

保护气氛中残留氧对微弧火花沉积的影响

王维夫, 张步康, 丁晨

(浙江工业大学 a.机械工程学院 b.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** 探究微弧火花沉积过程中残留氧对沉积行为的影响。**方法** 在不同残留氧浓度的富 Ar 保护气氛下进行了单脉冲、多脉冲和 2 min 持续沉积实验, 并使用扫描电子显微镜 (SEM)、光学显微镜 (OM) 和显微硬度计等对所获沉积层特征进行分析。**结果** 保护气氛中残留氧为 0.04%~0.06% 时, 沉积斑呈典型的放射状飞溅形貌, 持续 2 min 沉积可获得局部最大厚度约 140 μm 的平坦状沉积层。而残留氧为 0.4%~0.6% 和 1.4%~1.6% 时 (其他参数不变), 沉积斑表面平整, 边缘无显著飞溅特征, 2 min 沉积试验后在基体上形成了大量新奇的微柱体/柱胚结构。质量转移规律研究表明, 适当残留氧的存在能够提高质量转移效率。试验中当残留氧为 0.4%~0.6% 时, 质量转移系数最高, 可达约 91%。显微硬度测试结果显示, 涂层硬度约在 290~330HV 之间, 略低于冷轧态基体的硬度 (~356HV)。**结论** 富 Ar 气氛中残留的微量高活性元素氧对熔池表面张力温度梯度系数有较大影响, 适当残留氧的存在可使沉积斑形态从飞溅状向聚集状转变, 最终导致了沉积表面微柱体/柱胚结构的出现。

关键词: 微弧火花沉积; 氧浓度; 沉积斑形貌; 质量转移; 显微硬度

中图分类号: TG174.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)12-0284-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.12.038

Influence of Residual Oxygen on Micro-arc Spark Deposition in Shielding Atmosphere

WANG Wei-fu, ZHANG Bu-kang, DING Chen

(a.School of Mechanical Engineering, b.Engineering Research Center of Process Equipment and Re-manufacturing of Ministry of Education, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310032, China)

ABSTRACT: The work aims to study the influence of residual oxygen on micro-arc spark deposition. Single pulse, multiple pulses and 2 min deposition were performed in argon-rich shielding atmosphere with different residual oxygen concentrations. The scanning electron microscope (SEM), optical microscope (OM) and hardness tester were used to analyze the characteristics of deposition coating. When the residual oxygen concentration was 0.04%~0.06%, the deposition spots displayed a typical splashy appearance. For 2 min deposition, the irregular morphology deposited coating with a maximum thickness of ~140 μm was obtained. When residual oxygen concentrations were 0.4%~0.6% and 1.4%~1.6% (other parameters were the same), the deposition spots showed flat surfaces without splash on the edge. After 2 min deposition, the novelty column structures with embryos were observed on the substrate. The results of mass transfer trend showed that the mass transfer efficiency was increased with appropriate residual oxygen concentration. The maximum mass transfer coefficient was the highest about 91%, when the oxygen concentration was 0.4%~0.6%. From the hardness test results, the microhardness of coating was 290~330HV,

收稿日期: 2018-10-07; 修订日期: 2018-11-10

Received: 2018-10-07; Revised: 2018-11-10

基金项目: 浙江省自然科学基金资助项目 (LY14E050008)

Fund: Supported by Zhejiang Natural Science Foundation (LY14E050008)

作者简介: 王维夫 (1981—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为表面工程。

Biography: WANG Wei-fu (1981—), Male, Doctor, Associate professor, Research focus: surface engineering.

slightly lower than the value of the substrate (~356 HV). Temperature gradient coefficient of the surface tension is dramatically affected by the residual high-active element oxygen in argon-rich shielding atmosphere. The morphology of deposition spot is changed from splash to aggregation with the existence of appropriate residual oxygen, thus resulting in the novelty column structure with embryos.

KEY WORDS: micro-arc spark deposition; oxygen concentration; morphology of deposition spots; mass transfer; microhardness

微弧火花沉积（也称电火花沉积，ESD）是一种先进的金属表面强化与局部修复技术，因其热输入量集中和热影响区小等优点，近年来受到了广泛关注^[1-3]，在航空、航天、能源、军事、医疗等众多领域^[4-6]都得到了大量应用。国内外众多学者也始终在这一领域保持较高的研究热度，在沉积涂层的物相结构^[7]、显微硬度^[8]、摩擦性能^[9]和质量转移^[10]等方面都开展了大量卓有成效的研究工作，但在工作气氛（保护气氛）对微弧火花沉积影响方面的研究还较少。

现有的研究报道中，张二亮等人^[11]以 TC4 钛合金为电极，45 钢为基体，分别在氮气、氩气和空气三种气氛下制备了钛合金涂层，并分析了典型缺陷形成、摩擦性能和沉积层元素分布等。HONG 等人^[12]在氮气中制备了 TiN 强化层，并比较了氮气流量对强化层的影响。国外的 Sheveyko 等人^[13]则使用 TiC-CaO-Ti₃PO₄-(Ag₂Ca)电极在氩气、空气和纯水中进行沉积实验，并分析了不同相（如 Ti₃PO₄）的形成条件与规律。从这些已有的报道来看，其研究工作的重点均侧重在更换不同工作气氛（如氮气、氩气等）及其产生的影响方面，而对工作气氛中氧等微量活性成分变化对微弧火花沉积行为影响方面的研究还未见报道。众所周知，氧是工业保护气氛（如氩气等）中常见的高活性杂质残留气体，高温下氧对金属的表面张力、熔体性能等热力学因素均有较大影响。保护气氛中残留氧浓度的不同会显著影响沉积层的形成和沉积过程中沉积特性的改变，因此对微弧火花沉积过程中微量残留氧影响的研究是具有重要意义的。

本文以定制的 Fe-Ni-Cr 系修复合合金电极材料的微弧火花沉积为研究对象，选用了三种不同典型残留氧原子百分比（0.04%~0.06%、0.4%~0.6%和 1.4%~

1.6%）的氩气保护气氛，分别进行了单脉冲、多脉冲和 2 min 持续沉积试验，通过沉积斑形态改变、质量转移行为、沉积层硬度变化等方面的研究初步探讨了保护气氛中不同残留氧浓度对沉积行为的影响，成功观察到了一种基于熔滴过渡机制的新形态微柱体结构。这些结果是对现有微弧火花沉积研究的扩展，同时也希望能为微弧火花沉积行为控制方面的进一步研究提供一定的参考。

1 试验

微弧火花沉积实验的基体（12 mm×8 mm×3 mm，冷轧态，线切割切取）和电极（ ϕ 2.0 mm）都选用相同成分的 Fe-Ni-Cr 系合金，其化学成分如表 1 所示。在实验前，电极用 600[#]SiC 砂纸打磨，基体用 240[#]、600[#]和 1000[#]SiC 砂纸逐次打磨，去除两者表面的氧化层，然后放入无水乙醇中超声清洗 5 min，去除油污。

使用 3H-ES-6G 型微弧火花沉积装置，电极接正极，基体接负极，在密封的柔性气氛保护系统中进行沉积试验。三种不同富 Ar 气氛中的残留氧分别控制在 0.04%~0.06%、0.4%~0.6%和 1.4%~1.6%，其他参数保持不变。持续沉积试验中，每隔 30 s 使用感量为 0.0001 g 的分析天平称量基体和电极的质量改变，并绘制质量转移曲线。

使用 ARTCAM-300MI-WOM-DS 光学显微镜（OM）和 TESCAN VEGA-3-SBH 扫描电镜（SEM）观察涂层的表面形貌，样品经过 10%（质量分数）的草酸溶液电解腐蚀后观察截面形貌与显微组织。采用 HX-1000 型显微硬度计测量维氏硬度，使用载荷 50 g，加载时间 15 s。

表 1 电极和基体材料的化学成分
Tab.1 Chemical composition of electrode and substrate

wt%							
Fe	C	Si	Mn	Cr	Ni	S	P
Bal.	≤0.08	≤1.0	≤2.0	18~20	8~10.5	≤0.03	≤0.045

2 结果及分析

2.1 不同残留氧浓度下的典型单脉冲沉积斑形态

不同残留氧浓度的富 Ar 保护气氛下微弧火花单

脉冲沉积斑（以下简称沉积单斑）的形态如图 1 所示。可以看到，在放电参数均相同的情况下，不同残留氧环境下沉积单斑形貌具有明显的差异。当保护气氛中残留氧为 0.04%~0.06%时，沉积斑呈泼溅状不规则形态，其沉积斑长轴方向约 500 μm，短轴方向约 400 μm，表面有明显的波浪状起伏（图 1a）。而当残留氧为

0.4%~0.6%和1.4%~1.6%时,两者的单脉冲沉积斑轮廓则相对完整,呈薄饼状,沉积斑边缘清晰,泼溅特

征不明显,典型沉积斑直径分别约为450 μm 和300 μm ,如图1b和图1c所示。

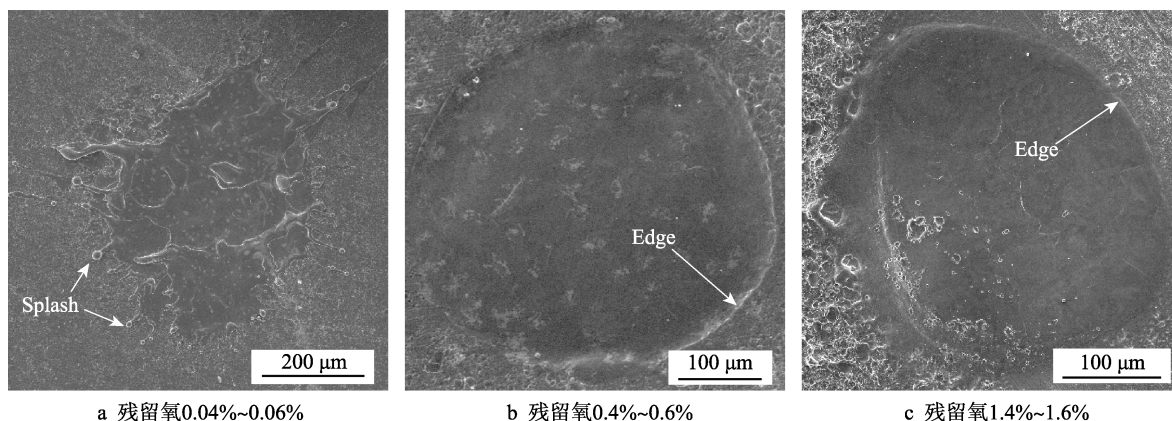


图1 不同残留氧富Ar保护气氛下单脉冲沉积斑形态(放电参数均相同)

Fig.1 Morphology of deposition spots by single pulse in argon-rich shielding gas with different residual oxygen (with the same discharge parameters): a) residual oxygen 0.04%~0.06%; b) residual oxygen 0.4%~0.6%; c) residual oxygen 1.4%~1.6%

2.2 多脉冲沉积下沉积层表面形貌

图2所示为多脉冲沉积下的微弧火花沉积表面形貌。从图中可以看到,多脉冲沉积时的沉积表面特征与图1所示的单脉冲沉积的表面特征基本一致。当残留氧为0.04%~0.06%时,沉积区域表面形态为与图1a相似的典型泼溅特征,不同沉积单斑间边缘模糊,难以区分,混杂在一起最终形成一个直径约为1000 μm 的大块沉积区,如图2a所示。当残留氧为0.4%~0.6%

时(图2b),其多脉冲沉积表面呈现为典型的多个清晰、完整的饼形沉积单斑交错堆叠特征,各沉积单斑间及沉积单斑与基体间的交叠边界清晰、连续,熔合良好,整体无泼溅特征。进一步观察后发现,后一沉积单斑的中心通常在前一沉积单斑的边缘处,最终形成了次序交叠的有趣现象,如图2b所示。残留氧为1.4%~1.6%时的样品特征与残留氧为0.4%~0.6%时相似,如图2c所示。

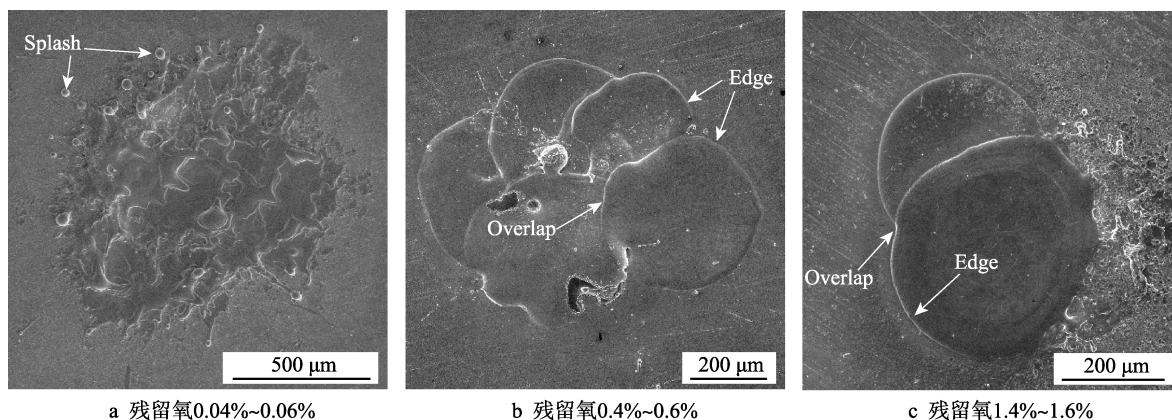


图2 不同残留氧富Ar保护气氛下多脉冲沉积斑形态(其他放电参数均相同)

Fig.2 Morphology of deposition spots by multiple pulse in argon-rich shielding gas with different residual oxygen (with the same discharge parameters): a) residual oxygen 0.04%~0.06%; b) residual oxygen 0.4%~0.6%; c) residual oxygen 1.4%~1.6%

2.3 保护气氛中残留氧浓度的影响

微弧火花沉积本质上是一种显微堆焊技术,在沉积过程中,通过不断的微米级尺度的微小熔滴过渡(图2)来实现沉积层的形成,其示意图如图3所示。前述的图1和图2中每一个沉积单斑即是一次熔滴过渡的结果。在沉积层形成过程中,表面张力是主要的沉积斑形态影响因素。一般来说,液态下金属熔滴的表面张力主要受熔滴温度(决定于放电加工参数)和

表面微区成分的影响,高温下保护气氛中的残留氧会向熔融金属内溶解、扩散,进而影响表面微区成分。当放电参数相同时,熔滴及微熔池的表面微区成分就成为主要影响因素。

Sahoo P等人^[14]研究发现表面张力温度梯度系数 $\partial\gamma/\partial T$ 是熔池内氧含量和熔池表面温度的函数:

$$\frac{\partial\gamma}{\partial T} = -A - R\Gamma_s \ln(1 + K_{\text{seg}} a_i) - \frac{K_{\text{seg}} a_i}{1 + K_{\text{seg}} a_i} \frac{\Delta H \Gamma_s}{T} \quad (1)$$

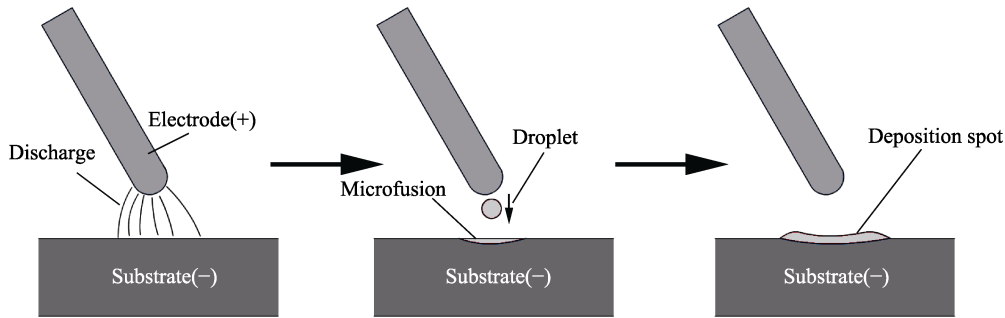


图 3 微弧火花沉积过程示意图

Fig.3 Schematic diagram of the micro-arc spark deposition process

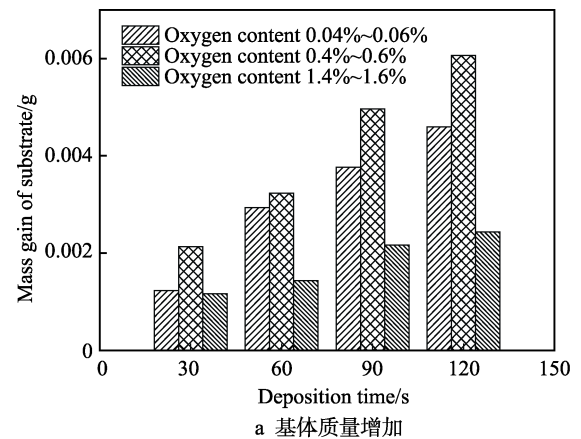
$$K_{\text{seg}} = k_1 \exp\left(-\frac{\Delta H}{RT}\right) \quad (2)$$

式中, A 为表面张力常数; Γ_s 为饱和表面过剩常数; R 为气体常数; ΔH 为标准吸附热; K_{seg} 为氧组元平衡吸附系数; T 为熔池表面温度; a_i 为熔池内氧含量; k_1 为表面偏聚熵常数。

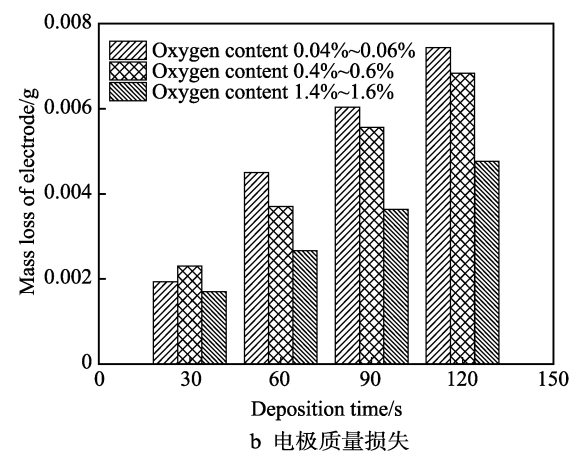
有研究指出, 当保护气氛中的氧在 0.04%~0.06% 之间时, 熔池表面张力温度梯度系数为负 ($\partial\gamma/\partial T < 0$)^[15]。由于微熔池中心温度比边缘处高, 因此中心处的表面张力比边缘处小, 熔融金属倾向于向微熔池边缘运动。沉积过程中, 在微熔滴冲击产生的横向作用和表面张力的协同作用下, 熔融的金属材料倾向于向微熔池四周分散, 甚至发生飞溅, 形成图 1a 和图 2a 中的“飞溅沉积斑”形貌。而当保护气氛中的氧在 0.4%~1.6% 之间时 (即图 2b 和图 2c 所示工况), 根据文献[15]可知, 表面张力温度梯度系数为正值 ($\partial\gamma/\partial T > 0$), 由于微熔池温度中心高、边缘低, 因此在此条件下微熔池中心表面张力大于边缘的表面张力, 在该表面张力的束缚下熔融金属有向微熔池中心聚拢收缩的倾向。从实际沉积结果来看 (图 1b 和图 1c), 在沉积过程中, 该聚拢收缩作用可部分甚至全部抵消熔滴冲击过程中产生的横向扩张作用, 因此最终形成了图 2b 和图 2c 所示的轮廓较为完整和清晰的“无飞溅沉积斑”形貌。

2.4 残留氧浓度对质量转移的影响

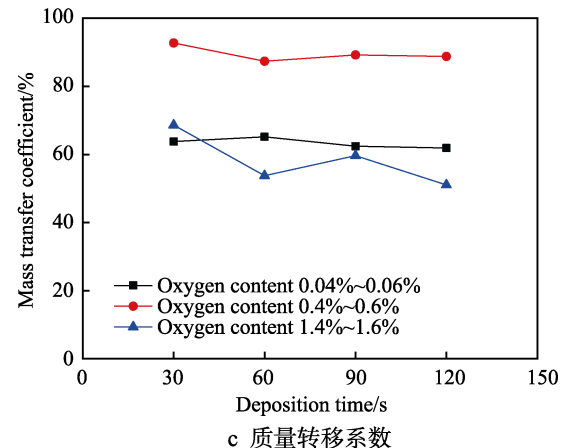
图 4a 是在不同残留氧浓度保护气氛下, 微弧火花沉积 2 min 的基体增重结果。可以看到, 三种气氛下, 基体的增重均随沉积时间的增加而增加, 并近似呈线性关系。但比较来看, 0.4%~0.6% 残留氧气氛下基体的累积增重最高, 0.04%~0.06% 残留氧气氛下次之, 而 1.4%~1.6% 残留氧气氛下的基体增重则明显小得多。从电极失重情况来看 (图 4b), 在 2 min 的沉积试验中, 电极的累积失重基本随着残留氧浓度的增加而减小。其中, 0.04%~0.06% 残留氧气氛下失重最大, 0.4%~0.6% 残留氧气氛下次之, 1.4%~1.6% 残留氧气氛下电极累积失重则最小。



a 基体质量增加



b 电极质量损失



c 质量转移系数

图 4 质量转移规律

Fig.4 Mass transfer trends: a) mass gain of substrate; b) mass loss of electrode; c) mass transfer coefficients

以上分析表明,在氧浓度较低的情况下(0.04%~0.06%残留氧),尽管电极材料消耗最多,但消耗的材料中有效转移到基体上的比例相对不高。一般来说,微弧火花沉积过程遵从如下的质量守恒定律:

$$m_{\text{Substrate gain}} = m_{\text{Electrode loss}} - m_{\text{Vapour}} - m_{\text{Splashing}} \quad (3)$$

式中: $m_{\text{Substrate gain}}$ 为基体增重; $m_{\text{Electrode loss}}$ 为电极失重; m_{Vapour} 为汽化损失; $m_{\text{Splashing}}$ 为飞溅损失。即基体的增重等于电极的质量损失减去沉积过程中的汽化损失和飞溅损失。结合图 1a 和图 2a 的观察结果可知,在 0.04%~0.06%残留氧气氛下,沉积材料的飞溅较为严重,因此尽管其电极失重较大,但因飞溅损失较多,有效转移的比例并不是最高(质量转移系数仅约为 64%)。

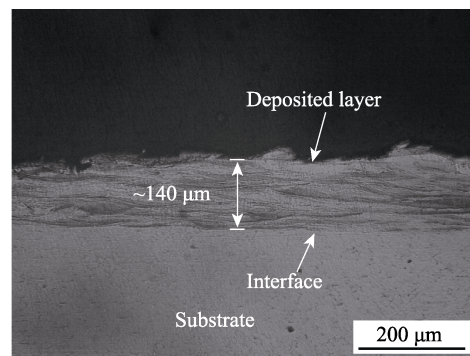
相对来看,在三组试验中,1.4%~1.6%残留氧气氛下,其电极失重和基体增重均是最小的,同时其质量转移系数也不高(平均仅约为 58%),这表明微弧火花沉积过程中保护气氛里过高的残留氧会导致沉积效率下降。相对而言,在 0.4%~0.6%残留氧气氛下,尽管其电极消耗并不是最高(图 4b),但其质量的有效转移比例较高,平均可达约 91%。结合沉积斑形态的观察结果(图 1b 和图 2b)来看,在 0.4%~0.6%残留氧气氛下,其沉积材料几乎无飞溅,除了少部分汽化损失外,大部分都有效转移到了基体表面形成沉积层,这表明在微弧火花沉积过程中,保护气氛中适量残留氧的存在对提高沉积效率和材料利用率有利。

2.5 沉积层截面显微分析

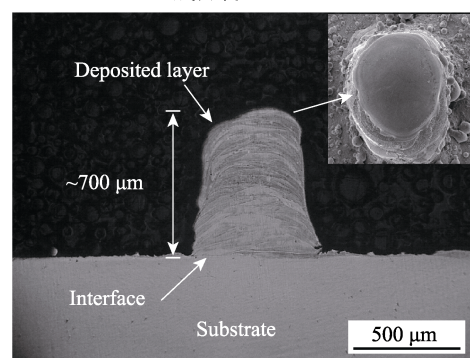
图 5 为在三种残留氧浓度保护气氛下,微弧火花持续沉积 2 min 后的沉积层截面显微形貌。当残留氧为 0.04%~0.06%时,沉积层基本呈涂层状,最大厚度处约 140 μm ,内部致密,无裂纹、孔洞、未融合等缺陷,沉积层与基体界面清晰,呈良好的冶金结合状态,如图 5a 所示。当残留氧为 0.4%~0.6%时,则获得了有趣的微柱体表面结构形态,典型的单个微柱体如图 5b 所示,该微柱体直径约 600 μm ,高约 700 μm ,涂层内部为典型的层状结构,整个柱体由大量图 2b 所示的子薄层交替堆叠形成。电镜观察显示(图 5b 右上)该微柱体与此前金柏冬等人^[16]报道的微柱体特征不同,是一种具有典型熔滴过渡特征(表面可见完整大尺寸熔滴)的新形态微柱体结构。而当残留氧达到 1.4%~1.6%时,沉积物呈现出与图 5b 类似的特征,但沉积层形态破碎,缺陷也较多,应属于发育不完善的微柱体/柱胚结构(图 5c)。这表明,保护气氛中过多的残留氧会导致沉积层质量下降、缺陷增多,不利于高质量沉积层的获得。

2.6 沉积层截面显微硬度分析

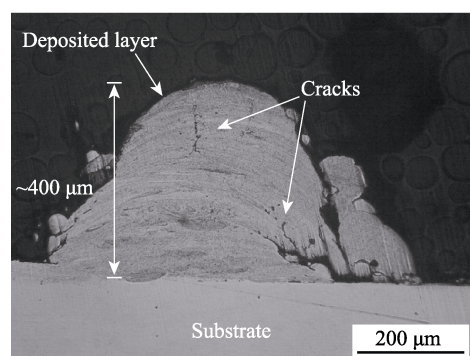
图 6 为沉积层截面的显微硬度测试结果。在三种不同残留氧浓度的富氩气氛下,沉积层的平均显微硬



a 残留氧0.04%~0.06%



b 残留氧0.4%~0.6%



c 残留氧1.4%~1.6%

图5 不同保护气氛下持续沉积 2 min 的沉积层截面显微形貌

Fig.5 Cross section morphology of the deposited coating after 2 min: a) oxygen concentration of 0.04%~0.06%; b) oxygen concentration of 0.4%~0.6%; c) oxygen concentration of 1.4%~1.6%

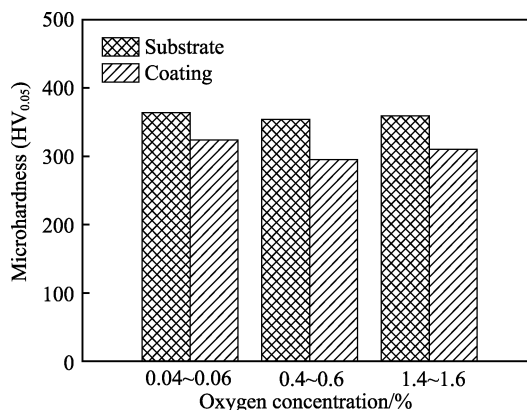


图6 沉积涂层显微硬度

Fig.6 Microhardness of deposited coating

度均在 290~330HV 之间, 这表明, 保护气氛中残留氧浓度对沉积层硬度的影响较小。试样基体由于是冷轧态, 因此硬度略高, 为 350~365HV。此外, 由于微弧火花沉积冷却速度极快 ($>10^6$ °C/s), 因此还可能有少量高温铁素体残留, 这也是导致沉积层的硬度稍低的可能原因之一。

3 结论

1) 保护气氛中残留氧浓度变化会导致熔池表面张力状态改变, 进而影响沉积斑形态。当残留氧为 0.04%~0.06% 时, 沉积斑呈典型的泼溅状形貌, 当残留氧增加到 0.4%~0.6% 和 1.4%~1.6% 时, 沉积斑转变为边缘没有明显飞溅的“薄饼状”, 并有诱发形成熔滴过渡型微柱体的倾向。

2) 保护气氛中适量残留氧的存在, 能够提高微弧火花沉积中的质量转移效率, 并有助于获得高质量的沉积表层, 但残留氧过多时 (1.4%~1.6%), 沉积层缺陷增多。

3) 保护气氛中残留氧在 0.04%~1.4% 之间时, 本试验采用 Fe-Ni-Cr 修复合金所获沉积层的显微硬度变化均不显著。

参考文献:

- [1] XIE Yu-jiang, WANG De, WANG Ming-sheng, et al. Evaluation of three kinds of MCrAlY coatings produced by electrospark deposition[J]. Transactions of nonferrous metals society of China, 2016, 26(6): 1647-1654.
- [2] HASANABADI M F, GHAINI F M, EBRAHIMNIA M, et al. Production of amorphous and nanocrystalline iron based coatings by electro-spark deposition process[J]. Surface and coatings technology, 2015, 270: 95-101.
- [3] 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.
- [4] ZAMULAEVA E I, SHEVEYKO A N, POTANIN A Y, et al. Comparative investigation of antibacterial yet biocompatible Ag-doped multicomponent coatings obtained by pulsed electrospark deposition and its combination with ion implantation[J]. Ceramics international, 2018, 44(4): 3765-3774.
- [5] 谢光, 邬蕾, 郑伟, 等. 微弧火花渗碳对一种定向凝固高温合金表面再结晶的影响[J]. 表面技术, 2016, 45(2): 118-161.
XIE Guang, WU Lei, ZHENG Wei, et al. Influence of micro-arc carburization on the surface recrystallization in a directionally solidified superalloy[J]. Surface technology, 2016, 45(2): 118-161.
- [6] WANG Wei-fu, WANG Mao-cai, SUN Feng-jiu, et al. Microstructure and cavitation erosion characteristics of Al-Si alloy coating prepared by electrospark deposition[J]. Surface and coatings technology, 2008, 202(21): 5116-5121.
- [7] EBRAHIMNIA M, GHAINI F M, XIE Y J, et al. Microstructural characteristics of the built up layer of a precipitation hardened nickel based superalloy by electrospark deposition[J]. Surface and coatings technology, 2014, 258: 515-523.
- [8] 赵林, 李丽, 王好臣, 等. TC4 钛合金混粉电火花表面改性研究[J]. 表面技术, 2017, 46(2): 138-143.
ZHAO Lin, LI Li, WANG Hao-chen, et al. Surface modification of TC4 titanium alloy by mixed powered electrical discharge machine in different tool electrode[J]. Surface technology, 2017, 46(2): 138-143.
- [9] PADGURSKAS J, KREIVAITIS R, RUKUIZA R, et al. Tribological properties of coatings obtained by electro-spark alloying C45 steel surfaces[J]. Surface and coatings technology, 2017, 311: 90-97.
- [10] WANG Xiao-rong, WANG Zhao-qin, LIN Tie-song, et al. Mass transfer trends of AlCoCrFeNi high-entropy alloy coatings on TC11 substrate via electrospark-computer numerical control deposition[J]. Journal of materials processing technology, 2017, 241: 93-102.
- [11] 张二亮, 张平, 蔡志海, 等. 不同气氛下电火花沉积钛合金涂层的组织性能[J]. 中国表面工程, 2011, 24(6): 28-34.
ZHANG Er-liang, ZHANG Ping, CAI Zhi-hai, et al. Microstructure and properties of titanium alloy coating prepared by electric spark deposition under different atmospheres[J]. China surface engineering, 2011, 24(6): 28-34.
- [12] HONG Xiang, TAN Ye-fa, WANG Xiao-long, et al. Effects of nitrogen flux on microstructure and tribological properties of in-situ TiN coatings deposited on TC11 titanium alloy by electrospark deposition[J]. Transactions of nonferrous metals society of china, 2015, 25(10): 3329-3338.
- [13] SHEVEYKO A N, MANAKOVA O S, ZAMULAWVA E I, et al. Structural transformations in Ti-CaO-Ti₃PO_x-(Ag₂Ca) electrodes and biocompatible TiCaPCO(N)-(Ag) coatings during pulsed electrospark deposition[J]. Surface and coating technology, 2016, 302: 327-335.
- [14] SAHOO P, DEBROY T, MCNALLAN M J. Surface tension of binary metal-surface active solute systems under conditions relevant to welding metallurgy[J]. Metallurgical and materials transactions B, 1988, 19(3): 483-491.
- [15] LU S P, FUJII H, NOGI K, et al. Effect of oxygen content in He-O₂ shielding gas on weld shape in ultra deep penetration TIG[J]. Science and technology of welding and joining, 2013, 12(8): 689-695.
- [16] 金柏冬, 王振龙, 彭子龙, 等. 电火花沉积加工微细结构的研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2007, 35(S1): 89-92.
JIN Bai-dong, WANG Zhen-long, PENG Zi-long, et al. Research on micro structure using EDM deposition[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (nature science edition), 2007, 35(S1): 89-92.