

超音速火焰喷涂涂层抗高温氧化和耐冲蚀性能

王志平¹, 纪朝辉¹, 李全华², 刘长江²

(1. 中国民用航空学院 理学院, 天津 300300 2 哈尔滨汽轮机厂
有限责任公司, 哈尔滨 150046)

摘 要: 采用超音速火焰喷涂 (HVOF) 技术喷涂 WC 涂层, 并对其抗高温氧化和耐冲蚀性能进行测定。试验结果显示, 与基体 1Cr12WMoV 比较, HVOF 制备的 WC-17Co WC-12Co NiCrBSi+35WC 涂层具有非常良好的抗高温氧化和耐冲蚀性能。其中 WC-17Co 涂层在任何冲蚀角度下均表现出优良的抗冲蚀能力, 是一种理想的汽轮机高压部件防护涂层。

关键词: 超音速火焰喷涂; WC 涂层; 高温氧化; 冲蚀性能

中图分类号: TG 148 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2005)12-06-03



王志平

0 序 言

高温下的固体微粒侵蚀是汽轮机高压部件常见的问题, 其失效机理是高温氧化和冲蚀磨损, 因此为了提高部件的使用寿命, 就必须提高其抗高温氧化和耐冲蚀磨损的能力^[1~6]。

目前工业上常用的高温防护涂层是采用等离子喷涂技术制备 WC 涂层。由于等离子喷涂的涂层与基体结合强度较低, 孔隙率较高, 涂层中的氧化物含量很高, 所以 WC 涂层很容易出现高温氧化和冲蚀磨损, 导致涂层的抗固体微粒侵蚀性能较差^[1]。此外, 国内外还采用物理或化学渗、离子注入等工艺方法对汽轮机高压部件表面进行强化。但由于强化层深度的限制, 高压部件工作寿命至今仍未得到大幅度地提高。因此, 如何进一步改善汽轮机高压部件的抗冲蚀性能, 提高其使用寿命是汽轮机制造与维修技术进步的重要课题之一。

超音速火焰喷涂 (HVOF) 是 20 世纪 80 年代出现的热喷涂技术, 它的发展与应用给热喷涂领域带来了一次革命性的进步。HVOF 最突出的工艺特点是具有非常高的颗粒飞行速度 (1 200 m/s), 同时喷涂燃流温度又相对较低 (3 400 K)。HVOF 的这种特殊工艺特性的主要贡献为, 其大幅度地提高了涂层的结合强度、密度和硬度, 同时减少甚至消除了涂层中的氧化物含量^[2~4]。并且涂层内应力状态完全不同于传统的热喷涂涂层, 由拉应力转变为压应力。

因此, 采用 HVOF 技术制备抗固体微粒侵蚀的 WC 涂层, 将解决涂层结合强度低、孔隙率高、脆性氧化物含量高和涂层厚度受限制等一系列难题。为进一步提高汽轮机高压部件的抗冲蚀性能和使用寿命提供了必要的技术条件, 具有很大的应用前景。由于目前国内在这个领域地研究还很不充分, 故作者采用 HVOF 技术喷涂 WC 涂层, 并模拟汽轮机高压部件的工矿条件, 对涂层抗高温氧化和耐冲蚀性能进行较详细地研究。

1 试验方法

1.1 涂层制备

作者采用的基体材料为 1Cr12WMoV, 试样尺寸 25 mm×16 mm×6 mm。喷涂前对试样表面进行喷砂处理, 所用砂为白刚玉, 粒度范围在 30~80 目。试验涂层所用的 WC-17Co 和 WC-12Co 材料是由美国 TAFA 公司提供的烧结破碎粉末; 所用的 NiCrBSi+35%WC 粉末材料是由成都大光公司提供的。粉末的粒度在 15~45 μm, 形状均为近似球形, 从而保证粉末具有良好的流动性, 满足喷涂送粉的要求。喷涂设备为美国 TAFA 公司的 JP5000 和自制的 JK3400 型液体燃料-氧气超音速火焰喷涂 (HVOF) 系统。试验涂层厚度为 2~2.5 mm。

1.2 涂层性能测试方法

高温氧化试验采用增重试验法。试验条件: 将试样在箱式炉中加热到 600℃并保温 48 h 然后炉中冷却, 冷却后进行称重 (精度为 1/10 000 g)。

涂层冲蚀性能试验是在 GWCS-1 型高温冲蚀

试验机上完成的。试验前每个试样均进行 $620\text{ }^{\circ}\text{C}\times 24\text{ h}$ 的高温氧化处理,并且每个试样冲蚀前后均进行 30 min 超声波清洗和称重(天平的精度为 $1/10\text{ }000\text{ g}$)。试验所用石英砂的粒度为 $+70\sim -110$ 目;冲击气流速度为 110 m/s ;温度为常温和 $600\text{ }^{\circ}\text{C}$;冲击角度分别为 30° 、 60° 、 90° ;每次用砂量为 50 g ;每次冲蚀时间为 5 min 。用冲蚀过程中涂层体积损失率的倒数 K_v^{-1} 来表征热喷涂涂层的耐冲蚀性能($\text{WC}-12\text{Co}$ 、 $\text{WC}-17\text{Co}$ 的比重约为 13.6 mg/mm^3 , $\text{NiCrBSi}+35\%\text{WC}$ 的比重约为 10 mg/mm^3 , 1Cr12W1MoV 的比重约为 8 mg/mm^3)。所有试验条件相同时, K_v^{-1} 值越大表明涂层耐冲蚀性能越好。

2 试验结果及分析

2.1 涂层高温氧化试验结果

热喷涂涂层与母材的高温氧化试验结果如图 1 所示。由图 1 可以看出: HVOF 喷涂的 WC 涂层具有优良的抗高温氧化性能。三种涂层中, $\text{NiCrBSi}+35\%\text{WC}$ 涂层抗高温氧化性能最好,氧化后的重量增量只为母材 1Cr12W1MoV 增量的 27% ; WC-Co 涂层的抗高温氧化性能略好于母材,氧化后重量增量为母材增量的 64% 。由于 1Cr12W1MoV 为具有良好抗高温氧化性能的高温材料,所以其表面的抗高温冲蚀涂层同时应具有更高的抗高温氧化性能。试验结果证实了以上三种涂层均具有高于 1Cr12W1MoV 的抗高温氧化性能,能够满足 $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下的工作条件。

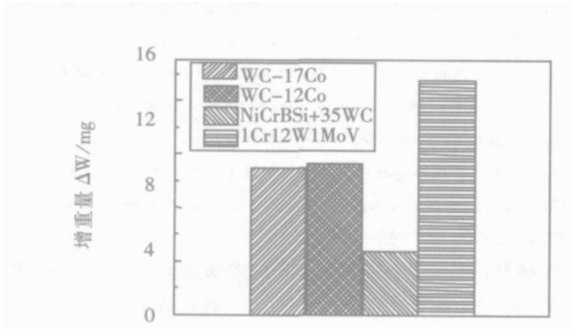


图 1 热喷涂涂层高温氧化试验结果 ($600\text{ }^{\circ}\text{C}$)
Fig. 1 Results of oxidation test for coatings ($600\text{ }^{\circ}\text{C}$)

2.2 涂层冲蚀性能试验结果与分析

室温和高温 ($600\text{ }^{\circ}\text{C}$) 的气固微粒冲蚀试验结果如图 2a、b 所示。图 3a、b 是涂层对基体的相对耐冲蚀性能。试验结果表明, HVOF 涂层具有良好的抗微粒冲蚀性能,但随着冲蚀角度的增大涂层的抗冲蚀性能下降很快。而母材金属的抗冲蚀能力却对冲

蚀角度没有那么敏感(见图 2),高温和常温试验结果都表现出同样的规律。在冲蚀角度为 30° 时 HVOF 喷涂的 $\text{WC}-17\text{Co}$ 、 $\text{WC}-12\text{Co}$ 甚至 $\text{NiCrBSi}+35\%\text{WC}$ 涂层均表现出了很好的抗冲蚀能力,但当冲蚀角增大到 90° 时 $\text{NiCrBSi}+35\%\text{WC}$ 涂层的抗冲蚀能力已经与母材相当,甚至在 $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时还低于母材。尽管 HVOF 喷涂涂层对冲蚀角度非常敏感,但 HVOF 喷涂的 $\text{WC}-17\text{Co}$ 涂层却始终表现出相当高的抗微粒冲蚀性能,在室温下冲蚀角为 30° 时其抗冲蚀性能是 1Cr12W1MoV 母材的 3.1 倍,冲蚀角为 90° 时其抗冲蚀性能仍达到 1Cr12W1MoV 母材的 1.5 倍(见图 3a);在 $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 高温冲蚀条件下,冲蚀角为 30° 时其抗冲蚀性能是 1Cr12W1MoV 母材的 3.3 倍,冲蚀角为 90° 时其抗冲蚀性能也达到了 1Cr12W1MoV 母材的 1 倍(见图 3b)。

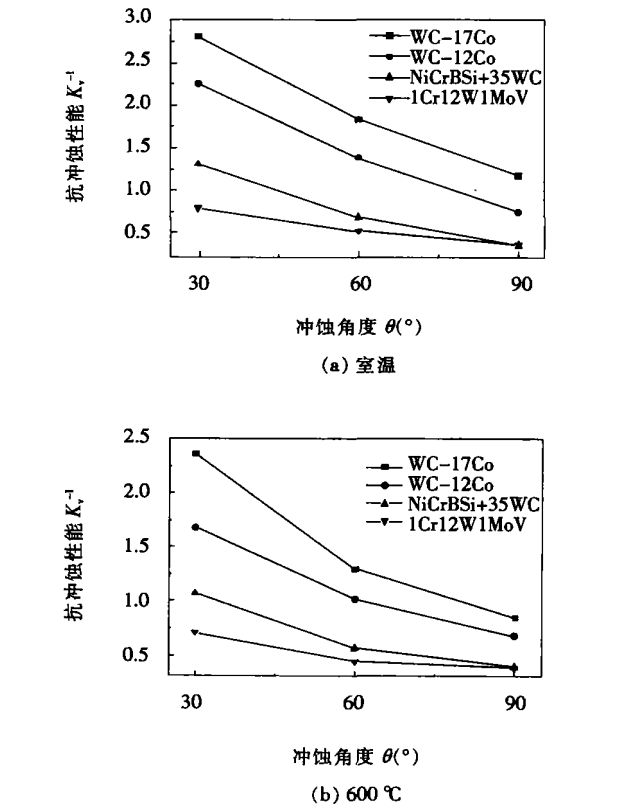


图 2 涂层及基体的耐冲蚀性能与冲蚀角度的关系
Fig. 2 Relationship between erosion resistance of coatings and substrate and impingement angle

图 4a、b 分别为冲蚀角为 30° 和 90° 时, 1Cr12W1MoV 母材金属和 $\text{WC}-17\text{Co}$ 涂层冲蚀后的表面形貌。它们的形貌说明在冲蚀过程中涂层没有出现开裂、剥落等失效现象。与此同时冲蚀后的表面形貌也揭示了基体材料与涂层抗微粒冲蚀的行

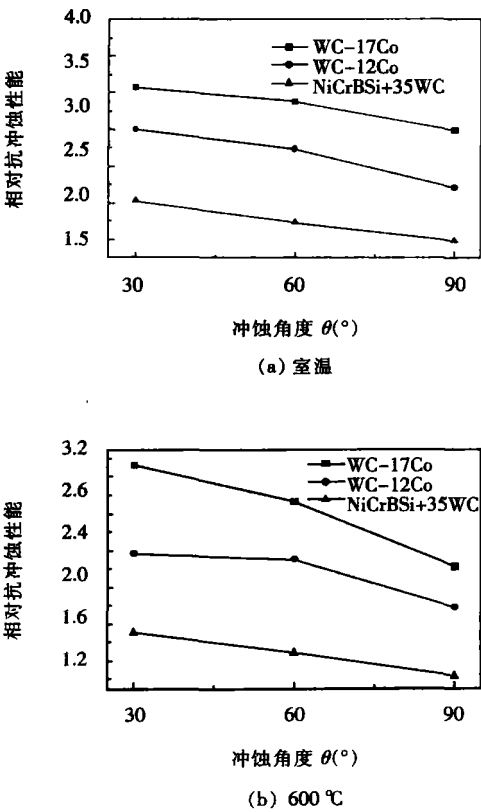


图 3 涂层对基体的相对耐冲蚀性能
Fig 3 Relative erosion resistance of coatings to substrate

为。基体材料由于硬度较低，特别是高温硬度更低，冲蚀颗粒在其表面划犁出较深的沟槽，致使基体材料表面体积损失很大，抗微粒冲蚀性能明显不足。而 HVOF 喷涂 WC-Co 涂层经微粒冲蚀后，表面仍很光滑无明显划痕。而且没有任何龟裂和脱落，所以其表现出良好的抗微粒冲蚀性能。作者认为其主要原因是涂层结合强度高、硬度高、密度大，且 WC 颗粒在涂层的保留率非常高。由此可以表明，在零部件表面应用 HVOF 喷涂 WC-17Co 涂层是一个非常有效可行的提高 1Cr12W1MoV 母材抗微粒冲蚀性能的工艺技术。

3 结 论

- (1) HVOF 制备的 WC 涂层具有优良的抗高温氧化性能和抗微粒冲蚀性能。
- (2) 三种涂层中，NiCrBSi+35WC 涂层抗高温氧化性能最好，WC-Co 涂层的抗高温氧化性能略好于母材。WC-17Co 涂层耐冲蚀性能最高，当冲蚀角小于 30° 时，其高、低温抗微粒冲蚀能力是

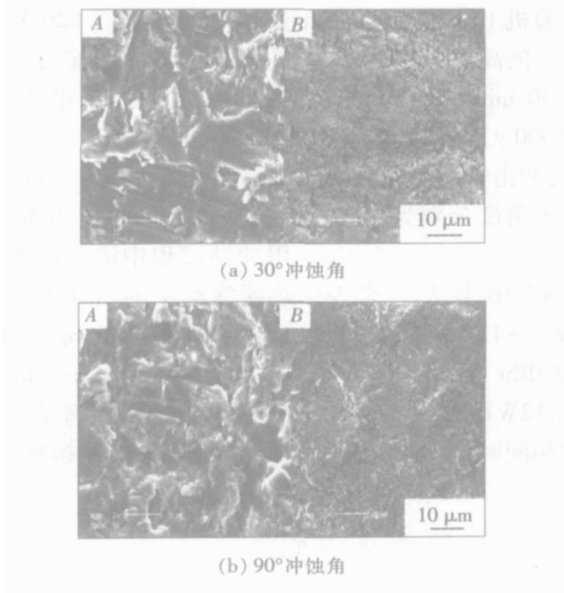


图 4 冲蚀后母材 1Cr12W1MoV (A) 和涂层 WC-17Co (B) 表面形貌 (600 °C)
Fig 4 Micrograph of 1Cr12W1MoV substrate (A) and WC-17Co coating (B) after erosion

1Cr12W1MoV 材料的 3 倍以上。与此相比，WC-12Co 涂层次之，NiCrBSi+35WC 涂层较差。
(3) HVOF 喷涂的 WC-Co 涂层在微粒冲蚀条件下，没有发生任何开裂、剥落等涂层失效现象。

参考文献:

- [1] 张 平, 王海军, 朱 胜, 等. 高效能超音速等离子喷涂系统的研制 [J]. 中国表面工程, 2003 16(3): 12-16
- [2] Fedrizzi L, Rossi S, Cistelli R, et al. Corrosion and wear behaviour of HVOF cement coatings used to replace hard chromium [J]. Electrochimica Acta 2004 49: 2803-2814.
- [3] Machio C N, Akdogan G, Witcomb M J. Performance of WC-VG-Co thermal spray coatings in abrasion and slurry erosion tests [J]. Wear 2005 258: 434-442.
- [4] 袁晓静, 王汉功, 查柏林, 等. 多功能超音速火焰喷涂 WC10Co4Cr 涂层磨损性能研究 [J]. 材料科学与工程学报, 2004 22(2): 204-208.
- [5] 张玉娟, 孙晓峰, 金 涛. 爆炸喷涂 NiCrAlY 涂层的高温抗氧化行为 [J]. 金属学报, 2003 39(2): 189-192.
- [6] 胡传顺, 王福会, 吴维岁. 超音速火焰喷涂包覆涂层的高温氧化性能 [J]. 腐蚀科学与防护技术, 2001 13(增刊): 421-423.

作者简介: 王志平, 男, 1963 年 1 月出生, 工学博士, 教授。主要研究热喷涂工艺、设备以及涂层性能等。发表论文 10 余篇。
Email: zpwang@cauc.edu.cn

MAN TOPICS ABSTRACTS & KEY WORDS

Study on arc stability of SACTIG and VPTIG(I) FANG Chen¹, CHEN Shu-jun¹, LIU Jia¹, YIN Shu-yan¹, SONG Yong-hui¹, LI Huan³, HOU Run-shi⁴, WEN Yong-ping² (1 College of Mechanical Engineering & Applied Electronics Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China; 2 Provincial Key Laboratory of Advanced Welding Technology, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang, Jiangsu 212003, China; 3 Material College, Tianjing University, Tianjing 300072, China; 4 Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China). p1-5

Abstract The welding current, arc voltage and shape of SACTIG and VPTIG welding were collected by high speed camera system and welding arc analyzer. The relation between welding arc stability and associated parameters during the passing zero time of SACTIG and VPTIG welding current was analyzed. The studied results indicated that (50 Hz) SACTIG arc may go out and reignite during changing polarity. While welding current increase to a threshold the arc will not go out. The higher reignition voltage will cause the longer arc going out, so the arc stability becomes worse. If reignition voltage is equal to arc voltage, the arc will not go out.

Keywords SACTIG; VPTIG; arc; stability

Thermal fatigue of WC coatings deposited with HVOF WANG Zhi-ping¹, JI Zhao-hui¹, LI Quan-hua², LIU Chang-jiang² (1 College of Science, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China; 2 Harbin Turbine Co., Ltd., Harbin 150046, China). p6-8

Abstract The thermal shock resistance of the WC coating deposited with HVOF was studied. The results indicated that HVOF coatings after 15 times thermal shock are all perfect without any defects as cracks, spalling. In contrast with the coatings deposited with plasma, they have cracked and spalled completely after 3 times thermal shock. HVOF WC coatings resistance ability to thermal shock is very excellent.

Keywords HVOF; WC coating; Thermal shock resistance; Thermal shock test

Finite element simulation of thermal stress on the brazed TiC cermet/iron joint FENG Ji-cai, ZHANG Li-xia (National Key Laboratory of Advanced Welding Production Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China). p9-12

Abstract Maximum value of thermal stress and stress concentration zones of iron/TiC cermet joint brazed at 1173 K during cooling were studied in this paper. The results show that the shear stress on iron/TiC cermet joint concentrates on the interface tip and the maximum value of the shear stress appears on the Ag-Cu-Zn/TiC cermet interface. The maximum value of tensile stress along TiC cermet undersurface appears on the tips of TiC cermet undersurface, which decreases when the temperature declines. The maximum value of compressive stress along TiC cermet undersurface appears on the center of TiC cermet undersurface, which increases when the temperature declines.

Keywords Finite element simulation; TiC cermet; iron; brazing

“In situ” wet alloying of plasma arc welding of SiCp/AlMMC LEI Yu-cheng, YUAN Wei-jin, ZHU Fei, BAO Xu-dong (Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China). p13-16

Abstract Plasma arc welding was used to join SiCp/Al composite and titanium used as alloy filler. Microstructure of the weld is characterized as functions of alloy content. Results show that the acicular lamellar phase Al₄C₃ is completely eliminated in the weld of SiCp/AlMMC by “in situ” wet alloying of plasma arc welding with titanium. The wetting property was improved between reinforced phase and Al matrix. A stable weld pool, a novel composite material welded joint reinforced by TiN and AlN was produced and welding performance was improved effectively because of the use of titanium. “In situ” wet alloying of plasma arc welding is a new promising method for joining of SiCp/AlMMCs.

Keywords SiCp/AlMMC; plasma arc welding; “in situ” wet alloying; aluminum carbide; titanium nitride; aluminum nitride

Numerical simulation of temperature field in friction stir welding WANG Xi-jing, HAN Xiao-hui, Guo Rui-jie, LI Jing (State Key Laboratory of Advanced Non-ferrous Metal Materials, Gansu Province, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2 Sifang Locomotive & Rolling Stock Ltd., CSR, Qingdao 266031, China). p17-20

Abstract The simplified thermal transfer model was supposed. The moving coordinate system following the heat source was established by using software ANSYS. The method of step-by-step loading was applied in the simulation. The transient temperature field in different positions and thermal cycle curves at different times of 3mm LY12 plate were calculated during the whole welding course. So the temperature field distribution in