

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.20160714001

FeCrBSiNb非晶涂层的制备及其性能

梁秀兵, 王 慧, 商俊超, 范建文, 陈永雄

(装甲兵工程学院 机械产品再制造国家工程研究中心, 北京 100072)

摘 要: 采用火焰喷涂自制的FeCrBSiNb气雾化合金粉末, 制备了高非晶含量的Fe基非晶涂层。利用X射线衍射仪、扫描电镜和透射电镜分析了粉末和涂层的相组织结构、表面形貌和微观特征。结果表明: FeCrBSiNb合金粉末主要有FeCrSi固溶体和B化物组成, 粉末球形度较好, 大颗粒粉末表面粗糙, 主要为枝晶状组织, 并伴有“卫星”球。制备的FeCrBSiNb非晶涂层润湿性较好, 粒子搭接边界不明显, 非晶体积分数高达80%。非晶涂层存在少量孔隙, 主要是未熔颗粒的嵌入、熔融粒子凝固时的“骤冷”应力和气体逸出造成。FeCrBSiNb非晶涂层在532~644 ℃存在明显放热峰, 玻璃转变温度 T_g 为509 ℃, 开始晶化温度 T_x 为532 ℃, 其形成非晶相的临界冷却速率为 3.458×10^3 K/s, 在同一试验条件下, 非晶涂层的相对耐磨性是45钢基体的2.6倍。

关键词: Fe基; 非晶涂层; 合金粉末; 火焰喷涂

中图分类号: TG174.442

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2017)01-0101-06

Fabrication and Properties of FeCrBSiNb Amorphous Coating

LIANG Xiu-bing, WANG Hui, SHANG Jun-chao, FAN Jian-wen, CHEN Yong-xiong

(National Engineering Research Center for Mechanical Product Remanufacturing, Academy of Armored Forces Engineering, Beijing 100072)

Abstract: FeCrBSiNb amorphous coating was prepared by flame spraying using the alloy powder fabricated by gas atomization. The phase composition, morphology and microstructure were investigated by XRD, SEM and TEM, respectively. The results show that the FeCrBSiNb alloy powder is mainly composed of FeCrSi solid solution and boride crystalline phase. Most particles are in near-spherical shape accompanied with some balls like satellites. It is mainly dendritic structure around the rough surface of big particles. The coating has a very high amorphous phase content up to 80%. The boundary of the particles melted well is not obvious. Some pores located between flattened droplets are observed in the coating, which mainly caused by the loose packed layer structure and gas porosity phenomenon and so on. The FeCrBSiNb amorphous coating crystallizes at 532~644 ℃. The glass transition top temperature T_g is about 509 ℃ and the onset top first crystallization event T_x is about 532 ℃. The critical cooling rate for glass formation of FeCrBSiNb coating is calculated to be 3.458×10^3 K/s. The wear resistance of the amorphous coating is 2.6 times compared with that of the 45 steel substrate.

Keywords: Fe-based; amorphous coating; alloy powder; flame spraying

收稿日期: 2016-07-14; 修回日期: 2016-12-07

网络出版日期: 2016-12-30 14:55; 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20161230.1455.002.html>

通讯作者: 梁秀兵(1974—), 男(汉), 研究员, 博士; 研究方向: 非晶涂层、再制造工程; E-mail: liangxb_d@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(51375492, 51575527); 教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-13-1068)

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China(51375492, 51575527) and Program for Ministry of Education of New Century Excellent Talents in University(NCET-13-1068)

引文格式: 梁秀兵, 王慧, 商俊超, 等. FeCrBSiNb非晶涂层的制备及其性能[J]. 中国表面工程, 2017, 30(1): 101-106.

LIANG X B, WANG H, SHANG J C, et al. Fabrication and properties of FeCrBSiNb amorphous coating[J]. China Surface Engineering, 2017, 30(1): 101-106.

0 引言

非晶材料具有很高的强度、硬度和优良的耐磨性、耐蚀性，在航空航天、电子电力和石油化工等领域都有广阔的应用前景^[1-2]。铁基非晶态合金具有优异的磁性能、力学性能和耐蚀性能等，被广泛应用在磁性材料、电子电力传感、精密器件和表面防护等领域^[3-4]。然而，铁基非晶态合金非晶形成能力较低，获得三维大尺寸块体非晶非常困难，极大地限制了其应用范围。近年来，利用热喷涂技术制备非晶涂层发展迅速，主要包括高速电弧喷涂(AS)、高速火焰喷涂(HVOF)、等离子喷涂(PS)和低温喷涂(CS)等方法^[5-7]。除高速电弧喷涂使用粉芯丝材外，其他几种技术都是使用高质量的非晶粉末来制备非晶涂层，非晶粉末成形的好坏直接影响非晶涂层的质量。现有的制备铁基非晶粉末的方法主要有机械法、雾化法和物理化学还原法。机械研磨和破碎法制备的非晶粉末形状不规则，流动性差；物理化学还原法制备非晶粉末粒度较细，产量低不适合应用在热喷涂领域。雾化法按冷却介质可分为水雾化和气雾化法。水雾化法是制备铁基非晶粉末主流的方法之一，但其存在粉末形状不规则，含氧量较高等问题；而气雾化法因为冷却速度不够高，制备非晶粉末产量低，成本较高。针对以上问题，文中利用真空气雾化法制备铁基合金的结晶粉末，粉末本身并不要求非晶含量，利用火焰喷涂快速冷凝的特点，制备高非晶含量的铁基涂层，为非晶涂层的制备其提供一种新的思路和方法。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料与过程

利用中频真空感应炉把FeB、SiFe、NbFe、CrFe等工业合金锭，其余为纯Fe，熔铸为 Φ 70 mm×150 mm圆柱棒。采用北京理工大学自制的5 kg级真空气雾化装置进行雾化造粉。电源为100 kW，2.5 kHz的变频电源。坩埚采用MgO坩埚，周围并用镁砂进行密封，熔炼前首先抽真空到 10^{-2} Pa，然后加热150 ℃左右时保温5 min，继续进行抽真空，消除圆柱棒表面及内部附着的有机膜及气体。待真空度稳定在 10^{-2} Pa时，停止抽真空，充入Ar气保护(防止加热过程中熔融液体飞溅)，继续加热至需要温度。炉内温度通过钨铼热电偶进行

监控，制粉具体参数如表1所示。

将经过粉末分级收集器得到的粉末经过CP-3000火焰喷涂设备制备火焰喷涂涂层。基体选择100 mm×100 mm×8 mm未经退火处理的普通45号中碳钢，对基体表面进行除油除锈，喷涂前30 min内对基体表面进行喷砂粗化，砂粒为830 μm(20目)棕刚玉，喷涂参数如表2所示。

表 1 气雾化制备FeCrBSiNb粉末参数	
Table 1 Gas atomization parameters of FeCrBSiNb powder	
Parameters	Values
Gas pressure / MPa	2.0
Gas	Ar
Nozzle diameter / mm	4.5–5
Melt superheat / ℃	250–300
Vacuum / Pa	10^{-2}

表 2 火焰喷涂FeCrBSiNb涂层工艺参数	
Table 2 Flame spraying parameters of FeCrBSiNb coating	
Parameters	Values
Fuel(C ₂ H ₂) pressure / MPa	0.13
Fuel flow / (m ³ ·h ⁻¹)	1.3
O ₂ pressure / MPa	0.7
O ₂ flow / (m ³ ·h ⁻¹)	1.25
Powder feeding rate / (g·min ⁻¹)	35
Spraying distance / mm	180
Cooling gas pressure / MPa	0.6

1.2 检测与分析方法

采用D8型X射线衍射仪分析粉末和涂层的相结构，采用Cu靶的K α 射线(λ =0.154 060 nm)，衍射角度20°~100°，衍射速度2°/min，步长为0.02°；采用Nova Nano 650型SEM场发射扫描电镜观测粉末和涂层表面及截面微观结构；采用透射电镜观察涂层的微观晶体结构。透射电子显微镜样品首先从制备的试样中利用线切割成大约300 μm厚度的纯涂层试样，然后将试样手工磨至100 μm厚度，最后采用离子减薄的方法对样品进行最终减薄。采用STA型示差热量计量仪(DSC)测量粉末和涂层相组织结构随温度变化，加热温度25~900 ℃，升温速率10 K/min。利用UMT-3型摩擦磨损机对涂层摩擦性能进行测试，磨损方式为往复球-面接触，对磨球为 Φ 4.0 mm的GCr15，涂层表面经过打磨抛光处理。试验条件为：干摩擦，载荷5 N，频率5 Hz，时间30 min，行程4.0 mm。

2 结果与讨论

2.1 粉末与涂层的相结构

图1为FeCrBSiNb粉末和涂层的XRD图谱。从图中可以看出, FeCrBSiNb粉末主要以晶体相CrFeSi固溶体和Fe(Cr)的硼化物为主, 在衍射角 2θ 约为 45° 有较宽化的迹象, 但是并不明显, 说明粉末中主要以晶体相为主。相比于粉末, FeCrBSiNb涂层在衍射角 2θ 约为 $40^\circ\sim 50^\circ$ 之间明显发生了宽化, 形成漫散射峰, 这是非晶态衍射峰的特征, 说明涂层中有非晶相的生成。通过Verdon^[8]方法对XRD图谱进行Pseudo-Voigt^[9]函数拟合, 测得涂层中非晶体积分数约为80%。

火焰喷涂FeCrBSiNb结晶粉末形成非晶涂层的原因: 一是FeCrBSiNb材料体系具有较高的非晶形成能力, 符合Ioune^[10]提出的块体非晶设计三大经验原则: 具有3种及其以上组元组成; 主要组元间原子尺寸比大于12%; 体系具有较大负混合热焓。FeCrBSiNb体系中 $\text{Nb}(0.208\text{ nm}) > \text{Cr}(0.185\text{ nm}) > \text{Fe}(0.172\text{ nm}) > \text{Si}(0.146\text{ nm}) > \text{B}(0.117\text{ nm})$, Nb/Fe, Fe/Si, Fe/B原子尺寸比和负混合热焓分别为: 17%, 15%, 31%和 -16 kJ/mol , -26 kJ/mol , -35 kJ/mol 。主要组元间较大的原子尺寸比和负混合热焓使得材料体系具有较强的非晶形成能力; 二是高速火焰喷涂具有较高的温度和冷却速度。高速火焰喷涂的温度在 $3\ 000\text{ }^\circ\text{C}$ 左右, 可以使得FeCrBSiNb结晶粉末得到充分熔化。熔融液滴在极高的冷却速率($10^5\sim 10^6\text{ K/s}$)下形成非晶态沉积在基体表面。在雾化制备FeCrBSiNb粉末时得到的非晶含量比较少, 因为雾化本身的冷却速率在 $10^3\sim 10^4\text{ K/s}$ 左

右, 达不到形成非晶相的临界冷却速率。而且在制粉过程中, 为了消除合金体系中存在的难溶晶体相和局部的原子团簇^[11], 使得熔液温度比熔点高出 $200\text{ }^\circ\text{C}$ 左右, 过高的过热度增加了合金熔体的整体热量, 凝固时释放的结晶潜热降低了液滴的实际冷却速率, 使得非晶相难以形成。

2.2 粉末与涂层的微观形貌

图2为FeCrBSiNb粉末和涂层表面微观形貌。从图2(a)中可以看出, FeCrBSiNb粉末球形度比较好, 大部分为“近球形”和“椭球形”, 保证了其具有较好的流动性。粉末尺寸在 $10\sim 50\text{ }\mu\text{m}$, 大颗粒粉末表面比较粗糙, 有较多的枝晶状组织和气孔逸出时造成的孔隙, 而且大多有“卫星球”附着。小颗粒粉末表面光滑均匀, “卫星”颗粒比较少。金属熔滴直径 R 与熔滴冷却速率之间的关系可表示为^[12]:

$$R = \frac{dT_d}{dt} = \frac{C}{d}$$
$$C = \frac{6}{C_1\rho_d} \left[h(T_{\text{gas}} - T_d) + \varepsilon\delta(T_w^4 - T_d^4) \right]$$

(1)

其中 C_1 为熔滴材料的定热容, $\text{J/kg}\cdot\text{K}$; ρ_d 为熔

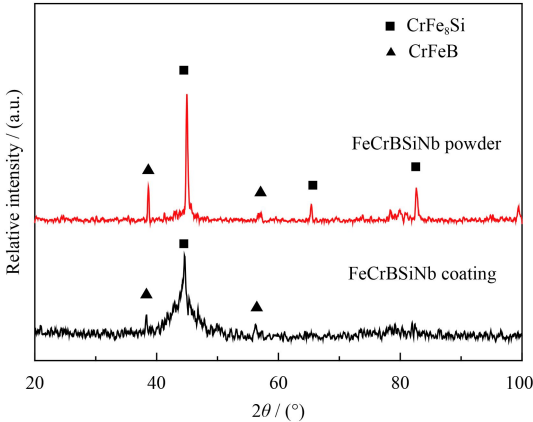
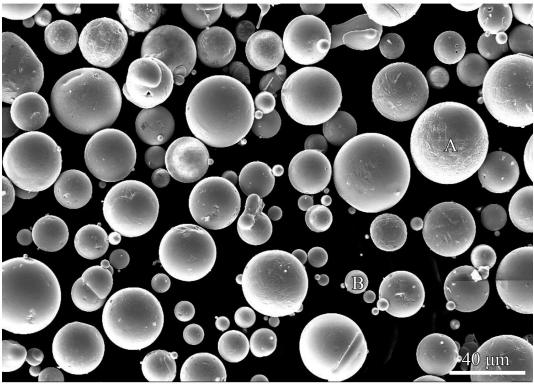
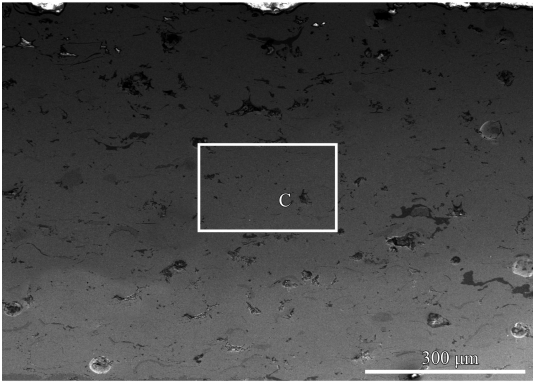


图1 FeCrBSiNb粉末和涂层XRD图谱



(a) Alloy powder



(b) Amorphous coating

图2 FeCrBSiNb粉末和涂层的微观形貌

Fig.2 Morphologies of FeCrBSiNb powder and coating

Fig.1 XRD patterns of FeCrBSiNb powder and coating

滴密度, kg/m^3 ; h 为热传导系数, T_{gas} 为气体温度, K; T_d 为熔滴温度, K; ε 和 δ 分别为辐射和Stefan-Boltzman数, T_w 为环境壁温度, K。在瞬态熔滴速度一定的情况下, 热传导系数 h 仅为熔滴直径 d 的函数, C 可以看作瞬态常量, 即熔滴的冷却速度 R 仅与熔滴的直径 d 成反比。熔滴的直径越大, 实际冷却速率越小。不同的冷却速率会使得不同粒度的熔滴表现出不同的组织结构, 一般来说随着冷却速度的增大, 粉末会呈现出平面状-胞状-树枝状-胞状平面状等的变化规律^[13]。即大颗粒粉末表面大多是枝晶状组织而小颗粒粉末表面光滑平均呈胞状平面状。

图2(b)为经过火焰喷涂制备的FeCrBSiNb非晶涂层。可以看出, 该粉末熔化完全, 粒子之间的搭接不明显。说明火焰喷涂的加热温度可以使得粉末充分熔化, 经快速冷凝形成非晶相。涂层存在少量孔隙, 经测定其孔隙率为2%左右。较大的孔隙是高熔点的硼化物未熔化镶嵌在涂层中, 使得其周围在粒子搭接时存在较大的孔隙; 较小的孔隙是因为含有较高热量的熔融粒子在冷却时形成的“骤冷”应力造成的微裂纹, 熔融液滴在冷却过程中内部气体的逸出也会造成一些微小的孔隙。

对图2(a)中粉末的A、B区域和图2(b)中涂层的C区域进行元素测定其结果如表3所示。涂层与粉末成分基本保持一致, 涂层中观测到氧元素的存

在, 是在喷涂过程中氧化所致。对涂层进行抗拉结合强度测试, 涂层结合强度可达51.8 MPa, 具有较高的结合性能。如表4所示。

表 3 FeCrBSiNb粉末与涂层的EDS分析

Table 3 EDS of the FeCrBSiNb powder and coating (w/%)

Zone	Fe	Cr	Si	Nb	B	O
A	84.05	1.81	3.91	6.68	3.55	
B	89.20	2.80	2.87	5.13		
C	81.72	3.45	2.91	5.75	5.66	0.5

表 4 FeCrBSiNb涂层的结合强度

Table 4 Bonding strength of FeCrBSiNb coating (MPa)

No.	1	2	3	4	5	Average
Bonding stress	53.4	48.6	51.3	54.8	51.0	51.8

2.3 涂层的TEM分析

图3为FeCrBSiNb非晶涂层的TEM明场像。从图中可以看出, 涂层中主要以组织均匀衬度均一的非晶相为主(F区域), 在非晶母相中离散分布着亚微晶结构的晶粒, 尺寸在200 nm左右。单晶颗粒的主要成分为(Fe, Cr)固溶体, 其中有少量的Si元素。Si原子与Fe原子半径相近, 可以置换Fe原子形成FeCrSi固溶体, 与XRD衍射结果一致。F区域主要为非晶区域, 元素组成如表5所示。非晶区域中包含了材料体系中主要元素, 说明本材料体系具有较强的非晶形成能力。

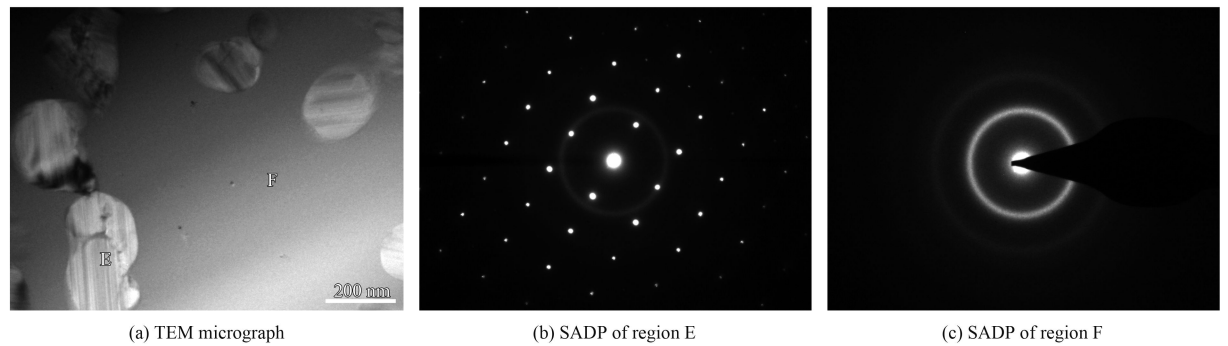


图 3 FeCrBSiNb涂层TEM形貌及选区电子衍射花样

Fig.3 TEM micrograph and SADP of FeCrBSiNb coating

表 5 E、F区域EDS分析

Table 5 EDS analysis of region E and F (w/%)

Zone	Fe	Cr	Si	Nb	B	O
E	92.32	5.65	2.03			
F	90.72	1.28	2.74	4.26		

2.4 涂层的DSC分析

图4为FeCrBSiNb非晶涂层与粉末的DSC曲

线。从图中可以看出粉末从常温加热到900 ℃没有出现明显热焓变化的放热峰, 说明粉末中非晶晶化的放热峰不存在, 非晶含量非常少。相比粉末, 涂层在532~644 ℃范围内存在明显的放热峰, 一个放热峰从532 ℃开始, 止于613 ℃, 峰值为590.3 ℃。此峰是涂层中的非晶相向晶体相转变的吸热反应, 而在613~644 ℃区间仍然有一个放

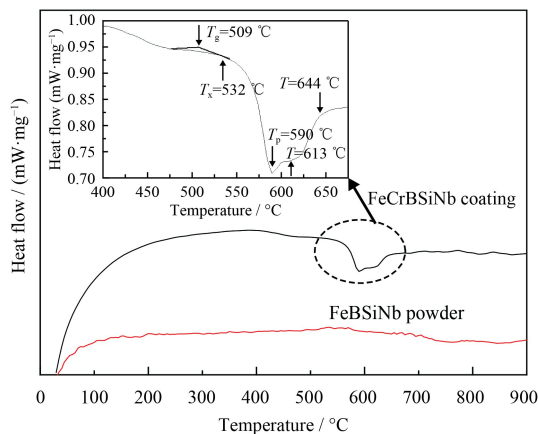


图4 FeCrBSiNb粉末和涂层的DSC曲线

Fig.4 DSC curves of FeCrBSiNb powder and coating

热峰的存在, 此峰为亚稳态的硼化物相转变为稳定的硼化物晶体相的放热峰。

利用切线法测得涂层的玻璃转变温度 T_g 为509℃, 开始晶化温度 T_x 为532℃, 而FeCrBSiNb合金的熔融液体温度在1 200℃左右。根据Liu^[14]计算非晶相形成的极限冷却速度 R_c 公式:

$$R_c = 5.1 \times 10^{21} \exp(-117.19\gamma) \quad (2)$$
$$\gamma = T_x / (T_g + T_1)$$

其中 T_x 为开始晶化温度, K; T_g 为玻璃转变温度, K; T_1 为熔融液体温度, K。由计算公式可得出, FeCrBSiNb合金形成非晶相的极限冷却速度, $\gamma=0.3569$, $R_c=3.458 \times 10^3$ K/s。而火焰喷涂的冷却速度在 10^5 K/s以上, 充分熔化的合金粉末经过火焰喷涂的急速冷却可以形成完全非晶涂层。而在雾化制粉过程中, 为了保证合金中难熔晶体相的充分熔化, 使过热度保持在250~300℃。此时 T_1 温度在1 400℃左右, 则 $\gamma=0.3214$, $R_c=2.249 \times 10^5$ K/s, 即雾化粉末如果要形成非晶相临界冷却速度要在 10^5 K/s以上。即相同的材料体系雾化制备粉末中没有形成非晶相而在火焰喷涂过程中形成了非晶相的原因。

2.5 涂层的摩擦磨损性能

图5为FeCrBSiNb非晶涂层与45钢基体的摩擦因数曲线。在5 N、5 Hz、30 min、对偶件GCr15的摩擦条件下, FeCrBSiNb非晶涂层与45钢基体的摩擦因数差别不大。45钢基体在0~600 s, 摩擦因数略有上升, 然后趋于平缓, 平均摩擦因数在0.4左右。FeCrBSiNb非晶涂层摩擦因数略低, 平均在

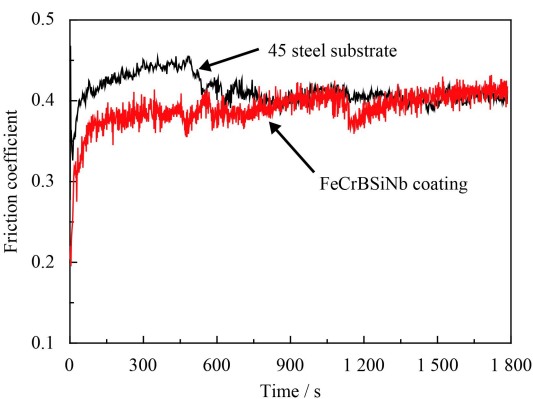


图5 FeCrBSiNb非晶涂层与45钢基体的摩擦因数

Fig.5 Friction coefficient of FeCrBSiNb amorphous coating and 45 steel substrate

0.38左右。摩擦因数曲线稍微的波动与涂层内部熔滴的铺展、孔隙和硬质相的存在有一定关系。

图6为涂层截面沿45钢基体的硬度分布。可以看出, 涂层平均硬度为885.8 HV_{0.1}, 是45钢基体的4倍左右。涂层内部存在一些软质点和硬质相, 硬质相使得涂层整体硬度较高, 具有较高的抗耐磨性, 软质点有一定的塑性变形能力, 可以起到固化硬质相的效果, 这种软质点和硬质相相互交错的“钉扎”结构, 使涂层具有优异的耐磨性能。

从三维磨痕形貌来看(如图7所示), 涂层磨痕较浅, 纵深高度只有44.1 μm, 宽度约为895 μm。涂层的硬度高于对磨件GCr15, 在摩擦磨损过程中, GCr15充当软质体磨损较为严重, 而随着摩擦时间的持续, 对磨件与涂层的实际接触面越来越大, 使得涂层的磨痕宽度增加, 在磨槽两端因为挤压有隆起的高台, 但磨痕高度变化不大。相比于FeCrBSiNb涂层, 45钢基体磨痕宽度略窄, 磨痕

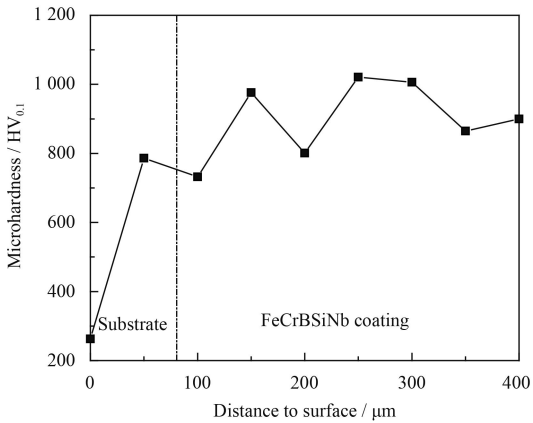


图6 涂层截面沿45钢基体的硬度分布

Fig.6 Microhardness of FeCrBSiNb coating along the substrate of 45 steel

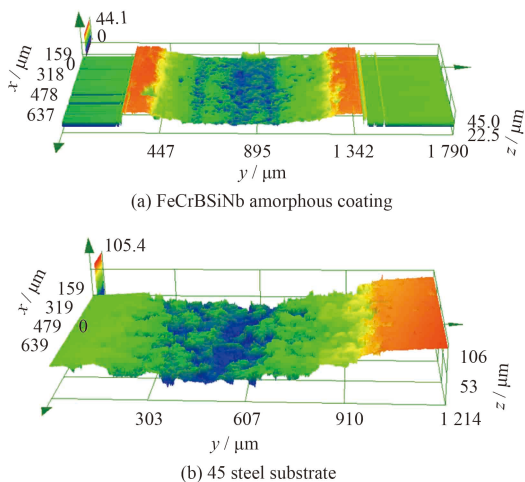


图7 FeCrBSiNb非晶涂层与45钢基体的三维磨痕

Fig.7 Three-dimensional topography of FeCrBSiNb amorphous coating and 45 steel substrate

纵深约为 $106.4\ \mu\text{m}$ 。在与摩擦副对磨过程中, 45钢基体是软质体充当磨损主体, 磨痕较深。经测量, FeCrBSiNb磨损体积为 $3.71\times 10^6\ \mu\text{m}^3$ 仅为45钢基体 $9.38\times 10^6\ \mu\text{m}^3$ 的1/3左右。

3 结 论

利用真空气雾化法制备了FeCrBSiNb合金粉末, 粉末主要有FeCrSi固溶体和(Fe, Cr)的硼化物组成, 粉末形状为“近球形”具有较好的流动性。大颗粒粉末表面有枝晶状组织和孔隙, 附着较多“卫星”颗粒。经过火焰喷涂FeCrBSiNb结晶粉末制备了高非晶含量的Fe基非晶涂层, 非晶题记分数达80%。证实了利用热喷涂技术快速冷凝的特点, 原位制备非晶涂层的可行性。FeCrBSiNb涂层形成非晶相的临界冷却速率为 $3.458\times 10^3\ \text{K/s}$, 在同一试验条件下, 测得FeCrBSiNb非晶涂层的相对耐磨性是45钢基体的2.6倍。

参考文献

- [1] KHANOLKAR G R, RAULS M B, KELLY J P, et al. Shock wave response of iron-based in situ metallic glass matrix composites[J]. Scientific Reports, 2016(6): 22568.
- [2] VARDELLE A, MOREAU C, THEMELIS N J, et al. A perspective on plasma spray technology[J]. Plasma Chemistry & Plasma Processing, 2015, 35(3): 491-509.
- [3] QIN Y J, WU Y P, ZHANG J F, et al. Long-term corrosion behavior of HVOF sprayed FeCrSiBmN amorphous/nano-crystalline coating[J]. Transactions of Nonferrous Metals So-

ciety of China, 2015, 25(4): 1144-1150.

- [4] ROTTGER A, WEBER S, THEISEN W. Mechanical properties of thermally sprayed Fe based coatings[J]. Materials Science and Technology, 2011, 27(6): 973-982.
- [5] VOYER J. Wear-resistant amorphous iron-based flame-sprayed coatings[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2010, 19(5): 1013-1023.
- [6] HENAO J, CONCUSTELL A, CANO I G, et al. Novel Al-based metallic glass coatings by cold gas spray[J]. Material & Design, 2016, 94: 253-261.
- [7] 李刚, 侯俊英, 刘丽, 等. 激光熔覆Ni基非晶复合涂层组织结构及性能研究[J]. 表面技术, 2010, 39(4): 15-18.
LI G, HOU J Y, LIU L, et al. Study on microstructure and properties of the Ni-based amorphous composite coating prepared by laser cladding[J]. Surface Technology, 2010, 39(4): 15-18 (in Chinese).
- [8] VERDON C, KARIMI A, MARTIN J L. A study of high velocity oxy-fuel thermally sprayed tungsten carbide based-coatings. Part 1: microstructures[J]. Materials Science & Engineering A, 1998, 246(1/2): 11-24.
- [9] LANGFORD J I. A rapid method for analysing the breadths of diffraction and spectral lines using the voigt function[J]. Journal of Applied Crystallography, 1978, 11(1): 10-14.
- [10] INOUE A. Stabilization of metallic supercooled liquid and bulk amorphous alloys[J]. Acta Materialia, 2000, 48(1): 279-306.
- [11] 胡壮麒, 张海峰. 块状非晶合金及其复合材料研究进展[J]. 金属学报, 2010, 46(11): 1391-1421.
HU Z Q, ZHANG H F. Recent progress in the area of bulk amorphous alloys and composites[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2010, 46(11): 1391-1421 (in Chinese).
- [12] 欧阳鸿武, 陈欣, 余文焘, 等. 紧耦合气雾化制备Al基合金非晶粉末的研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2006, 35(6): 866-870.
OUYANG H W, CHEN X, YU W T, et al. Preparation of amorphous powders of Al-based alloy by close-coupled gas atomization[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2006, 35(6): 866-870 (in Chinese).
- [13] 陈欣, 欧阳鸿武, 黄誓成, 等. 紧耦合气雾化制备Al基非晶合金粉末[J]. 北京科技大学学报, 2008, 30(1): 35-40.
CHEN X, OUYANG H W, HUANG S C, et al. Production of Al-based amorphous alloy powders by close-coupled gas atomization[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2008, 30(1): 35-40 (in Chinese).
- [14] LIU Z P, LIU C T. A new glass-forming ability criterion for bulk metallic glasses[J]. Acta Materialia, 2002, 50(13): 3501-3512.