

弹性环氧砂浆材料抗冲磨性能研究与工程应用

邵晓妹^{1,2}, 李发权², 韩炜¹

(1. 长江水利委员会长江科学院 湖北武汉 430010; 2. 武汉长江科创科技发展有限公司 湖北武汉 430010)

摘要: 环氧砂浆涂层防护是提高水工建筑物抗冲磨性的有效途径之一。为改善普通环氧砂浆的抗冲磨性能, 选用高韧性环氧树脂、低放热固化剂、级配填料等原料, 制备出弹性环氧砂浆。比较了弹性环氧砂浆与其他环氧砂浆的力学性能, 采用SEM分析了弹性环氧砂浆的结构特点, 并介绍了该材料的工程应用实例。实践证明, 弹性环氧砂浆在消力池、水垫塘等大流量、高水头建筑物的抗冲磨防护方面表现优异, 具有良好的应用前景。

关键词: 水工建筑物, 抗冲磨性能, 弹性环氧砂浆, 工程应用

Research on Anti-abrasion Property of CW Elastic Epoxy Mortar and Engineering Application

Abstract: Epoxy mortar coating protection was one of the effective ways to enhance the abrasion resistance of hydraulic structures. In order to improve the anti-abrasion properties of ordinary epoxy mortar, CW elastic epoxy mortar was prepared by using high flexibility epoxy resin, low-heat curing agent, graded filler and other raw materials. The anti-abrasion properties of elastic and other epoxy mortar were compared, the structural characteristic of elastic epoxy mortar was analyzed by SEM, and the engineering application examples were introduced. The practice have proved that, the CW elastic epoxy mortar showed excellent performance in the anti-abrasion protection of buildings with large flow and high head, such as absorption basin and plunge pool, and it had great application prospect.

Key words: hydraulic structure, anti-abrasion property, elastic epoxy mortar, engineering application

0 引言

以溢洪道、泄洪隧洞、消力池、引水隧洞、渡槽等为代表的泄水和输水建筑物, 常处于水流快、流量大、水头高的服役环境。受推移质及气穴作用, 此类建筑物容易产生冲磨或气蚀破坏, 导致混凝土表面剥落, 甚至出现钢筋外露及锈蚀, 影响结构稳定和运行安全^[1]。

面对水工建筑物的冲磨气蚀难题, 当前的解决措施集中于两个方向: 一是采取配合比设计以增强混凝土抗冲磨性能, 如向混凝土中掺入塑性纤维^[2]、耐磨骨料^[3]、抗冲磨外加剂^[4]等; 二是研发抗冲磨材料体系用作混凝土表面防护涂层。其中, 高分子基抗冲磨材料具有综合性

能优良、施工较简便等优点^[5]，因而得到较多研究与应用。目前，高分子基抗冲磨材料以聚脲弹性体和环氧砂浆最为常见，如马宇^[6]等介绍了单组分聚脲抗冲磨材料在新疆高寒地区大坝溢流面的施工应用情况；冯菁^[7]等制备出脂肪族聚脲并成功应用于三峡大坝船闸闸墙；杨伟才和郝巨涛^[8]将增韧剂引入环氧树脂连续相中形成呈球形分散的“海岛结构”，使环氧砂浆磨损率大幅度降低；张达^[9]等研究了2种改性环氧砂浆在藏木水电站溢流坝段的修补及防护应用。同聚脲相比，在保证抗冲磨效果的前提下，环氧砂浆耐老化性能较优，环境适应性较强，使用经济性较好，因此环氧砂浆得到更为广泛应用，先后在葛洲坝^[10]、小浪底^[11]、新安江^[12]、二滩^[13]等水利水电工程中展现出良好效果，是一类理想的抗冲磨防护材料。

然而国内外工程实践表明，普通环氧砂浆用于抗冲磨防护尚存在韧性低、粘度高、变形差的问题，因此大规模推广应用还必须改性处理。对环氧树脂进行增韧增强是一种重要改性手段，虽然目前可见大量有关环氧增韧的研究^[14-16]，但是增韧处理一般会大幅削弱环氧树脂的粘接性能和抗压强度，而兼顾柔韧和强度的改性研究相对不足，已有研究也主要关注于调整环氧基体的聚集态、改变增韧粒子的界面相结构等，从分子结构角度进行改性设计的研究则较少。为进一步提高环氧树脂的韧性与强度，本文首先通过调控环氧树脂的分子结构来形成海岛结构环氧树脂，再选择改性固化剂和级配填料制备出兼具高韧性、高强度和低放热的弹性环氧砂浆抗冲磨材料，研究其性能与结构。然后将该材料应用于构皮滩、沙沱水电站等工程，取得了良好的缺陷修补与抗冲磨防护效果，同时也可类似工程处理提供参考借鉴。

1 材料制备

1.1 原材料

环氧树脂：改性双酚 A 型环氧树脂，保留主链结构，剪裁硬段以降低交联密度，引入含活性基团的柔性链段以提高柔韧性，使环氧树脂黏度降至 30~70 Pa·s（25 °C），在固化反应时活性基团可与环氧基团结合析出球形颗粒，形成分散于环氧连续相上的海岛结构。

固化剂：改性脂肪族伯胺，与常用固化剂的固化放热峰温度^[17]相比显著降低，见表 1。

填料：通过正交试验，选用 80 目~300 目金刚砂和纳米级石英砂进行级配。

表 1 弹性环氧砂浆固化剂与常用固化剂的固化放热峰温度对比

(Table 1 Comparison of heat release peak temperature between curing agent of elastic epoxy mortar and common curing agent)

固化剂种类	弹性环氧砂浆 固化剂	NE 环氧砂浆 固化剂	二乙烯三胺	羟烷基多胺	聚酰胺
-------	---------------	----------------	-------	-------	-----

放热峰温度/°C	108	105	250	190	125
----------	-----	-----	-----	-----	-----

1.2 制备方法

首先根据正交试验确定的原料配比，采用电子分析天平称取海岛结构环氧树脂、级配填料、偶联剂；然后在 GFJ-0.4 型高速分散机内慢速搅拌 5 min~10 min；其次加入助剂高速搅拌 3 min~6 min；再加入改性固化剂高速搅拌 4 min~8 min，即得到 CW 弹性环氧砂浆。

1.3 性能测试

力学性能测试：采用 AG-IC/100kN 型电子万能试验机和石英膨胀计，参照《环氧树脂砂浆技术规程》DL/T 5193-2004 和《胶粘剂 拉伸剪切强度的测定》GB/T 7124-2008 进行，检测项目包括：抗压强度、抗拉强度、粘结强度、拉伸剪切强度、断裂伸长率和线膨胀系数。

抗冲磨性能测试：采用 HKS 型高速水下钢球法冲磨试验机，参照《水工混凝土试验规程》SL352-2006“4.20”进行，待混凝土试件成型和养护完成后，在试件表面涂刮 10mm 厚环氧砂浆，然后进行抗冲磨试验。试验规程要求冲磨时间为 72h，考虑到 72h 无法比较各材料的抗冲磨性能差异，故分别在 3 个冲磨周期 72h、144 h 和 216 h 后，测定试件的质量损失。

显微形貌测试：选择冲磨试验前后的弹性环氧砂浆样品进行液氮处理，对样品断面喷金后，采用 S-570 型扫描电子显微镜观察断面显微形貌。

2 结果与分析

2.1 力学性能

普通、改性和弹性环氧砂浆的力学性能结果对比见表 2。

表 2 几类环氧砂浆力学性能对比

(Table 2 Comparison of mechanical properties about Several kinds of epoxy mortar)

材料种类	检测项目					
	拉伸剪切强度 (28d, MPa)	断裂伸长率 (%)	线膨胀系数 ($\times 10^{-6}/K, 25^{\circ}C$)	抗压强度 (28d, MPa)	抗拉强度 (28d, MPa)	粘接强度 (28d, MPa)
普通环氧砂浆	11.0	1.3	18.9	82.3	11.9	4.3
改性环氧砂浆*	14.5	9.4	13.0	105.3	13.8	3.6
CW弹性环氧砂浆	22.0	18.0	9.2	78.5	12.9	4.5

*改性环氧砂浆力学性能数据来自文献[18]

由表2可知，与普通和改性环氧砂浆相比，弹性环氧砂浆的拉伸剪切强度和断裂伸长率大幅提高，拉伸剪切强度分别增长了100%、52%，断裂伸长率分别增长至14倍、2倍；线膨胀

系数显著减小,且与混凝土的(8~12×10⁶/K)接近;抗压强度有所降低,分别降低了4.6%、25.4%,但仍远高于常见抗冲磨混凝土50~70 MPa的设计强度;3种环氧砂浆的抗拉强度和粘接强度较为接近。检测结果表明,CW弹性环氧砂浆在保证强度的同时,柔韧性得到提高。

2.2 抗冲磨性能

弹性环氧砂浆抗冲磨试验效果见图1,3种环氧砂浆的抗冲磨性能结果见表3。

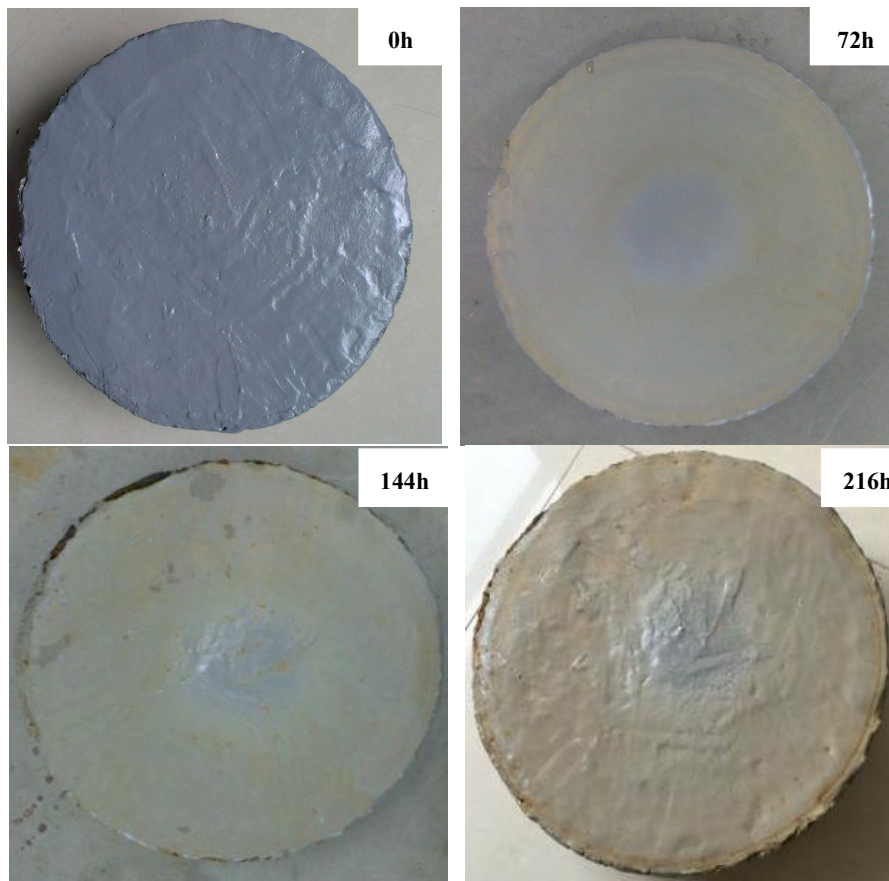


图1 弹性环氧砂浆抗冲磨试验效果图

(Graph 1 The rendering of Impact wear test about CW Elastic epoxy mortar)

表3 环氧砂浆抗冲磨性能对比

(Table 3 Comparison of impact wear resistance about epoxy mortar)

材料种类	损失量(g)				抗冲磨强度(h/(kg/m ²))			
	0h	72h	144h	216h	0h	72h	144h	216h
普通环氧砂浆	0	73.90	113.00	183.90	0	47.4	46.5	47.6
改性环氧砂浆*	0	69.18	/	/	0	75.0	/	/
弹性环氧砂浆	0	42.61	66.10	103.40	0	82.5	79.9	82.1

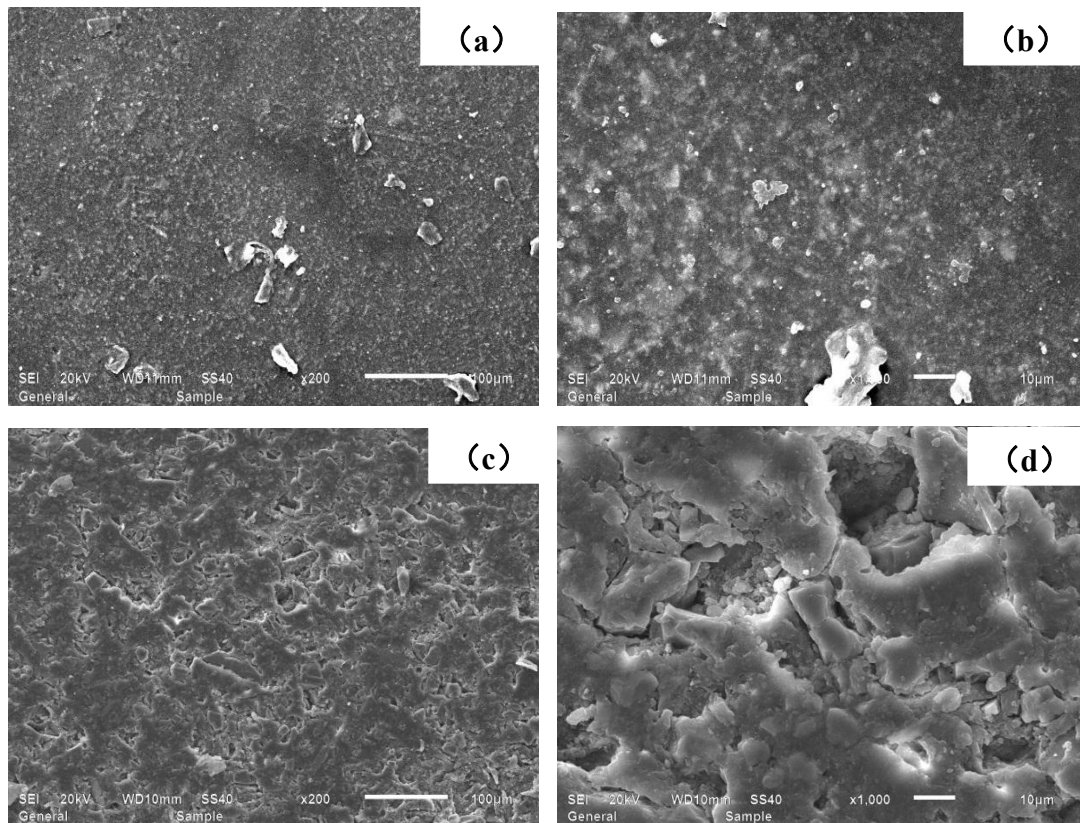
*改性环氧砂浆力学性能数据来自文献[18]

图1表明,随着冲磨时间增加,混凝土试件表面的抗冲磨防护涂层颜色逐渐变深,即涂层磨损逐渐加重。冲磨72h后,涂层表面平整,无裂缝、凹坑等缺陷,仅边缘存在少量破损;冲

磨144h后，涂层表面出现少量凹坑，边缘破损增多；冲磨216h后，涂层表面变为凹凸不平。表3结果表明，抗冲磨测试结果与试验效果图具有一致性，在冲磨72h后，弹性环氧砂浆磨损较普通环氧砂浆降低40.5%，较改性环氧砂浆降低38.4%，抗冲磨强度提高72.4%；冲磨216h后质量损失率仅为0.08%，216 h抗冲磨强度可达82.05 h/(kg/m²），远远大于普通环氧砂浆。

2.3 显微形貌

弹性环氧砂浆冲磨试验前及累计冲磨 216h 后的 SEM 图片如图 2 所示。



(a) 冲磨前 ×200, (b) 冲磨前 ×1000, (c) 冲磨后 ×200, (d) 冲磨后 ×1000

图 2 弹性环氧砂浆冲磨试验前后 SEM 图像

(Graph 2 The SEM images before and after impact grinding test of CW Elastic epoxy mortar)

图 2 表明，冲磨前弹性环氧砂浆较为光滑平整，冲磨后结构发生形变，出现较多褶皱界面与少量凹坑，但整体仍紧密结合，呈现较为完整的连续相，说明弹性环氧砂浆抗冲磨材料具有较好的抗冲磨性能，能够很好地抵御冲磨破坏。从图 2 (a) 和 (b) 中可以看出，冲磨试验前，浅色的球形颗粒（尺寸约为 5~10 μm）均匀分散于深色的环氧树脂连续相上形成海岛结构，此外连续相上还可可见少量板状填料晶体分布，晶体尺寸约为 10~30 μm。从图 2 (c) 和 (d) 中可知，冲磨试验后，弹性环氧砂浆断面增多，环氧树脂相和球形颗粒相均发生褶皱形变且出现韧窝结构，裂纹呈多向发展，填料晶体消失。分析抗冲磨机理如下：在推移质的

冲击、切削等外力作用下，弹性模量相对较小的球形颗粒及填料诱发环氧树脂基体产生褶皱、裂纹、韧窝等塑性形变，褶皱界面会经历扩展、受阻、转向和再扩展的循环过程，界面数量越多表面积越大，形变所吸收消耗的能量就越大，宏观表现为材料体系的韧性提高、抗冲磨强度增强。

3 工程应用实例

3.1 贵州乌江构皮滩水电站水垫塘修复处理工程

贵州乌江构皮滩水电站水垫塘采用平底板封闭抽排结构型式，横断面为复式梯形，净长约 332m，标准断面底宽 70m，底板高程 420m~412m。水垫塘为钢筋混凝土结构，430m 高程以下表面 50cm 厚为 C50 抗冲磨混凝土，其余为 C25 混凝土。大坝蓄水运行后，水垫塘底板和边墙易冲磨部位水损严重，施工内容主要包括水垫塘底板冲磨部位修补、底板和边墙交角掏槽处修补、边墙底部磨蚀处理、裂缝处理等。

采用弹性环氧砂浆对底板和边墙进行了修复及防护处理。该工程于 2015 年 2 月开工，历时 50 余天，共计完成工程量 4278m²。由于大面积修补，处理时分区进行修补，分区施工有利于避免环氧砂浆或胶泥的收缩及固化发热膨胀引起环氧砂浆层自身开裂和空鼓。分块边长控制在 3m 以内，施工块间应预留 30mm~50mm 的间隔缝，待固化 1d~2d 后再将间隔缝。用改性环氧砂浆或环氧胶泥填补密实处理后的环氧砂浆防护涂层平整致密，涂层与混凝土基体粘结牢固，结合试验室抗冲磨试验结果显示冲磨 216h 后质量损失率仅为 0.08%，216h 抗冲磨强度高达 101h/(kg/m²)，同时显著改善了水垫塘的渗漏状况，修复完成后，水垫塘无渗漏。确保水垫塘于 2015 年汛前正常使用，保障了构皮滩电站安全度汛工作。

3.2 贵州乌江沙沱水电站泄洪消能过流面修复施工

贵州乌江沙沱水电站泄洪建筑物布置在河床中部主河道上，采用宽尾墩与消力池联合运用的消能方式。消力池护坦顺下游河道布置，护坦长度为 100m，宽 135m，护坦开挖高程 282m~284m，护坦顶高程 287m。大坝蓄水运行后，消力池等过流面部位出现裂缝、冲坑、磨蚀等缺陷。施工内容主要包括泄洪消能过流面表面清理、消力池冲坑消缺处理、磨蚀处理、各类铅直孔的封堵、消力池结构缝及止水修复、裂缝处理和养护等。

采用弹性环氧砂浆对过流面裂缝、结构缝以及消力池底板等部位进行了修复及防护处理。该工程于 2015 年 3 月进场，施工期 1 个月，完成修复面积 1200m²。在修补区与未修补区底板之间，涂抹的环氧砂浆材料连接平滑、流畅，且严格控制了修补区的高程与平整度及与未修补区的连接，当表面不平整度超过 5 mm 时，采用 1:20 的斜坡平顺连接。性能优异的材料

配套合理的工艺，2015年5月泄洪过流面及消力池验收合格后投入使用，2年服役后的质量回访表明，修复部位没有出现环氧砂浆层破损、磨蚀、鼓胀或脱落等情况，至今仍保持良好运行。

4 结论

(1) 针对水工建筑物的抗冲磨防护需求，选用高韧性海岛结构环氧树脂、低放热改性固化剂、级配耐磨填料等制备出弹性环氧砂浆。

(2) 弹性环氧砂浆抗冲磨性能优异，其中28d拉伸剪切强度为22.0MPa，断裂伸长率为18.0%，线膨胀系数与混凝土的一致，216h抗冲磨强度可达82.1 h/(kg/m²)。

(3) 弹性环氧砂浆在构皮滩水电站水垫塘、沙沱水电站消力池等工程中的应用效果表明，该材料有效减缓混凝土磨蚀破坏，是水工混凝土缺陷修补及抗冲磨防护的理想材料。

参考文献

- [1] 张振忠, 陈亮, 汪在芹, et al. 水工泄水建筑物抗冲磨材料发展现状[J]. 化工新型材料, 2016(10):230-232.
- [2] 陈国新, 祝焯然, 杜志芹, et al. 塑钢纤维对水工抗冲磨混凝土性能的影响研究[J]. 混凝土, 2011(5):47-49.
- [3] 董芸, 杨华全, 肖开涛, 等. 不同骨料对抗冲耐磨混凝土性能的影响[J]. 混凝土, 2013(12):82-86.
- [4] 管惠领. HF 高强耐磨混凝土配合比设计及其应用[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2011, 32(6):51-54.
- [5] 徐雪峰, 白银, 余熠. 水工泄水建筑物抗冲耐磨高分子护面材料综述[J]. 人民长江, 2012(S1):181-183+202.
- [6] 马宇, 任亮, 冯启, et al. 单组分聚脲材料在寒冷地区某大坝溢流面防护中的应用[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2017(1).
- [7] 冯菁, 韩炜, 李珍, 等. 新型聚脲混凝土保护材料开发及工程应用研究[J]. 长江科学院院报, 2012, 29(2):64-67.
- [8] 杨伟才, 郝巨涛. "海岛结构"环氧砂浆抗冲磨性能试验研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2006, 4(4).
- [9] 张达, 崔同欢, 肖承京, 陈亮, 汪在芹. CW 改性环氧砂浆在西藏地区抗冲磨防护中的应用[J]. 长江科学院院报, 2015, 32(11):102-104.
- [10] 孙家浚. 葛洲坝二江泄水闸维修材料研究[J]. 人民长江, 1989(3):12-17.
- [11] 张涛, 徐尚治. 新型环氧树脂砂浆在水电工程中的应用[J]. 热固性树脂, 2001, 16(6):26-28.
- [12] 买淑芳, 陈肖蕾, 姚斌. 环氧砂浆涂层老化状况研究与弹性环氧材料的开发[J]. 大坝与安全, 2004(5).
- [13] 万雄卫, 李北星, 闵四海, 等. JME 改性环氧砂浆抗冲磨修补材料的研究与应用[J]. 施工技术, 2007, 36(5):94-96.
- [14] 陈兵, 王晓洁, 王喜占. 环氧树脂增韧改性研究进展[J]. 中国胶粘剂, 2017(2):55-58.

- [15] 徐雪峰, 蔡跃波. 新型纳米 Al₂O₃/ZrO₂ 抗冲磨面层涂料的研究[J]. 新型建筑材料, 2011, 38(5):63-65.
- [16] 樊勋, 张广成, 李建通,等. CTBN 增韧环氧树脂微孔发泡研究[J]. 工程塑料应用, 2017, 45(4):53-58.
- [17] 陈平, 刘胜. 环氧树脂[M]. 北京: 化学工业出版社,1999.
- [18] 邝亚力, 谭雪松, 韩炜,等. 新型环氧树脂抗冲磨材料的研究与施工工艺[J]. 化工新型材料, 2016(10):225-226.

基金项目: 国家自然科学基金“涂层材料与混凝土界面老化机理研究”(51579019)

武汉市高新技术产业科技创新团队计划项目(2016070204020166)

作者简介: 邵晓妹(1981—), 女, 江苏沛县人, 高级工程师, 主要从事水工新材料的研发及推广应用。E-mail: 409500448@qq.com。