

工艺研究

铝合金异形曲面热喷涂涂层的制备及性能研究

侯国梁^{1,2}, 周惠娣¹, 安宇龙^{1,2}, 赵晓琴¹, 刘光^{1,2}

(1. 中科院兰州化学物理研究所 固体润滑国家重点实验室, 兰州 730000;

2. 中科院北京研究生院, 北京 100049)

[摘要] 采用大气等离子喷涂(APS)(液态 CO₂ 气化冷却和未冷却)和超音速火焰喷涂(HVOF), 在模拟加力泵涡壳的异形铝合金工件内曲面, 制备了耐气蚀性较好的 3 种涂层, 并考察涂层和异形曲面基体的结合情况及涂层的相组成、显微硬度和孔隙率。结果表明: HVOF 在其焰流无法垂直喷涂的部位涂层与基体结合较差; 未使用 CO₂ 冷却的 APS 涂层卷曲, 涂层中有明显裂纹; 使用 CO₂ 冷却的 APS 涂层与基体结合良好, 涂层中没有裂纹, 该工艺是目前在铝合金异形曲面制备热喷涂涂层的有效途径。

[关键词] HVOF; APS; 热喷涂涂层; 异形曲面

[中图分类号] TG174.442

[文献标识码] A

[文章编号] 1001-3660(2010)03-0067-04

Study on Preparation and Performance of Thermal Spraying Coatings onto Aluminum Alloy Abnornity Bent Surface

HOU Guo-liang^{1,2}, ZHOU Hui-di¹, AN Yu-long^{1,2}, ZHAO Xiao-qin¹, LIU Guang^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Solid Lubrication, Lanzhou Institute of Chemical Physics,

Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

2. Graduate School of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China)

[Abstract] Three types coating that had fine cavitation erosion resistance, derived from NiCr feedstock, were fabricated on abnornity bent surface of aluminum alloy workpieces using air plasma spraying (APS) with and without cooling by gasified CO₂ and high velocity oxy-fuel (HVOF). The combination between coatings and substrate, and the composition, microhardness and porosity of the coatings were reviewed. The obtained results shows that HVOF sprayed coating has bad combination with substrate where the flame can't vertically sprayed on; APS sprayed coating without cooling by gasified CO₂ curls and has distinct crack; APS sprayed coating cooled by gasified CO₂ has good combination with substrate in anyplace and has not crack. It can be concluded that APS is an effective method to produce functional coatings on aluminum abnormal bent surface at present.

[Key words] HVOF; APS; thermal spraying coatings; abnormal bent surface

航空发动机供油系统存在大量的加力、加压部件, 造成航空油在流动过程中压强变化巨大^[1], 在低压区大量的气泡成核并长大, 当这些气泡流到高压区时就会溃灭, 如果发生在过流部件的壁面附近, 气泡溃灭产生的冲击波和微射流^[2]就会严重损坏供油部件, 即气

蚀损伤。

由于铝合金材料比强度值大, 具有一定的防腐性, 而且铝的良好导电性能可将燃油流动产生的静电消除, 减少静电损害^[3], 所以铝合金材料大量应用于航空燃油系统。但是铝合金耐气蚀性较差^[4], 使得供油系

[收稿日期] 2009-12-29; **[修回日期]** 2010-03-04

[基金项目] 国家自然科学基金委创新研究群体科学基金资助项目(50421502); 国家 973 计划资助项目(2007CB607601); 中国科学院“西部之光”人才培养计划“西部博士资助”项目(2007-12-18)

[作者简介] 侯国梁(1987—), 男, 山东人, 硕士研究生, 主攻硬质耐磨和耐气蚀涂层材料。

[通讯作者] 周惠娣(1965—), 女, 研究员, 主要研究方向为摩擦学与表面工程。

统中的铝合金部件气蚀损坏严重,如加力泵涡壳,严重影响航空发动机的安全。所以开展通过改善铝合金的表面属性,以提高其耐气蚀性的研究工作具有十分重要的意义。

虽然热喷涂耐气蚀涂层在不锈钢基体上已得到广泛研究并成功应用^[5-6],但是在铝合金基体上的研究工作还较为少见,尤其是在具有复杂形状铝合金工件的内曲面。使用 HVOF 和 APS 2 种热喷涂技术在模拟我国某型号战机加力泵涡壳的工件内曲面上,分别制备耐气蚀性较好的[50%(WC-17Co)+50%NiCr]涂层^[7],以期对解决铝合金加力泵涡壳的气蚀问题提供实验依据和理论指导。

1 实验

1.1 喷涂粉末及基体

所使用的粉末为质量比 1:1 的 15~45 μm WC-17Co 和 15~45 μm Ni20Cr 混合粉末,分别由赣州章源物业新材料公司和北京矿业总院提供,2 种粉末皆为球形,流动性较好,便于喷涂。

喷涂的铝合金工件是模拟我国某战机加力泵涡壳(其在服役过程中受到严重气蚀,严重影响飞行安全)实际尺寸制作的,其工件实图见图 1,断面示意图 2。

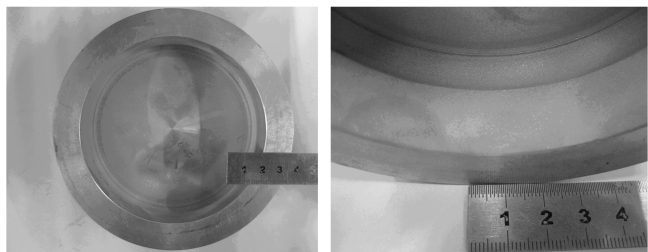


图 1 模拟实际战机零件的铝合金工件

Fig. 1 Photograph of aluminum workpiece according to the dimension of actual fighter plane's scroll-case

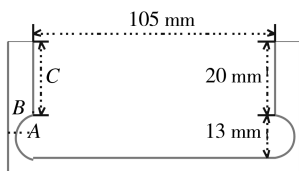


图 2 工件的界面示意图

Fig. 2 Sketch map of workpiece's cross section

1.2 喷涂

用 APS-2000A 型等离子喷涂设备在压缩空气冷却工件外表面的情况下,直接对其圆弧内表面进行喷涂;在压缩空气冷却外表面,且用气化 CO_2 冷却圆弧内表面的情况下,用等离子喷涂和 DJ-2700 超音速火

焰喷涂设备分别对工件的圆弧内表面进行喷涂,工艺参数分别见表 1 和见表 2。

表 1 APS 喷涂参数

Tab. 1 The parameters of APS spraying

喷涂方法	主气 Ar /($\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$)	电流 /A	电压 /V	送粉速率 /($\text{g} \cdot \text{min}^{-1}$)	送粉气 /($\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$)
APS	40	500	55	20	7
APS (CO_2 冷却)	40	500	55	20	7

表 2 HVOF 喷涂参数

Tab. 2 The parameters of HVOF spraying

参数	数值
氧气/($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	24.2
天然气/($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	8.9
载气 N_2 /($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	1.13
压缩空气/($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	29.3
送粉速率/($\text{g} \cdot \text{min}^{-1}$)	25

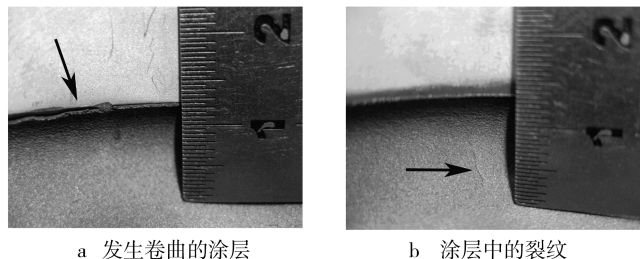
1.3 检测手段

使用 JSM-5600LV 型扫描电镜观察抛光后的样品截面形貌及涂层与基体的结合情况;使用 MH-5-VM 型显微硬度计测涂层抛光截面的显微硬度,加载 200 g,持续 10 s,每种涂层测 10 次,然后求平均值;使用 OLYCIAm3 图像分析软件对涂层的 SEM 照片进行分析,以求涂层的孔隙率;使用日本理学公司 D/Max-2400 粉末 X 射线衍射仪检测涂层的相结构。

2 结果和讨论

2.1 涂层的结合情况

未使用 CO_2 冷却圆弧内表面的 APS 喷涂工件,涂层的边缘发生卷曲,涂层和基体间有明显裂缝,且涂层中出现肉眼可见的裂纹,其外观见图 3。



a 发生卷曲的涂层

b 涂层中的裂纹

图 3 未使用 CO_2 冷却的 APS 涂层的照片

Fig. 3 Photograph of the APS sprayed coating without cooling by CO_2

使用 CO_2 冷却圆弧内表面的 APS 喷涂工件,涂层的边缘没有发生卷曲,涂层中没有裂纹,涂层与基体结合良好,且 A、B 2 个区域涂层与基体没有明显差别,其 SEM 照片见图 4。

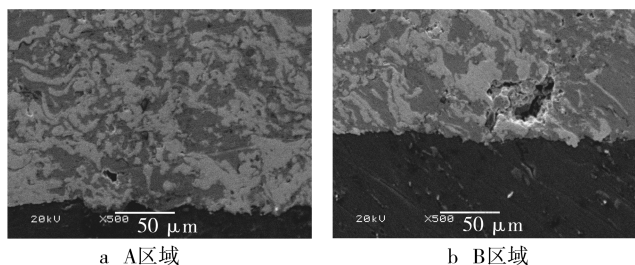


图 4 使用 CO_2 冷却的 APS 涂层的 SEM 照片

Fig. 4 SEM micrograph of APS sprayed coating cooled by CO_2

使用 CO_2 冷却圆弧内表面的 HVOF 喷涂工件, 涂层与基体间没有发现明显缝隙, 但是涂层的 SEM 照片表明 A 区域涂层与基体结合非常好, 好于 APS 涂层; B 区域涂层和基体的界面比 A 区域平滑, 在靠近边缘的部分涂层与基体间有缝隙, 其 SEM 照片见图 5。

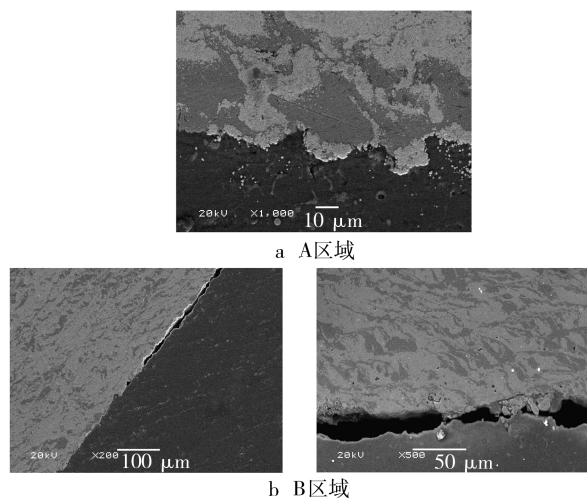


图 5 HVOF 涂层 SEM 照片

Fig. 5 SEM micrograph of HVOF sprayed coating

HVOF 涂层与基体的结合, 主要是靠喷涂过程中高达数倍音速的焰流把高动能传递给熔融的粒子, 当粒子撞击到工件表面时就会钉扎进基体, 产生机械咬合作用, 结合较好。但是这种高结合必须是在焰流和基体表面为 90° 才能达到最大值, 随着二者夹角的减小, 粒子钉扎进基体的深度就越浅。文中喷涂的实际工件在 A 区域, 焰流大都能和基体表面垂直或接近 90° , 所以涂层和基体结合的非常好; 而在 B 区域, 由于工件中 C 外沿的遮蔽影响, 见图 2, 导致焰流和基体表面的夹角 $< 60^\circ$, 在最边缘仅为 10° 左右, 所以粒子钉扎进基体的深度很浅, 涂层和基体的界面较为平滑, 另外由于在圆弧内表面制备的涂层比在平面上残余应力更大^[8], 就会导致涂层从基体上翘起, 形成缝隙。

APS 涂层通过高温将粒子融化, 然后喷射到基材上, 并粘附在基体表面形成涂层, 所以涂层与基体的结合受角度的影响较小, 但是由于 APS 的火焰温度太

高, 造成涂层中的残余应力较大, 所以在不使用气化 CO_2 冷却时, 残余应力会导致涂层卷曲和在涂层中形成裂纹。在使用 CO_2 冷却的情况下, 涂层的残余应力会得到较快的释放, 所以涂层和基体结合较好, 涂层中也不会出现裂纹。

2.2 涂层的相结构

图 6 是喷涂粉末和涂层的 XRD 图谱。从图中可以看出, 3 种涂层中 HVOF 涂层中 WC 的分解含量最小, 这与已报道文献中单独使用 HVOF 喷涂 WC-17Co 的结果类似^[9-10], 且涂层中没有形成 Cr_xC_y , Ni, Cr 仍以合金的形式存在, 说明颗粒在喷涂过程中粒子经历的温度相对较低。2 种 APS 涂层中, WC 都基本完全分解成 W_2C , 并且和 Cr 发生反应生成了 Cr_xC_y , 两者之间的差别是使用 CO_2 冷却的 APS 涂层的 XRD 图谱中有明显的曼散射包, 衍射峰更为宽化, 表明涂层中含有更多的非晶相, 这是由于涂层在 CO_2 冷却的情况下迅速冷却, Cr_xC_y 和 $\text{Co}_x\text{W}_y\text{C}$ 等来不及晶化而形成非晶。

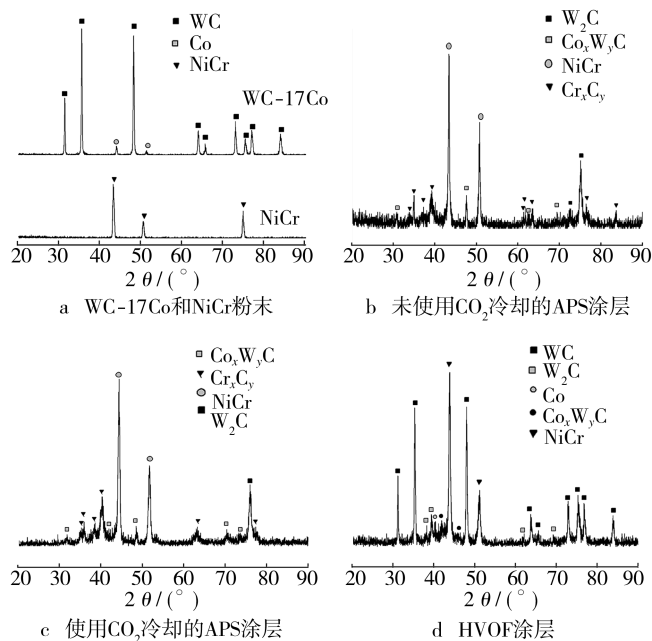


图 6 喷涂粉末和涂层 XRD 图谱

Fig. 6 XRD patterns of powders and coatings

2.3 涂层的显微硬度及孔隙率

对涂层显微硬度和孔隙率的测定结果见表 3。可以看出 HVOF 涂层的硬度远远大于 APS 涂层, 而其孔隙率却远小于后者。这是因为, 一方面 APS 工艺的焰流温度太高, WC 容易与周围环境中的 O_2 发生化学反应, 造成 WC 严重分解^[11]; 另一方面, 喷涂粒子获得的动能远没有 HVOF 工艺中粒子获得的动能大, 粒子到达基体或已形成的涂层表面时铺展得不够充分。以上两方面的原因都会导致涂层孔隙率过大, 组织与

HVOF 相比较为疏松,所以 APS 涂层的孔隙率比 HVOF 涂层大得多,显微硬度值却小很多。

表 3 涂层的显微硬度和孔隙率

Tab.3 Microhardness and porosity values of the coatings

涂层	显微硬度 HV_{200}	孔隙率/%
APS 涂层(CO_2 冷却)	310	3.32
HVOF 涂层(CO_2 冷却)	818	0.43

3 结论

1) CO_2 冷却可以显著降低 APS 涂层的残余应力,并且可以提高涂层中非晶相的含量。

2) APS 由于自身工艺的特点,使得其在喷涂复杂异型曲面时受角度影响较小,如果使用 CO_2 冷却以降低涂层的残余应力,就会得到和基体结合良好的涂层,这是目前在铝合金异形曲面制备功能涂层的有效途径。

3) APS 涂层比 HVOF 涂层 WC 分解严重,孔隙率大,硬度低。

4) 虽然目前市场上已有 HVOF 伸缩枪用以解决孔内表面的喷涂问题,但是至今仍然没有适合在较小孔径工件内表面喷涂的设备。所以研发合适的设备,以使具有优良性能的 HVOF 涂层尽快应用于小孔径工件内表面(如加力泵涡壳)已成当务之急。

[参 考 文 献]

- [1] 王维夫,王茂才. 航空发动机用铝合金加力泵涡壳的失效分析[J]. 金属热处理, 2007,33(10):114—118.
- [2] Zhang X B, Liu C S. Cavitation Erosion Behavior of WC Coatings on CrNiMo Stainless Steel by Laser Alloying [J]. International Journal of Minerals Metallurgy and Materials, 2009, 16(2):203—207.
- [3] 罗景峰,刘小峰. 飞机燃油系统铝合金选用[J]. 航空制造技术,2009,(10):60—62.
- [4] Tomlinson W J, Matthews S J. Cavitation Erosion of Aluminium Alloys [J]. Journal of Materials Science, 1994, 29:1 101—1 108.
- [5] Santa J F, Espitia L A. Slurry and Cavitation Erosion Resistance of Thermal Spray Coatings [J]. Wear, 2009, 267:160—167.
- [6] 赵刚. 纳米结构 WC-12Co 金属陶瓷涂层制备工艺及抗汽蚀机理的研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2007.
- [7] Lima M M, Godoy C. Coating Fracture Toughness Determined by Vickers Indentation: an Important Parameter in Cavitation Erosion Resistance of WC-Co Thermally Sprayed Coatings[J]. Surface and Coatings Technology, 2004,(177,178):489—496.
- [8] Stewart D A, Shipway P H. Influence of Heat Treatment on the Abrasive Wear Behaviour of HVOF Sprayed WC-Co Coatings [J]. Surface and Coatings Technology, 1998, 105:13—24.
- [9] Stewart D A, Shipway P H. Abrasive Wear Behaviour of Conventional and Nanocomposite HVOF-sprayed WC-Co Coatings [J]. Wear, 1999, 225:789—798.
- [10] Bolelli G, Giovanardi R. Corrosion Resistance of HVOF-sprayed Coatings for Hard Chrome Replacement [J]. Corrosion Science, 2008, 48: 3 375—3 397.
- [11] 王志平. 高速火焰与等离子喷涂 WC/Co 涂层的性能比较[J]. 中国表面工程, 1999,(2):18—20.