

微弧火花沉积制备不锈钢柱状微结构表面

王维夫^{1,2}, 谢剑舟^{1,2}, 张步康^{1,2}, 阮文豪^{1,2}, 韩超^{1,2}

(1. 浙江工业大学 机械工程学院, 杭州 310014;

2. 浙江工业大学 化工机械设计研究所 过程装备及其再制造教育部工程研究中心, 杭州 310032)

摘要: **目的** 探索新型表面微结构的制备方法。**方法** 采用微弧火花沉积工艺在 304 不锈钢基体表面, 制备出了奇特的“柱状”微结构表面, 并使用扫描电镜、光学显微镜、硬度计等对该微柱体的表面形貌、截面特征和显微硬度等进行了初步分析。**结果** 微柱体呈近似有规律的分立状分布, 微柱体间距约为 0.8~1.2 mm, 直径约为 300~500 μm 。微柱体为堆叠状生长, 有典型的分层特征, 微柱体之间存在生长中的竞争性行为。从微柱体截面来看, 单个脉冲沉积薄层的典型厚度大约为 15~20 μm , 微柱体中单个沉积子薄层一般呈中间厚、两侧薄的类透镜状形态。微柱体的平均硬度约为 320HV 左右, 略低于结合界面附近的基体硬度 (~340HV)。**结论** 微弧火花沉积的单点、高频率的技术特性是形成此类表面的重要因素, 放电沉积中的竞争性机制是导致微柱体成形的直接原因。

关键词: 微弧火花沉积; 表面微结构; 不锈钢; 微柱体; 机制

中图分类号: TG178 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2017)05-0159-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2017.05.026

Fabrication of Stainless Steel Microstructure Surface by Electro-spark Deposition

WANG Wei-fu^{1,2}, XIE Jian-zhou^{1,2}, ZHANG Bu-kang^{1,2}, RUAN Wen-hao^{1,2}, HAN Chao^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China;

2. Institute of Process Equipment and Control Engineering, Engineering Research Center of Process Equipment and Remanufacturing, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310032, China)

ABSTRACT: The work aims to study preparation methods of novel surface microstructure. A special “columnar” microstructure surface was prepared on 304 stainless steel substrate by means of micro-arc spark deposition. Scanning electron microscope (SEM), optical microscope (OM) and hardness tester were applied to preliminary analysis of morphology, section features and microhardness of the micro-columns. Those micro-columns obtained by ESD were distributed separately and regularly at the distance of nearly 0.8~1.2 mm. Diameter of the micro-columns ranged from 300 to 500 μm . A further observation indicated that rivalrous behaviors were present in the growth between different micro-columns exhibiting typical overlapping characteristics and growing in stacked form. Seen from cross section of the micro-column, thickness of a single pulse deposition film was about

收稿日期: 2016-12-20; 修订日期: 2017-02-15

Received: 2016-12-20; Revised: 2017-02-15

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51105340); 浙江省自然科学基金资助项目 (LY14E050008)

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China (51105340); Zhejiang Natural Science Foundation (LY14E050008)

作者简介: 谢剑舟 (1991—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为高能微弧火花表面处理。

Biography: XIE Jian-zhou (1991—), Male, Master, Research focus: surface treatment by micro-arc spark deposition.

通讯作者: 王维夫 (1981—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为表面改性及再制造。

Corresponding author: WANG Wei-fu (1981—), Male, Doctor, Associate professor, Research focus: surface modification and remanufacturing.

15~20 μm , and single layer in the micro-column was generally in a lenslike form (thick in the middle and thin on both sides). Average hardness of the deposited micro-columns was nearly 320HV, slightly lower than substrate strength near bonding interface (~340HV). Formation of such surfaces can be partly attributed to ESD technical features including single point and high frequency characteristics. The competing mechanism in discharge deposition directly leads to the formation of micro-columns.

KEY WORDS: electro-arc spark deposition; surface microstructure; stainless steel; micro-column; mechanism

微弧火花沉积 (Micro-arc spark deposition) 又叫电火花沉积 (Electro-spark deposition), 是一种低应力、低变形的新型金属表面处理技术, 由于其具有操作简单、热输入量小、工艺适用范围广等优点^[1-3], 近年来广泛应用于能源、航空、航天和军事等领域的改性表面或强化表面^[4-6]。如河北农业大学郝建军、马跃进等人^[7-11]采用微弧火花沉积工艺, 利用 TA2 钛合金作为电极, 在工业氮气气氛下, 分别在 Fe 基体和 TC4 基体上制备了 TiN 强化层, 并研究了工艺参数变化对增强层性能的影响; 北京科技大学孙鹏飞等人^[12]利用金属间化合物 $\text{Ti}_{45}\text{Al}_{55}\text{Nb}$ 作为电极, 在 304 不锈钢基材上, 利用微弧火花沉积工艺成功制备出均匀的涂层, 涂层和基体冶金结合良好, 表面耐熔锌腐蚀行为有所提升; 意大利学者 S.Frangini 等人^[13]采用 ESD 工艺成功在 304 不锈钢基体上制备了 Cr_7C_3 陶瓷涂层, 涂层厚度 10~30 μm , 在盐酸中耐腐蚀性能明显提高。

除了上述各种表面强化涂层的制备与研究外, 得益于该技术优异的加工特性, 微弧火花沉积还被用于各种新奇表面微结构和特种涂层的制备中。微弧火花沉积属于超快速熔凝过程, 在金属基体快速导热作用下, 能够形成极大的冷却速度、温度梯度和特异性的微尺度区域的热力学行为, 许多传统材料沉积后都表现出新的形貌及结构特性, 因此吸引了各国研究者尝试将该技术用于各种新奇表面结构的制备中。如哈尔滨工业大学王振龙、金柏东等人^[14-15]采用微细电火花沉积工艺, 利用 0.2 mm 的铜电极在钢表面沉积制备出了单根直径为 0.19 mm、高 7.35 mm 的微圆柱体和螺旋结构柱体。

目前, 传统的各种功能性表面微结构通常采用去除类的工艺来制备, 如飞秒激光技术^[16]、酸蚀技术^[17]、电解技术^[18]、机械加工技术^[19]等, 此类微结构表面加工技术是以不断去除表面材料来形成特定的表面结构。一般, 制备柱状微结构的表面通常采用线切割或铣削等技术。与传统的材料去除的“减法”方式不同, 本文报道了一种采用微弧火花沉积工艺在不锈钢表面制备特殊表面柱状微结构的方法。该方法通过“加法”(即不断在基体表面增加材料)的方式来获得柱状形态表面微结构。这里对微柱体的结构特征、形成过程和生长机制等进行了初步的研究, 希望能够为

本领域的类似研究工作提供一定的参考。

1 试验

实验所用基体材料和电极材料均为商用 304 不锈钢, 其主要成分如表 1 所示。选用 304 不锈钢圆棒为待沉积电极, 其直径为 1.0 mm, 表面用 600#砂纸打磨, 并经无水乙醇擦拭除油。基体试样尺寸为 12 mm×8 mm×4 mm, 实验前分别用 240#、400#、600#、800#、1000#SiC 砂纸逐号打磨, 并用无水乙醇超声清洗 6 min, 吹干后称重并用于实验。

表 1 基体材料和电极材料化学成分
Tab.1 Chemical composition of substrate and electrode material

wt%								
Fe	C	Si	Mn	Cr	Ni	S	P	N
Bal.	0.08	0.30	0.10	0.05	0.015	0.25	0.035	0.10

沉积实验采用 3H-ES-6 型高能微弧火花发生装置进行, 使用自制的气氛保护手套箱进行气氛保护, 保护气为 Ar。沉积面积为 12 mm×8 mm (即整个试样表面)。沉积过程中旋转的电极不断与基体间进行火花放电, 并在基体表面持续往复匀速移动, 以确保试样表面不同位置放电的均匀性。

采用 TESCAN VEGA-3-SBH 扫描电镜对所获样品的显微形貌特征进行观察, ARTCAM-300MI-WOM-DS 光学显微镜对涂层截面特征进行观察。采用 HX-1000TM 型显微硬度计进行显微硬度测量, 使用载荷 50 g, 加载时间 15 s。

2 结果及分析

2.1 304 柱状微结构表面形貌

微弧火花沉积试样的表面显微形貌如图 1 所示。试样表面呈有趣的“柱状”结构, 微柱体近似呈有规律的等间距分布 (偶见少量连缀体存在), 典型的柱体间距约为 0.8~1.2 mm, 单个微柱体直径一般约在 300~500 μm 之间。此外, 试样表面还可观察到部分未充分长大的微柱体胚芽 (Germ) 存在。这些微柱体胚芽多夹在已经充分长大的微柱体之间, 并且与最近的已充分长大的微柱体距离通常小于 0.5 mm, 即

小于典型的微柱体间距 (0.8~1.2 mm)。这表明微柱体在生长过程中存在竞争性行为, 部分靠得太近的微柱体胚芽会受到临近先长大微柱体的抑制作用而无法进一步长大。

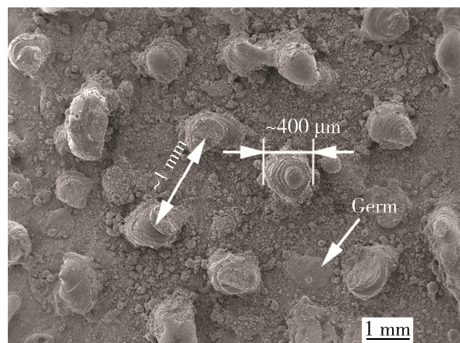


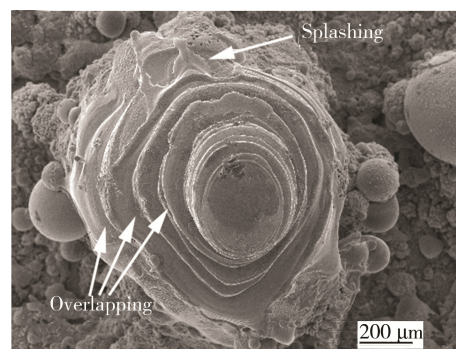
图 1 微柱体试样表面低倍形貌

Fig.1 The morphology of micro-columns with low magnification

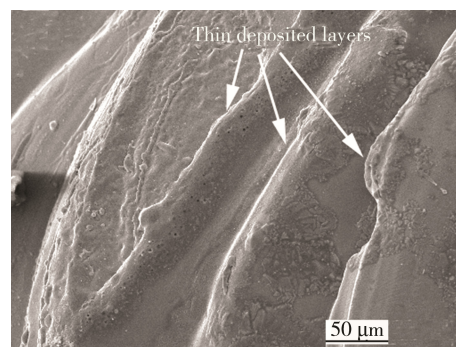
分析认为, 这种抑制作用主要与沉积过程中的尖端放电行为有关, 在电火花沉积过程中, 因为脉冲放电的不连续性以及放电电弧的随机性, 使得前几次沉积过程中产生不连续随机分布的小凸起。众所周知, 当金属带电时, 其表面曲率越大的地方电荷密度越大, 表面附近电场强度越强, 因而越容易击穿空气进行放电^[20]。根据尖端放电原理, 在后续的电火花沉积过程中, 放电将大多在小凸起上进行, 并进行电极材料的过渡, 使得小凸起不断长大, 导致凸起位置沉积循环。即当两个或多个靠得比较近的微柱体胚芽中的某一个相对略高时, 沉积脉冲更易于在较高的那个胚芽处发生, 随着沉积的不断进行, 最终导致发育初期较矮的微柱体胚芽被抑制。

图 2a 所示为图 1 中的单个微柱体的表面高倍观察结果。可以看到, 微柱体呈多层堆叠特征, 整个微柱体是由大量的单个脉冲沉积薄层 (Thin deposited layer) 逐层堆叠而形成的。部分沉积薄层边缘出现了泼溅状特征 (图 2b), 这是典型的熔融状液滴与基体碰撞所造成的, 这一特征与已有的单脉冲沉积斑观察结果相一致^[21]。图 3 则给出了更具一般性的微柱体形态, 可以看到, 单次沉积所形成的典型沉积子薄层的直径一般约为 300 μm 左右。哈尔滨工业大学王振龙、金柏东等人^[15,16]采用类似的微细电火花沉积工艺也制备出了单个微圆柱体。对比发现, 本实验所制备的为大面积近似呈有规律的等间距分布微柱体, 微柱体层与层之间界面更加清晰且光滑, 更具有层次感。多个微柱体之间基体表面为大小不一的球状颗粒飞溅产物, 在表面张力作用下收缩呈球状而凝固。

分析认为, 微弧火花沉积过程中, 在脉冲放电极短的时间内, 能量高度集中在微小区域, 电极和基体之间瞬时形成的高温、高压使得电极熔化气化, 熔融的电极材料在重力、热爆炸力、电动力、磁流体动力



a 整体形貌



b 局部泼溅状堆叠表面

图 2 单个微柱体的显微形貌

Fig.2 Micro-morphology of single micro-column: a) the overview, b) the magnification of multi-layer overlapping

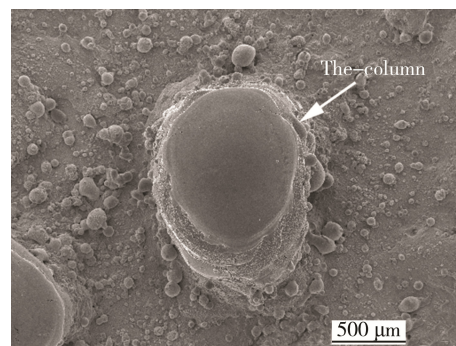


图 3 更典型的单个微柱体形貌

Fig.3 Morphology of a single typical micro-column

等力的综合作用下, 获得一个很高的速度。这些具有很高温度和速度的熔滴在接触工件表面时, 以很大的动能冲击工件表面, 产生强烈的碰撞。在碰撞的瞬间, 熔滴产生变形并迅速地扩展, 然后在表面张力的作用下和凝固的过程中停止, 最终形成扁平的薄圆片状粘附在工件基体表面。在撞击的过程中, 由于熔滴温度很高, 表面张力太小, 会造成一种“喷溅”现象, 即熔滴上的液态金属向四周溅射, 形成溅射状的边缘和飞溅颗粒, 符合图 2a 形貌特征。

2.2 柱状微结构截面形貌及组织

图 4 所示为光学显微镜下的微柱体试样的典型截面形貌。试样基体为等轴奥氏体组织, 微柱体和基

体间结合界面为高质量的冶金结合,结合界面清晰,无明显的热影响区,未见孔洞、未焊合等缺陷。制备的微柱体高度约为 500 μm 左右,微柱体内呈现出了明显的层状特征,有典型的多层堆叠行为,这与图 2 和图 4 中的观察结果一致,即这些微柱体是由大量的单个脉冲沉积薄层逐层堆叠而形成。

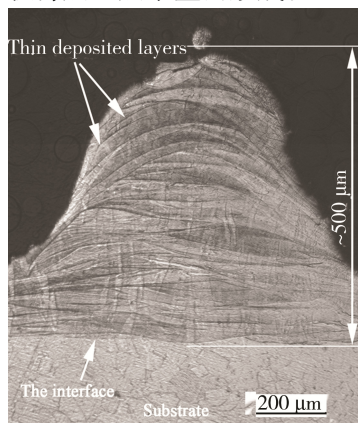


图 4 单个微柱体截面光学显微镜

Fig.4 The optical microscopy of the cross-section for a single micro-column

图 5 给出了较为典型的微柱体多层堆叠的高倍特征,可以看到各子薄层间的结合界面清晰,子薄层内为典型的微尺度甚至纳米级柱晶。柱晶的形成与温度梯度和冷却速率有关,而高能微弧火花沉积工艺恰好具有较高的温度梯度和冷却速率的特点,是一种超快速熔凝过程,其冷却速度可达 10^7 K/s 以上。液态金属凝固过程中,柱晶尺寸 λ 的计算如公式 (1) 所示:

$$\lambda = AG^{-\frac{1}{2}}v^{-\frac{1}{4}} \quad (1)$$

式中, A 为常数 (1.28), G 为温度梯度, v 为冷却速率。

从图 5 来看,单个脉冲沉积薄层的典型厚度大约在 15~20 μm 之间,与图 3 和图 4 对照观察可知,微柱体中单个沉积子薄层一般呈中间厚、两侧薄的类透镜状形态。透镜状薄片内为细密的柱晶组织。XRD 分析结果 (图 6) 显示,沉积层主要为奥氏体相,表明未有其他新相产生。

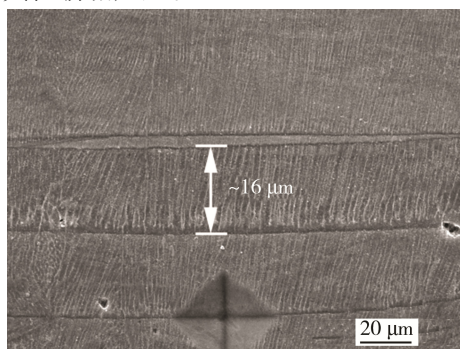


图 5 多层堆叠结构的局部放大

Fig.5 Partially enlarged multi-layer overlapping structure

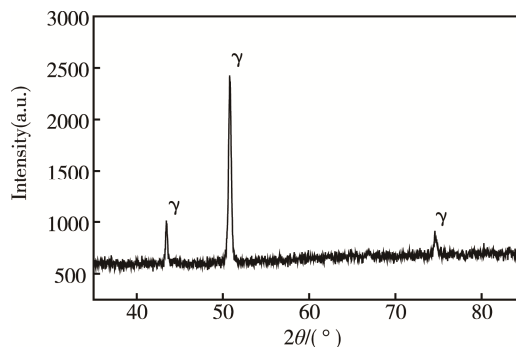


图 6 柱状 XRD 图谱

Fig.6 XRD pattern of micro-column

从沉积原理来看,在微弧火花沉积过程中,电极与工件间周期性地发生微小的电弧放电。在单脉冲放电沉积过程中,借助气体击穿,等离子体的高速碰撞运动瞬间产生高温高压,电极局部区域材料在极短的时间内发生熔融并在气体爆炸特性下被抛出,然后在多种力的作用下以熔滴的形态迁移到试样表面,其过程示意如图 7 所示。在液态溶滴与试样表面的碰撞过程中,液态熔滴发生变形,摊薄成薄片状,并通过电弧放电及接触瞬间的热传导等作用使基体表面发生微熔。在随后的凝固过程中,薄片状的电极材料与表面微熔的基体凝固在一起,形成单个脉冲沉积薄层。随着放电过程的不断进行,后续形成的沉积薄层不断覆盖在之前形成的沉积薄层上,并与之堆叠在一起,最终形成如图 2 和图 4 所示的多层堆叠结构。

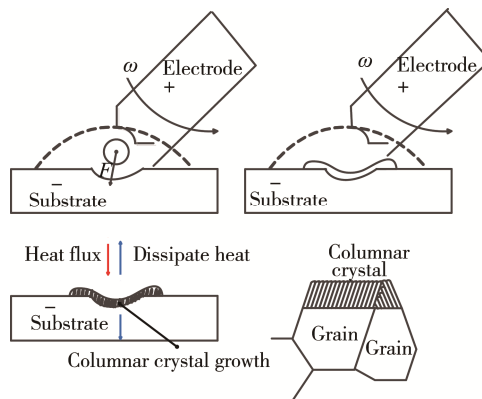


图 7 微弧火花沉积示意图

Fig.7 Schematic diagram of the deposition of ESD process

2.3 柱状微结构显微硬度分析

图 8 所示为沿微柱体截面的显微硬度曲线。从显微硬度的测试结果来看,微柱体内硬度最大约 360HV,最小约 290HV,平均硬度约为 320HV。而试样基体平均硬度约为 340HV,微柱体内的硬度约为基体硬度的 94.1%。这表明,多层堆叠的微柱体内的硬度稍低于相同材质基体(同为 304 不锈钢)的硬度,这可能与超高速冷却下沉积薄层内的高温铁素体残留等因素有关。

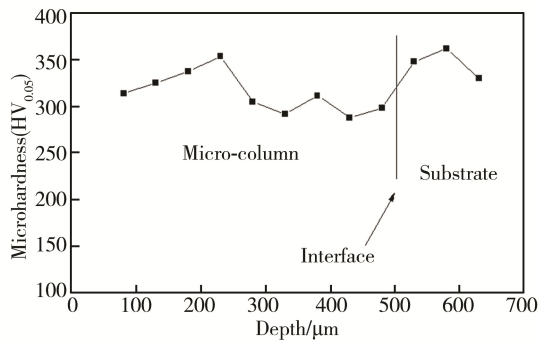


图 8 涂层显微硬度

Fig.8 Micro-hardness of coating

3 结论

1) 采用微弧火花沉积工艺, 以 304 不锈钢作为电极材料, 能够在相同的不锈钢基体上制备出“柱状”微结构表面, 所获的微柱体呈近似规律的分立状分布, 典型的柱体间距约为 0.8~1.2 mm, 柱体直径约在 300~500 μm 之间。

2) 微柱体呈典型的层状堆叠生长形态, 单个沉积薄层厚度一般约在 15~20 μm 之间。微柱体生长过程中存在竞争性生长行为, 微弧火花沉积的单点、高频率的技术特性和放电沉积中的竞争性机制是导致此类微柱体形成的主要原因。

3) 微柱体的平均硬度约为 320HV 左右, 大约相当于结合界面附近基体硬度的 94.1%, 这表明微弧火花沉积工艺制备的微柱体的强度相对于基体下降不大, 可以满足一定的强度性能需求。

参考文献:

- [1] 王维夫, 王茂才. 激光+微弧火花复合定向沉积的显微组织研究[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(4): 751—755.
WANG Wei-fu, WANG Mao-cai. Directionally Deposited Microstructures Prepared by Laser Cladding Electrospark Deposition[J]. Infrared and Laser Engineering, 2010, 39(4): 751—755.
- [2] 王维夫, 陈军, 徐贤统, 等. 铝合金电火花沉积层的组织和抗空蚀性能[J]. 材料热处理学报, 2013, 34(6): 120—124.
WANG Wei-fu, CHEN Jun, XU Xian-tong, et al. Microstructure and Cavitation Erosion Resistance of Aluminum Alloy Coatings Fabricated by Electrospark Deposition[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2013, 34(6): 120—124.
- [3] 罗成, 董仕节, 熊翔. 电火花沉积表面技术研究的最新进展[J]. 材料导报, 2008, 22(11): 66—68.
LUO Cheng, DONG Shi-jie, XIONG Xiang, et al. Latest Development in Research of Electrospark Deposition Surface Technology[J]. Materials Review, 2008, 22(11): 66—68.
- [4] TANG C B, LIU D X, WANG Z, et al. Electro-spark Alloying Using Graphite Electrode on Titanium Alloy Surface for Biomedical Applications[J]. Applied Surface Science, 2011, 257(15): 6364—6371.
- [5] 王建升. 电火花沉积工艺及沉积层性能的研究[J]. 表面技术, 2005, 34(1): 27—30.
WANG Jian-sheng. Study on Electro-spark Deposition Process and Property of ESD Coating[J]. Surface Technology, 2005, 34(1): 27—30.
- [6] LIU D Y, GAO W, LI Z W, et al. Electro-spark Deposition of Fe-based Amorphous Alloy Coatings[J]. Materials Letters, 2007, 61(1): 165—167.
- [7] 郝建军, 卜志国, 赵建国, 等. TC4 钛合金电火花沉积反应合成 Ti(CN)涂层[J]. 材料科学与工艺, 2009, 17(3): 406—409.
HAO Jian-jun, BU Zhi-guo, ZHAO Jian-guo, et al. Ti(CN) Coating Synthesized by Electric-spark Deposition on TC4 Titanium Alloy[J]. Materials Science and Technology, 2009, 17(3): 406—409.
- [8] 郝建军, 彭海滨, 黄继华, 等. 钛合金表面反应电火花沉积 TiN/Ti 复合涂层[J]. 焊接学报, 2009, 30(11): 69—72.
HAO Jian-jun, PENG Hai-bin, HUANG Ji-hua, et al. TiN/Ti Composite Coating Deposited on Titanium Alloy Substrate by Reactive Electric-spark[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2009, 30(11): 69—72.
- [9] 郝建军, 卜志国, 樊云飞, 等. 电火花沉积反应合成 TiN 增强 Fe 基金属陶瓷涂层[J]. 稀有金属材料与工程, 2009, 38(S1): 497—500.
HAO Jian-jun, BU Zhi-guo, FAN Yun-fei, et al. Reaction Synthesis of TiN Reinforced Fe-based Metal Matrix Composite Coating by ESD[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2009, 38(S1): 497—500.
- [10] 郝建军, 黄继华, 赵建国, 等. 电火花沉积反应合成 TiN 增强金属基复合涂层[J]. 焊接学报, 2007, 28(10): 33—36.
HAO Jian-jun, HUANG Ji-hua, ZHAO Jian-guo, et al. Reactive Synthesis TiN Reinforced Matrix Composite Coating by Electric-spark Deposition[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2007, 28(10): 33—36.
- [11] 郝建军, 黄继华, 刘洪杰, 等. 反应电火花沉积 TiN/Ti 复合涂层机理与性能[J]. 材料热处理学报, 2009, 30(3): 170—173.
HAO Jian-jun, HUANG Ji-hua, LIU Hong-jie, et al. Forming Mechanism and Property of TiN/Ti Composite Coatings Prepared by Reactive Electric-spark Deposition[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2009, 30(3): 170—173.
- [12] 孙鹏飞, 张来启, 林均品. 304 不锈钢/Ti-45Al-8Nb 电火花沉积涂层在熔锌中的腐蚀行为[J]. 材料热处理学报, 2014, 35(2): 151—156.
SUN Peng-fei, ZHANG Lai-qi, LIN Jun-pin. Corrosion Behaviour of Ti-45Al-8Nb Coating on 304 Stainless Steel

- by Electrospark Deposition in Molten Zinc[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2014, 35(2): 151—156.
- [13] FRANGINI S, MASCI A, BARTOLOMEO A D. Cr7C3-based Cermet Coating Deposited on Stainless Steel by Electrospark Process: Structural Characteristics and Corrosion Behavior[J]. Surface and Coatings Technology, 2002, 149(2—3): 279—286.
- [14] 王振龙, 彭子龙, 金柏冬. 空气介质微细电火花沉积加工微结构机理[J]. 纳米技术与精密工程, 2009, 7(1): 51—55.
WANG Zhen-long, PENG Zi-long, JIN Bai-dong. Forming Mechanism of Micro Electrical Discharge Machining Deposition in Air[J]. Nanotechnology and Precision Engineering, 2009, 7(1): 51—55.
- [15] 金柏冬, 曹国辉, 王振龙, 等. 空气中微细电火花沉积的工艺规律研究[J]. 中国机械工程, 2006, 17(2): 111—115.
JIN Bai-dong, CAO Guo-hui, WANG Zhen-long, et al. Research on Processing Law of Micro-EDD in Air[J]. China Mechanical Engineering, 2006, 17(2): 111—115.
- [16] 彭滢, 温雅, 张冬生, 等. 飞秒激光功率与脉冲数的比例关系对制备硅表面微结构的影响[J]. 中国激光, 2011, 38(12): 83—87.
PENG Yan, WEN Ya, ZHANG Dong-sheng, et al. Effect of the Relation between Femtosecond Laser Power and Pulse Number for Fabricating Surface-microstructured Silicon[J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(12): 83—87.
- [17] 焦岩. 生物医用钛合金表面处理及其微结构[D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
JIAO Yan. Surface Treatment and Microstructure of Bio-medical Titanium Alloy[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013.
- [18] 黄红光, 郭钟宁, 孙涛涛, 等. 模具钢大面积微结构的微细电解和化学蚀刻的比较研究[J]. 电加工与模具, 2014(S1): 41—44.
HUANG Hong-guang, GUO Zhong-ning, SUN Tao-tao, et al. The Comparative Study on Micro ECM and Chemical Etching of Large Area Micro Structure Die Steel[J]. Electromachining & Mould, 2014(S1): 41—44.
- [19] 孙涛涛, 于兆勤, 吴明, 等. 内壁表面微结构加工技术的发展与应用[J]. 现代制造工程, 2015(12): 147—152.
SUN Tao-tao, YU Zhao-qin, WU Ming, et al. Development and Application of Wall Surface Micro-machining Technology[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2015(12): 147—152.
- [20] QIU D H, MACALPINE J M K, LI Z Y. An Incremental 3-dimensional Analysis of Spark Paths in Air[C]// Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 1999 Annual Report Conference on. [s.l.]: IEEE, 1999.
- [21] GOVINDAN P, GUPTA A, JOSHI S S, et al. Single-spark Analysis of Removal Phenomenon in Magnetic Field Assisted Dry EDM[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2013, 213(7): 1048—1058.