

# 超细水泥修补与加固混凝土裂缝技术的应用与开发

曹恒祥, 殷保合

(水利部小浪底水利枢纽工程建设管理局, 河南 济源 454681)

**摘要:**从理论上阐述超细水泥灌浆浆液组成材料和浆液的特性, 以及配置浆液和裂缝修补与加固的工艺、设备等; 介绍小浪底工程混凝土裂缝修补与加固中的国外超细水泥灌浆技术的应用情况, 并针对小浪底高性能混凝土裂缝补强与加固要求, 开发国产超细水泥灌浆材料和浆液。试验和应用情况表明, 研制开发的国产超细水泥浆液性能已接近国外产品。

**关键词:**超细水泥; 比表面积; 最大粒径; 平均粒径; 超塑化剂; 粘度; 悬浮液

**中图分类号:** TQ172.79; TU755.7

**文献标识码:** B

**文章编号:** 1006-7647(2000)06-0045-05

目前混凝土裂缝修补与加固的材料种类很多, 笔者认为无机的混凝土裂缝, 最好使用无机的超细水泥灌浆修补与加固。超细水泥具有有机灌浆材料不可比拟的优点: ①超细水泥不像有机材料存在老化问题, 它强度高、耐久性好而且经济; ②由于超细水泥颗粒细, 它与混凝土及混凝土裂缝中破碎颗粒结合得好, 粘结性能强; ③灌浆浆液粘度小, 可灌性好, 可操作性强, 受环境温度影响小, 灌浆质量有保证; ④超细水泥与其修补或加固的混凝土有相近的线膨胀系数; ⑤超细水泥材料无毒、无侵蚀性, 对钢筋、施工人员和环境没有影响; ⑥混凝土裂缝中的水对超细水泥的性能影响不大。

尽管超细水泥有许多优点, 但由于我国在超细水泥细度、浆液的配制、灌浆工艺、设备等方面多年来没有技术上的突破, 因此超细水泥一直没有作为修补与加固混凝土裂缝的主要材料加以推广和普及。小浪底工程在混凝土裂缝修补与加固中使用了国外超细水泥灌浆技术, 同时还研制、开发、应用了国产超细水泥及浆液, 混凝土裂缝的修补与加固取得了良好效果。

## 1 超细水泥灌浆材料及超细水泥浆

### 1.1 超细水泥灌浆材料

超细水泥灌浆材料一般包括超细水泥、外加剂、超细矿物填加材料和水等。

#### 1.1.1 超细水泥

国外资料把磨细的比表面积在 10 000 ~ 16 000

cm<sup>2</sup>/g 的普通或矿渣水泥称为超细水泥。

对于混凝土裂缝及岩石裂隙灌浆的超细水泥还应有粒径要求。对粒径的要求有不同的观点, 有的认为超细水泥最大粒径不应大于裂缝宽度的 1/2 ~ 1/3<sup>①</sup>; 也有的认为超细水泥 85% 的颗粒直径即  $D_{85}$ , 应小于 6 ~ 8  $\mu\text{m}$ , 或  $D_{85}$  不应大于裂缝宽度的 1/5; 也有的认为  $D_{95}$  要小于 16  $\mu\text{m}$ ; 还有的要求平均颗粒尺寸即  $D_{50}$  不大于 3  $\mu\text{m}$ , 最大颗粒尺寸  $D_{\text{max}}$  不大于 30  $\mu\text{m}$ , 或  $D_{50}$  不大于 6 ~ 8  $\mu\text{m}$ ,  $D_{\text{max}}$  不大于 70  $\mu\text{m}$  等。从可灌性来讲, 超细水泥越细越好, 它可避免由于颗粒尺寸过大在混凝土裂缝的两壁之间出现“搭桥”现象, 过多的“桥”又将在裂缝截面上形成“滤网”, 堵塞裂缝的受浆。但具体问题应具体分析, 应根据建筑物特性、裂缝宽度及其所需修补与加固的程度, 确定超细水泥的平均粒径及最大粒径。过分要求超细水泥的粒径、细度, 势必增加超细水泥的成本。

就水工混凝土裂缝而言, 超细水泥应具备如下特点: ①与修补或加固的混凝土有相当的强度, 能起到修补与加固混凝土的作用; ②能完全阻挡建筑物内外水, 并保护混凝土内部钢筋; ③  $D_{50}$  为 6 ~ 8  $\mu\text{m}$ ,  $D_{85}$  为 25  $\mu\text{m}$  左右,  $D_{95} < 25 \mu\text{m}$ , 比表面积大于 11 000 cm<sup>2</sup>/g, 且在 16 000 cm<sup>2</sup>/g 左右; ④成本低廉。目前, 国内能生产比表面积 10 000 ~ 22 000 cm<sup>2</sup>/g 的超细水泥, 但不同比表面积的超细水泥价格悬殊较大。

以往制约我国超细水泥灌浆技术推广的主要原因之一, 就是超细水泥的颗粒粒径大、比表面积小, 过去用传统国产设备和工艺生产的超细水泥, 比表

作者简介: 曹恒祥(1963—), 男, 山东济南人, 工程师, 从事水工建筑物抗磨材料、混凝土及其缺陷修补工作的监理与研究。

①水利部科学技术司, 岩石与混凝土灌浆译文集, 1995。

面积的上限也仅在  $8\,000\text{ cm}^2/\text{g}$ , 目前采用进口或国产先进设备和工艺已解决了这一问题。

### 1.1.2 外加剂

超细水泥的外加剂一般有两种, 即超塑化剂和膨胀剂。

#### 1.1.2.1 超塑化剂

超细水泥浆属悬浮液, 因此它具有悬浮液的特点, 如沉降、析水、聚集和絮凝等, 这些特性都将影响超细水泥的正常使用效果。再者, 超细水泥的标准稠度用水量一般在  $40\% \sim 50\%$ , 如果水灰比小或遇到对水泥浆结石有较高强度要求时, 在不掺入超塑化剂情况下, 浆液粘滞力非常大, 絮凝作用强烈, 灌浆几乎是不可能的。

在超细水泥浆中, 超塑化剂的作用原理<sup>[1]</sup>是: 超塑化剂是一种易溶于水且性能很高的阴离子表面活性剂, 溶于水的超塑化剂离解成有机阴离子和金属离子, 超细水泥加入到有机高分子超塑化剂溶液中后, 水泥颗粒吸附有机阴离子带负电荷, 由于同电荷相斥的缘故, 阻止并减少了水泥絮凝状结构的形成, 同时还阻止了游离水被水泥絮凝状结构包围的可能, 使得水泥-水体系成为均匀分散体系, 阻止或减缓了沉降、析水、聚集、絮凝情况的发生。另外超塑化剂有机阴离子基团上的一端为憎水基团, 另一端是亲水基团, 极性很强, 带负电荷, 很容易和水分子的氢键结合, 在水泥微粒表面形成一层稳定的溶剂化水膜, 这一水膜在水泥颗粒间起着润滑剂的作用, 使得浆液流动性更好、粘度小而保持时间长。

通过研制开发国产超细水泥浆试验, 笔者认为由于超细水泥单位重量颗粒含量高、比表面积大、颗粒小、对超塑化剂的吸附作用大等原因, 超细水泥浆中的超塑化剂掺量不是混凝土中掺量的概念, 其在超细水泥浆中的掺量一般是混凝土中掺量的  $2 \sim 3$  倍。在国产超细水泥浆试验中, 掺入  $4.5\%$  左右的超塑化剂, 才使得浆液稳定, 粘度满足了裂缝灌浆的要求。

一般的超塑化剂都具有缓凝的作用(初凝约  $10 \sim 13\text{ h}$ ), 这对于混凝土裂缝修补与加固的最佳季节——冬春季施工及浆液的稳定是不利的, 因此在使用萘系塑化剂时, 其中的  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  含量应低于  $2\% \sim 5\%$  (粉剂), 通过试验也证实塑化剂(普通减水剂)功效较差, 其对超细水泥浆的作用极为有限。

#### 1.1.2.2 膨胀剂

由于裂缝表面混凝土对浆液中水分的吸收, 以及超细水泥水化反应的体缩等, 将影响超细水泥灌浆的效果, 因此超细水泥浆液中应加入适量的膨胀剂。目前国内仅有颗粒状的膨胀剂, 使用中应注意其细度和最大粒径的控制, 其应有与超细水泥相当的

细度和最大粒径。目前国外已有液态膨胀剂, 使用效果非常好。

### 1.1.3 超细矿物质填充料

超细水泥的矿物质填充料应该是能参与水泥水化物反应, 能提高硬化水泥浆结石强度, 比表面积比超细水泥大或相当的微细矿物材料, 且应价格低廉。根据这个标准, 硅粉应是超细水泥浆中首选的矿物质填充料。硅粉的比表面积一般在  $25\,000\text{ cm}^2/\text{g}$  左右, 它活性成分含量高, 颗粒细小, 极易与水泥水化物反应, 能有效增加水泥浆结石的抗压和粘结强度, 颗粒细小也减小了超细水泥的析水和沉降, 通过试验, 证实硅粉对超细水泥浆结石的抗压强度和抗折强度贡献是很大的, 特别是对水泥结石的后期强度的贡献更大。超细水泥浆中掺入硅粉是非常必要的。

#### 1.1.4 拌和水

超细水泥浆的拌和水一般符合 SDJ207《水工混凝土施工规范》中的要求即可。

## 1.2 超细水泥浆

### 1.2.1 影响超细水泥浆液特性的因素

混凝土裂缝灌浆对超细水泥浆特性要求主要是稳定性和流变性。超细水泥浆的稳定性指水泥浆中分散的水泥颗粒能克服其间引力和重力影响, 初凝前不絮凝、沉降、析水, 基本保持浆液初始流变性的特性; 超细水泥浆的流变性主要指浆液的粘度和屈服剪应力。

影响超细水泥浆液特性的因素有:

a. 水灰比( $w/c$ )。水灰比(也可以说浆液的浓度)是影响浆液特性的主要因素。随着水灰比减小浆液的屈服剪应力和粘度逐渐增大, 浆液的稳定性也逐渐减弱。

b. 超细水泥细度。水泥比表面积增大, 浆液屈服剪应力和粘度增大, 但浆液的稳定性将会增强。

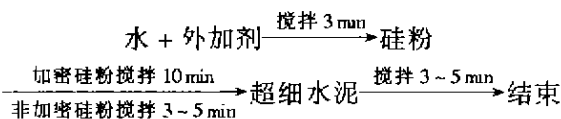
c. 填充料。浆液中掺入填充料——硅粉, 并随掺量的增加浆液的屈服剪应力和粘度均将增加。

d. 超塑化剂。浆液中掺加超塑化剂, 并随掺量的增加(一定范围), 浆液屈服剪应力和粘度明显降低, 浆液的稳定性也明显提高。

#### 1.2.2 超细水泥浆的制备

尽管超细水泥浆属悬浮液, 但由于超细水泥的颗粒粒径仅次于胶体中的粒子直径, 因此制备超细水泥浆的主要环节是要用胶体搅拌器或涡轮式搅拌器<sup>[2]</sup>拌制超细水泥浆。胶体搅拌器和涡轮搅拌器能产生巨大的剪切力把超细水泥絮凝状粒团和颗粒集团分解开, 絮凝状粒团和颗粒集团分散开的超细水泥浆能较长时间保持稳定。胶体搅拌机 and 涡轮搅拌机转数一般大于  $2\,000\text{ r/min}$ , 小浪底拌制超细水泥

浆使用的胶体搅拌机转速为 2 800 ~ 11 000 r/min(挡位控制转速),制备的浆液稳定性和可灌性非常好。笔者曾用实验室净浆搅拌机和砂浆搅拌机拌制过超细水泥浆,效果非常差,原因就是净浆搅拌机和砂浆搅拌机不能产生足以把水泥絮状粒团及颗粒集团分散开的剪切力。过去对这一因素认识不足也是制约我国超细水泥修补混凝土裂缝和岩基灌浆发展的原因之一。国产超细水泥浆室内制备程序为:



### 1.3 超细水泥灌浆的结束条件

灌浆结束条件是确保灌浆质量的重要标准。我国以往的灌浆结束条件大多为“不吃浆或吃浆量保持在一个定量上,恒压数分钟”。这种结束条件是建立在质量体系非常完善和施工操作人员良好素质等基础上的,能否将灌浆结束条件由“人为控制”改为非人为的设备控制呢,小浪底工程使用超细水泥灌浆修补与加固混凝土裂缝中,引用国外灌浆嘴解决了这一问题,确保了混凝土裂缝灌浆的质量。图 1 即为小浪底采用的国外灌浆嘴,它主要由灌浆嘴座、可膨胀橡胶管(囊)、单向灌浆注入嘴和膨胀橡胶管限胀套组成。这种灌浆嘴控制灌浆结束条件的原理是:当裂缝充满浆液或裂缝吃浆量少时,受灌浆泵仍然压浆的缘故灌浆嘴可膨胀橡胶管膨胀,膨胀橡胶管膨胀至限胀套直径时,受橡胶弹性的影响,此时的灌浆压力为 0.3 ~ 0.5 MPa,灌浆结束条件就是橡胶膨胀管膨胀至限胀套直径且不回缩,这种灌浆结束条件对施工操作人员和质检人员来讲是非常实际、客观和方便的。

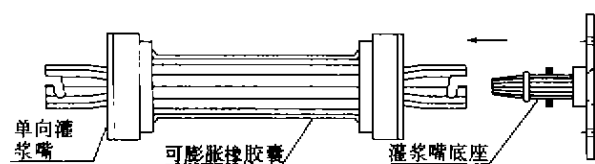


图 1 灌浆嘴

## 2 国外超细水泥灌浆修补裂缝技术在小浪底的应用

小浪底泄洪标段的混凝土裂缝修补与加固采用了瑞士 Sika 公司超细水泥灌浆材料和技术,根据合同要求对宽度大于 0.5 mm、长度大于 1.5 m 的裂缝进行了修补与加固。从修补后骑缝钻取的岩样显示,裂缝受浆饱满,岩样抗压强度基本达到原混凝土强度(C70)。从目前灌浆效果来看,Sika 公司超细水泥修补裂缝的技术是先进的。

### 2.1 超细水泥灌浆材料及其浆液特性

Sika 超细水泥灌浆材料包括 Sika Mikrodur R-U 矿物灌浆材料 and 外加剂 Intraplast HE-50(液态)及水。Sika 超细水泥灌浆材料、浆液及现场取样试验结果如下:

a. Sika Mikrodur R-U(超细水泥). 比表面积 16 000 cm<sup>2</sup>/g; 小于 2, 4, 8, 9.5 μm 颗粒含量分别为 25%, 55%, 90%, 95%,  $d_{50} < 3.5 \mu\text{m}$ ,  $d_{95} < 9.5 \mu\text{m}$ ,  $d_{85} < 7.0 \mu\text{m}$ ; 密度 3.1 kg/cm<sup>3</sup>; 需水量 47%。

b. Sika Intraplast HE-50(外加剂). 20℃时的密度为 1.1 kg/L; 20℃时 pH 值 7.0 ± 0.5; 粘度 (30 ± 10) MPa·s; 掺量 1% ~ 3%(水泥重量)。

c. Sika 超细水泥浆液. 密度 1.72 kg/L; 水灰比 0.55 ~ 0.65; Sika Intraplast 含量 3%; 马氏漏斗粘度 40 ~ 45 s; 搅拌器转速 5 000 ~ 7 000 r/min; 灌浆压力 0.6 ~ 1.2 MPa。

d. Sika 超细水泥浆液结石性能. 初凝时间 6.7 h, 终凝时间 10.23 h; 水灰比为 0.6 时, 1 d, 7 d, 28 d 抗压强度分别为 23 MPa, 45 MPa, 60 MPa; 3 d 抗折强度 8.3 MPa, 7 d 抗折强度 12.3 MPa。

从现场灌浆效果和实验结果来看,Sika Mikrodur R-U 矿物灌浆材料中除超细水泥外可能还有其它矿物填加料, Intraplast HE-50 还具有一定的膨胀作用。

### 2.2 制浆和灌浆设备

Sika 超细水泥制浆和灌浆设备包括胶体搅拌机、注浆泵、注浆嘴和过滤器。胶体搅拌机、注浆泵重量约 3 ~ 5 kg, 均由手提电钻驱动, 使用非常方便。

### 2.3 灌浆工艺流程

Sika 超细水泥灌浆技术修补混凝土裂缝的工艺流程(见图 2)为:

a. 清理. 沿裂缝走向, 用高压水或风清理表面裂缝及裂缝两侧 4 cm 宽的混凝土表面, 并用高压风吹干裂缝两侧混凝土。

b. 闭缝及安装灌浆嘴座. 沿裂缝涂抹厚 5 mm 左右、宽 2 × 4 cm 左右的环氧砂浆, 同时沿裂缝每隔 30 ~

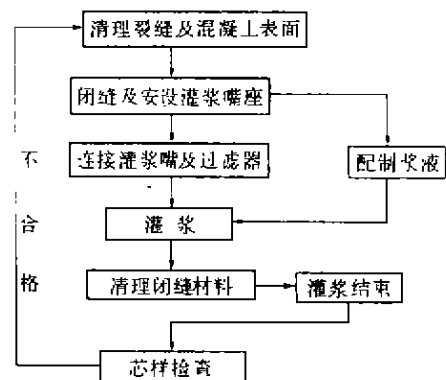


图 2 超细水泥灌浆工艺流程

50 cm 安设一灌浆嘴座(等待 24 h 后,进行下一步)。

c. 配制超细水泥浆。

d. 逐一安装灌浆嘴,连接过滤器、排气灌浆。铅直缝由下而上灌浆,水平缝方向不限(等待 24 h 后,进行下一步)。

e. 清理闭缝材料及灌浆嘴座(灌浆结束),用砂轮将闭缝的环氧砂浆及灌浆嘴座打磨掉。

f. 检查、骑缝钻取芯样检查,并修补取芯后的混凝土。

## 2.4 灌浆芯样的检查与试验结果

a. 灌浆 7 d 后对修补的混凝土裂缝进行了大量的取芯,对芯样的检测结果为:放大镜检查显示大于 0.1 mm 的裂缝受浆基本饱满。

b.  $\varnothing 100$  的芯样抗压强度 61.0 MPa 左右,且芯样的破坏面不在裂缝灌浆处(原混凝土设计抗压强度 70 MPa)。

## 3 国内超细水泥及超细水泥浆的开发情况

本着国产超细水泥材料、浆液及结石应在细度、粘度、强度等方面与 Sika 超细水泥基本相当的这一标准,我们与国内某厂共同开发了超细水泥,并经过多次试验筛选出了外加剂,配制出了与 Sika 超细水泥浆性能基本相当的国产超细水泥浆。

### 3.1 超细水泥的生产工艺流程

该厂生产超细水泥的设备是依据国外生产设备图纸加工制造的,其超细水泥生产工艺流程为:①用特制的组合滚珠研磨比表面积  $4000\text{ cm}^2/\text{g}$  左右的普通 525 号水泥,以时间控制研磨普通水泥的比表面积,研磨后的水泥的比表面积在  $8000\sim 10000\text{ cm}^2/\text{g}$ 。②风选研磨后的普通水泥,同样以时间控制风选所需的超细水泥比表面积,风选后的超细水泥比表面积在  $11000\sim 22000\text{ cm}^2/\text{g}$ 。

### 3.2 国产超细水泥的细度与颗粒级配

四种国产超细水泥的细度与颗粒级配情况见表 1。细度与颗粒级配检测依据为 DZG93-06/P493《光透粒度检测规范》。

### 3.3 外加剂的选择与掺量

根据超细水泥的特性,从国产多个品牌的超塑化剂中选择出了  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  含量小于 2%~5% 的非缓

凝型的超塑化剂。超塑化剂掺量在 4.5% 左右,浆液在粘度、稳定性等方面比较理想。

对于膨胀剂,由于国内现无液态膨胀剂,只好选择了效能较高的无机粉状膨胀剂 UEA-H。UEA-H 最不理想的是其比表面积大约为  $2500\text{ cm}^2/\text{g}$ ,0.08 mm 筛孔筛余小于 10%,1.25 mm 筛孔筛余小于 0.5%。好在我们在超细水泥浆中仅掺入 4%~6% UEA-H,其对浆液的稳定性和可灌性影响有限。顺便提一下,国外有些资料介绍的超细水泥浆没有掺入膨胀剂。

### 3.4 超细矿物填充料——硅粉的选择与掺量

试验中我们同时选择了加密硅粉和非加密硅粉<sup>[2]</sup>。从浆液制备工序及浆液性能上看,非加密硅粉要好于加密硅粉。加密硅粉粒径一般粗到 0.5 mm 左右,制备超细水泥浆前要先将加密硅粉“解密”制备成“胶体”的硅粉浆,一旦硅粉中存在未得以“解密”的颗粒,它将堵塞过滤器或造成裂缝中的“搭桥”、“滤网”现象,影响灌浆。再者未解密的大颗粒硅粉集团也易“吸附”小颗粒硅粉造成沉降,影响浆液的稳定。

通过试验,硅粉掺量大于或等于 8% 时(内掺),水泥浆结石强度增加才比较明显,目前国外超细水泥的矿物填充料除硅粉外还有磨细矿渣等。

### 3.5 超细水泥混合料的制备与浆液的配制

为了施工现场制浆的方便和各材料用量的准确,我们在室内将超细水泥、硅粉按配合比以 5 kg 为一个单元装入双层塑料袋中,同时装入塑料袋中的还有按配合比应添加的小包装粉状超塑化剂和膨胀剂。现场制浆时,先将超塑化剂和膨胀剂倒入已量好的水中搅拌 3~5 min,再加入超细水泥混合物搅拌 5~10 min 即可使用。

### 3.6 国产超细水泥浆及其结石性能

浆液特性及其结石强度见表 2。从表 2 中可得出:①浆液粘度随  $w/c$  减小略有增加, $w/c$  还有进一步缩小的空间;②同一  $w/c$  下的粘度随时间变化不大(60 min 内);③硅粉掺量 6% 时的结石强度变化不明显,硅粉掺量还有进一步增加的空间;④随  $w/c$  减小结石强度逐渐增大,效果明显;⑤超塑化剂掺量还有进一步增加的空间。

我们还进行了掺加 Sika Latex(丙乳)的浆液结石强度试验,但效果不明显。

表 1 国产超细水泥细度与颗粒级配状况

| 种类 | 比表面积<br>( $\text{cm}^2/\text{g}^{-1}$ ) | 颗粒含量/%             |                  |                  |                  |                  |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   | 平均粒径<br>' $\mu\text{m}$ |
|----|-----------------------------------------|--------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------------|
|    |                                         | <1 $\mu\text{m}$   | <2 $\mu\text{m}$ | <3 $\mu\text{m}$ | <6 $\mu\text{m}$ | <9 $\mu\text{m}$ | <12 $\mu\text{m}$ | <15 $\mu\text{m}$ | <18 $\mu\text{m}$ | <21 $\mu\text{m}$ | <24 $\mu\text{m}$ | <27 $\mu\text{m}$ | <30 $\mu\text{m}$ |                         |
| 1  | 11020                                   | 12.3               | 26.5             | 38.2             | 62.8             | 70.6             | 72.6              | 76.9              | 78.3              | 86.5              | 94.8              | 97.5              | 100               | 4.43                    |
| 2  | 11736                                   | 17.9               | 30.5             | 42.8             | 59.7             | 69.7             | 81.8              | 92.9              | 97.3              | 98.2              | 98.6              | 98.7              | 100               | 4.12                    |
| 3  | 12000                                   | 11.5               | 20.5             | 35.5             | 48.5             | 58.5             | 65.5              | 78.5              | 80.3              | 84.8              | 90.9              | 98.1              | 100               | 4.10                    |
| 4  | 21422                                   | <0.5 $\mu\text{m}$ | <1 $\mu\text{m}$ | <2 $\mu\text{m}$ | <4 $\mu\text{m}$ | <6 $\mu\text{m}$ | <8 $\mu\text{m}$  | <10 $\mu\text{m}$ | <12 $\mu\text{m}$ | <14 $\mu\text{m}$ | <16 $\mu\text{m}$ | <18 $\mu\text{m}$ | <20 $\mu\text{m}$ | 4.10                    |
|    |                                         | 15.5               | 27.8             | 48.2             | 70.7             | 75.1             | 75.1              | 79.6              | 80.3              | 84.8              | 90.9              | 98.1              | 100               |                         |

表2 国产超细水泥浆及其结石力学特性

| w/c  | 配合比        |              |             | 马氏漏斗粘度/s |        |        |        |        |        | 抗折强度/MPa |      |      | 抗压强度/MPa |       |       |       |
|------|------------|--------------|-------------|----------|--------|--------|--------|--------|--------|----------|------|------|----------|-------|-------|-------|
|      | 硅粉掺量<br>/% | 超塑化剂<br>掺量/% | 膨胀剂<br>掺量/% | 0 min    | 10 min | 20 min | 30 min | 40 min | 50 min | 60 min   | 3 d  | 7 d  | 28 d     | 3 d   | 7 d   | 28 d  |
| 0.65 | 5.0        | 4.0          | 5.0         | 38.5     | 39.9   | 39.9   | 40.1   | 41.5   |        |          | 2.15 | 3.85 | 6.05     | 17.70 | 25.10 | 38.00 |
| 0.65 | 8.0        | 4.5          | 5.0         | 36.9     | 38.3   | 39.5   | 40.7   | 40.8   |        |          | 5.08 | 5.40 |          | 18.20 | 26.60 | 43.00 |
| 0.60 | 8.0        | 4.5          | 5.0         | 39.1     | 43.3   |        | 45.8   | 45.5   |        |          | 4.58 | 5.03 | 5.06     | 21.60 | 33.95 | 46.20 |
| 0.60 | 6.0        | 4.5          | 5.0         | 39.0     | 42.0   | 43.3   | 45.0   | 44.6   |        |          | 4.55 | 6.41 |          | 22.50 | 31.20 | 42.00 |
| 0.60 | 6.0        | 4.5          | 5.0         | 36.4     |        | 40.5   |        | 41.5   |        | 43.0     | 3.75 | 5.20 | 6.60     | 13.25 | 21.50 | 31.40 |
| 0.60 | 6.0        | 4.5          | 5.0         | 37.1     |        | 41.0   | 42.8   |        | 44.0   |          | 3.95 | 5.95 | 5.69     | 13.10 | 21.20 | 30.20 |
| 0.55 | 8.0        | 5.0          | 5.0         | 45.5     | 49.7   | 50.1   | 52.6   |        |        |          |      |      | 5.90     | 26.70 | 38.60 | 51.60 |
| 0.50 | 6.0        | 4.5          | 5.0         | 43.4     |        | 54.5   |        | 58.5   |        | 63.7     | 3.20 | 5.98 | 6.00     | 25.60 | 35.00 | 45.20 |

表2中的试验是针对小浪底高性能混凝土裂缝补强与加固要求,并比照 Sika 超细水泥的灌浆效果、结石强度、浆液粘度等进行的试验。最后选择  $w/c = 0.5 \sim 0.6$ , 硅粉掺量  $8\% \sim 10\%$ , 超塑化剂  $4.5\% \sim 5.0\%$  的配合比例,该配合比配制的浆液可灌性与 Sika 超细水泥浆基本相当,通过对灌浆后的缝所取芯样观察,0.1 mm 的裂缝已受灌浆,  $\phi 100$  的混凝土芯样抗压强度接近混凝土强度,芯样破坏面不在裂缝灌浆处。

尽管国产超细水泥取得了上述良好效果,但与 Sika 超细水泥还有一定的差距,主要表现在  $D_{50}$ ,  $D_{85}$ ,  $D_{max}$  颗粒直径偏大,超塑化剂对结石强度及降低浆液粘度方面贡献还不够大。目前,针对小浪底高性能混凝土裂缝修补与加固的国产超细水泥的试验已结束,并应用到了工程上。其它普通混凝土修补与加固的国产超细水泥试验尚在进行中。

#### 4 结 语

超细水泥灌浆技术的关键在于:①超细水泥

$D_{50}$ ,  $D_{85}$ ,  $D_{95}$ ,  $D_{max}$  的颗粒直径及比表面积;②超塑化剂对浆液粘度、稳定性、可灌性及结石强度的贡献;③超细矿物填充料的选择与掺量;④超细水泥浆的制备工艺及设备;⑤超细水泥浆的灌浆结束条件。这些关键技术也是制约我国使用超细水泥修补与加固混凝土裂缝及固结岩石裂隙长期得不到发展的重要因素,目前我国已认识到并基本掌握了这些技术,为推广超细水泥灌浆技术修补与加固混凝土裂缝和岩石基础灌浆等打下了良好的基础。

#### 参考文献:

- [1] 卢璋,吴佩刚,顾德珍.混凝土外加剂概论[M].北京:清华大学出版社,1985.6~510.
- [2] 曹恒祥,王振凡.加密硅粉在小浪底工程的应用[J].水利水电技术,1999(9):46~48.

(收稿日期:2000-06-20 编辑:熊水斌)

欢迎订刊

全国水利系统优秀期刊 江苏省优秀期刊

欢迎投稿

## 水利水电科技进展

新颖 实用 快捷



(也可直接汇款至编辑部订阅,  
另加 6.00 元邮寄费)

双月刊, A4 开本, 彩色封面, 64 页, 2001 年全年定价 30.00 元, 全国各地邮局均可订阅

国际标准刊号: ISSN 1006-7647

国内统一刊号: CN 32-1439/TV

国外发行代号: DK 32003

(中国出版对外贸易总公司)

国内邮发代号: 28-244

编辑部地址: 210098 南京市西康路 1 号

联系电话: (025) 3713777-50335

电子信箱: kkb@hhu.edu.cn

银行账号: 南京工行宁海路分理处

02114249-0102459