

BT20 钛合金表面电火花沉积 WC 涂层 微观组织研究

王明伟¹, 潘仁¹, 李姝¹, 赵秀君¹, 朱志², 张立文²

(1. 大连工业大学, 辽宁 大连 116034)

(2. 大连理工大学, 辽宁 大连 116085)

摘要: 以 WC 为电极, 氩气为保护气, 采用电火花沉积方法在 BT20 钛合金基体上制备了强化沉积层。利用 SEM、EDS 和 XRD 分析了沉积层的微观结构和物相, 利用显微硬度计测试了沉积层截面的显微硬度。结果表明, 沉积层主要由 TiC、WC、W 和 W₂C 相组成, TiC 是电极材料与基体材料反应形成新相, 是沉积层的主要组成相; 沉积层与基体结合致密, 形成良好的冶金结合。沉积层表面呈“泼溅状”形貌, 截面组织形貌中观察到纳米级微晶堆垛结构和少量的树枝晶, 反映了电火花沉积过程的快速加热和冷凝机制。沉积层显微硬度呈梯度变化, 涂层最大硬度是基体的 3 倍。

关键词: BT20 钛合金; 电火花沉积; WC 涂层

中图分类号: TG174.44

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2014)02-0361-03

BT20 钛合金具有密度小、比强度高、耐蚀性好等优点, 被广泛应用于航空航天和军事工业等领域^[1]。但是其硬度较低, 耐磨性较差, 当受到挤压、剪切和冲击载荷的作用, 容易与对磨材料发生粘着磨损而失效。因此如何提高钛合金表面的硬度及耐磨性成为钛合金研究与应用的新焦点。为了改善钛合金的耐磨性, 近年来国内外科研工作者采用激光表面处理技术、等离子喷涂技术、离子束表面改性技术、热扩散技术、微弧氧化技术、堆焊技术等对钛合金表面进行强化, 取得了较好的效果, 但上述方法均需要昂贵的设备、特定的场所、专业的技术人员, 从而使强化成本大大增加。

电火花沉积(electrospark deposition, ESD)是近 20 年才引起广泛关注的表面强化新技术, 电火花放电时瞬间产生 5 000~20000 K 的高温, 通过火花放电作用将电极材料熔渗进工件表层以形成合金化的表面沉积, 具有设备简单、使用灵活、环保节能、沉积层厚度大、结合强度高优点, 已广泛应用于航空发动机中钛合金部件的表面强化, 并取得了良好的效果^[2-11]。本实验是以 WC 为电极, 采用氩气为保护气, 在 BT20 钛合金基体上制备 WC 强化涂层, 并对涂层的显微组织、物相和成分进行分析。

1 实验

试样材料为 BT20 钛合金, 采用线切割制备试样。试样尺寸为 $\phi 12 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ 。实验前, 依次采用 200、400、600#砂纸进行表面打磨, 然后再用丙酮溶液进行清洗吹干。

采用 DZ-4000(III)型电火花沉积堆焊机, $\phi 5 \text{ mm}$ WC 棒为电极。其电火花沉积工艺规范: 输出电压 80 V, 放电脉冲频率 2000 Hz, 放电电容 180 μF , 比沉积时间 6 min/cm^2 , 保护气体氩气供给量 6 L/min。沉积结束后, 涂层试样经线切割切片制备金相试样, 采用 D/Max-3B X 射线衍射仪 (XRD)、奥林巴斯金相显微镜 (OM)、Ieiss Supra55(VP)扫描电子显微镜 (SEM) 和 MHV-1000 型显微硬度计等进行涂层物相、表面形貌、组织结构、元素分析和显微硬度测试。

2 结果与分析

2.1 沉积层物相分析

图 1 为涂层 X 射线衍射分析结果。从图中可以看出, 涂层主要由 TiC、WC、W 和少量 W₂C 相组成。其中 TiC 的峰值较强, 说明了涂层表层含有较高的 TiC 相, 是强化层的主要成分。强化层 TiC、W 和 W₂C 都是新相, 可见由电极材料到强化涂层, 组织发生了变化, 强化层不是电极材料的简单堆积, 而是电极材料和基体材料或者电极材料自身重新合金化的产物。

收稿日期: 2013-01-15

基金项目: 大连工业大学青年基金项目 (QNJJ201204)

作者简介: 王明伟, 男, 1976 年生, 博士, 副教授, 大连工业大学机械工程与自动化学院, 辽宁 大连 116034, 电话: 0411-86324505, E-mail: wangmw@dpu.edu.cn

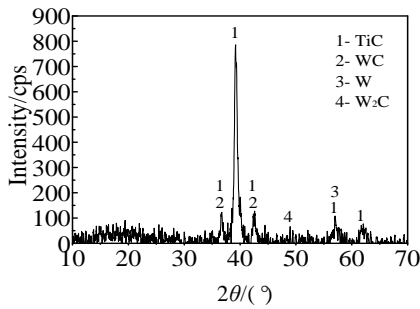


图 1 BT20 基体涂层的 XRD 图谱
Fig.1 XRD pattern of the coating

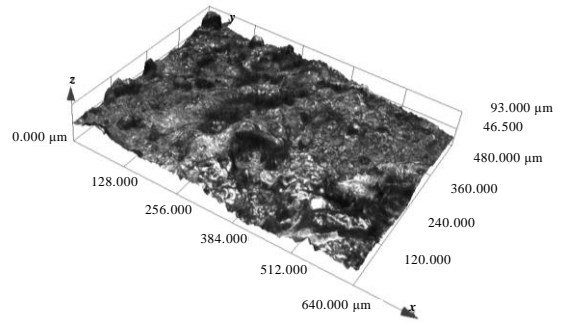


图 3 涂层表面三维形貌

Fig.3 3D morphologies of coating surface

2.2 沉积层表面形貌分析

图 2 给出了沉积层的表面形貌。从图中可以看出，沉积层表面比较平坦，但存在少量的气孔和微裂纹。气孔是由沉积过程中强化点不连续造成的，微裂纹是由于涂覆过程中产生循环热应力形成的。涂层表面形貌呈无数重叠形貌，呈“泼溅”状，边缘呈放射性溅射。分析认为，在沉积强化过程中极短的脉冲放电时间（约为 20 μs）能量高度集中在微小区域，电极和基体在脉冲放电过程中融化，电极熔滴在高温高压条件下被保护气体离子流加速，撞击到基体表面微区熔池，熔滴的冲击作用与高温产生的等离子气流作用，形成溅射状边缘和飞溅颗粒。

通过奥林巴斯光学显微镜观测的涂层表面三维微观形貌如图 3 所示。从图中可以看出涂层微区表面凹凸不平，表面粗糙度 R_a 为 8.5 μm，说明该工艺下制备的涂层表面比较粗糙。

2.3 沉积层截面微观组织成分分析

在扫描电镜下观察 BT20 钛合金基体强化涂层截面形貌如图 4 所示。从图中可以看出沉积层界面分为强化层、过渡层和基体。涂层厚度不均匀，其厚度范围在 40~70 μm。涂层与基体结合处过渡层可以看到细晶组织，即使放大到 3000 倍也难以分辨，这种组织是由于电火花沉积过程中超高速淬火形成的。涂层与基体结合处组织很致密，没有明显的分界层，组织过渡均匀，涂层与基体之间实现了良好地冶金结合。

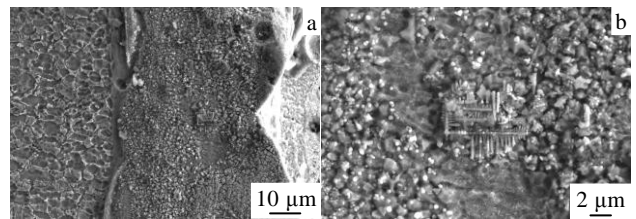


图 4 涂层截面形貌

Fig.4 SEM image of coating cross-section: (a) cross section and (b) high magnification image

从图 4b 中高倍 SEM 观察到涂层中少量的树枝晶形貌和纳米级微晶堆垛结构。形成这种微晶堆垛结构的主要原因分析如下：电火花沉积工艺是快速加热后迅速冷却，它的加热速度达到 10^7 °C/s，冷却速度可达 10^6 °C/s，这种快速加热实际上是一种非平衡态物相反应，促使了新相的形核率提高，组织细化^[12]。同时沉积过程中电极与基体之间不断地撞击，撞击过程中产生的弹性应变和温度效应也会引起组织细化。电极与基体发生放电时，高温下基体表层首先发生熔化，熔化的 Ti 与电极 WC 发生了剧烈的物理化学反应，由于放电微区内温度远在液相线以上，此时 TiC 全部溶解于液相中。放电结束后，放电微区熔池的液相受到基体的冷却作用快速凝固，在固液前沿容易产生成分过冷而使 TiC 呈树枝晶状生长。但是更多区域是由于冷却速度过快，没有产生成分过冷而形成树枝晶，而是形成了纳米级的微晶堆垛结构。

对沉积试样截面的主要元素进行线扫描分析，如图 5 所示。从图中可以看出，在电火花沉积过程中电极和基体元素均发生了扩散。从元素扫描线可以看出，沉积层和基体之间存在一定的过渡区，过渡区宽度只有几微米，在过渡区元素含量是逐渐变化的。

2.4 沉积层硬度变化

图 6 为沉积层截面显微硬度分布。从图中可知，沉积层表面的显微硬度最高值为 14974.8 MPa，约为基体硬度（4771.4 MPa）的 3 倍，这主要是涂层表层

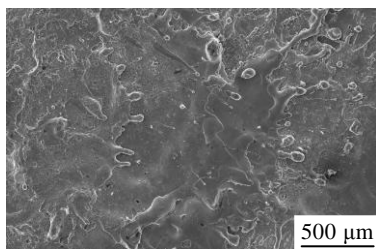


图 2 涂层表面照片

Fig.2 SEM image of coating surface

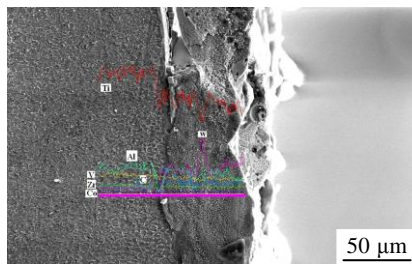


图 5 涂层截面元素分布

Fig.5 Linear scanning results for cross-section of coating

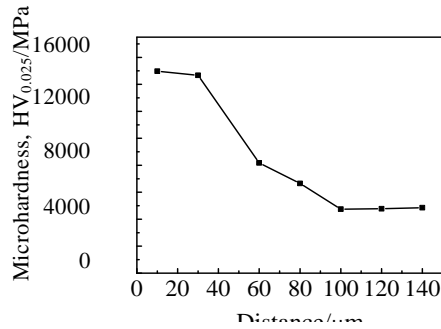


图 6 沉积层的显微硬度分布

Fig.6 Evolution of the microhardness of coating

中含有较多的高硬度 TiC 和 WC 硬质相, 这些硬质颗粒呈纳米级微晶堆垛结构, 由于电火花沉积过程加热和冷却都是瞬间完成的, 存在着高密度的位错和残余应力, 这些都导致沉积层具有较高的显微硬度。

3 结 论

1) 利用电火花沉积技术, 以 WC 为电极, 在 BT20 钛合金基体上制备了含有 TiC、WC 和 W₂C 硬质相的致密、连续的反应涂层, 沉积层与基体呈冶金结合。

2) 沉积层的显微硬度为 14974.8 MPa, 约为基体硬度 (4771.4 MPa) 的 3 倍。沉积层组织形貌中观察到少量树枝晶和纳米级微晶堆垛结构, 反映了电火花沉积过程中的快速加热和冷凝机制。

参考文献 References

- [1] Wang Mingwei(王明伟) *et al. Rare Metal Materials and Engineering* (稀有金属材料与工程)[J], 2012, 41(3): 502
- [2] Hao Jianjun(郝建军) *et al. Rare Metal Materials and Engineering* (稀有金属材料与工程)[J], 2007, 36(S2): 706
- [3] Hao Jianjun(郝建军) *et al. Rare Metal Materials and Engineering* (稀有金属材料与工程)[J], 2009, 38(5): 892
- [4] Wang Ruijun(汪瑞军) *et al. Transactions of the China Welding Institution* (焊接学报)[J], 2003, 24(5): 88
- [5] Zhang Kung(张 鲲) *et al. Transactions of Materials and Heat Treatment* (材料热处理学报)[J], 2008, 29(4): 143
- [6] Frangini S *et al. Surface & Coating Technology*[J], 2002, 149: 279
- [7] Luo Cheng *et al. Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2011, 21: 317
- [8] Chen Zheng *et al. Surface & Coating Technology*[J], 2006, 201: 1503
- [9] Zamulaeva E I *et al. Surface and Coatings Technology*[J], 2008, 202(15): 3715
- [10] Lesnjak A *et al. Science and Technology of Welding and Joining*[J], 2002, 7(6): 391
- [11] Frangini S *et al. Surface and Coatings Technology*[J], 2002, 149: 79
- [12] Qiao Shengru(乔生儒) *et al. Materials for Mechanical Engineering* (机械工程材料)[J], 2004(8): 7

Microstructure of Electro-Spark Deposition WC Coating on BT20 Titanium Alloy

Wang Mingwei¹, Pan Ren¹, Li Shu¹, Zhao Xiujun¹, Zhu Zhi², Zhang Liwen²

(1. Dalian Polytechnic University, Dalian 116034, China)

(2. Dalian University of Technology, Dalian 116085, China)

Abstract: The WC coating was produced on the surface of BT20 titanium alloy in Ar atmosphere by electro-spark deposition technique using WC as electrode. The microstructures and the phase compositions of WC coatings were characterized by SEM, EDS and XRD. The microhardness distribution of the deposition coating was studied by microhardness tester. The results show that the coating consists of TiC, WC, W and W₂C phases. TiC is a new phase formed by the reaction between the electrode material and the substrate which is the main phase of the deposited layer. The excellent metallurgical bonding between the coating and the substrate is obtained. The coating surface displays a "splash" shape. The nanometer crystallite stacking structure and a small amount of dendritic structure can be observed in the cross section morphology which reflects the electric spark deposition process for rapid heating and the cooling mechanism. The maximum microhardness of the coating is three times of that of the substrate.

Key words: BT20 titanium alloy; electro-spark deposition; WC coating

Corresponding author: Wang Mingwei, Ph. D., Associate Professor, School of Mechanical Engineering and Automation, Dalian Polytechnic University, Dalian 116034, P. R. China, Tel: 0086-411-86324505, E-mail: wangmw@dipu.edu.cn