

PAOMO HUNNINGTU CAILIAO YU
GONGCHENG YINGYONG

泡沫混凝土材料与 工程应用

唐 明 徐立新 主 编
闫振甲 副主编

中国建筑工程出版社

013071274

TU528.2
04

泡沫混凝土材料与工程应用

唐明 徐立新 主编
闫振甲 副主编



中国建筑工业出版社

TU528.2

04

1301575175

图书在版编目 (CIP) 数据

泡沫混凝土材料与工程应用/唐明, 徐立新主编.
北京: 中国建筑工业出版社, 2013. 8
ISBN 978-7-112-15520-0

I. ①泡… II. ①唐… ②徐… III. ①泡沫混凝土—
研究 IV. ①TU528.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 129488 号

本书是作者在总结国内外泡沫混凝土研究成果及自身多年实践经验的基础上, 依据国内最新规范体系编写而成。本书共分为 10 章, 包括: 泡沫混凝土材料与工程概论、泡沫混凝土的组分、泡沫混凝土地暖绝热层、泡沫混凝土屋面保温层、泡沫混凝土填注、泡沫混凝土墙体浇注、泡沫混凝土外墙保温板、预制 ASA 泡沫混凝土板装配式建筑、泡沫混凝土砌块及泡沫混凝土机械设备。本书内容全面、重点突出, 具有较强的实用性和可操作性。

本书可供从事泡沫混凝土材料研究、施工以及制品生产的广大技术人员参考使用。

* * *

责任编辑: 刘 江 王砾瑶 李 鸽
责任设计: 张 虹
责任校对: 肖 剑 赵 颖

泡沫混凝土材料与工程应用

唐 明 徐立新 主 编
闫振甲 副主编

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)
各地新华书店、建筑书店经销
华鲁印联 (北京) 科贸有限公司制版
廊坊市海涛印刷有限公司

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 19½ 字数: 480 千字
2013 年 9 月第一版 2013 年 9 月第一次印刷
定价: 58.00 元

ISBN 978-7-112-15520-0
(24100)

版权所有 翻印必究
如有印装质量问题, 可寄本社退换
(邮政编码 100037)

《泡沫混凝土材料与工程应用》编委会

主 编：唐 明 徐立新

副主编：闫振甲

编 委：牟世友 吕文朴 张 标 张健江 刘家强 于崇明
 刘晓波 朱恒杰 李国强 刘家义 孙志中 林盛根
 高永昌 徐道勇 马 焱 张振秋 付洪伟 宋志斌
 张健兴 王才智 卢文成 许大伟 陈思宇

前言

泡沫混凝土最早是1923年欧洲人首次提出来的。20世纪初前苏联积极开展泡沫混凝土工业化技术研究和生产,1950年开始他们向中国推广泡沫混凝土技术。

20世纪50年代是我国泡沫混凝土发展的第一个高潮期,在哈尔滨生产了蒸压泡沫混凝土板,并应用在哈尔滨电表仪器厂的屋面保温。第二个发展高潮期是20世纪80~90年代,在现浇屋面保温和地暖绝热层中采用。泡沫混凝土第三个发展高潮期是21世纪初,开始在建筑外墙外保温工程中大量应用。

泡沫混凝土具有的保温节能、安全防火及环保等性能大量应用在建筑保温工程中,使其必然成为未来建筑保温的主导产品。

泡沫混凝土分为现浇和制品两大类,现浇泡沫混凝土有泡沫混凝土地暖绝热层、楼地面垫层、屋面保温层、墙体浇注、大型填注等,制品有泡沫混凝土保温板、砌块、墙板等。

沈阳建筑大学教授、博士生导师唐明是辽宁省泡沫混凝土发展中心专家组组长,他生前致力于研究和开发泡沫混凝土,并计划出版一本泡沫混凝土专著,推动泡沫混凝土行业发展,他亲自写下了泡沫混凝土材料与工程概论和泡沫混凝土组成两章内容。为实现唐明的意愿,为全国泡沫混凝土行业的发展,我们组织了辽宁省、北京市、天津市、山东省、河北省和河南省等六个省市的泡沫混凝土企业家和专家编写了这本《泡沫混凝土材料与工程应用》一书。这本书的出版是对唐明教授的怀念,也将对泡沫混凝土行业的发展起到推波助澜的作用。

这本书的内容包括泡沫混凝土材料与工程概论、泡沫混凝土组成、泡沫混凝土地暖绝热层、泡沫混凝土屋面保温层、泡沫混凝土墙体浇注、泡沫混凝土填注、泡沫混凝土砌块、预制ASA泡沫混凝土板装配式建筑、泡沫混凝土外墙保温板和泡沫混凝土机械设备等10章内容。

泡沫混凝土行业是新型行业,泡沫混凝土产品是新型建筑节能产品,目前全国范围内没有一本全面介绍泡沫混凝土的专业书籍,从事泡沫混凝土制品生产和现浇施工安装人员,缺乏泡沫混凝土理论知识和专业知识,我们为满足全国泡沫混凝土行业员工急需这方面书籍的要求编写了《泡沫混凝土材料与工程应用》一书,这是一本全面、系统、专业的泡沫混凝土行业专著,也是泡沫混凝土行业百科全书。它将成为泡沫混凝土行业员工的培训教材,泡沫混凝土行业生产管理人员和工程技术人员的工具书,建筑工程和建筑材料大专院校师生的参考书,也是房地产开发公司、建筑公司、监理公司土建工程师们的参考书。

在编写这本书的过程中专家和企业家用了国家、行业、地方以及企业标准,结合企业生产实践,努力使内容更加完善和丰富。尽管做了很大的努力,但因为编写时间短促,再加水平有限,书中疏漏难免,希望广大读者和业内专家批评指教,阅读中发现问题及时提出宝贵意见,以便今后进一步修改提高。

徐立新

2013年5月于沈阳

目 录

1 泡沫混凝土材料与工程概论	1
1.1 泡沫混凝土的定义与分类	1
1.1.1 泡沫混凝土的定义	1
1.1.2 泡沫混凝土的分类	2
1.2 泡沫混凝土发展历史	4
1.2.1 混凝土材料的发展历史	4
1.2.2 泡沫混凝土的发展历史	8
1.3 泡沫混凝土的特点及用途	12
1.3.1 泡沫混凝土的特点	12
1.3.2 泡沫混凝土的用途	14
1.4 泡沫混凝土相关的标准与规范	19
2 泡沫混凝土的组分	22
2.1 胶凝材料	22
2.1.1 硅酸盐水泥	23
2.1.2 其他通用水泥的特性及应用	29
2.1.3 硫铝酸盐水泥和铁铝酸盐水泥	31
2.1.4 铝酸盐水泥与白水泥	35
2.1.5 石灰	37
2.1.6 石膏	40
2.1.7 镁质胶凝材料	45
2.2 掺合料	52
2.2.1 掺合料定义与分类	52
2.2.2 硅灰	54
2.2.3 粉煤灰	58
2.2.4 矿渣	68
2.2.5 沸石粉	73
2.2.6 偏高岭土	79
2.2.7 其他掺合料	82
2.3 外加剂	89
2.3.1 概述	89
2.3.2 减水剂	90
2.3.3 发泡剂	97
2.3.4 调凝剂和早强剂	113

2.3.5 憎水剂	115
2.4 聚合物乳液与聚合物乳胶粉	118
2.4.1 聚合物乳液	118
2.4.2 可再分散乳胶粉	121
2.5 保水增稠材料	125
2.5.1 化学性质	125
2.5.2 物理性质	127
2.5.3 作用效果与机理	128
2.5.4 纤维素醚	129
2.5.5 聚丙烯酰胺	131
2.5.6 淀粉醚	133
2.6 纤维	134
2.6.1 天然纤维	134
2.6.2 人造无机纤维	137
2.6.3 有机纤维	140
3 泡沫混凝土绝热层	144
3.1 地暖绝热层	144
3.2 泡沫混凝土设备及所用材料	146
3.2.1 水泥发泡机	146
3.2.2 水泥	147
3.2.3 掺合料	147
3.2.4 水	148
3.2.5 水泥发泡剂	148
3.3 泡沫混凝土绝热层	149
3.3.1 泡沫混凝土(发泡水泥)	149
3.3.2 泡沫混凝土的特性	149
3.3.3 泡沫混凝土绝热层施工特点	149
3.4 泡沫混凝土绝热层设计	150
3.4.1 一般规定	150
3.4.2 泡沫混凝土绝热层	150
3.4.3 泡沫混凝土配合比设计方法	151
3.5 泡沫混凝土绝热层施工	153
3.5.1 施工准备	153
3.5.2 一般规定	153
3.5.3 施工工艺流程	154
3.5.4 施工要点	154
3.5.5 施工质量	155
3.5.6 浇注质量控制	155

3.5.7	养护	156
3.5.8	家装地暖泡沫混凝土绝热层施工	156
3.6	泡沫混凝土绝热层检测与验收	158
3.6.1	一般规定	158
3.6.2	泡沫混凝土绝热层质量检查	159
3.6.3	取样试验方法	159
4	泡沫混凝土屋面保温层	160
4.1	普通泡沫混凝土屋面保温层	160
4.1.1	屋面现浇输送工艺	160
4.1.2	屋面现浇设备	161
4.1.3	屋面现浇的质量控制	164
5	泡沫混凝土填注	168
5.1	泡沫混凝土填注主要应用范围	168
5.2	泡沫混凝土填注生产工艺	168
5.2.1	常见填注工序	168
5.2.2	原材料配比及各种骨料的添加	170
5.3	泡沫混凝土填注设备的选择	172
5.3.1	各类型浇注设备在填注中的应用	172
5.3.2	泡沫混凝土填注专用设备	173
5.4	泡沫混凝土填注质量控制及检测	173
5.4.1	产品质量前期表象特征	174
5.4.2	产品质量后期体现	174
5.4.3	影响填注质量的因素及解决办法	174
5.4.4	填注中的产品自检	175
6	泡沫混凝土墙体浇注	177
6.1	概述	177
6.2	免拆模板泡沫混凝土墙体浇注	178
6.2.1	施工一般要求	178
6.2.2	配合比设计	179
6.2.3	材料及工具	180
6.2.4	工艺流程	181
6.2.5	安装面板	187
6.2.6	泡沫混凝土的浇注	193
6.2.7	浇注后的墙面处理	201
6.2.8	质量检验与验收	202
6.2.9	安全文明施工	203

6.3	可拆模板泡沫混凝土墙体浇注	205
6.3.1	可拆模板泡沫混凝土墙体浇注施工	205
6.3.2	拆除模板及清理整修	207
6.3.3	工程质量验收	209
7	泡沫混凝土外墙保温板	211
7.1	概述	211
7.1.1	泡沫混凝土保温板性能	211
7.1.2	泡沫混凝土保温板是建筑保温的主导产品	212
7.1.3	泡沫混凝土保温板基本要求	214
7.2	泡沫混凝土外墙保温板生产	215
7.2.1	泡沫混凝土保温板所需原材料	215
7.2.2	泡沫混凝土保温板生产工艺流程	218
7.2.3	泡沫混凝土保温板配合比	233
7.2.4	泡沫混凝土保温板质量问题原因及防治措施	235
7.3	泡沫混凝土外墙保温板安装	238
7.3.1	泡沫混凝土外墙保温板系统材料的组成及性能指标	239
7.3.2	泡沫混凝土外墙保温板的施工安装	240
8	预制 ASA 泡沫混凝土板装配式建筑	249
8.1	概述	249
8.1.1	工业化预制 ASA 泡沫混凝土板装配式建筑的概念	249
8.1.2	实现工业化预制 ASA 泡沫混凝土板装配式建筑的途径	249
8.1.3	工业化预制 ASA 泡沫混凝土板装配式建筑的类型	249
8.2	ASA 泡沫混凝土板式建筑	249
8.2.1	ASA 泡沫混凝土板式建筑的板材类型	249
8.2.2	ASA 大型板式建筑的节点构造	250
8.2.3	ASA 大型板式建筑的优缺点和适用范围	250
8.3	框架式镶嵌 ASA 板建筑	251
8.3.1	框架结构类型	251
8.3.2	框架结构构件的连接	251
8.3.3	外墙板的类型、布置方式和连接构造	251
8.3.4	框架式镶嵌 ASA 板建筑的优缺点和适用范围	252
8.4	其他类型工业化住宅建筑	252
8.4.1	大模板住宅建筑	252
8.4.2	滑模建筑	253
8.4.3	升板建筑	253
8.4.4	盒子建筑	253
8.5	预制 ASA 泡沫混凝土板装配式建筑工程实例	254

9 泡沫混凝土砌块	258
9.1 泡沫混凝土砌块特性	258
9.1.1 材料特性	258
9.1.2 制品分类和主要规格	259
9.1.3 性能指标	260
9.2 泡沫混凝土砌块原料选用、配合比和成本的比较	262
9.2.1 原材料的选用	262
9.2.2 原材料的配合比和产品的性能规格	264
9.2.3 原材料成本的比较	265
9.3 泡沫混凝土砌块的生产工艺和技术装备	266
9.3.1 工艺流程	266
9.3.2 主要设备和性能	267
9.3.3 技术装备的优势	269
9.4 泡沫混凝土砌块的应用	270
10 泡沫混凝土机械设备	272
10.1 泡沫混凝土设备概述	272
10.1.1 目前设备情况	272
10.1.2 设备种类	272
10.1.3 设备用途及选择原则	274
10.2 泡沫混凝土现浇设备	275
10.2.1 水泥发泡机	275
10.2.2 楼地面垫层(地暖绝热层)设备	278
10.2.3 屋面保温设备	278
10.2.4 墙体浇注设备	279
10.2.5 填注工程设备	280
10.3 泡沫混凝土保温板生产设备	280
10.3.1 原材料处理设备	281
10.3.2 配料系统	281
10.3.3 搅拌制浆设备	282
10.3.4 保温板切割设备	288
10.3.5 泡沫混凝土砌块设备	292
10.4 泡沫混凝土设备检测及维护	293
10.4.1 出厂检验	293
10.4.2 安装调试	293
10.4.3 使用维护	294
附录	296
致谢	299

1 泡沫混凝土材料与工程概论

1.1 泡沫混凝土的定义与分类

1.1.1 泡沫混凝土的定义

传统的泡沫混凝土定义为采用机械方法将泡沫剂水溶液制成泡沫,再将泡沫加入含硅材料、钙质材料、水及外加剂组成的料浆中,经混合搅拌、浇注成型和养护而成的轻质多孔混凝土材料^[1]。

传统的泡沫混凝土体积密度比较大,通常为 $500 \sim 1200 \text{ kg/m}^3$, 导热系数也比较大,通常为 $0.12 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K}) \sim 0.30 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, 抗压强度在 $3 \sim 14 \text{ MPa}$, 常用于屋面、自承重墙和热力管道的保温层。现代的超轻泡沫混凝土体积密度和导热系数都很小,分别为 80 kg/m^3 和 $0.04 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; 体积密度为 100 kg/m^3 的泡沫混凝土导热系数为 $0.043 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; 体积密度为 120 kg/m^3 的泡沫混凝土导热系数为 $0.047 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, 其热工性能非常优异。目前国内外通常把导热系数较低的材料称为保温材料(我国国家标准规定,凡平均温度不高于 350°C 时,导热系数不大于 $0.12 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 的材料称为保温材料),而把导热系数在 $0.05 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 以下的材料称为高效保温材料。超轻泡沫混凝土已成为高效保温材料,完全可以与聚氨酯、聚苯乙烯等材料相媲美。

随着泡沫混凝土科学技术和生产工艺的不断进步,应用领域不断扩大,泡沫混凝土的概念和内涵得到了很大的丰富,早已不是单纯的轻质材料、被排斥在混凝土材料边缘的不受重视的工程材料。泡沫混凝土的概念应丰富一些。关于泡沫混凝土和加气混凝土的定义和概念方面,始终没有一个比较准确的概念和定义。有人说化学发泡的是加气混凝土,物理发泡的是泡沫混凝土,我国的混凝土外加剂标准中定义的加气剂就是“混凝土制备过程中因发生化学反应,放出气体,而使混凝土中形成大量气孔的外加剂”。也有将蒸压养护的轻质多孔混凝土称为加气混凝土,非蒸压养护的轻质多孔混凝土称为泡沫混凝土。因国际上加气混凝土 ALC (Autoclaved Lightweight Concrete) 中英文意思就是蒸压养护过的轻质混凝土^[2]。也有人认为泡沫混凝土应包括物理发泡的多孔混凝土和化学发泡的多孔混凝土。这一概念使人们感觉到泡沫混凝土包括加气混凝土,也有人认为,物理发泡的泡沫混凝土和化学发泡的加气混凝土都是向混凝土中加气,都是加气混凝土(图 1-1、图 1-2)。

早在 2006 年,闫振甲先生就提出泡沫混凝土概念界定的三原则,即:(1)人们的传统习惯;(2)多数人的看法;(3)泡沫混凝土的大多数产品的技术特征,少数特殊产品应作为例外。

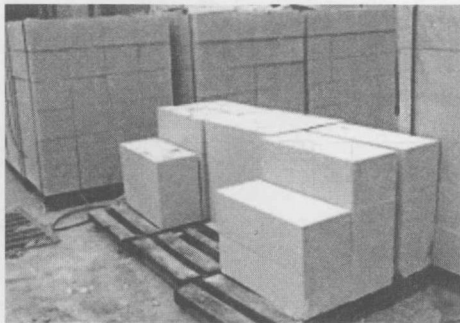


图 1-1 加气混凝土砌块

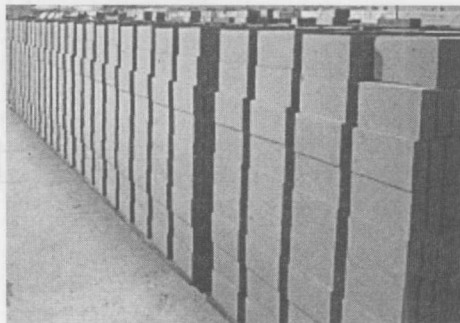


图 1-2 泡沫混凝土保温板

许多关于泡沫混凝土的国家行业标准在术语中把物理发泡的多孔混凝土定义为泡沫混凝土。这仅仅是标准中术语的界定。泡沫混凝土属于多孔混凝土中的一种，它与加气混凝土属于同一个类型的多孔混凝土。从本质上讲，泡沫混凝土也是一种加气混凝土，它实际上是加气混凝土的一个特殊品种^[3]。在日本的气泡混凝土定义中，包括加气混凝土（ALC：Autoclaved Lightweight Concrete）和发泡混凝土（Mix-Foamed Concrete）。

综上所述，笔者编制辽宁省泡沫混凝土外墙外保温工程技术规程时，对泡沫混凝土作了如下定义。

泡沫混凝土（foamed concrete）：以水泥基胶凝材料、掺合料等为主要胶凝材料，加入外加剂和水制成料浆，也可加入部分颗粒状轻质骨料制成料浆，经发泡剂发泡，在施工现场或工厂浇注成型、养护而成的含有大量的、微小的、独立的、均匀分布气泡的轻质混凝土材料。

这里的“发泡剂发泡包括物理发泡和化学发泡”，此外，特别强调了“大量的、微小的、独立的、均匀分布气泡”，这是高质量泡沫混凝土的技术保证。

在条文说明中写道，传统的泡沫混凝土是用物理方法将泡沫剂制备成泡沫，再将泡沫加入到以水泥基胶凝材料、掺合料、外加剂和水制成的料浆中，在工厂或施工现场浇注成型、养护而成的轻质混凝土材料。化学发泡的多孔混凝土称为加气混凝土。鉴于泡沫混凝土板制作过程中化学发泡板的强度远大于物理发泡板的强度，加上我国部分地方标准已将“按发泡原理的不同，可分为物理发泡型和化学发泡型”作为泡沫混凝土板定义的一部分，并已推广应用，考虑到质量为本的原则，本规程的泡沫混凝土为广义的泡沫混凝土，包括物理发泡和化学发泡。

1.1.2 泡沫混凝土的分类

泡沫混凝土种类繁多，它不同于加气混凝土，加气混凝土通常按材料组成、体积干密度和使用功能分类。现参照加气混凝土的分类方法进行分类。

(1) 按所用胶凝材料种类分类

1) 水泥泡沫混凝土：以通用硅酸盐水泥、硫铝酸盐水泥等为胶凝材料，也有采用硅酸盐水泥与硫铝酸盐水泥复合的水泥，还有硅酸盐水泥、硫铝酸盐水泥和铝酸盐水泥三元复合的泡沫混凝土，其水化矿物胶凝物质由水泥熟料矿物的水化反应获得，可用于制备各种泡沫混凝土板材及现浇泡沫混凝土，是泡沫混凝土的主导。

2) 菱镁泡沫混凝土: 以轻烧镁(菱苦土)为胶凝材料, 用氯化镁溶液作调和剂, 采用泡沫混凝土的工艺制成, 可用于屋面保温和隔墙板, 以及外墙外保温系统的大模内置等。镁水泥具有料浆黏度好, 易稳泡, 早期强度比较高。

3) 石膏泡沫混凝土: 以石膏为胶结材制成, 主要用于对强度要求不高的使用部位。其特点是早强快, 收缩变形小。

4) 碱矿渣泡沫混凝土: 以碱激发矿渣为胶凝材料, 采用泡沫混凝土的工艺制备的泡沫混凝土, 具有早期强度和后期强度高的特点。

(2) 按体积密度分类

1) 保温泡沫混凝土: 以保温为主要功能的泡沫混凝土。通常为干体积密度小于 400kg/m^3 的泡沫混凝土, 超轻泡沫混凝土是近年来的新型泡沫混凝土, 具有高效保温特点。

2) 承重泡沫混凝土: 常作为承重墙体材料, 通常以承重为主, 同时兼有一定的节能保温作用, 通常为干体积密度 700kg/m^3 以上的泡沫混凝土。

3) 承重兼保温泡沫混凝土: 主要是以自承重为主的泡沫混凝土, 通常为干体积密度在 $500 \sim 600\text{kg/m}^3$ 的泡沫混凝土。

(3) 按发泡方式分类

1) 泡沫剂物理发泡泡沫混凝土: 将表面活性剂为主的泡沫剂液体通过打泡机预先制作气泡, 然后混入搅拌好的料浆中, 可以通过气泡的掺入量自由调整密度制备泡沫混凝土, 泡沫混凝土的现浇施工性能良好, 但该工艺对打泡机的依赖性较大, 该工艺方法也可称为预发泡。

2) 充气泡沫混凝土: 采用充气加稳泡的方式制备的泡沫混凝土。其气泡是压缩空气经过充气装置的充气介质在料浆中弥散而成的。除气泡形成原理与加气混凝土不同外, 原材料、产品性能、生产工艺及设备等均与加气混凝土基本一致。在生产工艺中也可称为充气发泡。

3) 化学发泡的泡沫混凝土: 采用过氧化氢或铝粉在料浆里发泡制备的泡沫混凝土。过氧化氢或铝粉在搅拌机中混入料浆, 混合后由化学反应产生气体取气泡。混凝土的温度、料浆的稠度等可影响发泡时间和发泡量。在生产工艺中也可称为后发泡。

4) 搅拌发泡的混凝土: 表面活性剂、蛋白系动物类发泡剂等泡沫剂在在搅拌机中掺入, 与料浆一起搅拌, 也是一种通过搅拌物理作用制得气泡的方法。搅拌时间、搅拌速度和使用集料的粒径等因素的改变可以调节含气量, 工作性的好坏仅通过搅拌就很容易达到。

(4) 按养护方式分类

1) 自然养护泡沫混凝土: 整个养护过程采用自然养护, 也有采用塑料大棚、阳光板养护室进行养护的泡沫混凝土。

2) 蒸汽养护泡沫混凝土: 采用常压蒸汽养护的泡沫混凝土。

3) 蒸压养护泡沫混凝土: 采用蒸压釜在较高蒸汽压力下养护的泡沫混凝土。

(5) 按骨料种类分类

①聚苯颗粒泡沫混凝土: 以聚苯乙烯颗粒为骨料, 加入泡沫混凝土浆料中搅拌后浇注

成型的泡沫混凝土。

②膨胀珍珠岩泡沫混凝土：采用膨胀珍珠岩作为骨料制备的泡沫混凝土。此外，也有采用聚氨酯颗粒、酚醛树脂颗粒、玻化微珠颗粒和蛭石等制备的轻骨料泡沫混凝土。

(6) 按生产工艺分类

1) 工厂预制泡沫混凝土：许多泡沫混凝土制品是在专业化工厂预制的，如泡沫混凝土保温板、泡沫混凝土砌块和泡沫混凝土墙板等。

2) 现场浇注泡沫混凝土：如屋面保温隔热层、地暖保温隔热层、墙体现浇和大体积填充等泡沫混凝土。

(7) 按应用领域分类

1) 建筑工程泡沫混凝土：建筑工程的屋面保温、外墙外保温、地暖保温层等建筑各部位的泡沫混凝土。

2) 园林景观泡沫混凝土：园林景观工程的假山、园艺陶粒、水上漂浮物、轻质园林装饰品的造型基础材料等。

3) 特殊工程泡沫混凝土：矿井采空区回填、其他报废地下工程回填、补偿地基、抗冻地基等。

4) 工业用泡沫混凝土：工业管道保温、工业窑炉保温、化工滤质等。

5) 环保工程泡沫混凝土：泡沫混凝土颗粒用于污水处理，用泡沫混凝土颗粒吸满过氧化氢撒到有赤潮的海水中，起到抑制赤潮的作用。

1.2 泡沫混凝土发展历史

1.2.1 混凝土材料的发展历史

混凝土材料的历史可追溯到新石器时代，黏土混凝土是人类应用最早的混凝土材料，黏土是天然的胶凝材料，最早被用来铺筑地坪、胶结石块及外墙抹面。土坯的出现现在公元前 8000 年，在我国距今 6000 多年前的西安半坡遗址就已采用木骨泥墙建房，甘肃等地先民故居遗址中发现了有意识地用火焙烧过的草筋泥墙与坑台，至今 5000 多年依然坚固发亮，被命名为陶质墙面。黏土混凝土材料具有易开裂和耐水性差两大弊病，为解决黏土易开裂问题，先民们采用草筋作为黏土增强材料，至今很多生土混凝土建筑、部分村镇用黏土抹墙和屋面时，仍采用草筋作为抗裂材料。为解决黏土耐水问题，公元前 5000 年左右，苏美尔人开始生产黏土实心砖，在中国的西周时期已有生产黏土实心砖的记载。当人们发现石灰质材料后，采用三合土比原黏土耐水性得到显著提高。而现代黏土混凝土工程则采用激发剂、固化剂及防水剂以解决其耐水性问题。

图 1-3 为棕灶鸟及鸟巢。棕灶鸟阿根廷国鸟，腿细长，适合在开阔的草原上生活，分布在南美洲南半部开阔低地。多栖息于密林中的乔木上。棕灶鸟营半球形的巢，看上去像烤箱，人们赞赏其“建筑技艺”高超，故有“面包师”之美名。这种鸟在人类出现之前就开始用稻草增强黏土在树顶上建造房子。图 1-4 为 5000 年前的黏土混凝土。



图 1-3 棕灶鸟和鸟巢



图 1-4 5000 年前的黏土混凝土

石灰混凝土是人类使用较早的混凝土材料。早期的石灰使用介壳煅烧而成，主要用作埋葬尸体的干燥剂，后来被用于建筑、交通和水利工程。在东土耳其卡耶尼的考古挖掘中，发现了用石灰砂浆粘结的水磨石地面。对该出土文物的年代评估为公元前 12000 年～公元前 5000 年之间。巴比伦人在 6000 年前已使用石灰砂浆。在水利工程中，砂浆曾应用于扎胡雷（Sahure）法老（公元前 2800 年）水渠的灌溉设施中。石灰砂浆首次大量的应用是在公元前 1000 年建造的耶路撒冷水库。大约在公元前 3000 年，几种不同的文明在彼此并没有联系的情况下，先是在北非、南亚、中国，后来在南美和中美，石灰砂浆开始用于土木工程中。在埃及，石灰浆在古罗马时期才应用，但在克里特岛、塞浦路斯、希腊和中东使用得更早（公元前 6000 年～公元前 1200 年）。

考古证实，还在 4000 年前黄河上游的齐家文化遗址中，就已经有了用石灰岩煅烧的石灰。在我国，石灰一词的最早记载见于《左传》。到了战国时期，石灰被加入到黏土中制备二合土、三合土类复合胶凝材料。自汉代起石灰开始大量应用于建筑工程。据历史记载，曹操曾将植物油掺入石灰建造了铜雀台。宋代曾用糯米汁、石灰砌筑了安徽和州城墙。明代南京城墙也使用了糯米汁石灰，并用桐油石灰封顶以增强防水抗渗的能力。明代《开工天物》记载，将石灰 1 份、黄砂 2 份，用糯米、羊角藤汁拌匀制作贮水建筑，有很好的防渗耐久性能。清朝乾隆年间，用石灰、糯米汁和牛血建造永定河河堤，长达数里，经过数百年考验，至今具有重要的工程指导意义。

石灰属于气硬性胶凝材料，因为它能在空气中硬化，它的硬化实质上是由于拌合水的蒸发。此外是后期的碳化。这一反应有助于使物质变硬，但仅限于表层。因为如果灰浆捣固密实，会妨碍 CO_2 透过薄的表面层。在古代，人们能够制备出一些优质的石灰浆体，其硬度很高，以至于人们一度曾设想研究石灰浆制备中含有某些现已失传的秘密。Marcus Vitruvius 比较详细地叙述了用于古罗马建筑中给墙壁最后加工的不同等级的灰泥。可是以后的研究表明，这些灰浆的优良性能并不在于石灰制作的秘密，而在于充分搅拌和夯实（这一教训，现代的工程师应予牢记）。罗马时代的圆形剧场以及在尼姆斯的加德桥至少是某些罗马灰浆高质量的证明。图 1-5 为万里长城墙上的石灰砖缝，图 1-6 为古罗马时代的斗兽场，留下了石灰的印记。



图 1-5 万里长城墙上的石灰砖缝



图 1-6 古罗马时代的斗兽场

石膏在 8000 多年前已为人所知。石膏作为储藏量丰富的天然矿石，在古埃及就得到了应用。石膏经过煅烧，与砖粉混合用于建筑，埃及人在切奥帕斯（Cheops）的金字塔（约公元前 3000 年）建筑中采用了石膏材料。它由煅烧不纯的石膏制得。当拌入少量水时，该材料由于经过煅烧的石膏与煅烧时驱出的结晶水重新组合而凝结，最终硬化成整体。在印度，人们发现一个“石材-青铜-纪年”遗址，其墙体显示出石膏砂浆、石灰-石膏砂浆和纯石灰砂浆的痕迹。图 1-7 为埃及金字塔，石膏材料作为砌筑的胶凝材料，图 1-8 为法国卢浮宫，其中雕像是石膏雕塑而成。



图 1-7 埃及金字塔



图 1-8 法国卢浮宫的石膏雕像

古希腊人和古罗马人用煅烧含有黏土夹杂物的石灰石生产出水硬性石灰。罗马有丰富的火山灰资源，古罗马人发现在维苏威火山附近的波佐利（Pozzuoli）以及罗马北部和东部厚厚的地层里的一种带有巧克力色的砂土，称为“坑砂”，现在专业上称之为火山灰。当地人把这种火山生成的粉末与石灰混合成料浆，所制得的灰浆不仅比普通石灰浆强度高，而且耐水性非常好。古罗马人在这种灰浆中加入石料的残渣、砖块、天然卵石等，凝固后成为坚硬的磐石，具有很好的抗渗性。现代研究表明，这种石灰-火山灰材料属于水硬性胶凝材料，比气硬性石灰功能大大提高，石灰-火山灰胶凝材料的发现、改善和广泛应用，是罗马建筑成就的重要条件（图 1-9）。公元 4 世纪初，罗马城中有 1000 家公共浴池，最大的面积达 110000m²，能容纳 3200 人洗浴。当年的引水渡槽工程十分浩大，从 92km 外引入罗马城，共有 11 座渡槽，建造工程自

公元前310年到公元前226年,都是用石灰加磨细凝灰岩与浮石凝灰岩以1:3.5~1:4.5建成。这种石灰-火山灰砂浆与混凝土建成的桥梁和渡槽,2000多年后仍能使用(图1-10)。罗马卡利古拉(Caligula)皇帝时期,用石灰和火山灰以1:2配合,成功地建造了那不勒斯海港,经现场观察,至今海港虽然被海浪磨光了表面,长满青苔,但其混凝土却完好无损,数百米的墙几乎无一裂缝。这些实例对现代胶凝材料提高耐久性的研究具有重要的意义。自公元2世纪以来,在大量采用混凝土的古建筑中,保存最完好的可能就是万神殿了,其圆顶直径有44m,是在肋沟部分灌注混凝土,并使之硬化而建成的。图1-9为维苏威火山,有着大量的火山灰材料,图1-10为古罗马的渡槽。采用石灰火山灰砂浆砌筑。



图1-9 维苏威火山

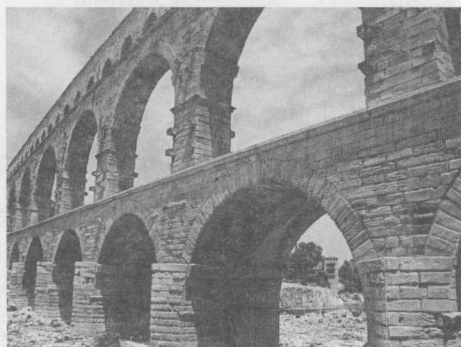


图1-10 古罗马渡槽

罗马时代砂浆技术传到德国是罗马军团北上越过阿尔卑斯山对今天的欧洲地区进行远征的结果。1893年,德国出版的《建筑百科词典》记载,大约从公元900年开始,砂浆制备和在建筑上的应用不再局限于罗马人居住的地带。18世纪英国的J. Smeaton在Conish海湾外用石灰-火山灰砂浆成功地建成耐海水的Eddystone灯塔。该灯塔饱受海浪冲刷,在环境极其恶劣的条件下,直到被一个更现代化的结构所代替。

进入18世纪,石灰-火山灰体系的混凝土因凝结硬化慢,早期强度低,无法适应社会生产迅速发展的需要。在波特兰水泥发明和应用之前,很长的历史阶段,人们认为最好的石灰是纯洁的石灰石煅烧的石灰,后来人们发现,含有黏土质的石灰石煅烧后,具有水硬性特征,于是开始有人用黏土含量较多的石灰石粉煅烧得到具有一定水硬活性的石灰,还有人用泥灰岩(含较多黏土质的石灰石)直接烧成水硬性石灰,无需磨细,经过消解直接应用。1796年,英国J. Parker用黏土质石灰石煅烧而制得水硬性水泥,成为天然水泥。1813年,法国的L. J. Vicat(他发明的维卡仪,至今我们仍然用以测定水泥的凝结时间)用石灰石和黏土加水湿磨成均匀的混合物,经过煅烧制成了人工水硬性石灰,被认为是近代波特兰水泥的雏形。1824年,英国里兹的J. Aspdin取得了波特兰水泥的专利,在市场上获得巨大的成功。J. Aspdin的幼子William在偶然中发现玻璃化的烧结块具有很高的强度。现代仪器分析表明,这种过少的物料含有阿利特晶体矿物。英格兰人Thomas Crampton在1877年获得了回转窑技术的专利(图1-11、图1-12)。