

煤油中电火花沉积钛合金表面改性层性能研究

徐召朋¹, 鲍曼雨^{1,2}, 马小斌^{1,2}, 汪瑞军^{1,2}

(1. 中国农业机械化科学研究院, 北京 100083; 2. 北京金轮坤天特种机械有限公司, 北京 100083)

摘要: 分别在氩气、煤油保护下, 在 TA32 钛合金表面制备电火花沉积改性层, 并对改性层的厚度、硬度和残余应力等进行测试分析。结果表明, 氩气保护下制备改性层最大厚度为 $37.7\ \mu\text{m}$, 煤油保护下制备改性层最大厚度为 $98\ \mu\text{m}$; 煤油保护下制备改性层最高硬度值可达 $502.06\ \text{HV}_{0.2}$, 氩气保护下制备改性层最高硬度值可达 $518.33\ \text{HV}_{0.2}$; 氩气保护下制备改性层的残余应力为拉应力, 最外侧的残余应力达到 $133\ \text{MPa}$, 而煤油保护下制备改性层的残余应力为压应力, 最外侧的残余应力达到 $-91.2\ \text{MPa}$ 。通过在煤油保护下制备改性层, 实现了残余应力从拉应力向压应力的转变, 为钛合金在航空航天、军事等领域的应用提供了一定的理论依据。

关键词: 煤油保护; 电火花沉积; 钛合金; 改性层; 硬度; 残余应力

中图分类号: TG 174 **文献标志码:** A

Research on Properties of Surface Modified Layer of Titanium Alloy by Electrospark Deposition in Kerosene

XU Zhaopeng¹, BAO Manyu^{1,2}, MA Xiaobin^{1,2}, WANG Ruijun^{1,2}

(1. Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Beijing 100083, China; 2. Beijing Golden Wheel Special Machine Co., Ltd., Beijing 100083, China)

Abstract: Under the protection of argon and kerosene, the ESD layer was prepared on the surface of TA32 titanium alloy, and the thickness, hardness and residual stress of the modified layer were tested. The results showed that the maximum thickness of the modified layer prepared under argon protection was $37.7\ \mu\text{m}$, and the maximum thickness of the modified layer prepared under kerosene protection was $98\ \mu\text{m}$. The highest value of the modified layer prepared under kerosene protection can reach to $502.06\ \text{HV}_{0.2}$, and the preparation was modified under argon gas protection. The highest value of the layer can reach $518.33\ \text{HV}_{0.2}$, the residual stress of the modified layer prepared under argon protection was tensile stress, and the residual stress at the outermost side reached to $133\ \text{MPa}$, while the residual stress of the modified layer prepared under kerosene protection was compressive stress. The residual stress on the outside reached to $-91.2\ \text{MPa}$. By preparing the modified layer under the protection of kerosene, the tensile-pressure transition of residual stress was realized, which provided a theoretical basis for the application of titanium alloy in aerospace, military and other fields.

Key words: kerosene protection, electric spark deposition, titanium alloy, modified layer, hardness, residual stress

钛合金密度小、比强度高, 具有优良的综合性能, 目前广泛应用于航空航天及军事工业。但钛合金的硬度较低, 热导率低, 耐燃性差, 易着火燃烧, 引发“钛火”故障。“钛火”故障会产生飞溅液滴, 滴落在其它未着火的钛合金零部件上, 可进一步扩大燃烧范围, 甚至烧毁整个设备, 从而限制了钛及其合金在某些领域的进一步应用^[1-3]。目前, 相关科研人员^[4-6]采用双辉光等离子表面合金化、等离子喷涂等方法对钛合金进行强化并取得了较好效果。但上述方法涂层与基体结合强度低, 设备昂贵, 成本高。

电火花沉积 (Electrospark Deposition) 是通过电容的脉冲放电原理, 在空气或者特殊介质中, 将电极材料沉积在金属基体表面, 使基体和电极材料发生冶金反应形成的表面改性层, 从而改善工件表面性能^[7-9]。

北京科技大学、西北工业大学和中国农业机械化科学研究院等机构^[10-13]在氩气、氮气、硅油等介质中, 采用电火花沉积技术在钛合金表面制备改性层, 改性层性能有所提升, 但厚度较薄, 残余应力也未测得详细数据。煤油具有一定的绝缘性能, 介电性能好, 有利于压缩放电通道, 提高放电通道中的能量密度, 增大电极材料的蚀除量, 增加沉积层沉积厚度, 还具有冷却性好、对工件的热影响小等优点, 可以有效地减小沉积层残余应力, 减少气泡和微裂纹。所以本文分别在氩气、煤油保护下, 采用电火花沉积技术在钛合金表面制备改性层, 对 2 种介质保护下制备改性层厚度、硬度等进行检测及对比分析, 并对电火花沉积制备改性层残余应力变化进行初步研究, 从而为钛合金在航空航天、军事等领域的应用提供理论依据。

1 试验方法

基体材料采用 25 mm×100 mm×2 mm 的 TA32 钛合金矩形片,其名义化学成分为 Ti-5Al-4Sn-2Zr-1Mo-0.25Si-1Nd,是我国中科院金属所自行设计的一种近 α 型高温钛合金^[14]。电极材料为 φ6 mm×100 mm 的 Ti₄₀Zr₂₅Ni₃Cu₁₂Be₂ 非晶合金。

采用中国农业机械化科学研究院生产的 DZ-4000 II 型电火花沉积设备在 TA32 钛合金表面制备改性层,煤油保护下电火花沉积制备改性层示意图如图 1 所示,煤油保护下制备改性层煤油液面要高于基体表面 5 cm,具体工艺参数见表 1。氩气保护下制备改性层氩气流量为 20 L/min。

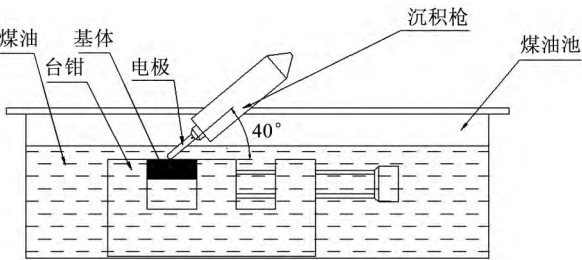


图 1 煤油保护下制备改性层示意图

表 1 煤油保护下制备改性层工艺参数

| 电源功率/W | 最大工作频率/Hz | 放电电压/V | 1 档电容/μF | 2 档电容/μF | 3 档电容/μF | 沉积枪转速/r·min ⁻¹ |
|--------|-----------|--------|----------|----------|----------|---------------------------|
| 4 000 | 2 000 | 60 | 180 | 240 | 420 | 2 600 |

所有试样在制备改性层前,先用砂纸打磨,清除钛合金表面氧化膜,然后将试样放在超声清洗池中进行超声震荡,用乙醇或丙酮清洗,将试样吹干,放在真空干燥箱内进行干燥。

采用松下 DMC—LX2 光学相机拍摄煤油、氩气保护下电火花沉积制备改性层表面形貌;采用 S—4800 扫描电镜观察改性层截面形貌及厚度分析;采用 EM—1500DL 显微硬度测试仪(压头为标准努氏压头;载荷大小 200 g;保载时间 5 s)对改性层与基体随机选取 5 个点进行测量;采用 PRISM 残余应力测试系统进行残余应力测试分析。

2 试验结果与分析

2.1 改性层表面形貌及厚度

采用松下 DMC—LX2 光学相机拍摄氩气、煤油保护下电火花沉积制备改性层表面形貌分别如图 2a 和图 2b 所示。改性层表面由无数单个沉积点相互叠加构成,单个沉积点无规则,形貌主要由放电电压、电流、脉冲宽度等放电参数控制。2 种不同介质保护下钛合金表面均已完全覆盖改性层,改性层无

起泡、脱落等明显缺陷。煤油保护下制备改性层光泽度明亮,氩气保护下制备改性层光泽度较为昏暗。试验表明,煤油保护隔绝空气、防止改性层氧化的效果更好。2 种不同介质下制备改性层厚度分别如图 3 和图 4 所示,氩气保护下制备改性层为 37.7 μm,煤油保护下制备改性层可达 98 μm,煤油保护下制备改性层厚度相较于氩气保护下制备改性层厚度有较大提升。

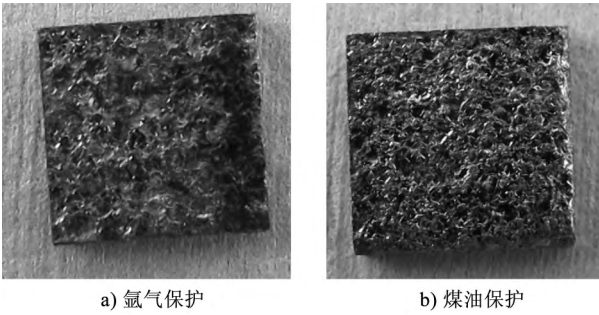


图 2 电火花沉积制备改性层表面形貌

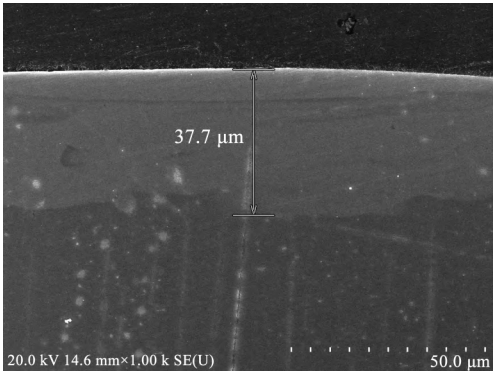


图 3 氩气保护下制备改性层厚度(1 000×)

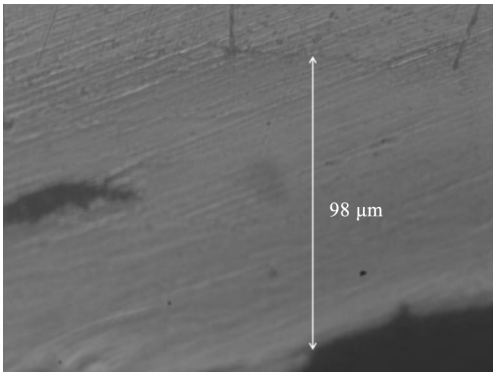


图 4 煤油保护下制备改性层厚度(1 600×)

2.2 改性层表面硬度

氩气、煤油保护下制备改性层硬度值分别见表 2 和表 3。煤油保护下制备改性层最外侧硬度为 446.86 HV_{0.2},最高值可达 502.06 HV_{0.2};氩气保护下制备改性层最外侧硬度为 446.55 HV_{0.2},最高值可达 518.33 HV_{0.2}。氩气、煤油保护下制备试样硬度变化曲线如图 5 所示,可以看出,2 种不同介质保护下制备改性层显微硬度值无明显差距,随着距改

性层表面距离的增加,虽稍有波动,但整体上显微硬度逐渐降低。2种介质保护下制备改性层硬度相较于基体均有明显提升。

表2 氩气保护下制备改性层硬度

| 深度/ μm | 硬度/ $\text{HV}_{0.2}$ |
|-------------------|-----------------------|
| 12.44 | 446.55 |
| 15.33 | 518.33 |
| 38.92 | 345.81 |
| 55.37 | 364.25 |
| 92.83 | 379.07 |

表3 煤油保护下制备改性层硬度

| 深度/ μm | 硬度/ $\text{HV}_{0.2}$ |
|-------------------|-----------------------|
| 7.25 | 446.86 |
| 19.46 | 502.06 |
| 43.38 | 341.83 |
| 63.35 | 384.22 |
| 90.68 | 394.82 |

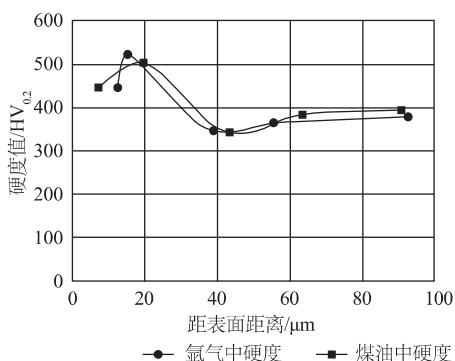


图5 氩气、煤油保护下制备试样硬度变化曲线

2.3 残余应力

采用电火花沉积技术制备的改性层中残余应力产生主要有如下几个方面:1)放电加热与冷却时温度分布不均,在工件表面微小区域内产生电火花放电,导致工件表面局部微小区域存在温度变化,工件大部分区域处于常温状态,未产生温度变化,产生的温度梯度形成了热应力;2)急热、急冷状态下接触微区发生相变产生相变应力^[15-16],在几十微秒左右,电极与工件接触微区可达8 000~25 000℃的高温,放电结束后,接触微区温度快速扩散从而急剧下降。

本试验采用芬兰 Stresstech Group 公司生产的 Prism 残余应力分析仪测量改性层深度残余应力分布情况,该测试系统基于钻孔去除材料法,同时结合数字成像和电子斑纹干涉技术进行应变测量分析。该测量系统结构组成及原理如图6所示,测量时钻头直径为0.8 mm,钻头材质为硬质合金,转速为25 000 r/min,进给速度为0.001 mm/s,每次进给量为0.02~0.1 mm。考虑到测量结果存在随机误差,因此试样表面随机选择5个点进行测量,对5个

点测量结果数据进行处理分析。

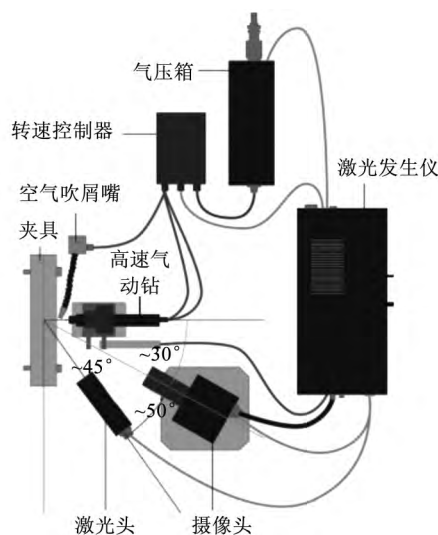


图6 PRISM残余应力测试系统

氩气、煤油保护下制备改性层残余应力见表4,正值代表拉应力,负值代表压应力。氩气保护下制备改性层残余应力为拉应力,改性层最外侧拉应力为133 MPa,在基体与改性层结合区域拉应力达到最大值1 045 MPa。随着改性层厚度增加,基体残余应力转为压应力,压应力测量所得最大值可达209 MPa。煤油保护下制备改性层残余应力为压应力,改性层最外侧压应力为91.2 MPa,在基体与改性层结合区域压应力有所降低。随着改性层厚度增加,基体残余应力转为拉应力,拉应力测量所得最大值可达92.2 MPa。

表4 氩气、煤油保护下制备改性层的残余应力

| 距表面深度/mm | 残余应力/MPa | |
|----------|----------|-------|
| | 煤油保护 | 氩气保护 |
| 0.020 | -91.2 | 133 |
| 0.050 | -57.4 | 1 045 |
| 0.100 | 78.6 | -209 |
| 0.200 | 92.2 | -35.7 |
| 0.500 | 33.9 | 47.3 |

氩气、煤油保护下制备改性层残余应力变化图如图7所示。氩气保护下制备改性层的残余应力自表面沿厚度方向分布为:改性层内存在拉应力,基体存在压应力,改性层与基体结合界面处的拉应力达到最大值;煤油保护下制备改性层的残余应力自表面沿厚度方向分布为:改性层内存在压应力,基体的残余应力转变为拉应力。

2种介质保护下制备改性层的残余应力均在改性层与基体结合界面处发生拉应力与压应力之间的转变,氩气保护下是拉应力转变为压应力,煤油保护下是压应力转变为拉应力。煤油保护下制备改性层

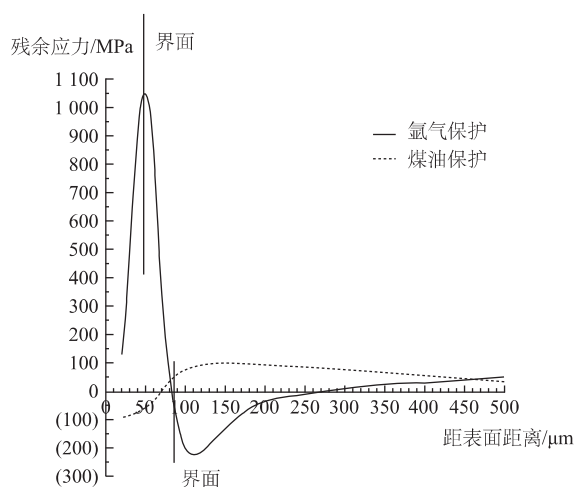


图7 氩气、煤油保护下制备改性层残余应力变化图

中为压应力,这是因为煤油比氩气散热速度快,接触微区冷却速度快,改性层产生的相变应力处于主导地位。适当的压应力可有效改善改性层的性能,延缓疲劳裂纹萌生过程,抑制裂纹早期扩展,有利于提高疲劳抗力。

3 结语

通过上述研究可以得出如下结论。

1) 氩气保护下制备改性层最大厚度为 $37.7 \mu\text{m}$, 煤油保护下制备改性层最大厚度为 $98 \mu\text{m}$, 煤油保护下制备改性层相较于氩气保护下制备改性层厚度有明显提升; 煤油保护下制备改性层最高硬度值可达 $502.06 \text{ HV}_{0.2}$, 氩气保护下制备改性层最高硬度值可达 $518.33 \text{ HV}_{0.2}$, 2 种不同介质保护下制备改性层显微硬度值无明显差距, 且改性层硬度相较于基体均有明显提升。

2) 氩气保护下制备改性层残余应力为拉应力, 最外侧为 133 MPa , 基体残余应力为压应力, 测量所得最大值可达 209 MPa ; 煤油保护下制备改性层残余应力为压应力, 最外侧为 91.2 MPa , 在基体与改性层结合区域压应力有所降低, 基体残余应力为拉应力, 测量所得最大值可达 92.2 MPa 。与氩气保护下制备改性层相比, 煤油保护下制备改性层残余应力实现了拉应力向压应力的转变。适当的压应力能够延缓疲劳裂纹萌生过程和抑制裂纹早期扩展, 有利于提高工件的抗疲劳能力。

3) 通过在煤油保护下对钛合金表面进行电火花沉积改性层的制备, 为提高钛合金性能提供了新的方法, 并对改性层残余应力进行研究, 从而为钛合金在航空航天、军事等特殊领域的应用提供了一定的理论依据。

参考文献

- [1] 赵丹丹. 钛合金在航空领域的发展与应用[J]. 铸造, 2014, 63(11): 1114-1117.
- [2] Pratt & Whitney Aircraft Group. Final report titanium combustion research program and user's manual for deck CCD 1152[J]. AFML-TR-79-4001.
- [3] 张喜燕, 赵永庆, 白晨光. 钛合金及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [4] 魏东博, 张平则, 姚正军, 等. TC4 合金双辉等离子渗 Cr 高温氧化行为[J]. 材料热处理学报, 2011(10): 146-150.
- [5] 张乐, 谢旭霞, 占焕校, 等. 等离子喷涂阻燃涂层性能研究[J]. 热喷涂技术, 2010, 2(2): 20-33.
- [6] 张乐, 于月光, 任先京, 等. 钛合金基体上阻燃涂层的研究进展[J]. 钛工业进展, 2008, 25(6): 6-10.
- [7] 陈钟燮. 电火花表面强化工艺[M]. 北京: 机械工业出版社, 1987.
- [8] Stiglich J, Campillo B, Rosales I, et al. Wear characteristics of WC-6Co coating deposited using pulsed electrode surfacing technique[J]. Surface Engineering, 1999(4): 307-311.
- [9] 张留伟, 邵俊. 电火花沉积技术研究现状及发展趋势[J]. 装备制造技术, 2017(8): 76-79.
- [10] 郝建军, 黄继华, 周志军, 等. 钛合金表面反应电火花沉积 Ti(CN) 涂层研究[J]. 材料热处理学报, 2008, 29(2): 128-130.
- [11] 李平, 乔生儒, 张丽丽, 等. Ti17 合金表面电火花沉积硅青铜涂层[J]. 材料热处理学报, 2008, 29(4): 148-152.
- [12] 傅斌友, 汪瑞军, 史萌, 等. 微弧离子沉积阻燃涂层及其性能[J]. 焊接学报, 2015, 36(6): 19-22.
- [13] 樊敏强, 傅斌友, 汪瑞军. 电火花沉积钛基非晶阻燃涂层及阻燃性能研究[J]. 焊接, 2015(4): 21-26.
- [14] Chen C, Chen M H, Xie L S, et al. Numerical and experimental investigations of the hot stamping process for complex aircraft skin parts composed of TA32 high-temperature titanium alloy using an Arrhenius-type constitutive model[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 103: 1-11.
- [15] 胡肖强, 严立. 电火花强化表面的残余应力探讨[J]. 电加工, 1988(4): 8-11.
- [16] 李小松, 蔡安辉, 陈华. 不同电火花加工条件对 Cr12MoV 钢表面残余应力的影响[J]. 电加工与模具, 2009(1): 17-21.

作者简介: 徐召朋(1995-), 男, 硕士研究生, 主要从事电火花沉积等方面的研究。

通信作者: 汪瑞军

收稿日期: 2019-05-07

责任编辑 郑练