

中南大学

硕士学位论文

提高泡沫混凝土抗压强度的研究

姓名：王少武

申请学位级别：硕士

专业：化学工程

指导教师：陈振兴;贾元平

20051201

摘要

本文通过实验得出水泥掺加量多少和水化后的抗压强度决定了泡沫混凝土的抗压强度，掺加量越高，泡沫混凝土抗压强度越高；水泥标号越高，泡沫混凝土抗压强度越高。泡沫混凝土中水在满足水泥水化、硬化的前提下，水料比越小，混凝土抗压强度越高，反之亦然。在泡沫混凝土中掺入矿渣微粉，能提高泡沫混凝土的抗压强度，尤其在早强剂的作用下，效果更加明显，但过多的矿渣会带进更多的惰性组分，反而会降低强度，矿渣微粉的掺入量与合理的范围，一般每立方中混凝土不宜超过 100kg。无机早强剂 CaCl_2 、 Na_2SO_4 与三乙醇胺对泡沫混凝土的抗压强度有明显的促进作用，非常适合做泡沫混凝土的早强激发剂。其激发效果次序： $\text{三乙醇胺} + \text{Na}_2\text{SO}_4 > \text{三乙醇胺} + \text{CaCl}_2 > \text{三乙醇胺} > \text{Na}_2\text{SO}_4 > \text{CaCl}_2$ 。其中，0.1% 的三乙醇胺和 2.5% 的 Na_2SO_4 复掺的情况下，激发效果最好。

本文还探讨了泡沫混凝土的强度和导热系数与其配合比之间的关系，同时考察了粉煤灰、矿渣等水泥混合材的掺入对泡沫混凝土性能的影响。利用硅酸盐水泥和矿渣、粉煤灰及硅灰等混合材，采用预制气泡后混合的方法制备出高性能泡沫混凝土。当水泥的用量为 $280 \sim 650 \text{kg/m}^3$ ，粉煤灰为 $42 \sim 97 \text{kg/m}^3$ ，矿渣为 $64 \sim 146 \text{kg/m}^3$ ，硅灰为 $34 \sim 78 \text{kg/m}^3$ ，砂为 $0 \sim 920 \text{kg/m}^3$ 时制成的泡沫水泥混凝土的相应密度为 $430 \sim 1500 \text{kg/m}^3$ ，导热系数为 $0.16 \sim 0.75 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$ ，抗压强度为 $1.1 \sim 23.7 \text{ MPa}$ 。控制干燥密度 1500kg/m^3 ，选择适当的配合比并添加适量超塑化剂，泡沫混凝土的抗压强度可达 44.1 MPa 。用本方法制备的泡沫混凝土，由于新拌浆体具有极好的流动性，混凝土浇筑时无需机械振动捣实，特别适用于大体积现场浇筑工程和地下不规则空间的混凝土填充浇筑，也可以在工厂预制成砖块、砌块、墙板等建筑构件。

关键词：泡沫，混凝土，抗压强度，保温，轻质

ABSTRACT

In the thesis, the effects of cement and vesicant, ratio between water and solid materials, early intensifier and micron slag powder on the compression strength of cement-mortar foamed concrete have been studied. The relation between the compression strength of the net cement foamed concrete and its proportion, the relation between the compression strength of the cement-mortar foamed concrete and its proportion, the relation between the compression strength of the net cement foamed concrete and its proportion when different slag and coal cinder powder are mixed. The effects of two kinds of exciter, plaster of paris and sodium sulfate of the growth of intensity, especially forepart intensity of the cement-mortar foamed concrete have also been studied. The conclusions is deduced that the compression strength of the foamed concrete in different level may decrease if sand and admixtures are added into cement. However, if two kinds of exciter with 2% are added, the compression strength of the foamed concrete will increase 30% in 14 days.

Furthermore, the connection between the compression strength and thermal conductivity of the foamed concrete and its proportion has also been studied. Through pre-foaming process, foamed concrete with good performance has been prepared from Portland cement, slag, coal cinder powder, and silica powder. When its raw material consumption is as follow, cement $280\sim 650\text{kg/m}^3$, coal cinder powder $42\sim 97\text{kg/m}^3$, slag $64\sim 146\text{kg/m}^3$, silica powder $34\sim 78\text{kg/m}^3$, sand $0\sim 920\text{kg/m}^3$, the density of the foamed concrete is about $430\sim 1500\text{kg/m}^3$, its thermal conductivity is about $0.16\sim 0.75\text{W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$ and its compression strength is about $1.1\sim 23.7\text{MPa}$. If dry density is controlled to 1500kg/m^3 , with proper proportion and adding suitable super plasticizer, the compression strength can reach 44.1MPa . It has excellent flow ability and especially suitable for the application in case of massive foamed concrete site casting and in case of filling casting into underground irregular void of that foamed concrete produced by this process. Besides, it also may be widely used for the pre-casting building components like blocks, bricks and wall

panels.

KEY WORDS: foam, concrete, compression strength, thermal insulation, lightweight

原创性声明

本人声明，所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了论文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得中南大学或其他单位的学位或证书而使用过的材料。与我共同工作的同志对本研究所作的贡献均已在在论文中作了明确的说明。

作者签名：王亦武 日期：2005年12月 日

关于学位论文使用授权说明

本人了解中南大学有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留学位论文，允许学位论文被查阅和借阅；学校可以公布学位论文的全部或部分内容，可以采用复印、缩印或其它手段保存学位论文；学校可根据国家或湖南省有关部门规定送交学位论文。

作者签名：王亦武 导师签名 日期：2005年12月 日

第一章 综述

1.1 泡沫混凝土

泡沫混凝土是用机械的方法将泡沫剂水溶液制备成泡沫，再将泡沫加入含硅质材料、钙质材料、水及各种外加剂组成的浆体中，经混合搅拌、浇注成型、养护而成的一种多孔材料^[1-3]。泡沫混凝土是一种多孔混凝土，其内部均匀分布着大量微小的气孔，泡沫混凝土与加气混凝土有相似的外观结构，其主要物理力学性能及热工性能与加气温凝土相似，主要区别是其气孔在制品内形成的方式不同。加气混凝土是在料浆里掺入发气剂，利用化学反应产生气体使料浆膨胀，经硬化后形成多孔结构。而泡沫混凝土是将物理机械作用下产生的泡沫掺入料浆中混合均匀，经硬化后形成多孔结构。由于泡沫混凝土不需压蒸养护，设备投资省，同时可以成型各种形状制品。泡沫混凝土与普通混凝土在组成材料上的最大区别在于泡沫混凝土中没有普通水泥混凝土中使用的粗集料，同时含有大量气泡。因其内部含有大量封闭的细小气泡孔，与普通混凝土相比，具有体积密度小、重量轻，保温、隔热、隔音、耐火性能好等特点^[4]。正常养护条件下泡沫混凝土与普通混凝土物理力学性能比较如表1-1。

表1-1 泡沫混凝土与普通混凝土物理力学性能比较

项目	泡沫混凝土	普通混凝土
干密度/kg/m ³	300 ~ 1800	2200 ~ 2400
抗压强度/MPa	5 ~ 10.00	30 ~ 80
弯曲强度/MPa	1.00 ~ 0.70	3.0 ~ 8.00
弹性模量/GPa	30 ~ 1.20	20 ~ 30
干燥收缩/ $\times 10^{-6}$	1500 ~ 3500	600 ~ 900
导热系数/W/m·K	0.30 ~ 1.00	~ 2.00
抗冻融性/%	90 ~ 97	90 ~ 97
新拌流动性/mm	>200	~ 180

在国际上，泡沫混凝土的研究最早可以追溯到30年代^[59]。在中国，泡沫混凝土的研究和应用开始于80年代以后。而将粉煤灰用于泡沫混凝土的制造，则是近年发展起来的技术。泡沫混凝土的制备包括两项技术，即发泡技术（包括发泡剂）和成型技术。前者有赖于高效的发泡剂和发泡机械，后者则有赖于与特定的发泡剂相匹配的成型或浇注方法。早期的泡沫混凝土全部采用铝粉作为

发泡剂，成型时铝粉与混凝土的其他组分同时加入搅拌机，混合搅拌，然后在成型后的静停过程中完成发泡。发泡原理在于铝粉与混凝土中的碱性物质作用后产生氢气，结果在混凝土内留下气泡。由于铝粉与碱组分间的化学反应过程受体系中碱浓度、环境温度等多种因素的影响，最终制成的混凝土内气泡的数量、体积（也即容重）难以控制，而且由于发泡过程是在静停过程中完成的，混凝土沿竖向气泡的数量和孔径分布不均匀，制品质量难以控制。随着发泡剂种类由铝粉类向有机表面活性剂类、再向蛋白质类的发展，泡沫混凝土的制备技术和质量也相应得到发展^[6-7]。近年来，由于新型高性能发泡剂的问世，新的泡沫混凝土制备技术相继诞生。用新型高性能发泡剂替代原来的铝粉，在发泡剂的作用下借助于物理的方法制备的气泡具有细小、均匀、牢固的特点。由此法制备的泡沫混凝土不但具有孔隙细小、孔径分布均匀的特点，而且可以在浇注过程中任意调节和控制泡沫混凝土的比重，既可以预制，也可以现场浇注。

1.2 泡沫混凝土的生产

1.2.1 组成材料

泡沫混凝土的基本原料为水泥、石灰、水、泡沫，在此基础上掺加一些填料、骨料及外加剂。常用的填料及骨料为：砂、粉煤灰、陶粒、碎石屑、膨胀聚苯乙烯、膨胀珍珠岩、莱脱克细骨料，常用的外加剂与普通混凝土一样，为减水剂、防水剂、缓凝剂、促凝剂等。

组成材料 1—水泥：普通硅酸盐水泥，矿渣硅酸盐水泥，粉煤灰硅酸盐水泥等均可使用。水泥在泡沫混凝土中主要起胶结作用，是泡沫混凝土机械性能的基础。

组成材料 2—砂子：普通的河砂或山砂均可，以磨细砂为好。砂子在泡沫混凝土中主要起填充作用，同时砂子的加入有利于提高硬化泡沫混凝土的体积稳定性。

组成材料 3—发泡剂：用于制造泡沫混凝土的发泡剂主要有三种类型，即铝粉类，表面活性剂类和蛋白质类。目前，国际上普遍使用蛋白质类发泡剂，它的主要特点是发泡速度快，泡沫细小，泡沫尺寸均匀，泡沫稳定性好持续时间长。发泡剂有固态发泡剂也有液态发泡剂。

1.2.2 泡沫混凝土制备方法

目前泡沫混凝土的制备方法可以分为两种^[1]，一种是先制泡再与砂浆拌合的方法。另一种是混凝土拌合与发泡同时进行的方法。为叙述方便起见，称前一种方法为预制泡混合法，称后一种方法为混合搅拌法。预制泡混合法主要分四

道工序,即砂浆制备、泡沫制备、砂浆与泡沫混合。及混凝土浇筑;混合搅拌法主要包括三道工序,即含发泡剂水泥砂浆制备、预制浇筑和静停发泡。可以看到,两种方法最大的区别在于预制泡沫混合法是预先制作气泡后再与砂浆混合,然后用混合均匀稳定的泡沫砂浆进行现场浇筑或预制泡沫混凝土;而混合搅拌法则是首先制作含发泡剂的砂浆再预制浇筑,然后在静停过程中完成发泡。所以,一般情况下预制泡沫混合法制备好的泡沫砂浆具有良好的流动性可以远距离泵送,而混合搅拌法制备的砂浆则一般不能用于泵送和现场浇筑^[8-9]。

最近,日本采用蛋白质物添加适量的阳离子表面活性剂配成的混合发泡剂,采用现场浇注成型的工艺,研制成功现浇泡沫混凝土新工艺。其所用发泡液是在蛋白质中掺入0.1~5%的阳离子表面活性剂而配成,阳离子表面活性剂使用季铵盐。其制备方法有三种^[10-12]:一种是将水、蛋白质物、阳离子表面活性剂混合,经发泡剂机发泡,再注入水泥料浆中搅拌,制备泡沫水泥浆,现浇成型;一种是将水、蛋白质物、阳离子表面活性剂混合,经高速搅拌机发泡,再注入水泥料浆中,制备发泡水泥浆;一种是按第二种方法发泡,一边加入少量水泥,一边高速搅拌,制备发泡水泥浆。上述三种方法以第一种制备方法较好。上述制备方法生产的现浇混凝土不仅轻质、高强、耐火,更引人注目的是不需蒸压养护,现浇即可成型,节能效果显著^[39-43]。

1.3 泡沫混凝土的特性

1.3.1 轻质

泡沫混凝土的密度小,密度等级一般为300~1800kg/m³,常用泡沫混凝土的密度等级为300~1200kg/m³,近年来,密度为160kg/m³的超轻泡沫混凝土也在建筑工程中获得了应用。

1.3.2 保温隔热性能好

由于泡沫混凝土中含有大量封闭的细小孔隙,因此具有良好的热工性能,即良好的保温隔热性能,这是普通混凝土所不具备的^[13]。通常密度等级在300~1200kg/m³范围的泡沫混凝土,导热系数在0.08~0.3W/m·K之间。

1.3.3 隔音耐火性能好

泡沫混凝土属多孔材料,因此它也是一种良好的隔音材料,在建筑物的楼层和高速公路的隔音板、地下建筑物的顶层等可采用该材料作为隔音层^[14-16]。泡沫混凝土是无机质材料,不会燃烧,从而具有良好的耐火性,在建筑物上使用,可提高建筑物的防火性能。

1.3.4 其它性能

泡沫混凝土还具有施工过程中可泵送性能好,防水能力强,冲击能量吸收性能好,可大量利用工业废渣,价格低廉等优点。

1.4 泡沫混凝土的应用

与普通混凝土相比,无论是新拌泡沫混凝土浆体,还是硬化后的泡沫混凝土,都表现出许多与普通混凝土不同的特殊性能,从而使泡沫混凝土有可能被应用于一些普通混凝土不能胜任的具有特殊性能要求的场合^[17-18]。

泡沫混凝土中没有重质粗集料,而且相当部分体积由气泡占据,使其表现出显著的轻质特性,因而泡沫混凝土特别适用于高层建筑的内墙材料和其它非承重结构材料,以有效地减少高层建筑物的自重。由于泡沫混凝土的密度小,在建筑物的内外墙体、屋面、楼面、立柱等建筑结构中采用该种材料,一般可使建筑物自重降低25%左右,有些可达结构物总重的30~40%。而且,对结构构件而言,如采用泡沫混凝土代替普通混凝土,可提高构件的承载能力。因此,在建筑工程中采用泡沫混凝土具有显著的经济效益^[19-21]。

泡沫混凝土内包含的大量气泡赋予其低的导热系数和良好的隔音性能,从而特别适用于录音棚、播音室及影视制品厂房等对隔音要求较高的场合;而其隔热、防火、保温特性,则使其特别适用于寒冷地区或炎热地区房屋建筑的墙体或屋顶材料,以提高能量利用效率。

泡沫混凝土中大量气泡的引入还显著改善新拌泡沫混凝土浆体的流动性,使其表现出远远优于普通混凝土的性能。泡沫混凝土的这种高流动特性使其特别适用于大体积现场浇筑和地下采空区的填充浇筑工程。

此外,硬化泡沫混凝土的多孔低强和低弹性模量特性,使其能保持与周围邻接材料间的整体接触,很好地吸收和分散外来负荷产生的应力,因而特别适宜于用作高速公路路基或大型土木构筑物之间的填充材料。

泡沫混凝土还可用作管道保护及保温、矿山回填工程、补偿地基、夹心构件、防静电等,用途非常广泛^[22-25]。所以,可以说泡沫混凝土是一种多功能多用途的符合现代建筑特点和要求的环保型材料。

1.4.1 我国泡沫混凝土的应用现状

近年来,我国越来越重视建筑节能工作,随着与建筑节能有关政策的实施,墙体材料改革取得了显著的成就,节能材料倍受欢迎。泡沫混凝土以其良好的特性,已用于节能墙体材料中,在其它方面也获得了应用。

1.4.1.1 泡沫混凝土砌块

泡沫混凝土砌块是泡沫混凝土在墙体材料中应用量最大的一种材料^[26]。在我国南方地区,一般用密度等级为 $900\sim 1200\text{kg/m}^3$ 的泡沫混凝土砌块作为框架结构的填充墙,主要是利用该砌块隔热性能好和轻质高强的特点。尤以广东省应用最多,目前该省泡沫混凝土砌块的年用量达 60万m^3 。在北方,泡沫混凝土砌块主要用作墙体保温层。表1-2为广州市美城新型建材开发有限公司生产的泡沫混凝土砌块的性能指标。

表1-2 泡沫混凝土砌块性能

规格尺寸/mm	390 × 90 × 190 390 × 150 × 190 390 × 180 × 190
干密度/ kg/m^3	600 ~ 900
抗压强度/MPa	1.50 ~ 3.50
干燥收缩率/mm/m	<0.80
吸水率/%	<25
导热系数/ $\text{W/m}\cdot\text{K}$	0.22
隔音系数 90 mm	>40
/db 190 mm	>50
耐火极限 90 mm	>200
/min 190 mm	>400

哈尔滨建筑大学开发研制了聚苯乙烯泡沫混凝土砌块,并用于城市楼房建设。此种砌块是以聚苯乙烯泡沫塑料作为骨料,水泥和粉煤灰作胶凝材料,加入少量外加剂,经搅拌、成型和自然养护而成,其规格为 $200\times 200\times 200\text{mm}$,可用于内、外非承重墙体材料,也可用于屋面保温材料^[27]。它具有质量轻、导热系数小、抗冻性高、防火、生产简单、造价较低、施工方便等优点,其与烧结粘土砖的技术经济对比见表1-3。

表1-3 综合性能对比

材料品种	保温层厚度	保温层质量	导热系数	导热系数
	/mm	/ kg/m^2	/ $\text{W/m}\cdot\text{K}$	/ $\text{W/m}\cdot\text{K}$
烧结粘土砖	490	900	0.78	1.59
聚苯乙烯泡沫混凝土	200	80 ~ 90	0.10	0.50

1.4.1.2 泡沫混凝土轻质墙板

目前用于建筑物分户和分室隔墙的主要材料是GRC轻质墙板,由于其原料

价格较高,影响了其推广应用^[28]。中国建筑材料科学研究院采用GRC 隔墙板生产工艺结合固体泡沫剂和泡沫水泥的研究成果,开发出了粉煤灰泡沫水泥轻质墙板的生产技术,并得到了应用。该产品生产采用的原料如下:30~40%的粉煤灰,45~65%的硫铝酸盐水泥,0~15%的膨胀珍珠岩,以及一定体积的泡沫。与传统的GRC轻质墙板相比,采用泡沫混凝土生产技术,不但能明显降低产品的成本,而且大大改善了浆体的流动性,使成型更为方便。该产品(外观尺寸为2700mm×600mm×60mm)的物理力学性能见表1-4。

表1-4 泡沫混凝土轻质墙板物理力学性能

面密度 /kg/m ²	抗折力 /N	导热系数 /W/m·K	干缩率 /mm/m	空心率 /%	防火性能
<40	>1400	<0.20	<0.50	28	不燃

1.4.1.3 泡沫混凝土补偿地基

现代建筑设计与施工越来越重视建筑物在施工过程中的自由沉降^[29]。由于建筑物群各部分自重的不同,在施工过程中将产生自由沉降差,在建筑物设计过程中要求在建筑物自重较低的部分其基础须填软材料,作为补偿地基使用。泡沫混凝土能较好地满足补偿地基材料的要求。例如,在北京团结湖大厦的部分基础中,现场浇注了厚度为150mm、抗压强度在89MPa、密度<200kg/m³的泡沫混凝土,取得了良好的效果。据现场测试,此种低密度泡沫混凝土的强度可很好地控制在设计的范围内,且具有良好的压缩性。

1.4.2 国外泡沫混凝土应用的新进展

近年来,美国、英国、荷兰、加拿大等欧美国家以及日本、韩国等亚洲国家,充分利用泡沫混凝土的良好特性,将它在建筑工程中的应用领域不断扩大,加快了工程进度,提高了工程质量^[30-33]。

1.4.2.1 用作挡土墙

主要用作港口的岸墙。泡沫混凝土应用于岸墙后作轻质回填材料可降低垂直载荷,也减少了对岸墙的侧向载荷。这是因为泡沫混凝土是一种粘结性能良好的刚性体,它并不沿周边对岸墙施加侧向压力,沉降降低了,维修费用随之减少,从而节省很多开支。泡沫混凝土也可用来增进路堤边坡的稳定性,用它取代边坡的部分土壤,由于减轻了重量,从而就降低了影响边坡稳定性的作用力。用于减少侧向压力的泡沫混凝土的密度为400~600kg/m³。

1.4.2.2 修建运动场和田径跑道

使用排水能力强的可渗性泡沫混凝土作为轻质基础,上面覆以砾石或人造草皮,作为运动场用。泡沫混凝土的密度为800~900kg/m³。此类运动场可进行

曲棍球、足球及网球活动。或者在泡沫混凝土上盖上一层0.05mm厚的多孔沥青层及塑料层，则可作田径跑道用。

1.4.2.3 用作夹芯构件

在预制钢筋混凝土构件时可采用泡沫混凝土作为内芯，使其具有轻质高强隔热的良好性能。通常采用密度为 $400\sim 600\text{kg/m}^3$ 的泡沫混凝土。

1.4.2.4 用作复合墙板

用泡沫混凝土制作成各种轻质板材，在框架结构中用作隔热填充墙体或与薄钢板制成复合墙板。泡沫混凝土的密度通常为 600kg/m^3 左右。

1.4.2.5 管线回填

地下废弃的油柜、管线（内装粗油、化学品）、污水管及其它空穴容易导致火灾或塌方，采用泡沫混凝土回填可解决这些后患，费用也少。泡沫混凝土采用的密度取决于管子的直径及地下水位，一般为 $600\sim 1100\text{kg/m}^3$ 。

1.4.2.6 贫混凝土填层

由于使用可弯曲的软管，泡沫混凝土具有很大的工作度及适应性，因此它经常用于贫混凝土填层。如对隔热性要求不很高，采用密度为 1200kg/m^3 左右的贫混凝土填层，平均厚度为0.50m；如对隔热性要求很高，则采用密度为 500kg/m^3 的贫混凝土填层，平均厚度为0.10m~0.20m。

1.4.2.7 屋面边坡

泡沫混凝土用于屋面边坡，具有重量轻、施工速度快、价格低廉等优点。坡度一般为10mm/m，厚度为0.03m~0.20m，采用密度为 $800\sim 1200\text{kg/m}^3$ 的泡沫混凝土。

1.4.2.8 储罐底脚的支撑

将泡沫混凝土浇注在钢储罐（内装粗油、化学品）底脚的底部，必要时也可形成一凸形地基，这样可确保整个箱底的支撑在焊接时处于最佳应力状态，这一连续的支撑可使储罐采用薄板箱底，同时凸形地基也易于清洁，泡沫混凝土的使用密度为 $800\sim 1000\text{kg/m}^3$ 。

1.5 研究的目的意义

目前墙体材料改革与建筑节能已成为我国的基本国策，研制可取代红砖，并能满足国家建筑节能规范的新型墙体材料，已成为材料科研工作者的使命^[34]。

随着国务院墙改办规定大中城市从2003年7月1日起，在全国170个城市，山东省27个地市禁止生产使用实心粘土砖。由于我国在建筑中粘土砖用量大，全面禁止后必然导致建筑业对粘土砖替代产品的强劲需求，作为替代产品之一的

泡沫混凝土可大量使用粉煤灰、氧化铝赤泥等工业废料做填充材料，享受国家税收优惠政策，研究开发这种材料有利于保护环境和日益减少的土地资源，符合国家产业政策，其前景是非常广阔的^[35-37]。

这种新型建筑材料，重量轻、保温隔热性能好，价格低廉，目前已广泛应用于东欧各国，成为墙体材料的主导产品。推广使用这种新型墙体材料，不但能改善建筑功能，提高建设质量和施工效率，满足住宅产业现代化、功能化的需要，而且对保护耕地，有效利用现有工业固体废料资源，促进国民经济发展，提高资源利用率，开发资源利用新技术，实现对环境无害模式都具有重要意义，是我国实施可持续发展战略的一项重大举措。当前，推广使用这种新型复合发泡混凝土墙体材料，符合国家产业政策。

目前，泡沫混凝土墙材应用还不是很广泛，主要原因是墙材的抗压强度较低，在搬运过程中受挤压容易缺角少棱，砌筑的墙体尺寸准确性差。虽然目前泡沫混凝土砌块生产线国内已有多条，但是不同物料对比对混凝土性能造成的影响，还不是很清楚，本研究将致力于探讨影响泡沫混凝土抗压强度的因素，根据使用条件，调整配比，满足用户和施工的要求，加快推广应用，从而达到大量使用工业废弃物，保护环境；降低粘土砖用量，节约土地资源的目的。

第二章 实验用原料及研究方法

2.1 试验用原料

2.1.1 发泡剂

2.1.1.1 发泡剂的选择

发泡剂又称起泡剂，是能促进发生泡沫而形成闭孔或联孔结构材料的物质，通常产生气泡而制成泡沫制品的方法有两种，即物理发泡和化学发泡。物理方法是由发泡剂在机械搅拌下产生大量泡沫或用压缩空气的方法形成气泡分散于料浆中；而化学发泡是发泡剂在料浆中发生化学反应，放出气体而形成细小气泡。发泡剂又可分为金属和非金属两大类，金属发泡剂有锌粉、铝粉等，非金属发泡剂有碳化钙、双氧水、表面活性剂、蛋白质等^[38]。目前，国内发泡剂的品种主要有：松香胶发泡剂、废动物毛发泡剂、树脂皂类发泡剂、水解血胶发泡剂、石油硫酸铝发泡剂等。发泡剂总体上说不够理想，如质量偏低、功能偏少，尽管有些发泡倍数够大，但稳定性差、制品强度不高。日本、意大利进口的发泡剂多为蛋白质类，质量好。我国也有以动物蛋白质为主要原料的发泡剂，其发泡倍数及稳定性较好，但因原料来源有限，生产成本低。目前，加气混凝土使用铝粉作为发泡剂最为广泛。

本研究使用的发泡剂主要采用化学发泡法，在碱性条件下反应放出气体，不同类型的发泡剂所制成的制品性能相差很大，本试验采用 A：松香发泡液 B：蛋白质发泡液。

2.1.1.2 发泡剂的技术指标及测试方法

泡沫稳定性：用泡沫沉陷距衡量泡沫稳定性。泡沫发生后，其测量方法如下：取内径为 6cm、高 9cm 的容器（或用尺寸相近而容积约为 250cm³ 的容器），盛满新发生的泡沫，刮平表面，在泡沫上覆纸一张，平静地放在无风处，40 分钟后量取泡沫沉陷距。

起泡力：用泡沫高度衡量起泡力。取一定量的发泡剂，加一定量的水配成溶液，用 D60-2F 型电动搅拌机中速搅拌 10min，量取泡沫高度。

发泡倍数：泡沫体积大于发泡剂水溶液体积的倍数。

泌水量：泡沫破坏后所产生发泡剂水溶液体积。

技术要求：发泡倍数，大于 20 倍；1h 泡沫的沉降距，不大于 10mm；1h 泌水量，不大于 80ml，发泡剂可以促进水泥、石膏等胶凝材料的凝结，但必须保证有足够的操作时间。

2.1.2 粉煤灰

粉煤灰系燃煤电厂废弃物，到2004年，我国灰渣排放量达到4亿吨左右。由此产生的资源和环境问题将十分突出，如能利用粉煤灰做保温材料，可谓一举多得^[39]。粉煤灰是由各种颗粒机械混合而成的群体，其中多为球形玻璃体，比表面积较大，其主要化学成分为 SiO_2 、 Al_2O_3 以及少量 Fe_2O_3 、 CaO 、 MgO 等，矿物组成主要是玻璃相、莫来石相、石英、赤铁矿、磁铁矿及少量未燃烧碳粒。粉煤灰在混凝土中的作用可归结为化学和物理作用两个方面。化学作用指的是粉煤灰的火山灰效应，它可以是对混凝土不利的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 转化为有利的C-S-H组分。这种潜在的活性效应是随龄期的增长才会明显地表现出来。而粉煤灰的物理作用是指粉煤灰的危机疗效应与形态效应，它可以改善集料的级配、流动性，又可以增加混凝土德密实性^[13]。本实验所用粉煤灰为山东铝业股份有限公司热电厂一级粉煤灰，其化学成分列于表2-1。

表2-1 粉煤灰成分

组成	SiO_2	Fe_2O_3	CaO	Al_2O_3	MgO	Loss
含量/%	63.60	6.36	2.44	18.37	2.25	4.90

2.1.3 无机胶凝材料

无机胶凝材料是泡沫混凝土材料强度的主要来源，要求其早期强度高、初凝时间短，常用的有：普通硅酸盐水泥、硫铝酸盐水泥、铁铝酸盐水泥、火山灰质复合胶凝材料等均可作为泡沫混凝土的胶凝材料。泡沫混凝土是一种大灰比的流态混凝土，采用普通硅酸盐水泥时，水泥完全水化的理论水灰比为0.277左右，剩余的自由水量大、干缩大；采用硫铝酸盐水泥和铁铝酸盐水泥时，水泥完全水化的理论水灰比为0.447左右，剩余的自由水少，干缩小；另外，这两类水泥还有微膨胀的特点，可以弥补泡沫混凝土干缩大的特点，且这两类水泥具有早强特点，能使泡沫混凝土迅速凝结，降低泡沫破裂的机会，提高泡沫混凝土性能；火山灰质复合胶凝材料也有高水化、低干缩的特性，适合配制泡沫混凝土。当然，也可采用其它种类的快硬水泥。

本实验用的水泥是山铝水泥厂的P.O32.5R和P.O42.5R普通硅酸盐水泥及42.5硅酸盐水泥，其熟料成分以及物理性能见表2-2和表2-3：

表 2-2 水泥熟料化学成分

组成	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	f-CaO	SO ₃	总和
含量/%	20.30	6.13	3.86	64.92	2.29	0.96	1.00	95.60

表 2-3 水泥物理性能

品种	标准稠度 /dc	安定性	初凝 /h	终凝 /h	强度/MPa			
					3 天抗折	3 天抗压	28 天抗折	28 天抗压
P.O32.5R	27.00	合格	2:47	3:35	4.50	22.20	8.00	41.00
P.O42.5R	26.00	合格	2:28	3:10	5.00	27.00	9.00	50.10

2.1.4 其他材料

砂子：本实验采用软练标准砂。

矿渣：矿渣是高炉炼铁时产生的废渣，在高炉出渣口将熔融状态的渣倒入冲渣池，经水急冷后的高炉水淬矿渣。经粉磨后的即可得到磨细矿渣，一般的细度都在 400m²/kg 以上。

矿渣作为水泥的混合材早已使用于水泥生产中，但因其细度不够，活性远未被利用，只是充当微集料而已。我国的矿渣年产量达 8000 万吨，以前基本上只用于矿渣水泥中作混合材，在于水泥熟料共同混磨时，由于其硬度较大，实际在水泥中的细度还达不到水泥的平均细度，这就限制了其活性的发挥。如果将矿渣单独磨细到比表面积 400m²/kg 以上，其活性大大增加。将磨细矿渣直接混入混凝土中作混合料时，可使混凝土的多项性能的到大的改善。本实验采用磨细矿渣粉，细度为 2.6%，比面积 420m²/kg 的莱钢矿渣，成份见表 2-4。

表 2-4 矿渣的化学成分

组成	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	烧失量
含量/%	36.37	33.42	16.03	0.81	10.73	0.20

外加剂: 在配制高强、具有更大流动性混凝土时添加高效减水剂等外加剂, 即英国、澳大利亚、加拿大等国称为 Superplasticizer (超塑化剂)。本试验添加硅灰, 硅灰是铁合金厂利用高纯石英冶炼硅和硅铁合金时从烟道除尘中收集到的超细微粉末。形状为球状的玻璃体。具有极微细的粒径, 比表面积达 $20000\text{m}^2/\text{kg}$, 其平均粒径小于 $0.1\mu\text{m}$ 。质量好的硅灰 SiO_2 含量在 90% 以上。其中活性 SiO_2 达 40% 以上 (测其在饱和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 溶液中的溶解度来表示), 其活性很高。硅灰对混凝土的增强作用十分明显, 当硅灰内掺 10% 时, 混凝土的抗压强度可提高 25% 以上。但随着硅灰产量的增加, 需水量也增加, 混凝土粘度也增加, 硅灰的掺入还会加大混凝土的收缩, 因此硅灰的掺量一般在 5%-10% 之间。可以和粉煤灰、矿粉、减水剂等复合使用^[6]。发达国家广泛地用于高强性能混凝土中。试验用硅灰成分见表 2-5:

表 2-5 硅灰的物理、化学成分

密度/ g/cm^3	比表面积/ m^2/kg	$\text{Fe}_2\text{O}_3/\%$	$\text{CaO}/\%$	$\text{SiO}_2/\%$	$\text{Al}_2\text{O}_3/\%$
2.20	15000 ~ 30000	0.90	0.35	93.10	-

2.2 实验方法

2.2.1 泡沫的制备

采用高速搅拌机制泡。制泡技术参数: 搅拌机转速为 1200r/min 以上, 搅拌时间以泡沫达到均匀、细小、稳定为界限, 容积为 1m^3 的搅拌机制泡时间一般为 3~5min。

2.2.2 密度和抗压强度试验

试件尺寸 $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 100\text{mm}$, 养护环境湿度 100% (雾室)、温度 $20 \pm 1^\circ\text{C}$, 成型后带模养护 24h, 到达预定养护龄期 3d 前取出试件置入 120°C 烘箱连续烘干 3d 后立即测定密度; 参照 BS1881part4 和 ASTM C495, 测定抗压强度。密度和强度为 3 块平均值。

2.2.3 导热系数试验

试件尺寸 $305\text{mm} \times 305\text{mm} \times 50\text{mm}$, 养护方法和条件与抗压强度试样完全相同, 按照恒定热流法测定泡沫混凝土的导热系数 (参照 ASTM 177)。

2.2.4 泡沫混凝土的制备工艺

泡沫混凝土的制备包括砂浆的配制、泡沫的制备和泡沫混凝土的拌合与浇筑。根据要求的泡沫混凝土的容重、抗压强度、保温性能和隔音性能等选择适宜的水泥和砂子, 计算出适宜的配合比, 同时确定水灰比和其他外加剂的适宜

掺量,用适宜的搅拌机拌合砂浆或水泥浆;将发泡剂按规定比例稀释成水溶液,借助于发泡设备制备泡沫;根据要求的泡沫混凝土的容重按比例混合预先制备好的砂浆和刚刚制备好的泡沫,泵送或就地浇筑。其流程图如3-1所示。

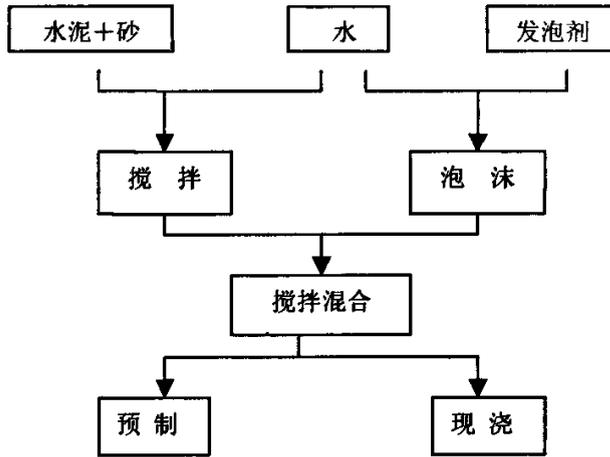


图2-1 预制泡混合法制备泡沫混凝土工艺流程

第三章 实验结果与分析

3.1 水泥和发泡剂对水泥-砂浆泡沫混凝土抗压强度的影响

水泥是泡沫混凝土的主要材料之一，它在水中硬化反应，把砂和其他材料牢固的胶结在一起，从而使泡沫混凝土产生强度^[40]。一般水泥砂浆的强度与水泥用量和水泥标号的关系为：

$$R_m = (K \cdot R_c \cdot C) / 1000$$

式中 R_m ——水泥砂浆的强度，MPa；

R_c ——水泥标号，MPa；

C ——砂浆中水泥用量， kg/m^3 ；

K ——系数一般在 0.70~0.99 之间。

即水泥砂浆混凝土的抗压强度与水泥标号和砂浆中水泥用量成正比关系。在建筑施工中，P.O32.5R 和 P.O42.5R 普通硅酸盐水泥使用最为普遍，因此在本次实验中用山铝牌这两种标号水泥。

泡沫混凝土所用的发泡剂主要有三种，即铝粉类、表面活性剂类和蛋白质类，铝粉类发泡剂在制备泡沫混凝土过程中产生的气泡不稳定，易上浮而破裂，表面活性剂类和蛋白质类形成的气泡较大，本试验采用两种进行试验，即 A：松香发泡液，B：蛋白质发泡液，从发泡效果看，蛋白质发泡液发泡速度快，泡沫小，尺寸均匀，稳定性好，持续时间长^[3]。

3.1.1 试验配比及数据

试验泡沫混凝土试配容重为 $800\text{kg}/\text{m}^3$ ，水料比：0.38，配比及数据见表 3-1。

表 3-1 试验泡沫混凝土配比

编号	水泥品种	发泡剂	水泥 /kg	砂子 /kg	水 /kg	泡沫剂 /ml	3 天抗压 强度 /MPa
1	P.O32.5R	A	109	610	207	4200	0.05
2	P.O42.5R	A	109	610	207	4200	0.15
3	P.O32.5R	B	109	610	207	4200	0.14
4	P.O42.5R	B	109	610	207	4200	0.46

3.1.2 数据分析

从上表可以看出,用 P.O32.5R 水泥配制的泡沫混凝土 3 天抗压强度仅为 P.O42.5R 水泥的 1/3。说明虽然气泡的引入降低了混凝土强度,但他对二者的影响是一致的,水泥做为泡沫混凝土的主要胶凝材料,其水硬化后的强度就决定了泡沫混凝土的强度,水泥标号越高,其水硬化后的强度也就越高,泡沫混凝土强度也就越高。这点与水泥砂浆混凝土相似。因此,要配制高抗压强度的泡沫混凝土材料,必须用高标号水泥,在以后的实验中,所采用的水泥均为 P.O42.5R 水泥。

从表中也可以看出在相同配比的情况下使用蛋白质发泡液的泡沫混凝土抗压强度高于使用松香发泡液的泡沫混凝土抗压强度。这主要是蛋白质发泡液形成的气泡细小、均匀分布于混凝土中,因而对混凝土强度影响小。气泡稳定的主要条件是气泡周围形成的液膜有一定的机械强度,使气泡在受到外力作用下能很快恢复原样而不被压迫,这要求发泡剂的分子有一定的链长,在分子内部,分子量大的分子的范德华力愈大,膜的机械强度愈大^[41]。松香发泡液主要是松香皂,其分子量就要比蛋白质要小,因此松香发泡液比蛋白质发泡液易破,从而影响了泡沫混凝土的抗压强度。

在以后的试验中,均采用 P.O42.5R 水泥与蛋白质发泡液。

3.2 水料比对水泥-砂浆泡沫混凝土抗压强度的影响

一般硬化水泥使得孔结构取决于混凝土的水料比和水泥的水化程度,水灰比越小,水泥石中的孔体积越小,强度越高。但泡沫混凝土的孔结构受水料比与气泡引入量决定,一方面,水料比的减少能减少空洞,提高强度;另一方面,气泡引入量的增加,增加了混凝土中的空洞,降低强度^[42-43]。

在配制相同容重的泡沫混凝土,根据配制计算公式,降低水料比就要提高发泡剂的掺入量(否则容重上升),水料比降低引起的密实度的提高被多产的气泡所削弱,从表 3-2 的数据中也证明了这一点。

表 3-2 试验泡沫混凝土配比及抗压强度

编号	水料比	水泥 /kg	砂子 /kg	水 /kg	泡沫剂 /ml	3 天强度 /MPa	3 天平均抗压 强度/MPa
5	0.38	109	610	207	4200	0.50	0.48
6	0.38	109	610	207	4200	0.46	
7	0.33	120	600	165.4	4500	0.49	0.51
8	0.33	120	600	165.4	4500	0.53	
9	0.30	144	576	141	4750	0.53	0.52
10	0.30	144	576	141	4750	0.51	
11	0.20	171	549	62.6	5150	0.51	0.53
12	0.20	171	549	62.6	5150	0.54	

由此可见，在配制相同容重的泡沫混凝土时，降低水料比的同时，气泡的引入量要增大，因此对泡沫混凝土抗压强度的影响，作用不是很大，从图 3-1 可以看出随着水料比降到 0.33 以下时，抗压强度增幅趋缓，砂浆和易性较差，为保持较好的和易性，在下面的试验中，泡沫混凝土的设计容重为 800kg/m^3 ，水料比：0.33。

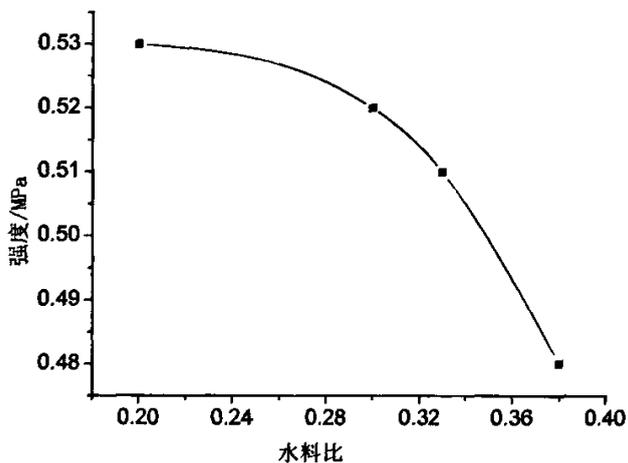


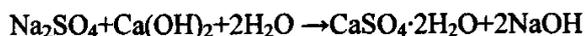
图 3-1 强度与水料比的关系

3.3 早强剂对水泥-砂浆泡沫混凝土强度的影响

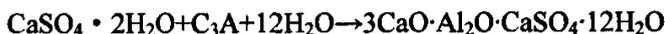
早强剂是加速混凝土早期强度发展的外加剂。混凝土早强剂可分为无机盐类、有机物类、复合型三类。无机盐类主要有氯化物、硫酸盐、硝酸盐及亚硝酸盐、碳酸盐等。有机物主要是指三乙醇胺、三乙丙醇胺、甲酸、乙二醇等。复合型是指有机和无机盐复合型早强剂。

CaCl_2 具有明显的早强作用，特别是低温早强和降低冰点作用。这主要是 CaCl_2 能与水泥中的铝酸三钙反应，在水泥微粒表面上生成水化氯铝酸钙 ($\text{C}_3\text{ACaCl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$)，具有促进水泥硅酸三钙与硅酸二钙的水化反应的作用，增强效果好于其他氯盐增强剂。当掺 1% 以下时对水泥的凝结时间无明显影响，掺 2% 时凝结时间约提前 2/3~2 小时，掺 4% 以上就会使水泥速凝。

硫酸钠又名元明粉、无水芒硝，易溶于水，在水泥水化时，与水泥水化产生的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 发生以下反应：



所生成的二水石膏颗粒细小，比水泥中原有的二水石膏更能加快水化反应：



使水化产物硫铝酸钙更快地生成，从而加快水化硬化速度。他的 1d 强度提高尤其明显。硫酸钠在水化反应中，由于生成了 NaOH ，使碱度有所提高，这对矿渣的激发作用有较明显的效果，因而比其他的硫酸盐激发效果好。由于早期水化物结构形成较快，结构致密成都较差一些，因而后期强度会略有降低。硫酸钠掺量有一个最佳控制量，一般在 1~3%，掺量低于 1% 早强作用不明显，掺量太大后期强度损失也大，一般在 1.5% 为宜。

在有机物类中，醇类、胺类均作早强剂，但最常用的是三乙醇胺，其分子中有 N 原子，它有一对未共用电子，很容易与金属离子形成共价键，发生络合，与金属离子形成较稳定的络合物，这些络合物在溶液中形成许多的可溶区，从而提高了水化产物的扩散速率，缩短水泥水化过程中的潜伏期，提高早期强度。此外，三乙醇胺在 $\text{C}_3\text{A}-\text{CaSO}_4-\text{H}_2\text{O}$ 的体系中，能加快钙矾石的生成，因而复合激发效果较好。当三乙醇胺掺量过大时，水泥矿物中 C_3A 与石膏在他的催化下迅速生成钙矾石而加快了凝结时间。三乙醇胺对 C_3S 、 C_2S 水化过程有一定抑制作用，这又使后期的水化产物得以充分地生长、致密，保证了混凝土后期强度的提高。三乙醇胺作为早强剂时，掺量为 0.02~0.05%，掺量 > 0.1% 则有促凝作用^[10]。

根据以上原理，特选定 CaCl_2 、 Na_2SO_4 、三乙醇胺为早强剂，验证其对泡沫混凝土抗压强度的影响，试验方案结果见表 3-3（外加剂的掺加是水泥重量的 %

计)。

表 3-3 早强剂对泡沫混凝土抗压强度的影响

编号	水泥 /kg	砂子 /kg	水 /kg	泡沫剂 /ml	三乙醇 胺/%	CaCl ₂ /%	Na ₂ SO ₄ /%	3天平均抗压 强度/MPa
13	120	600	165.40	4500	0	0	0	0.58
14	120	600	165.40	4500	0.02	0	0	0.94
15	120	600	165.40	4500	0.05	0	0	1.25
16	120	600	165.40	4500	0	1.00	0	0.63
17	120	600	165.40	4500	0	2.00	0	1.00
18	120	600	165.40	4500	0	0	1.00	0.60
19	120	600	165.40	4500	0	0	2.00	1.18
20	120	600	165.40	4500	0.02	1.00	0	1.06
21	120	600	165.40	4500	0.02	2.00	0	1.40
22	120	600	165.40	4500	0.05	1.00	0	1.33
23	120	600	165.40	4500	0.05	2.00	0	1.80
24	120	600	165.40	4500	0.02	0	1.00	1.15
25	120	600	165.40	4500	0.02	0	2.00	1.95
26	180	520	165.40	5956	0.05	0	1.00	1.62
27	180	520	165.40	5956	0.05	0	2.00	2.56

根据表 3-3 的数据, 计算掺早强剂后强度增长率, 如表 3-4。

表 3-4 掺早强剂后泡沫混凝土抗压强度增长率

编号	三乙醇胺	CaCl ₂	Na ₂ SO ₄	3 天抗压强度增	7 天抗压强度增
	/%	/%	/%	长率/%	长率/%
27	0.05	0	2.00	294	341
26	0.05	0	1.00	170	179
25	0.02	0	2.00	200	236
24	0.02	0	1.00	84	98
23	0.05	2.00	0	200	210
22	0.05	1.00	0	120	129
21	0.02	2.00	0	134	141
20	0.02	1.00	0	80	83
19	0	0	2.00	90	103
18	0	0	1.00	0	3.40
17	0	2.00	0	64	72
16	0	1.00	0	10	8.60
15	0.05	0	0	100	116
14	0.02	0	0	60	62

从表 3-4 中, 我们对增强剂效果比较后, 不难发现:

- 三乙醇胺+Na₂SO₄>三乙醇胺+CaCl₂>三乙醇胺>Na₂SO₄>CaCl₂
- 复掺比单掺效果好。
- 低掺量的 Na₂SO₄、CaCl₂ 早强作用不明显。

混凝土强度与水泥水化程度有直接的关系, 水化越彻底, 水泥石的强度越高, 而泡沫混凝土更加如此, 其内部气泡阻碍了水泥的进一步水化, 因此, 泡沫混凝土的强度较普通混凝土低得多, 如何激发水泥彻底水化也就成了提高泡沫混凝土强度的关键。三乙醇胺、氯化钙、硫酸钠均为早强剂, 但为什么三乙醇胺+硫酸钠效果最好, 主要由于三乙醇胺在水泥水化过程中与 Al³⁺、Fe³⁺生成易溶于水的络合物, 从而破坏了水化初期熟料离子表面形成的 C₃AF 水化物膜, 在有 SO₄²⁻存在的情况下反应速度加快, 促使 C₃A、C₄AF 的溶解速度及硫铝酸钙的生成速度加快, 从而降低了 Ca²⁺、Al³⁺ 的浓度, 促进了 C₃S 深入水化, 因此, 三乙醇胺与硫酸钠的复合效果最好。

早强剂作用明显, 但掺多后, 其副作用也是很大的, 如: 速凝、收缩、返碱等, 一般三乙醇胺不宜超过 0.1%, Na₂SO₄、CaCl₂ 不宜超过 2.5%。

3.4 矿渣微粉的掺入对水泥-砂浆泡沫混凝土抗压强度的影响

本试验所用的矿渣比表面在 $420\text{m}^2/\text{kg}$ ，活性得到很大改善。本组试验主要验证矿渣微粉对泡沫混凝土的影响，在以上试验的基础上，选用复合早强剂：三乙醇胺+ Na_2SO_4 、三乙醇胺+ CaCl_2 ，掺加量为水泥掺量的2%。方案与结果如表3-5。

表 3-5 试验配比及抗压强度结果

编号	水泥 /kg	砂子 /kg	矿渣 /kg	水 /kg	泡沫剂 /ml	三乙 醇胺 /%	CaCl_2 /%	Na_2SO_4 /%	3天平均 抗压强度/ Mpa
28	120	600	0	165.40	4500	0	0	0	0.56
29	120	550	50	165.40	4500	0	0	0	0.75
30	120	500	100	165.40	4500	0	0	0	1.06
31	120	400	200	165.40	4500	0	0	0	1.12
32	120	550	50	165.40	4500	0.05	2.00	0	1.87
33	120	500	100	165.40	4500	0.05	2.00	0	2.18
34	120	400	200	165.40	4500	0.05	2.00	0	2.29
35	120	550	50	165.40	4500	0.05	0	2.00	2.52
36	120	500	100	165.40	4500	0.05	0	2.00	2.97
37	120	400	200	165.40	4500	0.05	0	2.00	3.02

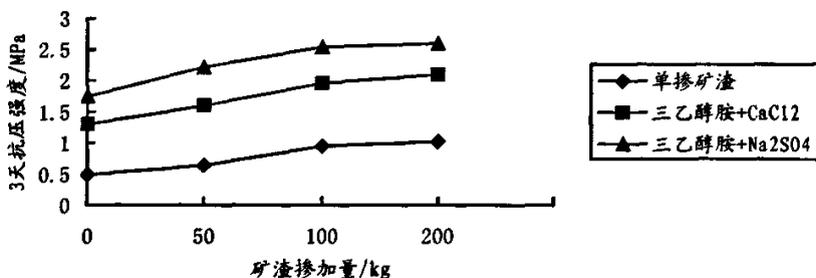


图 3-2 矿渣及早强剂掺入对泡沫混凝土 3 天抗压强度的影响

从图 3-2 可以看出，混凝土配比中水泥用量不变，当用矿渣代替砂子时，泡沫混凝土抗压强度随替代量的增长而不断提高，这主要是矿渣微粉具有活性原因，表明矿渣微粉的掺加，能提高泡沫混凝土的抗压强度，但随着矿渣掺入量的提高，泡沫混凝土的抗压强度增长在超过 100kg 后趋缓。在添加早强剂的情

况下, 0.05%三乙醇胺和 2%CaCl₂增强效果不如 0.05%三乙醇胺和 2%Na₂SO₄效果明显。

通过 SEM 的观察, Ca(OH)₂ 的晶体尺寸减少、数量也减少。这是矿渣微粉在水泥水化生成的 Ca(OH)₂ 的激发作用下, 其活性 SiO₂、Al₂O₃ 与 Ca(OH)₂ 反应生成胶凝物质, 增加了混凝土内部胶凝物质的数量, 减少了对混凝土不利的 Ca(OH)₂ 浓度于局部富集现象, 有效改善了界面结构, 增强了集料与水泥石的结合能力, 并且促进了水泥的水化, 形成更多的 C-S-H 凝胶, 降低了 C/S 比, 从而提高泡沫混凝土的强度。在有复合早强剂的情况下, 复合早强剂促进水泥水化产生更多的 Ca(OH)₂ 加速了矿渣微粉的活化反应, 尤其是三乙醇胺+Na₂SO₄ 能生成 NaOH, 使矿渣微粉中的活性组份反应大大加快, 从而大幅提高了泡沫混凝土的抗压强度。

过多的矿渣会带进更多的惰性组分, 反而会降低强度, 因此, 矿渣微粉的掺加量有合理的范围, 每立方混凝土中不易超过 100kg。

3.5 水泥净浆泡沫混凝土的抗压强度与配合比的关系

水泥净浆泡沫混凝土流动性试验, 得到的适宜的水灰比 0.5。根据发泡剂性能, 设计了容重在 700-1000kg/m³ 不同容重下发泡剂的加入量, 计算不同容重下水泥净浆泡沫混凝土的配合比如表 3-6 所示。

表 3-6 水泥净浆泡沫混凝土配合比 单位: kg

编号	设计容重 /kg/m ³	水泥用量 /kg	砂子量 /kg	粉煤灰量 /kg	矿渣量 /kg	砂浆成型水量 /kg
38	700	1606	0	0	0	803
39	800	1850	0	0	0	925
40	900	2098	0	0	0	1050
41	1000	2344	0	0	0	1172

根据表 3-6 所列泡沫混凝土的配合比制备的泡沫混凝土经规定条件养护至预定龄期, 即 3 天、7 天、28 天之后, 测定容重和抗压强度, 结果分别列于表 3-7 和表 3-8。

表 3-7 水泥净浆泡沫混凝土试样湿容重

编号	设计容重 /kg/m ³	不同龄期容重		
		3d	7d	28d
38	700	722	720	715
39	800	793	799	789
40	900	905	879	864
41	1000	1000	998	1005

由表 3-7 所列数据可以看到，容重误差不是很大，控制得很好。

表 3-8 水泥净浆泡沫混凝土试块抗压强度

编号	设计容重 /kg/m ³	抗压强度		
		3d	7d	28d
38	700	0.96	1.84	2.50
39	800	1.32	2.03	2.79
40	900	1.80	2.80	4.40
41	1000	2.03	3.78	5.35

从表 3-8 数据可以看到，水泥净浆泡沫混凝土在 3 天、7 天、28 天养护龄期具有很好的强度发展，其 3 天、7 天、28 天抗压强度随容重增大而逐渐升高，这主要是由于水泥加入量增加，导致强度增加的缘故。容重为 800 以上的试样当养护龄期为 7 天时，抗压强度就已经超过 2.0MPa；当养护龄期为 28 天时，所有试样的抗压强度都超过 2.5MPa；其中，容重 800kg/m³ 的试样抗压强度接近 3.0MPa；容重为 900kg/m³ 的试样抗压强度超过 4.0MPa；容重为 1000kg/m³ 的试样抗压强度已超过 5.0MPa。

从表中还可以看到，在相同水灰比下，泡沫混凝土容重越高，抗压强度越大。

3.6 水泥-砂浆泡沫混凝土的抗压强度与配合比的关系

根据流动性试验确定水泥砂浆泡沫混凝土试样水灰比为 0.52，灰砂比控制为 2: 1，计算出配合比列于表 3-9。

表 3-9 水泥砂浆泡沫混凝土试样原料配合比 单位: kg

编号	容重 /kg/m ³	水泥用量 /kg	砂子量 /kg	粉煤灰量 /kg	矿渣量 /kg	砂浆成型水量 /kg
42	700	1190	595	0	0	618
43	800	1372	686	0	0	713
44	900	1555	777	0	0	809
45	1000	1738	869	0	0	905

3 天、7 天、28 天抗压强度的测定结果列于表 3-10

表 3-10 水泥砂浆泡沫混凝土试块抗压强度

编号	设计容重 /kg/m ³	抗压强度 /MPa		
		3d	7d	28d
42	700	0.26	0.70	0.76
43	800	0.29	1.28	1.16
44	900	0.35	1.19	1.38
45	1000	0.43	1.58	1.78

表 3-10 数据表明, 与水泥净浆泡沫混凝土强度相比, 砂子的掺入导致泡沫混凝土抗压强度的降低, 相同容重降低幅度比较大, 达 50~70%。但随着容重的升高, 3 天、7 天、28 天抗压强度随容重增大而缓慢增长, 从强度增长上看 7 天到 28 天抗压强度增长缓慢。究其原因主要有二: 一是由于容重的限制, 砂子的加入导致水泥用量的减少, 二是砂子的加入导致水灰比的增加。

3.7 水泥-混合材泡沫混凝土的抗压强度和配合比的关系

在水泥净浆泡沫混凝土中掺入不同量的矿渣和粉煤灰, 进行了强度试验。试验中容重控制为 800kg/m³, 混合材的掺入量控制在矿渣与水泥比 0.10、0.20、0.30。

水泥-矿渣泡沫混凝土的配合比如表 3-11 所示。抗压强度测定结果如表 3-12 所示。

表 3-11 水泥矿渣混合材泡沫混凝土试样原料配合比 单位: kg

编号	矿渣/水泥	水灰比	水泥用量 /kg	砂子量 /kg	粉煤灰量 /kg	矿渣量 /kg	砂浆成型
	比						水量/kg
46	0.10	0.55	1630	0.00	0.00	163	986
47	0.20	0.60	1450	0.00	0.00	290	1045
48	0.30	0.65	1396	0.00	0.00	388	1095

表 3-12 水泥-矿渣泡沫混凝土 3 天、7 天、14 天抗压强度

编号	矿渣/水泥比	设计容重 /kg/m ³	抗压强度 /MPa		
			3 天	7 天	14 天
			46	0.10	800
47	0.20	800	0.80	1.28	1.78
48	0.30	800	0.59	0.79	1.43

由表 3-12 数据看出, 矿渣粉代替部分水泥之后, 制备出的泡沫混凝土抗压强度与水泥净浆泡沫混凝土相比, 也明显降低, 矿渣加入量越大, 降幅越大。采取相同的配比用粉煤灰代替矿渣。水泥-粉煤灰泡沫混凝土的配合比如表 3-13 所示。抗压强度测定结果如表 3-14 所示。

表 3-13 水泥粉煤灰泡沫混凝土试样原料配合比

编号	矿渣/水泥	水灰比	水泥用量 /kg	砂子量 /kg	粉煤灰 量/kg	矿渣量 /kg	砂浆成型
	比						水量/kg
49	0.10	0.55	1630	0.00	163	0.00	986
50	0.20	0.60	1450	0.00	290	0.00	1045
51	0.30	0.65	1396	0.00	386	0.00	1095

表 3-14 水泥粉煤灰泡沫混凝土试块抗压强度

编号	矿渣/水泥比	设计容重 /kg/m ³	抗压强度 /MPa		
			3 天	7 天	14 天
			49	0.10	800
50	0.20	800	0.80	1.41	1.71
51	0.30	800	0.62	0.94	1.31

表 3-14 数据表明, 粉煤灰代替部分水泥之后, 制备出的泡沫混凝土抗压强度与水泥-矿渣泡沫混凝土基本相同。

3.8 激发剂对水泥-混合材泡沫混凝土抗压强度发展的作用

实验采用两种激发剂, 即煅烧石膏和无水硫酸钠, 对水泥混合材泡沫混凝土的强度发展尤其是早期强度发展的作用进行了实验探讨。试验中, 激发剂的添加量均为水泥和混合材质量总和的 2%。混合材与水泥比值控制为 0.2。泡沫混凝土的容重控制为 800kg/m^3 , 配合比与相应的不加激发剂的试样完全一样。煅烧石膏和无水硫酸钠对水泥-矿渣泡沫混凝土的激发效果试验结果列于表 3-15, 对水泥-粉煤灰泡沫混凝土的激发效果列于表 3-16。

表 3-15 烧石膏和无水硫酸钠对水泥-矿渣泡沫混凝土的激发效果

编号	激发剂	设计容重 kg/m^3	抗压强度 MPa		
			3 天	7 天	14 天
52	煅烧石膏	800	1.00	1.30	2.50
53	无水硫酸钠	800	0.90	1.30	2.50

表 3-16 烧石膏和无水硫酸钠对水泥-粉煤灰泡沫混凝土的激发效果

编号	激发剂	设计容重 kg/m^3	抗压强度 MPa		
			3 天	7 天	14 天
54	煅烧石膏	800	1.00	1.10	2.50
55	无水硫酸钠	800	0.90	1.00	2.40

将表 3-15 和表 3-16 所列的强度试验结果分别与表 3-12 和表 3-14 所列的强度试验结果相比不难看出, 煅烧石膏和无水硫酸钠的添加无论对水泥-矿渣泡沫混凝土还是对水泥-粉煤灰泡沫混凝土的强度发展都显示出显著的激发效果。14 天抗压强度在原来的基础上提高至少 30% 以上。

3.9 水泥-砂浆泡沫混凝土的性能

试验首先考察了不掺混合材的水泥砂浆泡沫混凝土体系, 即单纯由水泥-砂子-泡沫构成的泡沫混凝土的性能随体系水灰比、新拌混凝土密度等参数的变化

规律。试验中泡沫混凝土单位体积水泥用量保持不变,均设定为 400kg/m^3 ,主要改变水灰比,但是由于体系中各参数之间的相互牵制作用,不可能只单独改变一个参数,其他参数也有一定程度的变化。试验主要考察的性能为硬化泡沫混凝土的抗压强度和导热系数。

3.9.1 水灰比与水泥-砂浆泡沫混凝土导热系数、抗压强度的关系

泡沫混凝土试样的配合比列于表3-17,试样制备时控制新拌泡沫混凝土的设计密度为 1000kg/m^3 。

表3-17 水泥-砂泡沫混凝土试样原料配合比

编号	水泥 /kg/m ³	砂子 /kg/m ³	水 /kg/m ³	泡沫 /m ³ /m ³	W/C
56	400.00	380.00	220.00	0.55	0.55
57	400.00	360.00	240.00	0.53	0.60
58	400.00	340.00	260.00	0.52	0.65
59	400.00	320.00	280.00	0.51	0.70
60	400.00	300.00	300.00	0.49	0.75
61	400.00	280.00	320.00	0.48	0.80

制成的泡沫混凝土按条件和试验方法养护至预定龄期,测定密度、抗压强度和导热系数,结果列于表3-18。

表3-18 水泥-砂泡沫混凝土物理性能

编号	干燥密度 /kg/m ³	导热系数 /W/m·°C	抗压强度 /MPa		
			7d	14d	28d
56	840	0.29	1.30	1.50	1.90
57	820	0.28	1.50	1.70	1.90
58	810	0.27	1.70	1.90	2.00
59	810	0.28	1.80	2.30	2.70
60	810	0.28	2.20	2.50	2.90
61	840	0.29	2.50	2.80	3.10

由表3-18可知,当泡沫混凝土的干燥密度相近时其导热性能变化不大,但是,

强度表现出一定程度的波动。泡沫混凝土的抗压强度随养护龄期的延长而增长,但是增长的幅度并不大,强度的绝对值也不大,只有普通混凝土的1/20-30。可见,在普通的水泥砂浆中单纯地引入大量泡沫,在不采取任何措施的情况下将导致混凝土强度显著降低。值得注意的是,仔细分析强度随泡沫混凝土各工艺参数的变化,可以发现在相同养护龄期下抗压强度随成型水灰比的增大而略有提高,这一特点与普通水泥混凝土强度随成型水灰比的增大而降低的规律有较大的不同。这一方面是因为水灰比增大使砂浆流动性改善,泡沫在混凝土中分布均匀化,另一方面水灰比增大的同时砂子和泡沫量减少也使硬化后的泡沫混凝土均匀性得到提高。这也就是说,泡沫混凝土的强度除了受到胶凝性提供者水泥的影响外,同时,也在很大程度上受到泡沫添加量、泡沫本身的尺寸、泡沫尺寸的分布和泡沫在混凝土中的分布影响。可以推断,泡沫混凝土的水灰比存在一个合适的范围,过分增加水灰比必然会导致硬化体强度的降低。彻底弄清上述强度变化规律有赖于更大量的配合比试验和泡沫混凝土微观结构的分析,即有赖于硬化泡沫混凝土内泡沫尺寸与分布随各种工艺参数的变化规律及其对性能影响规律的建立。

3.9.2 水泥-砂浆泡沫混凝土密度与强度、导热性能的关系

试验所用泡沫混凝土试样的配合比列于表3-19。

表3-19 不同密度的泡沫混凝土原料配比

编号	混凝土设计密度 /kg/m ³	水泥 /kg/m ³	砂子 /kg/m ³	水 /kg/m ³	泡沫 /m ³ /m ³
62	1600	400.00	920.00	280.00	0.26
63	1400	400.00	720.00	280.00	0.35
64	1200	400.00	520.00	280.00	0.43
65	1000	400.00	320.00	280.00	0.51
66	850	400.00	120.00	280.00	0.59
67	620	350.00	0.00	250.00	0.69

注:各试样W/C=0.7

制成的泡沫混凝土试样,按条件和试验方法养护至预定龄期。测定泡沫混凝土不同密度与抗压强度和导热系数的关系,结果见图3-3、图3-4所示。

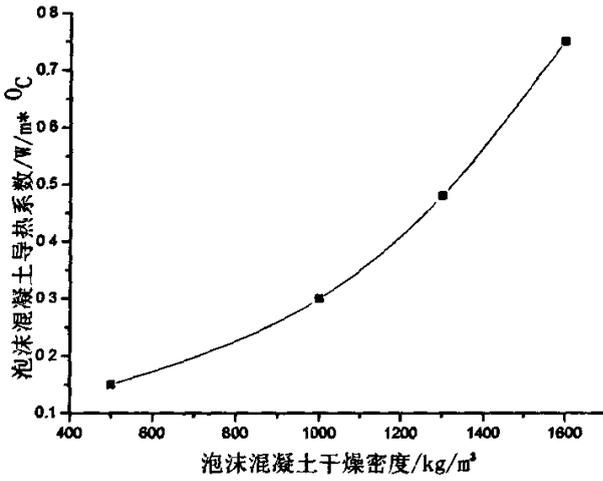


图3-3 泡沫混凝土的导热系数与干燥密度的关系

由图3-3 可以清楚地看出，泡沫混凝土的导热系数随其干燥密度的降低而减小，并且较好地服从指数变化规律即^[1]：

$$Y=0.0872e^{0.0014x} \tag{1}$$

式中： X—泡沫混凝土的干燥密度，kg/m³；
Y—泡沫混凝土的导热系数，W/m·°C。

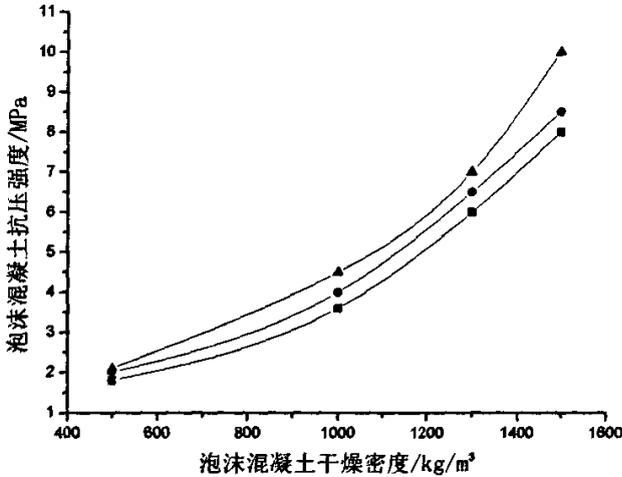


图3-4 泡沫混凝土的抗压强度与干燥密度的关系
曲线从上至下分别为28d；14d；7d抗压强度

当干燥密度为1500kg/m³时，泡沫混凝土的导热系数为0.70W/m·°C，当干燥

密度降低至 430kg/m^3 时泡沫混凝土的导热系数降低到 $0.16\text{ W/m}\cdot\text{ }^\circ\text{C}$ 。普通的水泥混凝土的导热系数一般为 $1.7\text{ W/m}\cdot\text{ }^\circ\text{C}$ 左右。可见，降低混凝土的密度可以显著减小其导热系数，赋予其隔热保温特性。实际上，泡沫混凝土产生保温性能的直接的原因在于其内部引入了泡沫，细小并且均匀分布的泡沫阻断或减缓了热流的通过，从而导致泡沫混凝土导热系数的降低。对于给定的泡沫混凝土，其干燥密度 X 与孔隙率 ρ 之间存在以下关系，即：

$$X = X_0(1 - \rho) \quad (2)$$

式中： ρ —泡沫混凝土的孔隙率，用体积分数表示；

X_0 —孔隙率为 ρ 时假想泡沫混凝土的密度。

这样式（1）所示的导热系数与干燥密度之间的关系也可以表示为下式（3）所示的导热系数与孔隙率之间的关系，即^[1]：

$$Y = 0.0872e^{0.0014 X_0(1-\rho)} \quad (3)$$

显然，泡沫混凝土孔隙率的增大是导致其导热系数减小的根本原因。与此同时，泡沫混凝土的抗压强度也随其干燥密度的降低而减小。当泡沫混凝土的干燥密度为 1500kg/m^3 时，其7d、14d、28d抗压强度分别为 7.8MPa 、 8.7MPa 、 9.9MPa 。与普通水泥混凝土相似，抗压强度随养护龄期的增长而提高。但是，当泡沫混凝土的干燥密度降至 430kg/m^3 时，其7d、14d、28d抗压强度分别降至 1.1MPa 、 1.5MPa 、 1.5MPa ，而且抗压强度随养护龄期的增长提高不多。所以，实际使用中泡沫混凝土的适宜配合比必须同时兼顾工程对密度、抗压强度、导热系数等性能的综合要求来确定。从这个意义上讲，泡沫混凝土并不是一个固定的产品，而是一个系列产品。

3.10 水泥-混合材-砂浆泡沫混凝土的性能

在水泥砂浆泡沫混凝土中掺入粉煤灰、矿渣、硅灰等混合材不但可以充分利用工业废渣，而且在一定程度上可以改善泡沫混凝土的各种物理力学性能。在上述水泥-砂浆泡沫混凝土试验的基础上，本文也考察了掺有粉煤灰、矿渣、和少量硅灰的泡沫混凝土。即水泥-混合材-砂浆泡沫混凝土的性能变化规律。

试验所用泡沫混凝土试样的配合比列于表3-20。与前述表3-17和表3-19所列泡沫混凝土的配合比不同之处是，表3-20所示泡沫混凝土中均添加有剂量不等的超塑化剂。

制成的泡沫混凝土按上述条件和试验方法养护至预定龄期，测定密度、抗压强度和导热系数，结果列于表3-21。

表3-20 水泥-混合材-砂浆泡沫混凝土的原料配比

编号	混凝土密度 /kg/m ³	水泥 /kg/m ³	砂子 /kg/m ³	硅灰 /kg/m ³	矿渣 /kg/m ³	粉煤灰 /kg/m ³	水 /kg/m ³	泡沫 /m ³ /m ³
68	820	390	-	46.50	87.20	58.20	174	0.63
69	1050	290	427	34.20	64.10	42.70	132	0.54
70	1280	650	-	77.70	146	97.10	291	0.37
71	1610	460	684	54.70	103	68.40	21	0.30

表3-21 水泥-混合材-砂浆泡沫混凝土硬化体性能

编号	干燥密度 /kg/m ³	导热系数 /W/m·°C	抗压强度 /MPa		
			7d	14d	28d
68	710	0.24	4.50	5.50	6.60
69	960	0.33	2.60	3.60	4.20
70	1160	0.44	13.20	15.70	17.00
71	1520	0.74	19.30	20.40	23.70

掺入混合材以后,由于比表面积扩大,浆体流动性变差,故加入适量的减水剂以保证在较低的水灰比下成型。硬化后的泡沫混凝土的导热系数随干燥密度的变化仍然基本服从式(1)的变化规律,即密度减小时泡沫混凝土的导热系数按指数关系变小。

由于水灰比控制很低而且超塑化剂的加入保证了原始砂浆的流动性有利于泡沫的分散,该体系泡沫混凝土的抗压强度与前述水泥-砂浆泡沫混凝土相比显著提高。相同养护龄期和相近密度条件下,抗压强度约提高2~3倍,尤其是当密度为1500kg/m³时抗压强度可达23.70MPa。另外,由上述试验结果可知,即使在相同的密度下通过改变泡沫混凝土的配合比和外加剂的添加量,也可以在较大范围内改变其抗压强度,而其导热系数则变化不大。

3.11 高强水泥-混合材-泡沫混凝土的性能

一般说来,高强度并不是泡沫混凝土的主要追求目标,但是高强轻质材料在某些特殊的施工场合仍然具有其独特的用处。试验中设计了两组采用水泥、

矿渣和粉煤灰为主要原料的高强泡沫混凝土，配合比如表3-22所示，硬化后高强泡沫混凝土的导热系数和不同养护龄期时的抗压强度如表3-23所示。

表3-22 水泥-混合材-砂高强泡沫混凝土的原料配比

编号	混凝土密度 /kg/m ³	水泥 /kg/m ³	矿渣 /kg/m ³	粉煤灰 /kg/m ³	水 /kg/m ³	泡沫 /m ³ /m ³	W/c
72	1080	461	71	355	196	0.51	0.24
73	1620	685	105	527	300	0.27	0.22

注：添加有机量不等的超塑化剂

表3-23 水泥-混合材-砂高强泡沫混凝土硬化体性能

编号	干燥密度 /kg/m ³	导热系数 /W/m·℃	抗压强度 /MPa		
			7d	14d	28d
			72	1020	0.37
73	1050	0.75	28.80	37.50	44.10

试验结果再次表明，泡沫混凝土的导热系数主要随密度而变，受配合比的影响比较小，而抗压强度则同时受到配合比、水泥用量、密度、外加剂添加量等因素的影响。当泡沫混凝土的干燥密度为1020kg/m³时，7d、14d和28d抗压强度分别可达24.60MPa、25.30MPa和34.20MPa；当泡沫混凝土的干燥密度为1550kg/m³，7d、14d和28d时抗压强度分别可达28.80MPa、37.50MPa和44.10MPa。这就使泡沫混凝土不但可以应用于低强度的填充和墙体材料等场合，也使其有可能与轻质骨料复合使用，从而有可能应用于具有一定强度要求的轻质结构工程。总之，泡沫混凝土的性能既受到水泥用量、混合材种类和用量、水灰比、泡沫添加量和超塑化剂添加量等与配合比有关的因素的影响，也受到泡沫性质、新拌泡沫混凝土流动性等决定新拌混凝土工作性和硬化泡沫混凝土结构相关的因素的影响，各种因素之间的内在关系尚有待于进一步深入研究。

第四章 结论

1、泡沫混凝土发泡剂材料种类较多，但从发泡效果上看，蛋白质发泡剂发泡速度快，泡沫细小、均匀，稳定性好，是泡沫混凝土生产的首选发泡剂；水泥是泡沫混凝土产生强度的主要胶凝材料，其掺加量多少和水化后的抗压强度决定了泡沫混凝土的抗压强度，掺加量越高，泡沫混凝土抗压强度越高；水泥标号越高，泡沫混凝土抗压强度越高。泡沫混凝土宜采用 42.5 以上标号的水泥。

2、泡沫混凝土中水的用途有两个，一是达到水泥水化、硬化的目的；二是保证混合砂浆有一定的流动性，满足混合搅拌、泵送、浇注等施工的需要。泡沫混凝土中水在满足水泥水化、硬化的前提条件下，水料比越小，混凝土抗压强度越高，反之亦然。适宜的水料比，应综合考虑混凝土物料配比、和易性、容重、强度等因素，通过实验确定。

3、无机早强剂 CaCl_2 、 Na_2SO_4 与三乙醇胺对水泥-砂浆泡沫混凝土的抗压强度有明显的促进作用，非常适合做泡沫混凝土的早强激发剂。其激发效果次序： $\text{三乙醇胺} + \text{Na}_2\text{SO}_4 > \text{三乙醇胺} + \text{CaCl}_2 > \text{三乙醇胺} > \text{Na}_2\text{SO}_4 > \text{CaCl}_2$ 。其中，0.1% 的三乙醇胺和 2.5% 的 Na_2SO_4 复掺的情况下，激发效果最好。

4、在水泥-砂浆泡沫混凝土中掺入矿渣微粉，能提高泡沫混凝土的抗压强度，尤其在早强剂的作用下，效果更加明显，但过多的矿渣会带进更多的惰性组分，反而会降低强度，因此，矿渣微粉的掺入量与合理的范围，一般每立方中混凝土不宜超过 100kg。

5、泡沫混凝土的导热系数与其干燥密度有密切的关系，干燥密度减小泡沫混凝土的导热系数随之减小。

6、水泥-混合材泡沫混凝土的抗压强度受其密度、配合比、成型水灰比等因素的影响。不加超塑化剂而且水灰比在一定范围内变动时，泡沫混凝土的抗压强度随水灰比的增大而提高，随干燥密度的减小而降低；添加超塑化剂时，泡沫混凝土的抗压强度更多地受控于混凝土的配合比。

7、一般情况下采用预制泡沫混合法制备的泡沫混凝土导热系数 $0.16 \sim 0.75 \text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ ，抗压强度为 $1.10 \sim 23.70 \text{MPa}$ 。选择合适的配合比泡沫混凝土的抗压强度可以达到 44.1MPa 。

8、用预制泡沫混合法可以制备流动性极好的新拌泡沫混凝土，从而使泡沫混凝土可以远距离泵送，并且用于大体积现场浇筑工程，尤其适用于地下空间的填充浇筑。

参考文献

- [1] 潘志华.新型高性能泡沫混凝土制备技术研究.建筑石膏与胶凝材料,2002,(5):1-5
- [2] 蒋冬青.泡沫混凝土应用新进展.中国水泥,2003,(3):46-48
- [3] 张巨松.国内外混凝土发泡剂及发泡技术分析.低温建筑技术,2001,(4):66-67
- [4] 华历.廉价的新型墙体材料—泡沫混凝土.新型建筑材料,1991,(12):21-24
- [5] 冯乃谦.高性能混凝土.北京:中国建筑工业出版社,1996
- [6] 邵洪江.粉煤灰泡沫混凝土研究.山东建材,1999,(2):1-4
- [7] 尚洪下.泡沫混凝土砌块发泡剂的研制.新型建筑材料.1999,(1):15-16
- [8] 谢慈仪.混凝土外加剂作用机理及合成基础.重庆:西南师范大学出版社,1998
- [9] 盖广清.陶粒泡沫混凝土孔结构及其对性能影响的研究.硅酸盐建筑制品,1995,(5):13-15
- [10] 沈威.水泥工艺学.武汉:武汉工业大学出版社,1992
- [11] 何水清.墙体材料生产技法.北京:中国工人出版社,1999
- [12] 王武祥.粉煤灰泡沫水泥的性能与应用.新型建筑材料,1996,(7):20-22
- [13] 邵洪江.粉煤灰泡沫混凝土研究.山东建材,1999,(1):13-15
- [14] 李富昌,王树茜.粉煤灰发泡保温制品的研究.粉煤灰综合利用,1998,(1):33
- [15] 高倩.泡沫混凝土.青岛建筑工程学院学报,2002,(3):113-115
- [16] 刘巽伯,沈旦申.上海市粉煤灰应用技术手册.上海:同济大学出版社,1995
- [17] 潘志华.现浇泡沫混凝土常见质量问题分析与对策.建筑石膏与胶凝材料,2004,(1):4-7
- [18] 李娟,王武祥.改善泡沫混凝土洗水性能的研究.混凝土与水泥制品,2001,(5):43-44
- [19] 肖力光.高掺量粉煤灰泡沫混凝土砌块的试验研究.新型建筑材料,2003,(1):33-35

- [20] 王洪镇.一种新型泡沫混凝土砌块的生产技术.混凝土与水泥制品,2000,(1):44-45
- [21] 邵洪江.早强剂和蒸养对粉煤灰泡沫混凝土性能的影响.吉林建材,1999,(1):16-18
- [22] 张巨松.混凝土发泡功能的探讨.混凝土,2000,(7):34-35
- [23] 刘振贤.一种新型憎水发泡剂的研制.中国建材科技,1999,(5):22-23
- [24] 谷章昭.工程用泡沫混凝土正在国外崛起.上海建设科技,1995,(3):38-40
- [25] 杨南如.无机非金属材料测试方法.武汉:武汉工业大学出版社,1992
- [26] 潘春圃.工地制作泡沫混凝土.陕西煤炭技术,1990,(1):10-14
- [27] 常婧莹.浅谈泡沫混凝土在建筑中的应用.房材与应用,2005,33(4):21-25
- [28] 张磊,杨鼎宜.轻质泡沫混凝土的研究及应用现状.混凝土,2005,(8):10-11
- [29] 唐虹.泡沫混凝土在现代建筑中的应用.贵州工业大学学报(自然科学版),2005,34(3):33-35
- [30] 李大鸣,罗秋苑,王小刚.整体现浇式泡沫混凝土在屋面保温隔热层中的应用.广东建材,2003,(2):7-8
- [31] 赵铁军,王兆利,高倩.泡沫混凝土.青岛建筑工程学院学报,2002,23(3):13-15
- [32] 范桂细.泡沫混凝土的生产与应用技术.广东建材,2005,(9):30-33
- [33] 杨久俊,张海涛,张磊.粉煤灰高强微珠泡沫混凝土的制备研究.粉煤灰综合利用,2005,(1):10-13
- [34] 赵铁军,高倩,王兆利.大掺量粉煤灰对泡沫混凝土抗压强度的影响.粉煤灰,2002,14(6):7-10
- [35] 曾尤,扬合,张巨松.国内外混凝土发泡剂及发泡技术分析.低温建筑技术,2001,(4):23-25
- [36] 吴保泓.新型粉状混凝土复合塑化剂的研究.广西电力工程,1999,(1):35-38
- [37] 肖力光,盖广清,杨艳.高掺量粉煤灰泡沫混凝土砌块的试验研究.新型建筑材料,2003,(1):27-30

[38] 张志春, 李家和, 孙文博. 陶粒泡沫混凝土强度及其影响因素研究. 哈尔滨建筑大学学报, 2002, 35(3): 17-20

[39] M R Jones, A McCarthy. Preliminary views on the potential of foamed concrete as a structural material. Magazine of Concrete Research, 2005, 57(1): 21-31

[40] A Laukaitis. Influence of technological factors on foam cement concrete formation mixtures and product properties. Statyba(Civil Engineering) (Lithuania), 1997, 11(3): 52-56

[41] D Aldridge. Foamed concrete. Concrete. 2000, 34(4): 20-23

[42] S V Dijk. Foam concrete for roof slopes and floor leveling Concrete. 2000, 34(4): 15-18

[43] L Cox, S V Dijk. Foam concrete: a different kind of mix. Concrete. 2002, 36(2): 54-57

致 谢

关于泡沫混凝土的试验及研究在历经数月后，终于取得阶段性结论，但要彻底搞清楚泡沫混凝土抗压强度、导热、密度等性能与配合比及各种物料之间的相互影响关系及最佳参数，达到指导生产的目的，还需做大量的实验研究工作。

本课题在资料查询过程中得到了母校中南大学化学化工学院叶红齐教授、满瑞林教授的大力协助，使我获得了宝贵的泡沫混凝土参考资料；试验过程在山东铝业公司水泥厂技术开发科和化验室进行，他们有许多试验研究经验供借鉴，在课题研究方案制定、试验过程、数据收集、分析方面作了大量的指导和帮助工作；在课题论文写作阶段，得到了我的校内导师陈振兴教授，校外导师山东铝业公司技术开发部贾元平部长，南京工业大学泡沫混凝土专家潘志华教授的指导。在此，向上述给与帮助、指导的单位、个人，研究生培养基地田金承老师，以及其他协助人员一并表示衷心感谢！

攻读学位期间主要的研究成果

1、2002-2003年，主要参加了山东铝业公司3000t/d水泥干法生产线的建设。完成了75万吨/年东营水泥粉磨站的建设的可行性研究，工艺流程选择，设备选型等工作。

2、2003年主要负责完成公司6万吨/年离子膜烧碱项目的市场调研，可行性研究，工艺及设备考察、选型，进口设备引进，项目已建成投产。

3、2004年主要参加了氧化铝基含镍、钒、钼废催化剂综合利用回收氧化铝、富集镍精矿工艺技术、设备的研究开发，并参与组织实施了产业化技改。该系统工艺独特、流程短、消耗低、工艺指标好，与传统工艺相比，具有明显的优势。取得了很好的经济、社会效益，其技术处于国内领先水平，其成果已申请专利，正组织鉴定。

4、2004年实施了氧化铝基含镍、钒、钼废催化剂综合利用回收氧化铝粗液中钒分离、提取钒精矿试验研究。该项目获中国铝业公司科技发展基金支持，通过实验室试验，确定工艺流程及参数，已完成产业化技改，正在申请专利并组织成果鉴定。

5、2005年进行了钒精矿精制偏钒酸铵、进而生产高纯五氧化二钒的研究。通过实验室试验和中间试验，已完善所有工艺流程及参数，正在实施扩大试验。

6、发表论文：

朱守河，王少武. 抗剥落高铝砖在湿法短窑烧成带的使用. 水泥, 2002, (6): 42-43

朱守河，王少武. 镁铬砖在我厂水泥窑烧成带上的使用. 回转窑水泥生产节能技术交流文集, 北京: 水泥情报研究所, 2002, (10): 152-153

张建业，焦裕刚，王少武. TC型充气梁篦式冷却机的应用. 水泥技术, 2003, (1): 21-22

王少武，侯素芹. 湿法窑喂料系统工艺改造. 水泥工程, 2003, (3): 37-38

李芝顺，张建业，王少武. 煤磨系统及回转窑燃烧器的改造. 水泥技术, 2003, (4): 35-36

王少武. 山东铝业公司3000t/d干法水泥生产线的设计与生产调试. 水泥技术, 2005, (4): 57-60