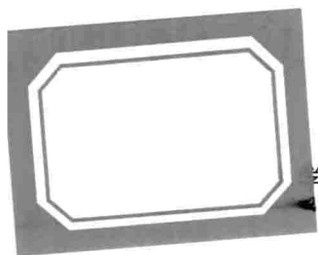


山东科技大学学术著作出版基金资助出版

高性能混凝土理论与实践

李云峰 著



学术著作出版基金资助出版

高性能混凝土理论与实践

李云峰 著

山东大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

高性能混凝土理论与实践/李云峰著.

—济南:山东大学出版社,2013.12

ISBN 978-7-5607-4976-1

I. ①高… II. ①李… III. ①高性能混凝土—研究 IV. ①TU528.31

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 003324 号

责任策划 陈 珊

责任编辑 李 港

封面设计 牛 钧

出版发行 山东大学出版社

社 址 山东省济南市山大南路 20 号

邮 编 250100

电 话 市场部(0531)88364466

经 销 山东省新华书店

印 刷 东港股份有限公司印刷

规 格 720 毫米×1000 毫米 1/16

13 印张 250 千字

版 次 2013 年 12 月第 1 版

印 次 2013 年 12 月第 1 次印刷

定 价 35.00 元

版权所有,盗印必究

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社营销部负责调换

前 言

高性能混凝土具有诸多性能特点,如工作性优良、体积稳定性好、耐久性高,以及显著的技术、经济、社会和环境效益,是目前国内外工程界研究的热点。随着跨海大桥、海底隧道、高速铁路、煤矿矿井、高层建筑等工程中越来越多地应用高性能混凝土,针对高性能混凝土新技术的研究日益成为学术界的焦点,在高性能混凝土领域取得了较为丰硕的研究成果和丰富的实践经验。

作者及研究团队成员先后承担“十一五”国家科技支撑计划项目子课题、山东省高校科技计划项目、青岛市科技计划项目等多项研究课题,在新型钢渣矿物掺合料、钢渣高性能混凝土、混凝土结构早期收缩开裂及控制技术、硅粉高性能混凝土等领域,进行了大量的试验研究与理论探讨,现将部分研究成果撰写整理,汇编成此书。第1章介绍高性能混凝土各种原材料(水泥、矿物外加剂、化学外加剂等)对高性能混凝土性能的影响;第2章详细研究新型矿物掺合料钢渣粉对混凝土微观结构、工作性、力学性能、耐久性能等方面的影响,提出了水泥—钢渣—矿渣复合胶凝材料的水化反应链式激发过程;第3章、第4章深入分析新型钢渣高性能混凝土的各种基本性能,研究抑制开裂措施、收缩开裂风险评估等理论并进行工程实践;第5章进行混凝土结构早期收缩开裂研究,建立早期混凝土应力分析模型进行开裂风险的评估;第6章利用硅粉矿物掺合料研制高性能混凝土,对硅粉高性能混凝土各项性能进行试验研究。

山东科技大学土木建筑学院对本书的出版给予了大力支持,山东科技大学学术著作出版基金、山东科技大学防灾减灾工程及防护工程学科山东省“泰山学者”建设工程专项经费对本书的出版给予了资助,中国建筑材料科学研究总院姚燕、王玲等老师对相关研究工作给予了许多指导和帮助,山东科技大学研究生郭华勋、王玲玲、王学良、高新丽、徐志峰、王全祥、韩米雪、张东升等参与了课题试验研究和资料整理工作,在本书的编写过程中,还参考了国内外同行公开发表的众多研究成果,在此一并表示感谢!

由于作者水平有限,缺憾乃至错误之处在所难免,恳请广大读者批评指正。

作 者
2013年10月

目 录

第 1 章 高性能混凝土原材料	(1)
1.1 水 泥	(1)
1.1.1 水泥的类别和性能	(1)
1.1.2 高性能混凝土用水泥的选择	(9)
1.2 矿物外加剂	(11)
1.2.1 磨细矿渣	(12)
1.2.2 粉煤灰	(22)
1.2.3 硅 灰	(39)
1.2.4 天然沸石粉	(45)
1.2.5 钢渣粉	(48)
1.3 化学外加剂	(53)
1.3.1 高效减水剂	(53)
1.3.2 泵送剂(缓凝高效减水剂)	(58)
1.3.3 引气剂	(59)
第 2 章 新型钢渣矿物掺合料	(65)
2.1 钢渣粉物理化学性能	(65)
2.2 钢渣粉对水泥胶砂性能的影响研究	(66)
2.2.1 钢渣粉对水泥胶砂强度的影响研究	(66)
2.2.2 钢渣粉对水泥胶砂收缩性能的影响研究	(71)
2.2.3 钢渣粉对水泥胶砂耐磨性能的影响研究	(76)
2.2.4 钢渣粉掺合料抑制碱集料反应试验研究	(77)
2.3 钢渣体积稳定性控制	(81)
2.3.1 钢渣体积稳定性控制的作用	(81)
2.3.2 钢渣体积稳定性控制方法——热闷法	(82)

2.4	钢渣、矿渣粉化处理	(83)
2.4.1	钢渣	(83)
2.4.2	矿渣	(84)
2.5	钢渣活性化学激发试验	(85)
2.5.1	钢渣活性激发方法	(85)
2.5.2	硫酸盐类复合激发剂	(85)
2.5.3	三乙醇胺类复合激发剂	(86)
2.6	钢渣粉化学激发作用机理	(87)
2.6.1	硫酸钠类复合激发剂	(87)
2.6.2	三乙醇胺类复合激发剂	(88)
2.7	水泥—钢渣—矿渣复合胶凝材料体系微观结构及水化机理分析	(88)
2.7.1	复合胶凝材料体系水化及微观结构分析	(88)
2.7.2	水泥、钢渣、矿渣水化链式激发过程	(93)
2.8	本章小结	(94)
第3章	新型钢渣高性能混凝土试验研究	(97)
3.1	钢渣粉(矿渣粉)对混凝土工作性能的影响研究	(98)
3.2	钢渣粉(矿渣粉)对混凝土力学性能的影响研究	(98)
3.2.1	混凝土抗压强度	(98)
3.2.2	混凝土抗弯拉强度	(101)
3.3	钢渣粉(矿渣粉)混凝土耐久性能	(104)
3.3.1	钢渣混凝土抗氯离子渗透试验研究	(104)
3.3.2	钢渣混凝土弯拉疲劳性能	(105)
3.4	钢渣粉(矿渣粉)混凝土收缩抗裂性能研究	(111)
3.4.1	材料配合比	(111)
3.4.2	试验方法	(112)
3.4.3	试验结果	(113)
3.5	本章小结	(116)
第4章	新型钢渣(矿渣)高性能混凝土工程应用	(117)
4.1	钢渣(矿渣)高性能水泥混凝土配合比优化设计	(117)
4.1.1	高韧性混凝土路面配合比	(117)
4.1.2	工程用钢渣(矿渣)混凝土配合比	(117)
4.2	钢渣(矿渣)高性能水泥混凝土路面工程应用	(118)
4.2.1	德州市内钢渣(矿渣)混凝土路面工程	(118)

4.2.2 济钢厂区内钢渣(矿渣)混凝土路面工程	(120)
4.2.3 唐山钢渣粉生产基地试验路工程	(121)
4.3 本章小结	(122)
第5章 混凝土结构早期收缩开裂风险评估	(123)
5.1 混凝土的早期收缩	(124)
5.1.1 自生收缩	(125)
5.1.2 干燥收缩	(127)
5.1.3 混凝土的收缩计算	(128)
5.2 混凝土的早期温度变形	(132)
5.3 混凝土的早期徐变松弛特性	(133)
5.4 混凝土早期线粘弹性本构关系	(135)
5.4.1 线粘弹性本构方程	(135)
5.4.2 约束收缩早期混凝土材料本构关系	(136)
5.5 混凝土早期约束应力及开裂预测评估	(136)
5.6 本章小结	(138)
第6章 硅粉高性能混凝土性能研究	(143)
6.1 硅粉水泥胶砂的力学性能	(143)
6.1.1 硅粉水泥胶砂的配合比	(143)
6.1.2 硅粉水泥胶砂的抗压强度	(144)
6.1.3 硅粉水泥胶砂的抗折强度	(153)
6.2 硅粉混凝土的力学性能	(161)
6.2.1 混凝土的配合比	(161)
6.2.2 硅粉混凝土的抗压强度	(162)
6.2.3 硅粉混凝土的抗折强度	(171)
6.3 硅粉混凝土抗氯离子渗透性能	(178)
6.3.1 混凝土的配合比	(178)
6.3.2 试验结果	(179)
6.3.3 试验结果分析	(179)
6.4 硅粉混凝土收缩抗裂性能	(187)
6.4.1 圆环收缩开裂试验研究	(187)
6.4.2 硅粉混凝土平板收缩开裂试验研究	(192)
6.5 本章小结	(195)

第 1 章 高性能混凝土原材料

高性能混凝土所用的原材料,除传统混凝土所用的水泥、砂、石和水四大组成,还有化学外加剂(亦称为“混凝土的第五组分”)和矿物外加剂(矿物掺合料,亦称为“混凝土的第六组分”)。使用新型的高效减水剂和磨细矿物掺合料是使混凝土达到高性能的主要技术措施。前者能降低混凝土的水胶比,增大坍落度和控制混凝土的坍落度损失,赋予混凝土高的致密性和良好的工作性;后者能填充胶凝材料的孔隙,参与胶凝材料的水化,除提高混凝土的致密性,还可改善混凝土的界面结构,提高混凝土的耐久性与强度。由于高性能混凝土的高性能要求和配制特点,原材料中原来对普通混凝土影响不明显的因素,对高性能混凝土就可能影响显著,因此,高性能混凝土和普通混凝土对所用原材料的要求有所不同。

1.1 水 泥

1.1.1 水泥的类别和性能

1.1.1.1 水泥的类别

水泥是混凝土中最重要的一种胶凝材料,它的选择直接影响混凝土的性能和成本。我国水泥种类繁多,按照不同的划分方法可分为不同的类型,如表 1.1 所示。

随着水泥生产技术的发展,如生料的均化和原料预均化技术的发展,烘干兼粉磨设备不断改进,水泥新型干法窑(悬浮预热器窑和窑外分解窑)不但大大降低了熟料的能耗,产量大幅提高,而且熟料质量完全可与湿法生产的熟料相媲美,已成为当前世界各国水泥工业主要发展的窑型。目前,我国大型水泥厂一般均为新型干法窑。

表 1.1 我国水泥的类别

划分方法	类别	说明
按照性能和用途来划分	通用水泥	用于大量土木建筑工程一般用途的水泥,如硅酸盐水泥、普通硅酸盐水泥、矿渣硅酸盐水泥、火山灰质硅酸盐水泥和粉煤灰硅酸盐水泥等
	专用水泥	指有专门用途的水泥,如油井水泥、中热硅酸盐水泥、低热矿渣硅酸盐水泥、砌筑水泥等
	特性水泥	指某种性能较突出的一类水泥,如快硬水泥系列、膨胀水泥系列、抗硫酸盐硅酸盐水泥等
按照水泥的生产方法(生料制备方法)不同来划分	湿法	将原料加水粉磨成生料浆后喂入湿法回转窑煅烧成熟料,则称为“湿法生产”。湿法生产能耗较高,单电耗较低,生料易于均化,成分均匀,熟料质量较好,粉尘少,在 20 世纪 30 年代得到了快速发展
	半干法	将生料粉加入适量的水制成生料球后喂入立窑或立波尔窑煅烧成熟料的方法,也可归入干法
	干法	将原料同时烘干与粉磨或烘干后粉磨成生料粉,然后喂入干法窑煅烧成熟料的方法
按照水泥的生产方法(熟料煅烧方法)不同来划分	立窑	立窑适用于规模较小的工厂
	回转窑	湿法窑
		立波尔窑 新型干法窑(悬浮预热器窑和窑外分解窑)
按照水泥熟料的矿物组成来划分	硅酸盐水泥、铝酸盐水泥、硫铝酸盐水泥、氟铝酸盐水泥、铁铝酸盐水泥、无熟料水泥等	

1.1.1.2 水泥的品种

配制高性能混凝土主要选用硅酸盐水泥和普通硅酸盐水泥,特殊情况下,还可选用其他几种类型的水泥。在高性能混凝土中,如果选用含有各种混合材的水泥,必须弄清楚水泥中矿物混合材的品种、细度和掺量,在进行高性能混凝土配合比设计时必须扣除水泥中混合材掺量,并在大量试配基础上确定各组分的用量。

1. 硅酸盐水泥

凡是由硅酸盐水泥熟料、0%~5%石灰石或高炉矿渣、适量石膏磨细制成的水硬性胶凝材料,均称为“硅酸盐水泥”。硅酸盐水泥分为两种类型,不掺混合材料的称为“Ⅰ型硅酸盐水泥”,代号“P·Ⅰ”,在硅酸盐水泥粉磨时掺加不超过水泥质量 5%的石灰石或粒化高炉矿渣混合材料的称为“Ⅱ型硅酸盐水泥”,代号“P·Ⅱ”,

广泛用于各种混凝土或钢筋混凝土工程。

2. 普通硅酸盐水泥

凡由硅酸盐水泥熟料、6%~15%混合材料、适量石膏磨细制成的水硬性胶凝材料,均称为“普通硅酸盐水泥”(简称“普通水泥”),代号“P·O”。按照国家标准 GB 175 中的规定,普通水泥中掺活性混合材料时,最大掺量不得超过 15%,其中允许用不超过水泥质量 5%的窑灰或不超过水泥质量 10%的非活性混合材料来代替。普通水泥广泛用于各种混凝土或钢筋混凝土工程。

3. 矿渣硅酸盐水泥

凡由硅酸盐水泥熟料、粒化高炉矿渣和适量石膏磨细制成的水硬性胶凝材料,均称为“矿渣硅酸盐水泥”(简称“矿渣水泥”),代号“P·S”。水泥中粒化高炉矿渣掺加量按质量分数计为 20%~70%,允许用石灰石、窑灰、粉煤灰和火山灰质混合材料中的一种材料代替矿渣,代替数量不得超过水泥质量的 8%,替代后水泥中粒化高炉矿渣不得少于 20%。该水泥具有水化热较低、耐腐蚀性和耐热性较好等特点,但泌水性和干缩性较大,抗冻性较差,早期强度较低(但后期强度增进率较快)。矿渣硅酸盐水泥可用于地面、地下、水中的各种混凝土工程中。

4. 火山灰质硅酸盐水泥

凡由硅酸盐水泥熟料、火山灰质混合材和适量石膏磨细制成的水硬性胶凝材料,均称为“火山灰质硅酸盐水泥”(简称“火山灰水泥”),代号“P·P”。按照国家标准 GB 1344 中的规定,火山灰水泥中火山灰质混合材料掺加量按质量分数计为 20%~50%。常用的火山灰质混合材料有火山灰、凝灰岩、煤矸石、烧页岩、烧黏土、硅藻土等,所用材料应符合火山灰质混合材料标准 GB/T 2847 中规定的要求。火山灰水泥具有水化热较低、耐硫酸盐侵蚀性较好等特点,但需水性和干缩性较大,抗冻性较差,早期强度较低(但后期强度增进率较大)。火山灰水泥的用途一般与普通硅酸盐水泥相类似,但更适合于地下、水中及潮湿环境的混凝土工程。

5. 粉煤灰硅酸盐水泥

凡由硅酸盐水泥熟料、粉煤灰和适量石膏磨细制成的水硬性胶凝材料,均称为“粉煤灰硅酸盐水泥”(简称“粉煤灰水泥”),代号“P·F”。按照国家标准 GB 1344 中的规定,粉煤灰水泥中粉煤灰掺加量按质量分数计为 20%~40%,粉煤灰质量应符合国家标准 GB/T 1596 中规定的要求。粉煤灰水泥具有需水量低、干缩性小、抗裂性较好、水化热低的特点。因此,粉煤灰水泥可用于一般工业和民用建筑,尤其适合于大体积的水工混凝土以及地下和海港工程等。

6. 复合硅酸盐水泥

凡由硅酸盐水泥熟料、两种或两种以上规定的混合材料、适量石膏磨细制成的水硬性胶凝材料,均称为“复合硅酸盐水泥”(简称“复合水泥”),代号“P·C”。按照国家标准 GB 12958 中的规定,水泥中混合材料总掺加量按质量分数计,应大于

15%，但不超过 50%。水泥中允许用 8% 以下的窑灰代替部分混合材料，掺加矿渣时混合材料掺量不得与矿渣硅酸盐水泥重复。复合硅酸盐水泥广泛用于各种工业与民用建筑工程，是我国主要的水泥品种之一。

1.1.1.3 水泥的物理性能及对高性能混凝土的影响

1. 密度和容重

水泥密度是指物料在没有空隙的状态下单位体积的质量。硅酸盐水泥的密度，主要取决于熟料的矿物组成、熟料的煅烧程度等，普通水泥、矿渣水泥、火山灰水泥、粉煤灰水泥、复合水泥等水泥的密度不仅与熟料密度有关，还与混合材的种类和掺加量等有关。水泥容重是物料在自然状态下（包括空隙）单位体积的质量。各种水泥的密度和容重范围如表 1.2 所示。

表 1.2 各种水泥的密度和容重范围

品 种	密度(g/cm ³)	容重(g/L)
硅酸盐水泥	3.1~3.2	900~1300
普通水泥	3.05~3.2	
矿渣水泥	3.0~3.1	800~1000
火山灰水泥、粉煤灰水泥	2.7~3.1	

2. 细 度

水泥细度是水泥企业用来控制产品质量的重要指标之一，它影响水泥的凝结硬化速度、强度、需水性、干缩性、水化热等一系列性能。水泥颗粒尺寸小于 40 μm 才具有较高活性，大于 90 μm 的颗粒几乎接近惰性，仅起填充作用。因此水泥必须控制一定的粉磨细度，水泥颗粒越细，则凝结快，早期强度发挥快，泌水性小，但也不能太细，否则一方面水泥的需水量大幅度增加，干缩大，水化放热集中，另一方面也大大降低磨机产量，增加电耗。在高性能混凝土中，水泥细度过大，容易导致混凝土的早期开裂，还会影响外加剂的作用效果。

水泥细度通常有三种表示方法：筛余、比表面积和颗粒级配。我国六大通用水泥产品标准中规定：除硅酸盐水泥用比表面积表示细度，其余水泥均用筛余表示水泥细度。水泥颗粒级配就是水泥不同颗粒大小的含量。从提高水泥生产技术、充分发挥水泥熟料的潜能出发，水泥颗粒之间有一个合适的比例是非常重要的，3~32 μm 的颗粒对强度增进率起主要作用，总量不能低于 65%；小于 3 μm 的颗粒不能超过 10%。

最简单的也是应用最早的粒度分析方法是筛分法，但标准筛最细一般只能到 400 目（相当于 38 μm ）。对于小于 10 μm 的超细粉体，不可能用标准筛进行粒度分

析和检测,这时可以采用沉降法、激光粒度分析法、BET 法等,其中激光粒度分析法测定范围为 $0.05\sim 3000\mu\text{m}$,自动化程度高,操作简单,测定速度快,重复性好,经常用于水泥和矿物外加剂颗粒级配的测试与分析。水泥的细度对外加剂的作用效果会有影响。

3. 需水性

混凝土中的水有两个作用:一是与水泥矿物进行水化反应,使混凝土凝结硬化,产生强度;二是使混凝土有一定的可塑性和流动性,便于试验成型和施工操作。其中水泥水化所需的水以外的游离水分会在硬化体中留下空隙,降低混凝土的强度和耐久性。

水泥加水后,按规定的方法搅拌,使水泥净浆达到规定可塑状态时的需水量称为“水泥标准稠度用水量”,用拌和水质量和水泥质量之比的百分数表示。影响水泥净浆需水性的主要因素有熟料矿物组成、水泥粉磨细度、水泥中混合材种类及其掺加量。

4. 凝结时间

水泥凝结过程分为初凝和终凝两个阶段:从水泥加水开始至净浆开始失去可塑性为水泥的初凝阶段,这段时间称为“初凝时间”;水泥加水至净浆完全失去塑性为水泥的终凝阶段,这段时间称为“终凝时间”。

凝结过快,拌制的水泥浆和混凝土还来不及输送和浇筑就失去流动性,使浇捣不能顺利进行,或因浇捣而破坏已初步形成的水泥石结构,最终降低水泥和混凝土强度。我国六大通用水泥标准规定:硅酸盐水泥、普通水泥、矿渣水泥、火山灰水泥、粉煤灰水泥及复合水泥的终凝时间不得早于 45min,硅酸盐水泥的终凝时间不得迟于 6.5h,普通水泥、矿渣水泥、火山灰水泥、粉煤灰水泥及复合水泥的终凝时间不得迟于 10h。水泥磨机内温度过高,引起部分二水石膏脱水,形成半水石膏或可溶性硬石膏,就可能造成水泥的假凝;熟料中 C_3A 含量高,水泥中未掺石膏或石膏掺加量不足,碱含量高,熟料生烧或游离钙过高,都可能引起水泥瞬凝(又称“急凝”“闪凝”)。

5. 体积安定性

水泥体积安定性反映水泥浆在硬化后因体积膨胀不均匀而形变的情况。水泥加水后在硬化过程中,一般都会产生体积变化,如果这种变化是均匀体积变化,或伴随着水泥石凝结硬化过程进行,则对建筑物的质量没有影响。如果在水泥混凝土已经硬化后由于水泥中某些有害成分的作用,在水泥石内部产生剧烈的、不均匀的体积变化,建筑物内部会产生破坏应力,导致建筑物强度下降,甚至会引起建筑物开裂、崩塌等严重质量事故。因此,水泥体积安定性是水泥质量的重要指标之一。表 1.3 列出了高性能混凝土经常使用的硅酸盐系列水泥中可能引起水泥体积安定性不良的常见因素,各种检验方法也一并列在表 1.3 中。

表 1.3 水泥体积安定性检验方法

体积安定性不良因素	检验方法	标准	方法原理
熟料中游离氧化钙 (f-CaO) 含量	煮沸安定性	GB 1346 《水泥净浆标准稠度用水量、凝结时间、安定性检验方法》	雷氏夹试件:水泥标准稠度净浆试件在沸煮后,雷氏夹两只指针尖端增加距离的平均值不大于 5.0mm时,认为该水泥沸煮安定性合格 试饼法:水泥标准稠度净浆试饼在沸煮后目测未发现裂缝,用钢直尺检查也没有弯曲的试饼为安定性合格
熟料中方镁石 (MgO) 含量	压蒸安定性	GB/T 750 《水泥压蒸安定试验方法》	原理是在饱和水蒸气条件下提高温度(215.7℃)和压力(2.0MPa)使水泥中的方镁石在较短时间内绝大部分水化,通过 25mm × 25mm × 250mm 的试件的形变来判断水泥压蒸体积安定性。普通水泥、矿渣水泥、火山灰水泥、粉煤灰水泥的压蒸膨胀应不大于 0.50%,硅酸盐水泥压蒸膨胀率应不大于 0.80%
水泥中石膏 (SO ₃) 含量	测定水泥水化 24h 砂浆中的剩余 SO ₃ 含量,即单位体积砂浆溶出液中的 SO ₃ 含量,以 g/L 表示	JC/T 668 《水化水泥胶砂中硫酸钙含量的测定方法》	调凝石膏与熟料中 C ₃ A 水化物作用生成钙矾石的反应中固相体积增大到 2.22 倍。当水泥中有过量石膏存在,则在水泥硬化以后就会产生局部膨胀,可能造成混凝土结构的破坏 原理是采用一定组成的胶砂(水泥 500g、标准砂 1375g、蒸馏水 250mL)在 23℃ ± 0.5℃ 的水中养护 24h ± 15min,按特定方法制备水泥胶砂溶出液,然后测定水泥胶砂溶出液中的 SO ₃ 含量。硅酸盐水泥、普通水泥、火山灰水泥、粉煤灰水泥和复合水泥中 SO ₃ 应不超过 3.5%,矿渣水泥中 SO ₃ 应不超过 4.0%

6. 强度等级

水泥试样必须按 GB/T 17671 标准方法检测 3d 和 28d 龄期抗压强度和抗折强度。各品种水泥强度等级划分如表 1.4 所示。

表 1.4 水泥的强度等级

水泥品种	评定标准	强度等级
硅酸盐水泥	GB 175	42.5、42.5R、52.5、52.5R、62.5、62.5R
普通水泥	GB 175	32.5、32.5R、42.5、42.5R、52.5、52.5R
矿渣水泥	GB 1344	32.5、32.5R、42.5、42.5R、52.5、52.5R
火山灰水泥	GB 1344	32.5、32.5R、42.5、42.5R、52.5、52.5R
粉煤灰水泥	GB 1344	32.5、32.5R、42.5、42.5R、52.5、52.5R
复合水泥	GB 12958	32.5、32.5R、42.5、42.5R、52.5、52.5R

近几年的工程实践发现,自 1999 年水泥强度试验方法修订后,为了达到早期强度和后期强度的双通过,我国水泥发生的一个明显变化就是细度普遍增加、比表面积增大。这种单纯为了提高强度采取磨细的做法,对高性能混凝土的工作性带来了很大的影响。

7. 水化热

水泥水化热是单位质量水泥中的各种化合物与水反应的过程中放出的热量,以 J/g 表示。影响水泥水化热的因素很多,包括水泥熟料矿物组成、水泥度、混合材掺量及质量、水灰比、养护温度等,但主要取决于熟料矿物的组成与含量。降低 C_3A 含量对限制水泥放热量是有效的。

测定水化热的方法很多,按测试龄期长短、传热方式、仪器结构等可分为直接法(或蓄热法)和间接法(或溶解热法)(见表 1.5)。

表 1.5 水泥水化热测定方法

测定方法	检测标准	方法原理和特点
水化热直接测定法	GB 2022《水泥水化热试验方法(直接法)》	方法原理是在热量计周围温度不变的条件下,直接测定热量计内水泥胶砂的温度变化,计算热量计内积蓄和散失热量的总和,从而求得水泥水化 7d 内的水化热 直接法的优点是设备简单,试验操作方便,易于掌握,结果复演性好,缺点是测试时间长,不宜测定在 7d 龄期以上的水化热

续表

测定方法	检测标准	方法原理和特点
水化热间接测定法	GB/T 12959《水泥水化热测定方法(溶解热法)》	方法原理是根据热化学的盖斯定律,即热化学的热效应只与体系的初态和终态有关,而与反应的途径无关。它是在热量计周围温度一定的条件下,用未水化的水泥与水化一定龄期的水泥分别在一定浓度的标准酸中溶解,测得溶解热之差,即为该水泥在规定龄期内所放出的水化热 溶解热法的优点是测定结果较直接法准确,可以测定较长龄期的水化热,每次试验时间短,缺点是实验设备贵重,试验操作繁杂,不易掌握

高性能混凝土中胶凝材料用量较大,控制水泥及胶凝材料的水化热对于大体积混凝土施工有着重要意义。由于混凝土的导热能力很低,胶凝材料水化发出的热量蓄积在混凝土内部,而使混凝土内部温度升高,造成早期的温度应力破坏。因此,选择低水化热水泥来控制绝对放热量和放热速度,对工程有很大影响。

8. 收 缩

高性能混凝土应用中最需要解决的问题之一就是收缩,其中水泥对其收缩起到决定作用。混凝土常见收缩按原因分为四种,水泥对这四种收缩有着显著的影响。

(1)自身收缩和化学收缩:这种收缩是由水泥水化时绝对体积的减少(7%~9%)而引起的收缩,主要影响因素是水泥的矿物组成,普通水泥 100d 的收缩值约为 0.07mm/m,混凝土的自身收缩值为 0.04~0.10mm/m。

(2)干缩:这是因水泥浆体中水分蒸发而引起的收缩,净浆的干燥收缩可达4.0mm/m,一般混凝土的干燥收缩为 0.3~0.6mm/m。

(3)冷缩:这是由于温度下降所引起的混凝土体积缩小,又称为“温度收缩”,混凝土热膨胀系数为 $(6\sim 12)\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$,温度下降 20℃造成的冷缩量为 0.12~0.24mm/m。

(4)碳化收缩:空气中含有比例一定的 CO_2 ,它们在一定相对湿度下会使水泥硬化浆体的水化物,如 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、水化硅酸钙、水化铝酸钙和水化硫铝酸钙分解,并释放出水分,从而引起收缩。碳化收缩的大小主要是受混凝土养护制度和环境湿度的影响。对于常温养护、相对湿度为 50%的混凝土,碳化收缩值可达 0.4mm/m。不均匀的收缩将在制品和构件中产生内应力,甚至发生裂缝,影响质量和耐久性。

9. 耐磨性

水泥耐磨性对于道路混凝土来说是一个很重要的指标,耐磨能力以一定形状试件经一定的摩擦行程后质量损失百分数表示。混凝土的耐磨性主要取决于水泥石,影响水泥耐磨性的主要因素有水泥品种、混合材种类和掺量,并且水泥耐磨性与水泥强度的相关性很好,水泥强度越高,耐磨性越好。水泥耐磨性测定按 JC/T 421《水泥胶砂耐磨性试验方法》进行,胶砂试件的尺寸是 $150\text{mm} \times 150\text{mm} \times 35\text{mm}$ 。

10. 抗硫酸盐侵蚀性

混凝土抗硫酸盐侵蚀能力首先与水泥混凝土的密实性有关,水泥石孔隙率大,抗渗能力差,易受侵蚀破坏。水泥的矿物组成对混凝土的抗硫酸盐侵蚀性影响很大,CaO 含量高的水泥抗侵蚀能力差,而掺加粉煤灰、矿渣、火山灰的水泥能明显提高抗侵蚀能力。

水泥抗硫酸盐侵蚀试验方法常用的是强度试验法和测长试验法。强度试验法是将按规定方法制成的水泥砂浆棱柱体试体分别置于硫酸盐溶液和淡水中,到达一定龄期后分别测定其抗折强度,根据两者的强度比值来评定水泥的耐蚀能力。目前,我国硅酸盐水泥抗硫酸盐侵蚀标准试验方法是测长法,按 GB/T 749《硅酸盐水泥在硫酸盐环境中潜在膨胀性能试验方法》进行,方法原理是通过在水泥中外掺一定量的二水石膏,使水泥中的 SO_3 总含量达到 7.0%,这样使得过量的 SO_4^{2-} 直接与水泥石中影响抗硫性能的矿物反应产生膨胀,然后通过测量胶砂试件在规定龄期的膨胀率来衡量硅酸盐水泥潜在的抗硫酸盐性能。

1.1.2 高性能混凝土用水泥的选择

国外研究用于高强高性能混凝土的特种水泥有球形水泥、调粒径水泥、超细磨水泥和高贝利特水泥等,这些水泥有的尚处于试验研究阶段,有的国内并无生产,所以一般不推荐首选使用特种水泥。

根据高性能混凝土的特点,从国内实际情况出发,选用的水泥应具有足够的强度,同时具有良好的流变性,并与目前广泛应用的高效减水剂有很好的适应性,较容易控制坍落度损失。在我国,普通水泥和硅酸盐水泥的强度等级完全可以满足高强高性能混凝土配制的需要,最常使用的是 42.5 强度等级以上的水泥。

在水泥的选择性试验研究中,我们对不同强度标号的硅酸盐水泥(从 425 号到 725 号)、中热水泥、普通硅酸盐水泥进行了试验。水泥的化学分析及胶砂强度值如表 1.6 所示,在混凝土配比一致,水泥用量、外加剂掺量相同,以不同的水灰比控制坍落度大致相同的情况下,各水泥配制的混凝土强度试验结果如表 1.7 所示。

表 1.6 水泥的化学分析及胶砂强度

序号	水泥品种	化学成分(%)							胶砂强度(MPa)	
		烧失量	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	3d 抗压/ 3d 抗折	8 抗压/ 28d 抗折
1	725 号硅酸盐	1.65	20.22	4.34	4.88	64.80	0.84	2.50	48.9/7.3	76.7/9.5
2	625 号硅酸盐	1.73	21.76	4.39	4.41	61.85	1.69	3.16	44.4/7.4	71.0/9.3
3	LN52 号硅酸盐	1.27	19.97	5.52	6.06	61.53	1.64	2.75	37.9/6.88	63.7/9.50
4	LLH525 号普硅	1.76	22.13	5.44	3.06	60.30	3.12	2.62	33.3/6.30	64.8/9.30
5	HS525 号中热	1.31	21.13	3.23	4.85	62.02	3.54	2.46	35.4/6.2	59.2/9.4
6	JD525 号 R 硅酸盐	16.24	19.95	4.71	2.90	60.58	1.41	—	38.4/7.2	63.8/9.1
7	LN425 号普硅	5.24	19.72	4.67	2.87	59.78	4.00	2.44	32.2/6.20	55.5/9.10

表 1.7 水泥品种与混凝土强度

序号	水泥种类	混凝土配合比	水泥用量(kg/m ³)	外加剂 JB-1(%)	水灰比	抗压强度(MPa)			
						3d	7d	28d	60d
1	725 号硅酸盐	1 : 1.128 : 2.096	560	1.5	0.289	68.0	72.4	81.5	88.7
2	625 号硅酸盐	1 : 1.128 : 2.096	560	1.5	0.284	72.0	74.0	84.5	92.9
3	LN525 号硅酸盐	1 : 1.128 : 2.096	560	1.5	0.321	52.1	60.2	75.0	81.0
4	LLH525 号普硅	1 : 1.128 : 2.096	560	1.5	0.286	61.5	74.6	87.6	89.1
5	HS525 号中热	1 : 1.128 : 2.096	560	1.5	0.290	72.0	78.0	92.0	94.8
6	JD525 号 R 硅酸盐	1 : 1.128 : 2.096	560	1.5	0.286	60.0	67.5	72.5	79.9
7	LN425 号普硅	1 : 1.128 : 2.096	560	1.5	0.299	56.5	63.0	74.8	79.2

注:625 号硅酸盐水泥是研究单位生产的,725 号硅酸盐水泥是某水泥厂生产的,试验时存放时间超过半年。

表 1-7 的试验结果表明,4 种 525 号硅酸盐水泥、625 号和 725 号硅酸盐水泥配制的混凝土强度虽有所不同,但均未超过 100MPa;625 号和 725 号硅酸盐水泥配制的混凝土强度除早期强度较高,后期也无明显的增长。这可能是 625 号和 725 号硅酸盐水泥与 525 号硅酸盐水泥在矿物组成上无明显差异,而前两者在细度上(比表面积大于 465m²/kg)明显大于 525 号硅酸盐水泥所致。从水灰比来看,JD、LLH 的 525 号水泥的水灰比明显低于 LN425 号水泥,这说明 JD、LLH 的 525 号水泥与外加剂 JB-1 有较好的适应性和流变性。

特别需要说明的是,配制高强度混凝土不一定必须使用高强度水泥。因为我国水泥的强度等级是按照规定的水灰比(0.5)成型水泥砂浆,养护至规定龄期来确定