

混凝土新技术丛书

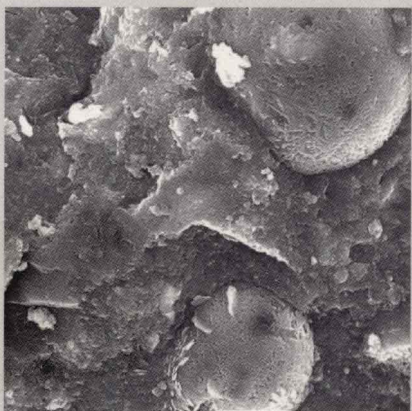
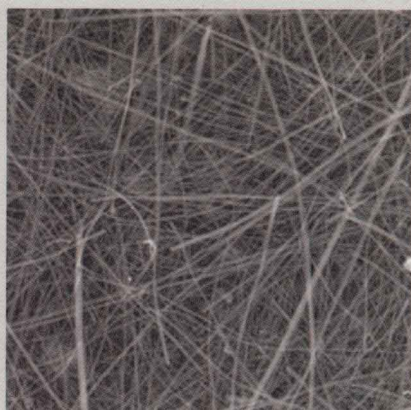
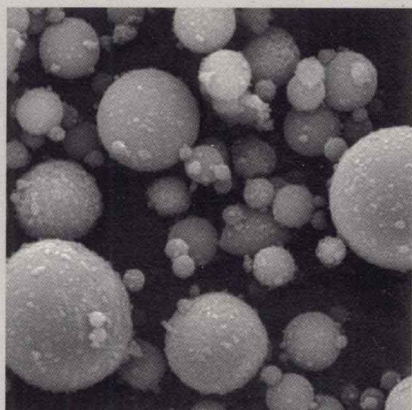
Supplementary Cementing Materials

Used in Concrete

混凝土

刘数华 冷发光 李丽华 著

辅助胶凝材料



中国建材工业出版社

混凝土辅助胶凝材料

Supplementary Cementing Materials Used in Concrete

刘数华 冷发光 李丽华 著

中国建材工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

混凝土辅助胶凝材料/刘数华, 冷发光, 李丽华著
—北京: 中国建材工业出版社, 2010. 6

ISBN 978-7-80227-768-7

I. ①混… II. ①刘… ②冷… ③李… III. ①混凝土—胶凝材料 IV. ①TU528. 044

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 081310 号

内 容 简 介

本书主要介绍了石灰石粉、天然火山灰、粉煤灰、硅灰、矿渣及磷渣粉六种辅助胶凝材料, 从材料的组成、结构等特性出发, 着重介绍不同辅助胶凝材料在混凝土中的作用机理、特殊应用以及对混凝土性能的具体影响。

本书内容丰富, 并配有大量的应用实例。既可以作为建筑和土木工程师、建筑出版商、混凝土生产商的工具书, 又可以用作混凝土专家、学者、高校教师、研究生的教学和科研参考书。

混凝土辅助胶凝材料

刘数华 冷发光 李丽华 著

出版发行: 中国建材工业出版社

地 址: 北京市西城区车公庄大街 6 号

邮 编: 100044

经 销: 全国各地新华书店

印 刷: 北京鑫正大印刷有限公司

开 本: 710mm × 1000mm 1/16

印 张: 14.5

字 数: 273 千字

版 次: 2010 年 6 月第 1 版

印 次: 2010 年 6 月第 1 次

书 号: ISBN 978-7-80227-768-7

定 价: 39.00 元

本社网址: www.jccbs.com.cn

本书如出现印装质量问题, 由我社发行部负责调换。联系电话: (010) 88386906

序

出于经济、技术和生态等方面的原因，辅助胶凝材料已称为混凝土的第六组分。粉煤灰、硅灰、矿渣及石灰石粉等已广泛地应用于混凝土中，不仅获得了良好的经济效益和环境效应，而且还改善了混凝土的诸多性能。

针对不同的混凝土辅助胶凝材料，作者进行了广泛深入的研究。本书结合作者多年来的研究成果，主要介绍了石灰石粉、天然火山灰、粉煤灰、硅灰、矿渣及磷渣粉等不同的辅助胶凝材料在混凝土中的作用机理、特殊应用以及对混凝土性能的具体影响。

本书由武汉大学刘数华博士、中国建筑科学研究院冷发光博士和湖北工业大学李丽华博士撰写，书中涵盖了三人多年以来的研究成果，并得到了高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(No. 200804861060)、中建股份科技研发课题(No. CSCEC—20090Z019)以及水资源与水利工程科学国家重点实验室(武汉大学)常晓林教授研究团队的支持。清华大学阎培渝教授、武汉大学方坤河教授、北京恒坤混凝土有限公司段雄辉总工、中建商品混凝土公司王军总工也给予了热忱的帮助。我的学生饶美娟、雷畅、罗培、刘建、吴相双、王宝忠等也参与了大量的试验、文献调研及翻译等工作。在此，深表感谢！

由于作者水平有限，难免有疏漏和不当之处，敬请读者批评指正。

刘数华博士

2010年3月于武汉大学

目 录

绪论	1
参考文献	2
第1章 石灰石粉	3
1.1 前言	3
1.2 石灰石粉的基本特性	5
1.3 石灰石粉的强度效应	8
1.3.1 石灰石粉-水泥二元胶凝材料体系	8
1.3.2 石灰石粉-粉煤灰-水泥三元胶凝材料体系	14
1.3.3 石灰石粉对混凝土强度的影响	17
1.4 石灰石粉的填充效应和孔结构分析	19
1.4.1 石灰石粉对水泥浆的填充效应	19
1.4.2 石灰石粉对砂浆孔结构的影响	22
1.4.3 石灰石粉对混凝土孔结构的影响	30
1.5 石灰石粉对复合胶凝材料水化动力学的影响	32
1.5.1 石灰石粉对胶凝材料水化放热过程的影响	32
1.5.2 水化动力学分析	34
1.6 石灰石粉对复合胶凝材料水化性能的影响	40
1.6.1 石灰石粉对水化产物的影响	40
1.6.2 石灰石粉对水化产物形貌的影响	46
1.7 石灰石粉在复合胶凝材料体系中的作用机理	55
1.7.1 填充效应	55
1.7.2 活性效应	56
1.7.3 加速效应	56
1.8 石灰石粉对砂浆和混凝土性能的影响	58
1.8.1 石灰石粉对砂浆在干燥状态下行为的影响	58

1.8.2 石灰石粉对砂浆抗硫酸盐侵蚀的影响	62
1.9 石灰石粉在超高性能水泥基材料中的应用	68
1.9.1 超高性能水泥基材料试验	69
1.9.2 石灰石粉在超高性能水泥基材料中的作用机理	70
参考文献	75
第2章 天然火山灰	79
2.1 前言	79
2.2 火山灰活性	80
2.3 火山灰活性的影响因素	81
2.4 火山灰活性的评价	82
2.5 火山灰反应的产物	83
2.6 火山灰-硅酸盐水泥反应	84
2.7 火山灰对混凝土性能的影响	86
参考文献	90
第3章 粉煤灰	92
3.1 前言	92
3.2 粉煤灰利用的障碍	94
3.2.1 粉煤灰的品质	94
3.2.2 粉煤灰对混凝土强度和耐久性的影响	95
3.2.3 标准与规范	95
3.2.4 粉煤灰中的有毒金属和氧	96
3.3 粉煤灰的基本特性	96
3.3.1 粉煤灰的来源	97
3.3.2 粉煤灰的化学成分	97
3.3.3 粉煤灰的矿物成分	98
3.3.4 粉煤灰的颗粒特性	99
3.4 粉煤灰提高混凝土性能的机理	100
3.4.1 粉煤灰的减水效应	100
3.4.2 干缩	102
3.4.3 水密性和耐久性	103
3.4.4 温度裂缝	103
3.5 粉煤灰的相关标准	104

3.6 粉煤灰对混凝土性能的影响	106
3.6.1 水化热	106
3.6.2 工作性	108
3.6.3 强度	110
3.6.4 抗渗性	113
3.6.5 弹性模量	113
3.6.6 干缩	114
3.6.7 抗冻耐久性	115
3.7 微观机理分析	116
3.7.1 形态效应	116
3.7.2 填充效应	117
3.7.3 火山灰活性	118
3.8 粉煤灰在水工混凝土中的影响效果	119
3.8.1 粉煤灰对水工混凝土弹性模量的影响	119
3.8.2 粉煤灰对水工混凝土温降的作用	120
3.8.3 粉煤灰对水工混凝土干缩的影响	121
3.8.4 粉煤灰对水工混凝土徐变的影响	121
3.8.5 粉煤灰对水工混凝土自生体积变形的影响	122
3.9 高掺粉煤灰高强自密实混凝土	122
3.9.1 自密实混凝土的配制机理	123
3.9.2 高掺粉煤灰自密实混凝土的配制	124
3.9.3 高掺粉煤灰自密实混凝土的展望	126
3.10 粉煤灰在碾压混凝土中的应用	127
3.10.1 碾压混凝土(RCC)筑坝技术的发展	127
3.10.2 粉煤灰对碾压混凝土性能的影响	127
参考文献	131
第4章 硅灰	133
4.1 前言	133
4.2 硅灰的生产、储存和运输	134
4.3 化学和物理性质	135
4.3.1 化学成分	135
4.3.2 物理特征	136
4.4 硅灰对混凝土性能的影响	137

4.4.1	火山灰对硬化混凝土性能的影响	137
4.4.2	工作性	138
4.4.3	凝结时间	139
4.4.4	塑性收缩	139
4.4.5	干缩	139
4.4.6	徐变	139
4.4.7	强度	140
4.4.8	渗透性	141
4.4.9	抗冻性	141
4.4.10	耐磨性	142
4.4.11	耐化学侵蚀性	142
4.4.12	与碱-骨料反应相关的膨胀	143
4.4.13	混凝土中钢筋的腐蚀	143
4.4.14	硅灰在混凝土工业中的应用	144
4.5	硅灰在高早强自密实混凝土中的应用	144
4.5.1	试验原材料	146
4.5.2	试验结果与分析	147
4.6	硅灰在活性粉末混凝土中的应用	148
4.6.1	试验原材料	149
4.6.2	二次回归正交试验及分析	150
4.7	硅灰在高性能再生骨料混凝土中的应用	153
4.7.1	试验原材料	153
4.7.2	试验结果与分析	154
4.7.3	微观结构分析	156
4.7.4	本构关系	157
4.8	硅灰在碾压混凝土中的应用	159
4.9	硅灰在无机粘结胶中的应用	161
4.9.1	无机粘结胶的开发	161
4.9.2	无机粘结胶在混凝土修补工程中的应用	162
4.9.3	无机粘结胶在高强混凝土修补工程中的应用	163
4.9.4	无机粘结胶在提高碾压混凝土层面粘结中的应用	164
4.9.5	无机粘结胶的粘结机理分析	166
	参考文献	168

第5章 矿渣	172
5.1 前言	172
5.2 高炉铁矿渣	172
5.2.1 生产	172
5.2.2 粒化高炉矿渣的结构与成分	174
5.2.3 矿渣的作用机理	175
5.2.4 矿渣的化学激发	176
5.3 矿渣水泥	176
5.3.1 矿渣水泥的水化	176
5.3.2 熟料特性和矿渣细度的影响	177
5.3.3 热处理的影响	178
5.3.4 矿渣水泥的强度	178
5.3.5 矿渣水泥的耐化学侵蚀性	178
5.3.6 矿渣水泥的应用	180
5.4 矿渣对混凝土性能的影响	180
5.4.1 工作性	180
5.4.2 凝结时间和工作性损失	180
5.4.3 泌水和塑性开裂	181
5.4.4 水化热和早期热开裂	181
5.4.5 强度	182
5.4.6 弹性模量	183
5.4.7 干缩	183
5.4.8 徐变	183
5.4.9 热学性能	184
5.4.10 耐久性	184
5.5 矿渣在高强混凝土中的应用	185
5.5.1 混凝土抗裂性能的评价指标	186
5.5.2 试验结果及分析	187
5.5.3 高强混凝土抗裂机理分析	188
5.6 矿渣在活性粉末混凝土(RPC)中的应用	189
5.6.1 RPC的配制原理	190
5.6.2 RPC的原材料和成型程序	192
5.6.3 正交试验及分析	192

参考文献	193
第6章 磷渣粉	195
6.1 前言	195
6.2 磷渣粉的基本特性及在混凝土中的作用机理	197
6.2.1 磷渣粉的基本特性	197
6.2.2 磷渣粉的水化机理	199
6.3 磷渣粉对混凝土性能的影响	200
6.3.1 磷渣粉对混凝土凝结硬化特性的影响	200
6.3.2 磷渣粉对胶凝材料水化热和混凝土绝热温升的影响	203
6.3.3 磷渣的掺量对砂浆强度的影响	205
6.3.4 磷渣粉对混凝土强度的影响	206
6.3.5 磷渣粉对混凝土弹性模量的影响	208
6.3.6 磷渣粉对混凝土极限拉伸值的影响	209
6.3.7 磷渣粉对混凝土干缩的影响	209
6.3.8 磷渣粉对混凝土耐久性的影响	210
6.3.9 小结	212
6.4 磷渣粉在水工混凝土中的应用	213
6.4.1 试验设计与试验结果	213
6.4.2 试验结果分析	214
6.5 磷渣粉在基础混凝土中的应用	218
参考文献	220

绪 论

混凝土是当今世界上用量最大的人造材料，由于原料丰富、价格低廉、制备简单、造型方便、相对耐久性好、维护费低等不可取代的优点，21 世纪仍将是最主要的建筑材料。混凝土是经济发展和社会进步的基础原材料之一，在我国的需求量为材料之最。2003 年我国水泥产量已达 8.25 亿 t，混凝土用量达 15 亿 m^3 ，均居世界首位^[1]。目前，我国每年建造房屋约 20 亿 m^2 ，高速公路约 5000km，还有大量铁路、桥梁、港口等基础建设，仅混凝土一项就需要 40 亿 m^3 /年。相应的，我国水泥年产量逐年增长，2007 年已超过 13.5 亿 t，占世界水泥总量的 50% 以上^[2]。

最初，混凝土生产的原材料只有三种：水泥、骨料和水。其中，水泥几乎都是硅酸盐水泥。后来，为了提高新拌混凝土或硬化混凝土的某些性能，在拌合物中加入很少量的化学产品，通常称作化学外加剂。随后，一些其他材料（天然的无机材料）也开始加入混凝土拌合物中。掺用这些材料的最初原因是出于经济性考虑，因其通常是天然矿物、工业生产中的副产品或废料，比硅酸盐水泥便宜。在混凝土中掺用这些“辅助”材料可降低混凝土生产的能源成本，而近年来对生态环境的关注进一步推动了这些“辅助”材料的应用。一方面，硅酸盐水泥的生产对生态有害，不仅需要开采矿石，还将向大气排放大量的二氧化碳；另一方面，大量工业废料（如粉煤灰、硅灰或矿渣）需要处理。

与以往不同，如今在混凝土中掺用辅助材料还因为它们赋予了混凝土不同的优异性能。在很多国家，大多数混凝土含有至少一种辅助材料。如前所述，该材料以前定义为“辅助材料”，且用于配制混凝土时具有一定的胶结性。但在不同的文献中，该术语仍未统一。这些辅助材料如果用于生产水泥，则称为混合材料；如果直接加入混凝土中，则称为混凝土掺合料或矿物掺合料。不管是哪种添加方式，辅助材料在混凝土中的作用机理都是一样的。因此，可以称之为水泥替代材料或辅助胶凝材料，通常有助于混凝土强度的获得。

实际上，在这些材料中，有的具备胶结性，有的具备潜在胶结性，还有一些材料是通过物理作用来提高混凝土的强度。表 0-1 描述了它们的相关性能，可以看出，很难将水硬性（即纯粹的胶结性）划清。所有的胶凝材料有一共性：它们至少具有和硅酸盐水泥颗粒一样的细度，有时还更细。但在其他方面



却大有不同，主要取决于它们的来源、化学成分及物理特性（如表面结构或密度）。辅助胶凝材料的掺量有很大的不同，有的较低，有的较高，甚至是胶凝材料的主要部分，这取决于其活性的大小。

表 0-1 不同胶凝材料的胶结性^[3]

材料	胶结性
硅酸盐水泥熟料	完全胶结性（水硬性）
磨细高炉矿渣	潜在水硬性，部分水硬性
天然火山灰（N类）	掺入硅酸盐水泥中具有潜在水硬性
硅质粉煤灰（F类）	掺入硅酸盐水泥中具有潜在水硬性
高钙粉煤灰（C类）	掺入硅酸盐水泥中具有潜在水硬性，但自身也具备较小的水硬性
硅灰	掺入硅酸盐水泥中具有潜在水硬性，但物理作用很大
钙质填料	主要表现为物理作用，但掺入硅酸盐水泥中具有较低的潜在水硬性
其他填料	化学惰性，只具备物理作用

实际上，术语“胶凝材料”指除骨料极细颗粒之外的所有粉体材料。有些胶凝材料自身具有水硬性，即材料自身可以水化并提高混凝土的强度；或者具有潜在水硬性，它们能与拌合物中共存的水泥水化产物发生化学反应，进而表现出水化活性。但也有第三种可能，这些胶凝材料基本上是化学惰性，但对其他材料的水化有催化作用（即促进成核和提高水泥浆的密实度）或对新拌混凝土的性能有物理作用。

本书将结合作者多年来的研究成果，对石灰石粉、天然火山灰、粉煤灰、硅灰、矿渣及磷渣粉等不同的辅助胶凝材料在混凝土中的作用机理、特殊应用以及对混凝土性能的具体影响进行介绍。

参考文献

- [1] 赵霄龙，张仁瑜．建筑节能 功在当代 利在千秋 [J]．住宅产业，2005（8）：19～22.
- [2] 中国建筑学会建筑材料分会．我国混凝土技术进展及工程应用 [C]．建筑材料新进展及工程应用 [A]．北京：中国建材工业出版社，2008.
- [3] Neville A M. Properties of concrete (Fourth edition) [M]．Pearson prentice hall. 1995.

第1章 石灰石粉

1.1 前言

我国水泥总产量几乎占到全球水泥生产总量的“半壁江山”，并且保持着很高的增长速度。据中国水泥行业协会数据显示^[1]：“十五”期间国内水泥总产量净增 4.5 亿 t，年平均增量超过 9000 万 t，2006 年水泥产量更是历史性地突破 12 亿 t；目前，我国水泥产量已超过世界水泥产量的 40% 以上。但是在国内水泥产能快速增长的背后，却有一个不容回避且日益凸显的问题，那就是水泥工业的高能耗和高污染问题。2007 年我国生产水泥 13.2 亿 t，排放 13.2 亿 t CO₂，对环境造成严重污染；同时还消耗了大量资源，石灰石、煤大量使用，造成资源短缺^[2]。

为了解决水泥工业带来的能耗和污染问题，除了改良水泥的生产工艺外，最有效的方法是减少硅酸盐水泥熟料用量，即掺入大量的矿物材料作为辅助胶凝材料。例如，欧洲标准 EN197—1 复合水泥中矿物材料组分最高可达 60% ~ 80%^[3]。更为常见的是将大量矿物材料掺入混凝土中，用作混凝土的辅助胶凝材料，特别是大体积混凝土中，辅助胶凝材料的掺量最高可达 50% ~ 70%。这些矿物材料多为工业废渣或磨细石灰石粉，将它们与硅酸盐水泥熟料共同组成复合胶凝材料，不仅可以减少污染、节约熟料，还能改善复合胶凝材料的诸多性能，已成为配制高性能混凝土的必备组分。

粉煤灰是当前应用最广、用量最大的辅助胶凝材料，部分取代硅酸盐水泥熟料后，不仅节约了水泥熟料，还能够改善混凝土的各项性能（如新拌混凝土的工作性、硬化混凝土的强度、体积稳定性及耐久性等）。然而，由于近几十年来国内外水利、交通、工民建等基础和民用设施建设的迅速发展，逐渐面临粉煤灰紧缺的问题；而且，还有一些国家和地区（如邻国柬埔寨、我国西南部分省市）根本就没有粉煤灰，从外地长距离运输粉煤灰必将大大提高混凝土的单位成本、增大工程造价。一方面是工程建设不断扩大，另一方面是粉煤灰等矿物材料短缺，因此，必须尽快找到一种容易获取、优质廉价的新型辅助胶凝材料。

《通用硅酸盐水泥》GB 175—2007 中允许加入一定量的石灰石粉作为非活性混合材料。美国 ACI 212.1R—81 《Admixtures for Concrete and Guide for Use of Admixtures in Concrete》(《混凝土外加剂和外加剂在混凝土中的使用指南》)中也指出石灰石粉可以作为混凝土的辅助胶凝材料。传统观点认为磨细石灰石粉是一种惰性材料,细度很小,可以与水泥等共同组成复合胶凝材料用于混凝土中,补充混凝土中缺少的细颗粒,减少泌水和离析,改善混凝土的和易性。

石灰石粉是一种容易得到且廉价的材料,骨料的加工过程中也会带来大量石灰石粉,如果不加以利用,不仅要占用场地堆放,而且会对环境造成污染。如果能将其稍作加工,作为辅助胶凝材料使用,替代日益紧缺的粉煤灰和价格相对昂贵的硅粉或矿渣,对于解决实际工程的原材料紧缺问题、降低工程造价和环保等将具有重大的现实意义,将有效地推动混凝土的可持续发展,是绿色建材的重要发展方向之一。

石灰石粉(Limestone Powder)主要指石灰岩经机械加工后的小于0.16mm的微细粒。目前,在混凝土材料中,对石灰石粉的使用主要有两个方面:一是将石灰石粉部分取代细骨料,二是将石灰石粉作为辅助胶凝材料使用,而且针对前者做的研究较多。

在我国,普定、岩滩、江垭、汾河二库、白石、黄丹等水电工程中均采用了石灰石粉取代部分细骨料,取得了良好的效果^[4~7]。石灰石粉在一定掺量范围内起到填充密实和微骨料效应,能明显改善新拌混凝土的和易性,而对混凝土的凝结时间几乎没有影响,提高混凝土的强度和抗渗性能,还可减少水泥用量 $30\sim 50\text{kg/m}^3$,从温控角度考虑,可以降低 $3^\circ\text{C}\sim 5^\circ\text{C}$ 绝热温升,这对于减小温度应力,提高混凝土抗裂能力是非常有利的。

龙滩、漫湾、大朝山、小湾等水电工程中,采用了石灰石粉作为辅助胶凝材料取代部分水泥,也得到成功应用^[8~9]。例如,龙滩水电站中采用石灰石粉取代25%的粉煤灰,共同作为混凝土辅助胶凝材料,对碾压混凝土的VC值影响不大,而抗压强度、劈拉强度和抗渗性能也能得到保证。

陈改新等^[10]曾提出研究水泥、粉煤灰和石灰石粉三元复合胶凝材料。水泥、粉煤灰和石灰石粉三者颗粒间发生“填充效应”,颗粒间的空隙减小,使空隙水减少,自由水增加,则浆体的流变性增大。研究水泥、粉煤灰和石灰石粉三元粉体体系对浆体流变性的影响是一个新的理念,这在以往的混凝土配合比设计方法中没有提及。他们通过试验提出优化配合比,即水泥34%、磨细锰铁矿渣23%和石灰石粉43%组成的三元复合胶凝材料。

国外也逐步对石灰石粉在混凝土中的应用开展研究,但多数仍属于试探性应用研究。主要以石灰石粉等量部分取代细骨料,得出的结论与国内成果基本

一致,石灰石粉能在一定程度上对混凝土的宏观性能起促进作用^[11]。

2005年,在长沙举办的第一届自密实混凝土的设计、性能和应用国际研讨会上,很多与会专家在配制自密实混凝土时掺入大量石灰石粉,掺量最高达到 $300\text{kg}/\text{m}^3$ 。石灰石粉的掺入不仅节约了大量水泥,还有效地改善了自密实混凝土的性能。石灰石粉取代部分水泥可以降低混凝土的用水量,提高新拌混凝土的流动性,使其能够自流平、自密实;可以调节硬化混凝土的强度,既能配制高强自密实混凝土,也能配制低强自密实混凝土,特别是低强度等级的自密实混凝土将有广阔的应用前景;可以降低混凝土的干缩,提高混凝土的徐变;可以降低水粉比,随着水粉比的减小,氯离子的扩散深度也将降低^[12~21]……总之,石灰石粉能够改善混凝土的多种性能,可以用作辅助胶凝材料。

当前很多国内外的研究是结合实际工程进行的,主要的方式是以石灰石粉代砂(或砂中石灰石粉含量较高),石灰石粉粒径要求通常为 $80\mu\text{m}$,甚至 0.16mm ,研究主要针对强度、干缩、抗渗性能及抗冻性能这几个工程常用指标进行。石灰石粉作为辅助胶凝材料应用研究较少,特别是对含石灰石粉复合胶凝材料的水化特性及其在水化中的作用机理等研究成果较少。

在对石灰石粉活性的认识上存在一个误区,认为石灰石粉属于惰性材料。辅助胶凝材料的活性实际上体现在两个方面:物理方面的填充效应和化学方面的活性效应。大多数研究只认识到石灰石粉的物理填充效应,而对其化学方面的活性缺乏足够认识。

大多数的研究认为石灰石粉属于惰性材料,之所以能在混凝土中起到积极作用,主要是因为它具有微骨料效应^[22~24]。得出这样的结论主要原因可能有两方面:第一,采用的石灰石粉粒径较大,通常以 $80\mu\text{m}$ 或 0.16mm 为衡量指标,按照纳米材料的观点,随着粒径减小,比表面积大大增加。庞大的比表面积,使得处于表面的原子数越来越多,键态严重失配,同时表面能迅速增加,使这些表面原子具有高的活性,出现许多活性中心,极不稳定,很容易与其他原子结合^[25]。因而,把石灰石粉磨得更细将有可能观察到它的水化活性;第二,水化龄期不够长,石灰石粉需要在一定环境和足够的水化时间内才能发生水化反应。

1.2 石灰石粉的基本特性

石灰石粉(Limestone Powder, LP)由石灰岩磨细加工而得,石灰岩属沉积岩类,俗称“青石”,是一种在海、湖盆地中生成的沉积岩。大多数为生物



沉积，主要由方解石微粒组成，常混入白云石、黏土矿物或石英。按混入矿物的不同可分为白云质石灰岩、黏土质石灰岩、硅质石灰岩等。岩石呈多种颜色，有黑色、深灰色、灰色或白色。致密块状，遇稀冷盐酸剧烈起泡。石灰岩是烧制石灰的主要原料，在冶金、水泥、玻璃、制糖、化纤等工业生产上都有广泛的用途。白垩是石灰岩的特殊类型，为一种白色的、疏松的土状岩石，主要由粉末状的方解石组成，外貌似硅藻土，遇酸不起泡，是石灰和水泥的原料^[26]。

表 1-1 中列出了石英岩、花岗岩、石灰岩和大理石的一些基本性能。其中，石灰岩和花岗岩是目前使用最广泛的骨料类型，与花岗岩相比，石灰岩的强度明显偏低，而其他性能较为接近。也正是由于石灰岩强度较低，很容易将其磨细加工成石灰石粉，加工费用较低，经济上可行。

表 1-1 几种岩石的基本性能^[27~28]

性能	石英岩	花岗岩	石灰岩	大理石
抗压强度 (MPa)	210	150	98	95
抗拉强度 (MPa)	15	14	11	11
弹性模量 (GPa)	110	75	60	64
断裂能 (N/m)	125	110	119	115
线膨胀系数 ($\times 10^{-6}/K$)	11 ~ 13	7 ~ 9	6	4 ~ 7
热传导性 [$W/(m \cdot K)$]	—	3.1	3.1	—
比热 [$J/(kg \cdot K)$]	—	800	—	—

表 1-2 是石灰石粉的化学成分和物理性质。由该表可以看出，石灰石粉的主要成分是 $CaCO_3$ ，需水量比为 92%，具有较高的减水作用。

表 1-2 石灰石粉的化学成分和物理性质

化学成分 (%)					物理特性
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	表观密度 (g/cm^3)
2.50	0.60	0.36	54.03	0.54	2.73
TiO ₂	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	烧失量	需水量比 (%)
0.05	0.01	0.096	0.084	41.59	92

图 1-1 为石灰石粉的颗粒形貌照片。从其形貌可以看出，石灰石粉基本上呈无规则几何结构，并拥有一定的级配，用为混凝土粉体材料时，将有良好的填充效果。

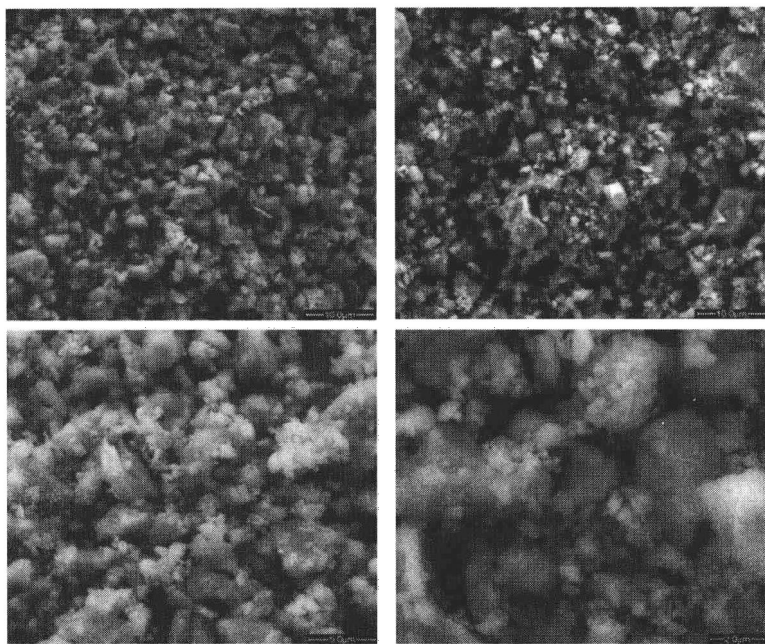


图 1-1 石灰石粉的颗粒形貌

由于石灰岩的强度较低，很容易将其磨细加工成石灰石粉。图 1-2 和图 1-3 是石灰石粉、粉煤灰和水泥颗粒的区间百分含量和累计百分含量的激光粒度分析结果，其中水泥为金隅 42.5 级普通硅酸盐水泥，粉煤灰为一级粉煤灰。通过对比，从图 1-2、图 1-3 中可明显看出，石灰石粉颗粒基本上都在 $10.0\mu\text{m}$ 以下，比粉煤灰颗粒更细，而水泥的颗粒粒径最大，且细颗粒较少。

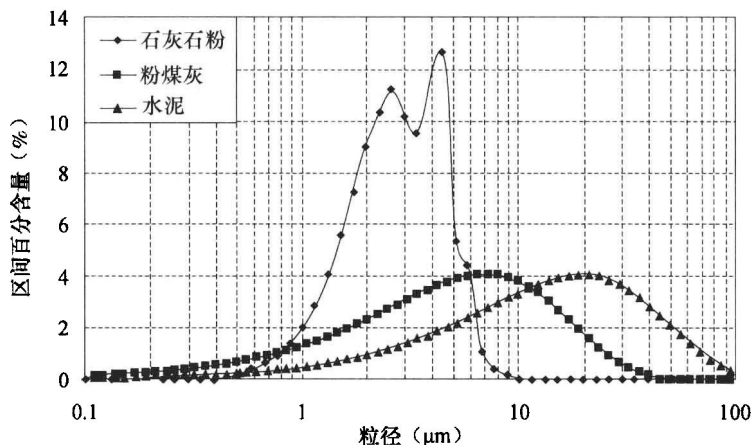


图 1-2 石灰石粉、粉煤灰和水泥颗粒的区间分布含量