

# 全国锅炉压力容器 标准化技术委员会 热交换器分技术委员会文件

热交换器分会（2017）13号

## 关于对 NB/T 47006《铝制板翅式热交换器》 行业标准征求意见的通知

各位委员及相关单位：

根据热交换器分技术委员会标准制修订工作计划，我分会已完成 NB/T 47006《铝制板翅式热交换器》行业标准征求意见稿。按照标准制修订程序，现将标准征求意见稿发送各位委员、会员及行业相关单位，敬请提出修改意见（按附件 1 格式填写），修改意见请于 2017 年 12 月 30 日前发送邮件或寄送我分技术委员会秘书处。

标准征求意见稿已发至各委员、会员单位电子信箱，也可在 [www.cscbpv.org.cn](http://www.cscbpv.org.cn) 或 [www.lanpec.com](http://www.lanpec.com) 网站下载。

热交换器分会秘书处通讯地址：

上海市金山区吕巷镇汇丰东大街 588 号，邮编：201518。

联系人：陈战杨，电话：021-51219888 转 83026；

赵 亮，电话：021-51219888 转 83026。

Email: [chenzhanyang@lanpec.com](mailto:chenzhanyang@lanpec.com), [zhaoliang@lanpec.com](mailto:zhaoliang@lanpec.com)。

附件 1：行业标准征求意见表。

二〇一七年十一月九日



主题词：铝制板翅式热交换器      标准      意见征求

抄 报：全国锅炉压力容器标准化技术委员会

抄 送：热交换器分会委员、会员单位等

NB

中华人民共和国能源行业标准

NB/T 47006—××××  
代替 NB/T 47006-2009 (JB/T 4752)

铝制板翅式热交换器

Aluminum plate-fin heat exchangers

(征求意见稿)

××××-××-××发布

××××-××-××实施

国家能源局发布

# 目 录

1. 范围 .....	4
2. 规范性引用文件 .....	4
3. 术语和定义 .....	5
4. 通用要求 .....	10
5. 材料 .....	12
6. 设计 .....	14
7. 制造、检验与验收 .....	26
8. 安装与操作 .....	36
附录 A（资料性附录）热交换器型号的编制方法 .....	41
附录 B（资料性附录）与国外材料标准的对比 .....	<a href="#">42</a>
附录 C（规范性附录）翅片最高允许设计压力的确定 .....	<a href="#">43</a>
附录 D（资料性附录）封头典型结构的应力分析案例 .....	47
附录 E（资料性附录）钎焊工艺规程和钎焊工艺评定报告 .....	<a href="#">67</a>
附录 F（资料性附录）焊接接头型式 .....	<a href="#">69</a>
附录 G（规范性附录）干燥度测试 .....	<a href="#">72</a>
附录 H（规范性附录）热交换器气阻试验方法 .....	<a href="#">73</a>
附录 I（资料性附录）热交换器使用须知 .....	<a href="#">79</a>
参考文献 .....	83

## 前言

本标准按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

本标准是依据 GB/T 151—2014《热交换器》针对铝制板翅式热交换器产品制定的，指导铝制板翅式热交换器设计、制造、检验的行业标准。

本标准与 NB/T47006—2009《铝制板翅式热交换器》相比，主要变化如下：

——提高设计压力范围，由原来不大于 8.0MPa 提高到 10.0MPa；

——提高了开停车时冷却降温速率的要求。

——修改了氦质谱仪检漏的要求和检测方法。

——修改了附录 F 中常用焊接接头结构形式相关的内容，供设计及制造时参考选用。

本标准由全国锅炉压力容器标准化技术委员会（SAC/TC 262）提出并归口。

本标准起草单位：

本标准主要起草人：

本标准的历次版本发布情况为：

—— JB/TQ 258-76、JB/T 7261—1994、NB/T 47006—2009。

# 铝制板翅式热交换器

## 1 范围

1.1 本标准规定了铝制板翅式热交换器（以下简称热交换器）的设计、制造、检验、验收、安装、使用及维护等要求。

1.2 本标准适用于设计压力不大于 10.0MPa 的热交换器。设计压力大于 10.0MPa 的热交换器，在征得买方同意后，可参照本标准进行设计与制造。

1.3 本标准适用的设计温度范围为-269℃~200℃。

1.4 本标准适用于空气的分离与液化设备、天然气加工及液化、石油化工及机械动力装置等场合使用的热交换器。

1.5 对不能采用本标准确定的热交换器受压元件，根据 GB/T 150.1 的规定，允许用以下方法设计，但需经全国锅炉压力容器标准化技术委员会评定、认可。

a) 验证性实验分析（如实验应力分析、验证性液压试验）；

b) 用可比的已投入使用的结构进行对比经验设计；

c) 采用包括有限元法在内的应力分析计算和评定。

### 1.6 热交换器界定范围

a) 热交换器本体及其与外部管道的连接：

1) 焊接连接的第一道环向接头坡口端面；

2) 法兰连接的第一个法兰密封面；

3) 螺纹连接的第一个螺纹接头端面；

4) 专用连接件或管件连接的第一个密封面。

b) 非受压元件与受压元件的连接焊缝；

c) 直接连接在热交换器的非受压元件，如支座、吊耳、垫板等；

d) 直接安装在热交换器上的超压泄放装置。

## 2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 150.1-2011 压力容器 第 1 部分：通用要求

GB/T 150.2 压力容器 第 2 部分：材料

GB/T 150.3 压力容器 第 3 部分：设计

GB/T 150.4 压力容器 第 4 部分：制造、检验和验收

GB/T 151-2014 热交换器

GB/T 2624.1—2006 用安装在圆形截面管道中的差压装置测量满管流体流量 第 1 部分：一般原理和要求（GB/T 2624.1—2006，ISO 5167-1:2003，IDT）

GB/T 2624.2—2006 用安装在圆形截面管道中的差压装置测量满管流体流量 第 2 部分：孔板（GB/T 2624.2—2006，ISO 5167-2:2003，IDT）

GB/T 2624.3—2006 用安装在圆形截面管道中的差压装置测量满管流体流量 第 3 部分：喷嘴和文丘里喷嘴（GB/T 2624.3—2006，ISO 5167-3:2003，IDT）

GB/T 2624.4—2006 用安装在圆形截面管道中的差压装置测量满管流体流量 第 4 部分：文丘里管（GB/T 2624.4—2006，ISO 5167-4:2003，IDT）

GB/T 3198—2010 铝及铝合金箔

GB/T 3880.1—2012 一般工业用铝及铝合金板、带材 第 1 部分：一般要求

GB/T 3880.2—2012 一般工业用铝及铝合金板、带材 第 2 部分：力学性能

GB/T 3880.3—2012 一般工业用铝及铝合金板、带材 第 3 部分：尺寸偏差

GB/T 4436 铝及铝合金管材外形尺寸及允许偏差

GB/T 4437.1 铝及铝合金热挤压管 第1部分：无缝圆管  
 GB/T 6892—2015 一般工业用铝及铝合金挤压型材  
 GB/T 6893 铝及铝合金拉（轧）制无缝管  
 GB/T 13384 机电产品包装通用技术条件  
 GB/T 16474—2011 变形铝及铝合金牌号表示方法  
 GB/T 16475 变形铝及铝合金状态代号（GB/T 16475—2008，ISO 2107：2007，MOD）  
 NB/T 47013.2—2015 承压设备无损检测 第2部分：射线检测  
 NB/T 47013.3—2015 承压设备无损检测 第3部分：超声检测  
 NB/T 47013.5—2015 承压设备无损检测 第5部分：渗透检测  
 JB/T 4734—2002 铝制焊接容器  
 YS/T 69—2012 钎焊用铝及铝合金复合板  
 TSG 21—2016 固定式压力容器安全技术监察规程

### 3 术语和定义

GB/T 151—2014、JB/T 4734 界定的以及下列术语和定义适用于本标准。

#### 3.1

##### 板翅式热交换器 plate-fin heat exchanger

热交换器是由芯体、封头、接管及支座等附件组成。流体的每一层通道由翅片、隔板、封条组成，每层通道在特定方位上都设有流体的进出口，并用该流体的进出口封头分别包容该流体的每层进出口，然后在封头上焊接各自的对外连接接管而组成，图1为板翅式热交换器示意图。

#### 3.2

##### 芯体 core

芯体由各流体的通道按需要依次叠置、钎焊成一体。每个通道由隔板（或侧板）、翅片（或导流片）、封条等零件组成，图2为芯体基本结构示意图。

#### 3.3

##### 翅片 heat transfer fin

翅片是热交换器的主要传热元件，传热过程主要通过翅片热传导及翅片与流体之间的对流传热来完成。

##### 3.3.1

##### 翅片型式 fin type

翅片型式主要有平直型翅片、锯齿型翅片、人字型翅片、波纹型翅片等，其中平直型翅片、人字型翅片和波纹型可以根据需要打孔成为多孔型翅片。

##### 3.3.2

##### 开孔率 percentage of opening

多孔型翅片开孔后翅片表面面积的减少量与开孔前总表面面积的比率。

#### 3.4

##### 导流片 distributor fin

在进出口引导流体进入芯体的翅片，一般为多孔型翅片。

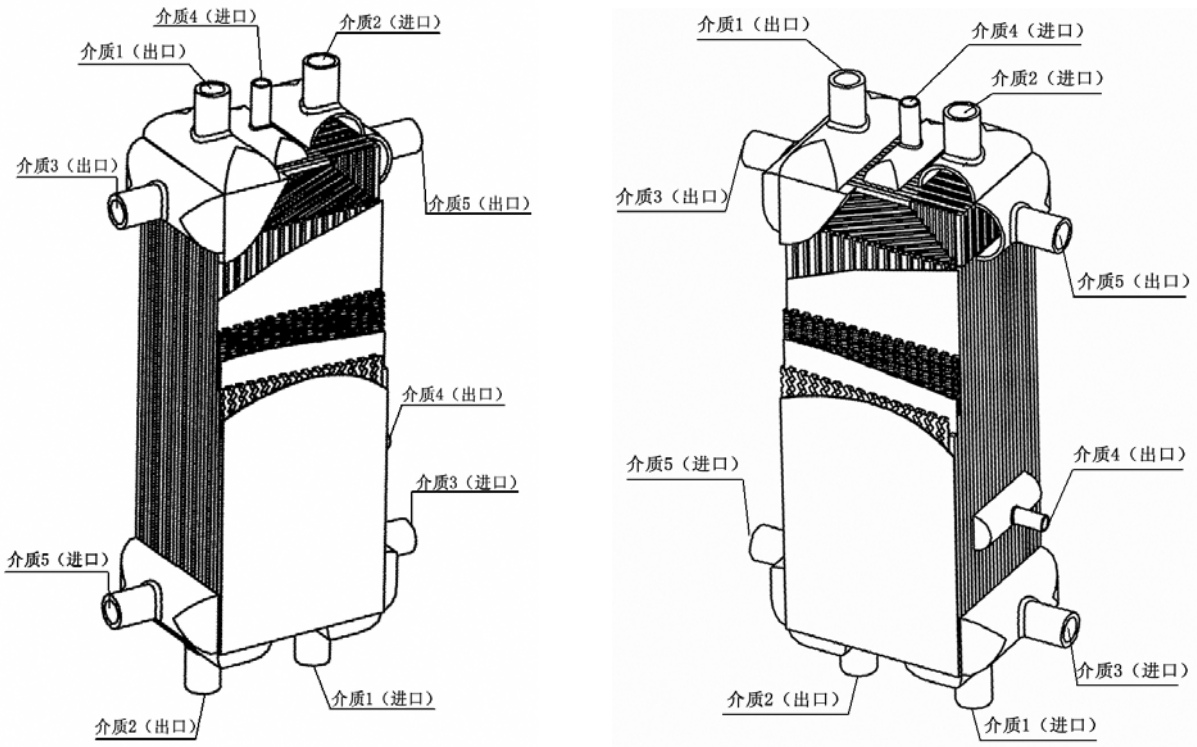


图 1 板翅式热交换器示意图

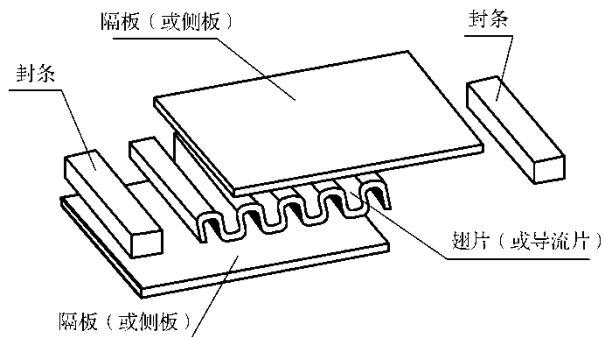


图 2 芯体基本结构示意图

### 3.5

**封条 side bar**

在热交换器中，起封闭和支撑各层通道作用的元件。

### 3.6

**隔板 parting sheet**

在热交换器中，分隔两层翅片之间流体的平板，钎焊时与翅片、封条焊接成一体。

### 3.7

**侧板 cap sheet**

位于热交换器芯体最外侧的盖板。

## 3.8

**强度层 dummy layer**

设置在芯体顶部和底部与环境大气相通，不进行热交换的通道层。强度层（又称工艺层）仅满足强度、热绝缘和制造工艺等要求。

## 3.9

**无用区域 dead area**

通道中和翅片或导流片相通或不相通的无介质流动的区域。

## 3.10

**通道排列 layer arrangement**

实现冷热介质换热所需要的流道排列方式，可分为单叠排列、复叠排列、混叠排列。

## 3.10.1

**单叠排列 single banking**

每一热通道都与一冷通道相邻排列，通道单叠排列示意图见图 3 a)。

## 3.10.2

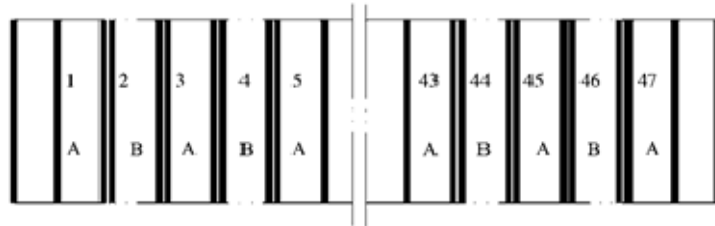
**复叠排列 double banking**

每一个热通道都与两个冷通道相间，或每一个冷通道和两个热通道相间，通道复叠排列示意图见图 3 b)。

## 3.10.3

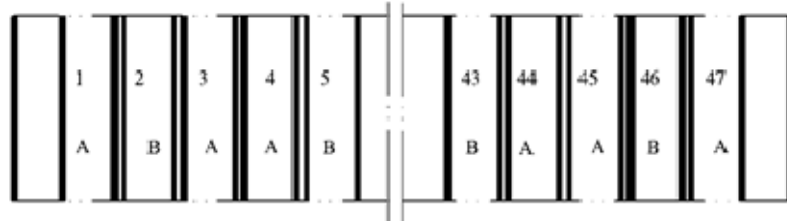
**混叠排列 single and multiple banking**

在同一芯体中除有热通道与冷通道相邻排列外，同时还存在一个热通道和两个冷通道相间或同时存在一个冷通道和两个热通道相间，通道混叠排列示意图见图 3 c)。



A—冷通道；B—热通道

a) 通道单叠排列示意图



A—冷通道；B—热通道

b) 通道复叠排列示意图

图 3 通道排列示意图



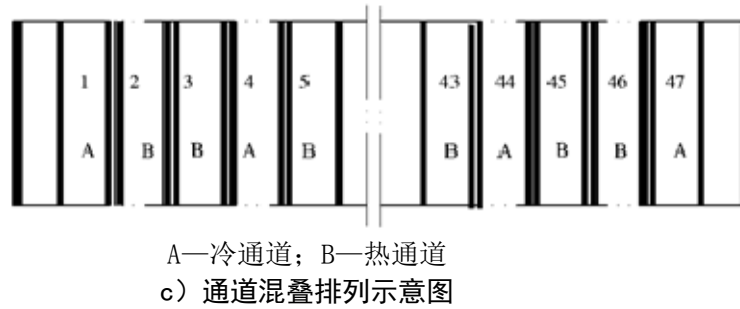


图3 通道排列示意图（续）

## 3.11

**封头 header**

封头通常由封头体、接管、端板或封瓦、法兰（或封盖）等零件经焊接而成。

## 3.11.1

**封头体 header body**

组成封头的半圆筒部分，又称封体。

## 3.11.2

**端板 header with ends**

半圆封头两端与封头体连接的板，又称封瓦或半圆板。

## 3.11.3

**接管 nozzle**

连接外部管路与封头的管子。

## 3.11.4

**封盖 nozzle cap**

试压或氮封时封闭接管的零件，又称闷盖。

## 3.12

**多芯体单元 composite block**

多芯体单元是指由两个或两个以上的芯体，通过并联焊接的方式连接成一体组成的芯体，图4为多芯体组成的热交换器单元结构图。

## 3.13

**热交换器组 manifolded exchanger**

热交换器组是由两台或两台以上的热交换器按不同的配管形式进行组合（并联或串联）而构成，如图5所示。

## 3.14

**传热面积 heat transfer area**

传热面积是指同一流体所有通道传热表面积之和，传热面积包括一次传热面积和二次传热面积。

## 3.14.1

一次传热面积 primary heat transfer surface

一次传热面积是指由隔板提供的传热表面积。

### 3.14.2

二次传热面积 secondary heat transfer surface

二次传热面积是指由翅片提供的传热表面积除去翅片与隔板直接焊接部分的表面积后的传热面积。

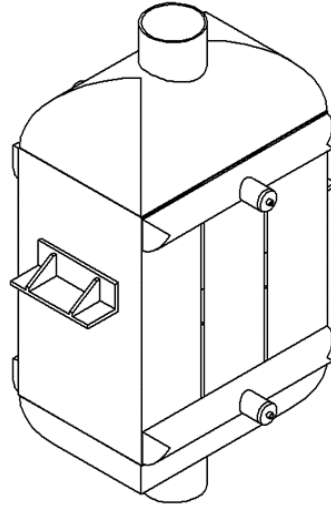


图4 多芯体组成的热交换器单元结构图

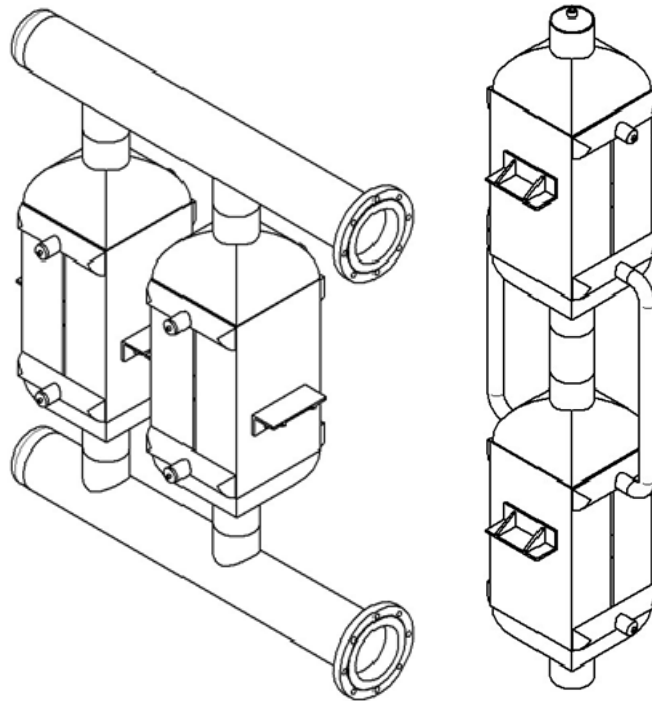


图5 热交换器组的构成示意图

### 3.15

**当量直径** equivalent diameter

将非圆形通道尺寸按水力半径相等的原则换算而得到的圆管直径。

## 4 通用要求

### 4.1 通则

热交换器的设计、制造、检验、验收、安装、使用和维护除符合本标准的规定外，还应遵守需方同意或是其指定的有关标准规范和法规，且应符合图样要求。本标准的符合性声明参见 GB/T 151-2014 附录 A 的规定。

### 4.2 一般规定

#### 4.2.1 压力

4.2.1.1 热交换器是由数个压力通道（相等或不等）组成。各通道按操作时可能出现的危险工况分别确定各自的设计压力。

4.2.1.2 每一个通道的设计压力应不低于该通道的最高工作压力。

4.2.1.3 热交换器按外压设计时，应考虑在正常工作情况下可能出现的最大内外压力差。

4.2.1.4 热交换器工作在真空状态时，其真空通道的设计压力按承受外压考虑，当设置有安全控制装置时，设计压力取 1.25 倍的最大内外压力差或 0.1MPa 两者的小值；当无安全控制装置时，取 0.1MPa。

4.2.1.5 设计压力不应高于由爆破试验确定的翅片芯体的最高允许工作压力。

#### 4.2.2 温度

4.2.2.1 内部热应力的增加应不超过材料的强度极限，在可接受的限度之内，稳定状态下的铝制热交换器通道之间（同一截面）的最大推荐允许温差为 50℃；但在有相变流体以及有在瞬间循环的条件下，推荐温差为 20℃~30℃。

4.2.2.2 设计温度应不低于元件金属在工作状态可能达到的最高温度。对于 0℃ 以下的金属温度，设计温度最低为 -269℃。

4.2.2.3 热交换器各部分在工作状态下的金属温度不同时，按最高温度设计。在任何情况下，元件金属的表面温度不应超过材料的允许使用温度。

4.2.2.4 元件的金属温度可用传热计算求得，或在已使用的同种工况的热交换器上测定，或按介质温度确定。对不同工况的热交换器，应在图样或相应技术条件中注明各工况的压力和温度值。

#### 4.2.3 流体介质

流体介质应洁净，且对铝合金无腐蚀作用。

#### 4.2.4 型号规定

热交换器型号的编制方法参见附录 A。

#### 4.2.5 载荷

设计时应考虑以下载荷：

- a) 内压、外压或最大压差；
- b) 液体液柱静压力；

- c) 热交换器的自重，以及正常工作条件下或压力试验状态下内装物料的重力载荷；
- d) 附属设备及隔热材料、管道等的重力载荷；
- e) 风载荷、地震载荷；
- f) 支座、支耳及其他型式支撑的反作用力；
- g) 连接管道和其他部件的作用力；
- h) 温度梯度或热膨胀量不同引起的作用力；
- i) 包括压力急剧波动的冲击载荷；
- j) 冲击反力，如由流体冲击引起的反力等；
- k) 运输或吊装时的作用力。

#### 4.2.6 铝材厚度附加量

铝材厚度附加量按式（4-1）确定：

$$C = C_1 + C_2 \quad (4-1)$$

式中：

C —— 铝材厚度附加量，mm；

C<sub>1</sub> —— 铝材厚度负偏差，按照 GB/T 3880.3 和 GB/T 4436 的规定，mm；

C<sub>2</sub> —— 腐蚀裕量，按 4.2.3 的规定，C<sub>2</sub>=0。

#### 4.3 焊接接头系数

4.3.1 焊接接头系数  $\phi$  应根据焊接方法和受压元件的焊接接头型式及无损检测的长度比例确定。

4.3.2 热交换器的焊接接头系数确定如下：

a) 双面焊对接接头和相当于双面焊的全焊透对接接头：

100%无损检测  $\phi = 0.95$ ；

局部无损检测  $\phi = 0.85$ 。

b) 单面焊对接接头（沿焊缝根部全长有紧贴基本金属的垫板）：

100%无损检测  $\phi = 0.90$ ；

局部无损检测  $\phi = 0.80$ 。

由于结构原因，焊接接头无法进行无损检测时，焊接接头应采用全焊透结构，其焊接接头系数一般不大于 0.6。

#### 4.4 耐压试验

##### 4.4.1 耐压试验压力

耐压试验压力的最低值按下述规定，试验压力的上限应满足 6.1.8.2 应力校核的限制。

##### 4.4.1.1 内压通道

a) 液压试验压力：

$$p_T = 1.3p \times \frac{[\sigma]}{[\sigma]^t} \quad \dots \dots \dots (4-2)$$

b) 气压试验或气液组合试验压力：

$$p_T = 1.25p \times \frac{[\sigma]}{[\sigma]^t} \quad \dots \dots \dots (4-3)$$

c) 气密性试验压力:

$$p_T = 1.0p \quad \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (4-4)$$

式中:

$p_T$  —— 试验压力, MPa;

$p$  —— 设计压力, MPa;

$[\sigma]$  —— 热交换器用材料在耐压试验温度下的许用应力, MPa;

$[\sigma]^t$  —— 热交换器用材料在设计温度下的许用应力, MPa。

注 1: 热交换器铭牌上规定有最大允许工作压力时, 式中应以最大允许工作压力代替设计压力  $p$ 。

注 2: 热交换器各元件所用材料不同时, 应取各元件材料的  $[\sigma]/[\sigma]^t$  比值最小者。

#### 4.4.1.2 外压通道

液压试验压力:

$$p_T = 1.3p \quad \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (4-5)$$

气压试验或气液组合试验压力:

$$p_T = 1.25p \quad \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (4-6)$$

式中:

$p_T$  —— 试验压力, MPa;

$p$  —— 设计压力, MPa;

#### 4.4.1.3 有特殊要求的压力试验

承受交变载荷以及在特殊场合使用的热交换器, 其液压试验压力应适当提高, 具体要求按照图样规定执行。

### 4.5 图样

制造厂应提供板翅式换热器的总图以供审核。总图至少应包含以下信息:

- a) 项目代号;
- b) 最大允许工作压力, 设计压力 (设备若在真空状态下工作, 则还须包括真空度), 试验压力, 最高设计温度, 最低设计金属温度, 板翅式热交换器的检验或操作的限制条件;
- c) 板翅式换热器外形尺寸及支座位置;
- d) 板翅式换热器所有的尺寸标注;
- e) 所选用翅片的型式;
- f) 安全与性能检验项目;
- g) 板翅式换热器的质量, 包括净重和带液重;
- h) 板翅式换热器分别在空置与工作条件下的重心;
- i) 所有零部件的材料规格;
- j) 接管等设备连接处所允许的力和力矩;
- k) 所有接管的尺寸、法兰等级与法兰密封面形式、位置、方向、流体方向;
- l) 相应的设计规范。

## 5 材料

### 5.1 一般要求

5.1.1 热交换器用铝材应考虑使用条件（如设计温度、设计压力、介质特性及操作特点等）、热交换器的制造工艺与检验要求以及经济合理性等因素，并应具有良好的耐蚀性能、力学性能、焊接性能、成形性能及其他工艺性能和物理性能。

5.1.2 热交换器的封头、接管、法兰、封条和侧板等受压元件用铝材应附有生产单位的铝材质量证明书原件，热交换器制造单位应按照铝材质量证明书对铝材进行验收，必要时还应进行复验。如无铝材生产单位的铝材质量证明书原件时，则应按 TSG 21—2016 中 2.1 的规定执行。

5.1.3 设计温度大于 65℃时，不得选用含镁量大于 3%的铝合金。热交换器用铝材使用温度范围参见附录 B。

## 5.2 热交换器零部件

5.2.1 热交换器用铝材应按表 1 选用，同时可以参照 JB/T 4734、GB/T 3880、GB/T 6893、GB/T 4437.1 及 YS/T 69 的相关规定执行。采用本标准未列出的铝材时，应按照相应材料标准的规定执行。

5.2.2 热交换器用封头、接管、法兰、封条和侧板等受压元件铝材的许用应力值按表 1 的规定选取（部分超过设计温度范围的许用应力值按 JB/T 4734 的有关规定选取）或按相应标准提供的力学性能和安全系数计算确定；

5.2.3 热交换器用翅片、隔板等受压元件的许用应力，按 GB/T 3198、GB/T 3880.2 和 YS/T 69 标准规定的抗拉强度值除以 TSG 21—2016 规定的安全系数计算确定。

表 1 热交换器常用材料及其许用应力

部件	合金编号	状态	抗拉强度 R <sub>m</sub> (MPa)	规定非比例延伸强度 R <sub>p0.2</sub> (MPa)	许用应力[σ] (设计温度 -269~65℃)
翅片	3003	0	95	35	23
	3004	0	155	60	40
导流片	3003	0	95	35	23
	3004	0	155	60	40
封条	3003	H112	115	70	38
隔板	3003	H24	145	115	48
盖板	3003	0	95	35	23
封头	3003	0	95	35	23
		H112	100~115	40~70	28~38
	5052	0	165~170	65	43
		H112	170~190	70~80	46~53
5083	0	270~345	115	76	
	H112	260~275	110~125	73~83	
接管	3003	0	95	35	23
		H14	130	110	43
	5052	0	170	65	43
		H14	230	180	76
	5083	0	270~350	110	73
H32		280	200	93	
5086	0	240	95	60	
5454	0	215	85	54	
	H112				

表 1 热交换器常用材料及其许用应力（续）

部件	合金编号	状态	抗拉强度 Rm (MPa)	规定非比例延伸强 度 Rp0.2 (MPa)	许用应力 $[\sigma]$ (设计温度 -269~65℃)
接管	6061	T6	290	240	41
	6063	0 T6	$\leq 130$ 220	- 190	29
法兰	5083	H112	270	110	73
	6061	T6 模锻 T6 手工锻	260 240~255	240 220~230	41
支架	5052	0	165~170	65	43
		H112	170~190	70~80	43~46
	5083	0	270~345	115	76
		H112	260~275	110~125	73~83

注 1: 上述材料可以是复合材料, 如果采用复合材料, 其最高设计温度按照基体材料确定。  
注 2: 铝合金状态依据 GB/T 16475 的规定。  
注 3: 合金编号见 GB/T 16474-2011 变形铝及铝合金牌号表示方法。

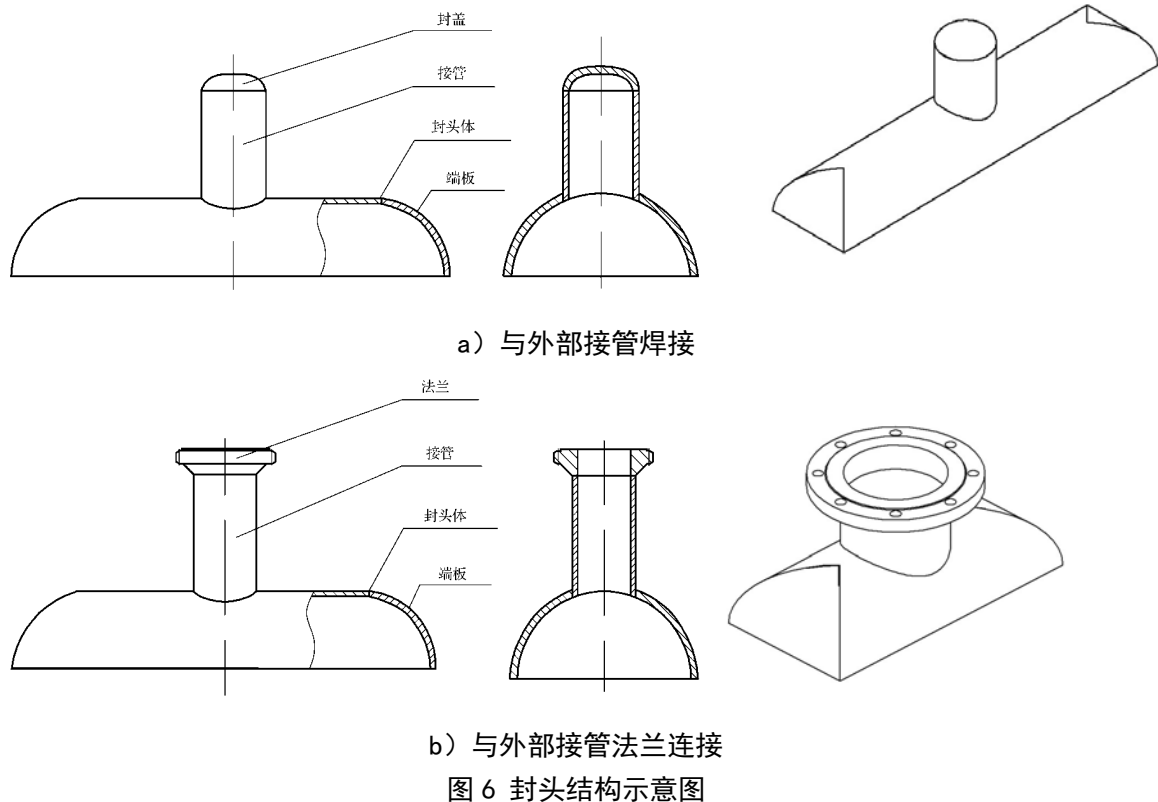
## 6 设计

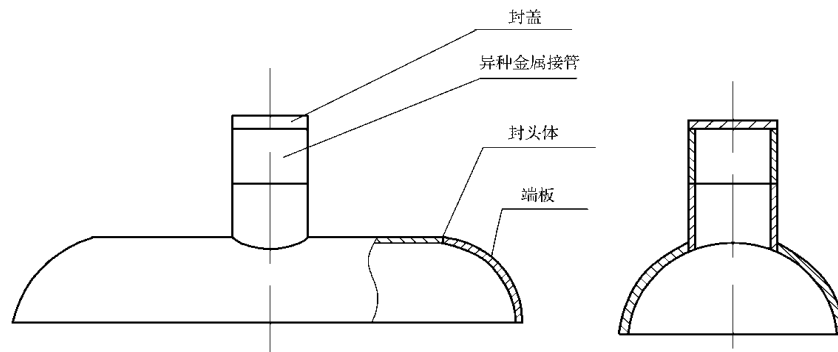
### 6.1 封头

6.1.1 封头的接管与外部铝合金管道连接时, 采用焊接结构, 见图 6 a)。

6.1.2 封头的接管与外部管道连接时, 采用法兰连接, 结构见图 6 b)。

6.1.3 封头的接管与外部异种金属管道 (不锈钢或铜) 连接时, 采用焊接结构, 见图 6 c)。

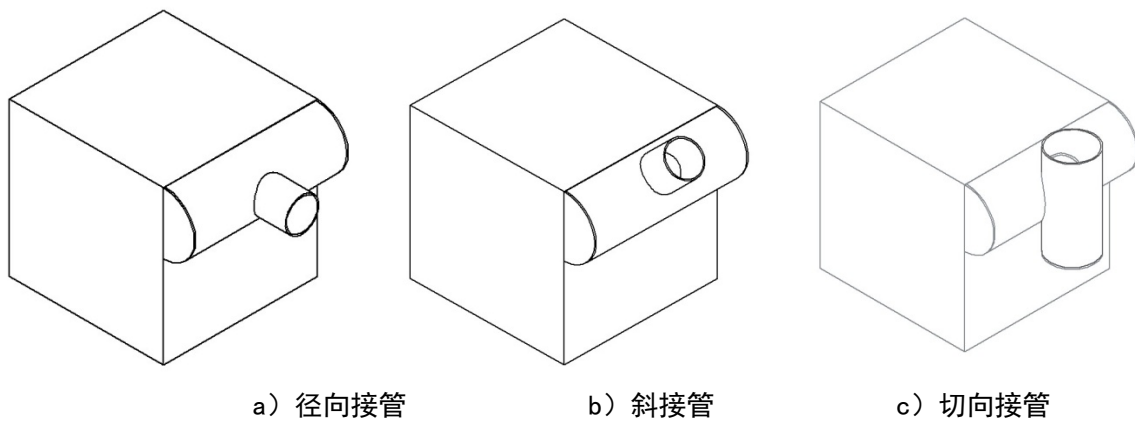




c) 与外部异种接管焊接

图 6 封头结构示意图 (续)

6.1.4 封头/接管的配置形式 (典型的配置图见图 7)。



a) 径向接管

b) 斜接管

c) 切向接管

图 7 典型的封头/接管形式

6.1.5 符号

- $B$  —— 组合式封头矩形底面横向宽度, mm;
- $C$  —— 壁厚附加量, mm;
- $D_i$  —— 半圆筒内直径, mm;
- $d_i$  —— 接管内直径, mm;
- $D_p$  —— 平板形端板计算直径, 圆形平板为内直径, 非圆形平板为短轴;
- $F$  —— 接管到封头与芯体连接处截面上所计算的合力, N;
- $F_r$  —— 接管到封头与芯体连接处截面上所允许的合力, N;
- $F_x$  —— 接管到封头与芯体连接处截面上 X 轴方向的分力, N;
- $F_y$  —— 接管到封头与芯体连接处截面上 Y 轴方向的分力, N;
- $F_z$  —— 接管到封头与芯体连接处截面上 Z 轴方向的分力, N;
- $h_1, h_2$  —— 板组合式封头折边高度, mm;
- $h$  —— 过渡短节高度, mm;
- $H$  —— 板组合式封头的高度, mm;
- $L$  —— 组合式封头矩形底面纵向宽度, mm;
- $M$  —— 接管到封头与芯体连接处截面上所计算的合力矩, N·m;



- $M_t$  —— 接管到封头与芯体连接处截面上所允许的合力矩,  $N \cdot m$ ;
- $M_x$  —— 接管到封头与芯体连接处截面上 X 轴方向的分力矩,  $N \cdot m$ ;
- $M_y$  —— 接管到封头与芯体连接处截面上 Y 轴方向的分力矩,  $N \cdot m$ ;
- $M_z$  —— 接管到封头与芯体连接处截面上 Z 轴方向的分力矩,  $N \cdot m$ ;
- $p$  —— 设计压力, MPa;
- $R_i$  —— 封头体内半径, mm;
- $R_p$  —— 平板形端板计算半径, mm;
- $\delta_p$  —— 平板形端板厚度 (包括壁厚附加量), mm;
- $\alpha$  —— 斜平板形端板的倾角,  $45^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ , 见图 10 所示;
- $\delta$  —— 封头体壁厚, mm;
- $\phi$  —— 焊接接头系数;
- $[\sigma]^t$  —— 设计温度下材料的许用应力, MPa。

6.1.6 热交换器封头结构形式见图 8~图 11。

6.1.7 封头与芯体的连接结构

根据设计压力和封头厚度, 可采用图 12 的结构形式。

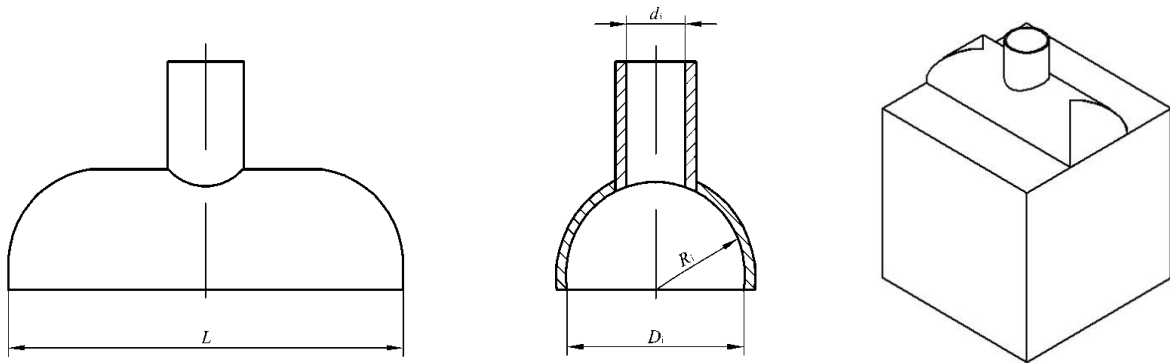


图 8 弧形端板封头示意图

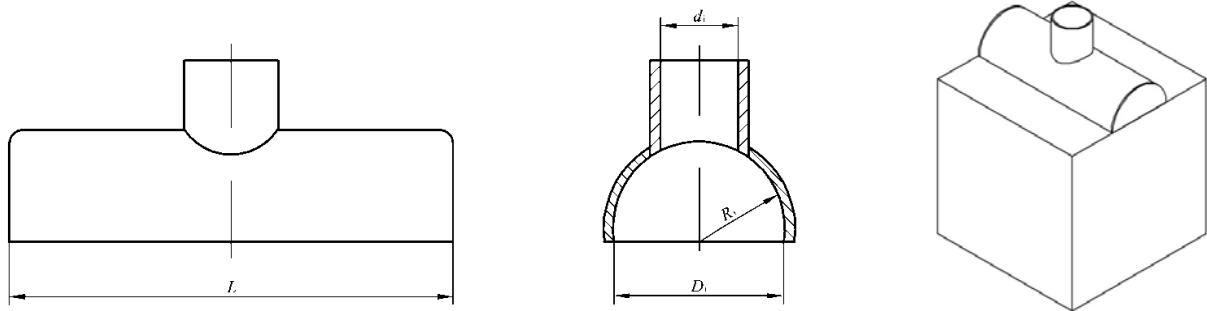


图 9 平板形端板封头示意图

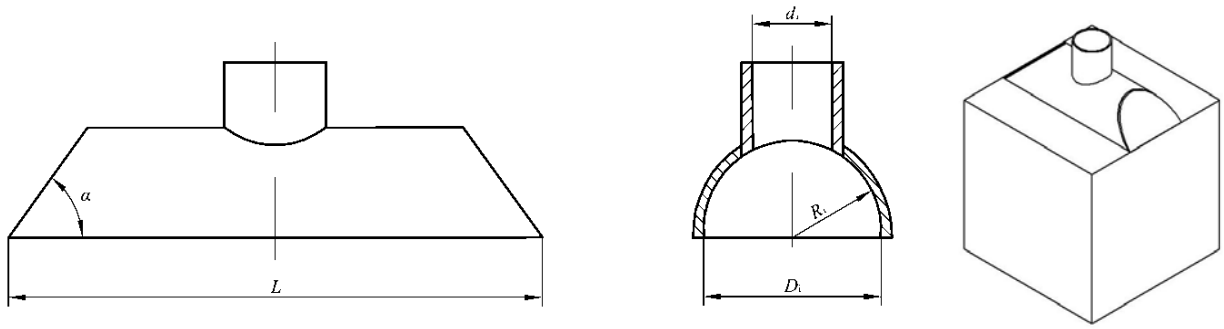


图 10 斜平板形端板封头示意图

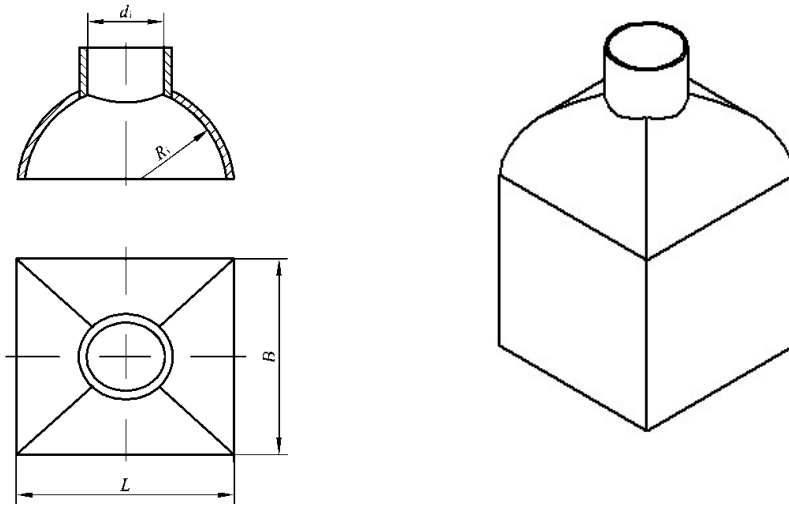
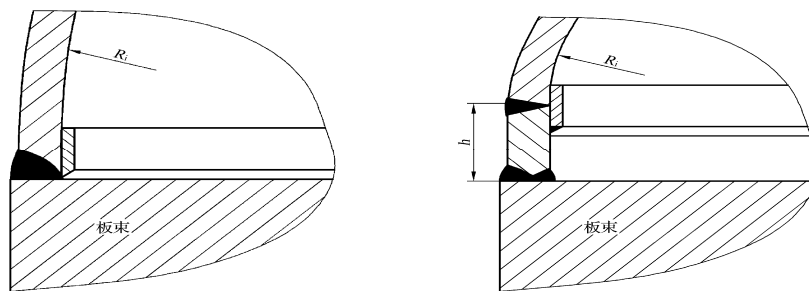


图 11 弧形端板组合式封头



a) 不带过渡板短节

b) 带过渡短节

图 12 封头与芯体连接（示意图）

6.1.8 壁厚计算与强度校核

6.1.8.1 端板及封头体的壁厚计算：

a) 当  $d_i/D_i \leq 0.5$  时（图 8~图 11），由式（6-1）计算：

$$\delta = \frac{pR_i}{[\sigma]^t \phi - 0.6p} + C \dots \dots \dots (6-1)$$

其中  $\phi = 0.6$ 。

b) 当  $d_i/D_i > 0.5$  时 (图 12), 可采用应力分析确定壁厚, 或采用有实践经验的公式计算壁厚, 否则应对每一设计尺寸按式 (6-2) 进行应力校核。

$$\sigma_T = \frac{p_T(R_i + 0.5\delta_e)}{\delta_e} \dots \dots \dots (6-2)$$

式中:

$\sigma_T$  —— 试验压力下圆筒的应力, MPa;

$R_i$  —— 圆筒内直半径, mm;

$p_T$  —— 试验压力, MPa;

$\delta_e$  —— 圆筒的有效厚度, mm。

$\sigma_T$  应满足下列条件:

液压试验时:

$$\sigma_T \leq 0.9\phi R_{0.2}$$

气压试验时:

$$\sigma_T \leq 0.8\phi R_{0.2}$$

式中:

$R_{0.2}$  —— 圆筒材料在试验温度下的规定残余延伸应力, MPa;

$\phi$  —— 圆筒的焊接接头系数。

6.1.8.2 平板形端板的壁厚计算:

当需采用平板形端板时, 其结构可按图 13 选用。

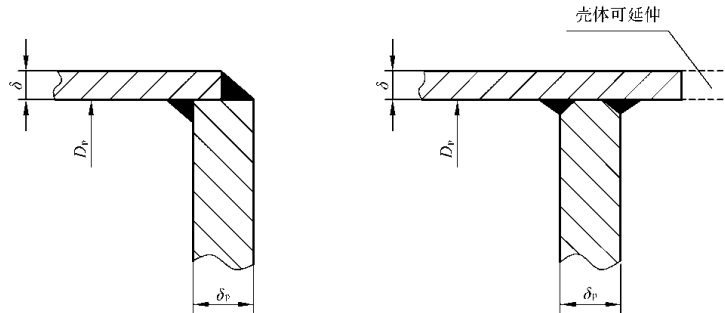


图 13 常用平板形端板结构示意图

圆形平板最小厚度按式 (6-3) 计算:

$$\delta_p = D_p \sqrt{\frac{0.44p}{[\sigma]^t} + C} \dots \dots \dots (6-3)$$

半圆形平板最小厚度按式 (6-4) 计算:

$$\delta_p = R_p \sqrt{\frac{0.44p}{[\sigma]^t \sin \alpha} + C} \dots \dots \dots (6-4)$$

其中:  $45^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ 。

6.2 侧板、隔板

### 6.2.1 侧板

侧板应和所配用的封头厚度相适应，侧板厚度一般为 3mm~6mm。

### 6.2.2 隔板

隔板厚度的选择应考虑压力引起的来自侧封条的拉应力。隔板厚度一般为 0.8mm~2.5mm，由设计者根据应力选取。

## 6.3 翅片、导流片

### 6.3.1 翅片

翅片高度、厚度及翅片节距一般为：

- a) 翅片高度  $h=2.5\text{mm}\sim 20.0\text{mm}$ ；
- b) 翅片材料厚度  $t=0.1\text{mm}\sim 0.6\text{mm}$ ；
- c) 翅片节距  $p=0.8\text{mm}\sim 4.2\text{mm}$ 。

翅片的最高允许设计压力按附录 C 确定，安全系数范围为 4~6，可根据使用场合选取。

6.3.1.1 翅片分为锯齿型、多孔型、平直型、波纹型等。具体结构如图 14 所示。

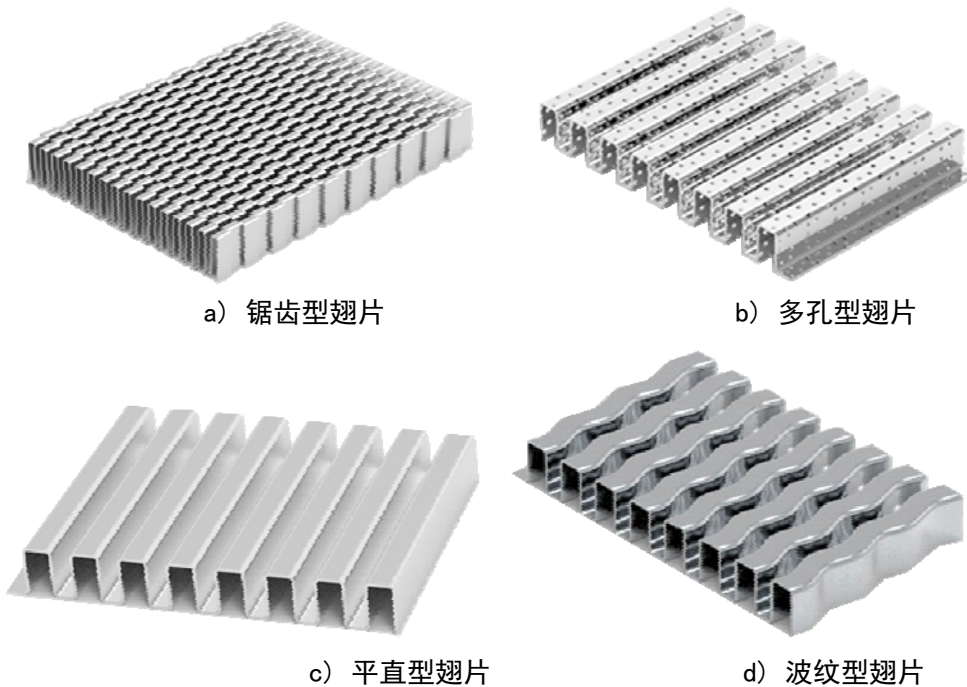


图 14 主要翅片类型

6.3.1.2 不同结构形式的翅片，根据高度 ( $h$ )、厚度 ( $t$ )、节距 ( $p$ ) 不同，可组成多种翅片规格尺寸，如图 15 所示。常用的规格尺寸见表 2~表 4。

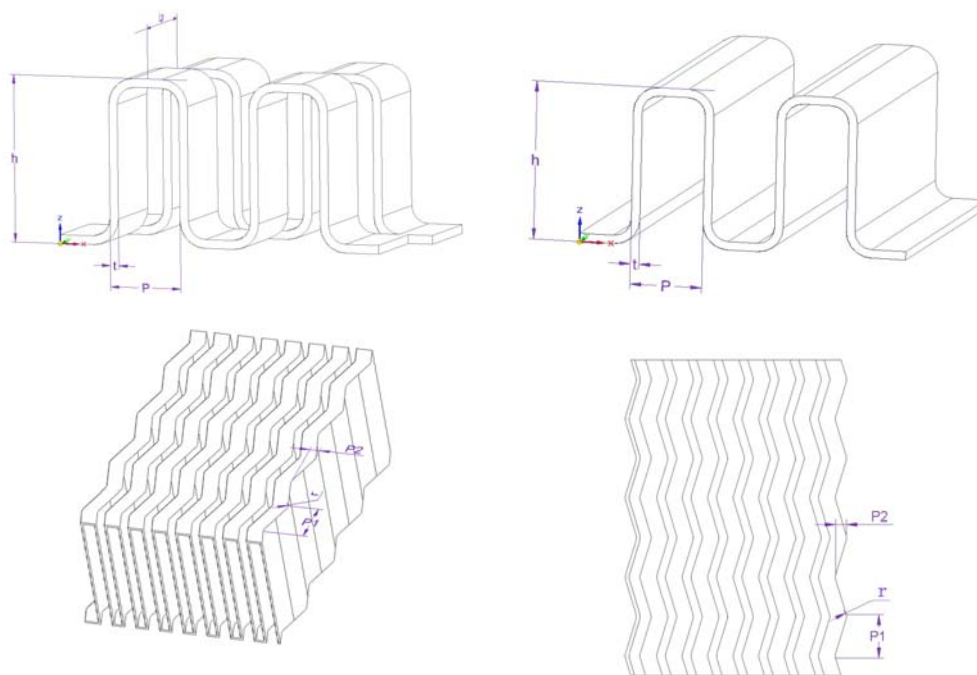


图 15 翅片尺寸定义

表 2 锯齿型翅片

翅高 $h$ , mm	翅距 $p$ , mm	翅厚 $t$ , mm	当量直径 $D_e$ , mm	通道截面积 $f_i$ , $m^2$	传热面积 $F_i$ , $m^2$	二次换热面积 所占比例
9.5	1.4	0.2	2.125	0.00797	15.0	0.886
9.5	1.7	0.2	2.583	0.00821	12.7	0.861
9.5	2.0	0.2	3.016	0.00837	11.1	0.838
6.5	1.7	0.3	2.284	0.00511	8.94	0.816
6.5	2.0	0.3	2.67	0.00527	7.9	0.785
4.7	2.0	0.3	2.45	0.00374	6.1	0.721
3.0	3.5	0.3	2.93	0.00247	3.37	0.458

注：选用锯齿型翅片时应注出锯齿齿长  $l_p$ 。

表 3 多孔型翅片、平直型翅片

翅高 $h$ , mm	翅距 $p$ , mm	翅厚 $t$ , mm	当量直径 $D_e$ , mm	通道截面积 $f_i$ , $m^2$	传热面积 $F_i$ , $m^2$	二次换热面积 所占比例
9.5	4.2	0.6	5.13	0.00763	5.95	0.712
9.5	2.0	0.3	2.87	0.00782	10.9	0.844
6.5	4.2	0.5	4.58	0.0053	4.62	0.619
6.5	2.0	0.6	2.263	0.00413	7.30	0.808

表3 多孔型翅片、平直型翅片（续）

翅高 $h$ , mm	翅距 $p$ , mm	翅厚 $t$ , mm	当量直径 $D_e$ , mm	通道截面积 $f_i$ , m <sup>2</sup>	传热面积 $F_i$ , m <sup>2</sup>	二次换热面积 所占比例
6.5	2.0	0.3	2.67	0.00527	7.9	0.785
6.5	1.7	0.3	2.284	0.00511	8.94	0.816
6.5	1.4	0.5	1.565	0.00386	9.857	0.87
4.7	4.2	0.5	3.934	0.0037	3.76	0.532
4.7	2.0	0.3	2.45	0.00374	6.1	0.721
3.0	4.2	0.5	2.984	0.0022	2.95	0.403

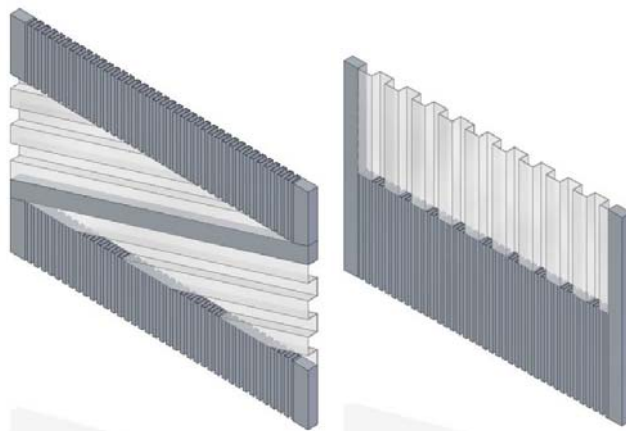
注：选用打孔翅片时应扣除开孔所占有的传热面（多孔型应注出开孔率）。

表4 波纹型翅片

翅高 $h$ , mm	翅距 $p$ , mm	翅厚 $t$ , mm	当量直径 $D_e$ , mm	通道截面积 $f_i$ , m <sup>2</sup>	传热面积 $F_i$ , m <sup>2</sup>	二次换热面积 所占比例
10.0	5.0	0.4	7.07	0.01075	6.08	0.676
9.5	3.0	0.3	4.17	0.00828	7.933	0.773
6.5	3.0	0.3	3.76	0.00558	5.933	0.697
4.7	2.5	0.3	2.933	0.00387	5.28	0.667

### 6.3.2 导流片

根据芯体的宽度及导流片在芯体内的开口位置和开口方向，导流片主要分为图 16 a) ~h) 所示的多种型式。



a) 通道侧面开口型导流片结构示意图      b) 通道敞开导流片结构示意图

图 16 部分导流片结构示意图

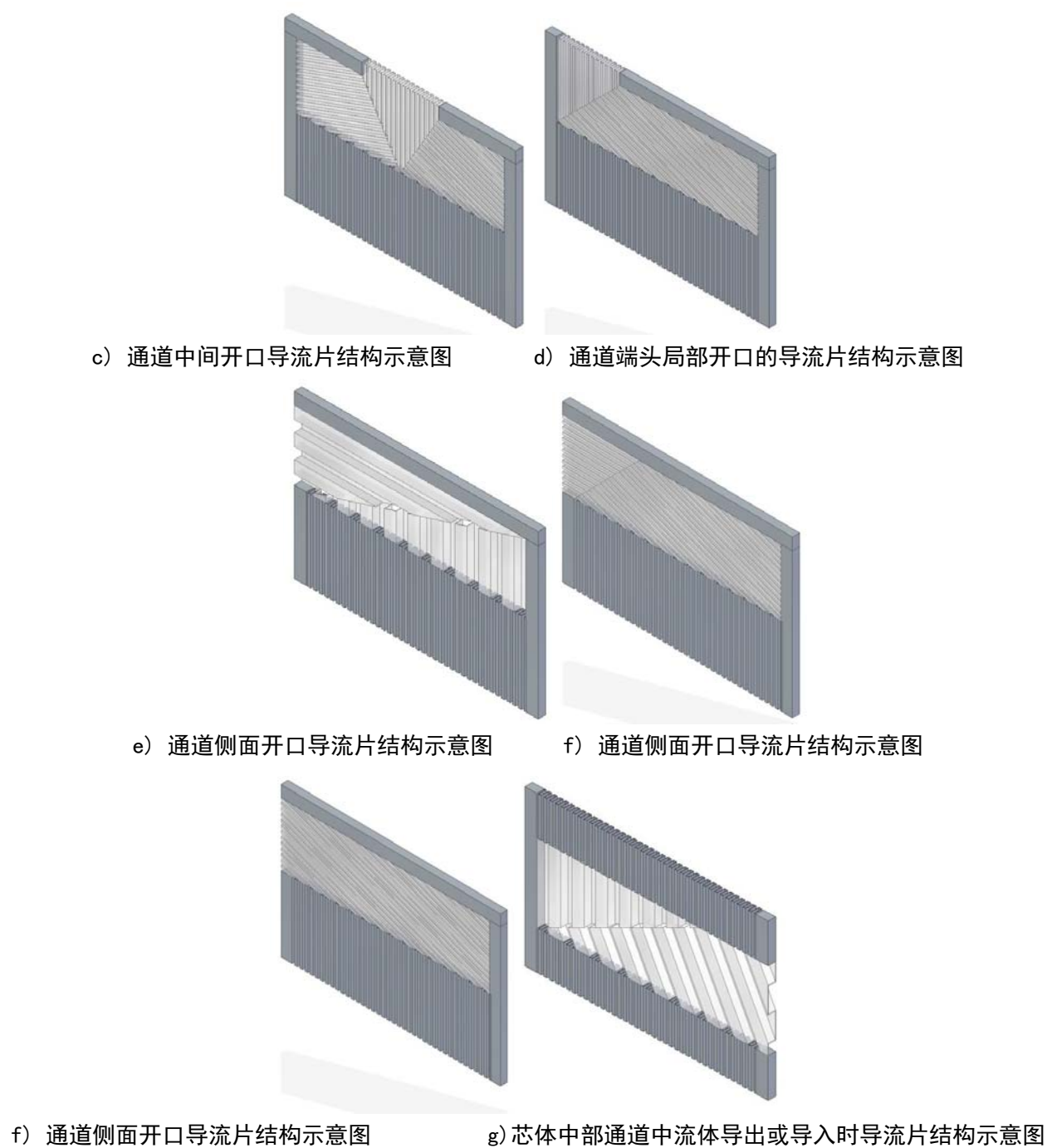
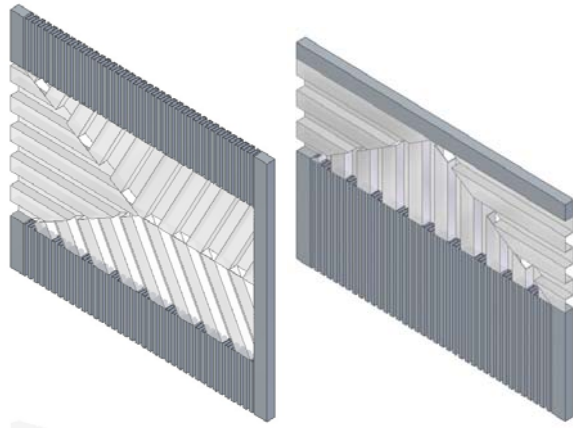


图 16 部分导流片结构示意图（续）

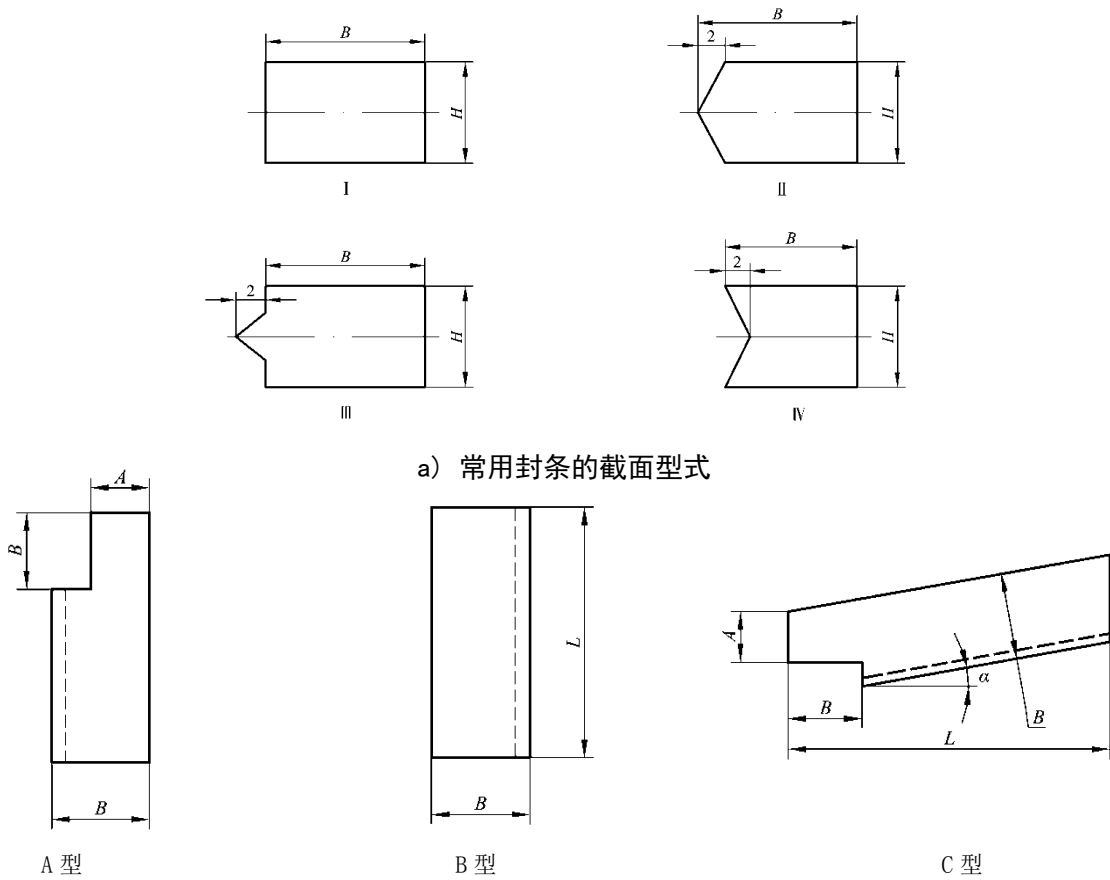


h) 芯体中部通道中流体导出或导入时导流片结构示意图      i) 芯体两侧开口导流片结构示意图

图 16 部分导流片结构示意图 (续)

### 6.4 封条

封条宽度可根据封头的壁厚及焊接的合理性选择。封条常用截面形式如图 17 a) 所示，常用端头形式如图 17 b) 所示。



a) 常用封条的截面型式

b) 封条端部接口型式 (以截面型式 IV 为例)

图 17 常用封条结构示意图

### 6.5 法兰



法兰的设计计算参照 GB/T 150.3 的有关规定执行。铝材的许用应力按照表 1 选取。

## 6.6 开孔和开孔补强

### 6.6.1 一般要求

6.6.1.1 本节规定适用于热交换器壳体和封头上开孔及其补强。开孔形状应为圆形，必要时可为椭圆形或长圆形。当为椭圆形和长圆形开孔时，其长径与短径之比不应大于 2，超过此值的开孔应采取特别的加强措施。

6.6.1.2 所有开孔应避免焊缝，开孔边缘与焊缝的距离应大于 3 倍壳体的实际壁厚，并不小于 60mm。若开孔需通过焊缝时，则开孔中心两侧各不小于 1.5 倍开孔直径范围内的焊缝须经 100% 无损检验。合格标准与壳体要求相同。

### 6.6.2 补强型式

筒体与封头的开孔补强应根据具体条件选用下列的补强型式。

#### 6.6.2.1 加补强圈的补强

用全焊透和局部焊透方法，将补强圈与壳体、接管相焊，如图 18 和图 19 所示，其开孔补强设计计算参照 GB/T 150.3 的有关规定执行。当采用图 18 的补强搭焊结构进行开孔补强时，应满足下列规定：

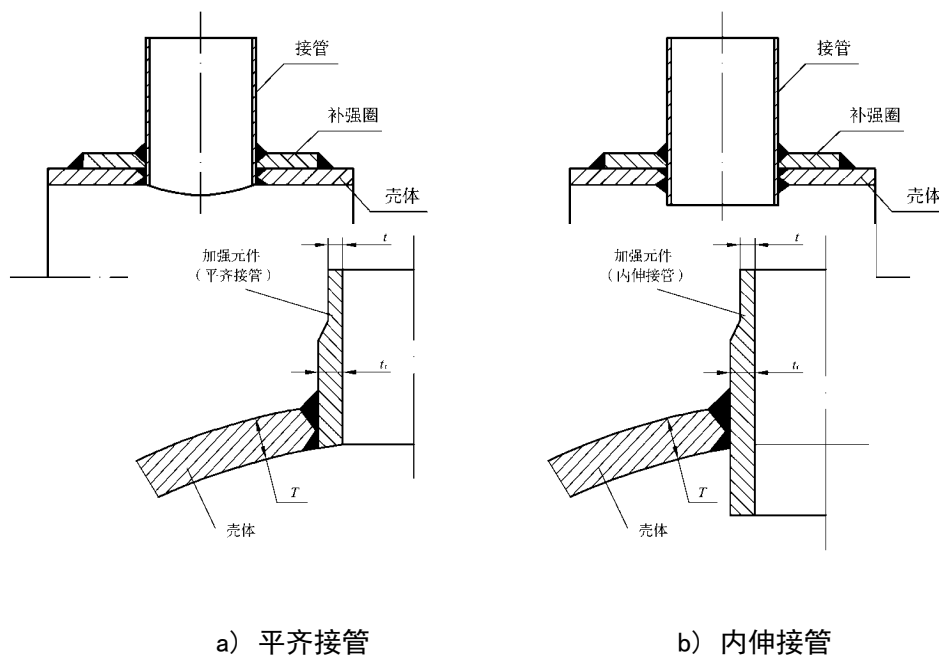


图 19 接管补强的开孔

- 外加补强件材料的许用应力值应等于或大于筒体或封头材料的许用应力值，若为后者，其增大大部分不得利用作为附加的补强面积；
- 当外加补强件材料的许用应力值小于筒体或封头部分材料的许用应力值时，所需补强的截面积须乘以两许用应力的反比值；
- 补强圈厚度不得大于 1.5 倍壳体厚度。

#### 6.6.2.2 接管补强

以全焊透方法将厚壁接管与壳体相焊，如图 19 所示，条件许可尽量以接管补强代替补强圈补强，尤其是筒体或球壳半径较小时。

### 6.6.2.3 翻边或凸颈补强

壳体或封头允许采用图 20 所示的结构形式，但开孔补强应通过应力分析计算。

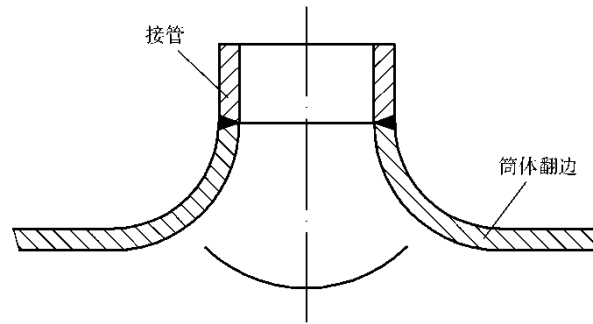


图 20 外翻边对焊接管

### 6.6.2.4 整体补强

整体补强应按照 JB/T 4734 的有关规定执行。

### 6.6.3 允许开孔的范围

开孔范围超出 GB/T 150.3 规定时，开孔的补强结构与计算应作特殊考虑。必要时应做验证性试验，以校核设计的可靠性，或用应力分析方法设计。典型结构的应力分析案例见附录 D。

## 6.7 翅片最高允许设计压力的确定

6.7.1 翅片结构的强度设计依据 GB/T 150.1-2011 附录 C 的规定；

6.7.2 当存在以下情况之一时，应通过爆破试验确定翅片、导流片的最高允许工作压力，试验方法按附录 C 的规定进行。

- a) 翅片材料发生变化时；
- b) 结构参数发生变化时；
- c) 加工工艺发生变化时。

## 6.8 接管

### 6.8.1 结构

接管一般与封头的圆筒形部分焊接在一起，其连接方式如图 7 所示，其结构设计应考虑以下内容：

- a) 接管一般选用标准无缝管或锻制管，较大的或特殊的接管可以采用焊接管材或板材制成；
- b) 如果为满足介质阻力，而接管的直径受到限制，可在同一封头上焊接几个接管；
- c) 为了防止或减少热交换器进出口处铝制构件的侵蚀，应考虑流速的极限；
- d) 热交换器接管外径小于 40mm 时，宜采用棒材加工成承插焊接接管的连接形式。对于切向接管，接管与封头之间的流通面积应不小于接管的横截面积。

### 6.8.2 接管安装

接管安装时，应确保各个压力腔中的流体排放彻底。需要时，可在封头或连接管道上增设排放接头

用于安装放净阀等。

### 6.8.3 接管载荷

当连接管道对热交换器的接管增加力与力矩时，制造厂应校核接管、封头等部件允许的最大力与力矩。

总的合力  $F$  与合力矩  $M$  按照式 (6-5) ~ (6-7) 计算确定：

$$M = \sqrt{M_x^2 + M_y^2 + M_z^2} \quad \dots \dots \dots (6-5)$$

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \quad \dots \dots \dots (6-6)$$

并且：

$$(M / M_r) + (F / F_r) \leq 1 \quad \dots \dots \dots (6-7)$$

三坐标轴的位置见图 21。

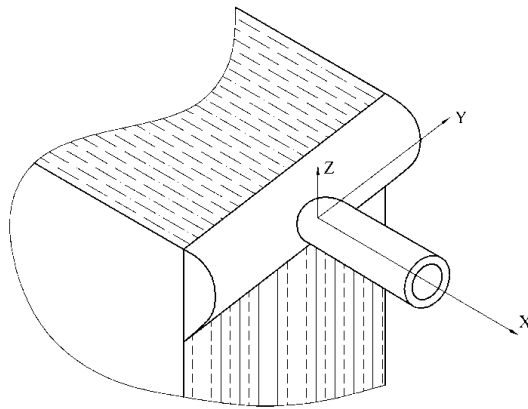


图 21 坐标轴的位置

## 7 制造、检验与验收

### 7.1 一般规定

7.1.1 热交换器的制造、检验与验收除遵守本章规定外，还应符合 GB/T 150.1、GB/T 150.4、GB/T 151 和 JB/T 4734 的有关规定及图样要求。

7.1.2 热交换器受压部分的焊接接头（钎焊缝除外），按其所在位置分为 A、B、C、D 四类，如图 22 所示：

- a) 封头、接管受压部分的纵向焊接接头均属 A 类焊接接头；
- b) 封头、接管受压部分的环向焊接接头及接管与法兰对接环向焊接接头等均属 B 类焊接接头；
- c) 接管与法兰的角焊接接头，接管与封盖、封头与端板、封头与芯体连接的焊接接头等均属 C 类焊接接头；
- d) 接管与封头连接的焊接接头、补强圈与封头连接的焊接接头等均属 D 类焊接接头。

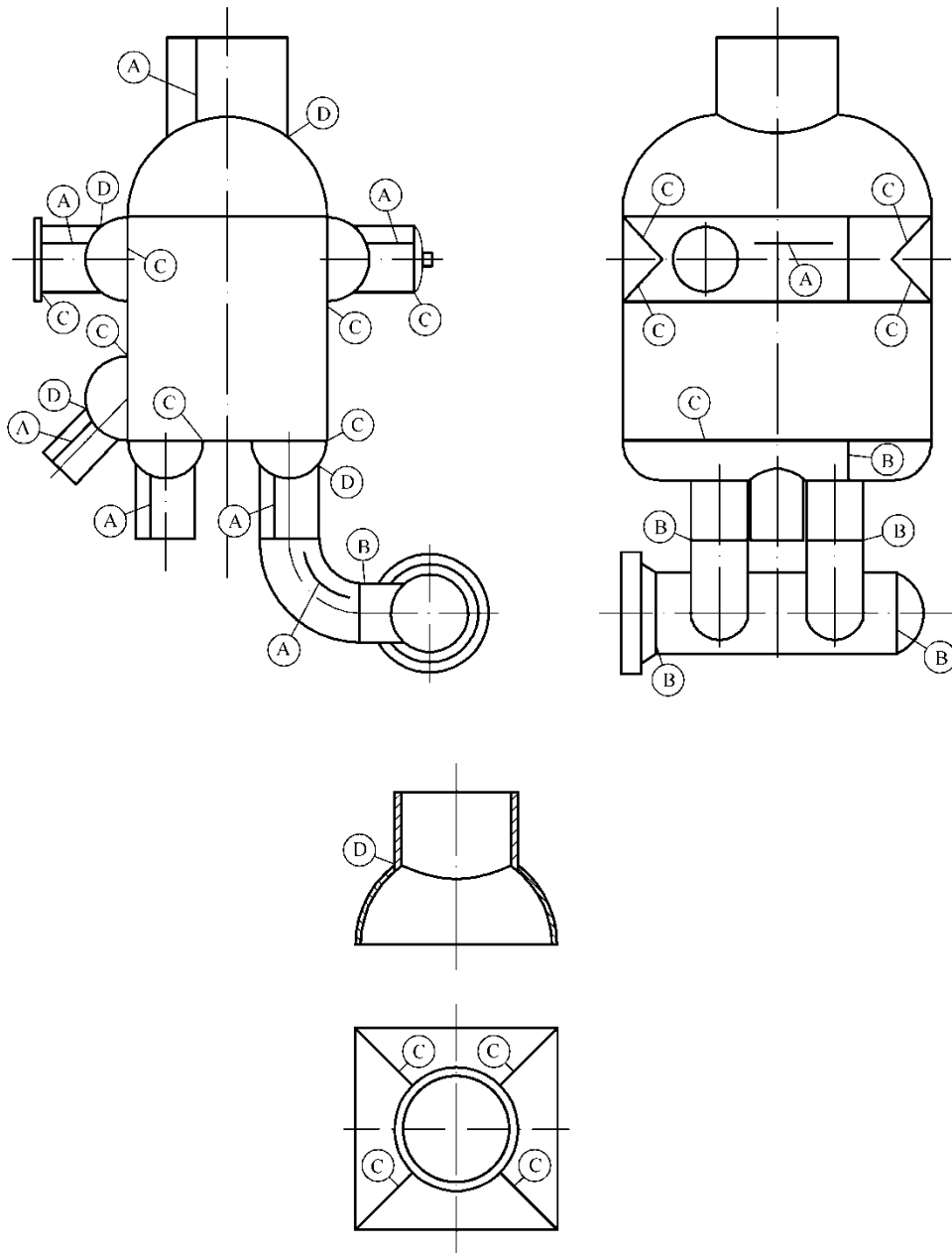


图 22 主要受压焊接接头类别示意图

## 7.2 芯体制造

### 7.2.1 组装要求：

- a) 钎焊元件的尺寸偏差和形位公差应符合图样或相关技术文件的要求；组装前不得有毛刺，且表面不得有严重磕、划、碰伤等缺陷；组装前应进行清洗，以除去油迹、锈斑等杂质，清洗后应进行干燥处理；
- b) 组装前的翅片和导流片的翅形应保持规整，不得被挤压、拉伸和扭曲；翅片、导流片和封条的几何形状有局部变形时，应进行整形；
- c) 隔板应保持平整，不得有弯曲、拱起、小角翘起和无包覆层的白边存在；板面上的局部凹印深度不得超过板厚的 10%，且最深不大于 0.15mm；
- d) 组装时每一层的钎焊元件应互相靠紧，但不得重叠。设计压力  $p \leq 2.5\text{MPa}$  时，钎焊元件的拼接间隙应不大于 3mm；设计压力  $p > 2.5\text{MPa}$  时，钎焊元件的拼接间隙应不大于 2mm。拼接间隙的特殊要求应在图样中注明。

### 7.2.2 钎焊

7.2.2.1 芯体应在钎焊炉内完成钎焊工作。

7.2.2.2 芯体钎焊前应具有评定合格的钎焊工艺支持，钎焊工艺指导书和钎焊工艺评定报告的推荐格式参见附录 E。

7.2.2.3 钎焊工艺评定技术档案应保存至该工艺评定失效。产品钎焊工艺及记录应至少保存 7 年。

### 7.2.3 芯体外观

钎焊后芯体应符合下列要求：

- a) 芯体焊缝应饱满平滑，不应有钎料堵塞通道现象；
- b) 导流片翅形应规整，不应露出于隔板之外；
- c) 相邻上下层封条间的内凹、外弹量不应超过 2mm；
- d) 芯体上下平面的错位量每 100mm 高不大于 1.5mm，且总错位量不大于 8mm；
- e) 当侧板的下凹总量超过芯体叠层总厚度的 1% 时，应对其使用性能和安全性能进行技术评估，并取得书面技术评估报告。

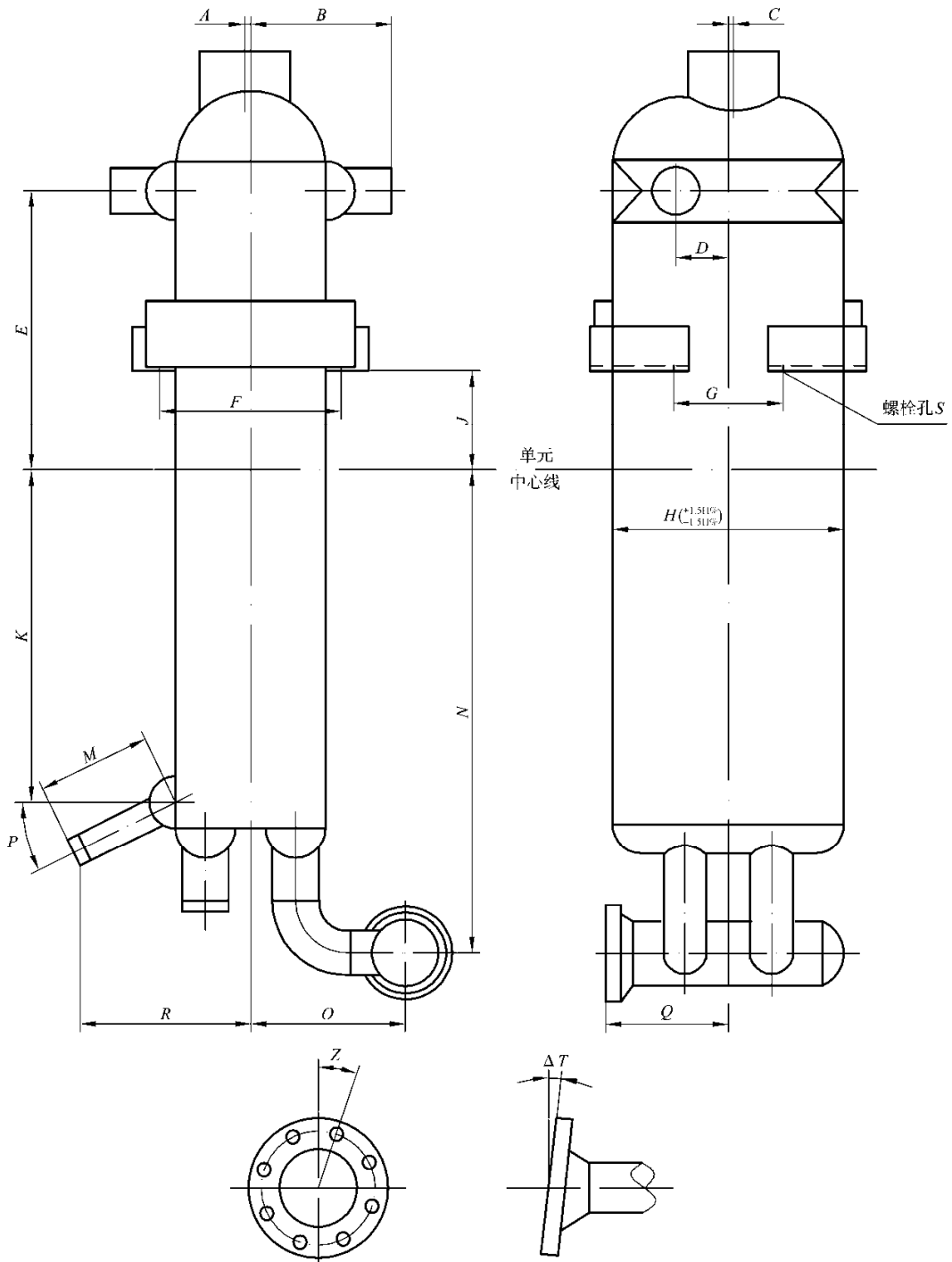
## 7.3 公差要求

7.3.1 热交换器接管的轴线位置和法兰面位置均以芯体各形面的几何轴线为基准，应在法兰平面和管端面进行检测。

7.3.2 热交换器组装后，应符合图 23～图 25 的规定，并应满足图样的要求。

7.3.3 管口或法兰面应垂直于接管或热交换器的主轴中心线，安装接管法兰应保证法兰面的水平或垂直（有特殊要求时应按图样规定），其偏差  $\Delta T$  不应超过图 23～图 25 的规定。

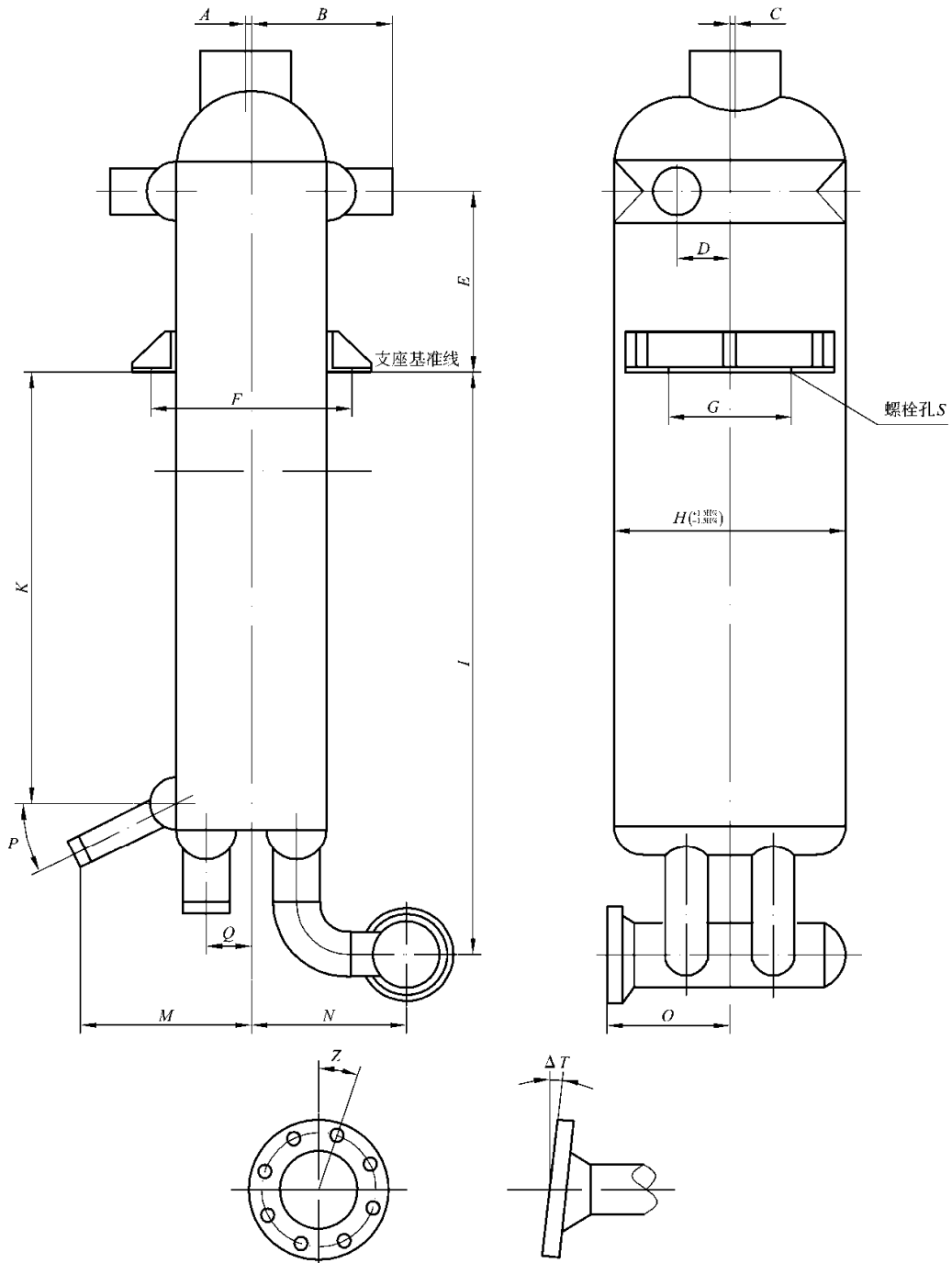
7.3.4 法兰螺栓孔应与接管轴线或铅垂线跨中布置，如图 23～图 25 所示。有特殊要求时，应在图样上注明。



mm

符号	基本尺寸	允许偏差	符号	允许偏差	符号	允许偏差
<i>B, E, K, N, Q, O</i>	$\leq 1000$	$\pm 6$	<i>A, C, D, M, R</i>	$\pm 6$	<i>P</i>	$\pm 3^\circ$
	$> 1000 \leq 2000$	$\pm 8$	<i>J, F, G</i>	$\pm 3$	$\Delta T$	$\pm 1^\circ$ 在法兰外径 $\max \leq 5$
	$> 2000$	$\pm 10$	<i>S</i>	$\pm 1$	<i>Z</i>	$\pm 1^\circ$ 在螺栓孔圆 $\max \leq 5$

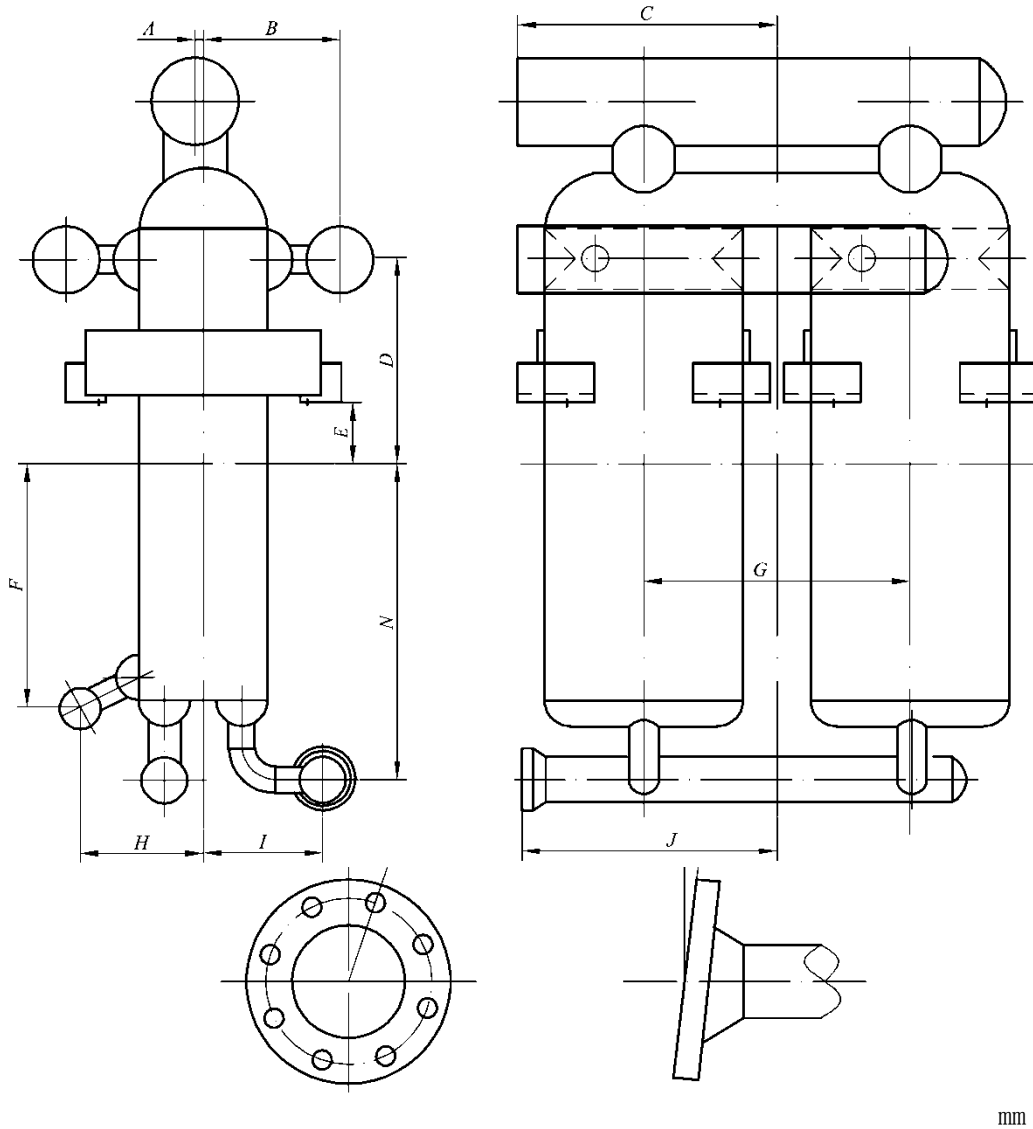
图 23 芯体中心线为基准线的公差示意图



mm

符号	基本尺寸	允许偏差	符号	允许偏差	符号	允许偏差
$B, I, K, E$	$\leq 1000$	$\pm 6$	$A, C, D, Q$	$\pm 6$	$P$	$\pm 3^\circ$
	$> 1000 \leq 2000$	$\pm 8$	$F, G$	$\pm 3$	$\Delta T$	$\pm 1^\circ$ 在法兰外径 $\max \leq 5$
$M, N, O$	$> 2000$	$\pm 10$	$S$	$\pm 1$	$Z$	$\pm 1^\circ$ 在螺栓孔圆 $\max \leq 5$

图 24 支座基线为基准线的公差示意图



mm

符号	基本尺寸	允许偏差	符号	允许偏差
$B, C, D,$	$\leq 1000$	$\pm 6$	$A$	$\pm 6$
$F, G, H$	$> 1000 \leq 2000$	$\pm 8$	$\Delta T$	$\pm 1^\circ$ 在法兰外径 $\max \leq 5$
$I, J, N$	$> 2000$	$\pm 10$	$Z$	$\pm 1^\circ$ 在螺栓孔圆 $\max \leq 5$
—	—	—	$E$	$\pm 3$

图 25 两台热交换器组装的公差示意图

7.3.5 单台热交换器外形尺寸的标准公差应按照图 23 和图 24 的规定，芯体中心线（见图 23）和支座基线（见图 24）作为外形尺寸的基准线。制造厂可使用其他的基准线。买方和制造厂双方同意后，可



采用其他的公差值。

7.3.6 两台热交换器组装的外形尺寸的标准公差应按照图 25 的规定,其支座基线也可作为外形尺寸的基准线。

7.3.7 图 23~图 25 中规定了法兰的尺寸公差要求。

#### 7.4 焊接(除钎焊外)

7.4.1 应根据介质温度和载荷条件选择焊接接头型式,选择焊接接头型式时应避免产生过大的应力集中和明显的外形突变,附录 F 提供了可供选择的焊接接头型式。

7.4.2 焊接工艺应符合下列规定:

- a) 热交换器施工前的焊接工艺评定应按 JB/T 4734-2002 的附录 B 进行。热交换器的焊接工艺文件应按图样技术要求和评定合格的焊接工艺并参照 JB/T 4734-2002 的附录 B 制订;
- b) 焊接接头表面的形状尺寸及外观要求、焊接接头返修要求应符合 JB/T 4734 的有关规定;
- c) 受压元件的 A、B、C、D 类焊接接头及钎焊缝的补焊应采用钨极氩弧焊、熔化极氩弧焊或采用通过试验可保证焊接质量的其他焊接方法,并应符合 JB/T 4734 的有关规定。

7.4.3 焊工应符合下列要求:

- a) 焊接应由持有技术监督部门颁发的相应类别焊工合格证的焊工担任,焊工考试按 JB/T 4734-2002 的附录 A 执行;
- b) 焊工识别标记应打在规定的容器部位,或者在焊接记录(含焊缝布置图)中记录焊工代号,不得在耐腐蚀面打钢印,焊接记录应列入产品质量证明文件。

#### 7.5 封头制造

成型后封头的壁厚减薄量不得大于图样规定厚度的 10%,且不大于 3mm。

#### 7.6 无损检测

7.6.1 封头和接管等受压元件的本体及其复合件的焊接接头的无损检测要求应符合 JB/T 4734 的规定。无损检测方法按照 NB/T47013 的规定。其对接接头应按 NB/T 47013.2 进行射线检测或 NB/T 47013.3 进行超声检测,无损检测合格级别应符合图样的要求。

7.6.2 封头和芯体的焊接接头,应采用全焊透结构。封头采用热处理提高材料机械强度时,应按 NB/T 47013.5 进行渗透检测,图样有要求的按照图样执行。

7.6.3 需在总装时完成的相邻封头之间的对接接头,对无法进行射线或超声检测的部位,应按 NB/T 47013.5 进行渗透检测, I 级合格。

7.6.4 当接管或法兰采用热处理提高材料机械强度时,接管和法兰焊接接头应按 NB/T 47013.5 进行渗透检测, I 级合格。

#### 7.7 试验、检验与验收

热交换器的检查和试验除根据项目要求在使用现场进行外,一般应在制造厂内进行。每台热交换器须经制造厂和第三方技术检验部门检验合格,并附有产品合格证方可出厂。试验方法按本标准附录 C、附录 G、附录 H 的规定进行。

##### 7.7.1 耐压试验

7.7.1.1 热交换器制造完成后,应进行耐压试验,耐压试验的项目和要求应在图样中注明。耐压试验应使用两个量程相同的并且经过检定合格的压力表。压力表的量程应在试验压力的 2 倍左右为宜,但不应

低于 1.5 倍和高于 3 倍的试验压力。压力表的精度不得低于 1.6 级，表盘直径不得小于 100mm。

7.7.1.2 耐压试验一般采用液压试验。液压试验一般应采用水作试验介质，水应是洁净对工件无腐蚀的。试验压力按 4.4.1 的规定。试验时，逐个通道进行，每一通道加压时，其余通道放空，检查要求按照图样规定。

7.7.1.3 对于不允许有微量残留液体或由于结构原因不能充满液体进行液压试验的热交换器，可采用气压试验或气液组合试验。气压试验或气液组合试验应满足 7.7.1.4 的要求。

7.7.1.4 气压试验应采用干燥无油洁净的空气、氮气或惰性气体作为试验介质，试验压力按 4.4.1 的规定。试验时，逐个通道进行，每一通道加压时，其余通道放空，检查要求按照图样规定。采用气压试验时，应要有可靠的防护措施，并由制造单位的安全管理部门应当制定应急预案。

## 7.7.2 泄漏试验

7.7.2.1 气密性试验应在热交换器的所有压力腔充分干燥合格后进行，气密性试验采用干燥无油洁净的空气、氮气或惰性气体作试验介质，试验压力为设计压力；试验时，对所有通道同时充压到各自规定压力值，逐个通道进行检查并符合图样要求。

7.7.2.2 氦质谱检漏试验应符合以下规定：

- a) 氦检漏应在强度、气密性检验合格后进行，热交换器应在氦检漏之前彻底干燥。
- b) 氦质谱检漏试验设备应选用合适精度的氦质谱检漏仪，并用标准漏孔定期对设备进行校准。
- c) 检测时氦气浓度不低于 20%。
- d) 外漏检测：将氦气罩（可用塑料薄膜制作）套在被测工件上，排除罩内的空气并向罩内充入氦气，被测通道抽真空至仪器的工作真空度，根据氦质谱检漏仪的读数，检测该通道内微量氦气的泄漏值。
- e) 内漏检测：被测通道抽真空至仪器的工作真空度，向被测通道的相邻通道充入氦气，压力不低于 0.1MPa，根据氦质谱检漏仪的读数，检测该通道内微量氦气的泄漏值。

热交换器允许漏率应满足设计文件要求。

## 7.7.3 气阻试验

7.7.3.1 气阻试验的试验条件和要求按本标准附录 H 或设计图样的规定。对空分设备中的切换热交换器的切换通道，除应检验其本身的阻力值外，还应满足两者之间相互阻力差的要求。换热交换器阻力差允许值应通过计算确定。

7.7.3.2 同一单元中（冷段或热段），两切换通道（A、B）的阻力偏差按式（7-1）计算。

$$(\Delta p_1 / \Delta p_2 - 1) \times 100\% \leq 8\% \quad (7-1)$$

式中：

$\Delta p_1$  —— A、B 通道中气阻值较大者（下同）；

$\Delta p_2$  —— A、B 通道中气阻值较小者（下同）。

7.7.3.3 冷、热段组合成一个小单元（含冷、热段串联的整体热交换器），小单元内两个切换通道总的阻力偏差按式（7-2）计算。

$$(\Delta p_1 / \Delta p_2 - 1) \times 100\% \leq 2.4\% \quad (7-2)$$

7.7.3.4 由若干个小单元组合成一个大单元后，该单元各通道的阻力值与相应通道的平均值的偏差按式（6-3）计算。

$$|(\Delta p_i / \Delta p_{cp} - 1) \times 100\%| \leq 4\% \quad (7-3)$$

式中：

$\Delta p_i$  —— 被测某一通道气阻值；

$\Delta p_{cp}$  —— 被测某一通道的平均阻力值，按式（6-4）计算。

$$\Delta p_{cp} = \left( \sum_{i=1}^N \Delta p_i / N \right) \quad (7-4)$$

式中：

$N$  —— 冷热段组合的小组数。

#### 7.7.4 荧光检验

在热交换器设计图样上或供货合同中有要求时需进行本项试验。可采用波长为 3200 Å~4000 Å 紫外线对该通道封头下面的热交换器表面、封头及接管的内侧进行荧光检验。

#### 7.8 返修

7.8.1 热交换器在制造过程中，如果发生与要求不一致时，则需要进行返修。制造厂需判断不一致的严重性，并根据合同要求确定买方是否参与处理。当合同无要求时，可以采用下述方法进行返修：

7.8.1.1 修正工作应遵照可靠的规程和工艺规范要求进行，应确保热交换器的性能和安全性不受影响，且不影响结构完整性。制造厂应作好不一致的文件记录，需要时应提供给买方。

7.8.1.2 应按照可靠的补焊工艺规程采用手工密封焊接，对钎焊缝泄漏进行修正。

7.8.1.3 当隔板穿通，导致通道相互间内漏时，应由设计部门确定应该采取的纠正方法。一般可封闭某一通道，并作出封闭通道对热交换器性能和压力降影响程度的报告。

7.8.2 在不影响产品的使用性能和寿命的情况下，热交换器表面允许存在缺陷，但封头和接管的缺陷深度不得大于 0.3mm；芯体的缺陷深度不得大于 0.5mm。

7.8.3 应对封头和接管上的尖锐伤痕以及局部伤痕、刻槽等缺陷予以修磨，修磨范围的斜度至少为 1:3。修磨的深度应不大于该部位铝材厚度  $\delta_s$  的 5% 且不大于 2mm，否则应予焊补。

7.8.4 补焊应符合下列规定：

7.8.4.1 试压后发现焊缝有渗漏或无损检测不合格时，允许进行返修补焊。补焊时制造厂应制订补焊工艺规范，但同一部位补焊次数一般不得超过 2 次，超过 2 次以上时，返修前应当经过制造单位技术负责人批准，并且将返修的次数、部位、返修情况记入压力容器质量证明文件。

7.8.4.2 补焊前应铲除缺陷部位的金属，并将焊接区重新清理，且不得带压施焊。

7.8.4.3 对于空分设备中的切换热交换器、主热交换器、冷凝蒸发器和设计压力大于 2.5MPa 的热交换器，钎焊缝允许的补焊长度不得大于外露隔板（包括封头内）总长度的 0.5%；对于其他热交换器，钎焊缝允许的补焊长度不得大于外露隔板（包括封头内）总长度的 1.5%。当补焊比例超过以上规定时，应由原设计单位对使用性能和安全性影响作出评估，并取得书面评估报告。

#### 7.9 质量证明书、标志、油漆、运输包装和贮存

##### 7.9.1 出厂准备工作

7.9.1.1 产品外表面应去除油污、脏物，以保持干净。涂漆和其他防腐处理应符合设计图样和有关技术文件的规定。

7.9.1.2 运输之前，制造厂应确保热交换器所有压力腔充分干燥，具体要求按附录 C 的规定进行。

7.9.1.3 法兰所有外露加工接触面均应加以适当的保护，以防止机械损伤，尤其是法兰密封面。

7.9.1.4 强度层及无用区域的开口以及封闭的无用区域的开口应加适当保护，以防止水分、灰尘侵入。

7.9.1.5 氮气密封应符合下列规定：

- a) 经干燥合格后的热交换器压力腔应充入干燥无油氮气进行置换并氮封，氮封压力一般为 0.025MPa~0.05MPa，特殊要求按设计图样和有关技术文件的规定；
- b) 氮封后应在管口处贴上压力警告标志，启封前应将压力腔卸压；
- c) 对于无法进行氮封或供需双方同意不进行氮封的热交换器，应采用塑料薄膜包装并放置干燥剂或吸湿剂。

7.9.2 热交换器出厂质量证明文件应至少包括下列内容：

- a) 产品合格证；
- b) 产品说明书；
- c) 产品质量证明书。

7.9.3 铭牌安装应符合下列规定：

- a) 每台热交换器都应安装有制造厂的铭牌，铭牌应安装在热交换器就位后容易接近的明显位置；铭牌应清晰、牢固、耐久。
- b) 铭牌宜采用合适材料制成，如买方允许，铭牌可以安装在热交换器的托架上。如果热交换器要安装在壳体或容器之内，制造厂还应提供复制铭牌，并安装于壳体或容器外表上；
- c) 对热交换器处理多种流体并具有多个独立压力腔时，可使用多块铭牌。

7.9.4 铭牌至少应包括下列内容：

- a) 产品型号；
- b) 产品名称；
- c) 主要技术特性参数：设计压力或最高允许的工作压力；试验压力；最高和最低允许的工作温度或设计金属温度；介质；换热面积；自重和容积、热交换器类别等；
- d) 制造日期；
- e) 制造厂名称；
- f) 认可机构的检验标记。

7.9.5 运输包装和贮存

7.9.5.1 热交换器包装应符合 GB/T 13384 的规定。

7.9.5.2 运输和贮存应符合下列规定：

- a) 热交换器的运输应符合铁路、公路、水运的要求；
- b) 热交换器在运输中应防止碰撞、雨淋；
- c) 热交换器应存放在清洁、干燥，没有酸、碱等腐蚀介质气氛的场所。不得存放在露天场地；
- d) 对于氮封的热交换器，在存放期内各通道的氮封压力不得低于 0.02MPa，否则应用干燥氮气补充至氮封压力；
- e) 对于无法进行氮封或供需双方同意不进行氮封的热交换器，存放期内应采用塑料薄膜包装并放置干燥剂或吸湿剂。

## 8 安装与操作

### 8.1 起吊及搬运

热交换器应设置用于起吊的机构，制造商应提供在起吊、搬运热交换器时的注意事项。

### 8.2 安装方式

8.2.1 热交换器的支座一般安装位于热交换器芯体的上半部，以减少角撑架与支撑横梁接合处在设备启动和停车时的震动。

8.2.2 除了主支座之外，当需要增设滑动导架时，应按图 26 与图 28 所示结构设置。

### 8.3 支承架

支承架的安装应满足如下要求：

- a) 热交换器应安装于支承架上。选择支承架时，除了要考虑热交换器的自重外，还应考虑外部管道所施加的力和力矩；
- b) 热交换器安装于支承架后的垂直度允许偏差应不大于  $0.5^\circ$  且不大于 15mm，可采用垫金属薄片的方式来调整垂直度；有特殊要求的热交换器除外；
- c) 支承架与热交换器配合面应绝热，绝热材料的强度应和承受的载荷与震动相适应，并根据工作条件确定绝热材料的厚度。
- d) 支承架推荐采用不锈钢或低温钢；

### 8.4 滑动导轨

8.4.1 如果风载、地震或管道负荷所施加的外力足以引起热交换器横向移动时，应设置滑动导向架以防止热交换器横向移动，但不能限制热交换器上下方向的移动。

8.4.2 典型的支撑系统和导向架如图 26~图 28 所示。导向架与热交换器之间需用绝热材料隔开。绝热材料应压紧，且用不锈钢螺钉固定于导向架上，以防松动脱开。导架连接件应用合金钢制成，并固定于壳体的主结构件或支架上。

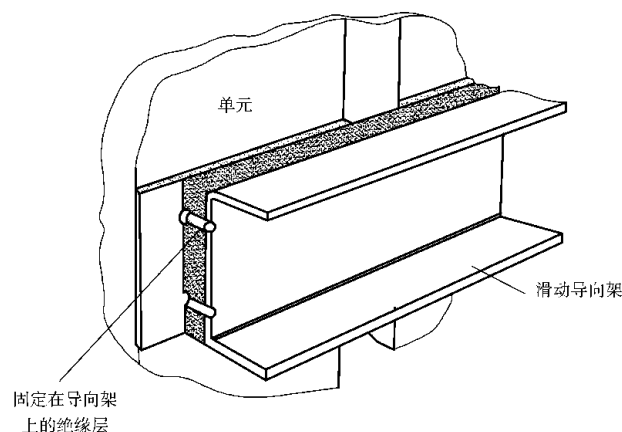


图 26 典型的滑动导轨（滑动控制架）

### 8.5 固定螺栓

8.5.1 热交换器安装于支撑架上应采用螺栓固定，固定时应考虑工作状态下因热胀冷缩导致的力和力矩的增加。

8.5.2 当支撑位置和工作温度低于室温，固定螺母不宜锁死，建议螺母位于在下方，采用双螺母或破坏

最端部螺纹防止螺母在工作状态下松动；对卧式固定的热交换器应特别注意热交换器长度方向的冷缩（热胀）；

8.5.3 低温热交换器的地脚螺栓和螺母宜采用不锈钢螺栓、螺母。

## 8.6 无用通道的开口

8.6.1 以下无用通道应设置开口：

- a) 强度层，芯体最外层的工艺层；
- b) 位于芯体侧面相邻两个封头之间的空间；

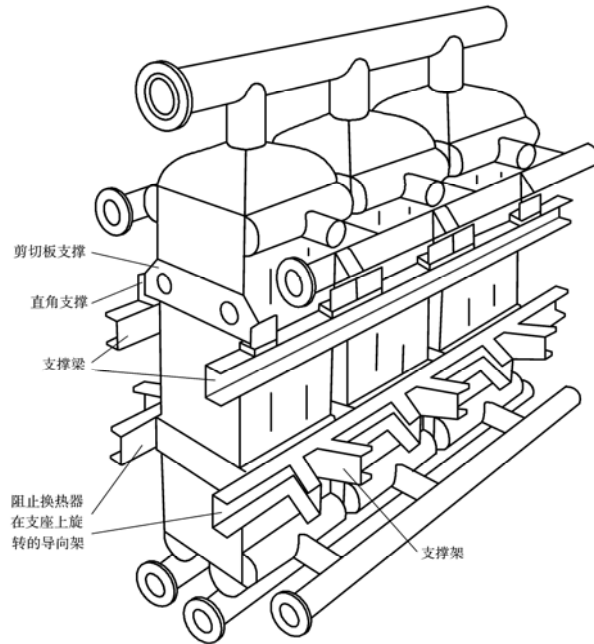


图 27 具有剪切边板支撑的三个热交换器单元组合装置

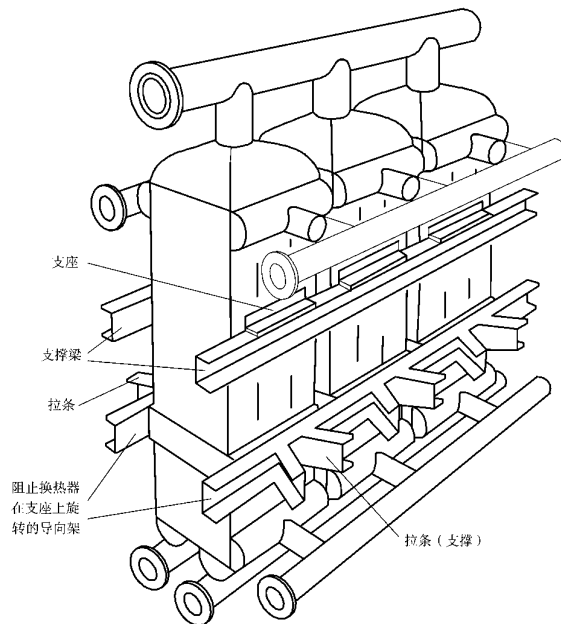


图 28 具有直角托架支撑的三个热交换器单元组合装置

- c) 端部导流片使用斜封条后形成的死角;
- d) 两个芯体并联(焊接)在一起时形成的空间;
- e) 其他特殊结构。

8.6.2 开口应有标记并应保证无用通道空腔的畅通,运输前应对开口进行干燥和封闭处理。

8.6.3 安装完成后,覆盖在开口上的封闭物(如螺钉、塞子或防水膜等)应在现场试验和运行前去除,并根据需要决定是否安装排放管路。

## 8.7 现场检验与试验

8.7.1 现场安装完成后,应对焊接接头进行目视检查,可进行渗透或射线检测,渗透和射线检测应符合相关标准的规定。

8.7.2 现场安装完成后系统应进行压力试验,压力试验应符合有关规范的要求并满足以下要求:

- a) 压力试验的介质一般采用干燥、无油、无水的空气,必要时应采用干燥氮气;
- b) 压力试验时应采取必要的安全措施;
- c) 压力试验应按通道分别进行,一个通道进行压力试验时,其他通道不能同时进行压力试验;
- d) 压力试验完成后应降压,然后进行气密性试验;
- e) 评价压力试验时,应考虑整个保压期间环境温度的变化,最终压力可按式(8-1)修正:

$$P_2 = P_1 \times \frac{T_2}{T_1} \quad (8-1)$$

式中:

$P_1$ ——试验最初压力,MPa;

$P_2$ ——试验最终压力,MPa;

$T_1$ ——试验最初环境绝对温度,K;

$T_2$ ——试验最终环境绝对温度,K。

f) 各通道的压力试验合格后,系统应进行气密性试验,保压30min无泄漏为合格。

## 8.8 绝热(隔热保冷)层施工

热交换器现场试验完毕后应进行绝热层施工,并满足以下要求:

- a) 对于壳体内部的热交换器,热交换器与壳体壁之间的最小绝热层不得小于图7.4规定的最小绝热厚度。绝热材料可采用珠光砂或矿渣棉。珠光砂的密度一般为 $60 \text{ kg/m}^3 \sim 80 \text{ kg/m}^3$ 。充填矿渣棉时应避免损坏热交换器接管。绝热层施工后,应采用干燥氮气吹除壳体绝热材料中残留的空气;
- b) 对于其他热交换器,绝热材料一般采用聚胺酯泡沫,最小绝热层厚度应满足图样的要求。绝热层施工后,绝热材料应加外壳封闭保护。

## 8.9 系统操作

### 8.9.1 启动

启动前应采取以下措施:

- a) 确认介质流动的脉动或振动(例如由压缩机、泵或不正确的配管等)不会传递到热交换器上;
- b) 应对热交换器各通道的压力泄放装置进行检查;

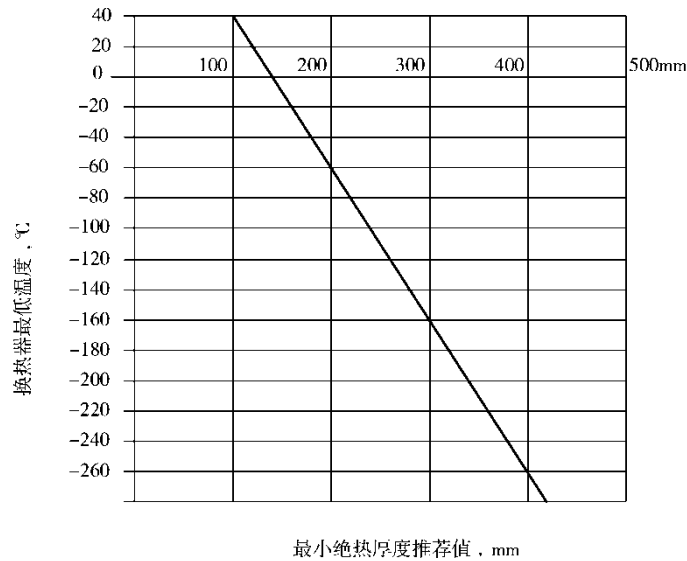


图 29 热交换器与壳体壁之间的最小绝热厚度

- c) 确保与热交换器联接的管道中没有氧化皮和沙粒等固体颗粒杂质；
- d) 应采用露点不高于 $-40^{\circ}\text{C}$ 的氮气对系统内残余的水分和碳氢化合物进行吹除，直至满足系统图样的要求；
- e) 应采用干燥气体进行系统冷却，为了防止冷热冲击，应缓慢进行，冷却时降温速率不得大于 $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 以避免对系统产生冷热冲击，冷却速度不得超过每小时 $30^{\circ}\text{C}$ ，冷却气体应同时引入各通道，冷却气体温度与局部金属温度的温差不得超过 $30^{\circ}\text{C}$ ；
- f) 启动数据应记录存档。

### 8.9.2 运行

运行时应符合如下要求：

- a) 流体的入口处应设置过滤器，并设置一个旁通系统，过滤网的过滤精度由制造商提出要求，通常推荐至少应能清除直径大于 $0.18\text{mm}$ 的固体颗粒杂质；
- b) 系统内流体的流动应保持稳定，以避免来自压缩机或泵的脉冲或喘振气流的直接冲击；
- c) 压力泄放装置的泄放压力不得大于最大允许工作压力，泄放压力设定值和泄放量应符合有关标准的规定。
- d) 调整控制工艺参数，确保各流道间的断面温差不超过热交换器图样要求或 3.4.2.1 的规定；操作温度不得高于热交换器图样要求
- e) 确保介质对铝合金没有腐蚀；

### 8.9.3 停车

停车应符合如下要求：

- a) 停车后应先排出系统中的液体，并应采用干燥气体使系统缓慢升温，升温速率不得大于 $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ，升温速度不得超过每小时 $30^{\circ}\text{C}$ ，并严格控制加温气体和系统之间的即时温度差不大于 $30^{\circ}\text{C}$ ；
- b) 系统达到常温后应停止升温，并采用干燥气体或露点不大于 $-40^{\circ}\text{C}$ 的氮气进行吹除；
- c) 吹除后，如果停车需要持续一段时间，应考虑对系统进行氮封。



## 8.10 维护保养

### 8.10.1 热交换器的维护保养应符合如下要求：

- a) 应记录热交换器的运行情况，记录内容应包括启动、停车和故障时的详情及运行数据；
- b) 当热交换器发生故障时，应向制造商咨询，咨询前不得自行处理；
- c) 对于介质中含有碳氢化合物等有害物质的系统，进行检查前应采用必要的安全防护措施；
- d) 对于低温系统，进入壳体内检查前，应切断壳体内保护氮气的气源。壳体内氧气含量未达到19%之前，不得进入壳体检查。进入壳体检查时，应采用报警式监测器连续监测氧气含量，至少应有两台监测器每隔1小时轮流使用；
- e) 如需要移开壳体内部分绝热材料检查时，应采取措施防止其余绝热材料垮塌，焊接时还应采取防火措施；
- f) 检查用珠光砂绝热的壳体时，不得在珠光砂完全移出前进入壳体。

### 8.10.2 热交换器使用注意事项参见附录 I。

## 8.11 泄漏检查

### 8.11.1 一般检漏

一般检漏按如下要求：

- a) 当热交换器发生外漏时，绝热外壳上局部会结冰(或霜)或冒出气体。若热交换器在壳体内泄漏时，壳体排气阀排出的气体的气味或组分含量会明显改变，或产生流体泄漏声音；
- b) 当热交换器发生内部泄漏时，产品纯度会降低，如果泄漏量较大，相关流体的流量会发生明显变化。

### 8.11.2 现场试压检漏

8.11.2.1 现场试压工作开始之前，所有的通道应用干燥氮气或干燥空气吹除。应进行气体分析，以确保该系统没有残余的有害气体。如果热交换器装在壳体内，应维持壳体上下出气孔的出气并连续监控壳体内的氧含量，氧含量小于19%时，不允许进入工作；并监测壳体内的其他可燃气体或其他有毒有害气体。

8.11.2.2 各通道用盲板封闭并装上合适的压力表，依次对各个通道进行加压；初期的试验压力不应大于0.5MPa（表压）。根据泄漏的情况，可能还需用较高的压力进行试验，但试验压力不能超过该通道的工作压力。试验介质应采用干燥无油的氮气或空气。

8.11.2.3 充压后确认所有机械接头都没有泄漏。保压时间不少于10小时，观察压力是否有变化，并结合保压期间温度变化判定是否泄漏。所有的通道都应设置压力泄放装置。

8.11.2.4 现场试压检漏时，应满足8.7.2的规定，同时应采取预防措施，确保泄漏不会置换封闭空间里的氧气或形成可燃氛围。

8.11.2.5 记录的压力应按8.7.2所述方法进行修正，以补偿试验期间环境温度的变化。

8.11.2.6 外部泄漏可采用8.7.2所述的方法用肥皂水对新布管道焊接接头进行检验判定。

## 8.12 泄漏的修补

8.12.1 外部泄漏，由合格的焊工按照补焊工艺进行补焊。

8.12.2 如果热交换器有内漏需修复，应与制造商协商提出修复的建议与方法。

8.12.3 与芯体体相关的焊接须特别注意，需专门的焊接工艺。

附 录 A  
(资料性附录)  
热交换器型号的编制方法

A.1 热交换器型号表示方法

A.2 符号规定说明

A.2.1 板翅式热交换器应用场合代号(采用汉语拼音的第一个拼音字母表示):

- J —— 加热器 (JIAREQI);
- D —— 动力装置 (DONGLI);
- H —— 化工设备 (HUAGONG);
- K —— 空分装置 (KONGFEN);
- L —— 冷却器 (LENGQUE);
- R —— 热交换器 (HUANRE);
- Z —— 制冷装置 (ZHILENG)。

A.2.2 换热面积  $F$  ( $m^2$ )

$F \leq 10$ , 有效数字取小数后一位。如: 10.0、0.8 等;

$F \leq 100$ , 有效数字取个位整数。如: 100、85 等;

$F \leq 1000$ , 有效数字取十位整数。如: 850、540 等;

$F \leq 10000$ , 有效数字取百位整数。如: 8500、6100 等。注: 换热面积 ( $F$ ) 取热交换器单元总换热面积。

A.2.3 设计压力 (MPa)

有效数字取小数点后一位。如: 10.0; 0.8; 0.1 等。

注: 设计压力取热交换器单元中最高设计压力。

A.3 示例

示例如下:

a) 一台板翅式热交换器有  $850m^2$  换热面积, 应用在乙烯壳体中。最高设计压力 4.6MPa。

型号为: BC-H-850/4.6 型板翅式热交换器

b) 一台板翅式热交换器有  $8000m^2$  换热面积, 应用在空分装置中。最高设计压力 0.9MPa。

型号为: BC-K-8000/0.9 型板翅式热交换器

附 录 B  
(资料性附录)  
国内外铝材使用温度

标准	ASME		EN 标准		中国标准	
	合金编号 (标准号)	设计温度	合金编号	设计温度	合金编号 (标准号)	设计温度
翅片	3003 (SB-209) 3004 (SB-209)	204℃ 204℃	AlMnCu	65℃	3003 (GB/T3880) 3004 (GB/T3880)	200℃ 200℃
导流片	SB-209 3003 3004	204℃ 204℃	AlMnCu	65℃	3003 (GB/T3880) 3004 (GB/T3880)	200℃ 200℃
封条	SB-221 3003	204℃	AlMnCu	65℃	3003 (GB/T6892)	200℃
隔板	SB-209 3003	204℃	AlMnCu	65℃	YS/T69 3003	200℃
盖板	SB-209 3003	204℃	AlMnCu	65℃	GB/T3880 3003	200℃
封头	SB-209, 2211&241 3003 5052 5083 5454	204℃ 204℃ 65℃ 204℃	AlMg3 AlMg4. 5Mn	150℃ 80℃	GB/T3880 3003 5052 5083 5454	200℃ 200℃ 65℃ 200℃
接管	SB-209, 2211&241 3003 5052 5083 5086 5454 6061 6063	204℃ 204℃ 65℃ 65℃ 204℃ 204℃	AlMg3 AlMg4. 5Mn	150℃ 80℃	GB/T6893 GB/T4437. 1 3003 5052 5083 5086 5454 6061 6063	200℃ 200℃ 65℃ 65℃ 200℃ 200℃ 200℃
法兰	SB-209&221 5083 6061	65℃ 204℃	AlMg4. 5Mn AlMg3	80℃ 150℃	YS/T479 5083 6061	65℃ 200℃
支架	SB-209&221 5052 5083	204℃ 65℃	AlMg3 AlMg4. 5	150℃ 80℃	GB/T3880 5052 5083	200℃ 65℃

注：上述材料可以是复合材料，如果采用复合材料，其最高设计温度按照基体材料确定。

## 附录 C

## (规范性附录)

## 翅片最高允许设计压力的确定

C.1 通过爆破试验确定翅片、导流片的最高允许设计压力。

C.1.1 试验设备和仪表应满足下列要求：

- a) 试验使用的测量仪器、仪表应经计量部门鉴定合格并在有效期内；
- b) 试压泵选用应满足测量试验翅片预测爆破压力的要求；
- c) 压力表精度为 1.5 级，表盘刻度极限值应是试验压力的 1.5~3 倍，宜为试验压力的 2 倍，表盘直径不应小于 100mm。压力表至少两只，其中一只应带有记录功能。

C.1.2 爆破试验条件如下：

- a) 试验规定用洁净水作试压介质，当试件与介质大致处于相同的温度后，才能加压至试验压力；
- b) 在进行爆破试验时应认真地做好试验人员的安全工作；
- c) 上述试件隔板厚度、封条尺寸，翅片型式均与产品要求相同，并钎焊成整体。

C.1.3 爆破试验程序如下：

- a) 将试验通道充满水，排净通道内的气体，强度层不做试验应通大气；
- b) 缓慢加压，当压力逐渐增加到翅片拟定的最高允许设计压力的 2 倍后，按照 0.5MPa 的增量缓慢加压到拟定最高允许设计压力的 4~6 倍，如果此时试验单元不破裂，应继续加压直到爆破发生为止，及时记录爆破时的压力值。试件爆破后，应对试件进行切块检验，如爆破形式是翅片拉伸断裂，则该翅片试验合格。如果是钎焊缝脱开，则应分析原因，针对不同原因制定下一步试验方案。
- c) 试验过程中设计人员、检验人员应在试验现场，并在试验报告上签字认可（试验报告的推荐样表可按表 C.1）。报告书作为技术文件存档保存。

C.1.4 设计压力的确定如下：

- a) 试验翅片的最高允许设计压力按式 C-1 计算；

$$[p] = \frac{p_b}{n_b} \times \frac{R_m}{R_{mp}} \quad (C-1)$$

式中：

[p]——最高允许设计压力，MPa；

$p_b$ ——试件的爆破压力，MPa；

$R_m$ ——室温下产品材料的实测平均抗拉强度，MPa；

$R_{mp}$ ——室温下爆破材料的实测平均抗拉强度，MPa；

$n_b$ ——安全系数

- b) 如果采用同一炉批号的材料制造一批翅片，并用这批翅片制作试件进行试验时，该批翅片最高允许设计压力为爆破压力除以安全系数。

c) 安全系数的确定：

- 1) 对于空分设备中承受交变应力的热交换器，其安全系数应取 6；

2) 对于最高工作压力小于 2.5MPa, 但停车后压力或瞬时压力小于 5MPa 的热交换器, 其安全系数应取 4;

3) 对于设计压力大于或等于最高工作压力 1.1 倍的热交换器, 其安全系数可取 4;

4) 其余的热交换器安全系数取 5。

C.2 通过应力分析确定翅片最高允许设计压力时, 应满足下列要求:

a) 每一种新翅片都要进行应力分析, 并提供应力分析报告;

b) 应力分析时, 取翅片材料的最低抗拉强度作为破坏应力;

c) 当应力分析求得的  $p_b$  为翅片参数的函数时, 则应力分析结果可通用于所有翅片。此时翅片的爆破压力可用计算的方法求得, 再除以安全系数求得翅片最高允许设计压力。

表 C.1 制造厂翅片允许设计压力试验报告推荐样表

制造厂翅片允许设计压力试验报告	
No:	_____
1. 试验日期:	
2. 翅片型号:	
3. 试验依据:	
4. 试验条件	<p>(1) 试验是在设计人员、检验人员在场的情况下进行的。</p> <p>(2) 试件的试验通道充满清洁的水，强度层通大气。</p> <p>(3) 试验用设备、仪表及环境条件如下：</p> <p>水 泵：型号：_____ 设备编号：_____</p> <p>          压力范围：_____</p> <p>压力表：型号：_____ 编号：_____</p> <p>          刻度范围：_____ 精度：_____</p> <p>          有效日期：_____</p> <p>温 度：室温：_____ °C      水温：_____ °C</p>
5. 试验规定:	<p>拟定试件的最高允许设计压力值为_____MPa，预计试件的最大试验压力值为_____MPa，按规定第一次升压值为_____MPa，保持 3min，确认试件无变形、无泄漏时再继续按规定升压至爆破。</p>
6. 爆破压力:	_____MPa。
7. 破坏位置:	见图
8. 试验操作者:	

表 C.1 (续)

<p>9. 试验检验人员:</p>
<p>10. 试验记录:</p> <p>钎焊的类型 _____</p> <p>试件芯体尺寸 (长) _____ × (宽) _____ × (高) _____</p> <p>封条尺寸 _____ 材料 _____</p> <p>侧板厚度 _____ 材料 _____</p> <p>翅片类型 _____</p> <p>翅片材料 _____</p> <p>翅片高度 _____</p> <p>翅片节距 (每英寸翅数) _____</p> <p>翅片材料厚度 _____</p> <p>爆破的原因 _____</p> <p>爆破试验压力 _____</p> <p>拉伸试验平均抗拉强度 _____</p> <p>修正后的爆破试验压力 = 爆破试验压力 × <math>\frac{\text{室温下材料的标准规定最小抗拉强度}}{\text{室温下试件材料实测平均抗拉试验强度}}</math></p> <p>修正后的爆破试验压力 = _____ × _____ = _____</p> <p>最高允许设计压力 = <math>\frac{\text{修正的爆破试验压力}}{\text{安全系数}}</math> = _____ = _____</p> <p>参与试验的设计代表 _____ 日期 _____</p> <p>合格批准人 _____ 日期 _____</p>
<p>授权检验师或设计人员:</p>

(资料性附录)  
封头典型结构的应力分析案例

## D.1 适用范围

本附录适用于板翅式热交换器封头的典型结构，依据JB4732-1995《钢制压力容器—分析设计标准》的计算结果。

## D.2 封头开孔处应力分析(一)

## D.2.1 封头主要几何参数及材料属性

D.2.1.1 几何参数见表 D.1，封头模型简图见图 D.1。

表 D.1 几何参数

	外直径 $\Phi$ (mm)	名义厚度 (mm)	负偏差 (mm)	有效厚度 (mm)	材料	备注
封体	300	8	0.4	7.6	5083-H112	R1=142 t1=8 t2=10 L1=1000 L2=300 L3=300 L4=600 D=168 H=160
接管	168	10	1.5	8.5	5083-H112	

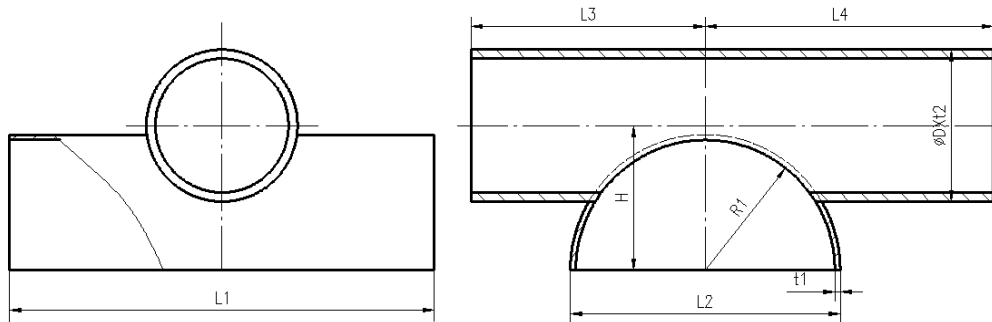


图 D.1 封头模型简图

## D.2.1.2 材料属性

表 D.2 材料性能

材料	温度 $^{\circ}\text{C}$	应力强度 $S_m$ (MPa)	屈服应力 $\sigma_s$ (MPa)	密度 $\rho$ $\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	弹性模量 E (MPa)	波松比
5083-H112 (板材)	-196	83	125	2700	$7.1 \times 10^4$	0.33
5083-H112 (管材)	-196	73	110	2700	$7.1 \times 10^4$	0.33



## D. 2. 2 应力分析

### D. 2. 2. 1 数学模型

因封头为对称结构，故取1/2建模。模型采用三维等参实体单元SOLID 185进行网格划分，此网格具有8节点，每个节点具有三个方向自由度（X，Y，Z）。

### D. 2. 2. 2 载荷

#### D. 2. 2. 2. 1 设计压力下载荷

- a) 设计压力：0.7MPa；
- b) 接管两端等效轴向力：-2.95MPa；
- c) 封体等效轴向力：-6.39MPa。

#### D. 2. 2. 2. 2 液压试验下载荷

- a) 液压试验压力：1.2 MPa；
- b) 接管两端等效轴向力：-5.06MPa；
- c) 封体等效轴向力：-10.96MPa。

#### D. 2. 2. 2. 3 边界条件

封头底面全约束（UX=UY=UZ=0）。

## D. 2. 3 应力分析结果

### D. 2. 3. 1 说明

ANSYS计算结果相关符号说明如下：

SINT	=	应力强度	(MPa)
	=	最大剪应力的两倍	
	=	$(\sigma_1 - \sigma_3)$	
SMX	=	节点的最大应力	(MPa)
SMN	=	节点的最小应力	(MPa)
$P_m$	=	一次总体薄膜应力	(MPa)
$P_l$	=	一次局部薄膜应力	(MPa)
$P_b$	=	一次弯曲应力	(MPa)

### D. 2. 3. 2 开孔处局部应力分析结果

#### D. 2. 3. 2. 1 设计压力下开孔处局部应力分析

封头开孔处设计压力条件下，分析结果见表D. 3，取值依据附录1《封头应力分析结果》：

表D.3 设计压力条件下应力分析结果及强度校核

	$P_m$ (MPa)	$P_L$ (MPa)		$P_L+P_b$ (MPa)	
	路径 1-1	路径 2-2	路径 3-3	路径 2-2	路径 3-3
计算值	13.69	18.99	14.28	18.99 <sup>②</sup>	14.28 <sup>②</sup>
许用值	$K^{①} \times 1.5 S_m^t$	$K^{①} \times 1.5 S_m^t$		---	
	109.5	109.5	109.5	---	---
结果	合格	合格	合格	---	---
注1: 由《JB4732-1995钢制压力容器—分析设计标准》表3-3, $K=1$ ;					
注2: 由《JB4732-1995钢制压力容器—分析设计标准》表4-1, 此处弯曲应力属于二次应力。					

## D.2.3.2.2 液压试验下开孔处局部应力分析

封头开孔处液压试验条件下, 分析结果见表D.4, 取值依据附件1《封头应力分析结果》:

表D.4 液压试验条件下应力分析结果及强度校核

	$P_m$ (MPa)	$0.9 \sigma_s$ (MPa)	$0.67 \sigma_s$ (MPa)
	路径 4-4		
计算值	23.46	99	73.7
$P_m < 0.9 \sigma_s, P_m < 0.67 \sigma_s$			
	$P_L+P_b$ <sup>①</sup> (MPa)		
	路径 5-5	路径 6-6	
计算值	32.55	24.47	
$P_L + P_b < 1.35 \sigma_s$			
结果	合格		
注: 由《JB4732-1995钢制压力容器—分析设计标准》表4-1, 此处弯曲应力属于二次应力。			

## D.2.4 结论

在设计压力和液压试验压力下, 此封头开孔处是安全的。

## 附件 1 封头应力分析结果

设计压力条件下路径 1-1 分析:

PRINT LINEARIZED STRESS THROUGH A SECTION DEFINED BY PATH= 1-1          DSYS= 0

\*\*\*\*\* POST1 LINEARIZED STRESS LISTING \*\*\*\*\*  
INSIDE NODE = 27775          OUTSIDE NODE = 20558

LOAD STEP 1 SUBSTEP= 1  
 TIME= 1.0000 LOAD CASE= 0

THE FOLLOWING X, Y, Z STRESSES ARE IN THE GLOBAL COORDINATE SYSTEM.

** MEMBRANE **						
	SX	SY	SZ	SXY	SYZ	SXZ
	13.33	-0.3236	1.505	0.4193	-0.2875E-01	-0.1976
	S1	S2	S3	SINT	SEQV	
	13.35	1.502	-0.3367	13.69	12.87	
** BENDING ** I=INSIDE C=CENTER O=OUTSIDE						
	SX	SY	SZ	SXY	SYZ	SXZ
I	2.285	-0.3656	1.933	0.8540E-01	-0.2792E-02	-0.6713E-02
C	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
O	-2.285	0.3656	-1.933	-0.8540E-01	0.2792E-02	0.6713E-02
	S1	S2	S3	SINT	SEQV	
I	2.288	1.933	-0.3683	2.656	2.498	
C	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
O	0.3683	-1.933	-2.288	2.656	2.498	
** MEMBRANE PLUS BENDING ** I=INSIDE C=CENTER O=OUTSIDE						
	SX	SY	SZ	SXY	SYZ	SXZ
I	15.62	-0.6892	3.438	0.5047	-0.3155E-01	-0.2043
C	13.33	-0.3236	1.505	0.4193	-0.2875E-01	-0.1976
O	11.05	0.4202E-01	-0.4279	0.3339	-0.2596E-01	-0.1909
	S1	S2	S3	SINT	SEQV	
I	15.64	3.435	-0.7049	16.34	14.71	
C	13.35	1.502	-0.3367	13.69	12.87	
O	11.06	0.3278E-01	-0.4320	11.49	11.27	
** PEAK ** I=INSIDE C=CENTER O=OUTSIDE						
	SX	SY	SZ	SXY	SYZ	SXZ
I	-0.1666	0.5811E-01	-0.1588	-0.7540E-01	0.7119E-01	0.3973E-02
C	0.3801E-03	0.3533E-01	0.1945E-01	-0.4411E-01	-0.8568E-01	0.2669E-01
O	0.2181	-0.4600E-01	0.1101	-0.7016E-01	0.6449E-01	0.1169E-01
	S1	S2	S3	SINT	SEQV	
I	0.9862E-01	-0.1583	-0.2076	0.3063	0.2848	
C	0.1328	-0.1687E-01	-0.6080E-01	0.1936	0.1758	
O	0.2357	0.1318	-0.8537E-01	0.3211	0.2838	
** TOTAL ** I=INSIDE C=CENTER O=OUTSIDE						
	SX	SY	SZ	SXY	SYZ	SXZ
I	15.45	-0.6311	3.279	0.4293	0.3964E-01	-0.2003
C	13.33	-0.2882	1.524	0.3752	-0.1144	-0.1709
O	11.27	-0.3973E-02	-0.3178	0.2637	0.3853E-01	-0.1792
	S1	S2	S3	SINT	SEQV	TEMP
I	15.47	3.276	-0.6430	16.11	14.55	0.000
C	13.35	1.528	-0.3051	13.65	12.83	

0 11.27 -0.4372E-02 -0.3264 11.60 11.44 0.000

设计压力条件下路径 2-2 分析:

PRINT LINEARIZED STRESS THROUGH A SECTION DEFINED BY PATH= 2-2 DSYS= 0

\*\*\*\*\* POST1 LINEARIZED STRESS LISTING \*\*\*\*\*  
 INSIDE NODE = 20310 OUTSIDE NODE = 24271

LOAD STEP 1 SUBSTEP= 1  
 TIME= 1.0000 LOAD CASE= 0

THE FOLLOWING X, Y, Z STRESSES ARE IN THE GLOBAL COORDINATE SYSTEM.

\*\* MEMBRANE \*\*

	SX	SY	SZ	SXY	SYZ	SXZ
	6.874	11.05	5.119	5.830	-6.275	-5.003
	S1	S2	S3	SINT	SEQV	
	19.59	2.846	0.6027	18.99	17.97	

\*\* BENDING \*\* I=INSIDE C=CENTER O=OUTSIDE

	SX	SY	SZ	SXY	SYZ	SXZ
I	2.679	3.328	0.2340	-3.010	0.6088	0.7194
C	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
O	-2.679	-3.328	-0.2340	3.010	-0.6088	-0.7194
	S1	S2	S3	SINT	SEQV	
I	6.031	1.056	-0.8460	6.877	6.151	
C	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
O	0.8460	-1.056	-6.031	6.877	6.151	

\*\* MEMBRANE PLUS BENDING \*\* I=INSIDE C=CENTER O=OUTSIDE

	SX	SY	SZ	SXY	SYZ	SXZ
I	9.553	14.38	5.353	2.820	-5.666	-4.284
C	6.874	11.05	5.119	5.830	-6.275	-5.003
O	4.195	7.719	4.885	8.840	-6.884	-5.722
	S1	S2	S3	SINT	SEQV	
I	19.20	8.489	1.588	17.62	15.37	
C	19.59	2.846	0.6027	18.99	17.97	
O	20.20	-0.3455	-3.058	23.26	22.03	

\*\* PEAK \*\* I=INSIDE C=CENTER O=OUTSIDE

	SX	SY	SZ	SXY	SYZ	SXZ
I	0.1249	1.026	-0.6661	-0.8977	0.2061	-0.4706
C	-0.2183	-0.5037	0.8661E-01	0.3148	0.2890E-01	0.2460
O	0.3628	0.7592	0.1504	-0.3075	0.7641E-02	-0.3227
	S1	S2	S3	SINT	SEQV	
I	1.658	-0.2595	-0.9139	2.572	2.315	
C	0.2713	-0.1840	-0.7227	0.9940	0.8618	
O	0.9634	0.4304	-0.1214	1.085	0.9395	

```

** TOTAL ** I=INSIDE C=CENTER O=OUTSIDE
      SX      SY      SZ      SXY      SYZ      SXZ
I  9.678    15.40    4.687    1.922    -5.460    -4.754
C  6.656    10.54    5.206    6.145    -6.246    -4.757
O  4.558     8.478    5.035    8.533    -6.876    -6.045
      S1      S2      S3      SINT     SEQV     TEMP
I  19.19     9.809    0.7671   18.42    15.96     0.000
C  19.39     2.167    0.8482   18.54    17.92     0.000
O  20.64    -0.2516   -2.313   22.95    21.99     0.000
    
```

设计压力条件下路径 3-3 分析:

PRINT LINEARIZED STRESS THROUGH A SECTION DEFINED BY PATH= 3-3      DSYS= 0

```

***** POST1 LINEARIZED STRESS LISTING *****
INSIDE NODE = 20760      OUTSIDE NODE = 22740
    
```

```

LOAD STEP      1    SUBSTEP=      1
TIME=      1.0000      LOAD CASE= 0
    
```

THE FOLLOWING X, Y, Z STRESSES ARE IN THE GLOBAL COORDINATE SYSTEM.

```

** MEMBRANE **
      SX      SY      SZ      SXY      SYZ      SXZ
3.027    7.861    9.980    2.772    -5.961    -2.504
      S1      S2      S3      SINT     SEQV
16.03    3.086    1.752    14.28    13.66

** BENDING ** I=INSIDE C=CENTER O=OUTSIDE
      SX      SY      SZ      SXY      SYZ      SXZ
I  1.350    14.17    8.879    0.7178   4.671    2.406
C  0.000     0.000    0.000    0.000    0.000    0.000
O -1.350   -14.17   -8.879   -0.7178  -4.671   -2.406
      S1      S2      S3      SINT     SEQV
I  17.11     6.678    0.6125   16.50    14.45
C  0.000     0.000    0.000    0.000    0.000
O -0.6125   -6.678   -17.11   16.50    14.45

** MEMBRANE PLUS BENDING ** I=INSIDE C=CENTER O=OUTSIDE
      SX      SY      SZ      SXY      SYZ      SXZ
I  4.377    22.03    18.86    3.490    -1.290   -0.9828E-01
C  3.027     7.861    9.980    2.772    -5.961   -2.504
O  1.677    -6.309    1.101    2.054   -10.63   -4.910
      S1      S2      S3      SINT     SEQV
I  23.09    18.47    3.711    19.38    17.53
C  16.03     3.086    1.752    14.28    13.66
O  11.43    -1.007   -13.96    25.39    21.99

** PEAK ** I=INSIDE C=CENTER O=OUTSIDE
      SX      SY      SZ      SXY      SYZ      SXZ
    
```

I	-1.479	10.08	0.5391	-3.059	0.1400	-0.8210
C	0.4681	-4.425	-0.6524	0.9639	-0.1738	0.4869
O	0.1847	6.156	1.101	-0.7093	0.7248E-01	-0.4964
	S1	S2	S3	SINT	SEQV	
I	10.85	0.7245	-2.435	13.29	12.02	
C	0.7902	-0.7740	-4.625	5.416	4.827	
O	6.242	1.295	-0.9519E-01	6.337	5.769	

\*\* TOTAL \*\* I=INSIDE C=CENTER O=OUTSIDE

	SX	SY	SZ	SXY	SYZ	SXZ
I	2.898	32.11	19.40	0.4304	-1.150	-0.9193
C	3.495	3.436	9.328	3.736	-6.134	-2.017
O	1.861	-0.1534	2.202	1.345	-10.56	-5.407
	S1	S2	S3	SINT	SEQV	TEMP
I	32.22	19.34	2.842	29.38	25.51	0.000
C	14.47	3.289	-1.497	15.96	14.19	
O	13.74	0.3853	-10.22	23.96	20.80	0.000

液压试验条件下路径 4-4 分析:

PRINT LINEARIZED STRESS THROUGH A SECTION DEFINED BY PATH= 4-4 DSYS= 0

\*\*\*\*\* POST1 LINEARIZED STRESS LISTING \*\*\*\*\*

INSIDE NODE = 27775 OUTSIDE NODE = 20558

LOAD STEP 1 SUBSTEP= 1  
TIME= 1.0000 LOAD CASE= 0

THE FOLLOWING X, Y, Z STRESSES ARE IN THE GLOBAL COORDINATE SYSTEM.

\*\* MEMBRANE \*\*

	SX	SY	SZ	SXY	SYZ	SXZ
	22.86	-0.5547	2.581	0.7187	-0.4932E-01	-0.3386
	S1	S2	S3	SINT	SEQV	
	22.88	2.576	-0.5772	23.46	22.05	

\*\* BENDING \*\* I=INSIDE C=CENTER O=OUTSIDE

	SX	SY	SZ	SXY	SYZ	SXZ
I	3.919	-0.6268	3.315	0.1465	-0.4796E-02	-0.1155E-01
C	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
O	-3.919	0.6268	-3.315	-0.1465	0.4796E-02	0.1155E-01
	S1	S2	S3	SINT	SEQV	
I	3.924	3.315	-0.6315	4.555	4.283	
C	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
O	0.6315	-3.315	-3.924	4.555	4.283	

\*\* MEMBRANE PLUS BENDING \*\* I=INSIDE C=CENTER O=OUTSIDE

	SX	SY	SZ	SXY	SYZ	SXZ
I	26.77	-1.181	5.896	0.8652	-0.5412E-01	-0.3501
C	22.86	-0.5547	2.581	0.7187	-0.4932E-01	-0.3386

O	18.94	0.7207E-01	-0.7341	0.5723	-0.4453E-01	-0.3270
	S1	S2	S3	SINT	SEQV	
I	26.81	5.890	-1.208	28.02	25.23	
C	22.88	2.576	-0.5772	23.46	22.05	
O	18.96	0.5623E-01	-0.7410	19.70	19.31	

\*\* PEAK \*\* I=INSIDE C=CENTER O=OUTSIDE

	SX	SY	SZ	SXY	SYZ	SXZ
I	-0.2858	0.9963E-01	-0.2723	-0.1293	0.1221	0.6805E-02
C	0.6478E-03	0.6059E-01	0.3334E-01	-0.7565E-01	-0.1469	0.4577E-01
O	0.3741	-0.7887E-01	0.1888	-0.1203	0.1106	0.2004E-01
	S1	S2	S3	SINT	SEQV	
I	0.1691	-0.2715	-0.3561	0.5252	0.4884	
C	0.2278	-0.2892E-01	-0.1043	0.3321	0.3016	
O	0.4043	0.2261	-0.1464	0.5507	0.4867	

\*\* TOTAL \*\* I=INSIDE C=CENTER O=OUTSIDE

	SX	SY	SZ	SXY	SYZ	SXZ
I	26.49	-1.082	5.624	0.7359	0.6798E-01	-0.3433
C	22.86	-0.4941	2.614	0.6431	-0.1963	-0.2928
O	19.31	-0.6799E-02	-0.5453	0.4519	0.6610E-01	-0.3070
	S1	S2	S3	SINT	SEQV	TEMP
I	26.51	5.619	-1.102	27.62	24.94	0.000
C	22.88	2.621	-0.5231	23.40	22.00	
O	19.33	-0.7477E-02	-0.5599	19.89	19.62	0.000

液压试验条件下路径 5-5 分析:

PRINT LINEARIZED STRESS THROUGH A SECTION DEFINED BY PATH= 5-5 DSYS= 0

\*\*\*\*\* POST1 LINEARIZED STRESS LISTING \*\*\*\*\*  
 INSIDE NODE = 20310 OUTSIDE NODE = 24271

LOAD STEP 1 SUBSTEP= 1  
 TIME= 1.0000 LOAD CASE= 0

THE FOLLOWING X, Y, Z STRESSES ARE IN THE GLOBAL COORDINATE SYSTEM.

\*\* MEMBRANE \*\*

	SX	SY	SZ	SXY	SYZ	SXZ
	11.79	18.94	8.776	9.995	-10.76	-8.578
	S1	S2	S3	SINT	SEQV	
	33.59	4.880	1.033	32.55	30.81	

\*\* BENDING \*\* I=INSIDE C=CENTER O=OUTSIDE

	SX	SY	SZ	SXY	SYZ	SXZ
I	4.593	5.704	0.4014	-5.161	1.044	1.233
C	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
O	-4.593	-5.704	-0.4014	5.161	-1.044	-1.233

	S1	S2	S3	SINT	SEQV
I	10.34	1.810	-1.450	11.79	10.55
C	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
O	1.450	-1.810	-10.34	11.79	10.55

\*\* MEMBRANE PLUS BENDING \*\* I=INSIDE C=CENTER O=OUTSIDE

	SX	SY	SZ	SXY	SYZ	SXZ
I	16.38	24.64	9.177	4.834	-9.713	-7.345
C	11.79	18.94	8.776	9.995	-10.76	-8.578
O	7.194	13.23	8.374	15.16	-11.80	-9.811

	S1	S2	S3	SINT	SEQV
I	32.92	14.56	2.723	30.20	26.36
C	33.59	4.880	1.033	32.55	30.81
O	34.64	-0.5921	-5.242	39.88	37.77

\*\* PEAK \*\* I=INSIDE C=CENTER O=OUTSIDE

	SX	SY	SZ	SXY	SYZ	SXZ
I	0.2144	1.758	-1.142	-1.539	0.3534	-0.8072
C	-0.3744	-0.8635	0.1484	0.5397	0.4953E-01	0.4218
O	0.6222	1.301	0.2580	-0.5274	0.1309E-01	-0.5534

	S1	S2	S3	SINT	SEQV
I	2.842	-0.4448	-1.567	4.409	3.969
C	0.4651	-0.3155	-1.239	1.704	1.478
O	1.652	0.7380	-0.2082	1.860	1.611

\*\* TOTAL \*\* I=INSIDE C=CENTER O=OUTSIDE

	SX	SY	SZ	SXY	SYZ	SXZ
I	16.60	26.40	8.036	3.295	-9.360	-8.152
C	11.41	18.07	8.924	10.54	-10.71	-8.156
O	7.816	14.53	8.632	14.63	-11.79	-10.36

	S1	S2	S3	SINT	SEQV	TEMP
I	32.90	16.82	1.315	31.58	27.35	0.000
C	33.24	3.716	1.454	31.79	30.72	
O	35.38	-0.4312	-3.966	39.35	37.70	0.000

液压试验条件下路径 6-6 分析:

PRINT LINEARIZED STRESS THROUGH A SECTION DEFINED BY PATH= 6-6 DSYS= 0

\*\*\*\*\* POST1 LINEARIZED STRESS LISTING \*\*\*\*\*  
 INSIDE NODE = 20760 OUTSIDE NODE = 22740

LOAD STEP 1 SUBSTEP= 1  
 TIME= 1.0000 LOAD CASE= 0

THE FOLLOWING X, Y, Z STRESSES ARE IN THE GLOBAL COORDINATE SYSTEM.

\*\* MEMBRANE \*\*

	SX	SY	SZ	SXY	SYZ	SXZ
	5.190	13.48	17.11	4.751	-10.22	-4.293



	S1	S2	S3	SINT	SEQV	
	27.48	5.290	3.005	24.47	23.41	
** BENDING ** I=INSIDE C=CENTER O=OUTSIDE						
	SX	SY	SZ	SXY	SYZ	SXZ
I	2.316	24.30	15.23	1.232	8.008	4.124
C	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
O	-2.316	-24.30	-15.23	-1.232	-8.008	-4.124
	S1	S2	S3	SINT	SEQV	
I	29.34	11.45	1.052	28.29	24.78	
C	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
O	-1.052	-11.45	-29.34	28.29	24.78	
** MEMBRANE PLUS BENDING ** I=INSIDE C=CENTER O=OUTSIDE						
	SX	SY	SZ	SXY	SYZ	SXZ
I	7.506	37.77	32.33	5.983	-2.210	-0.1685
C	5.190	13.48	17.11	4.751	-10.22	-4.293
O	2.873	-10.82	1.880	3.519	-18.23	-8.417
	S1	S2	S3	SINT	SEQV	
I	39.58	31.66	6.364	33.22	30.05	
C	27.48	5.290	3.005	24.47	23.41	
O	19.59	-1.728	-23.93	43.53	37.70	
** PEAK ** I=INSIDE C=CENTER O=OUTSIDE						
	SX	SY	SZ	SXY	SYZ	SXZ
I	-2.537	17.28	0.9248	-5.246	0.2400	-1.408
C	0.8027	-7.587	-1.119	1.653	-0.2980	0.8347
O	0.3166	10.56	1.889	-1.216	0.1243	-0.8511
	S1	S2	S3	SINT	SEQV	
I	18.61	1.243	-4.176	22.78	20.61	
C	1.355	-1.327	-7.931	9.286	8.277	
O	10.70	2.221	-0.1630	10.87	9.893	
** TOTAL ** I=INSIDE C=CENTER O=OUTSIDE						
	SX	SY	SZ	SXY	SYZ	SXZ
I	4.969	55.06	33.26	0.7370	-1.970	-1.576
C	5.992	5.888	15.99	6.404	-10.52	-3.458
O	3.190	-0.2674	3.770	2.303	-18.10	-9.268
	S1	S2	S3	SINT	SEQV	TEMP
I	55.25	33.16	4.874	50.38	43.74	0.000
C	24.80	5.637	-2.567	27.36	24.32	
O	23.55	0.6608	-17.52	41.07	35.65	0.000

### D.3 封头开孔处应力分析(二)

#### D.3.1 封头主要几何参数及材料属性

D.3.1.1 几何参数见表 D.5。

表 D.5 几何参数

	外直径 $\Phi$ (mm)	名义厚度 (mm)	负偏差 (mm)	有效厚度 (mm)	材料	备注
封体	140	5	0.25	4.75	5083-0	R1=65 t1=5 t2=3 L1=500 L2=140 L3=20 L4=140 D=70 $\alpha=60$
接管	70	3	0.23	2.77	5052-0	

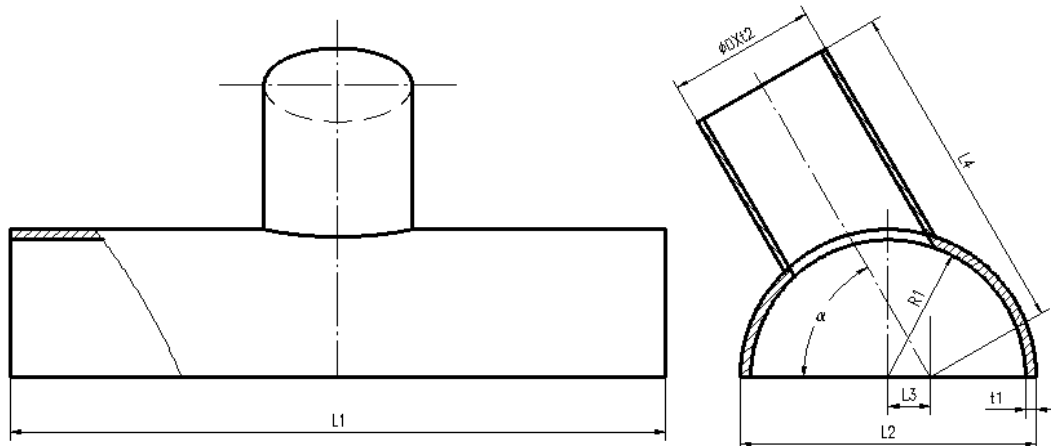


图 D.3.1 封头模型简图

## D.3.1.2 材料属性

主要材料属性见下表 D.6

表 D.6 材料性能

材料	温度 $^{\circ}\text{C}$	应力强度 $S_m$ (MPa)	屈服应力 $\sigma_s$ (MPa)	密度 $\rho$ $\rho$ (Kg / m <sup>3</sup> )	弹性模量 E (MPa)	波松比
5083-0 (板材)	-196	83	125	2700	$7.1 \times 10^4$	0.33
5052-0 (管材)	-196	46	70	2700	$7.1 \times 10^4$	0.33

## D.3.2 应力分析

## D.3.2.1 数学模型

因封头为对称结构，故取1/2建模。模型采用三维等参实体单元SOLID 185进行网格划分，此网格具有8节点，每个节点具有三个方向自由度（X，Y，Z）。

## D.3.2.2 载荷

## D.3.2.2.1 设计压力下载荷

- a) 设计压力：0.6MPa；

- b) 接管两端等效轴向力：-3.35MPa；  
c) 封体等效轴向力：-3.98MPa。

#### D.3.2.2.2 液压试验下载荷

- a) 液压试验压力：1.2 MPa；  
b) 接管两端等效轴向力：-6.7MPa；  
c) 封体等效轴向力：-7.96MPa

#### D.3.2.3 边界条件

封头底面全约束（UX=UY=UZ=0）。

### D.3.3 应力分析结果

#### D.3.3.1 说明

ANSYS计算结果相关符号说明如下：

SINT	=	应力强度	(MPa)
	=	最大剪应力的两倍	
	=	$(\sigma_1 - \sigma_3)$	
SMX	=	节点的最大应力	(MPa)
SMN	=	节点的最小应力	(MPa)
$P_m$	=	一次总体薄膜应力	(MPa)
$P_L$	=	一次局部薄膜应力	(MPa)
$P_b$	=	一次弯曲应力	(MPa)

#### D.3.3.2 开孔处应力分析结果

##### D.3.3.2.1 设计压力下开孔处局部应力分析

封头开孔处设计压力条件下，分析结果见表D.7，取值依据附件1《封头应力分析结果》：

表D.7 设计压力条件下应力分析结果及强度校合

	$P_m$ (MPa)	$P_L$ (MPa)		$P_L + P_b$ (MPa)	
	路径 1-1	路径 2-2	路径 3-3	路径 2-2	路径 3-3
计算值	8.479	15.17	14.35	15.17 <sup>②</sup>	14.35 <sup>②</sup>
许用值	$K^{\text{①}} \times 1.5 S_m^t$	$K^{\text{①}} \times 1.5 S_m^t$		---	
	69	69	69	---	---
结果	合格	合格	合格	---	---

注1：由《JB4732-1995钢制压力容器—分析设计标准》表3-3，K=1；

注2：由《JB4732-1995钢制压力容器—分析设计标准》表4-1，此处弯曲应力属于二次应力。

## D.3.3.2.2 液压试验下开孔处局部应力分析

封头开孔处液压试验条件下，分析结果见表D.8，取值依据附件1《封头应力分析结果》：

表D.8 液压试验条件下应力分析及强度校核

	$P_n$ (MPa)	$0.9\sigma_s$ (MPa)	$0.67\sigma_s$ (MPa)
	路径 4-4		
计算值	16.96	63	46.9
$P_n < 0.9\sigma_s, P_n < 0.67\sigma_s$			
	$P_L + P_b^{①} = P_L$ (MPa)		
计算值	30.34	28.7	
	$P_L + P_b < 1.35\sigma_s$		
结果	合格		
注：由《JB4732-1995钢制压力容器—分析设计标准》表4-1，此处弯曲应力属于二次应力。			

## D.3.4 结论

在设计压力和液压试验压力下，此封头开孔处是安全的。

## 附件 1 封头应力分析结果

设计压力条件下路径 1-1 分析：

PRINT LINEARIZED STRESS THROUGH A SECTION DEFINED BY PATH= 1-1      DSYS= 0

\*\*\*\*\* POST1 LINEARIZED STRESS LISTING \*\*\*\*\*  
INSIDE NODE = 60056      OUTSIDE NODE = 28963

LOAD STEP      1    SUBSTEP=      1  
TIME=      1.0000      LOAD CASE= 0

THE FOLLOWING X, Y, Z STRESSES ARE IN THE GLOBAL COORDINATE SYSTEM.

\*\* MEMBRANE \*\*

SX	SY	SZ	SXY	SYZ	SXZ
8.183	-0.2852	4.706	0.1311	-0.1739E-01	-0.1504
S1	S2	S3	SINT	SEQV	
8.192	4.700	-0.2873	8.479	7.381	

\*\* BENDING \*\*    I=INSIDE C=CENTER O=OUTSIDE

	SX	SY	SZ	SXY	SYZ	SXZ
I	-0.7738E-01	-0.2764	-0.5370	0.6580E-02	0.4658E-02	0.1689
C	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
O	0.7738E-01	0.2764	0.5370	-0.6580E-02	-0.4658E-02	-0.1689

	S1	S2	S3	SINT	SEQV
I	-0.2177E-01	-0.2766	-0.5924	0.5706	0.4951
C	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
O	0.5924	0.2766	0.2177E-01	0.5706	0.4951

\*\* MEMBRANE PLUS BENDING \*\* I=INSIDE C=CENTER O=OUTSIDE

	SX	SY	SZ	SXY	SYZ	SXZ
I	8.106	-0.5615	4.169	0.1377	-0.1273E-01	0.1851E-01
C	8.183	-0.2852	4.706	0.1311	-0.1739E-01	-0.1504
O	8.261	-0.8822E-02	5.243	0.1245	-0.2205E-01	-0.3192

	S1	S2	S3	SINT	SEQV
I	8.108	4.169	-0.5638	8.672	7.521
C	8.192	4.700	-0.2873	8.479	7.381
O	8.296	5.210	-0.1075E-01	8.307	7.273

\*\* PEAK \*\* I=INSIDE C=CENTER O=OUTSIDE

	SX	SY	SZ	SXY	SYZ	SXZ
I	0.1260E-01	0.2180E-01	0.6228E-02	-0.1520E-01	-0.5984E-02	-0.2399E-02
C	0.1541E-01	0.2256E-01	0.4944E-01	0.2201E-02	0.1708E-02	-0.8321E-02
O	-0.1088E-01	-0.4021E-01	-0.2346E-01	-0.5953E-02	-0.1008E-01	0.1582E-02

	S1	S2	S3	SINT	SEQV
I	0.3351E-01	0.9455E-02	-0.2339E-02	0.3585E-01	0.3165E-01
C	0.5141E-01	0.2317E-01	0.1282E-01	0.3859E-01	0.3460E-01
O	-0.8698E-02	-0.2026E-01	-0.4559E-01	0.3689E-01	0.3268E-01

\*\* TOTAL \*\* I=INSIDE C=CENTER O=OUTSIDE

	SX	SY	SZ	SXY	SYZ	SXZ
I	8.119	-0.5397	4.175	0.1225	-0.1871E-01	0.1611E-01
C	8.199	-0.2626	4.756	0.1333	-0.1568E-01	-0.1587
O	8.250	-0.4903E-01	5.220	0.1186	-0.3212E-01	-0.3176

	S1	S2	S3	SINT	SEQV	TEMP
I	8.121	4.175	-0.5416	8.662	7.511	0.000
C	8.208	4.748	-0.2648	8.473	7.379	
O	8.285	5.187	-0.5087E-01	8.336	7.298	0.000

设计压力条件下路径 2-2 分析:

PRINT LINEARIZED STRESS THROUGH A SECTION DEFINED BY PATH= 2-2 DSYS= 0

\*\*\*\*\* POST1 LINEARIZED STRESS LISTING \*\*\*\*\*  
 INSIDE NODE = 96812 OUTSIDE NODE = 97257

LOAD STEP 1 SUBSTEP= 1  
 TIME= 1.0000 LOAD CASE= 0

THE FOLLOWING X, Y, Z STRESSES ARE IN THE GLOBAL COORDINATE SYSTEM.

\*\* MEMBRANE \*\*

	SX	SY	SZ	SXY	SYZ	SXZ
	7.089	4.625	7.880	2.371	-2.150	-7.097

	S1	S2	S3	SINT	SEQV	
	15.53	3.707	0.3588	15.17	13.80	
** BENDING ** I=INSIDE C=CENTER O=OUTSIDE						
	SX	SY	SZ	SXY	SYZ	SXZ
I	-1.582	-4.491	-1.506	2.083	-1.819	0.5574
C	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
O	1.582	4.491	1.506	-2.083	1.819	-0.5574
	S1	S2	S3	SINT	SEQV	
I	-0.2828	-0.9880	-6.309	6.026	5.706	
C	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
O	6.309	0.9880	0.2828	6.026	5.706	
** MEMBRANE PLUS BENDING ** I=INSIDE C=CENTER O=OUTSIDE						
	SX	SY	SZ	SXY	SYZ	SXZ
I	5.506	0.1338	6.374	4.454	-3.969	-6.540
C	7.089	4.625	7.880	2.371	-2.150	-7.097
O	8.671	9.116	9.386	0.2889	-0.3308	-7.655
	S1	S2	S3	SINT	SEQV	
I	14.89	-0.4763	-2.400	17.29	16.41	
C	15.53	3.707	0.3588	15.17	13.80	
O	16.72	9.091	1.365	15.35	13.30	
** PEAK ** I=INSIDE C=CENTER O=OUTSIDE						
	SX	SY	SZ	SXY	SYZ	SXZ
I	-0.1021	0.8015	0.7759	-0.5844E-01	0.2615	-0.2138
C	0.2012	-0.4817	-0.4162	0.1176	-0.1768	0.1722
O	-0.6729	0.9456	0.3105	-0.3133	0.4443	-0.2993
	S1	S2	S3	SINT	SEQV	
I	1.082	0.5451	-0.1514	1.233	1.071	
C	0.2531	-0.2747	-0.6750	0.9281	0.8063	
O	1.264	0.9809E-01	-0.7788	2.043	1.775	
** TOTAL ** I=INSIDE C=CENTER O=OUTSIDE						
	SX	SY	SZ	SXY	SYZ	SXZ
I	5.404	0.9353	7.150	4.396	-3.707	-6.754
C	7.290	4.143	7.464	2.489	-2.327	-6.925
O	7.998	10.06	9.696	-0.2441E-01	0.1135	-7.954
	S1	S2	S3	SINT	SEQV	TEMP
I	15.34	-0.4252E-01	-1.807	17.15	16.34	0.000
C	15.34	3.114	0.4445	14.89	13.75	
O	16.85	10.06	0.8475	16.00	13.91	0.000

设计压力条件下路径 3-3 分析:

PRINT LINEARIZED STRESS THROUGH A SECTION DEFINED BY PATH= 3-3 DSYS= 0

\*\*\*\*\* POST1 LINEARIZED STRESS LISTING \*\*\*\*\*  
 INSIDE NODE = 28456 OUTSIDE NODE = 98199

LOAD STEP 1 SUBSTEP= 1  
 TIME= 1.0000 LOAD CASE= 0

THE FOLLOWING X, Y, Z STRESSES ARE IN THE GLOBAL COORDINATE SYSTEM.

**\*\* MEMBRANE \*\***

	SX	SY	SZ	SXY	SYZ	SXZ
	7.293	6.203	3.465	6.098	-2.210	-3.764
	S1	S2	S3	SINT	SEQV	
	14.53	2.256	0.1781	14.35	13.43	

**\*\* BENDING \*\* I=INSIDE C=CENTER O=OUTSIDE**

	SX	SY	SZ	SXY	SYZ	SXZ
I	2.090	4.318	2.468	1.996	1.447	1.190
C	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
O	-2.090	-4.318	-2.468	-1.996	-1.447	-1.190
	S1	S2	S3	SINT	SEQV	
I	6.371	1.682	0.8234	5.547	5.172	
C	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
O	-0.8234	-1.682	-6.371	5.547	5.172	

**\*\* MEMBRANE PLUS BENDING \*\* I=INSIDE C=CENTER O=OUTSIDE**

	SX	SY	SZ	SXY	SYZ	SXZ
I	9.382	10.52	5.933	8.094	-0.7627	-2.574
C	7.293	6.203	3.465	6.098	-2.210	-3.764
O	5.203	1.885	0.9969	4.102	-3.657	-4.954
	S1	S2	S3	SINT	SEQV	
I	18.50	5.944	1.397	17.10	15.34	
C	14.53	2.256	0.1781	14.35	13.43	
O	11.56	-0.8525	-2.617	14.17	13.38	

**\*\* PEAK \*\* I=INSIDE C=CENTER O=OUTSIDE**

	SX	SY	SZ	SXY	SYZ	SXZ
I	-0.9295	1.987	0.5379	0.7515	0.5972	0.4642
C	0.2533	-0.7783	-0.1885	-0.2016	-0.5251E-01	-0.1522
O	-0.2406	1.412	0.4591	0.2680	0.4646E-01	0.1409
	S1	S2	S3	SINT	SEQV	
I	2.425	0.3435	-1.173	3.598	3.129	
C	0.3295	-0.2164	-0.8266	1.156	1.002	
O	1.459	0.4773	-0.3058	1.765	1.532	

**\*\* TOTAL \*\* I=INSIDE C=CENTER O=OUTSIDE**

	SX	SY	SZ	SXY	SYZ	SXZ
I	8.453	12.51	6.471	8.846	-0.1655	-2.110
C	7.546	5.425	3.276	5.897	-2.262	-3.916
O	4.962	3.297	1.456	4.370	-3.610	-4.813
	S1	S2	S3	SINT	SEQV	TEMP
I	19.71	6.755	0.9615	18.75	16.63	0.000

C	14.29	1.852	0.1082	14.18	13.39	
O	12.00	-0.2838	-2.005	14.01	13.23	0.000

液压试验条件下路径 4-4 分析:

PRINT LINEARIZED STRESS THROUGH A SECTION DEFINED BY PATH= 4-4      DSYS= 0

\*\*\*\*\* POST1 LINEARIZED STRESS LISTING \*\*\*\*\*  
 INSIDE NODE = 60056      OUTSIDE NODE = 28963

LOAD STEP      1    SUBSTEP=      1  
 TIME=      1.0000      LOAD CASE= 0

THE FOLLOWING X, Y, Z STRESSES ARE IN THE GLOBAL COORDINATE SYSTEM.

\*\* MEMBRANE \*\*

	SX	SY	SZ	SXY	SYZ	SXZ
	16.37	-0.5704	9.412	0.2622	-0.3477E-01	-0.3007
	S1	S2	S3	SINT	SEQV	
	16.38	9.399	-0.5745	16.96	14.76	

\*\* BENDING \*\*    I=INSIDE C=CENTER O=OUTSIDE

	SX	SY	SZ	SXY	SYZ	SXZ
I	-0.1548	-0.5527	-1.074	0.1316E-01	0.9317E-02	0.3377
C	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
O	0.1548	0.5527	1.074	-0.1316E-01	-0.9317E-02	-0.3377
	S1	S2	S3	SINT	SEQV	
I	-0.4354E-01	-0.5532	-1.185	1.141	0.9902	
C	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
O	1.185	0.5532	0.4354E-01	1.141	0.9902	

\*\* MEMBRANE PLUS BENDING \*\*    I=INSIDE C=CENTER O=OUTSIDE

	SX	SY	SZ	SXY	SYZ	SXZ
I	16.21	-1.123	8.338	0.2754	-0.2546E-01	0.3703E-01
C	16.37	-0.5704	9.412	0.2622	-0.3477E-01	-0.3007
O	16.52	-0.1764E-01	10.49	0.2490	-0.4409E-01	-0.6384
	S1	S2	S3	SINT	SEQV	
I	16.22	8.338	-1.128	17.34	15.04	
C	16.38	9.399	-0.5745	16.96	14.76	
O	16.59	10.42	-0.2151E-01	16.61	14.55	

\*\* PEAK \*\*    I=INSIDE C=CENTER O=OUTSIDE

	SX	SY	SZ	SXY	SYZ	SXZ
I	0.2520E-01	0.4360E-01	0.1246E-01	-0.3040E-01	-0.1197E-01	-0.4798E-02
C	0.3081E-01	0.4511E-01	0.9888E-01	0.4402E-02	0.3416E-02	-0.1664E-01
O	-0.2175E-01	-0.8041E-01	-0.4692E-01	-0.1191E-01	-0.2016E-01	0.3163E-02
	S1	S2	S3	SINT	SEQV	
I	0.6703E-01	0.1891E-01	-0.4677E-02	0.7171E-01	0.6330E-01	
C	0.1028	0.4634E-01	0.2564E-01	0.7718E-01	0.6920E-01	
O	-0.1740E-01	-0.4051E-01	-0.9118E-01	0.7378E-01	0.6536E-01	



```

** TOTAL ** I=INSIDE C=CENTER O=OUTSIDE
      SX      SY      SZ      SXY      SYZ      SXZ
I  16.24    -1.079    8.351    0.2450   -0.3743E-01  0.3223E-01
C  16.40    -0.5253    9.511    0.2666   -0.3136E-01 -0.3174
O  16.50    -0.9806E-01  10.44    0.2371   -0.6425E-01 -0.6353
      S1      S2      S3      SINT     SEQV     TEMP
I  16.24     8.351    -1.083    17.32    15.02     0.000
C  16.42     9.497    -0.5295   16.95    14.76
O  16.57    10.37    -0.1017   16.67    14.60     0.000

```

液压试验条件下路径 5-5 分析:

PRINT LINEARIZED STRESS THROUGH A SECTION DEFINED BY PATH= 5-5 DSYS= 0

\*\*\*\*\* POST1 LINEARIZED STRESS LISTING \*\*\*\*\*  
 INSIDE NODE = 96812 OUTSIDE NODE = 97257

LOAD STEP 1 SUBSTEP= 1  
 TIME= 1.0000 LOAD CASE= 0

THE FOLLOWING X, Y, Z STRESSES ARE IN THE GLOBAL COORDINATE SYSTEM.

```

** MEMBRANE **
      SX      SY      SZ      SXY      SYZ      SXZ
14.18    9.250    15.76    4.743    -4.300    -14.19
      S1      S2      S3      SINT     SEQV
31.05    7.415    0.7175   30.34    27.60

** BENDING ** I=INSIDE C=CENTER O=OUTSIDE
      SX      SY      SZ      SXY      SYZ      SXZ
I  -3.165   -8.982   -3.012    4.165   -3.638    1.115
C   0.000    0.000    0.000    0.000    0.000    0.000
O   3.165    8.982    3.012   -4.165    3.638   -1.115
      S1      S2      S3      SINT     SEQV
I -0.5656   -1.976  -12.62    12.05    11.41
C   0.000    0.000    0.000    0.000    0.000
O  12.62     1.976    0.5656    12.05    11.41

** MEMBRANE PLUS BENDING ** I=INSIDE C=CENTER O=OUTSIDE
      SX      SY      SZ      SXY      SYZ      SXZ
I  11.01    0.2676    12.75    8.908   -7.938   -13.08
C  14.18     9.250    15.76    4.743   -4.300   -14.19
O  17.34    18.23    18.77    0.5777  -0.6617  -15.31
      S1      S2      S3      SINT     SEQV
I  29.78   -0.9525   -4.799    34.58    32.82
C  31.05     7.415    0.7175    30.34    27.60
O  33.43    18.18     2.730    30.70    26.59

** PEAK ** I=INSIDE C=CENTER O=OUTSIDE
      SX      SY      SZ      SXY      SYZ      SXZ
I -0.2041    1.603    1.552   -0.1169    0.5231   -0.4276

```

C	0.4024	-0.9634	-0.8323	0.2351	-0.3535	0.3445
O	-1.346	1.891	0.6209	-0.6266	0.8887	-0.5986
	S1	S2	S3	SINT	SEQV	
I	2.163	1.090	-0.3027	2.466	2.141	
C	0.5062	-0.5494	-1.350	1.856	1.613	
O	2.528	0.1962	-1.558	4.085	3.550	

\*\*\* TOTAL \*\*\* I=INSIDE C=CENTER O=OUTSIDE

	SX	SY	SZ	SXY	SYZ	SXZ
I	10.81	1.871	14.30	8.791	-7.415	-13.51
C	14.58	8.286	14.93	4.978	-4.653	-13.85
O	16.00	20.12	19.39	-0.4881E-01	0.2270	-15.91
	S1	S2	S3	SINT	SEQV	TEMP
I	30.68	-0.8504E-01	-3.615	34.29	32.67	0.000
C	30.68	6.229	0.8890	29.79	27.51	
O	33.70	20.12	1.695	32.00	27.82	0.000

液压试验条件下路径 6-6 分析:

PRINT LINEARIZED STRESS THROUGH A SECTION DEFINED BY PATH= 6-6      DSYS= 0

\*\*\*\*\* POST1 LINEARIZED STRESS LISTING \*\*\*\*\*  
INSIDE NODE = 28456      OUTSIDE NODE = 98199

LOAD STEP      1    SUBSTEP=      1  
TIME=      1.0000      LOAD CASE= 0

THE FOLLOWING X, Y, Z STRESSES ARE IN THE GLOBAL COORDINATE SYSTEM.

\*\*\* MEMBRANE \*\*\*

	SX	SY	SZ	SXY	SYZ	SXZ
	14.59	12.41	6.930	12.20	-4.420	-7.528
	S1	S2	S3	SINT	SEQV	
	29.05	4.511	0.3562	28.70	26.86	

\*\*\* BENDING \*\*\* I=INSIDE C=CENTER O=OUTSIDE

	SX	SY	SZ	SXY	SYZ	SXZ
I	4.180	8.636	4.936	3.992	2.894	2.379
C	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
O	-4.180	-8.636	-4.936	-3.992	-2.894	-2.379
	S1	S2	S3	SINT	SEQV	
I	12.74	3.363	1.647	11.09	10.34	
C	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
O	-1.647	-3.363	-12.74	11.09	10.34	

\*\*\* MEMBRANE PLUS BENDING \*\*\* I=INSIDE C=CENTER O=OUTSIDE

	SX	SY	SZ	SXY	SYZ	SXZ
I	18.76	21.04	11.87	16.19	-1.525	-5.149
C	14.59	12.41	6.930	12.20	-4.420	-7.528
O	10.41	3.771	1.994	8.204	-7.314	-9.907

	S1	S2	S3	SINT	SEQV
I	36.99	11.89	2.793	34.20	30.68
C	29.05	4.511	0.3562	28.70	26.86
O	23.11	-1.705	-5.235	28.35	26.76

\*\* PEAK \*\* I=INSIDE C=CENTER O=OUTSIDE

	SX	SY	SZ	SXY	SYZ	SXZ
I	-1.859	3.974	1.076	1.503	1.194	0.9284
C	0.5066	-1.557	-0.3771	-0.4032	-0.1050	-0.3044
O	-0.4813	2.824	0.9183	0.5360	0.9293E-01	0.2817

	S1	S2	S3	SINT	SEQV
I	4.850	0.6870	-2.346	7.196	6.258
C	0.6589	-0.4329	-1.653	2.312	2.003
O	2.918	0.9546	-0.6117	3.530	3.063

\*\* TOTAL \*\* I=INSIDE C=CENTER O=OUTSIDE

	SX	SY	SZ	SXY	SYZ	SXZ
I	16.91	25.02	12.94	17.69	-0.3310	-4.220
C	15.09	10.85	6.553	11.79	-4.525	-7.832
O	9.925	6.594	2.912	8.740	-7.221	-9.626

	S1	S2	S3	SINT	SEQV	TEMP
I	39.43	13.51	1.923	37.51	33.26	0.000
C	28.57	3.704	0.2164	28.36	26.78	
O	24.01	-0.5676	-4.010	28.02	26.47	0.000

## 附录 E

(资料性附录)

## 钎焊工艺规程和钎焊工艺评定报告

表 E.1 钎焊工艺规程

编制单位: _____	
钎焊工艺规程编号 (BPS No.): _____ 版本 _____ 日期 _____	
依据的钎焊工艺评定报告编号 (PQR No.): _____	
钎焊方法: _____ 类型: _____	
<b>钎焊接头</b> 接头型式 类型: _____ 间隙: _____ 搭接长度 最小: _____ 最大: _____	<b>接头简图</b>
<b>母材</b> 标准号: _____ 型号或等级: _____ 与标准号: _____ 型号或等级: _____ 相焊 母材厚度 最大: _____ 最小: _____ 其他: _____	<b>钎料</b> 标准号: _____ 型号: _____ 钎料形式: _____ _____
	<b>钎焊温度</b> 推荐的钎焊温度: _____ 钎焊保温时间: _____
<b>漫流位置</b> 允许的位置: _____ 漫流方向: _____ 钎料添加方法: _____ (表面添加、夹片、包覆等)	<b>钎剂, 气氛</b> 钎剂类型或商标名称: _____ 钎焊气氛类型: _____ 其他: _____
<b>钎焊技巧和其他</b> 零件清洗方法: _____ 压紧方式及压紧力: _____ 钎剂的施加: _____ 钎焊完成后的冷却方法: _____ 检查: _____	
编制: _____ 日期: _____	
审核: _____ 日期: _____	
批准: _____ 日期: _____	

表 E.2 钎焊工艺评定报告 (PQR)

编制单位: _____						
钎焊工艺规程编号 (BPS No.): _____						
钎焊工艺评定报告编号 (PQR No.): _____						
使用的钎焊方法: _____ 试件钎焊的日期: _____						
<b>母材</b>						
母材标准号: _____ 与母材标准号: _____						
母材型号或等级: _____ 与母材型号或等级: _____						
母材厚度: _____ 与母材厚度: _____						
钎料 钎料标准 标准号: _____ 型号: _____ 钎料产品形式: _____						
接头 搭接长度: _____ 接头类型: _____ 接头间隙: _____						
钎焊温度 钎焊温度范围: _____ 保温时间: _____						
<b>钎剂, 气氛</b>						
钎剂类型或商标名称: _____ 气氛类型: _____						
漫流位置 漫流的位置: _____ 漫流方向: _____						
钎后炉内冷却方法: _____						
<b>钎焊技巧和其他</b>						
零件清洗方法: _____ 压紧方式及压紧力: _____						
钎剂的施加方法: _____ 其他: _____						
拉伸试验				试验报告编号: _____		
试样编号	宽度	厚度	面积	极限总载荷	极限应力	失效位置
剥离或切片试验				试验报告编号: _____		
类型		结果		类型		结果
其他试验				试验报告编号: _____		
钎焊工姓名: _____ 钎焊工代号: _____						
试样评价者 (公司名称): _____						
编制: _____			日期: _____			
审核: _____			日期: _____			
批准: _____			日期: _____			

附录 F  
(资料性附录)  
焊接接头型式

F.1 本附录给出了板翅式热交换器常用焊接接头型式，供设计及制造时参考选用，焊缝坡口的基本形式及尺寸仅为推荐内容，具体坡口的选择（坡口角、间隙、钝边）取决于接头厚度、焊接位置和焊接方法，较大的间隙（≥1.5mm）可采用较小的坡口角。本附录中各类焊接接头的施工工艺应按 NB/T47014 评定合适后采用。

F.2 纵向及环向对接的焊接接头型式见图 F.1。

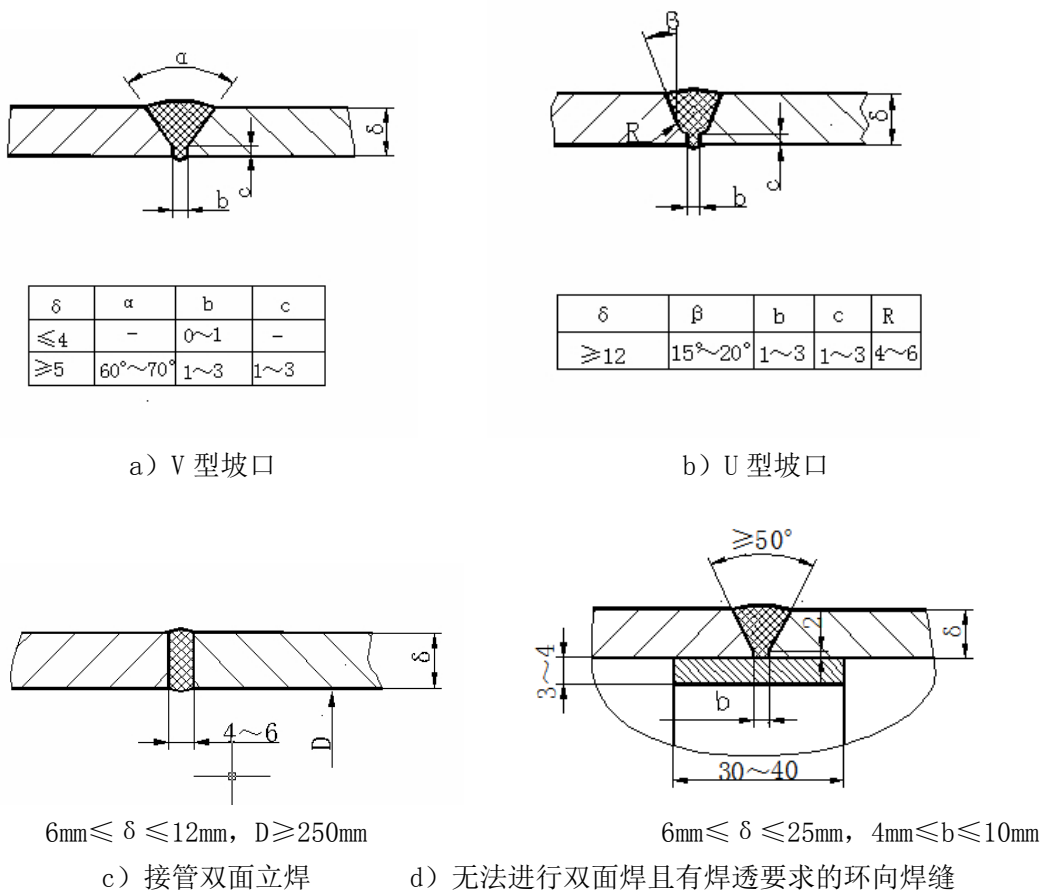
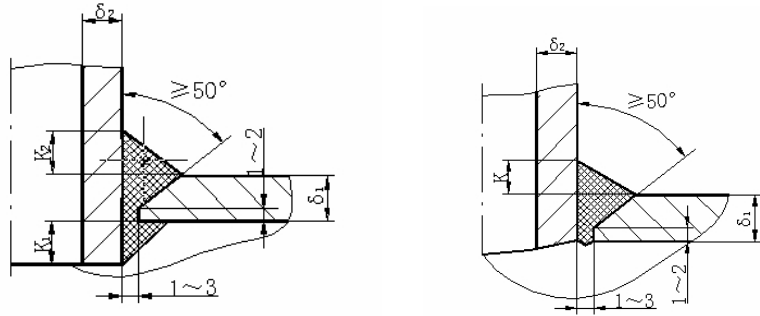


图 F.1 纵向及环向对接接头型式

F.3 封头体与接管焊接接头型式见图 F.2。

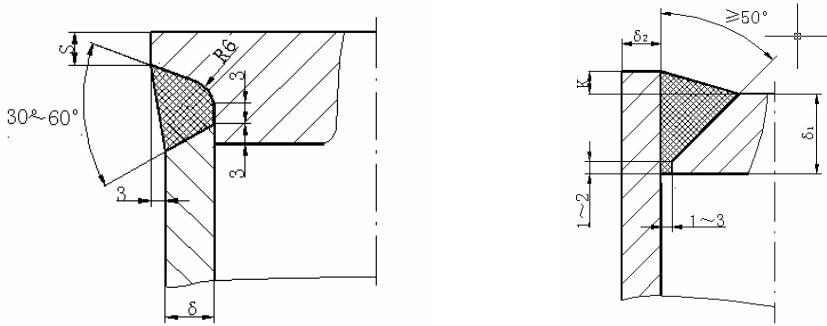


$K_1, K_2 \geq \delta$   
 $\delta$  为  $\delta_1, \delta_2$  中较小者  
 a) 封头体与接管插接

$K \geq \delta$   
 $\delta$  为  $\delta_1, \delta_2$  中较小者  
 b) 封头体与接管平接

图 F.2 封头体与接管焊接接头型式

F.4 接管与平端盖焊接接头型式见图 F.3。

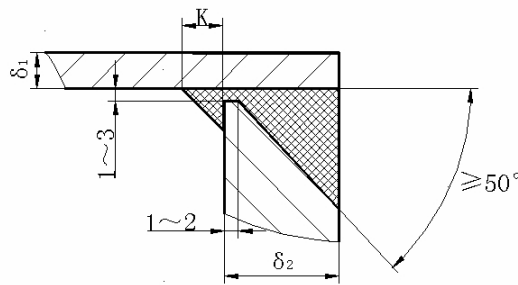


$S \geq \delta + 3$   
 a) 接管与平端盖

$K \geq \delta$ ,  $\delta$  为  $\delta_1, \delta_2$  中较小者  
 b) 接管与平端盖

图 F.3 接管与平端盖焊接接头型式

F.5 封头体与平端板焊接接头型式见图 F.4。



$K \geq \delta$ ,  $\delta$  为  $\delta_1, \delta_2$  中较小者

图 F.4 封头体与平端板焊接接头型式

F.6 封头体与芯体焊接接头型式见图 F.5。

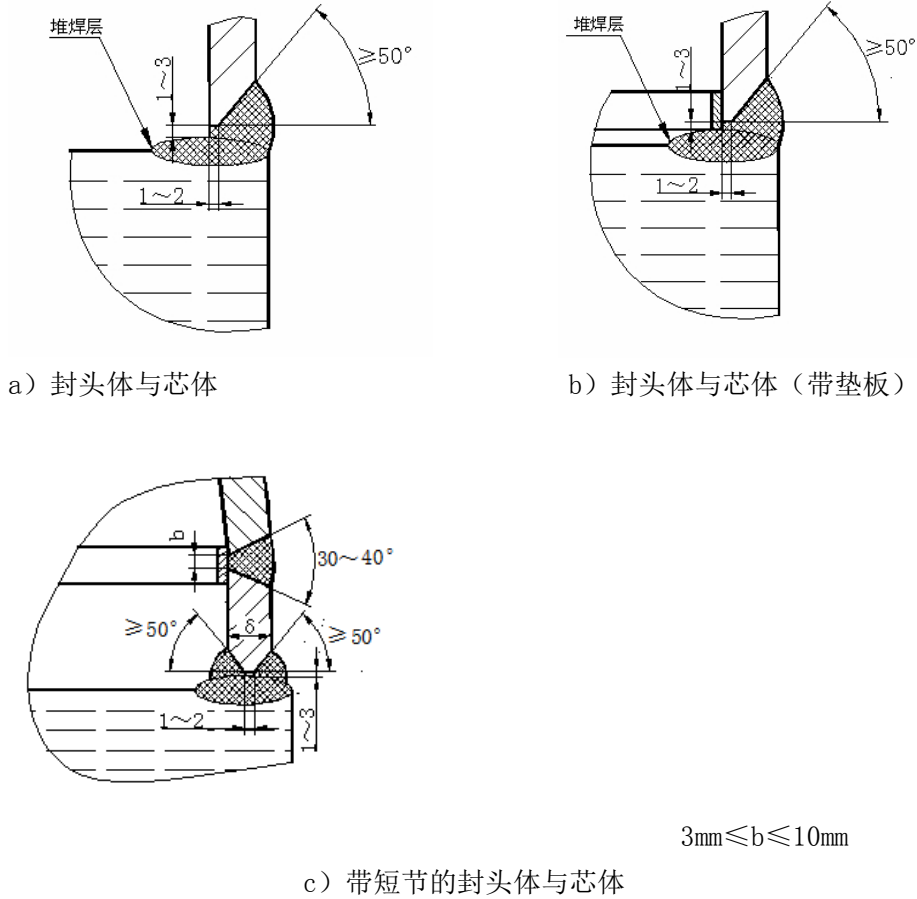


图 F.5 封头体与芯体焊接接头型式

F.7 中间隔板与封头体及芯体的焊接接头型式见图 F.6。

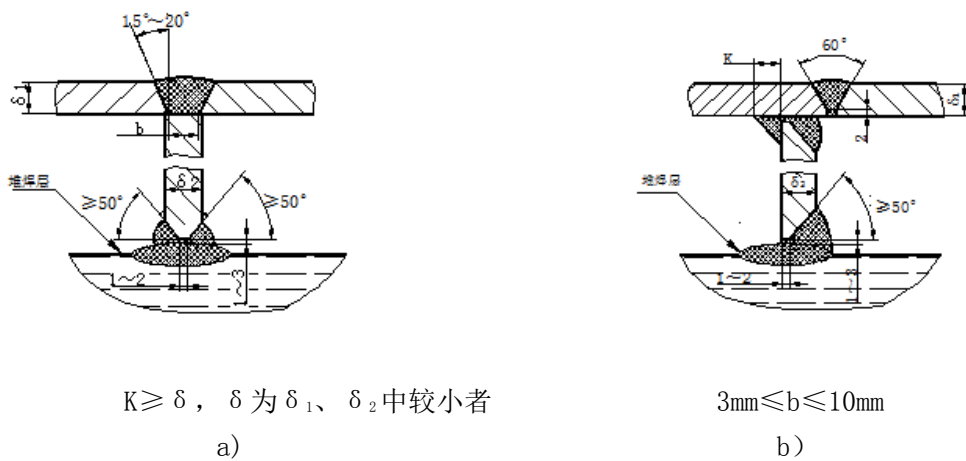


图 F.6 中间隔板与封头体、芯体焊接接头型式



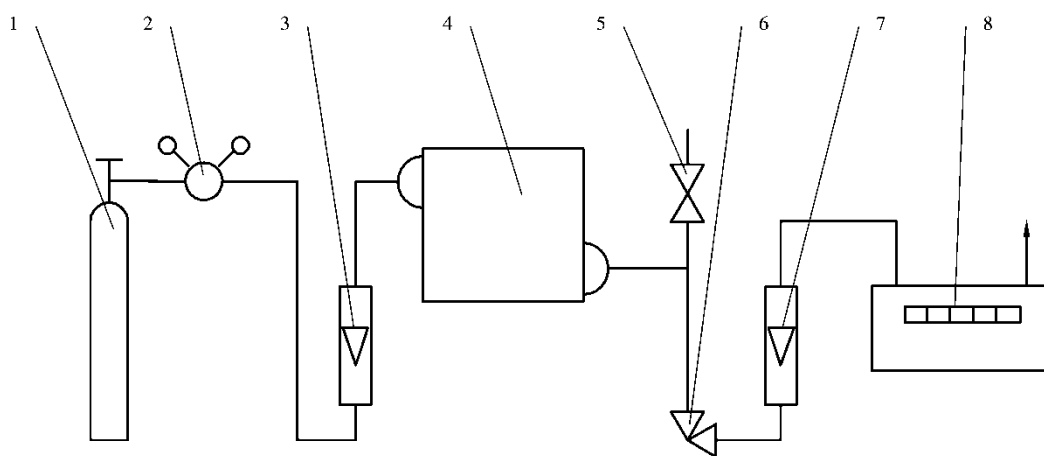
## 附录 G

### (规范性附录)

### 干燥度测试

#### G.1 概述

用露点仪测定板翅式热交换器各通道的干燥度。即各通道中通以一定压力、流量的气体流经露点仪测定该通道的露点，测试装置见图 G.1。



1—压缩气瓶； 2—减压表； 3、7—玻璃转子流量计；  
4—板翅式热交换器； 5、6—阀； 8—露点仪

图 G.1 露点测试装置简图

#### G.2 测试仪器和设备

测试仪器和设备如下：

- a) 压缩气瓶；
- b) 减压表；
- c) 露点仪， $\pm 1^{\circ}\text{C}$ ；
- d) 阀门；
- e) 玻璃转子流量计。

#### G.3 试验程序

板翅式热交换器经试压合格并烘干后，向各通道通入露点为 $-30^{\circ}\text{C}$ 以下的干燥、无油洁净的空气或惰性气体。用露点仪测出排出气体的露点。

#### G.4 试验评定

各通道露点低于 $-5^{\circ}\text{C}$ 为合格。如合同对露点值有要求时，按合同规定值执行。

## 附录 H

### (规范性附录)

### 热交换器气阻试验方法

#### H.1 范围

本标准适用于铝制板翅式热交换器的气阻性能测定。

本标准提出了采用高压风机对现场环境条件下热交换器气阻值的精确测量方法。

#### H.2 概述

向被测通道通入规定流量的测试用气体，测定该通道实验工况下进出口的压差，从而评定实现该通道设计工况下气阻值的可能性。一般采用吸入法，气阻测试装置见图 H.1。

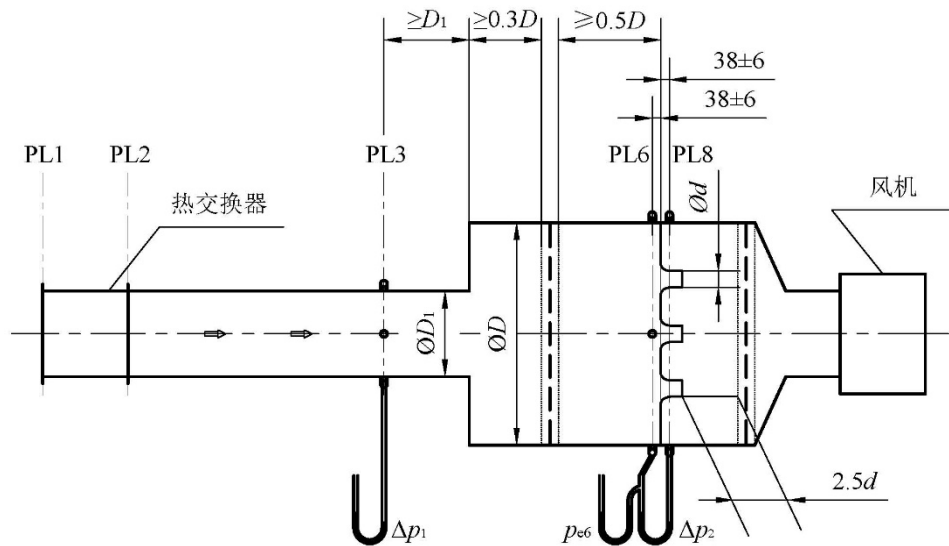


图 H.1 气阻试验装置简图

#### H.3 试验条件

H.3.3.1 试验用气体为无油洁净常温空气或惰性气体。

H.3.3.2 试件清洁度、干燥度应符合图样要求。

#### H.4 试验设备和仪器

- a) 温度计， $\pm 0.2^\circ\text{C}$ ；
- b) 压差计， $\pm 0.5\%FS$ ；
- c) 气压计， $\pm 40\text{Pa}$ ；
- d) 湿度计， $\pm 2\%RH$ ；
- e) 流量喷嘴，符合 GB/T 2624.1~2624.4 中的精度要求；
- f) 标准化风室；
- g) 风机，高压头罗茨风机或离心风机。

##### H.4.1 试验风室

标准化测试风室（图 H.1）横截面可以是  $D$  内径的圆形、 $b \times b$  的方形或  $h \times b$  的矩形。尺寸  $D$  是圆形风室的内径或带有内部尺寸  $h$  和  $b$  的矩形风室的当量直径，即

$$D = \sqrt{\frac{4hb}{\pi}} \quad (\text{H-1})$$

在热交换器出口风管测量热交换器气阻  $\Delta p_1$ 。出口风室配备测量流量用的多喷嘴。流量测定方法见 H.6.3。

#### H.4.2 试验风室内多喷嘴安装位置

多喷嘴应尽可能对称地定位。每个喷嘴的中心线距风室壁至少应该 1.5 倍喷嘴喉部直径。在同时使用多个喷嘴时，任意两个喷嘴中心之间的最小距离应为最大喷嘴喉部直径的 3 倍。

从最大喷嘴的出口平面到下游稳流装置的最小距离应是最大喷嘴喉部直径的 2.5 倍。喷嘴进口平面与上游和下游的压力测孔平面之间的距离为  $38 \pm 6\text{mm}$ 。

#### H.4.3 风道内平均压力的测定

在标准化风道内，进行压力测量的每一截面上，平均静压取自 4 个壁孔的静压平均值。当采用圆柱形风道时，4 个孔应等距分布在圆周上。当采用矩形风道时，该孔应位于 4 个侧面的中心位置。

### H.5 试验程序

按图 H.2 装接好设备、仪表和试件，启动风机，通过变频器调节流过试件的气体流量，并将其换算为设计工况下的流量。当气体流量与图样规定的值相差小于 2% 时，停止调节。稳定 3min；记录喷嘴进口温度  $T_1$ 、喷嘴出口温度  $T_2$ 、流量计上游段压力  $p_6$ 、热交换器气阻  $\Delta p_1$ 、喷嘴两端压差  $\Delta p_2$  等参数的数值（采集周期不大于 30s，每个参数记录数值不小于 20 个），计算各参数的平均值，并记录当时大气压  $p_a$  和相对湿度  $h_w$ 。

### H.6 计算

#### H.6.1 风室内的测试温度

取上述记录的平均值作为测试值，即  $\bar{T}_1$ 、 $\bar{T}_2$ 、 $\Delta \bar{p}_1$ 、 $\Delta \bar{p}_2$ 。  
风室中流经喷嘴的空气温度按式（H-2）求得

$$T_6 = (\bar{T}_1 + \bar{T}_2) / 2 \quad (\text{H-2})$$

#### H.6.2 空气密度

##### H.6.2.1 空气密度

风室内的空气密度按下列表达式求得

$$\rho_6 = \frac{p_6 - 0.378p_v}{287\Theta_6} \quad (\text{H-3})$$

式中：  $\Theta_6$ ——绝对温度，开尔文度， $\Theta_6 = T_6 + 273.15$ ；

$p_v$ ——空气中水蒸汽分压，Pa，测定方法见 H.6.2.2；

287——干空气的气体常数  $R$ , J/(kg·K);  
 0.378=  $(R_v - R) / R_v$ ,  $R_v=461$  是水蒸气的气体常数;  
 $p_6$ ——风室内的压力, Pa;  $p_6$ 按式 (H-4) 求得

$$p_6 = p_{e6} + p_a \quad (\text{H-4})$$

式中:  $p_a$ ——大气压, Pa。

### H. 6. 2. 2 水蒸汽分压 $p_v$ 的确定

直接测量空气相对湿度  $h_u$ , 按式 (H-5) 求得蒸汽分压  $p_v$

$$p_v = h_u \cdot (p_{sat})_{T_d} \quad (\text{H-5})$$

式中,  $(p_{sat})_{T_d}$  是干球温度  $T_d$  下的饱和蒸汽压力。表 H. 1 所列为温度  $0^\circ\text{C} \sim 100^\circ\text{C}$  时的饱和蒸汽压力值  $p_{sat}$ 。

$p_{sat}$  也可按下列表达式求得  
 在  $0^\circ\text{C} - 30^\circ\text{C}$  之间:

$$(p_{sat})_{T_d} = \exp\left(\frac{17.438T_d}{239.78 + T_d} + 6.4147\right) \quad (\text{H-6})$$

或者, 在  $0^\circ\text{C}$  和  $100^\circ\text{C}$  之间

$$(p_{sat})_{T_d} = 610.8 + 44.442T_d + 1.4133T_d^2 + 0.02768T_d^3 + 2.55667 \times 10^{-4}T_d^4 + 2.89166 \times 10^{-6}T_d^5 \quad (\text{H-7})$$

### H. 6. 3 试验流量计算

#### H. 6. 3. 1 质量流量

质量流量按式 (H-8) 求得

$$q_m = \varepsilon \pi \sum_{j=1}^n \left[ C_j \frac{d_j^2}{4} \right] \sqrt{2\rho_6 \Delta p_2} \quad (\text{H-8})$$

式中:  $n$ ——喷嘴数。

$\varepsilon$ ——膨胀系数, 由表 H. 2 中得到或按式 (H-9) 计算

表 H. 1 饱和水蒸汽压力  $p_{sat}$

干球温度 $T_d$	饱和水蒸汽压力	干球温度 $T_d$	饱和水蒸汽压力	干球温度 $T_d$	饱和水蒸汽压力
$^\circ\text{C}$	$10^5 \text{ Pa}$	$^\circ\text{C}$	$10^5 \text{ Pa}$	$^\circ\text{C}$	$10^5 \text{ Pa}$
0	0.006 112	33	0.050331	67	0.27349
0.01	0.006 117	34	0.053226	68	0.28578
1	0.006 571	35	0.056263	69	0.29854
2	0.007 059	36	0.059450	70	0.31178
3	0.007 580	37	0.062792	71	0.32551

表 H.1 饱和水蒸汽压力  $p_{sat}$  (续)

干球温度	饱和水蒸汽压力	干球温度	饱和水蒸汽压力	干球温度	饱和水蒸汽压力
4	0.008 135	38	0.066295	72	0.33974
5	0.008 725	39	0.069966	73	0.35450
6	0.009 352	40	0.073811	74	0.36980
7	0.010 019	41	0.077838	75	0.38565
8	0.010 728	42	0.082052	76	0.40207
9	0.011480	43	0.086462	77	0.41908
10	0.012279	44	0.091074	78	0.43688
11	0.013126	45	0.095897	79	0.45490
12	0.014025	46	0.100938	80	0.47376
13	0.014977	47	0.106205	81	0.49327
14	0.015985	48	0.111706	82	0.51345
15	0.017053	49	0.117450	83	0.53431
16	0.018183	50	0.123446	84	0.55588
17	0.019377	51	0.12970	85	0.57818
18	0.020640	52	0.13623	86	0.60122
19	0.021975	53	0.14303	87	0.62502
20	0.023385	54	0.15013	88	0.64961
21	0.024873	55	0.15752	89	0.67500
22	0.026444	56	0.16522	90	0.70121
23	0.028100	57	0.17324	91	0.72826
24	0.029846	58	0.18160	92	0.75618
25	0.031687	59	0.19029	93	0.78498
26	0.033625	60	0.19933	94	0.81469
27	0.035666	61	0.20874	95	0.84533
28	0.037815	62	0.21852	96	0.87692
29	0.040074	63	0.22869	97	0.90948
30	0.042451	64	0.23926	98	0.94304
31	0.044949	65	0.25024	99	0.97762
32	0.047574	66	0.26164	100	1.01325

$$\varepsilon = \left[ \frac{\kappa r_d^{2/\kappa}}{(\kappa-1)(1-r_d)} \right]^{0.5} \left[ \frac{1-\beta^4}{1-r_d^{2/\kappa}\beta^4} \right]^{0.5} \quad (\text{H-9})$$

其中,  $r_d = (p_u - \Delta p_2) / p_u = 1 - \Delta p_2 / p_u$ ,  $p_u$  表示喷嘴上游的平均压力;  $\kappa$  为等熵指数。

$C_j$ ——第  $j$  喷嘴的排出系数, 取决于喷嘴喉部雷诺数  $Re_d$ ;

$\beta$ ——喷嘴内径与上游段直径之比,  $\beta = d/D$ 。对于风室,  $\beta$  可取 0, 并且  $C_j = \alpha_j$ 。

$\alpha_j$  为喷嘴流出系数, 由表 H.3 中得到或按式 (H-10)、(H-11) 求得。

当喷嘴喉部长度  $L$  与喉部直径  $d$  的比值  $L/d=0.6$  时

$$\alpha = \left[ 0.9986 - \frac{7.006}{\sqrt{\text{Re}_d}} + \frac{134.6}{\text{Re}_d} \right] \left[ \frac{1}{\sqrt{1-\beta^4}} \right] = \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \quad (\text{H-10})$$

当  $L/d=0.5$  时

$$\alpha = \left[ 0.9986 - \frac{6.688}{\sqrt{\text{Re}_d}} + \frac{131.5}{\text{Re}_d} \right] \left[ \frac{1}{\sqrt{1-\beta^4}} \right] = \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \quad (\text{H-11})$$

其中,  $\text{Re}_d$  为对应于喷嘴出口直径的雷诺数。对于每一个喷嘴, 用式 (H-12) 估计喉道的雷诺数  $\text{Re}_{dj}$

$$\text{Re}_{dj} = \frac{\varepsilon C_j d_j \sqrt{2\rho_6 \Delta p_2}}{17.1 + 0.048 T_6} \times 10^6 \quad (\text{H-12})$$

用  $C_j=0.95$ , 第一次估计质量流量之后, 排出系数  $C_j$  可以计算和修正。

### H. 6. 3. 2 容积流量

容积流量按式 (H-13) 计算

$$q_v = \frac{q_m}{\rho_6} \quad (\text{H-13})$$

表 H. 2 用于风室内喷嘴的膨胀系数  $\varepsilon$

静压比 $r_d$	直径比 $\beta$					
	0	0.20	0.25	0.30	0.40	0.50
	膨胀系数 $\varepsilon$					
1.00	1.000 00	1.000 00	1.000 00	1.000 00	1.000 00	1.000 00
0.98	0.989 23	0.989 21	0.989 17	0.989 11	0.988 86	0.988 29
0.96	0.978 34	0.978 29	0.978 23	0.978 11	0.977 61	0.976 50
0.94	0.967 32	0.967 26	0.967 16	0.966 99	0.966 25	0.964 61
0.92	0.956 19	0.956 10	0.955 98	0.955 75	0.954 78	0.952 63
0.90	0.944 92	0.944 81	0.944 66	0.944 38	0.943 19	0.940 55

表 H. 3 用于风室内喷嘴的流量系数  $\alpha$

喷嘴流出系数 $\alpha$	雷诺数 $\text{Re}_d$		喷嘴流出系数 $\alpha$	雷诺数 $\text{Re}_d$	
	$L/d=0.5$	$L/d=0.6$		$L/d=0.5$	$L/d=0.6$
0.950	12 961	14 720	0.973	57 519	63 948
0.951	13 657	15 491	0.974	62 766	69 736
0.952	14 401	16 314	0.975	68 713	76 295
0.953	15 196	17 195	0.976	75 488	83 765
0.954	16 047	18 137	0.977	83 249	92 320
0.955	16 961	19 148	0.978	92 195	102180

表 H.3 用于风室内喷嘴的流量系数  $\alpha$  (续)

喷嘴流出系数 $\alpha$	雷诺数 $Re_d$		喷嘴流出系数 $\alpha$	雷诺数 $Re_d$	
	L/d=0.5	L/d=0.6		L/d=0.5	L/d=0.6
0.956	17 942	20 234	0.979	102 576	113 620
0.957	18 998	21 402	0.980	114 715	126 992
0.958	20 136	22 661	0.981	129 024	142 753
0.959	21 365	24 021	0.982	146 048	161 500
0.960	22 695	25 492	0.983	166 513	184 032
0.961	24 137	27 086	0.984	191 401	211 428
0.962	25 703	28 817	0.985	222 073	245 182
0.963	27 407	30 701	0.986	260 450	287 409
0.964	29 268	32 758	0.987	309 324	341 172
0.965	31 303	35 006	0.988	372 865	411 057
0.966	33 535	37 472	0.989	457 538	504 164
0.967	35 989	40 184	0.990	573 788	631 966
0.968	38 697	43 174	0.991	739 389	813 986
0.969	41 693	46 482	0.992	986 593	1 085 643
0.970	45 018	50 153	0.993	1 378 954	1 516 727
0.971	48 723	54 242	0.994	2 056 291	2 260 760
0.972	52 866	58 815	0.995	3 377 887	3 712 194

H.3.7.4 热交换器气阻  $\Delta h$ 

热交换器的气阻  $\Delta h$  由式 (H-14) 求得

$$\Delta h = \Delta \bar{p}_1 - p_y \quad (\text{H-14})$$

其中  $p_y$  为管路沿程压力损失, 包含了变径管阻力、弯管的局部阻力和风管直管段的沿程阻力等。

## H.3.7 试验评定

$\Delta h$  应符合设计图样的规定。

**附录 I**  
(资料性附录)  
**热交换器使用注意事项**

## 1.1 热交换器的热应力

### 1.1.1 总述

制造厂应根据预定设计压力来设计每台热交换器,并给买方提供现场可以施加在热交换器上的允许外加负荷的详细说明。热交换器应能适应它在工作时出现的所有负荷,包括压力负荷、外加负荷(即管路施加的力和力矩)和热致载荷产生应力。

在标准和非标准使用工况时,为使总的综合应力维持在允许极限内,本附录推荐一些方法,在使用热交换器时采取一些措施。

### 1.1.2 失效机理

1.1.2.1 热交换器的各部件是以各方向紧密刚性相互连接的,因此,在热交换器各部件内和部件间产生的局部金属温差会引起这些部件很大的热应力。

1.1.2.2 局部金属温差是因这些部件或部分部件随热量的输入(变化)以不同速度变热或冷却而引起的。部件内或部件间会产生瞬间膨胀或收缩,而焊接连接限制了构件因热而产生的移动,导致部件内的热应力。如果局部金属温差大,则热应力和其他外部负荷应力就会超过材料的屈服应力,并有可能超过材料的强度极限应力。

1.1.2.3 热交换器邻间部件相的温差,由下述原因有可能产生明显的热应力:

- a) 连续不稳定工况:如流量波动大,沸腾通道中流量不稳定,设备控制系统配备不适当等;
- b) 瞬变工况:如起动、停车、设备干扰、解冻、冷却和加温等。

1.1.2.3.1 连续的不稳定工况会产生超过屈服强度的循环应力,并会因疲劳可能产生失效后果。

1.1.2.3.2 瞬间变化工况时,如果综合应力超过材料的极限拉伸强度,部件就可能会出故障。

### 1.1.3 减少部件在使用时损坏或出故障的建议

- a) 制造商应把压力和外加负荷限制在允许限度范围内;
- b) 正如和其他任何热交换器一样,使用时也须使热交换器慢慢地进入使用工况或解冻工况,以避免过大热应力。尤其当导入热容量很大且传热迅速的液体或二相流时,这点非常重要,因此建议采用的起动速度、停车速度、冷却速度、加温解冻速度等要求可参见本标准第8章;
- c) 把热交换器任何地方两相邻通道间的温差限制在本标准第3章中推荐的温差范围内(或制造商推荐的温差范围内)。第3章中推荐的温差范围热交换器都通用。如需制造商提供专用热交换器,制造厂可提供其他温差范围;
- d) 应特别注意的是对那些在热交换器内工质需完全蒸发的用法。蒸发到完全干燥的程度会产生很大温差,同时还会引起流量的不稳定性。因此,应严格遵守制造厂对那些完全蒸发的热交换器所建议的允许温差,工艺设备的设计应确保流量的稳定;
- e) 设计和操作工艺设备以及与热交换器连接的管道,都要防止流量偏差和不稳定(例



如：进入换热器的液体出现间断性滞流等），这对沸腾流来说非常重要；

f) 限制任何流体周期的或经常交变的温度波动在 $\pm 1^{\circ}\text{C}/\text{min}$  范围内。

#### 1.1.4 热应力影响的总结

热交换器是一种能承受稳定流体间温差大的坚固耐用热交换器。由于热交换器是紧密刚性结构，因此，如果该热交换器处于间断性或连续性不稳定工况下工作，则会产生过大热应力，损坏热交换器。过大热应力可遵循上述几项建议来避免，这有助于确保热交换器的使用寿命。

### 1.2 热交换器的污垢及堵塞问题

#### 1.2.1 污垢问题

1.2.1.1 热交换器一般无污垢问题，因它通常用于空分、碳氢化合物分离和气体的液化。

1.2.1.2 如果产品压降无大变化而传热性能下降，则有可能是污垢问题。如出现这一问题，建议采用下述措施：

##### 1.2.1.3 污垢预防措施

1.2.1.3.1 在决定使用热交换器前，应检查液体（工质）是否存在固体和外来物，以防使用时形成沉积，特别是低温区更应注意。

1.2.1.3.2 考虑可能因工艺液体的杂质存在而引起的污垢是很重要的，典型例子就是致冷剂中使用的密封油。它会以固状膜附着在翅片表面上，并降低热交换器的传热性能。

1.2.1.3.3 不得使用含有微量氧化氮( $\text{NO}_x$ )的气体，它会聚积在设备的低温部分。经验表明，氧化氮不能从设备内排出，并有可能在设备加温时突然爆炸。

##### 1.2.1.4 清除污垢的办法

如果加温可以使污垢剂固/液转换，则通过改变热交换器的操作条件，加温污垢区则可以消除沉积物，如果采用加温法无效，则可采用溶剂清洁法。热交换器还可以通过改型或改变设计，和溶剂喷射系统结合在一起，从而冲洗被污染的表面。

#### 1.2.2 固体物质堵塞问题

1.2.2.1 固体颗粒进入热交换器内部阻塞翅片流道。

1.2.2.2 热交换器如被堵塞，造成各通道的流体分布不均匀，同时被堵塞通道的压降增加。

##### 1.2.2.3 预防措施

热交换器的堵塞问题可通过下述方法加以预防：

- a) 制造时，热交换器的接管或端部应保持封闭，直到接管或法兰与设备的管道工程连接完成；
- b) 清扫连接管路检查其清洁度，确保铁锈、碎片和灰尘等不能进入热交换器；
- c) 在可能会使工艺液体受污染的任何地方，在通道进口处安装过滤器。过滤器的孔径及排污可根据操作条件和技术要求由制造厂提出，网眼  $177\ \mu\text{m}$  (80 目) 能够覆盖大多数使用场合。

##### 1.2.2.4 堵塞的补救办法

1.2.2.4.1 如因某些原因而使热交换器堵塞（如没有安装过滤器，设备管路系统的清洗工艺错误，过滤设备失效等原因），将影响传热和压降（阻力）性能。

1.2.2.4.2 被堵塞的通道通常能很快鉴别出来，并制订维修计划，可在停车时实施。从热交换器中除去堵塞物的机械方法需要用空气或氮气吹除。

- a) 返吹被堵塞通道：在通道进口处装一爆破片，升高吹除空气（或氮气）压力，直至爆破片破裂（此操作应重复进行，直至吹除气中无微粒排出）；
- b) 或在热交换器出口处设置“排堵器”。它是由一只快开阀和定量带压空气组成。操作时，在热交换器芯体内产生冲击波而清除堵塞物。
- c) 如堵塞严重时，可在每通道口连接“排堵器”，采用排堵法来排除堵塞物。
- d) 采用溶剂和气体发泡法是利用充满装置的液体内产生的气所提供的机械能，来排除微粒。

### 1.3 腐蚀问题

#### 1.3.1 含水工艺环境

操作在水的冰点以下的热交换器的那些部位，其主要由水或含水而引起腐蚀现象，将会停止或不再进行。由于水的纯度变化及过冷现象，其冰点温度可能不是 0℃。上述冰点应考虑其他因素，例如解冻时。水的影响可分为三类：

##### 1.3.1.1 水在中性环境中的影响

1.3.1.1.1 热交换器可以被广泛应用于许多含水物的工艺过程中而存在水，这些水在热交换器中甚至在有卤素的环境中保持中性（pH 值 6~8），拥有中性水为工艺流体的热交换器，其适应性受工艺流体中含有重金属多少及沉积程度的影响。

1.3.1.1.2 热交换器应避免和铜、铜合金、铁、镍和铅等重金属一起使用，除非使用防腐剂以保护热交换器部件。当那些重金属的可溶性离子减少时，使用含有重金属的工艺流体而引起的孔蚀一般没有多大问题，通常含有重金属的酸性或中性水，作为工艺流体使用的铝制热交换器，比碱性工艺流体更有害。奥氏体不锈钢非常适于热交换器一起使用于中性水工艺流体中。

##### 1.3.1.2 水在酸性环境中的影响

通常用于热交换器的铝合金对酸性工艺流体或局部 pH 值在 4.5~6.0 范围的酸性工况都有抗蚀力。但如果在工艺流体中存在重金属或卤化物，则在上述 pH 值范围内的工艺流体需使用防腐剂。在 pH 值低于 4.5 以下时，就会因保护氧化膜的破裂而引起腐蚀。同时因铝制热交换器的零件或换热面和其他工艺装备中的贵金属之间产生电流偶合而产生电化腐蚀。在结构上重要的腐蚀是由于氧化膜破裂后，暴露的新生铝产生直接化学变化的结果。正如和中性环境一样，沉淀的形成会改变两方面的环境条件：腐蚀开始的条件和开始产生严重化学腐蚀的条件。

##### 1.3.1.3 水在碱性环境中的影响

热交换器的合金铝材料在轻度碱性环境中（pH 值 8~9）具有非常好的抗腐蚀性。碱性工艺流体不会使铝制部件表面变色，表面上的变黑仅仅是外表上的变化，它不会影响热交换器的结构和整体性能。如将铝制热交换器用于强碱环境中（pH 值 >9），则须仔细分析和考虑

所涉及的化学工艺流程及其他因素，如流程和设备承受的操作环境的流体杂质浓度和温度等，也应考虑。

### 1.3.2 含汞的工艺环境

1.3.2.1 如果不允许汞与热交换器接触，汞通常不会与铝起反应。但如果汞以液态并含水存在于热交换器内，则汞杂质会引起很多问题。汞的侵蚀如和另一种腐蚀过程联在一起，则后果是非常严重的。

1.3.2.2 另一个可能因工艺流体中存有汞而引起的问题就是：汞会对有高含量镁的铝合金起反应，汞能在无水情况下迅速与合金铝中的镁基第二相反应。如果设备的零件设计没有考虑这些问题和条件时，将有助于汞的腐蚀破坏，并在比无汞条件下所需应力低的水平下产生损坏。

1.3.2.3 许多热交换器因采用了有效的保护措施，可成功地使用于含汞流体中的场合。买方可用市场上购买到的装置来清除原料气体中的汞。操作人员也可采用一些特殊封闭方法，如冶金中采用氮封来制止和避免水汽。如解冻时长时间将温度升到 100℃ 以上，以避免和制止水汽的产生。

1.3.2.4 制造商对于含汞的设备可提供一些详细的供选择的方案，如设计部件时能设法消除汞的形成和堆积，设法避免使用反应敏感的合金。如这些办法都无法实行，则可采用一些预防措施，以隔离或保护含镁合金不受汞的侵蚀。

### 1.3.3 大气或环境腐蚀

任何装置的热交换器一般没有明显的受大气腐蚀的迹象。但如果把热交换器放在有温度变化的潮湿环境中，热交换器表面就会有因湿汽的凝结而引起的轻微自然腐蚀。

如将热交换器暴露在含有盐分的水雾或含盐大气的环境中，例如将热交换器长期存放在位于沿海地区的现场期间或海上运输而没有适应海运的包装期间，则应采取特殊保护措施。如果成套海上运输热交换器，热交换器到达现场后，则应立即用低氯水（含氯量小于 25mg/L）冲洗热交换器的所有表面，制造厂应告知有关冲洗热交换器单元的详细方法。冲洗后，表面应彻底晾干。

由于很难确保任一热交换器的绝热部件不漏水。因此，使热交换器不暴露在海水或其他形式的盐水中是很重要的。这些盐水有可能被吸收积聚在热交换器绝热部件和金属面之间，从而引起暴露面的腐蚀。自来水在这些条件下也有可能产生腐蚀现象，因此买方应与制造商就芯体干燥的方法取得联系。

### 1.3.4 其他腐蚀对热交换器影响

就安全使用热交换器问题，还可能存有许多腐蚀环境，但本附录不可能阐明所有的腐蚀性。因此，就流体或工艺工况对热交换器的腐蚀作用存有什么不明之处，可与制造厂联系，以便获得特殊说明。

### 参考文献

- [1] GB/T 1804 一般公差 未注公差的线性和角度尺寸的公差
- [2] GB/T 3190-2008 变形铝及铝合金化学成分
- [3] GB/T 3191—2010 铝及铝合金挤压棒材
- [4] GB/T 3195—2008 铝及铝合金拉制圆线材
- [5] GB/T 3246.1 变形铝及铝合金制品显微组织检验方法
- [6] GB/T 3246.2 变形铝及铝合金制品低倍组织检验方法
- [7] GB/T 8063—1994 铸造有色金属及其合金牌号表示方法
- [8] GB/T 9438—2013 铝合金铸件
- [9] GB/T 10858—2008 铝及铝合金焊丝
- [10] GB/T 16474-2011 变形铝及铝合金牌号表示方法
- [11] HG/T 20592~20635—2009 钢制管法兰、垫片、紧固件
- [12] GB/T 228 金属材料 室温拉伸试验方法
- [13] GB/T 229 金属材料 摆锤冲击试验方法
- [14] GB/T 232 金属材料 弯曲试验方法

NB/T 47006 《铝制板翅式热交换器》  
(征求意见稿)

编制说明

2017年11月

# NB/T 47006《铝制板翅式热交换器》编制说明

## 一、标准制修订计划来源与立项情况

### 1. 计划来源

根据国家能源局国能科技[2015]283号“国家能源局关于下达2015年能源领域行业标准制（修）订计划的通知”安排，对NB/T 47006-2009《铝制板翅式热交换器》行业标准进行修订（项目编号：能源20150537）。

### 2. 修订标准的目的

现行的NB/T 47006-2009《铝制板翅式热交换器》于2009年12月1日发布，2010年5月1日实施，颁布实施已七年。该标准的发布实施填补了当时国内铝制板翅式热交换器行业标准的空白，对铝制板翅式热交换器行业技术进步和产品质量的提高起到了巨大的促进作用，有效地保障了铝制板翅式热交换器产品的安全运行。

铝制板翅式热交换器作为一种节能设备，其应用范围越来越广泛。近年来，铝制板翅式热交换器的设计、制造技术进步显著，新技术、新工艺不断涌现。应用领域的不断扩大和设备大型化的需求，出现了压力更高、温度更高及更低、新材料等一系列铝制板翅式热交换器，有些已大大超出了原标准的使用范围；为满足铝制板翅式热交换器的发展需要，对原标准进行修订已是当务之急。

### 3. 指导思想

由于铝制板翅式热交换器的产品特点及产品应用的局限性，该产品虽然有很高的传热特性，但应用领域一直未得到很广泛的应用，其高能效特性未得到彰显。

本标准修订过程中力求做到产品安全性有保障，产品零部件标准化进一步加强，作为非标产品，从标准化加工制造工艺入手，加强特殊过程的管理。同时尽可能做到产品性能可表述、易测量、好评价、能推广，为板翅式热交换器的推广应用提供技术支撑，促进行业发展。

## 二、修订标准的原则

为达到协调铝制板翅式热交换器制造方、使用方、设计方、主要零部件供应方、安全管理方以及其他利益相关方需求，规范市场竞争环境、保证产品质量、确保公共安全的目的，充分展现板翅式热交换器高效节能的特点，促进行业发展，本标准在编制过程中遵循以下原则：

### （1）性能原则

在规定技术要求时坚持性能优先原则，能用性能特性表达时，在规定要求时应注意采用的方法和实施手段所允许的选择性，尽可能做到选择余地越大越好。只有在

采用性能特性确立指标时，检测费时费力，不如描述特性的检测方便才选择用描述特性。当然为保证铝制板翅式热交换器产品安全，对于特殊过程实现不仅要求性能，同时要求全过程追踪管理。

## (2) 可证实性原则

标准中所规范的内容都应可以被证实的，标准中的指标要求尽可能具体化，其方法应明确，所有的指标要求能通过已有方法进行测量和比较。标准的要求应尽可能定量，少用或不用定性要求。通常体现可证实性原则的具体形式有以下几种。

- a. 指标尽量采用具体数值形式
- b. 尽可能通过试验得出某种结论
- c. 采用相对直观的具体要求

## (3) 满足市场需求原则

在制定标准时应考虑如何从技术角度支撑合同，如何保护使用者的安全使用等问题以满足贸易的需求。

## 三、修订过程

该标准本部分修订计划下达后，全国锅炉压力容器标准化技术委员会热交换器分技术委员会（以下简称“热交换器分会”）组织成立了标准编制工作组。2016年11月标准工作组在杭州召开标准修订启动工作会议；2017年6月，标准工作组在开封组织召开了标准草案定稿会议，来自主管机构、科研院所、质检机构、生产企业、使用单位等13名代表参加了会议，并于2017年10月完成标准草案的编写；2017年11月向社会征求意见。

## 四、主要修订内容

### 1.适用范围

本次修订根据铝制板翅式热交换器近年来的发展，将设计压力的范围从8.0MPa，调整为10MPa。虽有个别企业已可以生产更高压力的设备，但考虑到仍存在一些尚未证实，且不易推广的技术问题，故更高压力的设备，未列入本标准，但也为其给出了解决方案。

设计温度范围仍按材料允许的使用温度范围确定，同时考虑与相关法规的规定保持一致。

### 2.规范引用性文件

- 1) 更新了相关引用标准的版本，去除了标准正文中未引用的标准；
- 2) 对比所有引用标准的变化，逐项对比了引用标准改版对本标准产生的影响并在

编制过程予以考虑和修正。

### 3.术语和定义

相比 NB/T 47006-2009 标准，术语和定义章节依据 GB/T 1.1 的规定从原标准的总则中抽出，独立成章。

在 NB/T 47006-2009 标准术语和定义的基础上，根据目前企业实际生产情况和生产习惯调整了部分专有名词术语的定义。如将“板束”改为“芯体”等。

### 4.通用要求

通用要求章节的结构亦按照 GB/T 1.1 的要求对其结构接行了调整。

本部分总体修订较大，原标准的一般规定更改为通用要求，同时章条内容上也做到一致。

为配合 GB/T 151-2014 热交换器标准对该标准的统领，首次将 GB/T 151-2014 的要求引入本次修订中。

焊接接头系数的选取，制造方和使用方尚存在不同的看法，也希望在本次征求意见中得到充分讨论。

耐压试验压力也参照新版 GB 150 作了相应的修订。

图样应包含的信息主要参考了 API 662.2 的相关规定。

### 5.材料

材料章节进行了大幅的修订，将常用铝合金材料进行了罗列，保证了设计过程中的方便性及完整性。

### 6.设计

设计章节中，澄清了原标准中不明确的表述，例如“ $F$ ——接管到封头的内截面上所计算的合力， $N$ ”的表述中，“内截面”在实际工作中会引起歧义；原标准第5.8.1 结构，b) 如果需要维持一定的流速……，其中“一定的流速”的表述也不准确。

对于设计过程中行业普遍感到困难的应力分析计算，本次修订也增加了相关计算实例，以供设计者对照。

### 7.制造

对本章节从结构上依据制造加工的顺序进行了调整，将公差要求后移。同时对于铝制板翅式热交换器最为关键的部件——翅片钎焊过程的加工也试着给出工艺评定的相关格式，以供制造者在工作实践中借鉴。

### 8.安装与操作



安装与操作章节原标准的表述与GB/T1.1的要求不一致，本次修订重点对其进行了编辑性修改。

## **9.附录**

本版标准中附录充分体现标准性能优先原则，对原有性能测试方法进行修订，并从结构上将每一性能测试方法独立成章。