

聚氨酯复合树脂砂浆在龙口水利枢纽排沙钢管内的应用

赵鹏亮 薛楠

黄河万家寨水利枢纽有限公司 山西 太原 030000

摘要：本文结合龙口水利枢纽排沙钢管内聚氨酯复合树脂砂浆抗冲磨涂层施工的工程实例，详细阐述了聚氨酯复合树脂砂浆的材料性能、施工工艺及质量控制等方面内容，并就实施效果进行总结和分析，验证了此材料在龙口水利枢纽应用的有效性和可靠性，为枢纽后续排沙钢管内抗冲磨涂层的施工提供实践经验，同时为同类型钢管抗冲磨涂层施工提供了参考借鉴。

关键词：龙口；排沙洞；抗磨涂层；聚氨酯复合树脂砂浆抗

引言

龙口水利枢纽共设有9孔排沙洞，布置于5#-10#坝段，承担着重要的排沙任务，是枢纽泄水建筑物的重要组成部分，其洞内结构的可靠性直接影响到枢纽是否能够安全稳定运行。

每年排沙期钢管内均需经高流速、高含沙、长历时过流运行，随着使用年限的增长及历年泄水排沙运行冲刷，排沙钢管内壁存在抗磨涂层大面积脱落、焊缝气蚀、管壁锈蚀等缺陷，钢管内壁缺陷可能影响排沙系统设备安全，对枢纽安全稳定运行造成不利影响^[1]。因此，为了消除排沙系统设备安全隐患，保证枢纽安全稳定运行，及时进行钢管内壁抗冲磨涂层施工是非常必要的。

1 抗冲磨涂层材料的选择

龙口水利枢纽排沙钢管运行工况较为恶劣，运行时长期受到水流冲刷、泥沙磨损以及水介质中的腐蚀性物质侵蚀，为保证抗冲磨涂层的可靠性，选用材料须具有较好的抗冲磨性能、抗气蚀性能，同时与基材具有良好的粘接性能，综合对比市面上主流的抗冲突涂层材料，经过认真比选，最终选定聚氨酯复合树脂砂浆。

聚氨酯复合树脂砂浆为黄科院自主研发的专利产品（专利号：201010537740.0），由高抗磨蚀聚氨酯弹性体材料、弹性环氧树脂、固化剂、硬金属粉、棕刚玉、耐水剂等组成，在环氧砂浆的基础上对环氧树脂进行改性，选用抗冲击性好的固化剂，提高环氧树脂剥离强度并降低其脆性，利用聚氨酯材料较强的抗气蚀性能，将其复合到环氧砂浆上，形成聚氨酯复合树脂砂浆耐磨涂层，该涂层除抗磨性能比环氧砂浆涂层大大提高外，还克服了环氧砂浆抗气蚀性能差的缺点，满足现场实际工况要求^[2]。

为确定抗冲磨涂层材料实施效果能否可满足现场要求，检验材料是否适应枢纽实际运行工况条件，决定选

取2#排沙钢管出口段进行试验性施工，涂抹聚氨酯复合树脂砂浆厚度4mm，施工面积为285m²，为排沙洞后期整体抗冲磨涂层处理提供实践支撑。

2 施工工艺要求

2.1 材料技术指标

聚氨酯复合树脂砂浆的力学性能指标如下表1所示：

表1 复合树脂砂浆力学性能指标

项目	单位	指标
抗压强度	MPa	≥ 100
抗拉强度	MPa	≥ 20
抗折强度	MPa	≥ 10
粘接强度	MPa	≥ 4（混凝土）；≥ 30（45号钢）
抗冲击强度	MPa	≥ 20
抗冲磨强度	h/（g/cm ² ）	≥ 20
空蚀率	g/h	≤ 0.05

2.2 施工工艺流程

结合材料特性与现场实际施工条件，确定聚氨酯复合树脂砂浆施工工艺流程及要求如下。

2.1.1 工件表面喷砂打磨

对待做砂浆位置采用喷砂机进行喷砂处理，每次喷砂长度为2-4m。

要求：清理杂质，粗糙度Sa ≥ 2.5级

2.1.2 工件预加温

采用履带式陶瓷加热片、硅橡胶电热毯及热电偶等，对待加工位置预先加温。

2.1.3 涂刷砂浆底胶

一般先由上向下纵向涂刷一遍，再左右横向涂刷，然后对角线交叉涂刷，最后再收面和修整边角。做到薄而均匀，无流挂、无露底。

要求：搅拌均匀，容器边不挂泪；毛刷选用口齐、根硬、头软、不掉毛的扁形毛刷，新刷使用时应先将不

牢固的刷毛搓揉掉，以免影响涂刷质量；涂料应随用随拌，如已凝胶，应废弃不再使用，以保证施工质量。

2.1.4 涂抹高韧性抗冲击砂浆

将配好的高韧性抗冲击砂浆采用加热的抹刀均匀地抹到待作业施工面位置。

要求：砂浆平整；对于直管道，涂层厚度3-4mm，对于拐弯处，涂层厚度4-6mm。

2.1.5 高韧性抗冲击砂浆高温固化

采用履带式陶瓷加热片、硅橡胶电热毯及热电偶等，对砂浆进行高温加热固化。

要求：固化时间8h-12h。

2.1.6 涂刷聚氨酯材料

砂浆固化后，涂刷聚氨酯弹性体涂料。

要求：容器边不挂泪，毛刷不掉毛

2.1.7 涂层固化二次刷聚氨酯

聚氨酯固化24h后涂刷第二遍。

2.1.8 涂层修整

待涂层完全固化后，对其涂层进行修整，对其挂泪部分做平整抛光处理。

3 施工过程

3.1 表面清理喷砂打磨

对待处理部位采用喷砂机进行喷砂处理。喷砂分两次完成，第一次喷砂面积约150m²，第二次喷砂面积约140m²。经过处理的钢管表面应达到GB/T 8923.1-2011规定的除锈等级Sa 2.5级，粗糙度应在Rz40~80μm范围内，且应干燥、无灰尘（干燥压缩空气吹净）。

3.2 施工部位预加温

本工程采用M型加热管和热风机对施工位置进行预先空气加温（两端钢管断面用厚塑料布密封），基面温度为30℃~40℃。例如：喷砂后施工区域的长度为4m，将塑料布放置位置为喷砂后施工区域两头以外各1m远（即塑料布间距为6m），加热设备为施工区域加热，塑料布距离加热设备较远，不会引起燃烧。加热时，在排沙钢管左右两侧壁设置固定点，固定点之间绑扎铁丝，铁丝上悬挂M型加热管进行加热，加热管后部连接电线用高压电工防水胶带缠绕并架空，可以防止电线受潮、触碰钢管壁和短路，保证加热管用电安全。

3.3 涂刷砂浆底胶

用电锤制搅拌器将粘接用底胶搅拌均匀，采用毛刷或者滚筒涂刷底胶，一般先由上向下纵向涂刷一遍。要求涂刷底胶做到薄而均匀，无露底。

3.4 涂抹高韧性抗冲击砂浆

人工操作拌制砂浆，将配好的高韧性抗冲击砂浆采

用加热抹刀，人工均匀涂抹到待作业施工面位置（已刷过底胶部位）。要求砂浆涂抹平整；对于直管道，涂层厚度不小于3mm，对于拐弯处，涂层厚度不小于4mm。第二天施工时，在第一天与第二天新老砂浆结合处，涂抹砂浆平滑过渡，继续完成第二天施工，以此类推。

3.5 高韧性抗冲击砂浆养护（采用高温固化方法）

采用M型加热管和热风机，对当日砂浆完工区域进行加热养护固化，采用空气加温方式（两端钢管断面用厚塑料布密封），空气加热温度30℃~50℃。要求养护固化时间为8h~12h。例如：当日砂浆完工区域长度为2m，将塑料布放置位置为当日砂浆完工区域两头以外各1m远（即塑料布间距为4m），加热设备为当日砂浆完工区域加热，塑料布距离加热设备较远，不会引起燃烧。加热时，在排沙钢管左右两侧壁设置固定点，固定点之间绑扎铁丝，铁丝上悬挂M型加热管进行加热，加热管后部连接电线用高压电工防水胶带缠绕并架空，可以防止电线受潮、触碰钢管壁和短路，保证加热管用电安全。

3.6 涂刷聚氨酯材料

高韧性抗冲击砂浆固化并养护完成后，用滚筒涂刷聚氨酯弹性体涂料。要求聚氨酯弹性体涂料搅拌均匀，厚度为不小于0.5mm。

3.7 二次刷聚氨酯材料

第一次涂刷聚氨酯弹性体材料固化24h后涂刷第二遍，厚度为不小于0.5mm。

3.8 涂层修整

待涂层完全固化后，对其涂层进行修整，对其挂泪部分用角磨机做平整抛光处理。最终形成抗冲磨涂层的厚度达到4mm。

3.9 涂层抗拉强度试验

3.9.1 试验设备

2#排沙洞抗冲磨砂浆涂层拉拔试验采用海创高科附着力测试仪（型号：HCTC-10）进行拉拔试验检测，手动加荷，极限拉力为10kN。

3.9.2 试验方法

在靠近放空阀部位排沙钢管底面制作3个厚度4-5mm砂浆涂层试验块，粘接面积分别为：1个直径25mm的圆形砂浆涂层和2个面积为20mm×20mm的正方形砂浆涂层；然后通过热风机加热养护7d后进行拉拔试验检测。

3.9.3 检测结果

本次抗冲磨砂浆涂层试验检测结果如下表2所示：

4 质量控制要点

4.1 工前控制

4.1.1 原材料检验

针对施工使用的原材料进行严格的质量检验，认真核查产品合格证及检验报告，同时对材料进行抽样检验，检验其粘接力、力学性能等指标，确保使用材料满足现场要求。

表2 抗冲磨砂浆涂层现场抗拉强度试验检测结果表

序号	拉力 (N)	粘接面积 (mm ²)	砂浆涂层抗拉强度 (MPa)
1	3872	400	9.68
2	3439	490.6	7.02
3	3826	400	9.56

4.1.2 编制方案

针对施工要点、难点及施工工艺要求编制专项施工方案，方案应内容详实、要求明确、满足现场实际情况，以便为后续施工提供技术参考及标准要求。

4.1.3 人员培训

对入场施工人员进行安全培训及技术培训，并对培训效果进行考核，在施工前应邀请厂家技术人员对施工人员进行全面技术交底，确保施工人员熟悉材料性能、了解施工工艺、掌握技术要点，为施工质量提供可靠保障。

4.2 过程控制

认真按照专项施工方案组织施工，施工过程中不得随意变更施工工序，每道工序完成后认真落实工序验收工作，验收合格后方可进行下道工序施工，并做好验收记录工作，同时对施工工器具进行严格核查，确保所用工器具满足规范及施工要求。

施工过程中加强过程监管，安排专人对现场进行巡视检查，不定期的进行工序抽检，对检查发现的问题及时整改，确保施工质量满足规范要求。

5 效果检查

2#排沙洞内钢管聚氨酯复合树脂砂浆抗冲磨涂层实施完毕后，经历了两轮主汛期泄空排沙的考验，汛后现场管理人员对排沙钢管内壁抗冲磨涂层进行了检查。

首年汛后检查发现，2#排沙洞出口段约3m范围内的钢管侧壁存在零星斑状聚氨酯复合树脂砂浆表层聚氨酯弹性体涂料（黑色）脱落现象，特别是出口段末端约20cm宽的环形区域内聚氨酯复合树脂砂浆表层聚氨酯弹性体涂料脱落比较明显，每处脱落面积大部分在0.1m×0.1m以下，露出内部黄灰色聚合物砂浆层，未见有明显冲蚀破坏现象，整体聚氨酯复合树脂砂浆涂层未见空鼓破损现象。

次年汛后检查发现，2#排沙洞出口段约3m范围内的钢管侧壁存在聚氨酯复合树脂砂浆表层聚氨酯弹性体涂料（黑色）脱落现象，较2022年脱落部位稍有增加，特别是出口段末端约20cm宽的环形区域内聚氨酯复合树脂砂浆表层聚氨酯弹性体涂料与上年检查时相比脱落面积扩大较为明显，但并未连成大面积脱落的情况，每处脱

落面积大多在0.1m×0.1m以下，其余聚氨酯弹性体涂料脱落部位面积未见明显扩大；其余试验段部位也有新增零星表层聚氨酯弹性体涂料（黑色）呈散斑状脱落现象。表层聚氨酯弹性体涂料（黑色）脱落部位，露出内部黄灰色聚合物砂浆层，未见有明显冲蚀破坏现象，整体聚氨酯复合树脂砂浆涂层未见空鼓破损现象。

综合分析评估聚氨酯复合树脂砂浆在龙口2#排沙洞内的试验，达到了预期的试验效果，对排沙钢管内壁起到了较好的抗冲蚀、抗气蚀保护作用。

6 结论

排沙钢管抗冲磨涂层施工是一项系统而复杂的工程，因排沙系统设备在水利枢纽中起到至关重要的作用，但设备通常运行工况较差，一旦结构出现损坏时维修难度较高且施工场地狭小，所以，必须结合设备实际工况和运行要求，制定科学合理的保护措施与实施方案，通过选择适宜的抗冲磨材料、严格按照规范要求施工、认真执行施工工艺要求以及加强质量控制等措施，提高排沙钢管的抗冲磨性能，延长其使用寿命，避免其出现不必要的损坏，确保排沙钢管在恶劣环境下长期稳定运行，为水利枢纽安全稳定运行提供可靠保障。

龙口水利枢纽排沙钢管聚氨酯复合树脂砂浆抗冲磨涂层施工完成后，经实际运行检验，抗冲磨效果良好，为排沙钢管提供了可靠保护，解决了钢管气蚀、锈蚀等问题，满足了排沙钢管运行要求，为枢纽泄水排沙、稳定运行提供有效支撑。同时结合本次试验性防护项目施工，对聚氨酯复合树脂砂浆抗冲磨涂层在龙口水利枢纽排沙钢管内作业的施工工艺和施工要求进行总结和研究，并加以提高和改进，为后续龙口水利枢纽其他排沙钢管抗冲磨涂层施工提供经验和数据支撑，也为同类型排沙钢管抗冲磨涂层施工提供了借鉴意义。

参考文献

[1]李云峰,杨伟才.某泄洪排沙洞推移质冲蚀破坏修复技术研究[J].水利技术监督,2024,(11):160-163.
[2]温鸿浦,张雷,郭维克.聚氨酯复合树脂砂浆在固海扬水泵站泵壳磨蚀防护中的应用[J].中国农村水利水电,2018,(12):126-128+133.