

膜层材料与技术

喷涂工艺对超音速火焰喷涂 Al-Cu-Fe-Si 准晶合金涂层性能的影响

蔡明伟, 曲寿江, 魏先顺, 沈军

(同济大学 材料科学与工程学院, 上海 201804)

摘要:目的 使用活性燃烧高速燃气喷涂(AC-HVAF)方法制备高质量的 Al-Cu-Fe-Si 准晶涂层,研究喷涂工艺对涂层性能的影响。方法 采用气雾化 Al-Cu-Fe-Si 准晶合金粉末,利用 AK02T 型 AC-HVAF 喷涂系统制备 Al-Cu-Fe-Si 准晶涂层材料。通过 X 射线衍射及扫描电镜观察分析准晶合金粉末和涂层的组织与结构,通过电化学工作站、显微硬度计和接触角测试仪等手段分析准晶合金涂层的耐蚀性、显微硬度及抗粘性能。结果 对气雾化准晶 Al-Cu-Fe-Si 合金粉末的研究发现,冷却速率显著影响准晶合金粉末的组织,在冷却速率较快的粉末中形成胞状晶组织,准晶 I 相含量较高。对准晶合金涂层进行热处理,高温退火显著提高了涂层的硬度,950 ℃退火 12 h 后,硬度值达到 (724 ± 153) HV0.1。分别对准晶合金涂层和基体 45# 钢的接触角进行测量,准晶合金涂层的接触角最大为 95°,而 45# 钢的仅为 79°。通过电化学工作站测试比较涂层的耐蚀性,发现在 3.5% (质量分数) 的 NaCl 溶液中,喷涂在 45# 钢和 5052 铝合金基体上的涂层腐蚀电流密度 J_{corr} 分别为 6.8×10^{-6} , 2.0×10^{-7} A/cm²。结论 不同粒径的气雾化准晶合金粉末的相组成不同,选择合适的粒径是保证铝基准晶合金涂层质量的前提。对涂层进行合适的热处理可以有效地提高涂层的显微硬度,铝基准晶合金涂层的接触角较 45# 钢的高,提高了基体的抗粘性。不同基体上制备的准晶合金涂层的耐蚀性有很大差异,5052 铝合金基体上的准晶涂层耐蚀性优于喷涂在 45# 钢基体上的涂层。

关键词: Al-Cu-Fe-Si 准晶涂层; 超音速火焰喷涂; 显微硬度; 耐腐蚀性能; 抗粘性

中图分类号: TG174.442 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2016)02-0073-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2016.02.011

Effect of Spraying Technology on the Properties of AC-HVAF Sprayed Al-Cu-Fe-Si Quasicrystalline Alloy Coating

CAI Ming-wei, QU Shou-jiang, WEI Xian-shun, SHEN Jun

(School of Material Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

收稿日期: 2016-01-05; 修订日期: 2016-02-15

Received: 2016-01-05; Revised: 2016-02-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(51274151)

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China (51274151)

作者简介: 蔡明伟(1990—),男,硕士生,主要研究热喷涂技术。

Biography: CAI Ming-wei (1990—), Male, Master graduate student, Research focus: thermal spraying technology.

通讯作者: 沈军(1965—),男,教授,博士生导师,主要从事非晶合金材料、薄膜与涂层材料及高性能轻金属结构材料的研究。

Corresponding author: SHEN Jun (1965—), Male, Professor, Doctoral tutor, Research focus: bulk and coating amorphous metals, electron beam physical vapor deposition and light structural metals.

ABSTRACT: Objective To prepare Al-Cu-Fe-Si quasicrystalline alloy coatings with high quality by AC-HVAF and investigate the effect of spraying parameters on the coating properties. **Methods** Al-Cu-Fe-Si quasicrystalline alloy coatings were prepared by AK02T AC-HVAF spraying system using gas-atomized Al-Cu-Fe-Si quasicrystalline alloy powders. The phase and microstructures of gas-atomized alloy powders and coating were analyzed by XRD and SEM. Other properties, such as corrosion resistance, microhardness and anti-adhesive, were studied by electrochemical workstation, microhardness tester and contact angle instrument. **Results** The study on gas-atomized Al-Cu-Fe-Si quasicrystalline alloy powders found that cooling rate had significant influence on the structure of powders and the cellular structure was founded in the finer powder particles with higher cooling rate and the quasicrystalline content of finer powder particles was higher than that of coarser particles. The microhardness of sprayed quasicrystalline coating increased after annealing at higher temperature during heat treatment. The microhardness reached up to (724 ± 153) HV0.1 after annealing at 950 °C for 12 h. The contact angle between quasicrystalline coating and distilled water at RT reached up to 95°, which was higher than that of 45# steel (79°). The comparison of the corrosion current density for coating by the electrochemical workstation test showed the corrosion current density for coating sprayed on 5052 aluminum substrates was 2.0×10^{-7} A/cm² and for 6.8×10^{-6} A/cm² on 45# steel substrates in 3.5% NaCl solution. **Conclusion** Gas-atomized quasicrystalline alloy powders with different sizes contain different phases. Selection of proper size of quasicrystalline alloy powders is very important for high quality coatings. Annealing process can effectively increase the coating hardness. The contact angle of Al-based quasicrystalline alloy coating is higher than that of 45# steel substrate, which indicates the improvement of anti-adhesive property of substrate. The corrosion resistance of coating varies significantly for different coating substrate materials, the coating sprayed on 5052 aluminums substrate has a better corrosion resistance than that on 45# steels substrate.

KEY WORDS: Al-Cu-Fe-Si quasicrystalline coating; AC-HVAF; microhardness; corrosion resistance; anti-adhesive

准晶材料(Quasicrystal)自1984年被以色列材料科学家谢切曼等人发现以来^[1],由于其独特的结构和优异的性能受到了各国科学家的广泛关注和多方面研究。准晶材料具有较低的表面能、低摩擦因数、高硬度、较好的耐磨性和抗氧化性,以及低的导热和导电系数^[2]。然而,由于它的室温脆性和较低的延展性,使其在结构材料上的应用受到限制。准晶优异的物理及力学性能和表面技术的结合恰好弥补了其不足^[3-6],使准晶涂层材料在表面防护方面的应用成为可能。Al-Cu-Fe系准晶合金属于稳定型准晶^[7],其无毒性,原料低廉,具有很大的应用前景。准晶涂层的第一个商业化产品是1998年法国Sitram公司研发的准晶不粘锅涂层^[8],其替代了此前的特氟龙不粘涂层。美国Ames国家实验室与通用汽车合作研究了Al-Cu-Fe准晶涂层的性能^[9],开发低摩擦因数、高硬度、耐腐蚀及低表面能的涂层材料,使其应用于汽车发动机的零件。在Al-Cu-Fe体系的基础上,研究人员发现用Si元素替代部分Fe,准晶I相区范围随着Si的添加而扩大,获得稳定的I相铝基准晶材料^[10]。

活性燃烧高速燃气喷涂(AC-HVAF)是采用丙烷为燃料,用空气作为助燃剂的超音速火焰喷涂技术,它的火焰温度介于冷喷涂和以氧气作为助燃剂的超音速火焰喷涂HVOF之间。由于准晶材料具有高的室温脆性和低延展性^[11],很难用冷喷涂技术制备^[12]。与传统HVOF和等离子喷涂^[13-14]相比,AC-HVAF具

有较低的温度和更高的速度,可以在制备准晶涂层过程中,减少铝基准晶相的分解和Al元素的损失,获得更加致密的涂层。利用AC-HVAF方法制备Al-Cu-Fe-Si准晶合金涂层未见报道,本研究系首次使用AC-HVAF方法制备Al-Cu-Fe-Si准晶合金涂层,主要研究喷涂工艺对Al-Cu-Fe-Si准晶合金涂层的硬度、润湿性及电化学性能的影响。

1 试验

本文采用的超音速火焰喷涂铝基准晶合金粉末的名义成分为 $\text{Al}_{50}\text{Cu}_{20}\text{Fe}_{15}\text{Si}_{15}$,合金粉末采用雾化方法制备,雾化气体为Ar。分别采用45#钢和5052铝合金两种材料作为基体来制备铝基准晶合金涂层,基体试样尺寸为40 mm×40 mm×10 mm,喷涂前将基体经丙酮超声清洗除油,用180目的白刚玉砂进行喷砂处理,得到粗糙表面。

超音速火焰喷涂设备采用美国Kermetico公司生产的型号为AK 02T的AC-HVAF喷涂系统,该系统使用液态丙烷为燃料,液态丙烷经过汽化器气化后,在AC-HVAF喷枪的燃烧室与压缩空气混合燃烧,经过拉瓦尔喷嘴加速后,获得超音速火焰束流。铝基准晶合金粉末经氮气束流通过轴向注粉器注入AC-HVAF喷枪的燃烧室,合金铝基准晶合金粉末在超音速火焰束流的作用下被加热和加速,高速合金粉末束

流冲击到基体表面形成致密的涂层结构。喷涂过程中喷枪的扫描线速度为 1.5 m/s,移动步距为 2 mm,喷枪离基体试样的喷涂距离为 210 mm,氮气流量为 35 L/min,空气压力为 87.5 psi,丙烷压力为 72 psi,喷枪的枪管长度为 100 mm,涂层厚度为 220 μm。AC-HVAF 的燃烧室根据长短分为长燃烧室(89 mm)和短燃烧室(69 mm),燃烧室的长短影响合金粉末的加热过程,从而影响合金粉末离开燃烧室时的加热温度。本文主要研究不同燃烧室和基体对准晶合金涂层的组织和性能的影响。喷涂试样参数见表 1。

表 1 喷涂试样的参数
Tab.1 Spraying parameters for specimens

Specimen	Combusion chamber	Substrate
S1	Short	45 [#] steel
S2	Short	Aluminum 5052
S3	Long	45 [#] steel
S4	Without coating	45 [#] steel (polished)

铝基准晶合金粉末和涂层试样的显微组织采用 Quanta 200 FEG 场发射环境扫描电镜(SEM)进行分析,加速电压 20 kV。用 D/max2550VB2+/PC X 射线衍射仪(XRD)对合金粉末和涂层的相结构进行分析,靶材为 Cu,射线为 Kα,采用连续扫描模式,扫描速度为

2 (°)/min。涂层与蒸馏水的接触角使用德国 Data-physics 公司生产的 OCA20 型接触角测仪进行测量。涂层的电化学性能采用 Reference 600 电化学工作站测量,参比电极 of 饱和 AgCl 溶液,辅助电极 of 铂片,测试温度为室温,腐蚀介质采用 3.5% (质量分数)的 NaCl 溶液,动态极化曲线的扫描速率为 0.5 mV/min。准晶涂层试样经真空封管后,在 750 ℃ 和 950 ℃ 退火。显微硬度测试在 DHV-1000 型维氏硬度计上进行,载荷为 100 g。

2 结果及分析

2.1 Al-Cu-Fe-Si 准晶合金粉末分析

对气雾化获得的 Al-Cu-Fe-Si 准晶合金粉末的表面形貌和内部组织进行分析。粉末的筛分结果表明,粒径范围为 25 ~ 38 μm 和小于 18 μm 的粉末共占了 70%。合金粉末的表面形貌及截面组织的 SEM 照片如图 1 所示,可以看出铝基准晶合金粉末的球形度较好,含极少量的卫星颗粒,适合用于超音速火焰喷涂。铝基准晶合金粉末截面的 SEM 照片如图 1b—d 所示,图 1b,c 和 d 分别表示粉末粒径为 46,33 和 15 μm 的粉末截面 SEM 照片,较粗的粉末中易形成枝晶状组

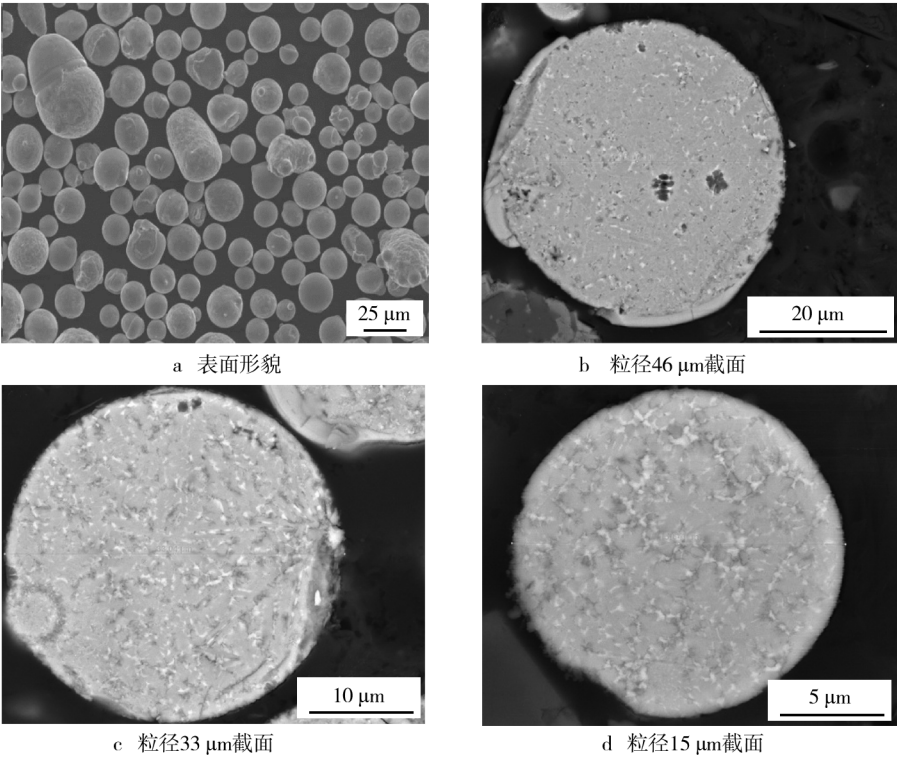


图 1 Al-Cu-Fe-Si 合金粉末表面形貌(a)及截面组织(b—d)的 SEM 照片

Fig.1 SEM images of surface morphology (a) and cross-section microstructures (b—d) for Al-Cu-Fe-Si alloy powders

织,有的还出现了二次枝晶组织和片状组织,而对于较细的粉末,主要是胞状晶组织,不同粒径的粉末颗粒的组织差别是由雾化过程中不同的冷却速度造成的,组织结果与 D. J. Sordellet 等人^[15]对 Al-Cu-Fe 准晶粉末组织的研究一致。图 2 是铝基准晶合金粉末的 XRD 图谱,标定后发现,雾化铝基准晶合金粉末主要由二十面体准晶相(I 相)和立方 β 相(立方 CsCl 型)组成,对于颗粒尺寸大于 45 μm 的粉末,除了准晶 I 相和 β 相外,还存在 λ 相和 η 相,细粉中 λ 相含量较粗粉中的少。

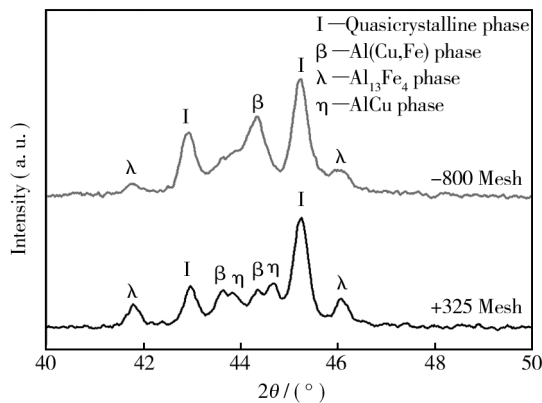


图2 不同粒径 Al-Cu-Fe-Si 合金粉末的 XRD 衍射图谱

Fig. 2 XRD patterns for Al-Cu-Fe-Si alloy powders with different particle sizes

2.2 涂层的显微硬度

超音速火焰喷涂获得的铝基准晶合金涂层试样 S1 和 S2 的显微硬度如表 2 所示,显微硬度分别为 566 HV0.1 和 536 HV0.1。铝基准晶材料为亚稳态材料,随着退火温度的提高,准晶合金将发生相转变,因此研究退火温度对涂层显微硬度的影响。退火温度选取为 750 和 950 $^{\circ}\text{C}$,退火时间为 12 h。如表 2 所示,随着退火温度的增加,准晶合金涂层的硬度随之提高。对于喷涂温度较高的样品 S3,硬度的离散性

表2 不同喷涂工艺及退火工艺涂层的显微硬度

Tab. 2 Microhardness of different spraying parameters and annealing parameters

Coating number	Annealing parameters	Microhardness(HV0.1)
S1	Unannealed	566±66
	750 $^{\circ}\text{C}$ for 12 h	648±103
	950 $^{\circ}\text{C}$ for 12 h	724±153
S3	Unannealed	536±42
	750 $^{\circ}\text{C}$ for 12 h	720±263
	950 $^{\circ}\text{C}$ for 12 h	750±109

较大,局部硬度高达 1229HV0.1,原因主要是退火温度为 950 $^{\circ}\text{C}$ 时,有部分的 λ - $\text{Al}_{13}\text{Fe}_4$ 相生成,据文献报道^[16], λ - $\text{Al}_{13}\text{Fe}_4$ 相的显微硬度为 1070HV,退火后涂层的高硬度一部分来自 λ 相的贡献。在制备准晶涂层时,选择合适的喷涂和热处理工艺以得到不同硬度的涂层。

2.3 涂层的润湿性

将尺寸为 10 mm×10 mm×10 mm 的铝基准晶合金涂层样品用砂纸打磨后抛光,在每个试样抛光面选取 5 个区域分别滴上 3 μL 的蒸馏水,使用接触角测量仪测量涂层对室温蒸馏水的表观接触角,如图 3a 所示,然后取 5 处的平均值,定性比较不同工艺参数所制备涂层的润湿性。

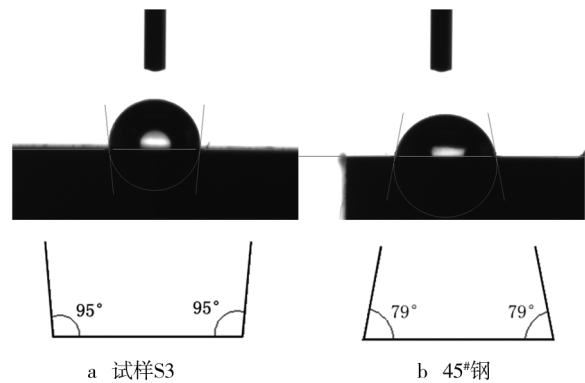


图3 涂层试样 S3 和 45# 钢与蒸馏水的室温接触角

Fig. 3 Water contact angle for S3 coating sample and 45# steel with distilled water at RT

从表 3 和图 3 的接触角实验结果可知,3 个铝基准晶合金涂层样品与蒸馏水的接触角都高于 45# 钢基体的,且最大接触角达到 95°,与准晶具有较低的表面能相吻合^[2],表现出较好的疏水性能。对比 3 个涂层样品发现,其接触角值存在差异,S3 样品的接触角最大,这说明蒸馏水对 S3 样品的润湿程度要大于 S1 和 S2 样品的。采用长燃烧室的准晶合金涂层 S3 样品的

表3 准晶涂层及 45# 钢的室温接触角

Tab. 3 Water contact angle of quasicrystalline coating and 45# steel at RT

Sample	CA of distilled water(RT)/($^{\circ}$)
S1	91
S2	89
S3	95
S4	79

喷涂温度较高,粒子熔融程度较充分,涂层比较致密,而 S1 和 S2 涂层表面有孔隙,残余空隙的存在可能导致 Cassie 润湿状态到伪 Wenzel 状态或 Wenzel 状态的转变^[17]。

2.4 涂层的耐腐蚀性

为了表征铝基准晶合金涂层的电化学行为,研究 3.5% NaCl 溶液中准晶涂层材料的动电位极化曲线,如图 4 所示。不同基体材料对铝基准晶合金涂层的耐蚀性能影响较大,45# 钢基体上的准晶合金涂层试样 S1 的腐蚀电流密度 J_{corr} 为 $6.8 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2$,而 5052 铝合金基体上的准晶合金涂层样品 S2 的腐蚀电流密度 J_{corr} 为 $2.0 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2$,即 S1 样品的耐腐蚀能力不及 S2 样品。从准晶合金涂层的截面 SEM 图片(图 5)可以看出,基体为 45# 钢的 S1 样品中,铝基准晶涂层和 45# 钢基体的界面及涂层内部存在大量的显微裂纹,显微裂纹彼此贯穿,并向表面扩展,而基体为

5052 铝合金的 S2 样品界面处有较少的裂纹,但无贯穿显微裂纹。试样 S1 中贯穿的显微裂纹是耐蚀性差的主要原因。

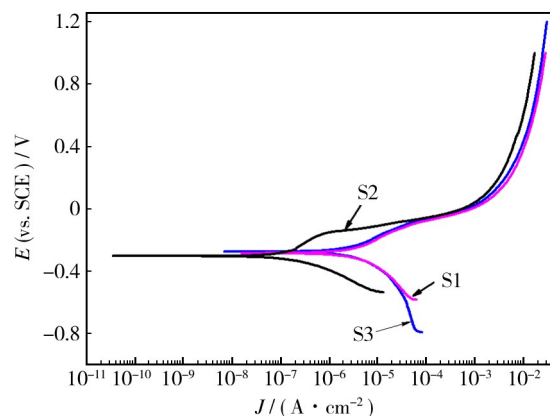
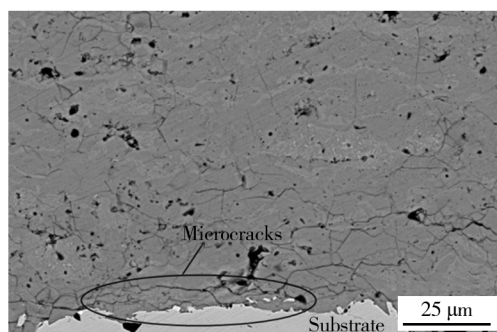
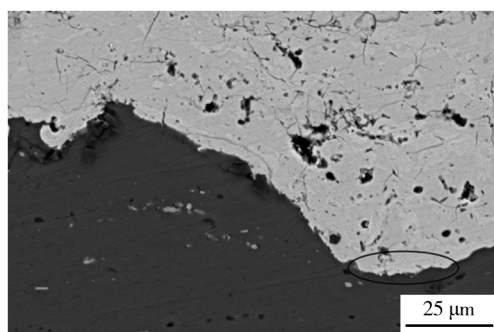


图 4 Al-Cu-Fe-Si 准晶合金涂层在 3.5% NaCl 溶液中的动电位极化曲线

Fig. 4 Potentiodynamic polarization curves of Al-Cu-Fe-Si quasicrystalline coating in 3.5% NaCl solutions



a S1



b S2

图 5 Al-Cu-Fe-Si 准晶合金涂层样品 S1 和 S2 的截面 SEM 照片

Fig. 5 SEM images of cross-section for sample S1 and S2 samples of Al-Cu-Fe-Si quasicrystalline coating

3 结论

1) 利用 AC-HVAF 超音速火焰喷涂技术制备了 Al-Cu-Fe-Si 准晶合金涂层。

2) 雾化铝基准晶合金粉末的相结构受冷却速率的影响较大,粒径为 $18 \mu\text{m}$ 左右的准晶 I 相含量较高,粒径尺寸大于 $45 \mu\text{m}$ 的粉末相组成为准晶 I 相、 β 相、 λ 相和 η 相。

3) 高温退火后,铝基准晶合金涂层的显微硬度升高,主要是由于高硬度 λ 相的析出。

4) 铝基准晶合金涂层与蒸馏水的接触角较 45# 钢基体的接触角大,铝基准晶合金涂层提高了基体的不粘性,不同喷涂工艺参数的准晶涂层接触角存在差异。

5) 铝基准晶合金涂层中存在的贯穿性显微裂纹显著降低了涂层的耐腐蚀性能,可以通过选择合适的基体和喷涂工艺减少喷涂过程中贯穿性显微裂纹的形成。

参考文献

- [1] SHECHTMAN D, BLECH I, et al. Metallic Phase with Long-range Orientational Order and no Translational Symmetry [J]. Physical Review Letters, 1984, 53(20): 1951—1953.
- [2] SHAITURA D S, ENALEEVA A A. Fabrication of Quasicrystalline Coatings: A Review [J]. Crystallography Reports, 2007, 52(6): 945—52.
- [3] CAI F, ZHOU C, WANG N, et al. Wear Behavior of Low-pressure Plasma-sprayed AlCuFe Quasicrystalline Coating

- on Titanium Alloy[J]. Vacuum, 2006, 81(1): 85—90.
- [4] DUBOIS J M. New Prospects from Potential Applications of Quasicrystalline Materials[J]. Materials Science and Engineering; A, 2000, 294—296: 4—9.
- [5] USTINOV A, POLISHCHUK S, SCORODZIEVSKII V, et al. Structure and Properties of Quasicrystalline and Approximant EBPVD Coatings of Al-based Systems[J]. Zeitschrift für Kristallographie, 2009, 224: 1—2.
- [6] MILMAN Y V, LOTSKO D V, DUB S N, et al. Mechanical Properties of Quasicrystalline Al-Cu-Fe Coatings with Sub-micron-sized Grains[J]. Surface and Coatings Technology, 2007, 201(12): 5937—5943.
- [7] TSAI A P, INOUE A, MASUMOTO T. A Stable Quasicrystal in Al-Cu-Fe System[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 1987, 26: 1505—1507.
- [8] MINEVSKI Z, TENNAKON C L, ANDERSON K C, et al. Electrocodeposited Quasicrystalline Coatings for Non-stick Wear Resistant Cookware[J]. Mrs Online Proceeding Library, 2002, 805: LL10—3.
- [9] http://www.mpc.ameslab.gov/downloads/Full_Brochure.pdf.
- [10] KIM K B, KIM S H, KIM W T, et al. Structural Evolution during Heat Treatment of Mechanically Alloyed Al-Cu-Fe-(Si) Alloys[J]. Materials Science and Engineering; A, 2001, 822: 304—306.
- [11] MOSKALEWICZ T, KOT M, WENDLER B. Microstructure Development and Properties of the AlCuFe Quasicrystalline Coating on Near- α Titanium Alloy[J]. Applied Surface Science, 2011, 258: 848—859.
- [12] 苏贤涌, 周香林, 崔华, 等. 冷喷涂技术的研究进展[J]. 表面技术, 2007, 36(5): 71—74.
- SU Xian-yong, ZHOU Xiang-lin, CUI Hua, et al. Research Progress in Cold Gas Dynamic Spray Technology[J]. Surface Technology, 2007, 36(5): 71—74.
- [13] FU Y, PENG T, YANG D, et al. HVOF Sprayed Al-Cu-Cr Quasicrystalline Coatings from Coarse Feedstock Powders[J]. Surface and Coatings Technology, 2014, 252: 29—34.
- [14] 杨洪伟, 栾伟玲, 涂善东, 等. 离子喷涂技术的新进展[J]. 表面技术, 2005, 34(6): 7—10.
- YANG Hong-wei, LUAN Wei-ling, TU Shan-dong. Recent Development on Plasma Spray Technology[J]. Surface Technology, 2005, 34(6): 7—10.
- [15] SORDELET D J, BESSER M F, ANDERSON I E. Particle Size Effects on Chemistry and Structure of Al-Cu-Fe Quasicrystalline Coatings[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 1996, 5(2): 161—174.
- [16] 金永吉, 冯莉萍, 邵天敏. 激光熔覆制备 Al-Si-Cu-Fe 准晶态合金涂层的研究[J]. 应用激光, 2004(6): 327—330.
- JIN Yong-ji, FENG Li-ping, SHAO Tian-min. Preparation of Al-Si-Cu-Fe Quasicrystalline Alloy Coatings by Laser Cladding[J]. Applied Laser, 2004(6): 327—330.
- [17] 刘思思, 张朝辉, 何建国, 等. 亲水性微观粗糙表面润湿状态转变性能研究[J]. 物理学报, 2013, 20: 1—9.
- LIU Si-si, ZHANG Chao-hui, HE Jian-guo, et al. Wetting State Transition on Hydrophilic Microscale Rough Surface[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 20: 1—9.

(上接第 72 页)

- [50] 杨向平, 曲虎, 刘静. 氮气气提法去除油田废水中的 H_2S [J]. 化工环保, 2012(1): 35—38.
- YANG Xiang-ping, QU Hu, LIU Jing. Removal of H_2S from Oil Field Wastewater by Nitrogen Stripping[J]. Environmental Protection of Chemical Industry, 2012(1): 35—38.
- [51] 杨向平, 曲虎, 刘静, 等. 气提法去除油田污水中二氧化碳气体的实验研究[J]. 现代化工, 2011, 31(10): 31—35.
- YANG Xiang-ping, QU Hu, LIU Jing, et al. Experiment Research on Removal of Carbon Dioxide in Oily Wastewater by Nitrogen Gas Stripping[J]. Modern Chemical Industry, 2011, 31(10): 31—35.
- [52] 周西臣, 曲虎, 刘静, 等. 气提法去除油田污水中 H_2S 的实验研究[J]. 工业水处理, 2012, 32(1): 66—68.
- ZHOU Xi-chen, QU Hu, LIU Jing, et al. Experimental Research on the Removal of Hydrogen Sulphide in Wastewater from Oilfields by Gas Stripping[J]. Industrial Water Treatment, 2012, 32(1): 66—68.
- [53] 史向阳, 陈占芳, 张志勇, 等. 气提法去除油田污水中腐蚀性气体的实验分析[J]. 中国化工贸易, 2013(9): 232.
- SHI Xiang-yang, CHEN Zhan-fang, ZHANG Zhi-yong, et al. Experiment and Analysis on Air-extraction to Remove Corrosive Gas from Oilfield Wastewater[J]. China Chemical Trade, 2013(9): 232.
- [54] 屈撑国, 焦琨, 薛瑾利. 油田污水腐蚀测试方法的评价与改进[J]. 石油工业技术监督, 2014, 30(2): 54—56.
- QU Cheng-tun, JIAO Kun, XUE Jing-li. Evaluation and Improvement of the Corrosion Test Methods for Oilfield Wastewater[J]. Technology Supervision in Petroleum Industry, 2014, 30(2): 54—56.