

文章编号: 1672-3031 (2005) 01-0040-05

水工混凝土喷涂聚脲弹性体抗冲磨涂层的相关应用技术研究

吴怀国

(中国水利水电科学研究院 结构材料研究所, 北京 100038)

摘要: 本文主要研究了 SK 型界面剂与潮湿混凝土基底的粘接性能, 以及在潮湿混凝土基底涂敷 SK 型界面剂后不同时间间隔喷涂聚脲弹性体抗冲磨涂层的粘接性能。试验结果表明, 在潮湿混凝土基底界面喷涂聚脲弹性体涂层具有较高的粘接强度。喷涂聚脲弹性体涂层抗高速含沙水流冲刷试验结果显示, 其抗冲磨性能大大超过 C60 硅粉混凝土。本文从技术可行性和经济性角度, 分析评价了喷涂聚脲弹性体抗冲磨层与传统高强混凝土, 环氧砂浆及环氧类涂料抗冲磨层的技术优势, 说明了喷涂聚脲弹性体作为水工泄水建筑物抗冲磨保护层的应用前景。

关键词: 喷涂聚脲弹性体技术; 潮湿混凝土粘接; 抗冲磨性能; 水工泄水建筑物

中图分类号: TV49

文献标识码: A

喷涂聚脲弹性体材料的物理化学力学性能和施工工艺深受多行业关注, 并迅速得到深入的开发应用研究。国外自 20 世纪 90 年代开发出后, 已将其广泛应用于各类工程整体防水防渗、接缝止水、工业重防腐层、机械衬里耐磨保护层等, 并很快成立了一个专门的 PDA 应用技术协会, 以此来大力推广该技术的应用^[1,2]。自上世纪末, 国内的专家也跟踪国外的技术发展积极开展多方面的应用研究^[3,4]。水利水电工程的大面积整体防渗保护、泄水建筑物抗冲磨保护等一直未有比较理想的处理方法。作者及时地了解 SPUA 技术的发展, 掌握喷涂聚脲弹性体技术, 引进该技术及其配套的专用机具, 开展了 SPUA 应用中的关键技术问题研究^[5]。

1 潮湿界面剂的研究

国外经过多年来的大量应用研究表明, 除了选用合适物理力学性能的聚脲弹性体材料配方以外, 重要的是研究应用部位基底的界面处理和喷涂工艺。由于施用的基底物质的性能差异很大, 而聚脲弹性体在喷涂出几秒钟内就固化, 因此很难与基层界面有很理想的粘结效果。这样基底界面的处理一般必需使用性能合适的界面剂。由于水利水电工程具有更复杂的施工环境, 混凝土面多长期处于潮湿有水状态, 且表面质量较差, 因此应用喷涂聚脲弹性体技术, 解决基底界面的处理尤为重要。

基于对水工混凝土潮湿界面粘接性应用研究的经验, 以及对聚脲弹性体材料的化学特性和其喷涂工艺的特点分析, 研制出了纳米改性环氧树脂类 SK 型界面剂。该界面剂除了与潮湿混凝土界面具有非常优异的粘接性能以外, 在未完全固化前与聚脲弹性体能产生一定的化学反应, 有效地提高粘接性能。另外, SK 型界面剂具有较合适的稠度, 采用刮涂施工, 立面不流挂, 可以封闭混凝土体表面小的坑、孔等缺陷, 有效地确保喷涂聚脲弹性体涂层表面的完整性和光滑平整性。

1.1 界面剂与潮湿混凝土基底的粘接性能试验 试验采用的试件为 10cm×10cm×40cm 的混凝土块, 混凝土块用电刷打毛刷净, 然后在水中浸泡 24h 以上。试验前用面丝擦除表面的浮水, 然后刮涂上界面剂。

为了适应工程应用的需要, 分别研究了界面剂在潮湿混凝土面涂后 1d、2d、3d 及 5d 的粘结强

收稿日期: 2004-09-21

作者简介: 吴怀国 (1970-), 男, 安徽池洲人, 博士生, 高级工程师, 主要从事于水利水电工程修补加固材料及技术和混凝土外加剂的应用开发研究。

E-mail: whgw@iwhr.com

度。粘结强度测试采用美国 NJ 仪器公司生产的拉拔试验仪，拉拔头为 $\Phi 5\text{cm}$ 的钢块。试验完全在潮湿的环境中进行。试验结果见表 1。

表 1 界面剂与潮湿混凝土块的粘结试验结果

测试龄期/d	粘结强度/MPa	界面破坏情况
1	3.67	20% 混凝土破坏, 80% 界面剂涂层与拉拔头间破坏
2	4.18	100% 混凝土破坏
3	4.74	100% 混凝土破坏
5	5.10	90% 混凝土破坏, 10% 拉拔头与界面剂涂层间破坏

从表 1 可以看出，界面剂与潮湿混凝土间的粘结性能非常理想，测试的粘结拉拔强度数值均大于 3.67MPa，粘结破坏基本上是混凝土本体破坏或界面剂涂层与拉拔头间脱开。5d 的粘接抗拉强度大于 5.0MPa，可以很好的满足工程应用的需要。

1.2 界面剂施用后喷涂聚脲弹性体涂层的粘接性能试验 采用相同的试件和方法，分别测试界面剂涂敷后不同时间间隔喷涂聚脲弹性体涂层的粘接强度。试验结果见表 2。

表 2 界面剂与潮湿混凝土块和聚脲弹性体涂层间的粘结试验结果

时间/h	测试龄期/d	粘结强度/MPa	界面破坏情况
3~ 4	3	1.88	80% 界面剂与混凝土间破坏, 20% 聚脲涂层与界面剂间破坏
	7	2.50	40% ~ 50% 混凝土破坏
10~ 12	3	1.73	基本在界面剂与混凝土间破坏, 粘下 10% ~ 15% 的混凝土
	7	2.15	50% 界面剂与混凝土间破坏, 50% 界面剂与聚脲涂层间破坏
20~ 24	3	1.20	基本为界面剂与聚脲弹性体涂层间破坏
	7	1.38	基本为界面剂与聚脲弹性体涂层间破坏
干燥基底 (3~ 4)	7	3.41	100% 混凝土破坏

从表 2 可以看出，界面剂与潮湿混凝土和聚脲涂层间的粘结强度达到 1.2MPa 以上，在界面剂涂敷后 3~ 4h（表干时间）与喷涂聚脲涂层的粘结强度较高，7d 能达到 2.50MPa，而且粘接破坏部分是混凝土基底破坏。界面剂涂敷后随喷涂聚脲弹性体涂层的时间间隔加长，其粘接性能呈下降趋势。

这可以从两个方面解释：其一，从材料的化学物理特性来看，在界面剂刚达表干时，表面还存在一定的活性基团可以与聚脲组分发生化学反应产生一定数量的化学键。而且从材料的粘结机理上分析，这个时间段喷涂聚脲涂层有利于两种材料间的浸润、渗透和分子间作用的产生，从而提高粘结性能。界面剂涂敷后停留的时间越长，界面剂就固化得越完全，其表面活性基团的活性将进一步降低，聚脲材料与界面剂之间也就很难发生化学反应。由于界面的粘结主要是靠分子间作用和氢键等，而聚脲弹性体在喷出后几秒钟就基本固化，聚脲涂层与界面剂涂层两界面间的浸润、渗透作用相对变差，分子间作用力也小得多，粘结效果也就会有所下降。其二，界面剂涂敷后未达到表干前，周围环境对其性能影响较小，如环境中的湿气会与界面剂发生化学作用被吸收；环境中的灰尘会很牢固地粘附在表面，并浸润到界面剂表面中，因此喷涂聚脲弹性体涂层与界面剂间的粘接性能受到的影响很小。而界面剂涂敷后停留时间越长，外界环境对其影响就会越大，如环境中的湿气再很难被吸收，而是凝聚在硬化的界面剂涂层表面；环境中的灰尘只能粘附在硬化的界面剂表面，这都容易形成一个粘接薄弱层，从而大大降低喷涂聚脲弹性体与界面剂间的粘接性能。因此，实际施工时应根据现场实际温度对界面剂表干时间的影响调节喷涂聚脲弹性体涂层的时间间隔，以确保应有的应用效果。

从干燥基底混凝土的试验结果看，SK 型界面剂与喷涂聚脲弹性体涂层间的粘接作用很强，大于 3.41MPa，粘接破坏都是混凝土本体破坏，这说明 SK 型界面剂与喷涂聚脲弹性体具有非常好的相容性。

2 喷涂聚脲弹性体涂层的抗冲磨性能研究

试验采用新改造的圆环抗冲磨试验仪，试件为混凝土圆环试块，其外径为 500mm，内径为

300mm，高为 100mm。在冲磨过的试件内环面涂敷界面剂，5~ 6h 后喷涂聚脲弹性体涂层 1~ 1.5mm 厚，7d 后进行冲磨试验。试验水流含沙率为 10%，流速为 40m/s，一次冲刷时间 30min，共冲磨两次。与平行进行的高强混凝土冲磨试验对比结果见表 3。

图 1 为高强混凝土试件和喷涂聚脲弹性体涂层试件冲磨试验后的对比照片。图 1 (a) 中可以看出，由于喷涂聚脲时试件内表面太小，喷涂操作不好操作，涂层表面有点流挂，试验前用刀切除的刀痕迹依然很明显，图 1 (b) 可以明显看出混凝土试件内壁有冲磨的沟痕以及大的骨料外露。

表 3 喷涂聚脲弹性体涂层与高强混凝土抗高速含砂水流冲磨对比试验结果

冲磨材料	冲磨掉的 总重量/g	磨损率 ($\text{g}/\text{cm}^2\cdot\text{h}$)	磨损体积/ cm^3	表面形态
喷涂聚脲弹性体涂层	< 2.5	< 0.027	2.45	涂层表面冲磨前后基本没有变化和刮痕。 喷涂试件时表面存在的部分凸起部位，也没有任何刮痕。
二级配混凝土（骨料为 石灰岩， $f_{28}=66.5\text{MPa}$ ）	414.0	0.440	159.20	试件冲磨后内壁有很多沟痕等缺陷
二级配混凝土（骨料为 花岗岩， $f_{28}=65.6\text{MPa}$ ）	98.0	0.104	37.70	

注：聚脲弹性体材料的比重为 1.02，高强混凝土比重按 2.6 计算其磨损体积量。

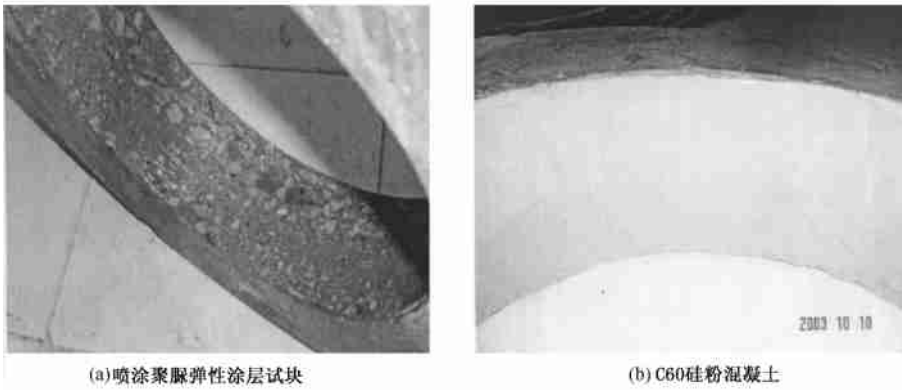


图 1 40m/s 含砂水流下抗冲磨试验结果

从表 3 和图 1 的试验结果可以看出，聚脲弹性体涂层的抗冲磨性能十分优异，其抗冲磨能力大大超过 C60 硅粉混凝土。从磨损的体积量看，聚脲弹性体的磨损量只有高强混凝土的 6.5%。

3 喷涂聚脲弹性体抗冲磨保护层与传统技术的对比分析

3.1 与环氧树脂类涂层和环氧树脂砂浆比较 与传统的环氧树脂类涂层和环氧树脂砂浆抗冲磨保护层相比，喷涂聚脲弹性体抗冲磨保护层的技术优势非常明显，一方面从材料物理力学性能和耐老化性上，是环氧树脂无法比拟的^[5]，另一方面，从施工性能上考虑，喷涂聚脲弹性体保护层可以在任意曲面、斜面、立面等复杂形状建筑物上施工，不易流挂，能非常好地保持好施工建筑物的基本形态。施工快捷、高效，一台机器日平均施工面积约 1 000m²。涂层固化速度快，强度增长快，施工后 1d 就可以在上面步行；施工期和涂层的保护期短，一般施工后最多 7d（一般 3d）即可投入使用。而环氧树脂砂浆或树脂涂层均难以达到这样优异的施工性能，在曲面、斜面、立面施工困难，凝胶时间长，容易有流挂，而且施工手段还多采用人工涂抹，施工质量也较难控制，施工期和涂层的保护期长，受环境条件影响大。因此，从技术角度上分析，喷涂聚脲弹性体抗冲磨保护层的施工技术具有十分明显的先进性，可以在大坝溢流面、泄洪道、泄洪洞、泄水孔、消力池等其它经受高速水流冲刷磨损的泄水结构部位大面积施用。

从经济角度上分析，喷涂聚脲弹性体抗冲磨保护层每平方米的直接施工费用仅是环氧树脂砂浆的 1/5~ 1/10，而抗冲磨性能是其 5 倍以上。与纯环氧树脂涂层相比，喷涂聚脲弹性体抗冲磨保护层的直

接施工费用约是其 2 倍,但是抗冲磨性能是其 5~10 倍。因此,喷涂聚脲弹性体抗冲磨保护层的经济优势也是很可观的。

3.2 与高强混凝土抗冲磨层比较 喷涂聚脲弹性体保护层以涂层厚度为 2mm 计,加上配套技术,按现行价格估计每平方米的费用与泄洪道表面高强混凝土保护层施工费用相当。但一方面高强混凝土的抗冲磨能力不及喷涂聚脲弹性体抗冲磨层的 1/10,另一方面,高强混凝土施工中裂缝难以得到有效控制,而常常导致较大面积被冲磨掉。如果按混凝土工程维修的“五倍律”规则^[9],那么采用喷涂聚脲弹性体抗冲磨保护层,提高抗冲磨层的使用寿命,可节约不必要的修补加固费用每平方米资金约 1 000~1 500 元,而且还可以避免因修补加固对水电站的正常生产造成不必要的损失。因此,其综合效益是非常可观的。

4 结语

本文通过试验对喷涂聚脲弹性体在水利水电工程中的应用进行了相关技术研究,得出如下成果和结论:(1)开发适用于潮湿混凝土基底界面喷涂聚脲弹性体材料的 SK 型界面剂,系统地进行了与潮湿混凝土基底的粘接性能,以及在界面剂涂敷后不同时间间隔喷涂聚脲弹性体涂层的粘结性能试验研究,结果显示,与潮湿混凝土基底界面具有很高的粘结强度,能达到 5.0MPa 以上,粘结破坏多发生在混凝土本体上;潮湿混凝土面涂敷界面剂后,当界面剂达到表干时喷涂聚脲弹性体涂层,其与界面剂的粘结强度能达 2.0MPa 以上,而界面剂涂敷时间间隔较长时,粘结性能将降低。因此,需要根据施现场来调节界面剂的配比和喷涂聚脲弹性体涂层的时间间隔,以达到较理想的应用效果。(2)优选出高性能喷涂聚脲弹性体材料,进行室内高速含沙水流冲刷试验,结果表明其抗高速含沙水流的冲刷磨损性能明显优于高强硅粉混凝土,涂层冲磨后表面基本完整光滑,没有明显的冲磨痕迹。(3)分别从施工工艺技术上和经济上,分析比较了喷涂聚脲弹性体抗冲磨保护层与传统的环氧树脂砂浆、环氧树脂涂层以及高强混凝土抗冲磨保护层的优势,其综合性能是当前其它材料和施工工艺技术手段无法比拟的,具有十分可观的应用前景。(4)作为一项新的材料和施工工艺应用技术,喷涂聚脲弹性体防护涂层成功应用于水电泄水建筑工程还需要进行更深入的相关技术研究和应用试验工作,以期能为解决我国水电泄水建筑物表面抗磨损或空蚀提供一个新的有效的解决途径。

参 考 文 献:

- [1] Primeaux D J. Spray Polyurea Elastomers Offer Performance Advantages [J]. Paint and Coatings, 1991, (6): 46-54.
- [2] John Henningsen. Polyurea: Leading a revolution in coating technology [J]. Paint and Coatings Industry, 2002, (1): 58-63.
- [3] 黄微波,杨宇润,王宝柱.喷涂聚脲弹性体技术[J].聚氨酯工业,1999,14(4):7-10.
- [4] 黄微波,王宝柱,等.喷涂聚脲弹性体技术在我国的发展和展望[J].聚氨酯工业,2002,17(3):6-9.
- [5] 吴怀国,孙志恒,赵德海.喷涂聚脲弹性体技术应用展望[J].中国水利水电科学研究院学报,2003,1(3):232-235.
- [6] 卢木.混凝土耐久性研究现状和研究方向[J].工业建筑,1997,25(5):1-6.

Study on Spraying Polyurea Elastomer abrasion-resistant coatings technology applied in hydraulic concrete structures

WU Huai-guo

(Department of Structures and Materials, IWHR, Beijing 100038, China)

Abstract: The author discussed some key problems of applying Spraying Polyurea Elastomer (SPUA) and investigated the adhesive properties of the SK type primer smeared on moist concrete substrate and the SPUA coating spreaded on the moist concrete substrate smeared with SK type primer at different time intervals. The results showed that a high adhesive strength could be achieved between SPUA coatings and moist concrete substrate. In terms of abrasion resistant ability to the high silt-laden flow, SPUA coating was over 10 times better than C60 silica powder concrete. Analysis was made about the feasibility of applying this technology and its economic benefits. It was revealed that SPUA abrasion resistant coatings had apparent superiority as compared with the traditional concrete technologies when applied in the hydraulic outlet works.

Key words: SPUA abrasion-resistant coatings; adhering to moist concrete; abrasive resistant; hydraulic outlet works

(责任编辑: 韩昆)

(上接第 39 页)

Evaluation and improvement on field irrigation techniques for Bojili irrigation district on Lower Reaches of Yellow River

LIU Yu¹, CAI Jia-bing¹, BAI Mei-jian¹, L. S. Pereira²

(1. Dept of Irrigation & Drainage, IWHR, Beijing 100044, China;

2. Institute of Agronomy, Technical University of Lisbon, Portugal)

Abstract: Two typical experiment areas were selected which represented respectively upstream and downstream conditions in the Bojili Irrigation District. Field irrigation experiments were conducted for winter-wheat and summer-maize plant mode in two consecutive years. The experiments were simulated by SRFR model that is a computer program for simulating flow movement in surface irrigation. The infiltration parameters were calibrated and the model was validated. Three methods were applied and their results were compared for determination of field application efficiency (E_a) and irrigation uniformity (D_u). Existing irrigation performance was evaluated based on calculated E_a and D_u for each irrigation cycle. Different improvement scenarios were analyzed based on the simulation results by SRFR for different conditions in the upstream and downstream of the District. Some recommendations were put forward for improving the irrigation performance. In upstream area, the application efficiency can be increased from current 0.7 to 0.84 by means of land leveling and reducing the slope of the irrigation borders. In downstream area, the E_a can be increased from current 0.64 to 0.8 by means of land leveling and cutting existing long borders from over 200m into small borders of 100m to 140m.

Key words: surface irrigation technique; application efficiency; irrigation uniformity; evaluation method; improvement scenario

(责任编辑: 吕斌秀)