

# 水下混凝土裂缝修复材料与工艺研究进展

周建华<sup>1,2</sup> 李勇辉<sup>2</sup> 陶 勇<sup>2</sup>

1. 中国水利水电科学研究院 北京 100044

2. 北京中水科工程集团有限公司 北京 100044

**摘要:** 水利水电工程具有重大民生经济意义,运行过程中不可避免产生裂缝,需要在水下进行修复。修复效果受水下材料和工艺影响显著。本文对国内外水下混凝土裂缝修复材料、工器具及工艺进行调研分析,总结现有水下混凝土修复技术及特点,分析现有工艺、材料对于水下混凝土裂缝修复的适用性及存在的问题,阐明了水下修复技术的研究重点,为水下裂缝修复材料、工艺改性提供支撑。

**关键词:** 水下裂缝;水下修复材料;水下设备;水下工艺

## 一、研究背景

水利水电工程具有重大民生经济意义,对推动社会发展具有重要作用。在地震、洪涝等自然灾害和长期运行条件下,水工建筑物不可避免会出现混凝土裂缝,若不及时修复,将可能使裂缝进一步扩展,产生险情,甚至引起水工建筑物的破坏,影响工程的安全运行。多数水库大坝不具备放空条件,或者放空可能会带来较大的经济损失和不良社会影响,而多数引调水工程也要求不停水连续运行,因而很多水工混凝土裂缝的修复需要在水下进行。灌浆是修复水下混凝土裂缝的有效手段,但修复效果受到裂缝表面封闭效果、灌浆材料和工艺影响显著<sup>[1-3]</sup>。

本文对国内外水下混凝土裂缝修复材料、工器具及案例进行深入调研分析,总结现有水下混凝土修复技术及特点,分析现有工艺、材料存在的主要问题及研究趋势,为水下裂缝修复材料、工艺改性提供技术支撑。

## 二、水下混凝土裂缝修复材料

与水上修复材料不同,水下修复材料既不能与水互溶,又必须具有一定的亲水性。混凝土裂缝表面越粗糙,修复材料与混凝土机械锁能力越强,黏结强度就越高。而在水下环境中,混凝土表面附着薄薄的水层,影响到

混凝土的表面性能。高分子化合物因其基团结构的不同,可分为憎水性基团和亲水性基团,解决了水下修复材料“既不溶于水又要亲水”的问题。水下修复材料并不是单一纯组分材料,包含各种不同性质的材料。根据修复材料组分的不同,可将修复材料分为:水下混凝土、环氧树脂灌浆材料、互穿网络聚合物等。而根据使用性能侧重点,可将修复材料分为:具修复补强作用的聚合物混凝土及FRP复合材料;快速堵漏、水下快速密封材料;针对复杂裂缝灌浆材料。水下修复材料在施工应用中必须具有抗分散性、快速固化、较高的黏结及力学强度、良好的耐蚀性和耐磨性<sup>[2-4]</sup>。

目前常用的水下修复材料有水下表面修复材料及水下化学灌浆材料,水下表面修复材料包括水下工程立面和平面的局部和薄层补强材料、伸缩缝止水材料、锚固剂、快速密封剂、涂料、弹性密封膏等。水下化学灌浆材料主要包括环氧类补强加固灌浆材料和聚氨酯类渗漏封堵灌浆材料等。使用时须根据修复工程需要来挑选合适的材料。表1列出主要的材料类型和用途<sup>[3-6]</sup>。

## 三、水下混凝土裂缝修复施工工器具及工艺

### (一) 水下混凝土裂缝修复施工工器具

性能优良的修补材料为水下混凝土缺陷的修复提供了可能,但要使其成为现实,还需要有相应的施工设备与工艺,水下施工质量的好坏与施工器具的机械化程度密切相关。近年来在施工设备的研究方面取得了较大的进展,通过使用各种先进的水下施工设备,潜水员可以在水下进行诸如水下清理、凿除、切割、钻孔、涂刷、锚固等各种操作,同时还可以通过现代化的水下摄像系统将水下作业情况及时传递给岸上的监理人员,从而能

**基金项目:** 中国水科院料研专项“复杂场景下闸坝工程水下缺陷修复加固成套技术”(编号:HTSS0145C012025EM252)。

**作者简介:** 周建华(1985-),男,汉族,山东省济宁市,硕士研究生,高级工程师,主要从事地基与基础处理技术研究及工程应用工作。

表1 水下缺陷处理用的材料系列

序号	材料类型	材料名称	材料名称	特点及应用范围
1	水下表面修复材料	水下不分散混凝土	HK-NDC、HK-NDC快硬型	大方量水下混凝土的快速浇筑
2		聚合物混凝土/砂浆	PMB型、TK型、海岛结构环氧合金	可用于薄层表面修补处理
3		塑性止水材料	SR塑性填料、GB塑性填料	用于上游面水下伸缩缝和裂缝的封闭
4		水下快速密封剂	SXM型、FIS7型、AUSBOND型	用于水下孔洞、槽穴、宽缝的刚性填封
5		水下弹性密封膏	HK-8505型、双组份聚硫密封胶	水下变形缝的弹性嵌缝处理
6		水下涂料	SK手刮聚脲、双组份喷涂聚脲	水下建筑物表面防护
7		水下界面剂/锚固剂	HK-963型、SK水下粘接剂	水下金属及混凝土粘结及防护, SR防渗模块及水下弹性密封膏的界面剂
8		表面封闭复合材料	柔性碳纤维复合GB板、复合止水盖板	高水头水下缺陷表面的封闭, 兼具加固和防渗作用
9	水下化学	水下裂缝封堵灌浆材料	双组份LW聚氨酯溶液	水下伸缩缝或裂缝渗漏封堵用的灌浆材料
10	灌浆材料	水下裂缝加固灌浆材料	双组份CW型、SK型环氧树脂溶液	水下裂缝的补强加固用灌浆材料

够较好地把握施工质量, 保证处理效果。

水下施工质量的好坏与施工设备的机械化程度有密切的关系, 目前基本上是采用体积小、动力大、效率高的液压动力站作为动力源, 通过传输管带动液压钻、液压镐、液压切割机、液压铲、液压链锯等工具, 在水下由潜水员实施清缝、开槽、钻孔、锚固等各种操作。目前在工程中使用的水下液压设备大多由国外进口, 国内也有些液压厂商制造水下液压设备, 但在动力性、灵巧性及配套性上与国外尚有不小的差距。

### (二) 水下混凝土裂缝修复工艺

水下混凝土裂缝修复工艺主要包括水下混凝土裂缝表面封闭及裂缝充填封堵工艺。裂缝表面封闭主要施工工艺: 潜水员表面检查→清理→堵缝→涂刷水下修补材料→粘贴/锚固补强加固材料。水下表面薄层缺陷修补处理工艺如图1所示。对于因结构、施工工艺、温度应力、地质条件以及荷载压力等各种原因引起的深部或贯穿裂缝渗漏, 通常根据相应的修补要求, 选择水溶性聚氨酯或环氧树脂材料, 采用灌浆进行充填修补处理, 主要施工工艺: 表面检查→打磨→凿槽、钻孔→清理→埋管→灌浆→表面处理。水下裂缝灌浆修补处理如图2所示。

水下混凝土表层缺陷处理详细步骤: ①表面检查: 通过潜水员水下录像, 对缝宽、走向、长度和混凝土表面状况检查, 对渗漏部位进行标记; ②清理: 潜水员采用手握式或机械式钢丝刷刷洗, 对水下裂缝两边面板附着物进行清理, 出露坚硬混凝土面; ③堵缝: 采用水下弹性密封膏或塑性止水材料顺缝嵌入; ④涂刷水下修补材料: 采用配制好的水下修补剂材料沿缝从渗水量较小

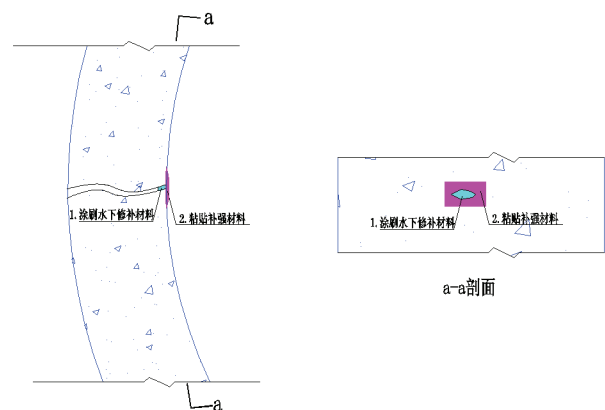


图1 水下混凝土表层缺陷处理工艺

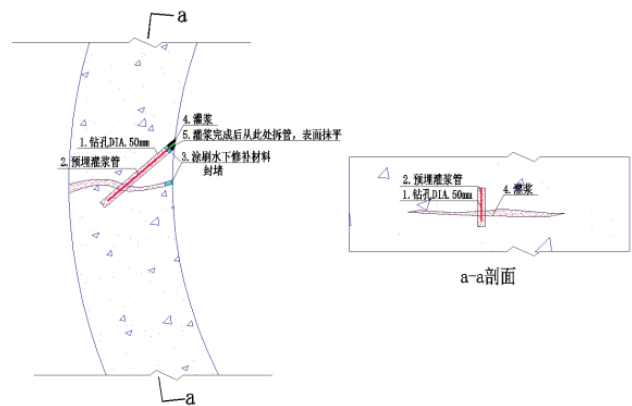


图2 水下混凝土裂缝灌浆修补工艺

和不渗水处先涂抹, 最后封堵渗水较大点; ⑤粘贴/锚固补强加固材料: 对缺陷部位涂刷相应补强加固材料界面剂, 施加一定作用力将柔性或刚性加固材料压在缺陷部位, 挤出交界面上水分及气泡, 使材料牢固黏贴于待补强修复部位。

水下混凝土裂缝灌浆处理详细步骤: ①表面检查:

潜水员对裂缝参数、漏水情况进行检查；②打磨：再沿缝两边各打磨宽20cm，将缝表面杂物和松散层打磨掉；③凿槽、钻孔：打磨后骑缝切割凿“V”槽，槽宽深均为1~2cm。凿“V”槽时沿缝两边凿，必须将缝凿在中间。骑缝中间进行钻孔；④清理：凿槽、钻孔完成后，对整个缝面和孔内清理干净；⑤嵌缝：采用水下弹性密封胶或塑性止水材料顺缝嵌入、捣实；⑥埋管：灌浆孔采用水下快速密封剂封闭，确保不漏浆；⑦灌浆：根据处理需要选择水溶性聚氨酯材料或环氧树脂材料，起始孔开始进浆时，其余孔敞开排气，待相邻孔排净积水及泡沫，并流出浓浆时可进行并联灌浆。根据进浆速度逐级缓慢提升，当进浆速度小于5mL/min时，将压力提升至0.4~0.5MPa。灌浆正常结束标准为：在设计最高压力下，单孔吸浆量小于0.01L/min，再持续灌注20min即可结束。在灌注过程中出现异常情况，应停止升压，进行处理。⑧表面处理：灌浆结束后，对所有灌浆嘴剪除，剪除灌浆管。

#### 四、存在的问题

结合上文所述，水下修复材料种类比较齐全，基本涵盖了水下修复的各个方面需求，多项工程应用表明，相应各类修复材料性能优异，能够满足特定工况下水下混凝土修补需求。但目前水下修复材料多用于闸坝工程静水环境水下常规处理，多数材料性能难以匹配水下修复快速处理特点与动水场景要求，导致水下缺陷修复率低、修复效果可靠性差。关于大流速条件下水下修复材料力学强度、抗冲、耐磨等各种基本性能的研究也较少。部分水下修复材料施工前的配制、拌合过程还必须在水面以上完成，增加了修复材料使用的难度，也大大限制了水下材料的适用工况。

在水下缺陷修复施工设备方面，主要包括液压钻、液压镐、液压切割机、液压链锯等工具，由设置在陆上的液压站通过传输管带动；水下灌浆采用陆上灌浆泵将灌填型浆料通过灌浆管输送到水下待灌部位。水下施工基本上都由潜水员完成清缝、开槽、钻孔、锚固、灌浆等各种操作。如德国VWEW-energie水电站水下缺陷修复时，由潜水员水下钻孔、连接注浆管，从地面注入FISEM环氧胶完成锚固工作；柬埔寨甘再水电站上游坝面渗漏修复（水下55m）、云南漫湾水电站水垫塘底板冲坑修复（水下42m）等都进行过类似人工作业<sup>[7-9]</sup>。在水下缺陷修复施工设备方面，麻省理工学院首先将水下机器人、声呐成像、激光扫描等手段与传统修复加固技术

相结合，实现精准的水下缺陷修复加固。国内基本形成了水下破损构件置换、水下表观薄层缺陷修补处理、水下冲磨蚀破坏修补处理及水下灌浆处理工艺。常规水下修复施工设备重量与体积较大，缺少专门用于水下作业的敷涂、灌浆等设备，处理工艺复杂，与潜水员潜水员水下作业模式和特点适配性差，修复工效低，修复效果难以保障。

#### 五、研究趋势

基于水利水电工程正常运行不停水工况条件及动水环境对水下修复材料性能的特殊要求，按照“理论机理研究→材料和工艺研发→设备研制→现场验证”的研究思路，研发复杂水域环境下水下混凝土裂缝修复加固成套技术，研发适用于裂缝水下封闭的敷涂嵌填型材料和灌填型高适配性、耐久性表里结合修复材料，并结合潜水员水下作业特点，研究适合潜水员水下修复作业的敷涂、灌填工艺及作业工具技术，提升水下施工设备和作业器具的适配性，研究制备、储存、输送与施工各阶段的高效修复处置工艺。

#### 参考文献

- [1] 高鑫, 熊建波. 水下修补灌浆技术研究进展[J]. 施工技术, 2015, 44(增刊): 372-376.
- [2] 包银鸿, 程红, 陆志华. 水下混凝土缺陷处理的工法研究—材料部分[J]. 大坝与安全, 2005(2): 21-28.
- [3] 张根全. 水工隧洞的渗漏与综合治理分析[J]. 智能城市, 2018, 15(7): 111-113.
- [4] 谭界雄, 王秘学, 等. 水库大坝水下加固技术[M]. 武汉: 长江出版社, 2015.
- [5] 许乾慰, 洪涛, 吴毅彬. 水下修复材料的研究进展[J]. 上海塑料, 2014, 1(165): 14-16.
- [6] 程雪军, 朱利春, 姜骏骏. 丹江口大坝加高溢流表孔水下封堵施工技术[J]. 南水北调与水利科技, 2013(5): 181-183.
- [7] R.V克利夫, 黄丽瑾, 许俊. 美国克利尔沃特坝坝基渗漏处理[J]. 水利水电快报, 2015, 36(2): 14-17.
- [8] 甘纯, 敬强, 卢志飞, 等. 基于水下机器人平台的海缆快速抢修的研究与实践[J]. 电力需求侧管理, 2016, 18(S1): 82-85.
- [9] 谭界雄, 田金章, 王秘学. 水下机器人技术现状及在水利行业的应用前景[J]. 工程建设与管理, 2018, 1(4): 44-46.