

文章编号:1672-3031(2020)02-0149-06

SK-PAM特种抗冲磨树脂砂浆材料工程特性研究

杨伟才^{1,2}, 鲍志强², 孟川²

(1. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038; 2. 北京中水科海利工程技术有限公司, 北京 100038)

摘要: 本文针对目前常用的薄层抗冲磨防护材料难以抵抗高速水流推移质磨蚀破坏难题, 以柔性氨基树脂材料和特种固化剂为胶结体系, 添加抗冲磨填料, 研发了一种新型抗冲磨树脂砂浆材料。并对新型树脂砂浆进行了力学性能、冲磨能力和环境适应性试验, 试验结果表明砂浆伸长率在5%以上, 与基面黏接强度大于2.5MPa, 表明其具有良好的抗裂能力和适应变形的能力; 水下钢球法冲磨试验3个周期质量基本没有损失, 同等条件下圆环法冲磨对比试验证明其抗冲磨强度是高强环氧砂浆的5倍以上, 证明新型抗冲磨树脂砂浆具有高弹韧性的材料特性, 适用于泄水建筑物的抗冲磨、特别是推移质破坏的防护和修复。

关键词: 泄水建筑物; 抗冲磨; 推移质; SK-PAM特种抗冲磨树脂砂浆

中图分类号: TV431

文献标识码: A

doi: 10.13244/j.cnki.jiwhr.2020.02.010

1 研究背景

水利水电工程泄水建筑物易遭受高速含砂水流冲磨和空蚀破坏, 严重影响泄水建筑物的寿命和正常工作。随着西南地区一批高水头、大流量高坝的建成, 泄水建筑物表面抗高速水流冲磨和空蚀的破坏问题越来越受到重视, 另外反复修补发生冲磨破坏的水工泄水建筑物也会消耗大量的人力和财力, 因此性能良好的抗冲磨材料对水工泄水建筑物的安全服役运行有重大工程和经济价值。

通常高速挟沙水流的磨蚀介质主要分为悬移质与推移质两种存在形式, 其对水工建筑物的磨损机理也不尽相同。悬移质泥沙以悬浮状态随水流运动, 由于颗粒细小, 在高速水流中往往会得到充分掺混而与水保持相近的运动速度, 因此, 悬移质泥沙对过流建筑物的磨损一般比较均匀, 表现为磨损、切削和冲撞, 磨损部位往往是整个过流边界。推移质对水工建筑物的磨损破坏除具有与悬移质类似的磨损切削作用外, 在高速水流的作用下还具有相当的撞击作用。在高速水流作用下, 推移质以滑动、滚动及跳跃等方式在过流面上运动, 对水工建筑物过水面混凝土产生冲击和摩擦两种作用, 并且冲击破坏的能量较大, 产生较高的接触应力, 而当局部拉应力达到混凝土本身断裂极限时, 微细裂纹便会产生或扩展, 使得表层混凝土脱落。其磨损破坏作用的大小取决于流速、流态以及推移质数量、粒径、硬度、运动方式等多方面因素的影响, 还与过流时间、建筑物体型、材料的抗冲耐磨性能有关。由于重力作用的影响, 推移质对水工建筑物的磨损破坏往往以底部较为严重。

针对悬移质磨蚀问题, 目前常用砂浆和抗冲蚀涂层进行防护, 如环氧砂浆、丙乳砂浆、环氧胶泥和聚脲涂层等材料, 并取得了良好的效果^[1-3]。但对于推移质的冲磨破坏问题, 由于传统的抗冲磨材料如高强混凝土、环氧砂浆、聚合物砂浆等属于脆性材料, 难以抵抗推移质的冲击, 一直没有得到根本的解决, 严重影响泄水建筑物混凝土结构的服役寿命和水利水电工程的运行安全。长期应用实践使人们逐渐认识到: 对于推移质破坏, 冲磨修补材料不能一味追求高强度, 而应在保证一定强度的情况下, 提高材料的弹韧性, 使之能较好地吸收冲击能量, 并能抵抗磨蚀介质的切割、磨损破坏。本文充分利用现代材料科学发展的新成果和新技术, 以新型柔性天冬氨基树脂及专用固化剂为胶结材料, 研发出一种新型高韧性高抗冲磨材料——SK-PAM特种抗冲磨树脂砂浆, 以满足当前及

收稿日期: 2018-08-29

基金项目: 中国水科院基础创新团队项目(SM0145B632017)

作者简介: 杨伟才(1979-), 高级工程师, 主要从事水利水电工程修补加固技术与材料研究。E-mail: 36472323@qq.com

今后兴建高坝大库对高性能抗冲耐磨材料的需求。

2 SK-PAM 特种抗冲磨树脂砂浆材料

2.1 SK-PAM 特种抗冲磨树脂基液性能 SK-PAM 特种抗冲磨树脂砂浆基液采用复合改性仲氨基树脂为 A 组分、以脂肪族异氰酸酯为固化剂 B 组分。表 1 为基液物理力学性能指标，SK-PAM 抗冲磨树脂浆材具有优异的物理力学性能，其拉伸强度超过 15 MPa，伸长率达 250% 以上，具有优异的柔韧性；在 -40℃ 低温条件下仍具有很好的柔韧性，与混凝土基面黏接性能良好，完全不同于传统的环氧砂浆和聚合物砂浆等脆性材料。

表 1 SK-PAM 抗冲磨树脂浆材基液物理力学性能

项目	拉伸强度/MPa	断裂伸长率/%	撕裂强度/(N/mm)	低温弯折性/℃	黏接强度/MPa	硬度(邵 A)
性能指标	≥15	≥250	≥70	≤-40	≥2.5 或基材破坏	≥80

2.2 SK-PAM 特种抗冲磨树脂砂浆的制备 SK-PAM 特种抗冲磨树脂砂浆是以柔性氨基树脂、特种固化剂为胶结浆材，添加砂、粉料、助剂等抗冲磨填料混合配制而成的一种新型高韧性抗冲磨树脂砂浆，兼具高柔韧性和一定的硬度，既能够吸收磨蚀材料的冲击能量，又具有很强的抗磨蚀能力。其制备方法如下：(1) 先将砂、粉料、助剂等填料按比例拌合均匀；(2) 按配比配制氨基树脂浆液；(3) 将配制好的氨基树脂浆液按填料重量的 25% ~ 35% 与上述填料混合，拌合均匀，即可得到 SK-PAM 特种抗冲磨树脂砂浆。

本文对制备的 SK-PAM 特种抗冲磨树脂砂浆进行了物理力学性能试验，并与环氧砂浆进行抗冲磨对比试验，以验证 SK-PAM 特种抗冲磨树脂砂浆的抗冲磨性能和环境适应能力。

3 试验方法与设备

3.1 拉伸强度和伸长率测试 拉伸试验参照 SL352-2006《水工混凝土试验规程》^[5] 中的水泥砂浆轴向拉伸试验的试验尺寸和拉伸试验器具，待砂浆试件到达 28 d 试验龄期后进行拉伸试验。试验中，记录试件从开始到破坏过程的延伸情况，记录试件破坏时的荷载，取最大拉伸强度时的伸长值计算伸长率，即伸长率为最大轴向拉伸强度时的伸长率。

3.2 抗压抗折强度试验 抗压试验参照 SL352-2006《水工混凝土试验规程》^[5] 中的水泥砂浆抗压强度试验的试验尺寸和抗压试验器具，试模使用 40 mm×40 mm×160 mm 的三联试模，待砂浆试件到达 28 d 试验龄期后进行抗压和抗折试验，使用受压面积为 40 mm×40 mm 的抗压夹具，采用 0.5 MPa/s 的加荷速度。记录试件的抗压强度，若试件压缩至 50% 尚未破坏，则记录该点的抗压强度。

3.3 黏接强度试验 为验证 SK-PAM 特种抗冲磨树脂砂浆适应现场环境的能力，黏接强度试验分别进行了常温条件黏接试验和高温水浴黏接强度测试。试验参考 DL/T5126-2001《聚合物改性水泥砂浆试验规程》中砂浆黏接抗拉强度试验的方法，预先浇筑成型混凝土 (C40) 试块，混凝土试块达到 28 d 龄期，表面清洗晾干后铺筑高弹性修补砂浆，成型砂浆厚度约 2 cm，28 d 龄期后粘贴 40 mm 圆形钢标准块进行拉拔试验，采用 J-10 型碳纤维黏接强度检测仪测定该砂浆材料与混凝土的黏接强度。

高温水浴黏接强度测试是将 SK-PAM 特种抗冲磨树脂砂浆粘接强度试件放置于 60℃ 恒温水浴箱内 7 d，然后取出晾干，粘贴 40 mm 圆形钢标准块进行黏接强度试验。

3.4 低温冻断对比试验 为验证 SK-PAM 特种抗冲磨树脂砂浆的抗低温开裂性能，参照 DL/T 5362-2006《水工沥青混凝土试验规程》中沥青混凝土的冻断试验进行了 SK-PAM 特种抗冲磨树脂砂浆和环氧砂浆材料的低温冻断对比试验。冻断试验是将整个冻断试验机置于高低温试验箱中，试验时高低温试验箱温度从 20℃ 开始，以 30℃/h 的速率降温，冻断试验机通过数据采集系统监测砂浆试件在降温过程中的收缩位移，并通过电机进行补偿，控制整个试验过程中冻断试件不发生收缩位移。

在此过程中, 试件中应力不断增长, 达到一定值时, 砂浆试件开裂, 此温度即为砂浆的冻断温度。

3.5 抗冲磨对比试验 抗冲磨性能试验参考 SL352—2006《水工混凝土试验规程》^[5] 中水下钢球法和圆环法两种方法进行了抗冲磨试验, 水下钢球法试验冲磨试件采用已经测试过的混凝土试件, 将试件基面冲洗干净并晾干, 然后在试件上浇筑厚约 2 cm 的 SK-PAM 特种抗冲磨树脂砂浆, 室温养护 28 d 后进行冲磨试验。根据规程要求, 72 h 为 1 个试验周期, 共试验了 3 个周期。

采用圆环法进行了 SK-PAM 特种抗冲磨树脂砂浆和环氧砂浆抗冲磨对比试验, 试验采用的 SK-PAM 特种抗冲磨树脂砂浆和环氧树脂砂浆的配比均为浆材: 填料=1:3。试验首先成型混凝土圆环试件(内径预留 2 cm), 然后再浇筑 SK-PAM 特种抗冲磨树脂砂浆和环氧树脂砂浆将内径恢复, 试件达到 28 d 龄期后, 按照规程试验方法进行冲磨试验。

4 试验结果分析

4.1 拉伸强度和伸长率试验结果分析 拉伸强度和伸长率是表征抗冲磨材料柔韧性和抗开裂能力的重要指标。表 2 是 SK-PAM 特种抗冲磨树脂砂浆的拉伸强度和伸长率试验结果, 从表 2 可以看出, SK-PAM 特种抗冲磨树脂砂浆拉伸强度 5.5 MPa, 试验配比下砂浆伸长率可达 5.7%, 根据工程需要, 通过调整砂浆配比, 其最大伸长率可达 10% 以上, 表明特种抗冲磨砂浆属于柔韧性材料, 具有较强的适应协调变形能力, 不容易发生开裂、脱空等问题。

表 2 SK-PAM 特种抗冲磨树脂砂浆拉伸强度和伸长率试验结果

试样编号	拉伸强度/MPa	伸长率/%	平均拉伸强度/MPa	平均伸长率/%
TDM-1	5.6	5.4		
TDM-2	5.4	5.7	5.5	5.7
TDM-3	5.4	6.7		

4.2 抗压抗折强度试验结果分析 表 3 是 SK-PAM 特种抗冲磨树脂砂浆抗压和抗折试验结果, 从表 3 的抗压抗折试验结果可以看出, 试验配比条件下的 SK-PAM 特种抗冲磨树脂砂浆抗压强度可达 20 MPa, 抗折强度为 11.9 MPa。图 1 为抗压试验破坏形态, 从图 1 可以看出, SK-PAM 特种抗冲磨树脂砂浆在受压条件下, 砂浆本体产生压缩变形, 直到超过最大受力能力发生破坏, 但砂浆本体并没有发生剥落, 说明 SK-PAM 特种抗冲磨树脂砂浆具有优异的柔韧性能。图 2 为抗折试验破坏形态, 从图 2 可以看出, 抗折试验时试件逐渐从底部逐渐向上裂开, 破坏形式表现为韧性破坏。

表 3 SK-PAM 特种抗冲磨树脂砂浆抗压和抗折试验结果

试样编号	抗折强度/MPa	平均抗折强度/MPa	抗压强度/MPa	平均抗压强度/MPa	压折比
TDM-1	12.0		19.9		
TDM-2	11.9	11.9	20.4	20.2	1.7
TDM-3	11.9		20.3		

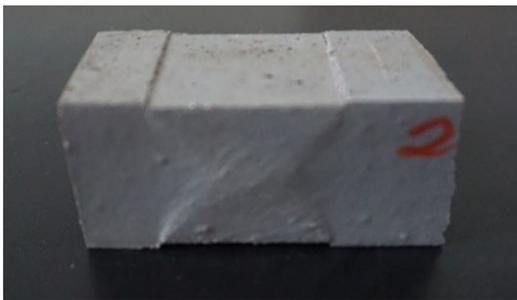


图 1 特种抗冲磨砂浆抗压试验破坏形态



图 2 特种抗冲磨砂浆抗折试验破坏形态

4.3 基面黏接强度试验结果分析 在大坝溢流面等位置，在夏季由于受太阳直射，地面温度最高可达 50 ℃以上，对薄层材料与基面的黏接能力是严峻的考验，薄层修补材料容易发生脱空、翘起等破坏，因此，采用高温水浴试验，检验特种抗冲磨砂浆抗高温黏接能力。表 4 为特种树脂砂浆在常温和高温水浴后的黏接强度测试结果，试验结果表明，高弹性修补砂浆与混凝土黏接强度最高可达 3.8 MPa，平均黏接强度为 3.6 MPa，高温水浴后黏接强度仍达 3.3 MPa。图 3 和图 4 分别为常温和高温水浴后黏接试验，从图 3、图 4 可以看出，拉拔试验的破坏形式均为内聚破坏，说明 SK-PAM 特种抗冲磨树脂砂浆与混凝土的黏结强度大于混凝土的抗拉强度，具有良好的环境适应能力，可以应用在混凝土缺陷的修补中。

表 4 SK-PAM 特种抗冲磨树脂砂浆黏接强度试验结果

试样编号	状态	黏接强度/MPa	平均黏接强度/MPa	断裂部位
TDM-1	常温	3.5	3.6	混凝土基面
TDM-2		3.8		
TDM-3		3.6		
TDM-4	高温水浴后	3.1	3.3	混凝土基面
TDM-5		3.3		
TDM-6		3.6		



图 3 常温成型黏接试验



图 4 55℃高温水浴后黏接试验

4.4 低温冻断对比实验结果分析 表 5 为 SK-PAM 特种抗冲磨树脂砂浆冻断试验结果。从表 5 可以看出，SK-PAM 特种抗冲磨树脂砂浆的低温冻断温度达 -42 ℃，而环氧砂浆的平均冻断温度只有 -15 ℃，说明 SK-PAM 特种抗冲磨树脂砂浆具有优异的低温抗裂性能。

表 5 SK-PAM 特种抗冲磨树脂砂浆冻断试验结果

材料名称	冻断温度/℃	平均值/℃	冻断应力/MPa	平均值/MPa
SK-PAM	-38.3	-42.3	5.2	6.2
	-42.5		6.7	
	-46.1		6.6	
环氧砂浆	-15.6	-15.0	12.80	12.3
	-14.4		11.7	

4.5 抗冲磨对比试验结果分析 现有的评价抗冲磨混凝土的试验方法中，水下钢球法主要模拟水流挟带着推移质及类推移质对底板及其他由混凝土浇筑部位的磨损破坏，圆环法抗冲磨测试侧重模拟含砂水流即悬移质对混凝土的冲磨破坏。为了探究 SK-PAM 特种抗冲磨树脂砂浆抵抗推移质破坏的能力，本文首先采用水下钢球冲磨试验机进行了 3 个周期的试验，试验结束后测量试件的质量损失基本为零，说明特种抗冲磨砂浆材料具有极强的抗推移质破坏能力。

表6 SK-PAM 特种抗冲磨树脂砂浆与环氧砂浆抗冲磨对比试验

试样	平均磨蚀量/g	抗冲磨强度/(h/(kg·m ²))
环氧砂浆	1006	0.93
SK-PAM 特种抗冲磨树脂砂浆	182	5.26



图5 高强环氧砂浆圆环法试验后冲磨情况



图6 SK-PAM 特种抗冲磨树脂砂浆抗冲磨试验后冲磨情况

由于水下钢球法无法有效测试特种树脂砂浆的冲磨强度，为了进一步测试抗冲磨砂浆的冲磨能力，并与环氧砂浆进行对比，本文又采用圆环法(40 m/s 流速)对SK-PAM 特种抗冲磨树脂砂浆和环氧砂浆进行了对比试验(表6)。表6结果表明，在同等条件下，SK-PAM 特种抗冲磨树脂砂浆的抗冲磨强度是高强环氧砂浆的5倍以上。图5是环氧砂浆冲磨后的形态，从图5可以看出，环氧砂浆被冲出很深的凹槽，表现出典型的悬移质微切削破坏形式。图6是特种抗冲磨砂浆冲磨后的形态，从图6可以看出，只是表面均匀的被磨损掉一层，圆环中部砂浆表面还比较完整，圆环法试验进一步证明特种抗冲磨砂浆具有优异的抗冲磨能力。

5 工程现场试验

为论证SK-PAM 特种抗冲磨树脂砂浆的主要力学性能和施工性能，研究施工工艺，确定各项主要施工技术参数，2018年5月在黄河刘家峡水电站溢洪道进行了现场试验，刘家峡水库溢洪道长期遭受高速水流和冻融破坏，底板混凝土局部发生冲磨破坏，破坏深度平均在3~5 cm左右(图7)，试验选择冲蚀较严重的部位，共修复破损混凝土30 m²(图8)。具体施工工艺流程为：(1)对泄流底板磨蚀破坏的混凝土基面凿毛处理，深度在3~5 cm左右；(2)高压水枪清洗基面；(3)基面干燥后涂刷专用界面剂；(4)然后涂刷一遍特种抗冲磨树脂基液；(5)浇筑SK-PAM 特种抗冲磨树脂砂浆并抹面找平，自然养护14 d。



图7 刘家峡溢洪道底板现状



图8 浇筑SK-PAM 特种抗冲磨树脂砂浆

2018年夏季刘家峡水电站遭受近30年以来最大洪水的考验，溢洪道泄洪流量达1800 m³/s，持续时间长达30余天，SK-PAM 特种抗冲磨树脂砂浆完好无损(图9)，抗高速水流冲磨效果良好。



图9 特种砂浆经历泄洪冲磨后情况

6 结语

本文针对水利水电工程存在的泄洪建筑物冲磨防护难题, 深入分析高速水流作用下推移质及悬移质对水工混凝土磨蚀破坏机理, 以柔性氨基树脂材料和特种固化剂为胶结体系, 添加抗冲磨填料, 研发了新型抗冲磨树脂砂浆材料, 并对新型树脂砂浆进行了力学性能、冲磨能力和环境适应性试验, 试验表明该材料抗压强度大于 20 MPa, 低温冻断温度达 $-42\text{ }^{\circ}\text{C}$, 抗冲磨强度可达 $5.2\text{ h}/(\text{g}/\text{cm}^2)$, 同等条件对比试验证明其抗冲磨强度是高强环氧砂浆的 5 倍以上, 低温冻断温度达 $-42\text{ }^{\circ}\text{C}$, 说明 SK-PAM 特种抗冲磨树脂砂浆具有高韧性和高抗冲磨的材料特性。刘家峡溢洪道现场试验表明其抗冲磨效果好, 适用于泄水建筑物的抗冲磨、特别是推移质破坏的防护和修复, 也可应用于混凝土结构的抗冻融保护及破坏后的修复。

参 考 文 献:

- [1] 陈改新. 高速水流下新型高抗冲耐磨材料的新进展[J]. 水力发电, 2006, 32(3): 56-59.
- [2] 杨伟才. 环氧砂浆的增韧及其抗冲磨性能的实验研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2005.
- [3] 王红强, 张光碧. 水工建筑物冲磨和空蚀破坏机理及其防治对策[J]. 云南水力发电, 2008, 24(2): 89-92.
- [4] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T16777-2008, 建筑防水涂料试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [5] 中华人民共和国水利部. SL352-2006, 水工混凝土试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.

Research on engineering characteristics of SK-PAM special anti-abrasion resin mortar material

YANG Weicai^{1, 2}, BAO Zhiqiang², MENG Chuan²

(1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;

2. Beijing IWHR-KHL Co., Ltd, Beijing 100038, China)

Abstract: This paper aim at the problem of abrasion damage by bed load in high-speed flow, based on the flexible amino resin material and special curing agent for cement system, adding anti abrasion fillers, developed a new type of special abrasion resistant resin mortar material. And tested the mechanical properties, abrasion resistance and environmental adaptability, results show that the elongation of mortar is over 5%, and the base bonding strength is greater than 2.5MPa. It shows that the mortar material has good crack resistance and deformation adaptability. The comparative test of ring abrasion shows that its abrasion resistance is 5 times of the high strength epoxy mortar. It proved that the new abrasion resistant resin mortar has the material characteristics of "combining rigidity with flexibility", suitable for the protection and repair of abrasion resistance for drainage structures, especially for bedload damage.

Keywords: sluice structure Abrasion resistance Bed load SK-PAM Special anti-abrasive resin mortar

(责任编辑: 王冰伟)