

# 不同环境下 AlSiFeMm 非晶纳米晶 涂层摩擦磨损行为研究

刘奇<sup>1</sup>, 程江波<sup>1,2</sup>, 冯源<sup>1</sup>, 梁秀兵<sup>2</sup>, 陈永雄<sup>2</sup>, 胡振峰<sup>2</sup>

(1.河海大学 力学与材料学院, 南京 211100;  
2.军事科学院 国防科技创新研究院, 北京 100010)

**摘要:**目的 研究 AlSiFeMm (Mm 为镍包混合稀土) 非晶纳米晶涂层在干摩擦和 3.5%NaCl 溶液中的摩擦磨损行为。方法 采用 Rtec (MFT-3000) 往复式磨损试验机测试涂层在干摩擦条件和有腐蚀介质条件下的摩擦磨损性能, 使用 LEXT OL 3000-IR 非接触三维表面轮廓仪测定涂层的磨损体积和磨痕的三维形貌, 利用扫描电子显微镜对磨痕进行形貌观察和成分分析。结果 铝基非晶纳米晶涂层的摩擦系数随着载荷的增加而不断减小。干摩擦条件下, 铝基非晶纳米晶涂层的磨损率随着载荷的增加而增大, 当磨损速度为 10 mm/s、载荷为 15 N 时, 涂层相对耐磨性为 6061 铝合金的 2.5 倍, 其磨损机制为脆性剥落、磨粒磨损, 并伴随氧化磨损。在 3.5%NaCl 溶液中, 涂层的磨损率随着载荷的增加而逐渐降低, 当磨损速度为 35 mm/s、载荷为 30 N 时, 涂层的耐磨性能约为 6061 铝合金的 8 倍, 其失效机制主要为剥层磨损和腐蚀磨损。结论 铝基非晶纳米晶复合涂层在干摩擦和腐蚀介质中均表现出较为优异的耐磨性能, 可以作为轻质合金涂层应用于表面防护领域。

**关键词:** 铝基非晶纳米晶; 涂层; 干摩擦; 腐蚀磨损; 磨损机制

**中图分类号:** TG174.442 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2019)04-0075-09

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.04.011

## Wear Behaviors of As-sprayed AlSiFeMm Amorphous/Nanocrystalline Coating in Different Environments

LIU Qi<sup>1</sup>, CHENG Jiang-bo<sup>1,2</sup>, FENG Yuan<sup>1</sup>, LIANG Xiu-bing<sup>2</sup>, CHEN Yong-xiong<sup>2</sup>, HU Zhen-feng<sup>2</sup>

(1.School of Mechanics and Materials, Hohai University, Nanjing 211100, China; 2.Academy of Military Science PLA China, National Innovation Institute of Defense Technology, Beijing 100010, China)

**ABSTRACT:** The work aims to investigate the sliding wear behaviors of the AlSiFeMm (Mm is Ni-wrapped rare earth elements) amorphous/nanocrystalline coating under dry friction and 3.5%NaCl solution conditions. Rtec (MFT-3000) reciprocating ball-on-block tester was used to measure tribological properties of the coating under dry friction and corrosive medium. The

收稿日期: 2018-12-05; 修订日期: 2019-02-15

Received: 2018-12-05; Revised: 2019-02-15

基金项目: 国家自然科学基金 (51575159); 国家重点研发计划 (2018YFC1902400); 江苏省重点研发计划 (BE2017065)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51575159), National Key R&D Program of China (2018YFC1902400) and the Key Research and Development Plan of Jiangsu Province (BE2017065)

作者简介: 刘奇 (1996—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为表面工程。

Biography: LIU Qi (1996—), Male, Master, Research focus: surface engineering.

通讯作者: 程江波 (1979—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为表面制造与新材料。邮箱: Chengjiangbo@hotmail.com

Corresponding author: CHENG Jiang-bo (1979—), Male, Doctor, Associate professor, Research focus: surface manufacturing and new materials. E-mail: Chengjiangbo@hotmail.com

wear volumes and 3-dimensional profiles of worn tracks of the coating were measured by LEXT OL 3000-IR non-contact three-dimensional surface profilometer. The worn surface morphology and components were analyzed by scanning electron microscopy (SEM). The friction coefficient of Al-based amorphous/nanocrystalline coating decreased with the increase of load. Under dry friction conditions, the wear rate of coating increased with the increase of load. The wear resistance of the coating was about 2.5 times that of the 6061-Al alloy with sliding speed of 10 mm/s and load of 15 N. The wear mechanism was brittle flaking, abrasive wear and oxidative wear. In 3.5%NaCl solution, the wear rate of the coating gradually decreased with the increase of load. When the sliding speed was 35 mm/s and load was 30 N, the wear resistance of the coating in corrosive medium was about 8 times that of 6061-Al alloy. The wear mechanism of the coating was delamination and corrosion damage. The Al-based amorphous/nanocrystalline coating has excellent wear resistance in dry friction and corrosive media, and can be used as a lightweight alloy coating in the field of surface protection.

**KEY WORDS:** Al-based amorphous/nanocrystalline; coating; dry sliding; tribocorrosion; wear mechanism

磨损和腐蚀是机械零部件与工程构件的主要破坏形式,是工业领域和日常生活中常见的现象,也是造成材料和能源损耗的主要原因。磨损、腐蚀造成的工件或结构失效大多是从表面开始的,利用热喷涂技术不仅可以恢复受损工件的尺寸,还能延长零件的使用寿命<sup>[1-4]</sup>。近年来,随着非晶纳米晶合金的研究开发与应用,非晶纳米晶涂层的制备及摩擦磨损性能研究已成为热喷涂技术重要的发展方向之一<sup>[5,6]</sup>。

高速电弧喷涂技术是一种成本低、效率高且易于操作的涂层制备技术,其涂层的形成是一个复杂的非平衡态合金化过程。电弧喷涂过程中,单个熔融粒子的瞬间冷却速度可达  $10^5 \text{ K/s}$ <sup>[7]</sup>,这种非平衡快速凝固是非晶纳米晶形成的必要条件。铝基非晶合金具有比强度和延展性较高、耐腐蚀性和耐磨性优异<sup>[8-10]</sup>等特点,是一种具有广阔应用前景的轻质结构材料,近年来越来越受到研究者的青睐。John Henao 等人<sup>[11]</sup>利用高压冷气体喷涂技术在 7075-T6 铝合金表面制备铝基非晶合金涂层,该涂层相对于基体的耐磨性提高了 2 倍。Gao 等人<sup>[12]</sup>利用超音速火焰喷涂在 AA2024 铝合金基体上制备出铝基非晶涂层,相比于基体,涂层的耐磨性有明显的提高。本课题组前期<sup>[13]</sup>制备的 AlFeSi 非晶纳米晶涂层具有较高的硬度,其相对耐磨性为 6061 铝合金的 2.9 倍。这些研究成果表明,相比于铝合金,铝基非晶纳米晶涂层的耐磨性得到了较大的提升,因此进一步开发低成本铝基非晶纳米晶材料以提高涂层耐磨性能的研究仍然具有十分重要的意义。

本文研究了不同载荷作用下 AlSiFeMm 非晶纳米晶涂层的干摩擦行为及其在腐蚀介质下的磨损行为,探索传统电弧喷涂技术制备的铝基非晶涂层服役于海洋苛刻环境下的可能性,为 AlFeSi 系非晶纳米晶涂层在摩擦学领域的应用奠定试验基础。

## 1 试验

喷涂丝材为自制的 2 mm 铝基粉芯丝材,丝材及涂层的具体制备过程见文献[5]。通过前期组织的研究

与表征可知,本设计涂层为非晶纳米晶组织。磨损试验前,用粒度 240<sup>#</sup>到 2000<sup>#</sup>的 SiC 砂纸依次打磨试验样品的表面,砂纸磨到 2000<sup>#</sup>后,使用粒度为  $1 \mu\text{m}$  的金刚石研磨膏抛光至表面粗糙度为  $0.05 \mu\text{m}$ ,然后依次在去离子水以及丙酮中超声清洗 10 min,最后真空干燥。

利用 Rtec (MFT-3000) 往复式试验机来测试涂层在干摩擦条件和腐蚀介质(3.5%NaCl)条件下的摩擦磨损性能。腐蚀磨损试验中,保持涂层完全浸没在腐蚀介质中,除磨损表面外,其余面用环氧树脂镶嵌,以防止涂层与基体之间产生电偶腐蚀。干摩擦的试验参数为:滑动速度 10 mm/s,法向载荷 5、15、25 N。腐蚀介质下的摩擦磨损试验参数为:滑动速度 35 mm/s,法向载荷 10、30、50 N。单次滑动行程均为 2 mm,摩擦对偶为直径 12.7 mm 的 WC 球,磨损时间为 20 min。试验中选取 6061 铝合金作为对比试样。每种参数下涂层的摩擦磨损试验重复 3 次。摩擦系数由试验系统自动纪录,试验后,利用 LEXT OL 3000-IR 非接触三维表面轮廓仪测定涂层的磨损体积,利用 SEM 分析试样磨损后的表面形貌。计算磨损率,以表征涂层的磨损性能,使用公式(1)<sup>[14]</sup>计算磨损率。

$$W = \frac{V}{D \times L} \quad (1)$$

式(1)中:  $W$  是磨损率 ( $\text{mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ ),  $V$  是磨损体积 ( $\text{mm}^3$ ),  $D$  是施加载荷 (N),  $L$  是磨损距离 (m)。

## 2 结果与讨论

### 2.1 涂层的组织形貌

图 1 为 AlSiFeMm 非晶纳米晶涂层的微观组织形貌。可以看出,涂层呈典型的层状结构,与基体间结合良好。整个涂层呈现出了 4 种不同颜色衬度的区域:灰色区域、白色区域、灰黑色区域和黑色区域。对不同区域进行能谱分析,其化学组成如表 1 所示。

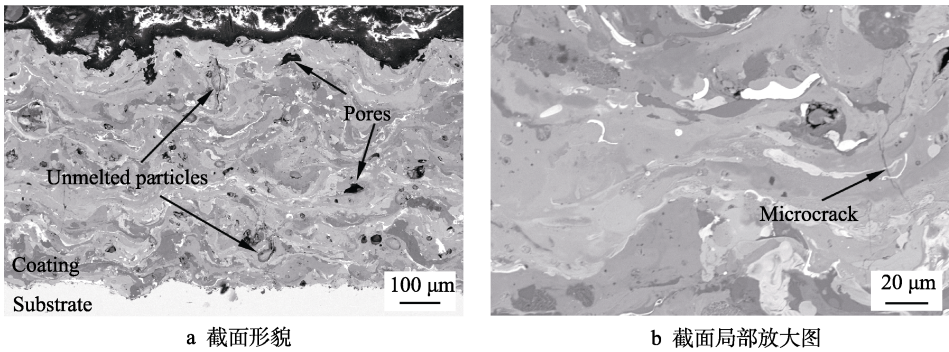


图 1 AlSiFeMm 涂层截面微观形貌  
Fig.1 SEM image of cross-section of the AlSiFeMm coating:  
a) SEM image of cross-section of the coating, b) local amplified image of the coating

表 1 涂层不同区域元素分布  
Tab.1 Element distribution in different regions of the coating

Composition	O	Al	Si	Fe	Ni	Ce	Pr	Nd	La
White region	26.23	—	—	—	7.49	31.70	4.87	9.64	20.07
Gray region	—	62.34	18.42	7.98	8.63	—	—	2.63	—
Gray-black region	—	75.95	10.75	4.68	6.30	2.32	—	—	—

可以看出，灰色区域为涂层合金，白色区域为含稀土的氧化物。另外，涂层中存在少量微裂纹、黑色的孔隙和近似于圆形的未熔粒子，利用图像处理方法测得涂层的孔隙率为 2.3%。

2.2 干摩擦条件下涂层的摩擦磨损行为

图 2 是磨损速度为 10 mm/s、不同载荷作用下 AlSiFeMm 非晶纳米晶涂层和 6061 铝合金的磨损试验结果。由图 2a 可以看出，涂层和 6061 铝合金的磨

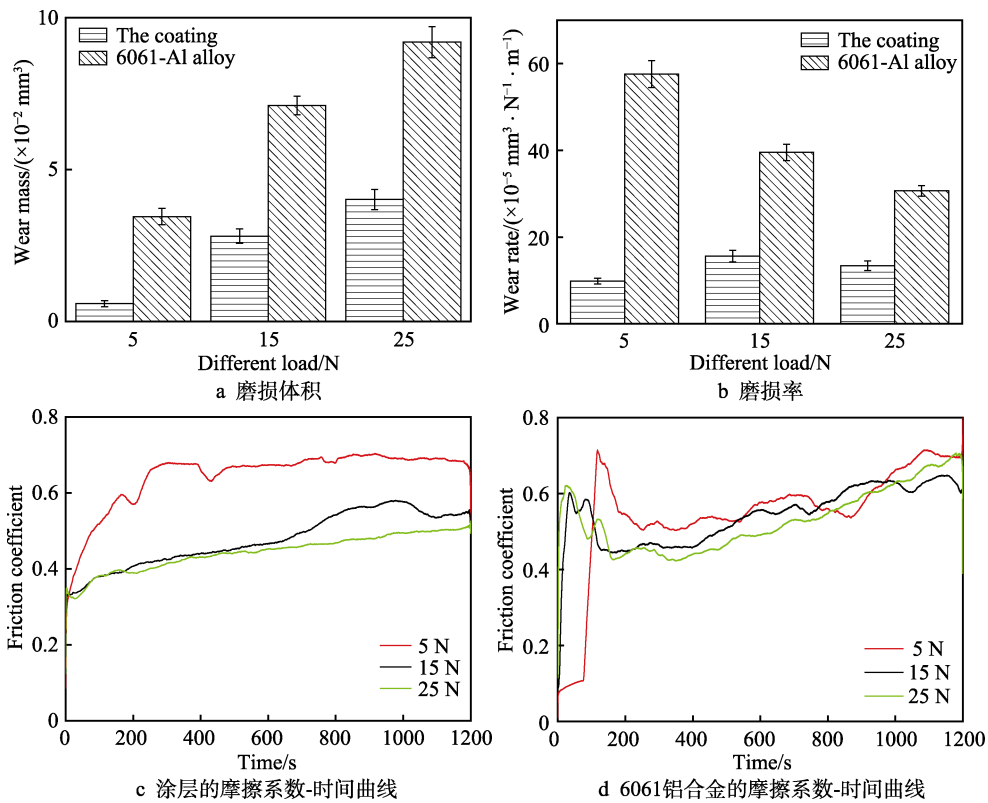


图 2 不同载荷作用下涂层与 6061 铝合金的磨损体积、磨损率与摩擦系数  
Fig.2 Wear mass, wear rate and friction coefficient curves of the coating and 6061-Al alloy under different loads:  
a) wear mass, b) wear rate, c) friction coefficients of the coating, d) friction coefficients of 6061-Al alloy

损体积随着载荷的增加而增加,且6061铝合金的磨损体积远高于涂层。由图2b可知,在相同的测试条件下,6061铝合金的磨损率高于涂层,在三种载荷作用下,6061铝合金的磨损率分别为涂层的5.8、2.5和2.3倍,这表明涂层的耐磨性优于6061铝合金。由于在磨损过程中6061铝合金磨屑不能及时排出,导致其磨损率在一定程度上呈现降低趋势。由图2c和图2d可知,与6061铝合金相比,涂层的摩擦系数较为稳定,没有呈现出较大的波动,且随着载荷的增加,涂层的摩擦系数呈变小的趋势。这主要是因为非晶纳米晶涂层具有较高的硬度,因而有较大的塑性变形抗力,在磨损实验中,载荷增加的比例大于剪切力和接触面积增加比例的乘积,因此摩擦系数表现为随

载荷的增加而减小。

图3为AlSiFeMm非晶纳米晶涂层在不同载荷下的磨损表面形貌和三维形貌。当外加载荷为5 N时,磨损表面较为平滑,涂层呈现出块状剥落现象,由区域A的能谱分析结果(表2)可知,磨痕表面含有一定的O,说明在摩擦热的作用下,涂层磨损表面发生了氧化行为。当载荷增加至25 N时,涂层磨痕表面发生严重的塑性变形,存在犁沟、剥落坑以及大量的磨屑。从表2能谱分析结果来看,区域B主要是涂层合金,含有少量的氧化物;区域C的氧含量较高,氧化现象较为严重。从图3c和图3d三维磨损形貌中也可以看出,随着载荷增加,磨痕的宽度和深度升高。

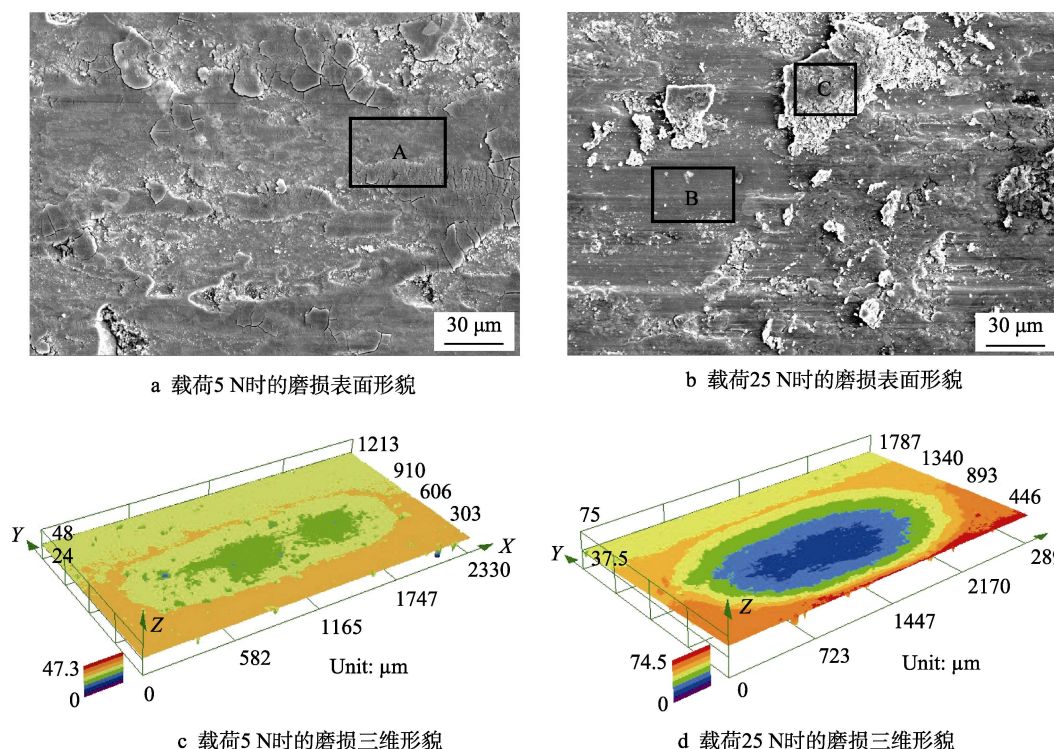


图3 涂层在不同载荷下的磨损表面形貌和三维形貌

Fig.3 Worn surfaces and 3D profiles of the coating under different loads: a) worn surface with load of 5 N, b) worn surface with load of 25 N, c) 3D profile with load of 5 N, d) 3D profile with load of 25 N

表2 干摩擦条件下磨痕表面不同区域化学成分

Tab.2 Chemical composition of different regions of the wear track under dry friction

Composition	O	Al	Si	Fe	Ni	Ce	wt%
Region A	16.35	56.23	11.45	4.00	9.66	2.31	
Region B	8.80	57.71	17.21	5.63	9.05	1.60	
Region C	40.56	37.12	8.88	4.56	7.58	1.30	
Region D	59.92	40.08	—	—	—	—	

在磨损过程中,陶瓷 WC 球施加垂直表面方向的法向载荷,涂层表面及次表面首先会发生塑性变形。随着 WC 球的反复碾压,涂层的扁平粒子间将会萌生微裂纹,随着磨损的持续进行,这些微裂纹逐渐扩展

形成不稳定裂纹,从而导致层状粒子发生断裂,形成剥落坑。同时,这些剥落的块状磨屑一部分被 WC 球碾压在摩擦副之间担当磨损颗粒,对涂层产生切削作用,使得涂层摩擦磨损行为由二体磨损转变为三体磨



损, 从而形成犁沟形貌。另外干摩擦过程中会产生大量的摩擦热, 且摩擦热随外加载荷的增大而变高。随着摩擦热的不断升高, 涂层表层温度也随之上升, 形成的磨屑和露出新鲜涂层的表面将会发生氧化行为。这些氧化物一方面在涂层表面快速形成一层保护性的氧化膜, 减小涂层的磨损程度; 另一方面, 氧化层的显微硬度较高, 大大减少了摩擦副之间的实际接触面积。当外加载荷增大时, 涂层表面的剪切应力也随之增大, 磨损表面的氧化层容易剥落, 氧化物颗粒在摩擦副中会加速磨损。而且当局部的摩擦热超过铝基非晶相的晶化转变温度时, 将会导致涂层中的非晶相转变为晶体<sup>[15-17]</sup>, 降低涂层硬度, 从而导致磨损量的升高。因此涂层的磨损量随着载荷的增大而增大。干

摩擦条件下, 涂层的磨损机制为脆性剥落、磨粒磨损和氧化磨损。

图 4 为涂层与 6061 铝合金在 15 N、10 mm/s 下的磨损表面和三维形貌。由图 4a 和图 4b 可以看出, 涂层磨损表面呈现出塑性变形和脆性剥落的特征, 而 6061 铝合金磨损表面存在大量裂纹, 呈大片状剥落形貌。由表 2 知, D 区域的元素成分为  $\text{Al}_{40.08}\text{O}_{59.92}$ , 这表明 6061 铝合金在磨损过程中发生了严重的氧化行为。由图 4c 和图 4d 也可以看出, 相比于涂层, 6061 铝合金磨痕的三维形貌宽且深, 这说明在相同的干摩擦条件下, 6061 铝合金磨损量更大, 此时 6061 铝合金的磨损体积为  $7.113 \times 10^{-2} \text{ mm}^3$ , 是涂层磨损体积 ( $2.809 \times 10^{-2} \text{ mm}^3$ ) 的 2.5 倍。

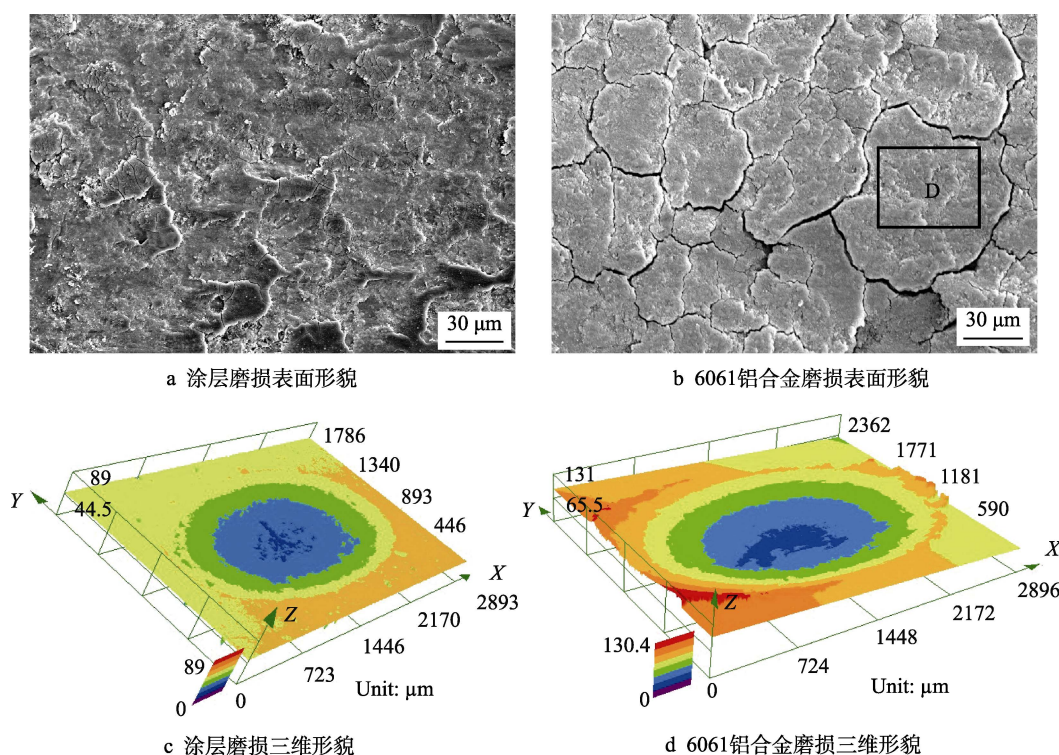


图 4 涂层与 6061 铝合金在 10 mm/s、15 N 下的磨损表面和三维形貌

Fig.4 Worn surfaces and 3D profiles of the coating and 6061-Al alloy at sliding speed of 10 mm/s and load of 15 N: a) worn surface of the coating, b) worn surface of 6061-Al alloy, c) 3D profile of the coating, d) 3D profile of the 6061-Al alloy

由于 6061 铝合金的硬度较低, 抗变形能力较差, 当合金表面受到硬质 WC 球的挤压时, 会发生剧烈的塑性变形, 这将引起位错的增殖与运动。随着塑性变形程度的加深, 合金表面形成位错塞积, 在表层下会萌生裂纹源, 随着塑性变形的加剧, 裂纹将发生扩展, 当裂纹最后折向表面 (发生剪切) 时, 裂纹上部的材料将变成薄片状的磨屑剥落下来, 形成剥层磨损。同时磨损过程中产生的摩擦热使合金发生氧化, 生成的氧化物硬度较合金基体高, 氧化物处于对磨球与合金之间, 也引起了进一步的磨粒磨损。相比而言, 涂层中非晶结构具有较高的硬度, 从而提高了其耐磨性。另一方面, 涂层中析出的纳米晶相起到了弥散强化的

作用, 减少了涂层的体积损失。Yavari<sup>[18]</sup>和 Gloriant<sup>[19]</sup>证实了纳米晶在非晶基体中均匀析出的复合结构比纯非晶相具有更好的耐磨性能。因此相对于 6061 铝合金, 铝基非晶纳米晶涂层具有较为优异的耐磨性。

$$V_w = k \frac{S \cdot N}{H} \quad (2)$$

式(2)为 Archard 磨损公式<sup>[20,21]</sup>, 其中:  $V_w$  为材料磨损体积;  $k$  为摩擦系数;  $S$  为磨损距离;  $N$  为载荷大小;  $H$  为材料硬度。由公式(2)可知, 磨损体积与载荷大小成正比, 磨损时间相同, 载荷越高, 则磨损体积越大。而且随着外加载荷的增大, 会引起摩擦副接触点之间温度迅速上升, 导致接触点材料的强度降

低。WC 对磨球与涂层之间的实际接触面积增大, 磨损程度加剧, 因此在磨损时, 载荷越大, 涂层的磨损量越大。式(2)还表明材料的磨损体积与材料硬度成反比, 硬度越高, 磨损体积越小。AlSiFeMm 非晶纳米晶涂层的显微硬度约为  $350\text{HV}_{100}$ , 是 6061 铝合金硬度的 4.7 倍<sup>[5]</sup>, 因此在相同的磨损条件下, AlSiFeMm 非晶纳米晶涂层表现出较为优异的耐磨性。

## 2.3 腐蚀介质下涂层的摩擦磨损行为

图 5 为非晶纳米晶涂层与 6061 铝合金在 3.5%NaCl 溶液中于不同载荷下的磨损率与摩擦系数分布图。由图 5a 可知, 随着载荷的增加, 涂层和 6061 铝合金的磨损体积也随之增加, 且 6061 铝合金表现出更高的磨损体积。由图 5b 可以看出, 涂层呈现出较小的磨

损率, 且磨损率随载荷的增大而变小, 三种载荷作用下, 6061 铝合金的磨损率分别为涂层的 7 倍、8 倍和 8 倍。6061 铝合金的磨损率远高于涂层, 说明涂层具有优异的耐腐蚀磨损性能。由图 5c 和图 5d 可以看出, 与 6061 铝合金相比, 涂层具有较小的摩擦系数, 且摩擦系数随载荷的增加而降低。这是因为在磨损的过程中, NaCl 溶液作为腐蚀介质侵蚀涂层表面, 同时也充当了润滑剂起到减磨作用。在较高载荷作用下, 涂层表面的塑性变形增加, 磨损程度增大, 摩擦副对磨时产生的磨屑在剪切、挤压应力的作用下形成表面光滑的微凸体。由于磨屑和光滑微凸体的存在, 减少了 WC 球和涂层的实际接触面积, 在大量的磨屑和 NaCl 溶液充当润滑剂的作用下, 涂层的摩擦系数发生一定程度的下降。

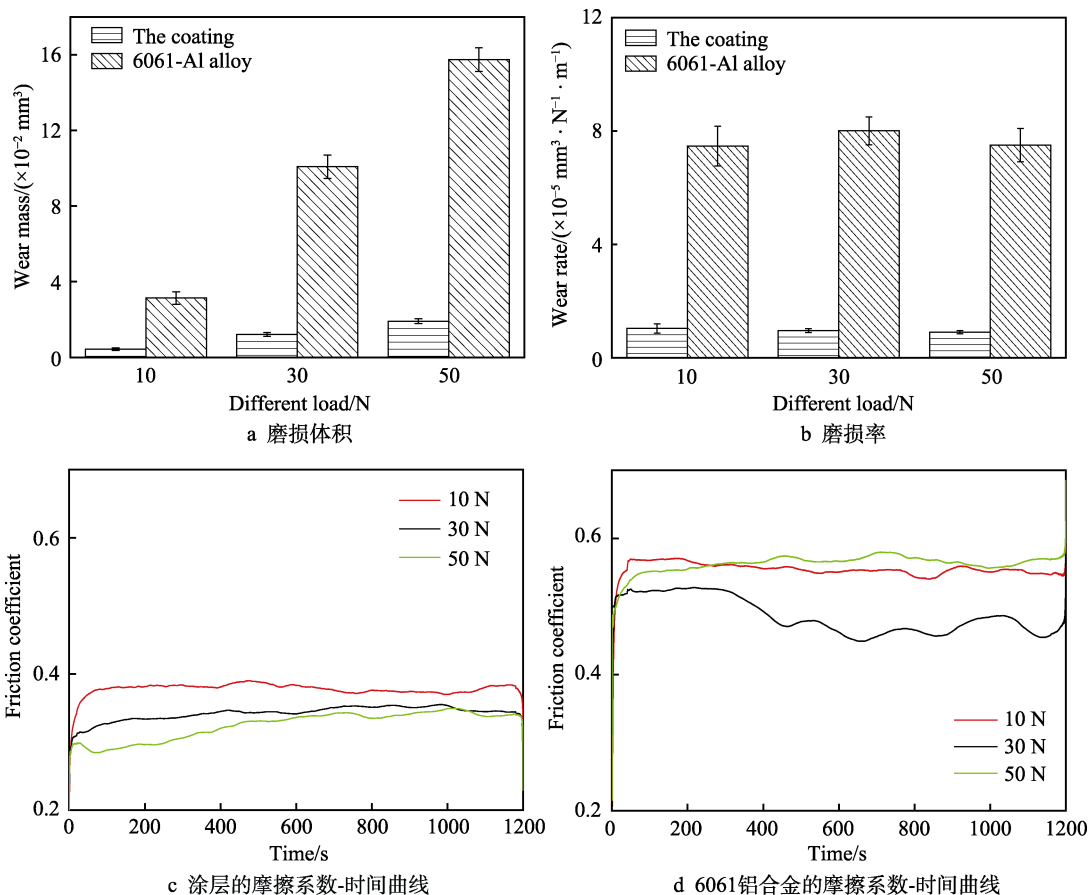


图 5 不同载荷作用下涂层与 6061 铝合金的磨损体积、磨损率与摩擦系数曲线

Fig.5 Wear mass, wear rate and friction coefficient curves of the coating and 6061-Al alloy under different loads: a) wear mass, b) wear rate, c) friction coefficients of the coating, d) friction coefficients of 6061-Al alloy

图 6 为铝基非晶纳米晶涂层在不同载荷下的磨损表面形貌和磨痕三维形貌。在较低载荷作用下 (图 6a), 磨损表面较为光滑, 分为白色区域和灰色区域, 由能谱分析结果 (表 3) 可知, 白色区域 A 主要为涂层的合金元素, 灰色区域 B 发生了氧化行为。随着载荷的增大 (图 6b), 磨损表面变得十分粗糙, 存在裂纹和大量的剥落坑, 由能谱分析可知, 区域 C 发生

了氧化现象。由图 6c 和图 6d 可知, 较大应力作用下, 涂层在腐蚀介质中的磨损形貌要比较小应力时粗糙得多, 表现为在磨痕底部出现大量较深的剥落坑或点蚀坑。这是因为涂层同时受到磨损与腐蚀的协同作用, 磨损使铝基非晶纳米晶涂层表面出现较为严重的塑性变形, 表面的钝化膜发生破裂, 磨损表面的缺陷密度急剧增大, 空位、位错等缺陷处具有较高的活性,



容易形成“应变差异电池”，加速了疲劳裂纹的扩展<sup>[22]</sup>，在切向应力的作用下容易发生层片状剥落。同时磨损过程中摩擦副的往复振动促进了阴极反应过程，Cl<sup>-</sup>会沿着微裂纹向涂层深度方向渗透，促进点蚀的形成，加速腐蚀的进行<sup>[23,24]</sup>。由图 6c 和图 6d

可以看出，当外加载荷较小时，涂层表面点蚀坑的数量及体积较小；当载荷增大时，涂层的点蚀坑的数量和体积明显增加，表明应力对点蚀的形成具有较大影响。因此，涂层的磨损机制为剥层磨损和腐蚀磨损。

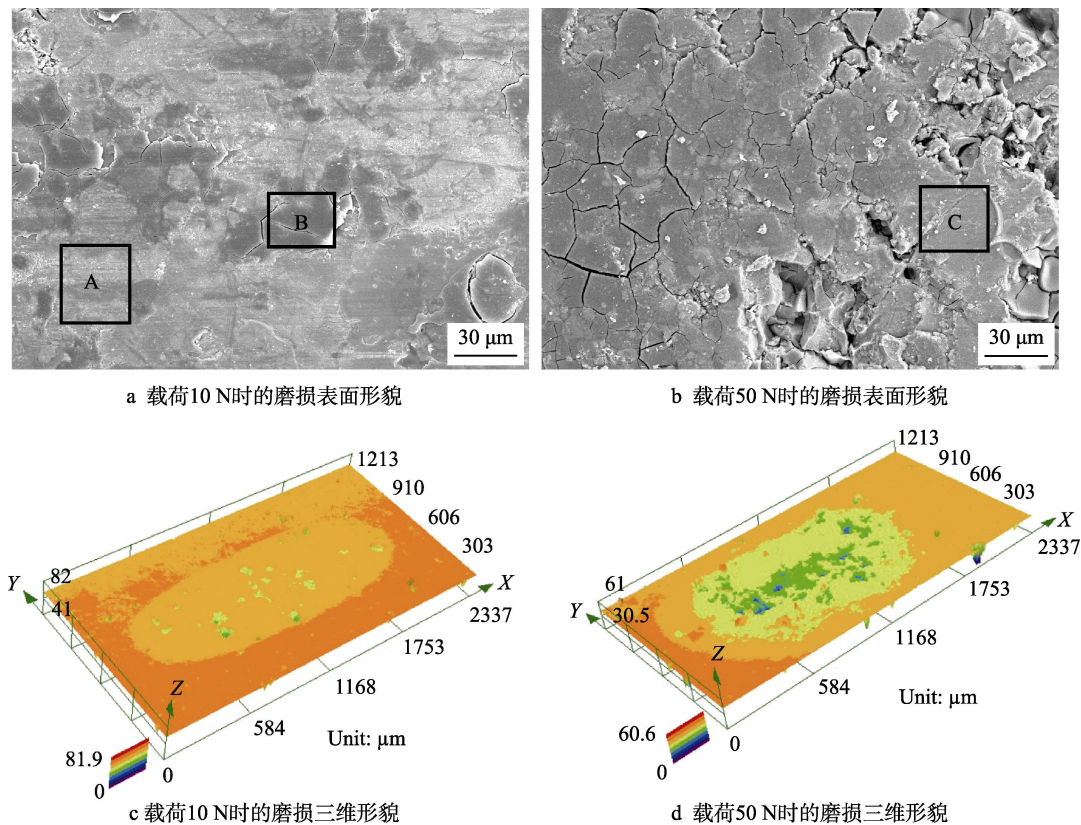


图 6 腐蚀磨损条件下涂层在不同载荷作用下的磨损表面形貌和三维形貌  
Fig. 6 Worn surfaces and 3D profiles of the coating with different loads under corrosive wear condition: a) worn surface with load of 5 N, b) worn surface with load of 25 N, c) 3D profile with load of 5 N, d) 3D profile with load of 25 N

表 3 腐蚀介质条件下磨痕表面不同区域的化学成分  
Tab.3 Chemical composition of different regions of the worn track under corrosive media condition

Composition	O	Al	Si	Fe	Ni	La	Ce	Pr
Region A	4.18	42.48	15.20	7.73	22.97	2.54	4.44	0.35
Region B	23.35	34.77	13.12	6.65	15.15	1.19	5.01	1.78
Region C	28.94	39.53	14.01	4.90	10.19	1.17	1.26	—

图 7 为涂层与 6061 铝合金在 30 N、35 mm/s 下的磨损表面形貌和三维形貌，涂层的磨损表面存在裂纹和少量即将剥落的块状涂层。由能谱分析结果（表 4）可以看出，这些即将剥落的 A 区域氧化程度较高，B 区域主要为合金元素。由图 7b 可以看出，6061 铝合金的磨损表面要粗糙得多，能谱分析显示区域 C 主要为铝的氧化物，并且存在 Cl<sup>-</sup>。这是因为在 WC 球反复推碾作用下，硬度较低的 6061 铝合金表面会产生微裂纹，由于铝合金对点蚀较为敏感<sup>[25]</sup>，Cl<sup>-</sup>会沿着微裂纹向合金深度方向渗透，合金中 Al 发生阳极溶解形成腐蚀产物，同时释放的氢气以气泡的形式

溢出，导致合金内部存在应力，在内部应力和外部切向应力的同时作用下，合金表面发生剥落，同时形成腐蚀产物，从而导致涂层失效。由 7c 和图 7d 也可以看出，在相同的磨损条件下，6061 铝合金的磨痕宽度和深度要明显大于涂层，说明涂层具有较为优异的耐腐蚀磨损性能。

图 8 为涂层与 6061 铝合金在 3.5%NaCl 溶液中浸泡 1 h 后的动电位极化曲线。由图 8 可以看出，6061 铝合金具有较低的自腐蚀电流密度，阳极区有明显的钝化行为，这表明 6061 铝合金在腐蚀介质中具有较为优异的耐蚀性。腐蚀介质中的磨损对材料的损伤主

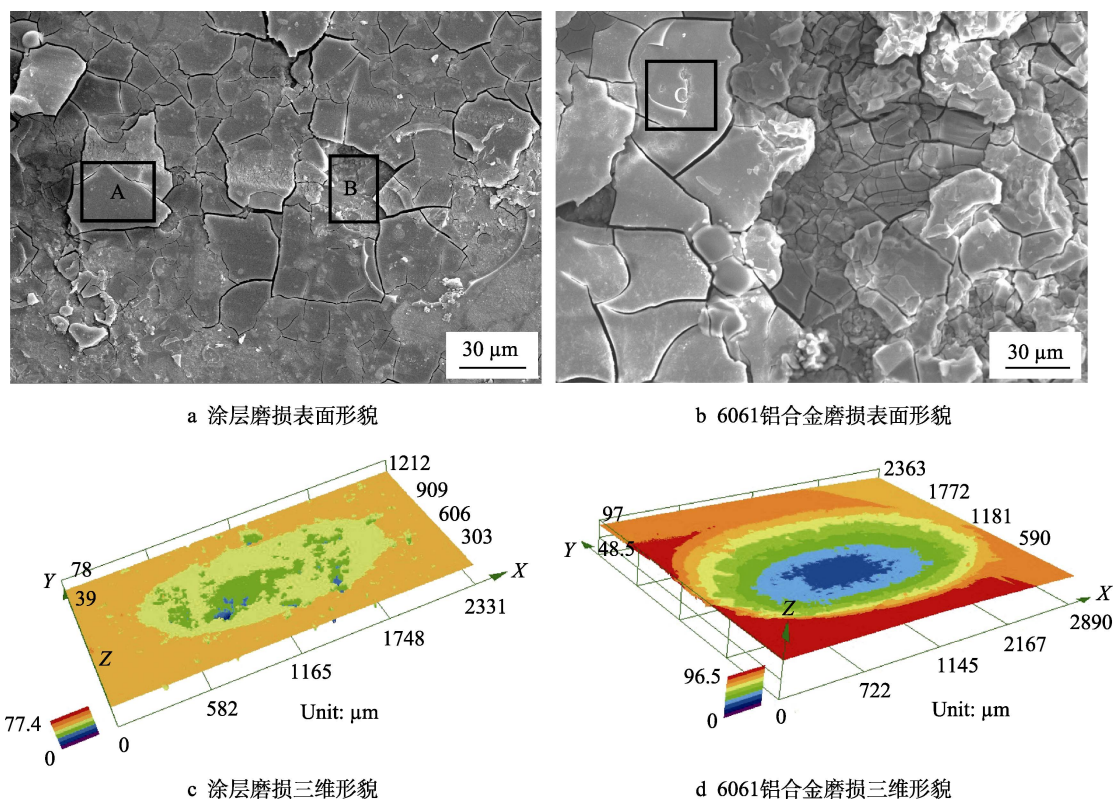


图 7 腐蚀磨损条件下涂层与 6061 铝合金的磨损表面形貌和三维形貌

Fig.7 Worn surfaces and 3D profiles of the coating and 6061-Al alloy under corrosive wear condition: a) worn surface of the coating, b) worn surface of 6061-Al alloy, c) 3D profile of the coating, d) 3D profile of the 6061-Al alloy

表 4 涂层与 6061 铝合金磨损表面不同区域化学成分

Tab.4 Chemical composition in different regions of the worn track of the coating and 6061-Al alloy

Composition	O	Al	Cl	Si	Fe	Ni	La	Ce	Pr
Region A	51.32	38.14	—	10.54	—	—	—	—	—
Region B	11.49	56.42	—	9.67	4.96	7.62	2.70	5.07	0.59
Region C	60.13	39.60	0.27	—	—	—	—	—	—

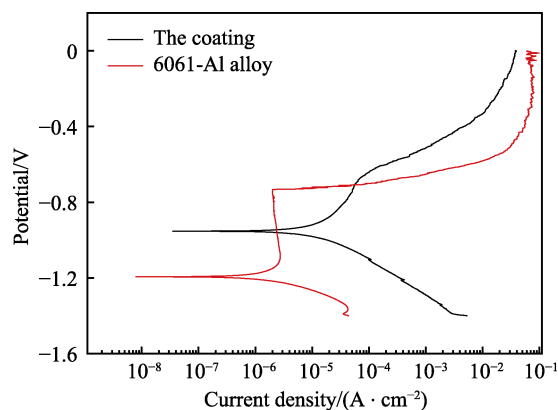


图 8 涂层与 6061 铝合金动电位极化曲线

Fig.8 Potentiodynamic polarization curves of the coating and 6061-Al alloy

要分为 3 个部分：机械磨损、电化学腐蚀及二者交互作用损伤<sup>[26]</sup>。材料的损伤可用公式(3)表述。

$$V = V_{\text{wear}} + V_{\text{corr}} + \Delta V \quad (3)$$

式(3)中,  $V$  是总的材料损失,  $V_{\text{wear}}$  为由于机械磨损造成的材料损失,  $V_{\text{corr}}$  为由于电化学腐蚀造成的材料损失,  $\Delta V$  为二者交互作用对材料造成的损失。相比于涂层, 6061 具有较好的耐蚀性, 但是在腐蚀介质中的磨损体积远高于涂层的磨损体积, 且由图 7c 和图 7d 可以看出, 涂层的磨损中具有明显的点蚀坑, 而 6061 铝合金的磨损中没有明显的点蚀坑出现。这表明在腐蚀磨损过程中, 涂层的体积损失是机械磨损与腐蚀磨损共同作用的结果, 而对于硬度较低的 6061 铝合金, 机械磨损的作用远高于电化学腐蚀的作用。

### 3 结论

1) 在干摩擦条件下, 随着载荷的增大, 涂层磨损体积和磨损率逐渐增加。铝基非晶纳米晶涂层具有良好的耐磨性能, 在相同的磨损条件下, 其相对耐磨性是 6061 铝合金的 2.5 倍。涂层在干摩擦条件下的



主要失效形式为脆性剥落、磨粒磨损和氧化磨损。

2) 在腐蚀介质中, 涂层的磨损体积随着载荷的增加而增大。在相同的磨损条件下, 涂层的相对耐磨性是 6061 铝合金的 8 倍, 具有优异的耐腐蚀磨损性能。涂层在腐蚀介质中的磨损失效机理主要为剥层磨损和腐蚀损伤。

3) 涂层具有非晶纳米晶复合结构及较为优异的力学性能, 在干摩擦和腐蚀介质条件下均表现出优异的耐磨性能, 可以作为轻质合金涂层应用于表面防护领域。

#### 参考文献:

- [1] 徐滨士. 再制造工程基础及其应用[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2005.  
XU Bin-shi. Remanufacturing engineering foundation and its application[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2005.
- [2] UOZATO S, NAKATA K, USH M. Corrosion and wear behaviors of ferrous powder thermal spray coatings on aluminum alloy[J]. Surface and coatings technology, 2003, 169-170: 691-694.
- [3] 朱子新, 徐滨士, 马世宁, 等. 高速电弧喷涂 Fe-Al/WC 复合涂层的摩擦学特性[J]. 摩擦学学报, 2003, 23(3): 173-178.  
ZHU Zi-xin, XU Bin-shi, MA Shi-ning, et al. Tribological properties of Fe-Al/WC composite coating prepared by high velocity arc spraying[J]. Tribology, 2003, 23(3): 173-178.
- [4] 程江波, 梁秀兵, 王泽华, 等. 油润滑条件下 FeBSiNb 非晶涂层磨损性能研究[J]. 摩擦学学报, 2012, 32(2): 119-125.  
CHENG Jiang-bo, LIANG Xiu-bing, WANG Ze-hua, et al. Wear behavior of FeBSiNb metallic glass coating under oil lubrication[J]. Tribology, 2012, 32(2): 119-125.
- [5] LIU Q, CHENG J, WANG B, et al. Effects of substitution of Fe by mischmetal on formation and properties of arc-sprayed AlSi-based amorphous coating[J]. Journal of thermal spray technology, 2018, 27(6): 949-958.
- [6] ZHANG Z B, LIANG X B, CHEN Y X, et al. Abrasion resistance of Al-Ni-Mm-Fe amorphous and nanocrystalline composite coating on the surface of AZ91 magnesium alloy[J]. Physics procedia, 2013, 50: 156-162.
- [7] NEWBERY A P, GRANT P S, NEISER R A. The velocity and temperature of steel droplets during electric arc spraying[J]. Surface & coatings technology, 2005, 195(1): 91-101.
- [8] INOUE A, OHTERA K, TSAI A P, et al. Aluminum-based amorphous alloys with tensile strength above 980 MPa (100 kg/mm<sup>2</sup>)[J]. Japanese journal of applied physics, 1988, 27(4): 479-482.
- [9] GAUTHIER B, TAILLEART N, EIDELMAN S, et al. Spray applied amorphous/nanocrystalline aluminum alloy coatings as a replacement for aluminum cladding[J]. ECS transactions, 2008, 11(15): 59-74.
- [10] YANG B J, YAO J H, ZHANG J, et al. Al-rich bulk metallic glasses with plasticity and ultrahigh specific strength[J]. Scripta materialia, 2009, 61(4): 423-426.
- [11] HENAO J, CONCUSTELL A, CANO I G, et al. Novel Al-based metallic glass coatings by cold gas spray[J]. Materials & design, 2016, 94: 253-261.
- [12] GAO M, LU W, YANG B, et al. High corrosion and wear resistance of Al-based amorphous metallic coating synthesized by HVOF spraying[J]. Journal of alloys and compounds, 2018, 735: 1363-1373.
- [13] CHENG, J, WANG B, LIU Q. In-situ synthesis of novel Al-Fe-Si metallic glass coating by arc spraying[J]. Journal of alloys and compounds, 2017, 716: 88-95.
- [14] GREER A L, RUTHERFORD K L, HUTCHINGS I M. Wear resistance of amorphous alloys and related materials[J]. International materials reviews, 2002, 47(2): 87-112.
- [15] FLEURY E, LEE S M, AHN H S, et al. Tribological properties of bulk metallic glasses[J]. Materials science & engineering: A, 2004, 375: 276-279.
- [16] KONG J, XIONG D, LI J, et al. Effect of flash temperature on tribological properties of bulk metallic glasses[J]. Tribology letters, 2009, 35(3): 151-158.
- [17] CHENG J, LIU D, LIANG X, et al. Wear behaviors of arc-sprayed FeBSiNb amorphous coatings[J]. Tribology letters, 2015, 60(2): 22.
- [18] YAVARI A R, BOTTA F W J, RODRIGUES C A D, et al. FeNiB-based metallic glasses with fcc crystallisation products[J]. Journal of non-crystalline solids, 2002, 304 (1): 44-50.
- [19] GLORANT T. Microhardness and abrasive wear resistance of metallic glasses and nanostructured composite materials[J]. Journal of non-crystalline solids, 2003, 316 (1): 96-103.
- [20] ARCHARD J F. Contact and rubbing of flat surfaces[J]. Journal of applied physics, 1953, 24(8): 981-988.
- [21] CHENG J B, LIANG X B, XU B S. Devitrification of arc-sprayed FeBSiNb amorphous coatings: effects on wear resistance and mechanical behavior[J]. Surface & coatings technology, 2013, 235: 720-726.
- [22] 陈君, 李全安, 张清, 等. AISI316 不锈钢腐蚀磨损交互作用的研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2014, 34(5): 433-438.  
CHEN Jun, LI Quan-an, ZHANG qin, et al. Sliding wear-corrosion performance of AISI316 stainless steel against alumina in artificial seawater[J]. Journal of Chinese society for corrosion and protection, 2014, 34(5): 433-438.
- [23] IWABUCHI A, SONODA T, YASHIRO H, et al. Application of potential pulse method to the corrosion behavior of the fresh surface formed by scratching and sliding in corrosive wear[J]. Wear, 1999, 225-229: 181-189.
- [24] STEMPEL M, MISCHLER S, LANDOLT D. The effect of contact configuration on the tribocorrosion of stainless steel in reciprocating sliding under potentiostatic control[J]. Corrosion science, 2003, 45(3): 625-640.
- [25] JIANG J Z, HOFMANN D, JARVIS D J, et al. Low-density high-strength bulk metallic glasses and their composites: A review[J]. Advanced engineering materials, 2015, 17(6): 761-780.
- [26] 姜晓霞, 李诗卓, 李曙. 金属的腐蚀磨损[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003: 196-221.  
JIANG Xiao-xia, LI Shi-zhuo, LI Shu. Corrosive wear of metals[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2003: 196-221.