

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2015.01.021

改性环氧树脂固体颗粒冲蚀磨损试验研究^{*}

王彦平^{1,2}, 龚卓¹, 王起才²

(1. 兰州交通大学机电工程学院, 兰州 730070; 2. 兰州交通大学土木工程学院, 兰州 730070)

摘要: 采用气流挟沙喷射法对改性环氧树脂材料进行固体颗粒冲蚀磨损试验, 考查冲蚀速度和角度对其冲蚀磨损的影响, 并探讨了其冲蚀磨损机理, 对比了相同冲蚀条件下几种材料冲蚀率的大小。实验结果表明, 改性环氧树脂材料冲蚀率与冲蚀速度近似呈线性关系; 在不同的冲蚀速度下, 改性环氧树脂材料的冲蚀率在45°冲蚀时最大, 表现出半塑性材料的冲蚀特征; 在相同的冲蚀条件下, 改性环氧树脂材料冲蚀率是对比材料(如M30砂浆、水泥石等)冲蚀率的1/16~1/4, 适合用作强风沙流环境下混凝土桥梁墩身的防护材料; 冲蚀形貌扫描电子显微镜照片表明, 冲蚀能量的法向分量使材料表面产生裂纹和破碎, 而其切向分量使材料表面产生切削。

关键词: 环氧树脂; 固体颗粒; 冲蚀磨损

中图分类号: TU528.51 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2015)01-0093-04

Experimental Research of Erosion Wear of Modified Epoxy Resin Solid Particle

Wang Yanping^{1,2}, Gong Zhuo¹, Wang Qicai²

(1. School of Mechatronic Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;

2. School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract : Experiments were carried out to study the effects of impingement angle and particle velocity on the solid particle erosion behaviour of modified epoxy resin by sandblast method, and the mechanism of erosion wear was discussed, in addition, the erosion rates for several different materials were compared. Experimental results show that the relationship between erosion rates of modified epoxy resin and wind-sand flow velocity approximates linear relationship. The erosion rates for modified epoxy resin are highest at 45° impingement angle under different velocity, which follows semi-ductile material erosion laws. The erosion rate of modified epoxy resin is approximately 1/16 ~ 1/4 of the reference materials (such as M30 mortar, cement stone etc.) at the same condition. Therefore, the modified epoxy resin can be used protection material for concrete bridge pier under gobi wind-sand flow environment. The morphologies scanning electron microscope photoes show that the normal component of erosion energy makes to produce cracks and debris, and the tangential component to produce surface cutting.

Keywords : epoxy resin ; solid particle ; erosion wear

即将开通的兰新铁路第二双线沿线穿越五大强风区, 强风挟带的沙粒对风区地段的混凝土桥梁的梁体、墩身和铁路路基产生了严重的冲蚀磨损, 造成如桥梁墩身表面出现蜂窝麻面以及既有微裂纹的加速扩展, 这些损伤可能进一步加剧混凝土结构的其它病害和损伤, 大大降低混凝土结构的耐久性^[1]。因此, 研究混凝土桥梁墩身的冲蚀磨损防护材料, 对于强风沙流地区混凝土桥梁在役期质量的保障具有明显的现实意义。环氧树脂作为土木工程中应用最广泛的材料, 自然作为强风沙流区混凝土桥梁墩身冲蚀磨损防护的候选材料。

以环氧树脂为基体的耐磨胶粘涂层广泛用于水轮机叶片、泥浆泵、选矿机部件等在浆体冲蚀工况下工作的工作表面, 作为其耐冲蚀磨损的保护涂层

以及腐蚀、磨损面的修补^[2-4]。该类材料耐冲蚀性能良好, 涂敷工艺简单、成本低, 因而得到了广泛的应用。目前人们对环氧树脂基耐磨涂层(复合材料)在液固两相流下的冲蚀磨损进行了广泛的研究^[5-9], 而对于强风挟带固体沙粒对环氧树脂基耐磨涂层(复合材料)的冲蚀磨损特性和磨损机理的研究还很少报道。笔者采用气流挟沙喷射法, 模拟戈壁强风挟带固体沙粒环境, 对改性环氧树脂材料进行冲蚀磨损试验, 分析其冲蚀磨损行为和冲蚀磨损机理, 探讨改性环氧树脂材料作为强风沙流地区混凝土桥梁墩身冲蚀磨损防护材料的可行性。

^{*} 长江学者和创新团队发展计划资助项目(IRT1139)

联系人: 王起才, 教授, 主要从事混凝土的冲蚀磨损防护研究

收稿日期: 2014-10-26

1 实验部分

1.1 主要原材料

环氧树脂(甲组分): A71-1, 中蓝晨光化工研究院有限公司;

改性脂肪胺固化剂(乙组分): A71-1, 中蓝晨光化工研究院有限公司。

1.2 主要设备及仪器

材料试验机: AG-IS 型, 日本岛津公司;

喷砂试验机: STR-9060 型, 江苏张家港斯特尔涂装设备有限公司;

扫描电子显微镜(SEM): JSM-5600 型, 日本电子光学公司。

1.3 试样制备及性能测试

将 A71-1 环氧树脂与改性脂肪胺固化剂按 3 : 1 混合, 搅拌均匀, 真空脱气后倒入聚四氟乙烯模具制备改性环氧树脂拉伸试样和冲蚀磨损试样(100 mm × 50 mm × 3 mm)。

试样室温放置 2 周后, 在材料试验机上测试其拉伸强度, 其值为 51.3 MPa。采用排液法测试改性环氧树脂的密度, 其值为 1.13 g/cm³。

1.4 冲蚀磨损试验方法及试验参数

试验采用改进的喷砂试验机对环氧树脂试样进行冲蚀磨损试验, 其原理如图 1 所示。关于该设备的具体描述可参见文献 [1]。

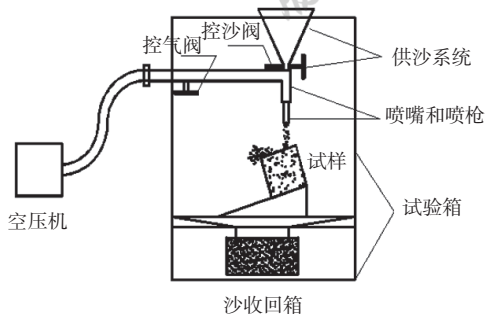


图 1 试验设备原理示意图

试验时所选喷嘴直径为 8 mm; 喷嘴距试样冲蚀面中心 20 cm; 冲蚀颗粒是有棱角的平均直径为 325 ~ 425 μm 的石英砂(见图 2)。

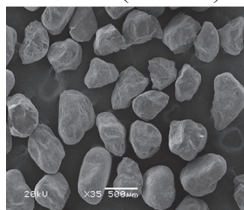


图 2 冲蚀颗粒的 SEM 照片

冲蚀颗粒的流量为 75 g/min; 冲蚀时间设定

为 6 min; 调节控气阀将气体压力调为 0.1, 0.16, 0.22, 0.28, 0.34 MPa, 所对应气流的平均速度分别为 17, 22, 26, 31, 35 m/s (分别相当于 8, 9, 10, 11 和 12 级风的风速); 调节试样夹具, 使冲蚀角度分别为 90°, 60°, 45° 和 30°。

1.5 试验数据处理

冲蚀前后采用量程为 200 g (精度为 0.001 g) 的电子天平称试样的质量, 每个条件下至少重复 3 次试验。冲蚀率的计算公式为:

$$E_R = \frac{\Delta M / \rho}{M_p \cdot t} \quad (1)$$

式中: E_R 为冲蚀率, mm³/g; ΔM 为试样的质量损失, mg; ρ 为冲蚀试样的密度, g/cm³; M_p 为沙流量, g/min; t 为冲蚀时间, min。

2 结果与讨论

2.1 冲蚀速度对改性环氧树脂冲蚀率的影响

在不同的冲蚀角度下, 改性环氧树脂试样的冲蚀率随冲蚀速度的变化关系曲线, 如图 3 所示。

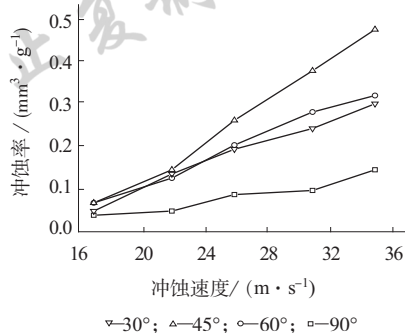


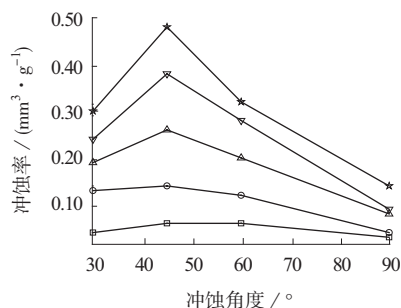
图 3 改性环氧树脂冲蚀率随冲蚀速度的变化曲线

由图 3 可见, 环氧树脂试样冲蚀率与冲蚀速度近似呈线性关系, 随着冲蚀颗粒速度的增加, 冲蚀率逐渐增加。在 90° 正向冲蚀时, 直线斜率较小, 也就是试样冲蚀率随冲蚀速度的变化较小。这主要是因为 90° 正向冲蚀时, 回弹颗粒与入射颗粒和喷嘴之间发生交互作用^[10], 消耗冲蚀颗粒的一部分能量, 造成作用于试样表面冲蚀能量的降低, 所以试样冲蚀率随冲蚀速度的变化缓慢; 60° 和 30° 冲蚀时直线的斜率相近, 而在 45° 冲蚀时直线的斜率达到最大。环氧树脂材料的冲蚀磨损, 既受冲蚀颗粒能量切向分量的影响, 又受其法向分量的影响, 是两者共同作用的结果。在 60° 冲蚀时, 法向分量大而切向分量小, 在 30° 冲蚀时, 法向分量小而切向分量小, 在 45° 冲蚀时, 法向分量和切向分量都较大。法向分量主要使材料表面产生裂纹和破碎, 切向分量主要使材料表面产生切削。

2.2 冲蚀角度对环氧树脂冲蚀率的影响

冲蚀角度是影响材料冲蚀率的主要因素之一。在其它条件相同的情况下,脆性材料和塑性材料的冲蚀率随冲蚀角度变化的规律明显不同。塑性材料在 $15^\circ \sim 30^\circ$ 冲蚀时冲蚀率最高,而脆性材料在 90° 冲蚀时冲蚀率最高。

图4是在不同的冲蚀速度下,改性环氧树脂冲蚀率随冲蚀角度的变化关系曲线。不同于塑性材料和脆性材料,环氧树脂材料在 45° 冲蚀时冲蚀率最大,表现出半塑性材料的冲蚀特征^[11]。从而可见,经过改性的环氧树脂脆性降低,韧性增加。



冲蚀速度: $\square$ —17 m/s; $\circ$ —22 m/s; $\triangle$ —26 m/s; ∇ —31 m/s; $\star$ —35 m/s

图4 冲蚀角度对改性环氧树脂冲蚀率的影响

2.3 环氧树脂与其它材料冲蚀磨损特性的对比

由于改性环氧树脂具有较高的韧性,当其受到风沙流的冲蚀时能够发生较大的弹性变形和塑性变形,从而有效吸收沙粒的动能,减缓风沙流的冲蚀作用。图5是在冲蚀角度为 45° 、冲蚀速度为 26 m/s 的条件下,改性环氧树脂与 M30 砂浆、C30 混凝土、C50 混凝土和水泥石冲蚀率的对比^[1]。

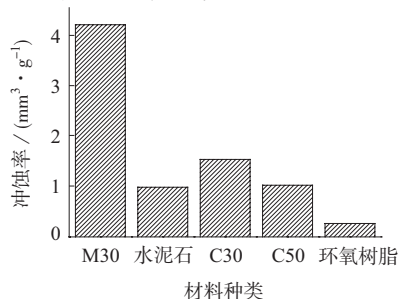


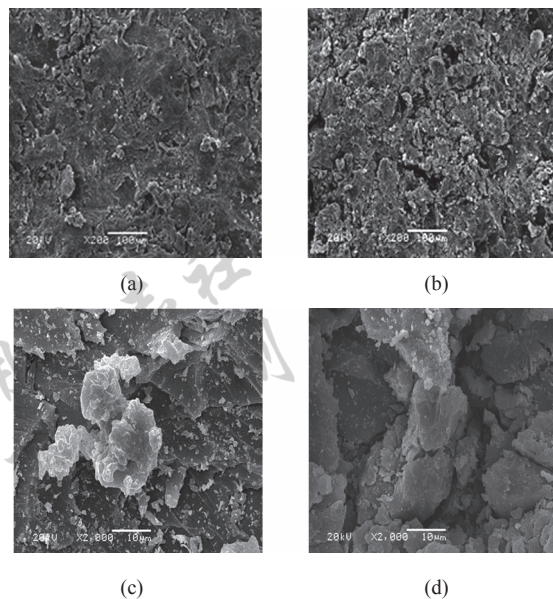
图5 环氧树脂与其它材料的冲蚀率对比

由图5可见,改性环氧树脂冲蚀率是 M30 砂浆冲蚀率的约 $1/16$,是 C50 混凝土和水泥石的约 $1/4$,是 C30 混凝土的约 $1/6$ 。这说明改性环氧树脂具有良好的抗冲蚀能力,加之其与混凝土具有良好的粘接能力、相近的线胀系数,因此适合用作强风沙流环境下混凝土桥梁墩身的防护材料。

2.4 环氧树脂冲蚀磨损后的形貌

图6为冲蚀速度 26 m/s、冲蚀时间 6 min 的

条件下,两种不同冲蚀角度下的环氧树脂冲蚀磨损后的微观形貌。从不同放大倍数的 SEM 照片可以看出,冲蚀角度为 90° 时,试样表面有大量的破碎物,这些破碎物堆积在试样表面对进一步的冲蚀具有“遮挡效应”,因此,在 90° 冲蚀时冲蚀率小。而当冲蚀角度为 45° 时,冲蚀能量的法向分量使材料表面产生裂纹和破碎,而其切向分量使材料表面产生切削,高倍照片(见图6c)中可明显看到沿冲蚀方向的切削痕迹。



a— 45° ($\times 200$); b— 90° ($\times 200$); c— 45° ($\times 2000$); d— 90° ($\times 2000$)

图6 不同冲蚀角度和放大倍数下环氧树脂冲蚀磨损后微观形貌

3 结论

(1) 改性环氧树脂材料冲蚀率与冲蚀速度近似呈线性关系。

(2) 在不同的冲蚀速度下,改性环氧树脂材料的冲蚀率,在 45° 冲蚀时最大,表现出半塑性材料的冲蚀特征。

(3) 改性环氧树脂材料冲蚀率是对比材料(M30 砂浆、C30 混凝土、C50 混凝土和水泥石)冲蚀率的 $1/16 \sim 1/4$,这说明改性环氧树脂具有良好的抗冲蚀能力,适合用作强风沙流环境下混凝土桥梁墩身的防护材料。

(4) 微观冲蚀形貌表明,改性环氧树脂材料冲蚀是冲蚀能量法向分量和切向分量共同作用的结果,法向分量使材料表面产生裂纹和破碎,切向分量使材料表面产生切削。

参考文献

- [1] 王彦平,居春常,王起才. 风沙环境下混凝土、砂浆和水泥石的固体颗粒冲蚀磨损试验研究[J]. 中国铁道科学,2013,34(5):22-27.

- Wang Yanping, Ju Chunchang, Wang Qicai. Experimental investigation on the solid-particle erosion of concrete, mortar and cement paste under blown sand environment[J]. China Railway Science, 2013, 34(5):22-27.
- [2] 高义民, 邢建东, 徐欣, 等. 环氧树脂耐磨胶涂层冲蚀磨损特性的研究[J]. 西安交通大学学报, 2001, 35(3):319-321.
- Gao Yimin, Xing Jiandong, Xu Xin, et al. Investigation on erosive wear of modified epoxy-based composites[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2001, 25(3):319-321.
- [3] 李光照, 张阿昱, 冯拉俊. 环氧树脂涂层耐冲蚀性能研究[J]. 焊管, 2012, 35(7):22-24.
- Li Guangzhao, Zhang Ayu, Feng Lajun. Research on corrosion resistance performance of epoxy coating[J]. Welded Pipe and Tube, 2012, 35(7):22-24.
- [4] 周晓谦. 环氧树脂涂层的耐冲蚀磨损性能[J]. 合成树脂及塑料, 2004, 21(3):66-68.
- Zhou Xiaolian. Resistance to impact erosion-wear of epoxy resin coatings[J]. China Synthetic Resin And Plastics, 2004, 21(3):66-68.
- [5] 卢德宏, 苏高申, 管桂生, 等. 聚氨酯改性环氧树脂的浆料冲蚀磨损研究[J]. 昆明理工大学学报(理工版), 2005, 30(4):35-37.
- Lu Dehong, Su Gaoshen, Guan Guisheng, et al. Erosion resistance of epoxy toughened with polyurethane[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology (Science and Technology), 2005, 30(4):35-37.
- [6] 耿刚强, 刘士杰, 曹三琦, 等. 环氧复合胶粘层的浆体冲蚀磨损性能[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2005, 25(1):93-96.
- Geng Gangqiang, Liu Shijie, Cao Sanqi, et al. Slurry erosion wear properties of epoxy resin coatings[J]. Journal of Chang'an University(Natural Science Edition), 2005, 25(1):93-96.
- [7] 胡少坤, 于晶, 胡开放, 等. 液体橡胶/环氧树脂复合材料的冲蚀磨损性能[J]. 特种橡胶制品, 2007, 28(5):37-41.
- Hu Shaokun, Yu Jing, Hu Kaifang, et al. Scour and wear properties of liquid rubber/epoxy resin composites[J]. Special Purpose Rubber Products, 2007, 28(5):37-41.
- [8] 买淑芳, 方文时, 杨伟才, 等. 海岛结构环氧树脂材料的抗冲磨试验研究[J]. 水利学报, 2005, 36(12):1498-1502.
- Mai Shufang, Fang Wenshi, Yang Weicai, et al. Experimental study on abrasion resistant performance of epoxy resin with sea island structure[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(12):1498-1502.
- [9] 买淑芳, 方文时, 李敬玮. “海岛结构”环氧“合金”抗冲磨防护材料的开发及应用[J]. 施工技术, 2005, 34(4):36-39.
- Mai Shufang, Fang Wenshi, Li Jingwei. Study and application of “sea island structure” epoxy resin “alloy” materials resistant to erosion and abrasion[J]. Construction Technology, 2005, 34(4):36-39.
- [10] Shipway P H, Hutchings I M. A method for optimizing the particle flux in erosion testing with a gas-blast apparatus[J]. Wear, 1994, 174:169-175.
- [11] Tewari U S, Harsha A P, Hauger A M, et al. Solid particle erosion of carbon fibre-and glass fibre-epoxy composites[J]. Composites Science and Technology, 2003, 63 (3-4):549-557.

中科院纳米所开发出超高热导率 石墨烯-聚合物复合材料

作为近来纳米科学领域的研究热点,新兴的石墨烯由于具有独特的二维结构、高比表面积和优异的热学性能[导热系数可高达 $3\,000\sim 6\,000\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$],受到了广泛关注。石墨烯/聚合物导热复合材料有望在电子器件、光电子器件、消费电子及导热聚合物材料中得到重要应用。目前,石墨烯的添加一定程度上改善了聚合物复合体系的导热性能,尽管能使聚合物的导热系数提高一个数量级,但有限石墨烯添加量、无序结构以及石墨烯/聚合物高界面热阻致使石墨烯-聚合物复合体系的热导率无法实现更高突破,阻碍了其在未来热管理中的广泛应用。

中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所器件部刘立伟研究员团队与苏州格瑞丰纳米科技有限公司合作,在定向组装三维石墨烯与聚合物复合体系的热导率方面取得新进展。采用高质量薄层石墨烯材料作为高导热填料,通过结构控制使高质量薄层石墨烯在聚合物基体中形成有取向的三维阵列,制备了一种以高质量薄层石墨烯为填料的高导热率复合材料。高填充量石墨烯之间充分搭接,减少了界面热阻。在择优取向方向上,该复合材料的热导系数可高达 $33\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,导热性能超过了一些常见合金,如不

锈钢和青铜[约 $16.7\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 和 $26.2\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$],是迄今热导率最高的碳纳米材料-聚合物复合材料,在导热应用领域具有巨大潜力。(中国聚合物网)

日本开发新型耐黄变聚氨酯弹性体

日本三井化学公司日前宣布,研发制造出一种不会黄变的新型聚氨酯弹性体,并预计于2015年4月推向市场。

这款名为Fortimo的新型聚氨酯弹性体是一种基于新型脂肪族异氰酸酯的聚氨酯弹性体,相比传统的异腈酸酯类弹性体,新产品的弹性更好、更耐用,且耐热性更加出色。

据了解,热塑性聚氨酯弹性体具有较高的耐磨性和耐老化性,可替代橡胶应用于鞋类、工业品等领域,但黄变一直是聚氨酯弹性体面临的难题。据称,Fortimo不会黄变,且其成型时间比传统的弹性体更短。这种产品的目标应用领域包括汽车、医用导管和高度耐用工业材料领域,这种产品初期将在三井化学名古屋工厂生产,三井化学为该产品在名古屋新建的工厂将于2016年投入使用。

同时,三井化学还开发了一种基于1,5-环戊烷二异氰酸酯(PDI)的聚异氰酸酯。相比1,6-己二异氰酸酯(HDI),这款产品的反应活性更高,可用于塑料、涂料等,且不会发生黄变现象。(中国聚合物网)