

回转体零件热喷涂涂层的结合强度^{*}

张甲英^{1a}, 赵刚^{1b}, 丁华东^{1b}, 孙椰望^{1a,2}, 杨军伟^{1b}

(1. 装甲兵工程学院 a. 再制造技术重点实验室, b. 装备维修与再制造工程系, 北京 100072; 2. 北京理工大学机械与车辆学院, 北京 100081)

摘 要: 回转体失效零件利用热喷涂技术修复之后需要对其涂层抗拉结合强度进行测量。参考平面热喷涂涂层结合强度测量方法, 提出了一种回转体零件涂层抗拉结合强度测量方法, 并对该方法进行了理论分析, 给出了具体操作要点和步骤。分析了回转体零件涂层结合强度与平面涂层结合强度测量结果之间产生差异的原因, 并进行了试验验证。实际测量了相同工艺下基体半径为 40 mm 的 FeAlCrBSiNb 回转体涂层和平面涂层的结合强度, 测量结果分别为 48.3 MPa 和 51 MPa, 两者相差 5.3%。结果表明, 在试样基体半径尽可能大或涂层实际面积与投影面积相差尽可能小的条件下, 利用该方法可以测得较为准确的后转体零件涂层结合强度。

关键词: 回转体涂层; 平面涂层; 结合强度

中图分类号: TG174.442 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-9289(2014)02-0019-05

Bond Strength of Revolution Body Thermal Spray Coating

ZHANG Jia-ying^{1a}, ZHAO Gang^{1b}, DING Hua-dong^{1b}, SUN Ye-wang^{1a,2}, YANG Jun-wei^{1b}

(1a. Science and Technology on Remanufacturing Laboratory, 1b. Department of Equipment Maintenance and Remanufacturing, Academy of Armored Forces Engineering, Beijing 100072; 2. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081)

Abstract: The coating bond strength of repaired revolution body parts need to be measured after thermal spraying. Based on the method of measuring plane coating bond strength, this paper proposed a method to measure the bond strength of revolution body coating. The key operation steps and detailed process are described. The differences between the revolution body coating and plane coating are also analyzed. According to the method, the bond strength of FeAlCrBSiNb revolution body coating with a radial matrix of 40 mm is measured. Compared with the same coating in plane shape, the measured bond strength of FeAlCrBSiNb revolution body coating is slightly small, 48.3 MPa for revolution body and 51 MPa for plane shape, coinciding with that of theoretical analysis. Results show that when the radius of the matrix is as large as possible or the difference between the actual area and the projected area of the coating is as small as possible, this method can accurately measure the bond strength of revolution body parts coating.

Key words: revolution body coating; plane coating; bond strength

0 引 言

涂层结合强度是评估热喷涂涂层性能非常重要的一个指标^[1-2]。在工程应用领域, 大部分失

效零件都是回转体。对失效零件进行喷涂之后仍需要进行必要的机加工以保证其满足一定的尺寸精度和配合精度^[3-4]。机加工过程中力、振动

收稿日期: 2013-12-23; **修回日期:** 2014-03-03; **基金项目:** * 国家自然科学基金(51105379); 装备再制造技术国防科技重点实验室资助项目(ZX1129)

作者简介: 张甲英(1965—), 男(汉), 山西临猗人, 副教授, 博士; **研究方向:** 机械加工自动化

网络出版日期: 2014-03-10 14:48; **网络出版地址:** <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20140310.1448.007.html>

引文格式: 张甲英, 赵刚, 丁华东, 等. 回转体零件热喷涂涂层的结合强度 [J]. 中国表面工程, 2014, 27(2): 19-23.

等因素会对涂层结合强度产生一定的影响。因此对回转体零件涂层结合强度的研究非常重要。

涂层服役过程中存在3类应力:平行于结合界面的剪切应力、垂直于结合界面的正应力以及涂层内部的内聚力^[5]。涂层服役过程中,剪切应力和正应力对涂层结合强度产生主要影响,因此一般测量方法主要针对这两方面进行测量。现有涂层结合强度测量方法主要有拉伸法、剪切法、弯曲法、刮剥法、划痕法、压入法、热冲击试验法、超声波试验法等^[6-8]。

上述几种测量方法中只有拉伸法、弯曲法、剪切法可以进行定量测量,其中前两者针对平面涂层设计,第三者主要测量涂层抗剪结合强度,因此对于回转体涂层抗拉结合强度仍需设计新的测量方法。

1 平面涂层结合强度测量

平面涂层抗拉结合强度普遍采用拉伸法进行测量。GB/T 8642-2002 对此进行了详细规范。图1为平面涂层结合强度拉伸测量法示意图。

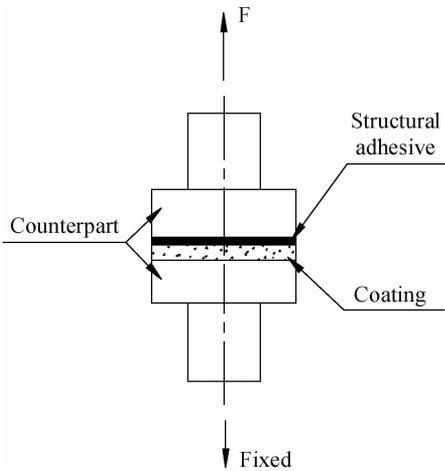


图1 结合强度拉伸测量示意图

Fig. 1 Schematic diagram of tensile measuring for bond strength

涂层喷涂在对偶件端面,利用结构胶粘结成拉伸试样。对偶件端面面积为 A_0 ,涂层脱落时的最大载荷为 F ,拉伸速度不超过 1 mm/min 。以涂层全部脱落评定为试验有效。涂层结合强度 σ_b 可通过(1)式进行计算:

$$\sigma_b = \frac{F}{A_0} \quad (1)$$

该方法的优势是可以较为准确的测得平面

涂层结合强度实际值,但是对于回转体零件,由于其涂层结合界面为弧面,无法直接使用该方法进行测量。

2 回转体涂层结合强度测量

2.1 测量方法设计

参照GB/T 8642-2002 涂层结合强度的测量方法,结合回转体零件涂层特点,对其结合强度测量方案进行设计。

2.1.1 方案设计

从覆有热喷涂涂层的棒料上取边长为 l 的立方体试样,如图2所示。该试样尺寸应满足两个条件:①试样中涂层部分的弧面尽可能小;②试样大小要便于粘结对偶件以及进行拉伸试验。试样尺寸在上述基础上,根据对偶件尺寸和拉伸试样机匹配尺寸进行设计。

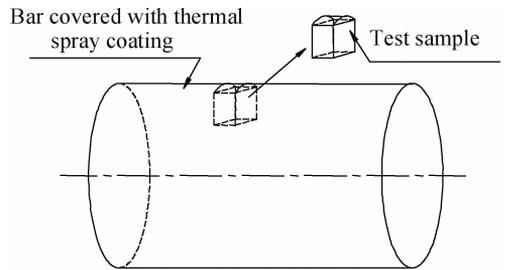


图2 试样制取示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the test sample facture

将试样与棒材胶粘成对偶件,如图3所示。胶粘对偶件所用的胶为黏稠状,可以填充进涂层弧面与棒材端面的缝隙中,保证对偶件的胶粘质量。

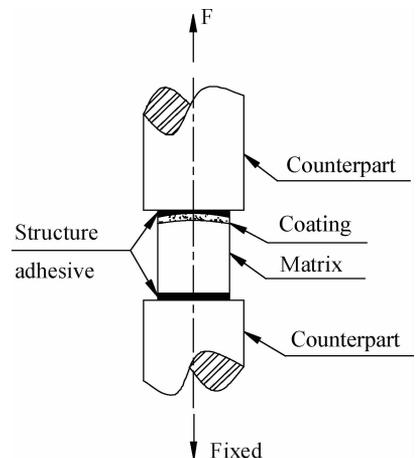


图3 对偶件胶粘示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the counterpart bonding

2.1.2 结合强度计算

测量过程中涂层及基体均产生微小的弹性形变,该形变对涂层结合强度测量影响很小,可以忽略不计。涂层与基体结合界面抗拉结合强度为 σ'_b ,假设拉伸载荷为 F 时涂层完全脱落,受力情况如图 4 所示。

根据受力分析可得如下公式:

$$F = 2a \int_0^{\pm} \sigma'_b R \cos \varphi d\varphi \quad (2)$$

式中, F 为涂层脱落最大载荷, N; σ'_b 为涂层抗拉结合强度, MPa; R 为基体半径, mm; θ 为涂层圆弧角度, °; a 为试样轴向长度, mm。

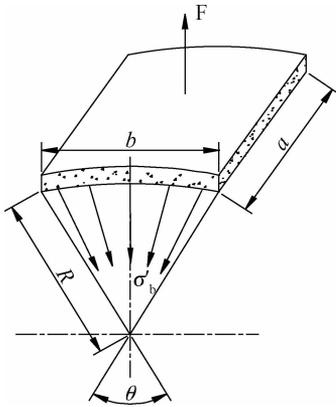


图 4 涂层受力分析

Fig. 4 Force analysis of the coating

通过(2)式计算可以发现,投影面积相同的平面涂层和回转体涂层在拉伸法测量中所需的外加载荷相同。但是实际拉伸过程中,回转体涂层与平面涂层的脱落过程存在一定差异。

平面涂层拉伸过程中,在受力均匀的情况下,可以认为涂层与基体结合界面的结合点同时发生断裂,即涂层同时从基体上脱落。因此,外加载荷需要同时克服涂层与基体所有结合点的结合力。而回转体涂层拉伸过程中,由于涂层具有一定弧度,因此受力不均匀。在加载过程中,试样顶端的法向分力最大,最先达到涂层与基体的结合力极限,结合点先发生断裂,因而在顶端涂层与基体结合界面处产生裂纹,如图 5 所示。

回转体涂层试样顶端涂层与基体结合界面产生裂纹后,在外加载荷作用下,裂纹沿图 5 中箭头方向扩展,促进了涂层的脱落,从而导致拉伸过程中,回转体涂层完全脱落所需的外加载荷小于平面涂层完全脱落所需载荷,即投影面积相

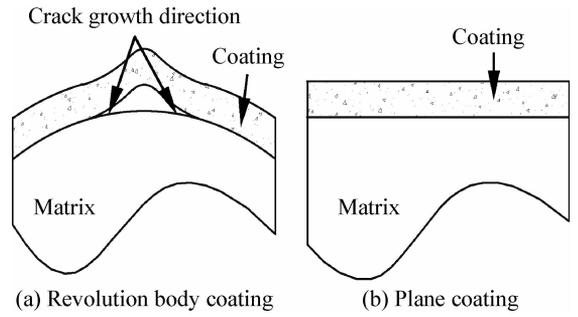


图 5 回转体及平面涂层脱落过程示意图

Fig. 5 Abscission process of the revolution body coating and plane coating

同的试样,回转体涂层拉伸法测得的涂层结合强度测量值小于相同工艺下的的平面涂层拉伸法测得值。因此,为避免测量过程中由涂层弧度产生的裂纹扩展而引起的测量值偏小的现象发生,使测量值更加接近实际结合强度,在不影响试验操作的前提下,所选试样的基体半径应尽可能大或涂层实际面积与投影面积相差应尽可能小。

2.2 回转体涂层结合强度测量试验

2.2.1 材料及设备

采用电弧喷涂方法制备 FeAlCrBSiNb 涂层,喷涂电压 36 V,喷涂电流 150 A,空气压力 0.7 MPa,喷涂距离 200 mm,转台转速 700 r/min,喷涂厚度 1 mm。基体材料为 45 钢,直径 40 mm,拉伸试验采用 MTS809 Axial/Torsional Test System 拉伸试验机。

2.2.2 试验步骤

(1) 试样制取

根据试样制取条件取 $l=10$ mm,涂层投影面积为 1 cm^2 。图 6 为试样切取结果。

(2) 对偶件胶粘

选用 $\Phi 18$ mm, 45 钢棒材作为对偶件。选用 E-7 高温结构胶进行粘结,该胶甲乙组分配比为 10 : 1,接触压力 0.05 MPa, 100 °C 下 3 h 固化。在粘结过程中,试样位置偏心会导致应力集中,影响测量结果的准确性,因此在对偶件端面铣出深 3 mm, $\Phi 15$ mm 的定位盲孔,如图 7 所示。定位盲孔可以保证试样粘结在对偶件端面中心位置,使拉伸过程中涂层受力均匀,减少应力集中。

保温固化过程中,为保证上下对偶件可以精确对心,在粘结好的对偶件外部套上内径 $\Phi 20$ mm 的金属套管。对偶件试样如图 8 所示。

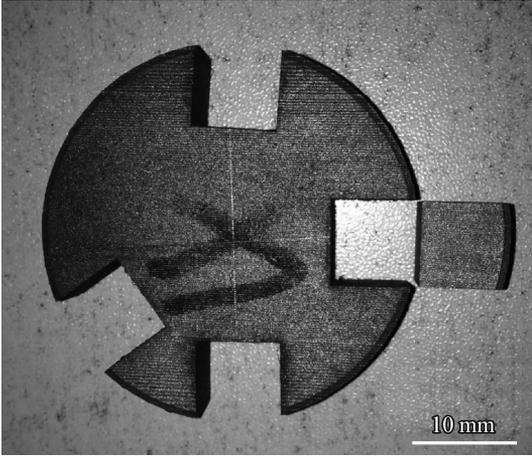


图6 试样切取结果

Fig. 6 Result of the cutted test sample



图7 定位盲孔的宏观形貌

Fig. 7 Macro morphology of the positioning blind hole



图8 对偶件试样的宏观形貌

Fig. 8 Macro morphology of the counterpart samples

(3) 拉伸试验及数据分析

试验机预设载荷 10 kN, 预设加载时间 20 s。结果以涂层完全脱落为有效数据, 如图 9 所示。

表 1 为回转体涂层及 GB/T 8642-2002 标准下相同工艺、材料、基体的平面涂层拉伸试验结果。

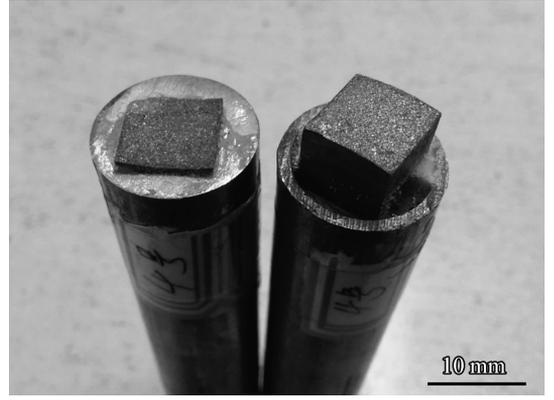


图9 涂层脱落结果

Fig. 9 Result of the coating shedding

表1 回转体和平面涂层拉伸试验结果

Table 1 Tensile test results of revolution body and plane coating

No.	Revolution body coating		Plane coating	
	Force/ kN	Bond strength/ MPa	Force/ kN	Bond strength/ MPa
1	4.67	46.7	5.1	51
2	4.80	48.0	5.0	50
3	4.98	49.8	5.4	54
4	4.86	48.6	4.9	49
Average	4.83	48.3	5.1	51

通过表 1 的数据可知, 回转体试样涂层结合强度平均值为 48.3 MPa, 平面涂层的结合强度为 51 MPa。对比可发现, 对于相同工艺下的热喷涂涂层, 回转体涂层测量结果小于平面涂层测量结果, 两者相差 5.3%。

3 结论

(1) 参考平面涂层结合强度测量法, 提出了一种测量回转体零件涂层抗拉结合强度的方法, 并分析该方法下的测量值与实际值之间产生偏差的原因。

(2) 平面涂层平均结合强度为 51 MPa, 基体半径 40 mm 的回转体涂层平均结合强度为 48.3 MPa, 回转体涂层测量结果略小于平面涂层测量结果, 两者相差 5.3%。因此为使测量值更加接近实际结合强度, 所选试样的基体半径应尽可能大或涂层实际面积与投影面积相差应尽可能小。

参考文献

[1] 李建华, 陈丽. 浅析影响热喷涂涂层抗拉结合强度测定结果的主要因素 [J]. 热喷涂技术, 2010, 2(2): 42-45.

[2] 王耀斌, 关文达, 任有, 等. 金属喷涂层机械性能的研究 [J]. 农业机械学报, 1997, 28(S1): 145-148.

[3] 许崇波, 张永俊, 刘晓宁. 热喷涂层的加工技术 [J]. 航空精密制造技术, 2005, 41(1): 39-41.

[4] 吴志远, 梁克高, 巴国召, 等. 高硬热喷涂层的缓进给切削试验 [J]. 装甲兵工程学院学报, 2012, 26(1): 86-88.

[5] 王银军. 用于测定热喷涂涂层抗拉结合强度的制样方法及装置 [J]. 物理测试, 2006, 24(6): 52-53.

[6] 李坤明, 包亦望, 万德田, 等. 压痕法和十字交叉法评价

类金刚石硬质涂层的界面结合强度 [J]. 硅酸盐学报, 2010, 38(1): 119-125.

[7] 宋亚南, 徐滨士, 王海斗, 等. 喷涂层结合强度测量方法的研究现状 [J]. 工程与试验, 2011, 51(4): 1-8.

[8] 张永康, 孔德军, 冯爱新, 等. 涂层界面结合强度检测研究 (II): 涂层结合界面应力检测系统 [J]. 物理学报, 2006, 55(11): 6008-12.

作者地址: 北京市丰台区杜家坎 21 号院 100072
 装甲兵工程学院再制造技术重点实验室
 Tel: (010)6671 8540
 E-mail: zhaogangpd@163.com

(责任编辑: 王文宇)

 • 本刊理事长单位介绍 •

国家绿色镀膜技术与装备工程技术研究中心

国家绿色镀膜技术与装备工程技术研究中心于 2007 年 11 月 16 日经科技部批准依托兰州交通大学和兰州大成科技股份有限公司组建,是我国镀膜行业第一个也是唯一一个国家工程中心。

中心坚持“自主创造核心技术,引领行业技术进步”的创新理念,提出了“绿色镀膜”、“绿色镀膜新材料”、“绿色镀膜新能源(聚光太阳能)”等新技术理念,以绿色镀膜技术、绿色镀膜新材料、绿色镀膜新能源的自主创新为主要研究方向,以绿色镀膜关键技术创新为核心,不断拓展绿色镀膜工艺技术应用新领域,集中攻关绿色制造、清洁生产关键共性基础技术和系统集成问题,形成一批具有自主知识产权的绿色镀膜工艺技术和成套装备,实现了“出一流人才、创一流技术、造一流装备”的创新目标,形成了“以关键技术创新支撑工程技术研发,以工程技术研发促进成果产业化,以成果产业化收益再支持关键技术创新”的独具特色的技术创新体系。

中心研发了 8 类 20 种型号的产品并全部实现了产业化推广;获得 1 项国家科技进步二等奖、4 项甘肃省科技进步一等奖,其它省部级科技进步一等奖 1 项、二等奖 5 项;申请专利 40 件,其中发明专利 23 件;获得授权专利 29 件,其中发明专利 15 件;获得 11 项软件著作权;获得 5 项国家重点新产品和 14 项软件产品;制定并实施了 8 项国内首部企业技术标准。

中心聚集了一批优秀创新人才,形成了一支专业结构、年龄结构、学历结构合理,多学科交叉,具有可持续创新能力的创新团队,被信息产业部评为“全国信息产业科技创新先进集体”,2009 年被中央四部委联合授予“全国专业技术人才先进集体”荣誉称号。

中心已成为技术先进、特色鲜明的绿色镀膜技术研究开发和技术创新基地、工程技术咨询与信息中心、绿色镀膜装备产业化示范基地、绿色镀膜技术检验与测试基地。