

火焰喷涂和等离子喷涂 FeCrBSi 涂层及其防滑和耐磨性能研究

吴庆丹, 刘黎明, 徐海峰, 肖金坤, 张超

(扬州大学 机械工程学院, 江苏 扬州 225127)

摘 要: **目的** 采用大气等离子喷涂 (APS) 和火焰喷涂 (FS) 在 304 不锈钢基体上制备 FeCrBSi 涂层, 并对比研究两种工艺制备涂层的防滑和耐磨性能。**方法** 通过光学显微镜、场发射扫描电镜和 X 射线衍射仪对涂层的显微形貌和结构进行分析, 通过维氏硬度计测试涂层的显微硬度。采用摩擦磨损试验机和三维光学显微镜, 测量涂层在干摩擦条件下的摩擦系数和磨损量。**结果** 两种喷涂方法制备的涂层多孔, 在喷涂过程中极少发生氧化。与火焰喷涂涂层 ($749\text{HV}_{0.1}$) 相比, 大气等离子喷涂涂层 ($837\text{HV}_{0.1}$) 具有更高的维氏硬度值。在摩擦试验中, 火焰喷涂涂层的磨损率为 $(38.63 \pm 2.37) \times 10^{-6} \text{ m}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$, 而大气等离子喷涂涂层的磨损率为 $(9.5 \pm 0.49) \times 10^{-6} \text{ m}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$, 但两种涂层的摩擦系数区别较小, 在频率 2 Hz、载荷 10 N 的条件下的摩擦系数为 0.6~0.7。**结论** 两种涂层的磨损机制均为疲劳磨损, 喷涂态 FeCrBSi 涂层具有较好的防滑耐磨性能, 且大气等离子喷涂涂层性能优于火焰喷涂涂层。

关键词: 等离子喷涂; 火焰喷涂; FeCrBSi; 防滑涂层; 耐磨性。

中图分类号: TG174.442 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2017)07-0104-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2017.07.017

Flame Sprayed and Atmospheric Plasma Sprayed FeCrBSi Coatings and Their Skid and Wear Resistance

WU Qing-dan, LIU Li-ming, XU Hai-feng, XIAO Jin-kun, ZHANG Chao

(College of Mechanical Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225127, China)

ABSTRACT: The work aims to investigate and compare skid and wear resistance of FeCrBSi coatings by preparing the coatings on 304 stainless steel substrate by atmospheric plasma spray (APS) and flame spray (FS) techniques, respectively. Microstructure and structure of the coatings were analyzed with optical microscope (OM), field-emission scanning electron microscope (FE-SEM) and X-ray diffractometer (XRD), and microhardness with Vickers hardness tester. Friction coefficients and wear volume of the coatings under dry lubrication conditions were measured with friction-abrasion testing machine and three-dimensional optical microscope. FeCrBSi coatings prepared in both spraying methods were porous and rarely oxidized during the spraying process. APS coating exhibited considerably higher hardness ($837\text{HV}_{0.1}$) than the FS coating ($749\text{HV}_{0.1}$). In friction test, wear rate of APS coating was $(9.5 \pm 0.49) \times 10^{-6} \text{ m}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$, much lower than

收稿日期: 2017-01-25; 修订日期: 2017-03-10

Received: 2017-01-25; Revised: 2017-03-10

基金项目: 扬州市-扬州大学市校合作基金 (YZ2016254); 江苏省自然科学基金 (BK20140487, BK20160472)

Fund: Supported by Cooperation Funding of Yangzhou City-Yangzhou University (YZ2016254), the Jiangsu Natural Science Foundation of China (BK20140487, BK20160472)

作者简介: 吴庆丹 (1991—), 女, 研究生, 主要研究方向为防滑涂层。

Biography: WU Qing-dan (1991—), Female, Master graduate student, Research focus: thermal sprayed non-skidding coatings.

通讯作者: 张超 (1981—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为热喷涂功能与结构涂层。

Corresponding author: ZHANG Chao (1981—), Male, Ph. D., Professor, Research focus: thermal sprayed functional and structured coatings.

that of FS coating $((38.63 \pm 2.37) \times 10^6 \text{ m}^3/(\text{N} \cdot \text{m}))$. However, the friction coefficients of the two coatings were very close, the value between was 0.6 ~ 0.7 at 10 N load and 2 Hz frequency. The main wear mechanism of the two coatings was fatigue wear. The as-sprayed FeCrBSi coatings have good skid and wear resistance, and the performance of APS coating is superior to that of FS coating.

KEY WORDS: atmospheric plasma spray; flame spray; FeCrBSi; non-skid coating; wear resistance

热喷涂技术的持续发展促进了工业应用的可持续增长^[1-3]，热喷涂涂层为摩擦学应用提供低成本、高效益的解决方案^[4-6]。防滑问题涉及人类生产生活的多个领域，如道路桥梁等交通领域^[7]，船舶、港口设施、海洋平台等海洋环境领域^[8]，太空机器人等航天领域，人体步进摩擦等医疗康复领域^[9]等。在解决防滑问题的诸多方式中，防滑涂层是最为经济和有效的方式之一。防滑涂层几乎可以运用到各种材料的表面，除了防滑耐磨之外，还能起到美化、装饰的作用^[10]。

铁基高硬度涂层由于具有良好抗滑动及耐磨损性能而广泛应用于表面工程中^[11]。由于其具有赋毛化的表面特性以及多孔隙结构，因此具有较高的摩擦系数，适宜用作防滑涂层。涂层的动摩擦系数是评价涂层防滑性能的重要依据，但在实际服役过程中，涂层摩擦系数衰减规律不甚清楚^[12]，文献中对大气等离子喷涂和火焰喷涂铁基耐磨涂层的研究也较少。

本文采用大气等离子喷涂和火焰喷涂技术在不锈钢基体上制备铁基防滑耐磨涂层，即 FeCrBSi 涂层。通过调整喷涂参数来控制涂层厚度和优化涂层微观结构，对比研究两种涂层的显微组织结构、力学性能和滑动摩擦磨损性能，并分析涂层的磨损机理。

1 实验方法

1.1 喷涂材料

本研究选取成都锦淳公司生产的 FeCrBSi 粉末作为喷涂材料，在 304 不锈钢基体（尺寸为 60 mm × 40 mm × 3 mm）上制备防滑涂层。图 1 为粉末的 SEM 照片，可以观察到粉末颗粒间有粘连现象，形状较为规则。粉末的成分参数见表 1。

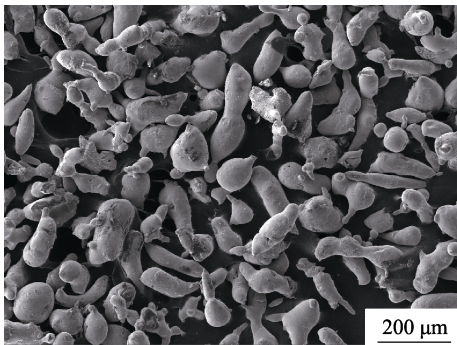


图 1 FeCrBSi 粉末的 SEM 形貌照片
Fig. 1 SEM image of FeCrBSi powder

表 1 FeCrBSi 粉末的成分

Tab.1 Composition of FeCrBSi powder					wt. %
Element	Cr	B	Si	C	Fe
Content	25.0~31.0	1.0~1.5	1.0~2.0	4.0~5.0	Bal.

1.2 涂层制备

为提高涂层与基体间的结合强度，在喷涂前采用北京多特喷砂设备有限公司 GP-1 干式喷砂机对基体进行喷砂处理（喷砂压力为 0.5 MPa，喷砂材料为 24[#] 棕刚玉），采用 ABB 六轴机器人夹持喷枪。等离子喷涂采用 Oerlikon Metco 的 F4MB 喷枪和 5MPE 送粉器，将 FeCrBSi 涂层沉积在不锈钢基材上，同时利用压缩空气对不锈钢基体背部进行冷却，冷却空气压力为 0.2 MPa。根据前期研究及试验结果确定本研究的喷涂参数如表 2 所列。火焰喷涂时，采用 CastoDyn DS 8000 氧-乙炔火焰喷涂沉积涂层，喷涂过程中对基体预热，预热温度为 100 ℃。具体喷涂参数如表 3 所列。

表 2 等离子喷涂工艺参数

Tab.2 Parameters for plasma spraying	
Parameters	Value
Spraying Distance/mm	120
Current/A	566
Ar/(L·min ⁻¹)	50
H ₂ /(L·min ⁻¹)	6

表 3 氧-乙炔火焰喷涂工艺参数

Tab.3 Parameters for flame spraying	
Parameters	Value
Spraying Distance/mm	200
Oxygen/MPa	0.4
Acetylene/MPa	0.07
Air/MPa	0.14

1.3 性能表征

使用德国蔡司公司的 EVO18 型扫描电子显微镜表征粉末形貌，采用德国 Bruker-AXS 多晶 X 射线衍射仪测定涂层及粉末的物相组成，衍射仪型号是 D8 Advance。采用华银 HV-10000A 型显微维氏硬度计检测涂层的维氏显微硬度，实验条件：载荷为 100 g，保荷时间 10 s，每种涂层取 24 个硬度点。球盘往复式摩擦磨损实验采用德国布鲁克公司生产的 UMT-2 型摩擦磨损

试验机, 选用 $\phi 4$ mm 氮化硅球作为对磨球。滑动摩擦实验条件: 1) 法向载荷 10 N, 频率 2 Hz, 磨痕长度 8 mm, 时间 2 h; 2) 法向载荷 10 N, 频率 5 Hz, 磨痕长度 8 mm, 时间 1.5 h。磨痕的三维形貌以及磨损量通过德国布鲁克 GT-K 型三维光学轮廓仪进行表征与计算。在本实验中采取体积磨损率研究涂层的磨损性能。材料的体积磨损率可以使用公式 (1) 计算。

$$R_v = \frac{V}{F \cdot S} \quad (1)$$

式中, R_v 为体积磨损率, $\text{mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$; V 是磨损体积, mm^3 ; F 为负载, N; S 为滑动总行程, m。

为方便起见, 将采用等离子喷涂制备出的涂层称为 C1; 火焰喷涂制备的涂层称为 C2。

2 结果与分析

2.1 涂层的微观组织与成分

两种涂层横截面光学图如图 2 所示, C1 厚度约为 300 μm , C2 厚度约 200 μm 。由图可见, C1 涂层由熔融、半熔的 FeCrBSi 颗粒堆叠而成, 熔融粒子在撞击基体表面时发生铺展形成扁平化粒子。C2 涂层颗粒间结合较差, 有明显的间隙。两种涂层均存在不规则的孔洞, C1 涂层中颗粒的熔融状态和结合性能优于 C2 涂层, 孔隙率明显小于 C2, 采用 Image J 测得 C1 与 C2 的孔隙率分别为 8.4% 和 11.1%, 这些孔洞对涂层的结合强度、显微硬度以及摩擦系数都有一

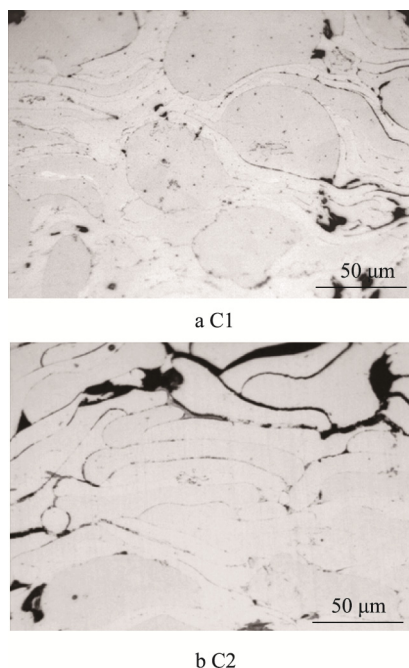


图 2 C1 和 C2 在光学显微镜下的抛光断面图

Fig. 2 OM polished cross-sectional morphology of the C1 and C2 coatings

定的影响^[13]。而涂层的孔隙率受喷涂技术、颗粒大小、喷涂参数等的影响, 这需要在以后的工作中做进一步的研究。

图 3 是两种涂层及其粉末的 XRD 图谱。对比发现 C1 涂层组织较为简单, 衍射峰强度低于 C2 涂层以及粉末。通过阅读相关文献^[14-15], 对比标准 PDF 卡片可知涂层的衍射峰主要为 (Fe,Cr) 相, 含有少量的 Cr_7C_3 、 Fe_5SiB_2 和 SiB_6 相, 这些硬质相提高了涂层的硬度和耐磨性。在涂层 XRD 图谱中未发现 Fe 的氧化物存在, 说明涂层在沉积过程中极少发生氧化。

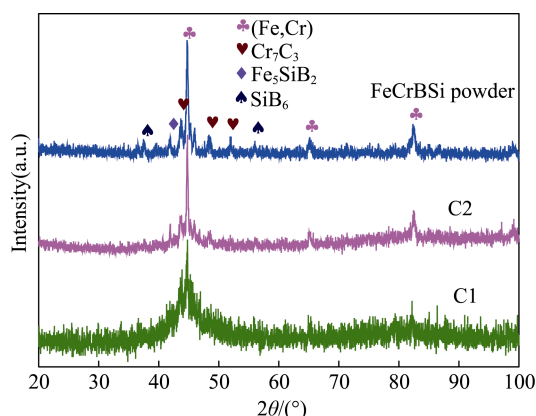


图 3 FeCrBSi 涂层及粉末 X 射线衍射图谱

Fig. 3 XRD patterns of the FeCrBSi coatings and powder

2.2 显微硬度

铁基涂层具有较高的维氏显微硬度, 以保证涂层具有较好的耐磨性。C1 硬度 ($836.6 \pm 151.99 \text{ HV}_{0.1}$) 明显高于 C2 ($749.18 \pm 132.54 \text{ HV}_{0.1}$), 且两种涂层硬度的离散度较大。涂层硬度分布不均与涂层的显微组织形貌以及相组成有关, 涂层中的孔隙、非硬质相都会降低涂层的硬度值。

图 4 为两种涂层显微硬度沿厚度方向的分布, 可以看出 C1 涂层中间部分的硬度值较高, 靠近基体与涂层表面附近的硬度相差不大, 数值比涂层中间部分约小 100 $\text{HV}_{0.1}$ 。这是因为 C1 涂层中的硬质颗粒 (硬度约 1050 $\text{HV}_{0.1}$) 均匀分布在涂层中间, 增强了涂层中间部分的硬度, 而近基体和表面的位置处层状组织密集 (硬度约 600 $\text{HV}_{0.1}$), 受力时易沿结合面开裂, 导致涂层在该处的硬度较低。C2 涂层的硬度分布较为均匀, 约 700 $\text{HV}_{0.1}$, 但涂层中较多的孔隙以及颗粒间的弱结合导致涂层硬度离散性较大。大气等离子喷涂技术与氧-乙炔火焰喷涂技术相比, 焰流温度高, 速度快, 因此 C1 涂层比 C2 涂层的沉积效率高, 沉积效果好, 颗粒的熔融程度和颗粒间结合强度也高, 硬度更大。涂层的硬度会影响摩擦磨损性能^[16]。

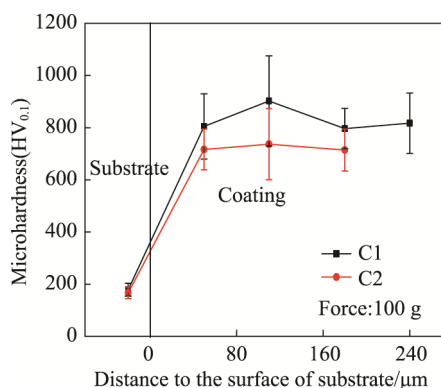


图 4 两种涂层显微硬度在涂层厚度方向的分布
Fig. 4 Microhardness distribution of two coatings along thickness direction

2.3 涂层的防滑性能

图 5 是两种涂层在频率 2 Hz、载荷 10 N 的条件下干磨 2 h, 以及频率 5 Hz、载荷 10 N 的条件下干磨 1.5 h 的摩擦系数曲线随时间的变化图。由图可知, 两种涂层摩擦系数曲线在开始阶段都经历了一个急剧上升的过程, 随后出现波动, 最终达到平衡状态。摩擦实验前对涂层进行了打磨抛光是摩擦系数曲线急剧上升的主要原因, 抛光后 C1 和 C2 的表面粗糙度 R_a 值分别为 (429.25 ± 40) nm 和 (429.75 ± 26) nm,

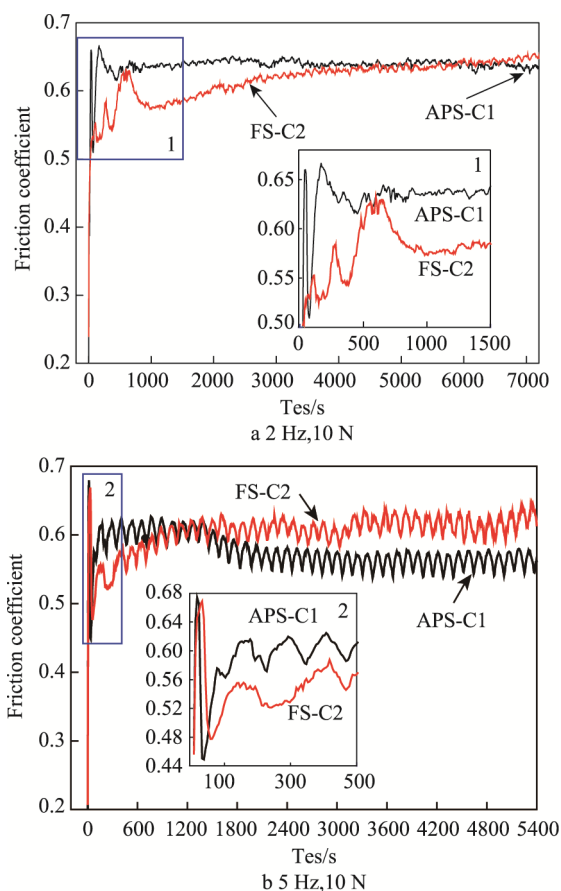


图 5 不同工艺制备的涂层的摩擦系数
Fig. 5 Friction coefficient of coatings by different processes

打磨抛光影响了涂层表面与对偶球的接触面积, 摩擦开始阶段, 对偶球先与光滑的涂层表面接触, 光滑表面被迅速磨损, 露出粗糙的涂层内部结构, 摩擦接触面迅速增加, 导致涂层的摩擦系数急剧上升。随着进一步的磨损, 涂层结合较弱的扁平粒子脱落, 并充当了润滑颗粒。在摩擦过程中, 脱落颗粒被磨成更加细小的颗粒, 表现为涂层摩擦系数的上下波动, 随后便很快达到稳定阶段, 表现为摩擦系数在某一数值上下稳定波动。摩擦系数与涂层的硬度和表面粗糙度密切相关。分析上述实验结果, 不难发现 C2 因其相对疏松的结构和较低的硬度, 其摩擦系数在达到平稳时略高。

Harlin 在工作中也观察到了类似的现象^[18]。一般来说, 在磨损期, 涂层表面的粗糙粒子在固定载荷下逐渐被磨损掉。由于 C1 的孔隙率较低, 硬度较高, 因此需要更长的滑动距离才能实现表面粗糙颗粒的去除。在磨损期产生的碎片, 也会改变摩擦系数, 造成摩擦系数波动, 这需要进行进一步的研究。当涂层表面粗糙颗粒被磨损后, 会获得轻微抛光的表面, 主要表现为摩擦系数的下降。

两种摩擦条件下的摩擦系数变化规律相似, 频率为 2 Hz 时, 涂层的摩擦系数稳定在 0.6~0.7 之间, 满足防滑涂层防滑系数的要求^[17]。频率为 5 Hz 时, 涂层的摩擦系数稳定在 0.6 左右, 由于摩擦频率高, 摩擦系数在某一数值上下波动较大。摩擦系数 0.5~0.6 为基本安全范围, 摩擦系数大于 0.6 为非常安全环境范围^[10]。因此整体来讲, 两种涂层的防滑性能相当, 均具有良好的防滑性能。

2.4 涂层的耐磨性能

涂层的磨损和涂层材料、组织结构、力学性能紧密相关。现仅对 2 Hz 时的涂层磨痕进行分析, 图 6 为 C1、C2 涂层磨痕形貌的 SEM 图。由图可见, 涂层中颗粒剥落形成的凹坑几乎布满整条磨痕, C2 涂层剥落更为明显, 磨痕宽度大约为 C1 涂层的 2 倍。此外, 能够观察到 C1 磨痕上磨屑和颗粒剥落形成的亮色凹坑以及暗色摩擦膜, 涂层在沿摩擦方向产生犁沟。而 C2 涂层的磨痕中主要是颗粒剥落形成的凹坑, 磨痕上有大量的磨屑, 颗粒间产生了较大的裂纹, 涂层中的孔洞清晰可见 (图 6e 中圆圈所示), C1 中未发现类似孔洞。

在摩擦过程中, 由于往复摩擦力的作用, 裂纹沿着涂层颗粒间的孔隙扩展, 逐渐形成大裂纹, 这些大裂纹导致颗粒剥落, 涂层受到进一步破坏。磨痕中颜色较深的区域是由于摩擦产生的摩擦膜, 这些膜在一定程度上可以保护涂层, 减少涂层的磨损, 但随着摩擦的进行, 形成的硬质薄膜会逐渐剥落, 失去保护涂层的作用。

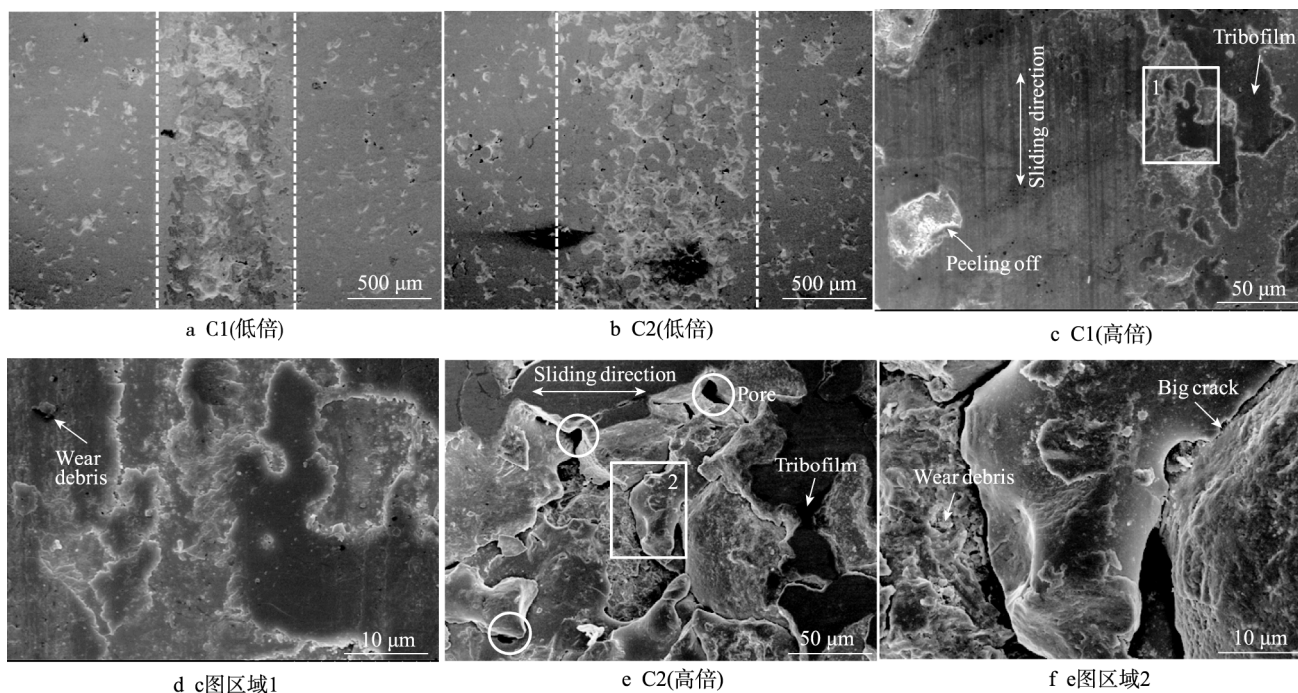


图6 涂层磨痕的SEM照片

Fig. 6 SEM morphology of wear track surface of the coatings: a C1 (low power), b C2 (low power), c C1 (high power), d zone 1 in fig.c, e C2 (high power), f zone 2 in fig.e

通过比较涂层磨痕的截面轮廓曲线发现(图7所示), C2的磨痕深度约为C1的6倍, 并且磨痕表面非常粗糙, 沿摩擦方向形成犁沟。C2的磨痕深度达到了25 μm左右, 而C1的磨痕深度为4 μm左右, 耐磨性明显优于C2。

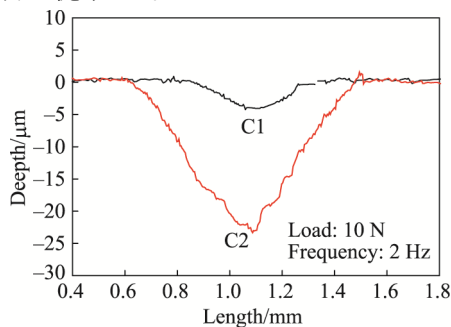


图7 涂层磨痕截面轮廓线

Fig. 7 Cross section contour line of the coatings

从三维形貌图(图8)中能更加清楚直观地观察到在相同载荷、频率下, C1、C2的磨痕宽度分别约为0.6 mm和1.1 mm, 磨损量差异明显, 这与磨损率的计算结果一致(C1为 $(9.5 \pm 0.49) \times 10^{-6} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$, C2为 $(38.63 \pm 2.37) \times 10^{-6} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$)。并且, 可以观察到涂层磨痕上的孔洞明显, 除涂层喷涂过程中产生的孔洞外, 在磨损过程中, 涂层中未熔颗粒受力脱落, 导致涂层进一步被损坏, 也会产生孔洞。同时, 未熔颗粒的脱落会形成许多润滑颗粒, 影响涂层与对偶球的接触, 表现为摩擦系数曲线的波动以及磨痕上犁削沟槽的产生。C1涂层较好的耐磨性能与其优越的力学性能密切相

关^[19], 其较高的维氏显微硬度使涂层产生较小的磨损率。以上实验结果表明, 等离子喷涂技术制备的涂层性能明显优于氧-乙炔火焰喷涂涂层, 涂层的高耐磨性主要是由于均匀单相固溶体的形成提高了涂层的硬度。

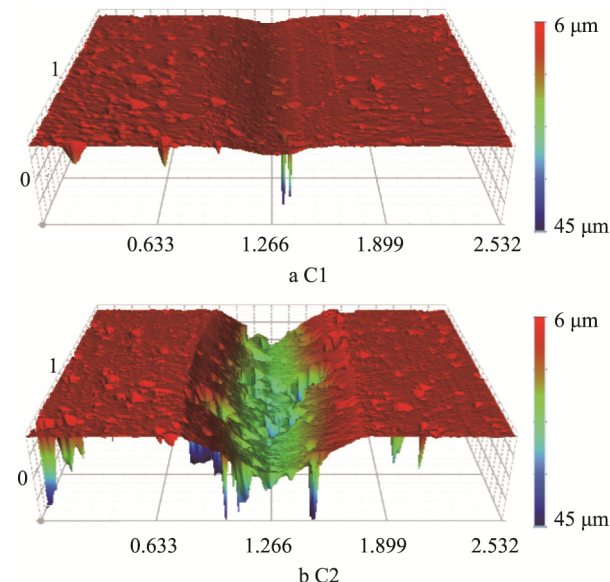


图8 涂层的3D磨痕形貌图

Fig. 8 3D profile of wear track of the coatings

3 结论

1) 大气等离子喷涂技术制备的涂层粉末颗粒的熔融状态优于火焰技术制备的涂层, 颗粒间的结合度

也有所提高。

2) 采用大气等离子喷涂技术制备的涂层孔隙率(8.4%)明显低于火焰技术制备的涂层(11.1%),涂层的硬度分布不均匀,硬质相颗粒硬度较高,约1050 HV_{0.1},层状组织较为集中处硬度较低,约600 HV_{0.1},且受力时易开裂。

3) 两种涂层均具有较高的摩擦系数,且摩擦系数非常接近。在载荷10 N、频率2 Hz、时间2 h的条件下,两种涂层的摩擦系数稳定在0.6~0.7之间。在载荷10 N、频率5 Hz、时间1.5 h的条件下,两种涂层的摩擦系数稳定在0.6左右。从摩擦系数角度讲,两种涂层均具有较好的防滑效果。

4) 涂层在磨损过程中发生颗粒脱落的现象,这与涂层自身颗粒间的结合强度有关。两种涂层的主要磨损机制是疲劳磨损,在摩擦过程中形成的摩擦膜在一定程度上可以保护涂层。大气等离子喷涂涂层的耐磨性优于火焰喷涂涂层,更加适合作为防滑耐磨涂层。

参考文献:

- [1] FUJII M, YOSHIDA A, MA J, et al. Rolling Contact Fatigue of Alumina Ceramics Sprayed on Steel Roller under Pure Rolling Contact Condition[J]. Tribology International, 2006, 39(9): 856—862.
- [2] AHMED R. Contact Fatigue Failure Modes of HVOF Coatings[J]. Wear, 2002, 253(3—4): 473—487.
- [3] GAO Yang, XU Xiao-lei, YAN Zhi-jun, et al. High Hardness Alumina Coatings Prepared by Low Power Plasma Spraying [J]. Surface and Coatings Technology, 2002, 154(2—3): 189—193.
- [4] STEWART S, AHMED R, ITSUKAICHI T. Contact Fatigue Failure Evaluation of Post-treated WC-NiCrBSi Functionally Graded Thermal Spray Coatings[J]. Wear, 2004, 257(9—10): 962—983.
- [5] NAKAJIMA A, MAWATARI T, YOSHIDA M, et al. Effects of Coating Thickness and Slip Ratio on Durability of Thermally Sprayed WC Cermet Coating in Rolling/Sliding Contact[J]. Wear, 2000, 241(2): 166—173.
- [6] STEWART D A, SHIPWAY P H, MCCARTNEY D G. Influence of Heat Treatment on the Abrasive Wear Behaviour of HVOF Sprayed WC-Co Coatings[J]. Surface and Coatings Technology, 1998, 105(1—2): 13—24.
- [7] 杜乃娟, 王建平, 孙勇. 浅谈舟桥器材的钢桥面防滑[J]. 桥梁建设, 2004(6): 77—79.
DU Nai-juan, WANG Jian-ping, SUN Yong. Antiskid Techniques of Pontoon Bridge Steel Deck[J]. Bridge Construction, 2004(6): 77—79.
- [8] 白杨, 邢路阔, 李相波, 等. 海洋环境防滑涂层技术研究进展[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2013, 25(6): 540—542.
BAI Yang, XING Lu-kuo, LI Xiang-bo, et al. Research Progress of Non Slip Coating Technology in Marine Environment[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2013, 25(6): 540—542.
- [9] 贾利晓, 张永振, 牛永平, 等. 人体步进摩擦的研究现状[J]. 工程设计学报, 2010, 17(1): 61—65.
JIA Li-xiao, ZHANG Yong-zhen, NIU Yong-ping, et al. Research Progress of Human Step Friction[J]. Journal of Engineering Design, 2010, 17(1): 61—65.
- [10] 宋世红, 张学卿. 防滑涂料概论[J]. 中国涂料, 2009, 24(7): 60—63.
SONG Shi-hong, ZHANG Xue-qing. Summary on the Anti-skid Coatings[J]. China Coatings, 2009, 24(7): 60—63.
- [11] FELDSTEIN E, KARDAPOLAVA M, DYACHENKO O. On the Effectiveness of Multi-component Laser Modifying of Fe-based Self-fluxing Coating with Hard Particulates[J]. Surface & Coatings Technology, 2016(307): 254—261.
- [12] ZHANG Huan, XIE You-tao, HUANG Li-ping, et al. Effect of Feedstock Particle Sizes on Wear Resistance of Plasma Sprayed Fe-based Amorphous Coatings[J]. Surface and Coatings Technology, 2014, 258: 495—502.
- [13] 张冠忠, 毛志强, 伍建华, 等. 等离子喷涂纳米与非纳米氧化锆涂层的性能比较[J]. 材料保护, 2006, 39(9): 1—3.
ZHANG Guan-zhong, MAO Zhi-qiang, WU Jian-hua. Comparison of Properties of Plasma Sprayed Nanostructured and Conventional Zirconia Coatings[J]. Materials Protection, 2006, 39(9): 1—3.
- [14] ZHU Li-na, XU Bin-shi, WANG Hai-dou, et al. Determination of Hardness of Plasma-sprayed FeCrBSi Coating on Steel Substrate by Nanoindentation[J]. Materials Science and Engineering A, 2010, 528(1): 425—428.
- [15] 王召煜, 李国祿, 王海斗, 等. 超音速等离子喷涂 FeCrBSi 涂层组织和残余应力分析[J]. 材料热处理学报, 2012, 33(1): 147—148.
WANG Zhao-yu, LI Guo-lu, WANG Hai-dou, et al. Analysis of Microstructure and Residual Stresses in Supersonic Plasma Sprayed FeCrBSi Coatings[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2012, 33(1): 147—148.
- [16] PLANCHE M P, LIAO H, NORMAND B, et al. Relationships between NiCrBSi Particle Characteristics and Corresponding Coating Properties Using Different Thermal Spraying Processes[J]. Surface and Coatings Technology, 2005, 200(7): 2465—2473.
- [17] 朱万章. 摩擦与防滑涂料[J]. 涂料工业, 2002(8): 34—37.
ZHU Wan-zhang. Friction and Anti-skid Coatings[J]. Paint & Coatings Industry, 2002(8): 34—37.
- [18] HARLIN P, CARLSSON P, BEXELL U, et al. Influence of Surface Roughness of PVD Coatings on Tribological Performance in Sliding Contacts[J]. Surface and Coatings Technology, 2006, 201(7): 4253—4259.
- [19] YUGESWARAN S, KOBAYASHI A, SURESH K, et al. Wear Behavior of Gas Tunnel Type Plasma Sprayed Zr-based Metallic Glass Composite Coatings[J]. Applied Surface Science, 2012, 258(22): 8460—8468.