

超音速电弧喷涂 FeAlNbB 涂层的摩擦磨损行为

周勇, 王猛, 赵飞, 党墨含

(西安石油大学 材料科学与工程学院, 西安 710065)

摘 要: 目的 探讨 FeAlNbB 涂层的制备方法, 研究 FeAlNbB 涂层的组织结构及摩擦磨损行为。方法 通过超音速电弧喷涂技术制备 FeAlNbB 涂层, 采用扫描电镜 (SEM)、X 射线衍射仪 (XRD) 分析 FeAlNbB 涂层的组织结构及相组成, 并利用显微硬度计和摩擦磨损试验机对 FeAlNbB 涂层的硬度及摩擦学行为进行研究。结果 FeAlNbB 涂层主要由 α -Fe、Fe₃Al、FeAl 相组成, 涂层的平均硬度为 700HV。在试验参数下, 涂层的摩擦系数在 0.2~0.4 之间, 涂层的耐磨性为 20[#]钢的 12~33 倍, 涂层的磨损机理主要以犁沟效应和磨粒磨损为主。结论 超音速电弧喷涂制备的 FeAlNbB 涂层与基体结合良好, 组织致密。涂层中无非晶组织, 但涂层的硬度、耐磨性能与 FeAlNbB 非晶态涂层相当。

关键词: 超音速电弧喷涂; FeAlNbB 涂层; 组织结构; 摩擦磨损

中图分类号: TG174.442; TH117 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2017)10-0156-05

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2017.10.022

Friction and Wear Behavior of FeAlNbB Coating by Supersonic Electric Arc Spraying

ZHOU Yong, WANG Meng, ZHAO Fei, DANG Mo-han

(School of Material Science and Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China)

ABSTRACT: The work aims to study structure as well as friction and wear behavior of FeAlNbB coating by discussing preparation method of the coating. FeAlNbB coating was prepared by adopting supersonic electric arc spraying technology. Structure and phase composition of FeAlNbB coating were analyzed by using SEM and X-ray diffractometer. Hardness and tribological behavior of the FeAlNbB coating were studied by using microhardness tester and friction-wear tester. The FeAlNbB coating was mainly composed of α -Fe, Fe₃Al and FeAl phases. Average hardness of the coating was 700HV. Provided with test parameters, friction coefficient of the coating ranged between 0.2~0.4, wear resistance of the coating was 12~33 times as high as that of 20[#] steel, and wear mechanism of the coating was mainly plowing effect and abrasive wear. The FeAlNbB coating prepared by supersonic electric arc spraying is compact and well bonded to the substrate. There is no crystalline structure in the coating, but hardness and wear resistance of the coating are equivalent to that of FeAlNbB amorphous coating.

KEY WORDS: supersonic electric arc spraying; FeAlNbB coating; structure; friction and wear

收稿日期: 2017-07-31; 修订日期: 2017-08-21

Received: 2017-07-31; Revised: 2017-08-21

基金项目: 陕西省重点学科专项资金资助项目 (ys37020203)

Fund: Supported by Shaanxi Province Key Discipline of Special Funded Projects (ys37020203)

作者简介: 周勇 (1963—), 男, 博士, 教授, 主要从事石油工程材料表面工程技术研究。

Biography: ZHOU Yong (1963—), Male, Doctor, Professors, Research focus: petroleum engineering materials surface engineering technology.

利用超音速电弧喷涂技术制备的涂层具有孔隙率低、致密度高、结合强度高的特点，因此在工业生产中得到广泛使用^[1-4]。Fe-Al 合金具有一系列优点，如较低的密度、高熔点、良好的导热性、抗氧化和耐腐蚀等，是具有巨大发展潜力的高温涂层材料^[5]。而 FeAl 金属间化合物因塑形和强度较低，限制了其在工业中的应用^[6]。梁秀兵等^[7]利用高速电弧喷涂技术制备 FeBSiNbCr 系列非晶涂层，发现涂层结构致密、组织均匀，具有更好的性能。田浩亮等^[8]用高速电弧喷涂技术制备 FeAlNbB 非晶纳米晶涂层，结果表明涂层组织均匀、结构致密，耐磨性是 3Cr13 的 2.2 倍。电弧喷涂由于设备简单、喷涂丝材为粉芯丝材且易于加工等特点而被广泛应用。铁基材料由于具有成本低、可加工性好、环境友好等优势，而引起了人们大量研究^[9-10]。本文利用超音速电弧喷涂技术在 20#钢基体表面制备 FeAlNbB 涂层，分析了涂层的物相组成、组织形貌、硬度，并对 FeAlNbB 涂层的摩擦磨损行为进行了研究。

表 2 电弧喷涂参数
Tab.2 Parameters of electric arc spraying

空气压力/MPa	燃气压力/MPa	喷涂距离/mm	喷涂角度/(°)	喷枪速度/(cm·s ⁻¹)	工作电压/V	工作电流/A
0.59	0.52	150	90	10~15	31.1	193

1.2 方法

喷涂完成后，用线切割方法将喷涂后的试板切割成不同的试样，备用。涂层的相结构分析采用 XRD-6000 型 X 射线衍射仪，工作方式为连续扫描，工作参数为：扫描速度 2 (°)/min，扫描范围 10°~90°，步长 0.02°。涂层的组织结构采用 JSM6390A 扫描电镜进行观察。使用 HXD-1000TMC 显微硬度测试仪测量涂层的显微硬度。基体 20#钢和 FeAlNbB 涂层的摩擦磨损行为采用 MMX-3G 多功能摩擦磨损试验机进行试验，转速为 100、150 r/min，载荷为 100、150 N，常温干摩擦，摩擦副为止推圈。

2 结果与分析

2.1 XRD 分析和组织结构

图 1 为 FeAlNbB 涂层截面的 SEM 形貌，可以发现涂层各处厚度都在 300 μm 以上，平均值为 341 μm，涂层与基体结合良好且在结合处没有明显的孔隙。

图 2 为 FeAlNbB 涂层的截面 SEM 形貌，涂层由变形良好的带状粒子相互搭接堆积，呈现典型的层状结构，层与层之间结合紧密，孔隙较少，通过 Image-tool 软件分析得出孔隙率为 2.08%。

图 3 为 FeAlNbB 涂层表层和中部的 X 射线衍射

1 试验

1.1 材料

基体材料为 20#钢，尺寸为 50 mm×25 mm×2 mm。喷涂材料为自行设计的 Fe 基粉芯丝材，Al、Nb、B 粉的纯度均达到 99.9%，粉芯丝材直径为 2.0 mm。丝材成分如表 1 所示。

表 1 FeAlNbB 丝材成分及含量
Tab.1 Composition and content of FeAlNbB wire
wt%

元素	Al	Nb	B	Fe
含量	<20	<10	<5	余量

喷涂前利用超声波清洗机对基体材料进行除油、除锈，之后采用射吸式喷砂机对其进行喷砂处理，保证基体表面获得规定的粗糙度，然后立即进行喷涂。采用 TRS300H 型电弧喷涂系统制备涂层，喷涂参数见表 2。

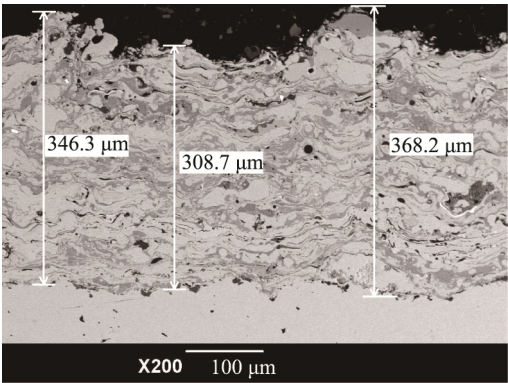


图 1 FeAlNbB 涂层的截面 SEM 形貌
Fig.1 SEM cross-sectional morphology of FeAlNbB coating

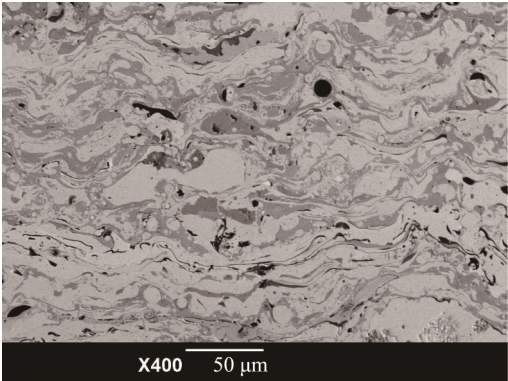


图 2 涂层的截面形貌
Fig.2 Cross-sectional morphology of coating

图谱,可以发现涂层的表面和中部都不存在漫散射峰,即无非晶相。涂层主要由 α -Fe、 Fe_3Al 、 FeAl 相

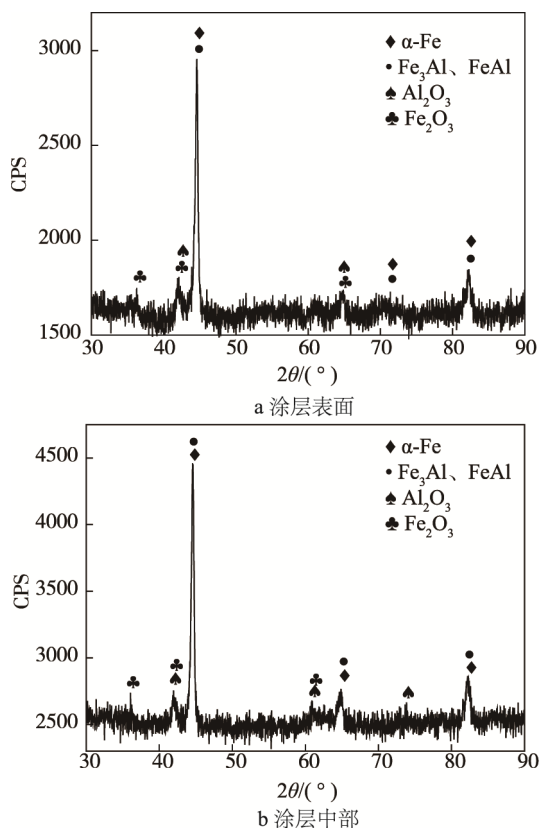
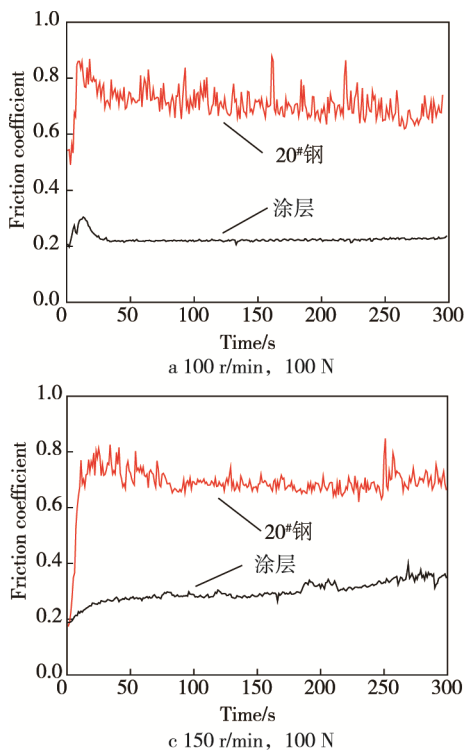


图3 FeAlNbB涂层的XRD图谱

Fig.3 XRD spectrum of FeAlNbB coating: (a) coating surface, (b) coating center



和少量的 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 构成,其中 Fe_3Al 、 FeAl 金属间化合物具有高硬度和优异的耐磨耐蚀性。

2.2 涂层的显微硬度

图4为FeAlNbB涂层的显微硬度。从图4可以发现,基体的显微硬度在160HV左右,涂层的显微硬度在700HV左右,其硬度与田浩亮等人^[8]所制备的FeAlNbB非晶态涂层相当。涂层中,金属间化合物 Fe_3Al 、 FeAl 及硬质陶瓷相 Al_2O_3 的存在是涂层具有高硬度的主要原因,这些硬质相弥散分布在涂层中,可以起到弥散强化作用,从而显著提高涂层的硬度。

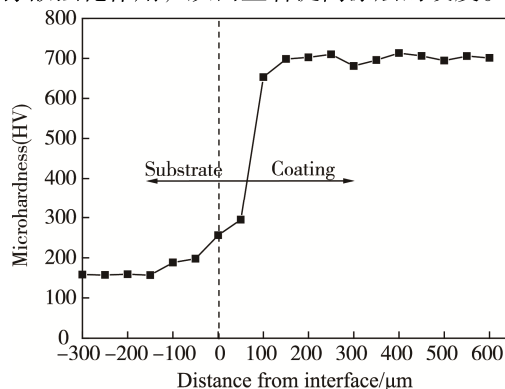


图4 涂层的显微硬度

Fig.4 Microhardness of coating

2.3 摩擦磨损性能分析

图5为涂层、20#钢在不同载荷和转速下的摩擦系

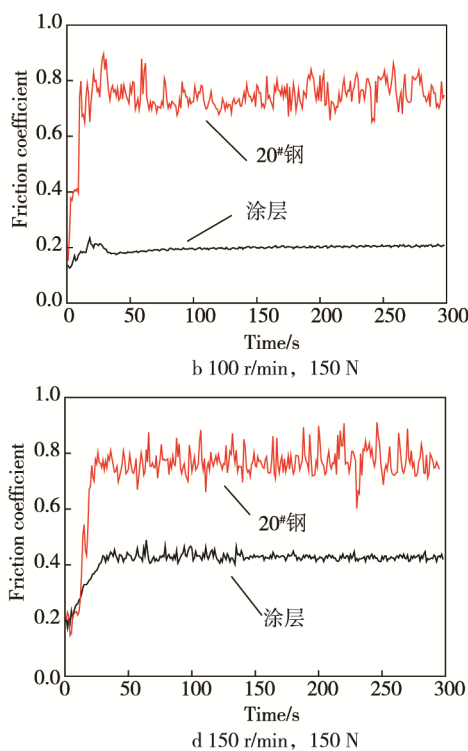


图5 涂层和20#钢在不同载荷和转速下的摩擦系数

Fig.5 Friction coefficient of coating and 20# steel at different load and speed

数曲线。从图 5 可以发现, 摩擦系数曲线具有较典型的饱和阶段和稳定磨损阶段^[11]。比较图 5a 和图 5b 可以发现, 当转速为 100 r/min 时, 载荷从 100 N 增加到 150 N, 涂层与基体的摩擦系数基本保持稳定。涂层的摩擦系数在 0.2~0.35 之间, 基体的摩擦系数在 0.75 左右。当转速增加到 150 r/min (图 5c、5d) 时, 可以发现, 20#钢基体的摩擦系数基本不变, 但涂层的摩擦系数随着转速和载荷的增加都有较明显的增加, 说明涂层在摩擦磨损过程中可能存在硬质相脱落。

图 6 为涂层和 20#钢在不同转速下的磨损量对比图。采用图 6a 中的数据进行计算可以得出, 当转速为 100 r/min、载荷为 100 N 和 150 N 时, 基体 20#钢的磨损量分别是涂层的 33 倍和 12 倍。同理, 当转速为 150 r/min、载荷为 100 N 和 150 N 时 (图 6b), 基体 20#钢的磨损量分别是涂层的 39 倍和 14 倍。从实验数据分析可以发现, 随着载荷的增加, 涂层的磨损性能明显下降。当转速发生变化时, 涂层的磨损量随载荷的增加稍有增加。

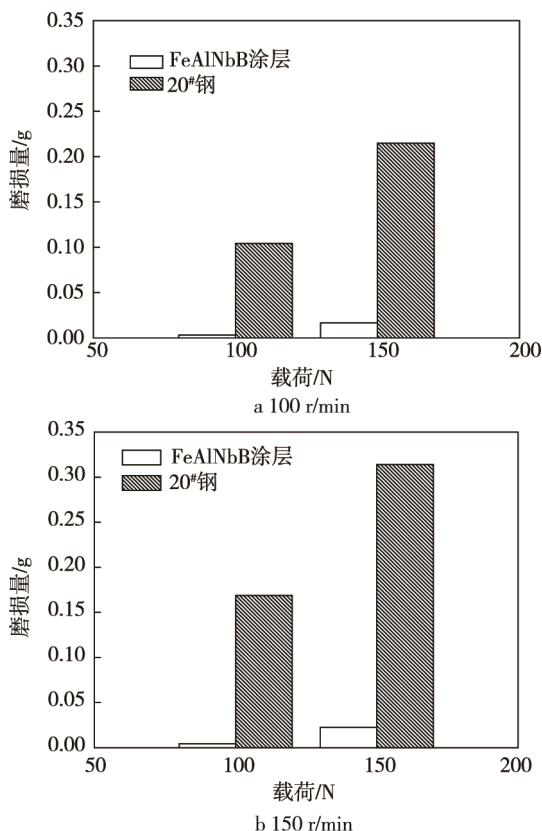


图 6 涂层和 20#钢在不同转速下的磨损量

Fig.6 Abrasion loss of coating and 20# steel at different speed

2.4 磨损形貌

图 7 为涂层和 20#钢磨损后的表面形貌, 从图 7a 可以发现, 超音速电弧喷涂制备的 FeAlNbB 涂层的磨损表面存在部分粒子剥落和凹坑, 磨面上存在较浅的犁沟, 磨损过程中产生较多磨屑, 在法向载荷作用

下, 一部分磨粒被压入涂层表面, 止推圈在磨面上滑动并剪切和切削涂层, 进而形成槽状磨痕, 随着磨损的进行, 涂层表面出现局部剥落, 使得磨屑在表面堆积进而产生犁沟。因此, 涂层的磨损形式主要为犁沟效应和磨粒磨损。FeAlNbB 涂层由金属间化合物 Fe_3Al 、 FeAl 相组成, 金属间化合物具有较高的硬度和良好的耐磨性, 均匀地分布在涂层中, 且与 $\alpha\text{-Fe}$ 相容性较高, 起到弥散强化作用。利用超音速电弧喷涂技术制备的涂层具有熔滴细小、金属间化合物分布更加均匀的特点, 使得 FeAlNbB 涂层在无晶态组织的情况下也具有较好的耐磨性能, 说明 FeAlNbB 涂层的耐磨性不仅与非晶相的存在有关, 主要还与涂层中形成的金属间化合物、硬质相分布有关。图 7b 为 20#钢磨损后的表面形貌, 20#钢的磨损失效主要为粘着磨损。

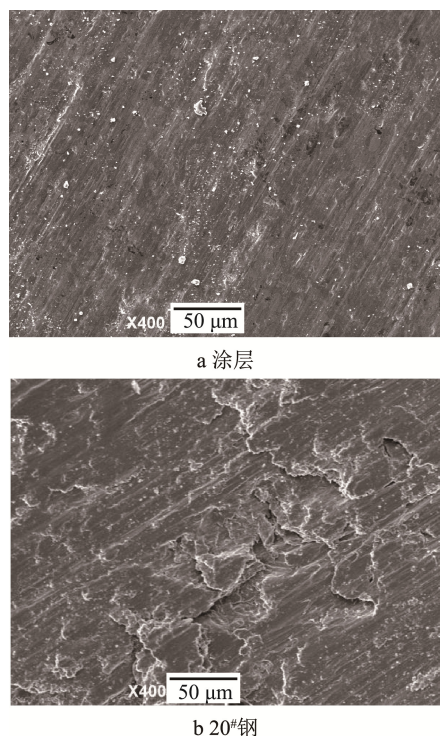


图 7 涂层和 20#钢磨损后的表面形貌

Fig.7 Morphology of coating and 20# steel after wear

3 结论

1) 超音速电弧喷涂制备的 FeAlNbB 涂层组织均匀、结构致密, 呈层状结构, 与基体结合良好, 孔隙率为 2.08%。

2) 超音速电弧喷涂制备的 FeAlNbB 涂层主要由 $\alpha\text{-Fe}$ 、 Fe_3Al 、 FeAl 相构成, 涂层中分布的 Fe_3Al 、 FeAl 都属于硬质相, 提高了涂层的硬度。涂层的硬度约为 700HV, 摩擦系数小, 耐磨性是 20#钢的 12~33 倍。FeAlNbB 涂层的失效形式主要为犁沟效应和磨粒磨损。

3) 超音速电弧喷涂制备的 FeAlNbB 涂层, 无非

晶组织, 但涂层的硬度、耐磨性能与 FeAlNbB 非晶态涂层相当。

参考文献:

- [1] 易春龙. 电弧喷涂技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006: 14.
YI Chun-long. Elcetric Arc Spraying Technology[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006: 14.
- [2] 查柏林, 王汉功, 杨晖, 等. 超音速电弧喷涂技术[J]. 机械工人, 2002(6): 16-18.
ZHA Bai-lin, WANG Han-gong, YANG Hui, et al. Supersonic Arc Spraying Technology[J]. Machinery Workers, 2002(6): 16-18.
- [3] 王引真, 孙永兴. 热喷涂技术在石油石化工业中的应用与发展[J]. 石油工程建设, 2004, 30(4): 1-5.
WANG Yin-zhen, SUN Yong-xing. Thermal Spray Technology and Development of Petroleum and Petrochemical Industry[J]. Petroleum Enigneering Construction, 2004, 30(4): 1-5.
- [4] 赵文轸. 材料表面工程导论[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2001.
ZHAO Wen-zhen. Introduction to Surface Enigneering[M]. Xi'an Jiaotong University Press, 2001.
- [5] 望斌, 彭志方, 张凡, 等. 粉末冶金制备 Fe-Al 金属间化合物材料研究进展[J]. 材料导报, 2007, 21(1): 75-82.
WANG Bing, PENG Zhi-fang, ZHANG Fan, et al. Research Progress in Preparing Iron Aluminide Intermetallics Matermetalics by Powder Metallurgy[J]. Material Review, 2007, 21(1): 75-82.
- [6] LA Pei-qing, YANG Jun, DAVID J H. Bulk NanocrySTALLINE Fe₃Al-basedmaterial Prepared by Alumina Thermic Reaction[J]. Advanced Materials, 2006, 18(6): 733-737.
- [7] 梁秀兵, 程江波, 白金元, 等. 铁基非晶纳米晶涂层组织与冲蚀性能分析[J]. 焊接学报, 2009, 30(2): 61- 64.
LIANG Xiu-bing, CHENG Jiang-bo, BAI Jin-yuan, et al. Microstructure and Erosion Properties of Fe-based Amorphous and Nanocrystalline Coatings[J]. Journal of Welding, 2009, 30(2): 61-64.
- [8] 田浩亮, 魏世丞, 陈永雄, 等. 高速电弧喷涂 FeAlNbB 非晶纳米晶涂层的组织与性能[J]. 材料科学与工艺, 2012, 20(1): 108-113.
TIAN Hao-liang, WEI Shi-cheng, CHEN Yong-xiong, et al. Microstructure and Mechanical Properties of FeALNbB Amorphous/Nanocrystalline Coatings Deposited by High Velocity Arc Spaying[J]. Materials Science and Technology, 2012, 20(1): 108-113.
- [9] 赵新春. 点缺陷空位的表征与计算[D]. 南宁: 广西大学, 2007.
ZHAO Xin-chun. The Characterization and Calculation of Vacancy[D]. Nanning: Guangxi University, 2007.
- [10] TIWARI G P, PATIL R V. A Correlation between Vacancy Formation Energy and Cohesive Energy[J]. Scripta Metallurgica, 1975, 9(8): 833-836.
- [11] 郭金花, 吴嘉伟, 倪晓俊, 等. 电弧喷涂含非晶相的 Fe 基涂层的电化学行为[J]. 金属学报, 2007, 43(7): 780-784.
GUO Jin-hua, Wu Jia-wei, Ni Xiao-jun, et al. Electrochemical Behavior of Fe-based Coatings Containing Amorphous Phase Prepared by Electric Arc Spraying[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2007, 43(7): 780-784.