

引用格式:张帅,王德,王文琴,等. 脉冲 TIG 增材修复 TB6 钛合金组织和性能优化[J]. 材料工程, 2024, 52(11):133-140.
ZHANG Shuai, WANG De, WANG Wenqin, et al. Optimization of microstructure and properties of TB6 titanium alloy repaired by pulsed TIG additive manufacturing[J]. Journal of Materials Engineering, 2024, 52(11):133-140.

脉冲 TIG 增材修复 TB6 钛合金组织 和性能优化

Optimization of microstructure and properties of
TB6 titanium alloy repaired by pulsed
TIG additive manufacturing

张 帅¹, 王 德^{1*}, 王文琴², 应俊龙³, 巢昂轩³, 熊震宇¹,
刘 频¹, 胡 波¹, 呼树增¹

(1 南昌航空大学 航空制造工程学院, 南昌 330063;

2 南昌大学 先进制造学院, 南昌 330031; 3 昌河飞机
工业(集团)有限责任公司, 江西 景德镇 333002)

ZHANG Shuai¹, WANG De^{1*}, WANG Wenqin²,
YING Junlong³, CHAO Bingxuan³, XIONG Zhenyu¹,
LIU Pin¹, HU Bo¹, HU Shuzeng¹

(1 School of Aeronautical Manufacturing Engineering, Nanchang
Hangkong University, Nanchang 330063, China; 2 School of
Advanced Manufacturing, Nanchang University, Nanchang
330031, China; 3 Changhe Aircraft Industry (Group)
Co., Ltd., Jingdezhen 333002, Jiangxi, China)

摘要:采用脉冲钨极惰性气体保护焊(TIG)增材制造技术对 TB6 钛合金进行缺陷修复,研究工艺参数(脉冲电流和脉冲时间)和热处理对修复后 TB6 钛合金微观组织和力学性能的影响,以确定最佳的热处理工艺参数。结果表明:在脉冲电流为 50 A,脉冲时间为 40 ms 时,修复状态下 TB6 钛合金的力学性能相对较好,抗拉强度为 1113 MPa,伸长率为 5.26%。对样品依次进行固溶和时效热处理,在不同温度(740, 760, 780 °C)下固溶 2 h 后,初生 α 相逐渐溶解,而 β 相生长并均匀分布在基体中。水淬后, β 相的生长受到抑制, β 晶粒内析出针状的斜方马氏体 α'' 相,导致抗拉强度下降,伸长率显著提高。在不同时效温度(500, 520, 540 °C)下保温 8 h, α'' 相不断生长,逐渐转变为等轴晶粒,力学性能显著提高。在 780 °C/2 h WC+520 °C/8 h AC 条件下获得最佳的组织和力学性能,抗拉强度为 1119 MPa,伸长率为 7.36%。

关键词:脉冲 TIG; 增材制造; TB6 钛合金; 显微组织; 力学性能; 热处理

doi: 10.11868/j.issn.1001-4381.2023.000486

中图分类号: TG444; TB31 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2024)11-0133-08

Abstract: The defects on TB6 titanium alloy were repaired using pulsed TIG (tungsten inert gas) additive manufacturing technology, and the effects of process parameters (pulse current and pulse time) and heat treatment on the microstructure and mechanical properties of the repaired TB6 titanium alloy were studied to determine the optimal heat treatment process parameters. The results show that the mechanical properties are relatively better in the as-repaired state when the pulse current is 50 A and the pulse time is 40 ms, with a tensile strength of 1113 MPa and an elongation of 5.26%. These samples are sequentially subjected to solid solution and aging heat treatment. When the samples are solid solution treated for 2 h under different temperatures (740, 760, 780 °C), the primary α phase is increasingly dissolved, while the β phase gradually grows and evenly distributes in the matrix. After water quenching, the growth of the β phase is inhibited, and acicular rhombic martensite α'' phase is precipitated in β grains, resulting in a

decrease in tensile strength and a remarkable increase in elongation. Under different aging temperatures (500, 520, 540 °C) for 8 h, the α'' phase continuously grows and gradually transforms to equiaxial grain, and the mechanical properties are greatly improved. The optimal microstructure and mechanical properties are achieved under the conditions of 780 °C/2 h WC+520 °C/8 h AC, with a tensile strength of 1119 MPa and an elongation of 7.36%.

Key words: pulsed TIG; additive manufacturing; TB6 titanium alloy; microstructure; mechanical property; heat treatment

TB6 钛合金 (Ti-10V-2Fe-3Al) 是典型的近 β 型钛合金, 相变温度为 790 ± 5 °C^[1]。Al 为 α 相稳定元素, V 和 Fe 为 β 相稳定元素, 它们降低了 β 相转变温度。TB6 钛合金既具有亚稳态 β 钛合金的优点, 又具有 ($\alpha + \beta$) 钛合金的优点, 如比强度高、断裂韧度好、各向异性小、锻造温度低、抗腐蚀能力强和蠕变性能优异等^[2], 可满足损伤容限设计的需要和高可靠性及低成本制造的要求。连续 TIG (tungsten inert gas)、MIG (metal inert-gas welding)、激光和电子束等方法修复 TB6 钛合金时, 存在热影响区大、易产生气孔和裂纹等缺陷, 难以对复杂结构件进行修复, 另外还存在修复效率低、设备昂贵和运行成本高等问题^[3]。而脉冲 TIG 增材修复方法可以适应各种复杂结构件的修复需求, 提高修复的效率和可靠性, 被广泛应用于航空产业之中, 能够对横梁、涡轮盘和机身的起落架结构和接头、直升机桨毂等处产生的损伤缺陷进行高质量修复^[4-5]。脉冲 TIG 修复是利用可控的脉冲电流和脉冲时间对工件进行加热, 从而精确地控制热输入和熔池尺寸, 使熔深均匀。熔池金属在高温停留时间短, 金属冷凝速度快, 可减少热敏感材料产生裂纹的倾向, 有利于消除气孔和改善焊缝接头的力学性能, 从而获得细晶粒的显微组织。脉冲 TIG 增材修复对焊件热输入少、电弧能量集中且挺度高, 减少了修复工件内部的残余应力, 有利于薄板和超薄板焊接, 同时具有材料利用率高、成形效果好等优势^[6]。Zhu 等^[7]研究了激光增材修复 TB6 钛合金的凝固行为和晶粒

形貌, 激光增材为非平衡凝固过程, 容易形成粗大 β 柱状晶粒, 产生组织应力及热应力, 出现变形和开裂等现象。马振书等^[8]研究了脉冲频率和热输入对电弧增材制造 TC4 钛合金形貌和组织的影响。结果表明, 随着脉冲频率的增加, 粗大的 β 柱状晶细化为等轴晶, 增加热输入有利于形成等轴晶, 提高合金的力学性能。所以相比于其他修复方法, 采用脉冲 TIG 对钛合金进行增材修复, 能够有效克服焊接修复时的热积累效应, 而且还能细化晶粒, 提高修复区的力学性能^[9-10]。本工作通过大量实验, 探究不同脉冲电流和脉冲时间对 TIG 增材修复 TB6 钛合金的微观组织和力学性能的影响, 得出最优工艺参数。在获得最佳修复参数的基础上, 对修复后的 TB6 样品进行热处理, 探究不同温度对修复样品组织和力学性能的影响。

1 实验材料与方法

TB6 钛合金基板 (Ti-10V-2Fe-3Al) 尺寸为 120 mm × 25 mm × 25 mm, 化学成分如表 1 所示。焊丝为尺寸 1.2 mm 的 TB6 钛合金焊丝, 采用线切割的方式对 TB6 钛合金基板母材进行缺口制备, V 型缺口的深度为 1 mm。选择 V 型缺口主要用于模拟 TB6 钛合金的典型缺陷类型——划伤缺陷^[11]。不同工艺参数修复前后 TB6 钛合金宏观形貌如图 1 所示, 焊接修复参数如表 2 所示。

表 1 TB6 钛合金的化学成分 (质量分数/%)

Table 1 Chemical compositions of TB6 titanium alloy (mass fraction/%)

Al	V	Fe	C	N	H	Y	O	Ti
2.6-3.4	9.0-11.0	1.6-2.2	≤0.05	≤0.05	≤0.015	≤0.005	≤0.13	Balance

在保持焊接修复参数不变的情况下, 通过组合不同脉冲电流 (30, 40, 50 A) 和脉冲时间 (30, 40, 50 ms) 来修复 V 型缺口样品, 探究其最优的力学性能, 得出最佳的工艺参数, 然后再将最佳工艺参数修复后的样品放入马弗炉中进行热处理实验, 以 5 °C/min 的升温速度分别加热到 740, 760, 780 °C 固溶处理温度, 保温

2 h, 随后水冷 (water cooling, WC) 至室温; 选取力学性能最佳的固溶处理样品, 在时效温度分别为 500, 520, 540 °C 下进行 8 h 保温热处理, 随后空冷 (air cooling, AC) 至室温。具体热处理过程如图 2 所示。

利用 XQ-2B 金相样品镶嵌机进行镶嵌, 制备圆柱形磨抛样, 经粗磨、细磨后抛光, 样品所用的腐蚀液为

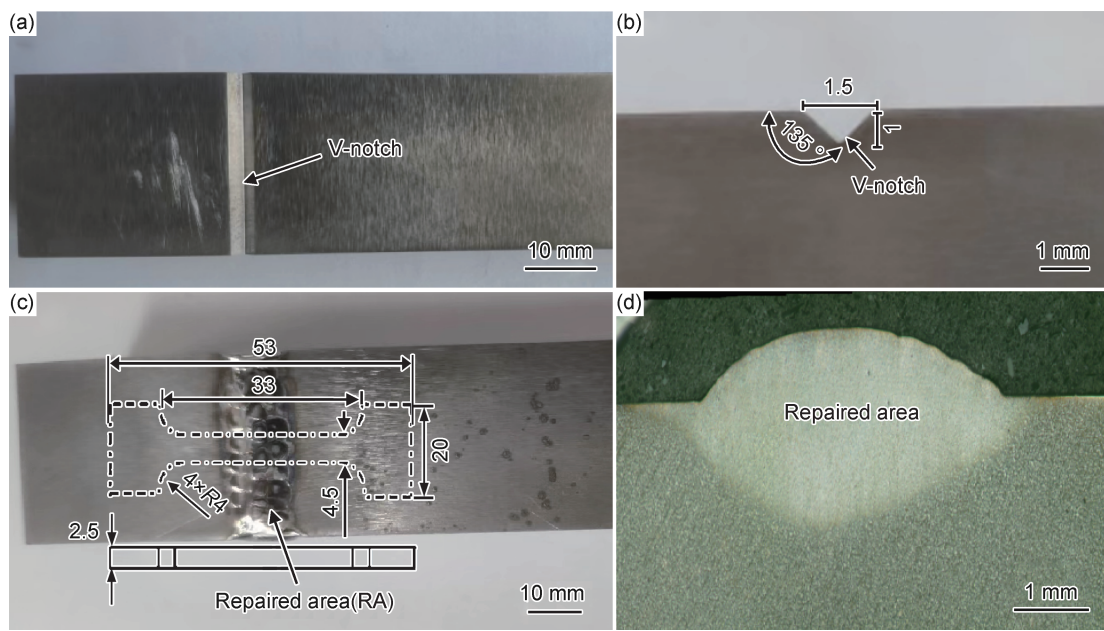


图1 TB6钛合金修复前后宏观形貌
(a)修复前V型缺口俯视图;(b)修复前V形缺口的侧视图和尺寸;(c)修复后样品俯视图及拉伸样品位置和尺寸;(d)修复区横截面形貌

Fig. 1 Macro morphologies of TB6 titanium alloys before and after repaired

(a)top view of V-notch before repair;(b)side view of V-notch and dimensions before repair;(c)top view of repaired sample, location and dimensions of tensile sample;(d)cross-sectional morphology of repaired area

表 2 焊接修复参数

Table 2 Welding repaired parameters

Tungsten needle diameter/mm	Wire diameter/mm	Nozzle diameter/mm	Tungsten electrode extension length/mm	Distance from nozzle to workpiece/mm	Argon gas flow rate/(L·min ⁻¹)
2	1.2	10	4-8	12	5-8

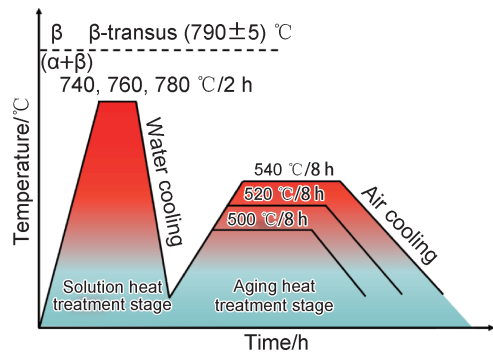


图2 TB6钛合金热处理过程示意图
Fig. 2 Schematic diagram of heat treatment process for TB6 titanium alloy

HF:HNO₃:H₂O=1:3:20(体积比)的Kroll试剂,腐蚀时间为10~12 s。采用光学显微镜(OM)、FEI Nova Nano SEM450 扫描电子显微镜(SEM)及X射线衍射仪(XRD)对TB6钛合金修复区进行显微组织观察和相的分析。脉冲TIG修复TB6钛合金的室温拉伸样品根据GB/T 228—2002制备。拉伸性能测试在电液伺服疲劳试验机(8801)上进行,拉伸速率

为0.5 mm/min,每组参数的拉伸性能实验重复3次,综合抗拉强度和伸长率较优的一组来进行不同参数的对比。

2 结果与分析

2.1 不同工艺参数对修复TB6钛合金组织和性能的影响

母材(base material, BM)和不同工艺参数修复TB6钛合金的拉伸曲线和力学性能如图3和表3所示,其中抗拉强度和伸长率的乘积(product of tensile strength and elongation, PSE)反映了工程应用中合金强度和塑性之间的平衡。从表3可以看出,不同工艺参数修复后TB6钛合金的抗拉强度和伸长率存在明显差异。图4为不同脉冲时间和脉冲电流下TB6钛合金修复区的显微组织。可以看出,组织都是由等轴α相和残留β相组成,不同工艺参数下等轴α相的含量和尺寸各有差异。α相在β钛合金中的变形行为及其对力学性能的影响很大程度上取决于α相的含量和尺

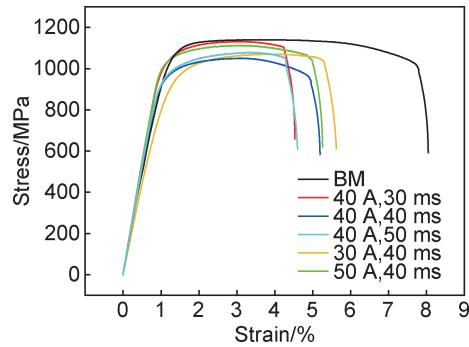


图3 母材和不同工艺参数修复TB6钛合金的拉伸曲线

Fig. 3 Tensile curves of base material and TB6 titanium alloy repaired with different process parameters

寸,等轴 α 相的含量和合金的抗拉强度成正比^[12]。晶粒尺寸及其均匀性对TB6钛合金的伸长率有较大的影响。晶粒尺寸越小,金属越有利于变形,伸长率越大。较大的晶粒往往具有较低抵抗变形的能力,容易在拉伸过程中成为应力集中点,导致材料在达到较低应变

表3 母材和不同工艺参数修复TB6钛合金的力学性能

Table 3 Mechanical properties of base materials and TB6 titanium alloy repaired with different process parameters

Sample	Pulse current/A	Pulse time/ms	Tensile strength/MPa	Elongation/%	PSE/(GPa%)
BM	—	—	1140	8.00	9.12
Repaired	40	30	1132	4.40	4.98
TB6	40	40	1050	5.19	5.45
	40	50	1079	4.60	4.96
	30	40	1060	5.45	5.77
	50	40	1113	5.26	5.85

时发生断裂。这种断裂通常发生在晶粒最大的位置,因为大晶粒的边界相对较少,变形协调能力较差。所以在不考虑其他因素的情况下,一般在混晶现象(即晶粒大小差异显著)较为严重的晶粒最大位置处出现金属的断裂^[13]。

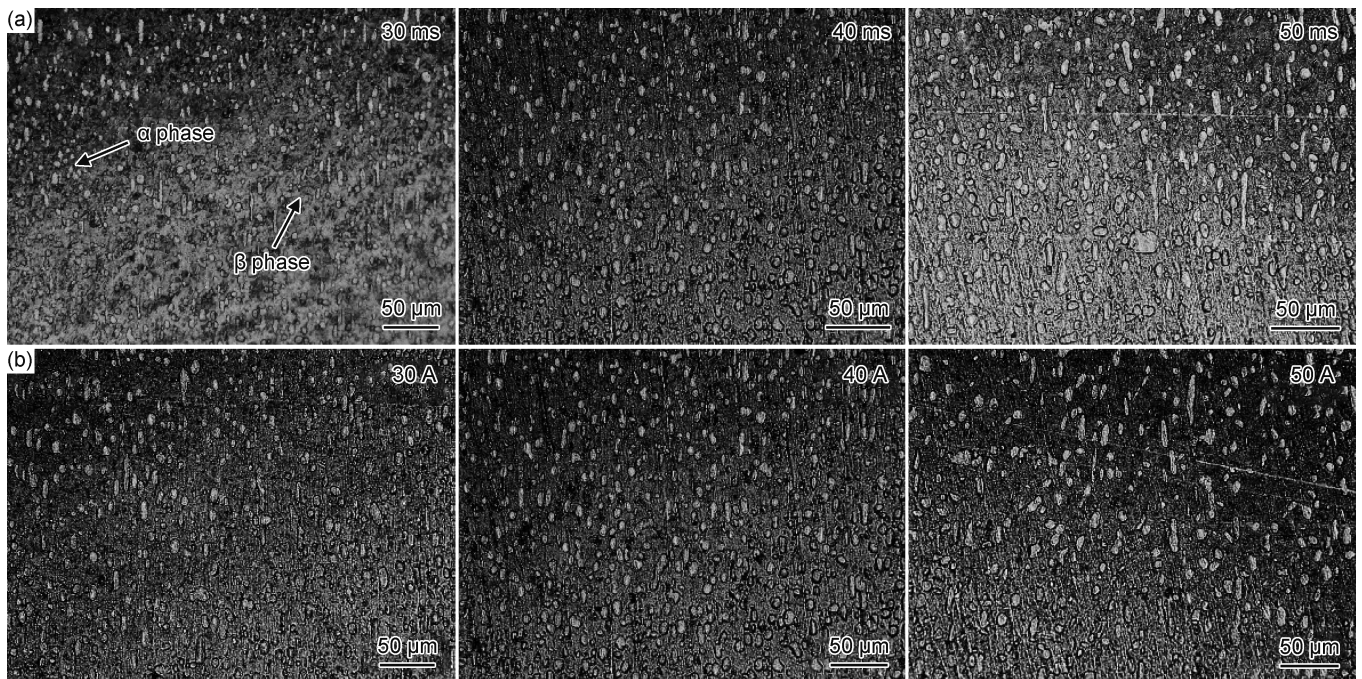


图4 不同脉冲时间(a)和脉冲电流(b)下TB6钛合金修复区显微组织

Fig. 4 Microstructures of TB6 titanium alloy repaired area under different pulse time(a) and pulse currents(b)

通过 image-Pro Plus 软件测量了不同工艺参数下等轴 α 相的含量。当脉冲电流为40 A,脉冲时间分别为30,40,50 ms时,等轴 α 相含量分别为12.44%(体积分数,下同),11.56%,14.61%;当脉冲时间为40 ms,脉冲电流分别为30,50 A时,等轴 α 相含量分别为16.78%,16.32%。不同工艺参数修复TB6钛合金的抗拉强度都是先减小后逐渐增大,表明等轴 α 相的比例越高,对应的抗拉强度越大。当脉冲时间为30 ms

时, α 晶粒细小,呈球状。当脉冲时间逐渐增加至40 ms时,输入的热量增加, α 晶粒逐渐生长,变得更加等轴,并均匀地分布在 β 基体上,这有利于提高金属的塑性。当脉冲时间增大到50 ms时,持续的热输入使等轴 α 晶粒被拉长,不利于金属变形,伸长率逐渐降低;当脉冲时间由30 ms逐渐增大到40 ms时,样品的伸长率逐渐增加。说明在适宜的温度范围内,等轴 α 晶粒在 β 基体上均匀形核,样品的塑性增强。当脉冲

时间为 50 ms 时,热输入过大,超过等轴 α 晶粒均匀形核的适宜温度, α 晶粒被拉长,伸长率降低,塑性较差^[14]。综合分析,脉冲电流为 50 A 且脉冲时间为 40 ms 时,修复区的热输入处于等轴 α 晶粒均匀形核的适宜温度范围内,此时增材修复的 TB6 钛合金具有较高的抗拉强度(1113 MPa)和伸长率(5.26%),PSE 为 5.85 GPa%,TB6 钛合金的综合性能最好。

母材和不同工艺参数修复 TB6 钛合金修复区的 XRD 分析,如图 5 所示。衍射角与标准 PDF 卡片 α (PDF 00-044-1294), β (PDF 00-009-0098)相对应,可以看出,所有样品都是由 α 相和 β 相组成,并且相的含量随不同工艺参数的变化而变化。检测到的布拉格峰晶体结构为 hcp(密排六方结构) α -Ti 和 bcc(体心立方结构) β -Ti,其中 β -Ti 相以(110)峰为主, α -Ti 相以(101)峰为主。

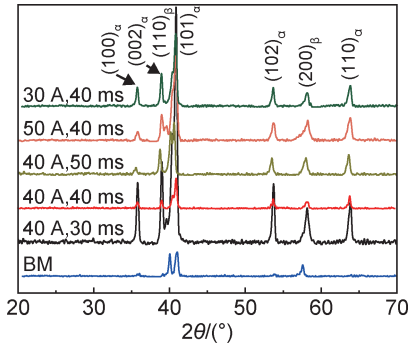


图5 母材和不同工艺参数修复 TB6 钛合金修复区的 XRD 谱图
Fig. 5 XRD patterns of base material and repaired area of TB6 titanium alloy with different process parameters

2.2 热处理对修复 TB6 钛合金组织和性能的影响

在脉冲电流为 50 A,脉冲时间为 40 ms 时,增材修复 TB6 钛合金的力学性能优良。为了继续提升修复样品的力学性能,对该参数修复下的 TB6 样品进行不同温度的热处理,得出最优的热处理工艺参数。最佳工艺参数修复 TB6 钛合金在不同温度热处理后的拉伸曲线和力学性能如图 6 和表 4 所示。不同固溶温度(740,760,780 ℃)下样品的力学性能与 50 A,40 ms 修复后的进行对比,可以看出,抗拉强度整体降低,伸长率显著提高。图 7 为不同热处理工艺 TB6 钛合金修复区的显微组织。可知,主要为 α + β 双相组织,在固溶温度为 740 ℃时, β 基体上分布着大量未转变的初生 α 相, β 晶粒内有少量的斜方马氏体 α'' 相^[15]。在 760 ℃时, β 基体上仍然分布着较多未转变的等轴初生 α 相, β 晶粒内析出的斜方马氏体 α'' 的尺寸也较为细小,不容易塑性变形,伸长率提高。当固溶温度升高到 780 ℃时(接近 β 相变温度),初生 α 相几乎全部溶解, β 相的

含量达到最大值。在高温后淬火,快速的冷却使得 β 晶粒内产生斜方马氏体 α'' 相,其晶粒尺寸较小,呈小球状,有利于金属塑性变形,塑性较高^[16]。

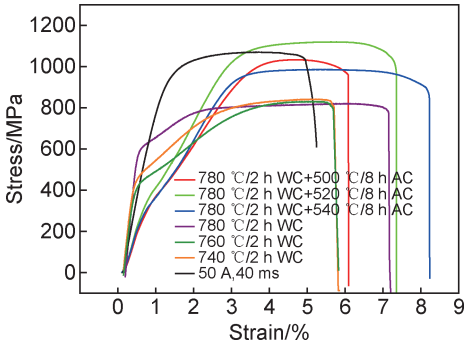


图6 最佳工艺参数修复 TB6 钛合金在
不同温度热处理后的拉伸曲线

Fig. 6 Tensile curves of TB6 titanium alloy repaired with optimal process parameters after heat treatment at different temperatures

表 4 最佳工艺参数修复 TB6 钛合金在
不同温度热处理后的力学性能

Table 4 Mechanical properties of TB6 titanium alloy repaired with optimal process parameters after heat treatment at different temperatures

Heat treatment process parameter	Tensile strength/MPa	Elongation/%	PSE/(GPa%)
50 A, 40 ms	1125	5.45	6.13
740 ℃/2 h WC	832	5.86	4.87
760 ℃/2 h WC	830	5.85	4.85
780 ℃/2 h WC	809	7.20	5.82
780 ℃/2 h WC+500 ℃/8 h AC	1033	6.10	6.30
780 ℃/2 h WC+520 ℃/8 h AC	1119	7.36	8.23
780 ℃/2 h WC+540 ℃/8 h AC	989	8.17	8.08

时效工艺能够显著影响 TB6 钛合金析出相的种类、形貌、尺寸及分布,并最终引起 TB6 钛合金性能的变化^[17]。图 7(d)~(f)为不同时效温度处理后的显微组织。时效热处理能够使亚稳态的 β 晶粒析出较多细密、任意方向的针状 α'' 相。时效温度上升,针状 α'' 相逐渐生长,呈等轴状,且分布也更加均匀,使得 TB6 钛合金的塑性提升。 β 型钛合金时效后的显微组织中, α'' 相的形态和体积分数决定了材料的强度水平,其中,弥散析出的 α'' 相是 TB6 钛合金强化的主要机制^[18]。在时效过程中 α'' 相会不断析出,导致 α/β 相界面的增多,阻碍晶界之间的位错运动,从而提高合金的抗拉强度。当时效温度为 520 ℃时, ω 过渡相首先会在 β 基体上析出,为 α'' 相的析出提供均匀形核的位置,加快 α'' 相的析出速度^[19],最终获得均匀、细小的 α'' 和 β 相,

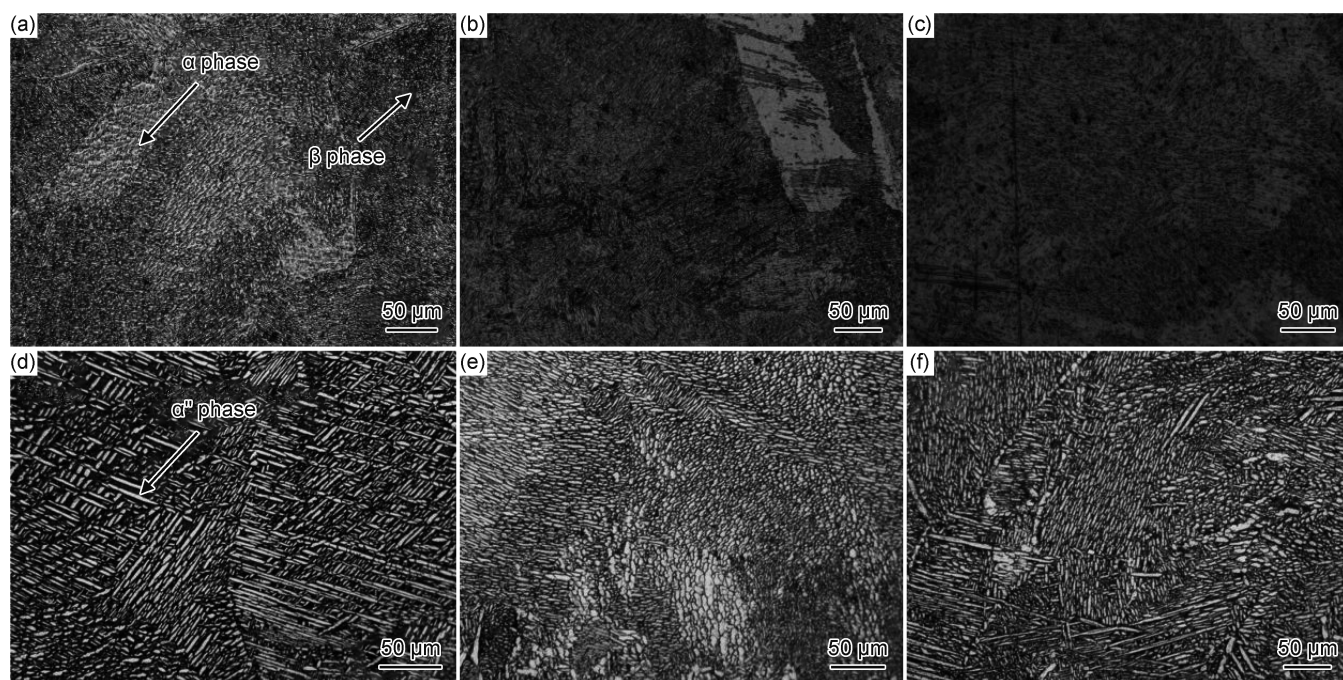


图7 固溶+不同时效温度处理TB6钛合金修复区的显微组织

(a) 740 °C/2 h WC; (b) 760 °C/2 h WC; (c) 780 °C/2 h WC; (d) 780 °C/2 h WC+500 °C/8 h AC;
(e) 780 °C/2 h WC+520 °C/8 h AC; (f) 780 °C/2 h WC+540 °C/8 h AC

Fig. 7 Microstructures of TB6 titanium alloy repaired area treated with solid solution and different aging temperatures

(a) 740 °C/2 h WC; (b) 760 °C/2 h WC; (c) 780 °C/2 h WC; (d) 780 °C/2 h WC+500 °C/8 h AC;
(e) 780 °C/2 h WC+520 °C/8 h AC; (f) 780 °C/2 h WC+540 °C/8 h AC

在 β 基体上形成弥散强化,使得材料的抗拉强度有较高的提升。当时效温度逐渐增加至540 °C时, α'' 相逐渐长大,晶粒尺寸增加,间距增大,材料的抗拉强度开始降低。从实验结果可以看出,在780 °C/2 h WC+520 °C/8 h AC时,其抗拉强度为1119 MPa,伸长率为7.36%,PSE为8.23 GPa%,此时TB6钛合金的力学性能较优,明显优于钛合金板国家标准(GB/T 3621—2022)中TB6的抗拉强度要求(≥ 1000 MPa)和伸长率要求($\geq 6\%$)。

图8为母材和不同温度热处理TB6钛合金修复区

的XRD谱图。可以看出,母材只含有 α 相和 β 相,热处理后主要的相为初生 α 相、斜方马氏体 α'' 相、亚稳态 β 相。随着固溶温度的不断升高,初生 α 相的峰值高度明显降低,说明在 β 相变点(M_s 为 (790 ± 5) °C)以下进行固溶热处理时,初生 α 相不断溶解,含量逐渐降低。固溶热处理使 β 相不断生长,水冷后 β 相的生长受到抑制,在较短的时间内 β 相中会析出细小的斜方马氏体 α'' 相。在不同温度时效处理过程中,细小的斜方马氏体 α'' 晶粒随着时效温度升高而不断长大并逐渐等轴化,在力学性能上表现为良好的抗拉强度和塑性^[20]。

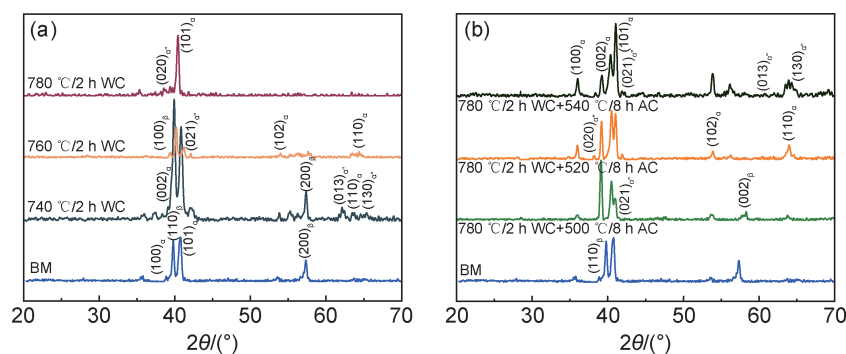


图8 母材和不同热处理TB6钛合金修复区的XRD谱图

(a)固溶热处理;(b)固溶+时效热处理

Fig. 8 XRD patterns of base material and repaired area of different heat-treated TB6 titanium alloys

(a)solution heat treatment;(b)solution+aging heat treatment

图 9 为 780 °C/2 h WC+520 °C/8 h AC 时 TB6 钛合金修复区的 SEM 图和 EDS 谱图。由图 9(a) 可以看出,显微组织主要由等轴 α'' 相和残余 β 相构成。固溶温度为 780 °C 时,由于此温度接近 β 相变点温度,初生 α 相几乎全部溶解,固溶后水淬,在 β 基体上开始析出细小的 α'' 相。时效处理能够使 α'' 相的形貌、尺寸及分布发生较大的改变,从而使钛合金的力学性能发生变化。时效温度增加, α'' 晶粒尺寸增大,等轴化程度增加,时效后组织中的亚稳相发生分解,析出细小的 α'' 相。时效温度 520 °C 保温 8 h 时, α'' 均匀分布在 β 基体

上, α'' 相含量达到最大值,此时合金有很好的抗拉强度和塑性。当时效温度继续上升, α'' 晶粒开始融合,尺寸逐渐增大,从而使晶界的数目减少,降低了合金的抗拉强度和塑性^[21]。图 9(b),(c) 为点 1,2 不同位置 EDS 谱图。可以看出, α'' 相和 β 相中各元素的含量相差不大。Al 元素在 α'' 相中的含量明显比 β 相高,可有效提高 β 相转变温度,有显著的固溶强化作用^[22],使 TB6 钛合金的强度提高。V 和 Fe 元素为 β 稳定元素,在 β 相中的含量明显比 α'' 相中多,扩大 β 相区,增大 β 相的稳定性,提高 TB6 钛合金的力学性能。

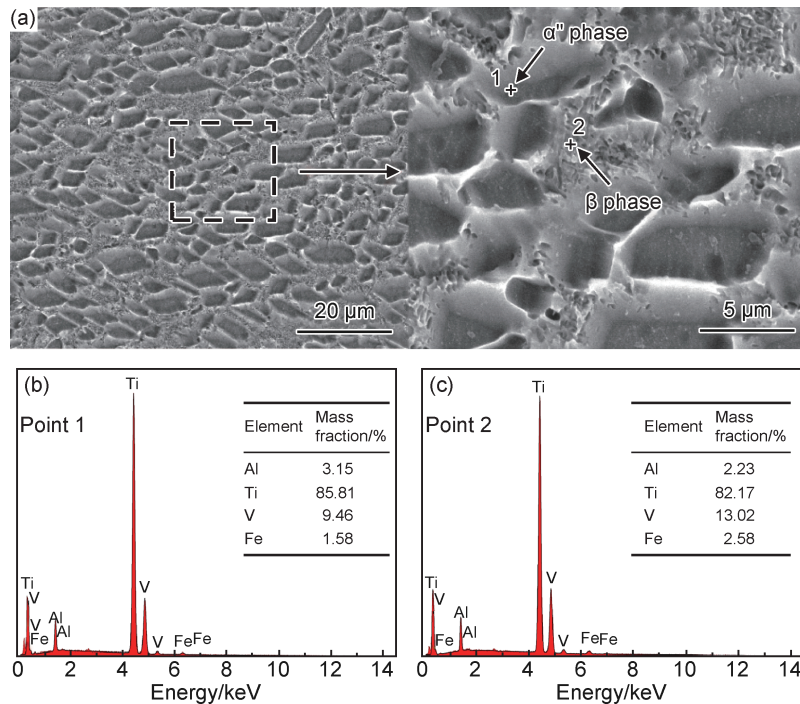


图 9 780 °C/2 h WC+520 °C/8 h AC 时 TB6 钛合金修复区 SEM 图(a)及点 1(b)和点 2(c)EDS 谱图

Fig. 9 SEM images of repaired area of TB6 titanium alloy at 780 °C/2 h WC+520 °C/8 h AC(a), EDS spectra of point 1(b) and point 2(c)

3 结论

(1) 脉冲电流为 50 A, 脉冲时间 40 ms 时, 脉冲 TIG 增材修复 TB6 钛合金的力学性能较好, 抗拉强度为 1113 MPa, 伸长率为 5.26%。在 β 相变点以下进行固溶处理, 合金的抗拉强度明显降低, 伸长率有较大提升。在经过时效处理后, 合金的抗拉强度和伸长率提高。在 780 °C/2 h WC+520 °C/8 h AC 时, 合金的综合力学性能较优, 抗拉强度为 1119 MPa, 伸长率为 7.36%。

(2) 在不同工艺参数下, 修复区的显微组织都为 $\alpha + \beta$ 双相组织, 其力学性能相差不大; 在不同温度 (740, 760, 780 °C) 下固溶 2 h 后, 初生 α 相逐渐溶解, 而 β 相逐渐生长并均匀分布在基体中。水淬后, β 相的生

长受到抑制, β 晶粒内析出针状的斜方马氏体 α'' 相, 导致抗拉强度下降, 伸长率显著提高。在不同时效温度 (500, 520, 540 °C) 下保温 8 h, 细小的斜方马氏体 α'' 晶粒随着时效温度升高而不断长大, 逐渐等轴化。时效温度为 520 °C 时, α'' 等轴化程度最高, 在力学性能上表现为良好的抗拉强度和较好的塑性。

(3) 等轴 α 相的含量和尺寸会显著影响合金的抗拉强度和伸长率。等轴 α 相的含量越高, 合金的抗拉强度越大, α 晶粒的等轴化程度越高; 尺寸越小, 样品的伸长率越大。

参考文献

- [1] 马超, 王高潮. TB6 钛合金定 m 值法高温超塑性拉伸试验研究 [J]. 锻压技术, 2016, 41(10): 88-91.

- MA C, WANG G C. Study on high temperature superplastic tensile test of TB6 titanium alloy with constant m value method[J]. Forging Technology, 2016, 41(10): 88-91.
- [2] YI X B, ZHANG J X, LI B D, et al. Dynamic compressive mechanical properties of TB6 titanium alloy under high temperature and high strain rate[J]. Rare Metals, 2019, 48(4): 1220-1224.
- [3] 张志毅,王群,张晓东. 钛合金修复技术的研究与应用[J]. 航空制造技术, 2018(7): 64-68.
- ZHANG Z Y, WANG Q, ZHANG X D. Research and application of repair technology for titanium alloy[J]. Aviation Manufacturing, 2018(7): 64-68.
- [4] 周培山,唐珩崧,李国超,等. TIG 焊工艺发展研究[J]. 焊接技术, 2023, 52(3): 14-19.
- ZHOU P S, TANG H W, LI G C, et al. Research on the development of TIG welding process[J]. Welding Technology, 2023, 52(3): 14-19.
- [5] ZHOU S, ZHANG X Y, LI H, et al. Fatigue performance research and strength evaluation of TB6 titanium alloy with defects[J]. Hot Work Technology, 2021, 50(12): 39-43.
- [6] 郭靖. TA2 钛管钨极氩弧焊焊接工艺及可靠性研究[D]. 天津: 天津大学, 2012.
- GUO J. Study on tungsten arc welding process and reliability of TA2 titanium tube[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012.
- [7] ZHU Y Y, TANG H B, LI Z, et al. Solidification behavior and grain morphology of laser additive manufacturing titanium alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 777: 712-716.
- [8] 马振书,陈广森,吴倩茹,等. 脉冲频率和热输入对电弧增材制造 TC4 钛合金形貌和组织的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2018, 47(7): 2144-2150.
- MA Z S, CHEN G S, WU Q R, et al. Effects of pulse frequency and heat input on the morphology and microstructure of arc additive manufacturing TC4 titanium alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2018, 47(7): 2144-2150.
- [9] 邱葭菲,汤国乐,王瑞权,等. 钛 TIG 焊焊接工艺研究[J]. 焊接技术, 2014, 43(11): 84-86.
- QIU J F, TANG G L, WANG R Q, et al. Study on TIG welding technology of titanium[J]. Welding Technology, 2014, 43(11): 84-86.
- [10] 刘昌奎,刘华. TA15 钛合金焊接接头性能与断裂行为研究[J]. 失效分析与预防, 2006(2): 45-48.
- LIU C K, LIU H. Study on performance and fracture behavior of welded joint of TA15 titanium alloy[J]. Failure Analysis and Prevention, 2006(2): 45-48.
- [11] 刘晓丰,田雅馨,邹静,等. 直升机关键金属 TB6 钛合金的划伤、冲击缺陷容限性能[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(29): 349-355.
- LIU X F, TIAN Y X, ZOU J, et al. Tolerance of helicopter key metal TB6 titanium alloy to scratch and impact defects[J]. Science and Technology and Engineering, 2019, 19(29): 349-355.
- [12] SADEGHPOUR S, ABBASI S M, MORAKABATI M, et al. Correlation between alpha phase morphology and tensile properties of a new beta titanium alloy[J]. Materials & Design, 2017, 121: 24-35.
- [13] 史蒲英,刘向宏,李建伟,等. β 斑对 TB6 钛合金性能及拉伸变形行为的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2023, 52(5): 1925-1931.
- SHI P Y, LIU X H, LI J W, et al. Effect of β spot on the properties and tensile deformation behavior of TB6 titanium alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2023, 52(5): 1925-1931.
- [14] 叶萃. TB6 钛合金室温塑性机制研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2015.
- YE C. Study on the room temperature plasticity mechanism of TB6 titanium alloy[D]. Guiyang: Guizhou University, 2015.
- [15] 沙爱学,王庆如,李兴无. 航空用高强度结构钛合金的研究及应用[J]. 稀有金属, 2004, 28(1): 239-242.
- SHA A X, WANG Q R, LI X W. Research and application of high-strength structural titanium alloys for aviation[J]. Rare Metals, 2004, 28(1): 239-242.
- [16] 李聪. 钛合金应力诱导马氏体相变影响因素及力学性能研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2013.
- LI C. Study on the influencing factors and mechanical properties of stress induced martensitic transformation of titanium alloy[D]. Changsha: Hunan University, 2013.
- [17] SHANG G Q, KOU H C, WANG X N, et al. Influence of aging processing on microstructure and mechanical properties of Ti-10V-2Fe-3Al alloy[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2010, 39(6): 1061-1065.
- [18] 刘娣,张利军,刘小花. 热处理工艺对 TB6 钛合金棒材微观组织和力学性能的影响[J]. 热加工工艺, 2022, 51(24): 116-118.
- LIU D, ZHANG L J, LIU X H. Effect of heat treatment process on the microstructure and mechanical properties of TB6 titanium alloy bar[J]. Hot Working Process, 2022, 51(24): 116-118.
- [19] 王晓燕,刘建荣,雷家峰,等. 初生及次生 α 相对 Ti-1023 合金拉伸性能和断裂韧性的影响[J]. 金属学报, 2007, 43(11): 1129-1137.
- WANG X Y, LIU J R, LEL J F, et al. Effect of primary and secondary α phase on tensile property and fracture toughness of Ti-1023 alloy[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2007, 43(11): 1129-1137.
- [20] 鹿超龙,杨文成,权国政,等. 固溶+时效处理对 TB6 钛合金组织的影响[J]. 热加工工艺, 2021, 50(14): 146-149.
- LU C L, YANG W C, QUAN G Z, et al. Effect of solution + aging treatment on the microstructure of TB6 titanium alloy[J]. Hot Working Process, 2021, 50(14): 146-149.
- [21] 高蕾,刘娟,宋琦,等. 固溶时效对 TB6 钛合金锻件组织和性能的影响[J]. 大型铸锻件, 2022, 205(1): 23-25.
- GAO L, LIU J, SONG Q, et al. Effect of solution and aging on the microstructure and properties of TB6 titanium alloy forgings[J]. Large Castings and Forgings, 2022, 205(1): 23-25.
- [22] 吴欢,赵永庆,葛鹏,等. β 稳定元素对钛合金 α 强化行为的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2012, 41(5): 805-810.
- WU H, ZHAO Y Q, GE P, et al. Effect of β stable elements on the α phase strengthening behavior of titanium alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2012, 41(5): 805-810.

基金项目: 国家自然科学基金(52205375); 江西省主要学科科学技术带头人培养计划(20204BCJ23003); 江西省重点研发计划基金(20202BBE52002); 江西省“双千计划”(jxsq2019201118)

收稿日期: 2023-07-25; 修订日期: 2024-01-02

通讯作者: 王德(1987—), 男, 副教授, 博士, 研究方向为先进制造技术, 联系地址: 江西省南昌市东湖区丰和南大道 696 号南昌航空大学航空制造工程学院(330063), E-mail: wangde@nchu.edu.cn

(本文责编: 王 晶)