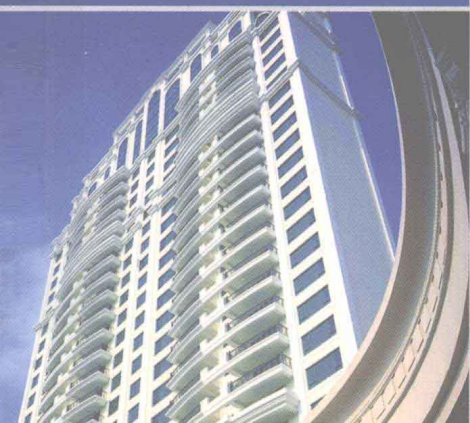


# 混凝土建筑物修补材料及应用

黄国兴 纪国晋 编著



HUNNINGTU JIANZHUWU  
XIUBU CAILIAO  
JI YINGYONG



中国电力出版社

[www.cepp.com.cn](http://www.cepp.com.cn)

# 混凝土建筑物修补材料及应用

黄国兴 纪国晋 编著

HUNNINGTU JIANZHUWU  
XIUBU CAILIAO  
JI YINGYONG



中国电力出版社

[www.cepp.com.cn](http://www.cepp.com.cn)

该书概要论述水工混凝土建筑物老化病害与修补材料分类,系统介绍混凝土建筑物病害处理的表面嵌填堵漏材料、表面防渗材料、裂缝灌浆材料、剥蚀破坏修补材料、磨蚀破坏修补材料、结构补强加固材料、水下修补材料、化学侵蚀防护材料,以及以上各类材料的工程应用实例。

该书可供从事水工混凝土建筑物和其他混凝土建筑物老化病害修补处理与补强加固设计、科研、施工、管理等技术人员与高等院校有关专业师生参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

混凝土建筑物修补材料及应用/黄国兴,纪国晋编著. —北京:  
中国电力出版社, 2009

ISBN 978 - 7 - 5083 - 8150 - 3

I. 混… II. ①黄…②纪… III. 水工结构: 混凝土结构-  
建筑物-加固-建筑材料-研究 IV. TV331

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 190633 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

\*

2009 年 3 月第一版 2009 年 3 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 14.75 印张 358 千字

印数 0001—3000 册 定价 27.00 元

### 敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

# 前言

混凝土建筑物修补材料及应用

1999年3月,黄国兴与陈改新合作编著的《水工混凝土建筑物修补技术及应用》一书由中国水利水电出版社出版发行,先后进行了3次印刷,受到广大读者的欢迎。该书主要论述水工混凝土建筑物裂缝、渗漏与剥蚀等病害的调查与检测、修补方法、修补材料、修补工艺等。这部专著主要搜集了我国1997年前水工混凝土建筑物病害及修补处理资料编写而成的,而从1997年至今的10多年来,我国水工混凝土建筑物病害的检测技术、修补方法、修补材料及修补工艺等都有了不少进展,特别是水工混凝土建筑物修补材料方面进展很大。为此编者认为,在原有资料基础上,吸收近10年来修补材料的研究成果及工程应用资料,编写一本《混凝土建筑物修补材料及应用》很有必要。另外,《水工混凝土建筑物修补技术及应用》一书所包括的修补材料内容不全,如水下修补材料与化学侵蚀防护材料就没有,还有该书的修补材料分类不尽合理。因此,编者在2005年就开始搜集资料着手编写《混凝土建筑物修补材料及应用》。为了便于选用,对混凝土建筑物修补材料进行了较合理分类。

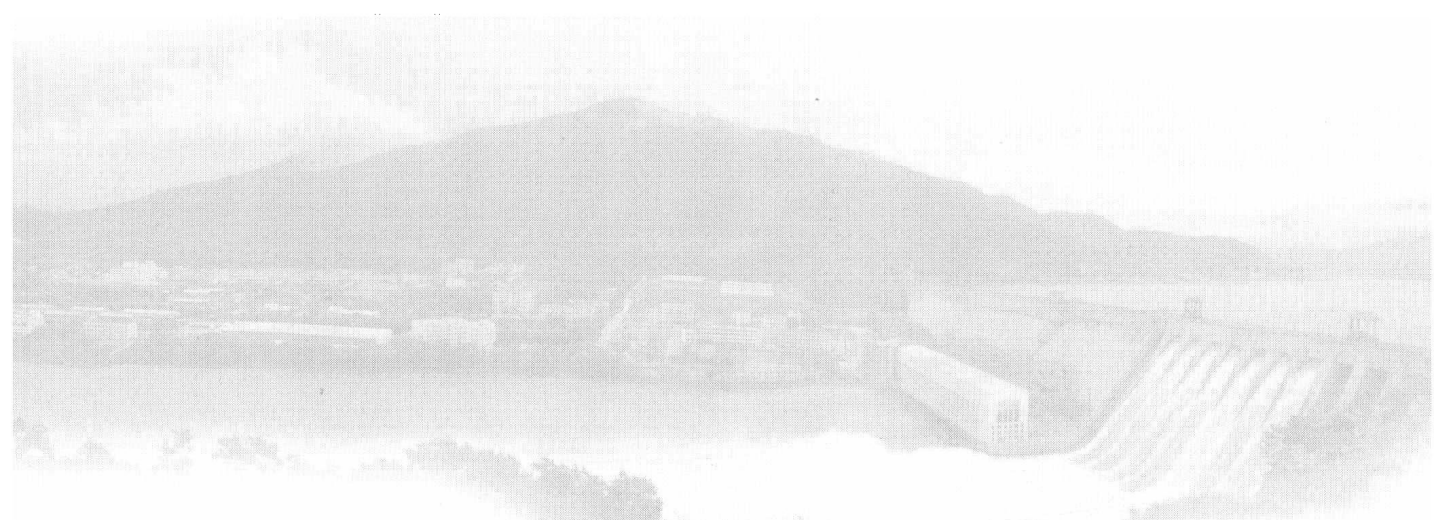
本书共分9章,第1章绪言介绍水工混凝土建筑物老化病害及修补材料的分类;第2章至第9章分别介绍表面嵌填堵漏材料、表面防渗材料、裂缝灌浆材料、剥蚀破坏修补材料、磨蚀破坏修补材料、结构补强加固材料、水下修补材料与化学侵蚀防护材料,以及以上各类材料工程应用的57个实例。

本书的前言与第1、4、6、7、8、9章由黄国兴执笔,第2、3、5章由纪国晋执笔,全书由黄国兴统稿。在编写本书过程中,曾得到中国水利水电科学研究院结构材料所领导及同志们们的热情支持与帮助,在此一并致谢!

因作者理论知识与实践经验所限,书中难免存在不妥之处,恳请广大读者给予指正。

编者

2008年8月



# 目 录

## 混凝土建筑物修补材料及应用

### 前言

|                           |    |
|---------------------------|----|
| <b>1 绪言</b> .....         | 1  |
| 1.1 混凝土建筑物的老化病害 .....     | 1  |
| 1.2 混凝土建筑物修补材料的分类 .....   | 4  |
| <b>2 表面嵌填堵漏材料</b> .....   | 6  |
| 2.1 聚合物水泥砂浆 .....         | 6  |
| 2.2 环氧砂浆 .....            | 9  |
| 2.3 非硫化丁基橡胶 .....         | 10 |
| 2.4 GB 嵌缝材料 .....         | 10 |
| 2.5 SR 嵌缝材料 .....         | 11 |
| 2.6 弹性聚氨酯嵌缝材料 .....       | 11 |
| 2.7 腻子型膨胀橡胶 .....         | 11 |
| 2.8 聚硫嵌缝密封材料 .....        | 12 |
| 2.9 快速堵漏材料 .....          | 13 |
| 参考文献 .....                | 14 |
| <b>3 表面防渗材料</b> .....     | 16 |
| 3.1 聚合物水泥砂浆 .....         | 16 |
| 3.2 沥青砂浆 (混凝土) .....      | 16 |
| 3.3 钢丝网喷浆 (混凝土) .....     | 16 |
| 3.4 环氧玻璃丝布 (玻璃钢) .....    | 17 |
| 3.5 橡胶片材 .....            | 18 |
| 3.6 聚氯乙烯 (PVC) 防水卷材 ..... | 18 |
| 3.7 GB 复合土工膜止水板 .....     | 19 |
| 3.8 SR 防渗保护盖片 .....       | 20 |
| 3.9 水泥基渗透结晶型防水材料 .....    | 21 |
| 3.10 防水涂料 .....           | 22 |
| 3.11 工程实例 .....           | 23 |
| 参考文献 .....                | 44 |
| <b>4 裂缝灌浆材料</b> .....     | 46 |
| 4.1 概述 .....              | 46 |
| 4.2 水泥类浆材 .....           | 48 |
| 4.3 环氧类浆材 .....           | 49 |

|                           |     |
|---------------------------|-----|
| 4.4 丙烯酰胺类浆材 (丙凝) .....    | 51  |
| 4.5 丙烯酸盐类浆材 .....         | 52  |
| 4.6 甲基丙烯酸酯类浆材 .....       | 54  |
| 4.7 聚氨酯类浆材 .....          | 55  |
| 4.8 沥青类浆材 .....           | 56  |
| 4.9 互穿网络复合浆材 .....        | 57  |
| 4.10 工程实例 .....           | 59  |
| 参考文献 .....                | 91  |
| <b>5 剥蚀破坏修补材料</b> .....   | 93  |
| 5.1 水泥砂浆和预缩水泥砂浆 .....     | 93  |
| 5.2 聚合物水泥砂浆 .....         | 93  |
| 5.3 环氧砂浆 .....            | 94  |
| 5.4 聚合物水泥混凝土 .....        | 97  |
| 5.5 树脂混凝土 .....           | 97  |
| 5.6 高抗冻性混凝土 .....         | 98  |
| 5.7 喷射混凝土 .....           | 99  |
| 5.8 钢筋阻锈剂 .....           | 99  |
| 5.9 界面处理剂 .....           | 100 |
| 5.10 防护涂层材料 .....         | 101 |
| 5.11 工程实例 .....           | 102 |
| 参考文献 .....                | 111 |
| <b>6 磨蚀破坏修补材料</b> .....   | 112 |
| 6.1 高强水泥石英砂浆 .....        | 112 |
| 6.2 环氧砂浆 .....            | 113 |
| 6.3 硅粉抗磨蚀混凝土 (砂浆) .....   | 113 |
| 6.4 高强耐磨粉煤灰混凝土 (砂浆) ..... | 114 |
| 6.5 铁矿石骨料硅粉混凝土 .....      | 114 |
| 6.6 辉绿岩铸石混凝土 .....        | 115 |
| 6.7 钢纤维高强混凝土 .....        | 117 |
| 6.8 钢纤维硅粉混凝土 .....        | 118 |
| 6.9 低收缩硅粉混凝土 .....        | 119 |

|          |                          |            |          |                          |            |
|----------|--------------------------|------------|----------|--------------------------|------------|
| 6.10     | 多元胶凝材料抗冲磨<br>混凝土.....    | 121        | 8.7      | GB 复合土工膜止水板 .....        | 185        |
| 6.11     | 聚脲抗冲磨材料.....             | 123        | 8.8      | 水下不分散混凝土(砂浆) ...         | 185        |
| 6.12     | “海岛结构”环氧合金抗冲磨<br>材料..... | 125        | 8.9      | 水下聚合物混凝土(砂浆) ...         | 187        |
| 6.13     | 工程实例.....                | 128        | 8.10     | 水下环氧浆材.....              | 188        |
|          | 参考文献.....                | 138        | 8.11     | 水溶性聚氨酯浆材.....            | 188        |
| <b>7</b> | <b>结构补强加固材料 .....</b>    | <b>140</b> | 8.12     | 聚氨酯/环氧树脂互穿网络<br>浆材.....  | 189        |
| 7.1      | 钢板与建筑结构胶 .....           | 140        | 8.13     | 聚氨酯/甲凝互穿网络浆材 ...         | 189        |
| 7.2      | 预应力锚杆与锚索 .....           | 142        | 8.14     | 工程实例.....                | 190        |
| 7.3      | 玻璃钢 .....                | 143        |          | 参考文献.....                | 210        |
| 7.4      | 喷射混凝土 .....              | 145        | <b>9</b> | <b>化学侵蚀防护材料 .....</b>    | <b>212</b> |
| 7.5      | 碳纤维复合材料 .....            | 146        | 9.1      | 混凝土化学反应侵蚀 .....          | 212        |
| 7.6      | 工程实例 .....               | 152        | 9.2      | 硫铝酸盐水泥 .....             | 220        |
|          | 参考文献.....                | 180        | 9.3      | 掺矿渣硫铝酸盐水泥 .....          | 222        |
| <b>8</b> | <b>水下修补材料 .....</b>      | <b>181</b> | 9.4      | 抗硫酸盐水泥 .....             | 223        |
| 8.1      | 水下环氧砂浆 .....             | 181        | 9.5      | 掺活性掺合料的硅酸盐水泥 ...         | 224        |
| 8.2      | SXM 水下快速密封材料.....        | 182        | 9.6      | 聚合物水泥砂浆 .....            | 225        |
| 8.3      | GBW 遇水膨胀止水条 .....        | 183        | 9.7      | 混凝土化学反应侵蚀的防护<br>措施 ..... | 225        |
| 8.4      | HK-963 水下环氧黏结剂 .....     | 183        | 9.8      | 工程实例 .....               | 227        |
| 8.5      | 橡胶片材 .....               | 184        |          | 参考文献.....                | 228        |
| 8.6      | SR 防渗盖片.....             | 184        |          |                          |            |

## 1

## 绪 言

## 1.1 混凝土建筑物的老化病害

混凝土建筑物的老化病害从现象上来看主要有裂缝、渗漏、剥蚀三种，而每一种病害又是由多方面原因造成的。裂缝主要是由荷载、温度、干缩、地基变形、钢筋锈蚀、碱骨料反应、地基冻胀、混凝土质量差、水泥水化热温升等原因引起的；渗漏主要是由混凝土密实性差、裂缝、伸缩缝止水失效等原因引起的；剥蚀主要是由冻融、冲磨空蚀、钢筋锈蚀、化学侵蚀、碱骨料反应及低强风化等原因引起的。

## 1.1.1 裂缝

裂缝是混凝土建筑物最普遍、最常见的病害之一，不发生裂缝的混凝土建筑物是极少的。而且混凝土裂缝往往是多种因素联合作用的结果。裂缝对混凝土建筑物危害程度不一，严重的裂缝不仅危害建筑物的整体性和稳定性，而且还会产生大量的漏水，使闸坝及其他水工建筑物的安全运行受到严重威胁。另外，裂缝往往会引起其他病害的发生与发展，如渗漏溶蚀、环境水侵蚀、冻融破坏及钢筋锈蚀等。这些病害与裂缝形成恶性循环，会对混凝土建筑物的耐久性造成很大危害。

混凝土是多相复合脆性材料，当其拉应力大于抗拉强度，或拉伸变形大于极限拉伸变形时，就会产生裂缝。裂缝按深度不同，可分为表层裂缝、深层裂缝和贯穿裂缝；按裂缝开度变化可分为死缝（宽度和长度不再变化）、活缝（宽度随外界环境条件和荷载条件变化而变化，长度不变或变化不大）和增长缝（宽度或长度随时间而增长）；按产生原因可分成温度裂缝、干缩裂缝、钢筋锈蚀裂缝、超载裂缝、碱骨料反应裂缝、地基不均匀沉陷裂缝等。

(1) 温度裂缝。大体积混凝土浇筑后，水泥水化热使内部混凝土温度升高，当水化热温升到达高峰后，由于环境温度较低，因此混凝土温度开始下降。温降过程中混凝土发生收缩，在约束条件下，当温降收缩变形大于混凝土极限拉伸变形时，混凝土容易发生裂缝，这种裂缝通常称为温度裂缝。还有一种温度裂缝是由混凝土内外温差引起的，如混凝土遭受寒潮侵袭或夏天混凝土经阳光曝晒后突然下雨，都会使混凝土内部与表层产生很大温差，混凝土表层温度下降，而内部温度基本不降，这样内部混凝土对表层混凝土起约束作用，同样会导致温度裂缝。

为了减少温度裂缝，一般选用中热水泥或具有微膨胀性的中热水泥（自生体积变形为膨胀变形，如水泥中  $MgO$  含量较高，但不大于 5%）和热膨胀系数小的骨料，如石灰岩骨料混凝土热膨胀系数为  $(5 \sim 6) \times 10^{-6}/^{\circ}C$ ，而砂岩骨料混凝土热膨胀系数为  $(10 \sim 12) \times 10^{-6}/^{\circ}C$ ，同样温度降低  $1^{\circ}C$ ，砂岩骨料混凝土温度变形比石灰岩骨料混凝土的温度变形大 1 倍。同时还在施工中还应严格采取温控措施，尽量避免裂缝发生。

(2) 干缩裂缝。置于未饱和空气中的混凝土因水分散失而引起的体积缩小变形,称为干燥收缩变形,简称干缩。干缩仅是混凝土收缩的一种,除干燥收缩外,混凝土还有自生收缩(自缩)、温度收缩(冷缩)、碳化收缩等。温度的扩散速度比干缩的扩散速度要快 1000 倍。例如,大体积混凝土干缩扩散深度达到 6cm 需花 30d 时间,而在这段时间内,温度却可传播 6m 深。因此,大体积混凝土内部不存在干缩问题,但其表面干缩是一个不能忽视的问题。正因为干缩扩散速度小,混凝土表面已干缩,而其内部不缩,这样内部混凝土对表面混凝土干缩起约束作用,使混凝土表面产生干缩应力。当混凝土的干缩应力大于抗拉强度时,混凝土就会产生裂缝,这种裂缝称为干缩裂缝。

实际上,水工混凝土建筑物产生干缩裂缝,也包含有混凝土自生体积收缩和碳化收缩作用的结果。

(3) 钢筋锈蚀裂缝。混凝土中钢筋发生锈蚀后,其锈蚀产物(氢氧化铁)的体积将比原来增长 2~4 倍,从而对周围混凝土产生膨胀应力,当该膨胀应力大于混凝土抗拉强度时,混凝土就会产生裂缝,这种裂缝称为钢筋锈蚀裂缝。钢筋锈蚀裂缝一般都为沿钢筋长度方向发展的顺筋裂缝。

(4) 碱骨料反应裂缝。碱骨料反应主要有碱—硅酸盐反应和碱—碳酸盐反应,它们都是水泥中的碱( $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ )与骨料中的某些活性物质如活性  $\text{SiO}_2$ 、微晶白云石(碳酸盐),以及变形石英等发生反应而生成吸水性较强的凝胶物质。当反应物增加到一定数量,且有充足水时,就会在混凝土中产生较大的膨胀作用,导致混凝土产生裂缝,这种裂缝称为碱骨料反应裂缝。与最常见的混凝土干缩裂缝和荷载引起的超载裂缝不同,碱骨料反应裂缝的形貌及分布与钢筋限制有关,当限制力很小时,常出现地图状裂缝,并在缝中伴有白色浸出物;当限制力强时,则出现顺筋裂缝。

(5) 超载裂缝。当建筑物遭受超载作用时,其结构构件产生的裂缝称为超载裂缝。

此外,常见的混凝土裂缝还有地基不均匀沉陷裂缝、地基冻胀裂缝等。

### 1.1.2 渗漏

水工混凝土建筑物的主要任务是挡水、引水、输水和泄水,都与“水”密切相关,而水又是无孔不入,特别是压力水。因此,渗漏也是水工混凝土建筑物常见的主要病害之一。渗漏会使建筑物内部产生较大的渗透压力和浮托力,甚至危及建筑物的稳定与安全;渗漏还会引发溶蚀、侵蚀、冻融、钢筋锈蚀、地基冻胀等病害,加速混凝土结构老化,缩短建筑物的使用寿命。同时,渗漏会引起混凝土建筑物的水量损失,影响经济效益和社会效益。

按照渗漏的几何形状,渗漏可分为点渗漏、线渗漏和面渗漏三种。

点渗漏和面渗漏一般是由混凝土施工质量差造成的。例如,生产混凝土所用原材料不合格、搅拌不均匀、浇筑振捣不密实或漏振、骨料分离、早期冻害、塑性收缩裂缝等使混凝土疏松、不密实,抗渗等级低或在其内部形成相互连通的蜂窝孔隙,从而导致集中或零散渗漏和大面积散渗发生。

线渗漏较为常见,发生率高。线渗漏又可分为病害裂缝渗漏和变形缝渗漏两种。

根据渗漏水速度,渗漏又可分为慢渗、快渗、漏水和射流四种,渗水量与渗径长度、静水压力、渗流截面积三个因素有关。

水工混凝土建筑物的渗漏问题是一种较为普遍的病害,归纳起来造成渗漏的原因主要有以下几点:

(1) 裂缝, 尤其贯穿性裂缝是产生渗漏的主要原因之一, 而漏水程度又与裂缝的性状(宽度、深度、分布)、温度及干湿循环等有关, 如冬季温度低、裂缝宽度大, 在同样水位下渗漏量就大。

(2) 止水结构失效, 沥青止水并混进了水泥浆、止水片材性能不佳, 发生断裂、腐烂, 伸缩缝变形大导致绕止水带渗漏, 还有止水带施工工艺不当等也会引起渗漏。

(3) 混凝土施工质量差, 密实度低, 甚至出现蜂窝孔洞, 从而导致水在混凝土中渗漏。

(4) 基础灌浆帷幕破坏是引起基础渗漏的主要原因, 如帷幕灌浆施工没有达到设计要求; 运行中, 帷幕受环境水的侵蚀而破坏; 基础处理不善, 基岩出现不均匀沉降, 导致帷幕断裂失效等。

渗漏对水工混凝土建筑物的危害性很大, 首先, 渗漏会使混凝土产生溶蚀破坏。所谓溶蚀, 即渗漏水对混凝土产生溶出性侵蚀。众所周知, 混凝土中水泥的水化产物主要有水化硅酸钙、水化铝酸钙、水化铁铝酸钙及氢氧化钙, 而足够的氢氧化钙又是其他水化产物凝聚、结晶稳定的保证。以上水化产物中, 氢氧化钙在水中的溶解度较高。正常情况下, 混凝土毛细孔中均存在饱和氢氧化钙溶液, 而一旦产生渗漏, 渗漏水就可能把混凝土中的氢氧化钙溶出带走, 在混凝土外部形成白色碳酸钙结晶。这样就破坏了水泥其他水化产物稳定存在的平衡条件, 从而引起水化产物的分解, 导致混凝土性能的下降。当混凝土中总的氢氧化钙含量(以氧化钙量计算)被溶出 25% 时, 混凝土抗压强度要下降 50%; 而当溶出量超过 33% 时, 混凝土将完全失去强度而松散破坏<sup>①</sup>。由此可见, 渗漏对混凝土产生溶蚀将造成严重的后果。其次, 渗漏会引起并加速其他病害的发生与发展。当环境水对混凝土有侵蚀作用时, 渗漏会促使环境水侵蚀向混凝土内部发展, 从而增加破坏的深度与广度; 在寒冷地区, 渗漏会使混凝土的含水量增大, 促进混凝土的冻融破坏; 对水工钢筋混凝土结构物, 渗漏还会加速钢筋锈蚀等。

### 1.1.3 剥蚀

混凝土产生剥蚀破坏是由于环境因素(包括水、气、温度、介质)与混凝土及其内部的水化产物、砂石骨料、掺合料、外加剂、钢筋相互之间产生一系列机械的、物理的、化学的复杂作用, 从而形成大于混凝土抵抗能力(强度)的破坏应力所致。最常见的剥蚀破坏有下列四种。

(1) 冻融破坏。混凝土产生冻融破坏, 从宏观上看是混凝土在水和正负温度交替作用下而产生的疲劳破坏; 在微观上, 其破坏机理有多种解释, 较有代表性和公认程度较高的是美国学者 T. C. Powers 的冻胀压和渗透压理论。这种理论认为, 混凝土在冻融过程中受到的破坏应力主要有两方面来源, 一个是混凝土孔隙中充满水时, 当温度降低至冰点以下而使孔隙水产生物态变化, 即水变成冰, 其体积要膨胀 9%, 从而产生膨胀应力; 与此同时, 混凝土在冻结过程中还可能出现过冷水在孔隙中的迁移和重分布, 从而在混凝土的微观结构中产生渗透压。这两种应力在混凝土冻融过程中反复出现, 并相互促进, 最终造成混凝土的疲劳破坏。

(2) 冲磨与空蚀。在水工建筑物过流部位往往容易发生冲磨和空蚀破坏, 但冲磨与空蚀的破坏机理是不同的。冲磨破坏是一种单纯的机械作用, 它既有水流作用下固体材料间的相

① 水利电力部水工混凝土耐久性调查组, 全国水工混凝土建筑物耐久性病害处理调查总结报告, 1987. 5。

互摩擦,又有相互间的冲击碰撞。不同粒径的固体介质,当它的硬度大于混凝土硬度时,在水流作用下就形成对混凝土表面的磨损与冲击,这种作用是连续的和不规则的,最终对混凝土面造成冲磨破坏。而空蚀破坏是在高速水流下由于水流形态的突然变化,在局部产生负压,从而使水气化而形成空穴(气泡),这些空穴随水流运动到高压区时又迅速破灭,此时对混凝土表面产生类似爆炸的剥蚀应力,从而形成混凝土表面的空蚀破坏。

(3) 钢筋锈蚀破坏。混凝土中钢筋锈蚀的原因主要有两方面:①由于混凝土在空气中发生碳化而使混凝土内部碱度降低,钢筋钝化膜破坏,从而使钢筋产生电化学腐蚀现象,导致钢筋生锈;②由于氯离子侵入到混凝土中,也使钢筋的钝化膜破坏,从而形成钢筋的电化学腐蚀。因此,钢筋锈蚀过程实际是大气( $\text{CO}_2$ 、 $\text{O}_2$ )、水、侵蚀介质( $\text{Cl}^-$ 等)向混凝土内部的渗透、迁移而引起钢筋钝化膜破坏,并产生电化学反应,使铁变成氢氧化铁的过程。钢筋生锈后,其锈蚀产生的体积比原来增长2~4倍,从而在周围的混凝土中产生膨胀应力,最终导致钢筋保护层混凝土开裂、剥落。而保护层的剥落又会进一步加速钢筋锈蚀。这一恶性循环将使混凝土结构的钢筋保护层大量剥落、钢筋截面积减小,从而降低结构的承载能力和稳定性,影响结构物的安全。

(4) 化学侵蚀。化学侵蚀引起混凝土剥蚀破坏的原因也较复杂,从总体上看,都是可溶性侵蚀介质随着水渗透扩散到混凝土中,再与混凝土中水泥水化产物或其他组分发生化学反应,生成膨胀性产物或溶解度较大的反应产物,从而使混凝土产生胀裂剥蚀或溶出性剥离。混凝土受到化学侵蚀出现的破坏主要有两类:一类是硫酸盐侵蚀,属膨胀型破坏。当这些溶解度小而又有体积膨胀的产物不断增加时,在混凝土孔隙中将产生不断增加的膨胀应力,最终导致混凝土开裂和剥蚀。另一类是酸性水的溶出性侵蚀,溶出性侵蚀会促使混凝土中的氢氧化钙不断溶出,从而引起水泥水化产物分解、水泥石结构疏松,混凝土强度降低。

## 1.2 混凝土建筑物修补材料的分类

针对混凝土建筑物老化病害——裂缝、渗漏及剥蚀,为了便于选用,将混凝土建筑物修补材料分为以下8类:

- (1) 表面嵌填堵漏材料。
- (2) 表面防渗材料。
- (3) 裂缝灌浆材料。
- (4) 剥蚀破坏修补材料。
- (5) 磨蚀破坏修补材料。
- (6) 结构补强加固材料。
- (7) 水下修补材料。
- (8) 化学侵蚀防护材料。

### 1.2.1 表面嵌缝封堵材料

表面嵌缝封堵材料主要用于裂缝灌浆处理开槽嵌填、伸缩缝堵漏嵌填、集中渗漏封堵等。常用的表面嵌缝封堵材料有聚合物水泥砂浆、环氧砂浆、非硫化丁基橡胶、GB嵌缝材料、SR塑性止水材料、弹性聚氨酯嵌缝材料、腻子型膨胀橡胶、聚硫嵌缝密封材料等。

### 1.2.2 表面防渗材料

表面防渗材料主要用于处理较大面积散渗。常用的表面防渗材料有聚合物水泥砂浆、沥青砂浆、钢丝网喷混凝土（砂浆）、环氧玻璃丝布复合材料（玻璃钢）、橡胶片材、聚氯乙烯（PVC）防水卷材、GB 复合土工膜止水板、SR 防渗盖片、水泥基渗透结晶型防水材料、防水涂料等。

### 1.2.3 裂缝灌浆材料

灌浆材料主要用于渗水裂缝防渗处理、混凝土裂缝结构补强、混凝土伸缩缝渗水处理，以及基础与绕坝渗漏处理等。常用的灌浆材料有水泥类浆材、环氧树脂类浆材、丙烯酰胺类浆材、丙烯酸盐类浆材、甲基丙烯酸酯类浆材、聚氨酯类浆材、沥青类浆材、互穿网络复合浆材等。

### 1.2.4 剥蚀破坏修补材料

剥蚀破坏修补材料主要用于冻融破坏、钢筋锈蚀引起的混凝土保护层剥落等。常用的剥蚀破坏修补材料有水泥砂浆、预缩水泥砂浆、聚合物水泥砂浆、环氧砂浆、水泥混凝土、聚合物水泥混凝土、环氧树脂混凝土、喷射混凝土、高抗冻性混凝土、钢筋阻锈剂、界面处理剂与防护涂层材料等。

### 1.2.5 磨蚀破坏修补材料

磨蚀破坏修补材料主要用于高速水流或夹沙（石）高速水流引起的混凝土冲磨与空蚀破坏修补。常用的磨蚀破坏修补材料有高强水泥砂浆、高强水泥石英砂浆、环氧砂浆、高强耐磨硅粉混凝土（砂浆）、高强耐磨粉煤灰混凝土（砂浆）、铁矿石骨料抗磨蚀混凝土（砂浆）、钢纤维硅粉混凝土、铸石骨料混凝土（砂浆）、低收缩硅粉混凝土、多元胶凝材料抗冲磨混凝土、聚脲抗冲磨材料，以及“海岛结构”环氧合金抗冲磨材料等。

### 1.2.6 结构补强加固材料

结构补强材料主要用于混凝土结构与钢筋混凝土结构承载能力不够的补强加固工程。常用的结构补强材料有补强灌浆材料、钢板与黏结剂、预应力锚杆或锚索、玻璃钢、喷射混凝土、碳纤维复合材料等。

### 1.2.7 水下修补材料

水下修补材料主要用于水下混凝土建筑物裂缝、渗流等病害的修补。常用的水下修补材料有水下环氧砂浆、SXM 水下快速密封材料、GBW 遇水膨胀止水条、HK-963 水下黏结剂、橡胶片材、SR 防渗盖片、GB 复合土工膜止水板、水下不分散混凝土（砂浆）、水下聚合物混凝土（砂浆）、水下环氧灌浆材料、水溶性聚氨酯浆材、聚氨酯/环氧树脂复合浆材、聚氨酯/甲凝复合浆材等。

### 1.2.8 化学侵蚀防护材料

化学侵蚀防护材料主要用于溶出性侵蚀（渗漏、扩散）、分解性侵蚀（酸性侵蚀、碳酸与硫氢酸侵蚀、镁盐与铵盐侵蚀）、盐类侵蚀（硫酸盐侵蚀、盐类结晶侵蚀、苛性碱侵蚀）、有机质侵蚀（油类侵蚀、生物侵蚀）等化学侵蚀的防护，以及化学侵蚀破坏的修补。常用的化学侵蚀防护材料有硫铝酸盐水泥、抗硫酸盐水泥、掺矿渣硫铝酸盐水泥、掺活性掺合料硅酸盐水泥、聚合物水泥砂浆等。

## 2

## 表面嵌填堵漏材料

表面嵌填堵漏材料主要用于线渗（裂缝渗漏、伸缩缝渗漏）与集中渗漏处理，即裂缝处理开槽埋管嵌填、伸缩缝嵌填，以及集中渗漏的快速堵漏等。因此，表面嵌填堵漏材料包括嵌填、嵌缝与快堵三类材料，主要有以下9种。

### 2.1 聚合物水泥砂浆

众所周知，水泥砂浆（混凝土）的缺点是脆性大、抗拉强度低、变形性能与黏结性能均较差。为了改善水泥砂浆（混凝土）的变形性能、黏结性能和耐久性，采用有机高分子材料（聚合物）与无机材料复合，即配制成聚合物改性水泥砂浆（混凝土），可发挥有机、无机材料各自优点，能明显提高砂浆（混凝土）的极限拉伸、抗拉强度、黏结强度，降低弹模，减小干缩率，提高混凝土密实性、抗渗性及抗冻性等。

早在古代，我国将天然聚合物用于古建筑已有悠久历史，如古代用糯米粥和榆树叶汁拌石灰砌城墙和墓穴。

1923年，英国里特布尔（Letebure）申请用天然橡胶乳液改性水泥砂浆及混凝土的专利。

1932年，英国邦德（Bend）申请用人造橡胶乳液改性水泥砂浆及混凝土的专利。

20世纪40~50年代，人们申请了多种合成聚合物胶乳进行改性水泥砂浆及混凝土的发明专利。

20世纪60~70年代，研究用不同形态的聚合物，如应用聚合物单体、树脂、聚合物胶乳、聚合物粉末等对水泥砂浆及混凝土进行改性。

1971年，美国混凝土学会（ACI）成立548委员会（聚合物混凝土）。

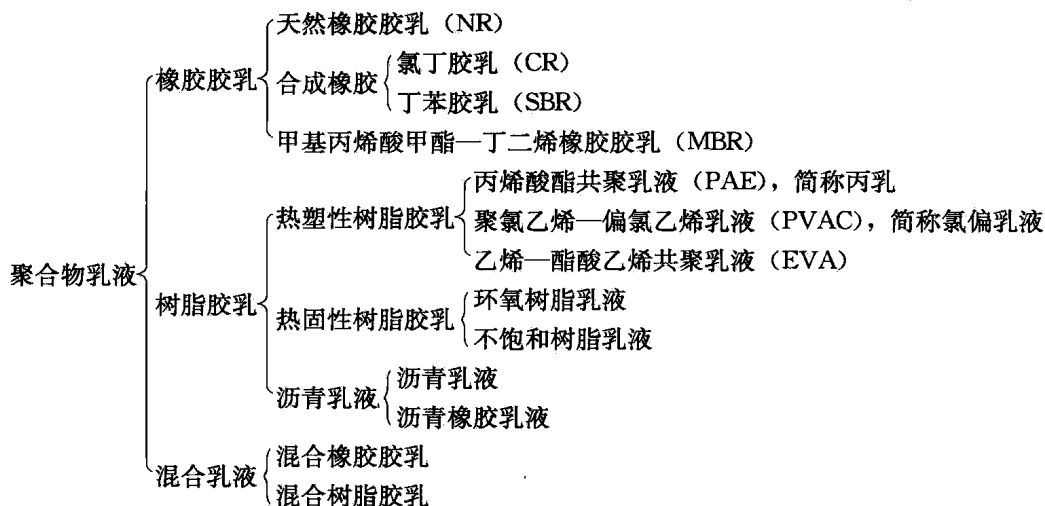
从1979年开始，每隔3年左右即召开一次聚合物混凝土国际学术讨论会，1990年第六届聚合物混凝土国际学术讨论会在上海同济大学召开。

美国和日本都制定了聚合物水泥砂浆及混凝土的应用标准。

我国由于化学工业较落后，直至20世纪60年代才开始聚合物乳液对水泥砂浆及混凝土的改性研究，主要研究天然橡胶胶乳、丁苯胶乳、氯丁胶乳、氯偏胶乳、丙烯酸酯共聚乳液（丙乳）等聚合物水泥砂浆的性能及应用。

2001年，我国颁布了电力行业标准 DL/T 5126—2001《聚合物改性水泥砂浆试验规程》。

聚合物分为三类，即聚合物乳液、水溶性聚合物或单体、粉末状聚合物，而聚合物乳液又分橡胶胶乳、树脂胶乳与混合乳液三种。



常用的聚合物有丙乳 (PAE)、氯丁胶乳 (CR)、丁苯胶乳 (SBR)、氯偏乳液 (PVAC)，其性能见表 2-1<sup>[2-1]</sup>。

表 2-1 聚合物的性能

| 聚合物种类                             | PAE  | CR   | SBR  | PVAC |
|-----------------------------------|------|------|------|------|
| 固形物含量 (%)                         | 46   | 42   | 48   | 50   |
| 稳定剂种类                             | 非离子  | 非离子  | 非离子  | 非离子  |
| 密度 (26℃, g/cm <sup>3</sup> )      | 1.09 | 1.10 | 1.01 | 1.09 |
| pH 值                              | 9.5  | 9.0  | 10.0 | 2.5  |
| 黏度 (20℃) (×10 <sup>-3</sup> Pa·s) | 250  | 10   | 24   | 17   |
| 表面张力 (26℃) (Pa)                   | 4.0  | 4.0  | 3.2  |      |

### 2.1.1 聚合物水泥砂浆的配合比

聚合物水泥砂浆的配合比设计不同于普通水泥砂浆，其抗压强度不作为主要性能，而是结合使用要求综合考虑抗压、抗拉、抗渗、抗腐、黏结性能等进行配合比设计。

聚合物水泥砂浆配合比参数中，聚灰比（乳液中固形物量与水泥的重量比）成为主要控制参数，一般聚灰比为 5%~10%，灰砂比为 1:1~1:3，水灰比为 0.22~0.40。

由于聚合物乳液在生产过程中加入了表面活性剂，当将它加入水泥砂浆中时，其和易性得到了极大改善，达到相同流动度，用水量显著减少，表现出聚合物乳液有减水性能。

聚合物对水泥的水化过程一般有滞后作用，因此聚合物对水泥的凝结时间有影响，一般随聚灰比的增加终凝时间也增加，但仍属正常范围，初凝时间为 1~3h，终凝时间小于 12h。

聚合物水泥砂浆的保水能力优于普通砂浆，且保水性能随聚合物掺量的增加而变化。

### 2.1.2 聚合物水泥砂浆的性能<sup>[2-1]</sup>

(1) 强度特性。一般情况下，聚合物水泥砂浆的抗拉、抗折强度比普通砂浆有较显著提高，但其抗压强度有所降低。

聚合物水泥砂浆强度与养护方式及龄期有关，对聚合物水泥砂浆 28d 标准养护方式为：7d 湿、21d 干养护。如果 28d 一直处于干燥状态，则强度随时间增加而提高；如果一直处于水中养护，则强度有所降低，但降幅不大。

(2) 变形性能。聚合物水泥砂浆的弹性模量随聚合物掺量增加而降低, 极限拉伸随聚合物掺量的增加而提高, 但干缩随聚合物掺量的增加而降低。

丙乳砂浆与普通水泥砂浆性能对比试验结果见表 2-2。

表 2-2 丙乳砂浆与普通水泥砂浆性能对比试验结果

| 砂浆类型 | 聚合物掺量 (%) | 抗拉强度 (MPa) | 极限拉伸 ( $\times 10^{-4}$ ) | 拉伸弹性模量 (GPa) | 收缩变形 ( $\times 10^{-6}$ ) | 抗裂系数 ( $\times 10^{-5}$ ) |
|------|-----------|------------|---------------------------|--------------|---------------------------|---------------------------|
| 普通   | 0         | 5.4        | 2.28                      | 25.5         | 1271                      | 3.8                       |
| 丙乳   | 12        | 7.4        | 5.58                      | 16.2         | 538                       | 47.8                      |

由表 2-2 可知, 丙乳砂浆比普通砂浆的抗裂系数提高 10 倍以上, 说明丙乳砂浆比普通砂浆的抗裂性大大提高。

(3) 黏结性能。聚合物水泥砂浆对砂浆、混凝土、钢材、木材、瓷砖等各种材料都有良好的黏结性, 并且是一种常温水性黏结剂, 黏结面潮湿或在潮湿空气中均可黏结。

南京水利科学研究院曾研究丙乳砂浆与钢板、砂浆的抗拉黏结强度, 其试验结果见表 2-3。

表 2-3 不同养护条件下丙乳砂浆的黏结强度

| 养护条件       | 砂浆种类 | 与钢材黏结强度 (MPa) | 与砂浆黏结强度 (MPa) |
|------------|------|---------------|---------------|
| 7d 湿、21d 干 | 普通   | 0             | 1.39          |
|            | 丙乳   | 0.38          | 7.83          |
| 7d 湿、21d 水 | 普通   | 0.17          | 5.73          |
|            | 丙乳   | 0.33          | 7.90          |

(4) 抗渗性。聚合物水泥砂浆抗渗性优于普通水泥砂浆, 南京水利科学研究院试验结果为, 一次加压 1.5MPa, 24h 后测渗水高度, 丙乳砂浆仅为 3.4~3.9mm, 而普通砂浆为 9~12mm。

(5) 抗冻性。聚合物水泥砂浆具有很好的抗冻性, 不掺聚合物的普通砂浆一般抗冻等级为 F50 左右, 而聚合物水泥砂浆的抗冻等级大于 F300。

(6) 耐老化性能。南京水利科学研究院曾对丙乳砂浆进行耐老化试验 (日本进口 WE-2 型紫外碳弧灯全气候老化箱), 老化试验 2160h (90d)。老化试验结果表明, 经 90d 老化试验, 丙乳砂浆抗拉强度和极限拉伸均未明显降低, 与同批同龄期末老化试件相比, 降低幅度与普通砂浆的相同, 说明其耐老化性能良好。

### 2.1.3 聚合物对水泥砂浆改性机理

用电子显微镜观察和分析普通砂浆与丙乳砂浆的形貌结果显示, 普通砂浆断面上有许多纵横交错的微裂缝, 缝多而宽, 在砂子周围有断断续续宽约  $1\mu\text{m}$  的裂缝, 这些裂缝的存在降低了普通砂浆的抗拉、黏结能力。当微裂缝受到结构应力或温度应力作用时, 就会扩展, 甚至相互贯连。另外, 普通砂浆水灰比大, 用水量较多, 砂浆内空隙率大, 与外界连通的孔隙也多, 因此抗渗性较差。

丙乳砂浆, 在水泥水化同时, 聚合物乳液失水而形成聚合物膜, 与水泥浆互为连续相, 水

泥浆体中聚合物膜弹性模量低,使水泥砂浆内部的应力状态得到改善,可以承受变形而使水泥石应力减小,因此产生微裂缝的可能性就小些,同时聚合物纤维越过微裂缝,起到架桥和填充作用,限制裂缝的发展,微裂缝常在聚合物较多处消失。同时,聚合物水泥砂浆的用水量大幅度降低,砂浆内部空隙少、聚合物膜充填了空隙,切断了孔隙与外界通道,起到密封作用。

由上可知,聚合物掺入,减少了砂浆用水量,而且改变了硬化水泥砂浆的组织结构及内应力,致使微裂缝大大减少,因而聚合物水泥砂浆的抗裂性、抗渗性、抗碳化、抗氯离子渗透能力等均得到很大改善。

#### 2.1.4 聚合物水泥砂浆的施工要求及注意事项<sup>[2-1]</sup>

(1) 对原材料的要求。

聚合物乳液:满足产品质量标准

注意储存温度和时间,如丙乳储存温度为 5~30℃,储存期为 6 个月

水泥:42.5 硅酸盐水泥或 42.5 普通硅酸盐水泥

砂子最大粒径:小于等于砂浆涂层厚度的 1/3

(2) 聚合物水泥砂浆的配制。

水泥和砂子先拌均匀,再倒入聚合物乳液,加水搅拌 3min 后尽快运至施工部位,拌好的砂浆应在 30~40min 内施工完。

(3) 基底处理。先清除疏松层、油污、灰尘等,用钢丝刷刷毛或打毛后用压力水冲洗干净,基底表面潮湿 24h 后方可抹砂浆,但不能有积水。先用聚合物水泥净浆打底,15min 后再抹聚合物砂浆。

(4) 聚合物砂浆施工与养护(以丙乳砂浆为例)。

1) 丙乳砂浆的施工温度为 5~30℃,遇寒潮、高温、雨雾天气应停止施工。

2) 大面积施工,应分块间隔施工,并设接缝条,分块面积小于 10~15m<sup>2</sup>。

3) 当涂层厚度大于 10mm 时,应分层施工。

4) 丙乳砂浆抹面收光后,表面触干,要立即喷雾养护或盖塑料薄膜或湿草袋进行湿养护 7d,然后进行自然干燥养护 21d,才可承载。

5) 丙乳砂浆养护结束后,应涂刷一层丙乳净浆。

#### 2.1.5 聚合物水泥砂浆的工程应用

(1) 新建工程防渗材料。

(2) 大坝溢流面等冻融破坏表面修补。

(3) 裂缝灌浆开槽埋管嵌填材料。

(4) 老建筑物防渗处理。

(5) 防碳化处理。

(6) 防氯盐腐蚀钢筋的表面防护材料。

(7) 工业建筑防腐材料。

## 2.2 环氧砂浆

环氧砂浆是由环氧树脂、固化剂、增塑剂、稀释剂、填料及砂子按一定比例配制而成的。环氧砂浆具有强度高、弹性模量低、极限拉伸大、黏结强度高等优良特性,但其热膨胀

系数大 ( $25\sim 30\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ )，温度剧烈变化时能使环氧砂浆与老混凝土脱开，另一缺点是材料易老化。因此，环氧砂浆适用于温度变化小、日光不易照到的部位修补处理。经多年研究，已研制出潮湿、水下、低温环境中固化的环氧树脂固化剂，因此环氧砂浆不仅能用在干燥混凝土面，也能在潮湿、水下、低温条件下使用。

## 2.3 非硫化丁基橡胶

非硫化丁基橡胶是以丁基橡胶为主体，添加软化剂、增黏剂、树脂、防老化剂及填料等经混、练、滚压而成，其断裂伸长率达 800% (常温)，在  $-30^{\circ}\text{C}$  低温下，也高达 600%，高温  $60^{\circ}\text{C}$  不流淌；使用黏结剂可与老混凝土牢固黏结，并能适应水泥砂浆和混凝土变形，防水、耐酸碱盐、耐候性较好，自身黏结性好，无毒，在工厂可制成需要形状的成品，施工方便，不用黏结剂能与新浇混凝土黏结，其机理是在这种材料制造过程中引入羧基，羟基与水泥水化生成的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  发生离子反应，形成化学结合，并伴随物理黏结，使两者牢固地黏结起来。

非硫化丁基橡胶早在 1982 年就用于浙江亭下水库大坝裂缝防渗处理，后来又在北京模式口引水渠道伸缩缝处理、太平湾水电站大坝伸缩处理、河北省百官屯水闸裂缝处理等工作中应用，效果良好。

## 2.4 GB 嵌缝材料

非硫化丁基橡胶价格较贵，为了降低成本，采用再生丁基橡胶为主研制成 GB 嵌缝止水材料，其性能与非硫化丁基橡胶基本相同，且价格较便宜。中国水利水电科学研究院结材所科海利新型建材公司生产的 GB 第二代止水材料与巴西 IGAS 材料性能比较列于表 2-4<sup>[2-2]</sup>。

表 2-4 GB 第二代止水材料与巴西 IGAS 材料性能比较

| 测试项目                                              |                                | 控制指标           | GB             | IGAS  | 备 注                                     |
|---------------------------------------------------|--------------------------------|----------------|----------------|-------|-----------------------------------------|
| 耐水<br>耐化学<br>侵蚀性                                  | 水                              | $\pm 3\%$      | +1.3%          | +1.7% | GB 止水材料在三种溶液浸泡 5 个月的重量变化率               |
|                                                   | 饱和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 溶液 | $\pm 3\%$      | +1.7%          | +2.1% |                                         |
|                                                   | $\text{NaCl}$ 溶液               | $\pm 3\%$      | +1.0%          | +1.3% |                                         |
| 针入度 (0.1mm)                                       |                                | 55~85          | 71             | 62    |                                         |
| 密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )                     |                                | $\geq 1.15$    | 1.15~1.40      | 1.35  |                                         |
| 常温断裂伸长率 (%)                                       |                                | $\geq 800$     | 1278           | 294   | GB 止水材料与混凝土黏结面没有被拉开                     |
| $-30^{\circ}\text{C}$ 断裂伸长率 (%)                   |                                | $\geq 800$     | 1040           |       |                                         |
| 黏结面浸水黏结强度与基准值之比 (%)                               |                                | $\geq 90$      | 92.3           |       |                                         |
| 冻融 300 次混凝土黏结强度与基准值之比 (%)                         |                                | $\geq 90$      | 94.9           |       | $-21\sim +5^{\circ}\text{C}$ 快速冻融 300 次 |
| 流淌性 ( $60^{\circ}\text{C}$ 、 $75^{\circ}$ 倾角、48h) |                                | $< 1\text{mm}$ | 不流淌            | 1mm   |                                         |
| 抗渗性 (水压为 1.0MPa)                                  |                                | 72h 不渗         | $> 72\text{h}$ | 48h   |                                         |
| 环境保护                                              |                                | 无毒无污染          | 无毒无污染          | 无毒无污染 |                                         |

GB 嵌缝材料与非硫化丁基橡胶一样,不用黏结剂就能与新浇混凝土黏结,因而可将造槽与嵌缝两个工序合并在一起,在混凝土浇筑过程中完成,加快施工速度。

GB 嵌缝止水材料已在西北口混凝土面板坝周边缝、青海省小干沟引水隧洞伸缩缝、青岛市大东河水库浆砌石坝横缝、甘肃引大入秦工程盘道岭引水隧洞环向施工缝渗水处理中得到应用,后来又在新疆乌鲁瓦提、福建芹山、云南柴石滩、江西大坳等混凝土面板坝周边缝中应用,效果都很好。

## 2.5 SR 嵌缝材料

SR 嵌缝材料是由丁基橡胶、沥青、有机硅树脂等高分子材料与矿物质经高温混熔而成,由华东勘测设计研究院科研所实验厂生产。SR 嵌缝材料在广东抽水蓄能电站上库面板坝混凝土面板接缝、浙江天荒坪抽水蓄能电站上库面板坝面板接缝等工程中应用,最近又在三峡右岸泄洪坝段、厂房坝段裂缝防渗处理工程中应用。SR-2 嵌缝止水材料技术性能指标见表 2-5<sup>[2-3]</sup>。

表 2-5 SR-2 嵌缝止水材料技术性能指标

| 项 目                | 性能指标     |
|--------------------|----------|
| 外观                 | 黑色均匀塑性胶泥 |
| 施工度 (mm)           | 9~15     |
| 耐热性 (80℃, 下垂) (mm) | ≤4       |
| 黏结延伸率 (%)          | ≥250     |
| 挥发率 (%)            | ≤3       |
| 低温柔性 (-30℃)        | 无裂缝和剥离现象 |
| 抗渗性 (MPa) (不渗漏)    | ≥1.5     |

## 2.6 弹性聚氨酯嵌缝材料

弹性聚氨酯嵌缝材料是由低分子量预聚体(含活泼异氰酸基——NCO)为主剂,芳香族二元胺为固化剂,外加一定量辅助剂(增塑剂、催化剂、防老化剂等)及填料配制而成,为双组分。该材料具有弹性好、延伸率大(200%~1000%)、耐低温(-40℃)、耐水耐酸碱、抗疲劳等优点,与混凝土有较高黏结强度,可冷嵌施工。

南京水利科学研究院研制的 PUI 型弹性密封膏属弹性聚氨酯嵌缝止水材料,为双组分材料,A 组分为黄色或棕色透明液体,B 组分混均后为灰色液体、固化物为灰色弹性体,其性能如下<sup>[2-1]</sup>:

|             |                            |
|-------------|----------------------------|
| 密度          | 1.35g/cm <sup>3</sup>      |
| 抗拉强度        | ≥0.3MPa                    |
| 黏结强度        | 大于本体抗拉强度                   |
| 断裂伸长率 (25℃) | ≥500%                      |
| 低温柔性        | -45℃, 挠曲 400 次, 未破坏痕迹      |
| 抗渗性         | ≥2.0MPa                    |
| 抗冻性         | -45~25℃, 100 次循环, 力学性能几乎不变 |

## 2.7 腻子型膨胀橡胶

遇水膨胀橡胶是 20 世纪 80 年代国际最新型止水材料,具有遇水膨胀以水止水的优点,