

氩弧焊修复对激光增材制造 TC18 钛合金力学性能影响研究



王志刚¹, 朱小军¹, 刘栋²

1. 航空工业第一飞机设计研究院, 陕西 西安 710089

2. 北京航空航天大学, 北京 100191

摘 要: 本文对不同修复量激光增材制造 TC18 钛合金试件进行室温拉伸、冲击和断裂韧性的试验, 并与未包含修复区的激光增材制造基材母板、过渡区进行力学性能对比分析。研究表明, 随着氩弧焊对激光增材制造件修复量的增大, 室温拉伸强度无明显变化, 塑性略有降低; 修复件的室温断裂韧性 K_{IC} 平均值与基材相当, 裂纹预制在修复区和过渡区的断裂韧性平均值相当; 修复后塑性、疲劳寿命降低明显。氩弧焊修复激光增材制造工艺应在小修复量、低应力水平下限制使用。

关键词: 氩弧焊; 增材制造; 钛合金; 修复; 力学性能

中图分类号: TG444

文献标识码: A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2022.09.006

TC18 钛合金是一种 $\alpha+\beta$ 双相、高强高韧可焊型钛合金, 退火后的强度在 1080MPa 以上, 是目前退火状态下强度最高的钛合金^[1], 将此合金用于飞机的大型主承力结构来代替高强钢, 可使飞机减重 15%~20%。因此, 苏-27 飞机的主起落架扭力臂和前起落架左右支架、伊尔-76 的起落架和机身部件材料均使用 TC18 钛合金, 此外, 该合金还用于制造襟翼导轨和其他大型承力构件^[2]。

激光熔化沉积 (LMD) 制造技术是一种基于材料添加的快速凝固“近净成形”制造技术, 利用激光熔化沉积技术制造钛合金构件具有快速、无须模具、材料利用率高、机械加工量小等优点^[3], 为大型整体复杂钛合金构件的制造提供了一条成本低、周期短的新途径。

在激光增材制造构件工程制造和使用过程中, 可能遇到由变形、机械加工掉刀等造成的零件毛坯局部缺量或者产品使用过程中意外造成的局部损伤, 焊接作为一种成本低、工艺操作灵活的修复方法可实现零件的修复或再制造, TC18 钛合金可以用氩弧焊、电子束焊和等离子焊等多种方式进行焊接^[4]。目前, 对于传统成形钛合金的焊接特性研究已较为成熟, 如国内航空工业领域首次在某新型舰载机起落架研制中采用了 TC18 钛合金焊接技术, 通过试验研究某型机前起

落架斜撑杆的焊接和焊后热处理工艺, 形成了完整配套的 TC18 钛合金焊接应用技术^[5]; 电弧增材再制造技术是根据离散堆积原理, 利用电弧作为载能束, 使金属丝材加热熔化, 在由缺损数据模型生成的路径规划程序驱动下, 点一线一面一体累加成形, 使缺损零件恢复尺寸形貌和性能的先进制造技术^[6]。英国克兰菲尔德大学通过对不同 4043 铝合金焊丝电弧增材成形性的对比研究, 发现焊丝内、外部质量对成形性能有重要影响^[7], 法国学者 Branza 等^[8]采用电弧熔敷方法对耐热铸钢轴类零件进行多道焊修复, 并研究了其修补后的组织特点。现在国内外在多丝熔覆成形工艺研究领域都以双丝电弧熔覆成形技术为基础, 发展迅猛。如华中科技大学增材制造团队用多丝电弧增材方法制造出大型多向建筑结构接头与高强钢大型筒体构件, 达到较高的研究水平^[9], 而激光快速成形钛合金零件焊接及修复性能的相关研究还相对较少^[10], 国内如侯慧鹏等^[11]研究了氩弧焊修复激光成形 TC11 钛合金的组织及高周疲劳性能。

根据激光增材制造构件成形阶段的不同, 对构件的修复可分为热处理前修复和热处理后修复。热处理之后的修复, 由于修复区不再进行热处理, 因此修复区与基材材料热处理状态不同, 加之修复带来的热影响和热应力, 均可能导致其力

收稿日期: 2022-05-18; 退修日期: 2022-06-13; 录用日期: 2022-07-18

引用格式: Wang Zhigang, Zhu Xiaojun, Liu Dong. Effect of TIG Welding restorations on the mechanical properties of laser-formed TC18 Titanium Alloy[J]. Aeronautical Science & Technology, 2022, 33(09): 51-57. 王志刚, 朱小军, 刘栋. 氩弧焊修复对激光增材制造 TC18 钛合金力学性能影响研究[J]. 航空科学技术, 2022, 33(09): 51-57.

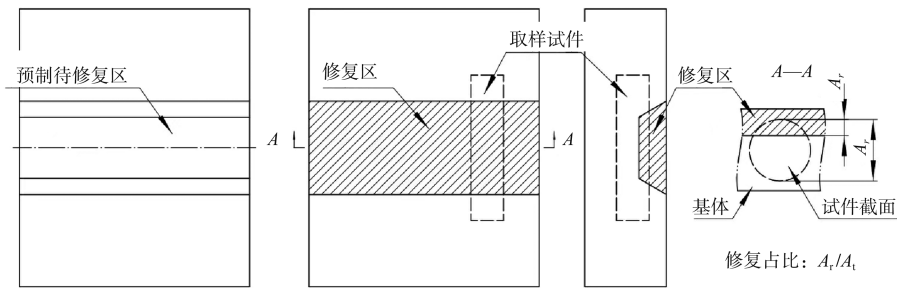


图1 激光增材制造试件修复区及取样示意图

Fig.1 Repair area and sampling diagram of laser-formed TC18 Titanium alloy test parts

学性能发生变化,理论上修复量受到限制,只能进行适量修复。热处理前修复则可保证修复区材料和热处理工艺与增材制造母材的一致性,适用于激光增材制造过程中的零件修复。

本文针对激光增材制造 TC18 钛合金零件制造过程中的制造缺陷,采用氩弧焊修复工艺,研究氩弧焊修复量对激光增材制造 TC18 钛合金组织和静力、冲击性能和断裂韧度等综合力学性能的影响,为氩弧焊修复激光增材制造 TC18 钛合金工程应用提供参考和依据。

1 试验材料与方法

本文主要研究 30% 和 50% 修复量对激光增材制造 TC18 钛合金主要力学性能的影响。其中,修复量指修复后采取的力学性能试件的工作部分截面修复区面积 A_r 和基体面积 A_t 之占比,如图 1 所示。力学性能测试包括室温拉伸性能、断裂韧度和轴向加载疲劳性能。激光增材制造基体为去应力退火态,待修复区表面按照激光成形基材工艺处理。修复前后试验件如图 2 所示。

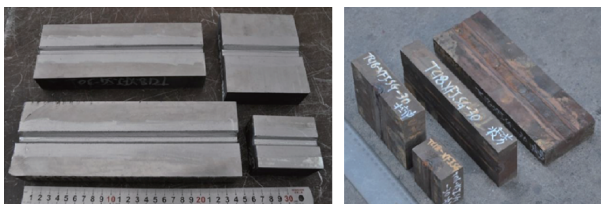


图2 激光增材制造 TC18 钛合金氩弧焊修复前后实物照片

Fig.2 Photos of laser-formed TC18 Titanium alloy test parts before and after TIG welding repairing

室温拉伸和室温冲击分别按照 GB/T 228.1 和 GB/T 229 进行,室温拉伸采用圆形棒状试件,室温冲击采用 U 形冲击样,试件取样部位如图 3 所示。室温断裂韧度按照国标 GB/T 4161 进行,试样分为两组,取样示意图如图 4 所示,一组预制裂纹在修复区(A组),另一组预制裂纹在修复区与基体的过

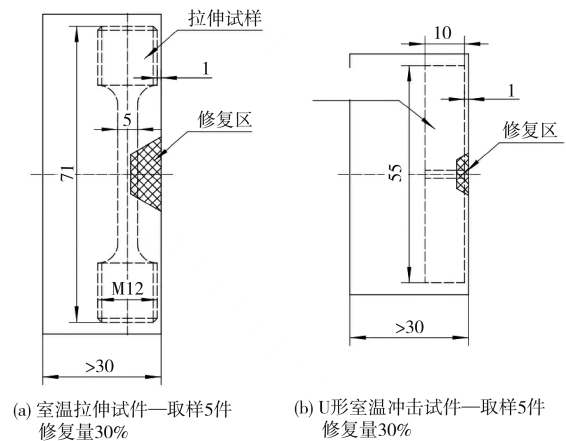


图3 室温拉伸、冲击取样示意图(单位:mm)

Fig.3 Diagram of room temperature tensile and impact sampling(Unit:mm)

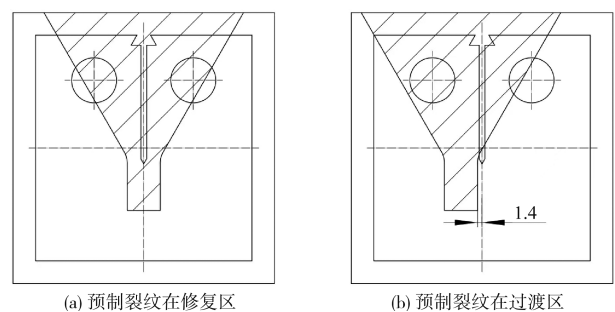


图4 室温断裂韧度试样取样示意图(单位:mm)

Fig.4 Diagram of specimen sampling for room temperature fracture toughness(Unit:mm)

渡区(B组),如图 5 所示,以考察修复不同区域的抵抗裂纹扩展的阻力。采用未经修复的激光增材制造 TC18 钛合金基材的试验件作为力学性能对比试验件。

2 试验结果与分析

2.1 宏、微观组织

激光成形 TC18 钛合金氩弧焊修复区截面宏观和显微

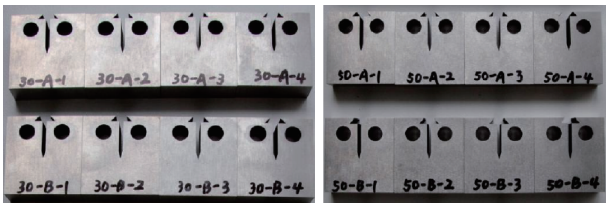


图5 激光增材制造钛合金断裂韧性试样

Fig.5 Fracture toughness samples of TC18 Titanium alloy test parts

组织照片分别如图6和图7所示,由此可见:(1)对比修复量为30%和50%,二者修复区深度与设计深度符合较好。二者组织特征并无明显差别,主要差别为修复区深度不同。(2)修复区组织中 β 晶粒较粗大、晶界 α 明显,并且修复区晶粒为垂直于基材沉积方向生长的较粗柱状晶,较激光成形TC18钛合金基材晶粒明显粗大。修复区向基材组织过渡的宏观组织照片如图6所示,修复区 β 晶粒较粗大,接近熔合区的下方为晶粒较细的热影响过渡区,最终过渡到晶粒尺寸较均匀的基材区;显微组织如图7所示,除过渡区 α 形状和尺寸不同以外,修复区与基材差别并不明显,其中修复区 α 相为短棒状,而基材和过渡区 α 相为松针状、长宽比更高。激光成形

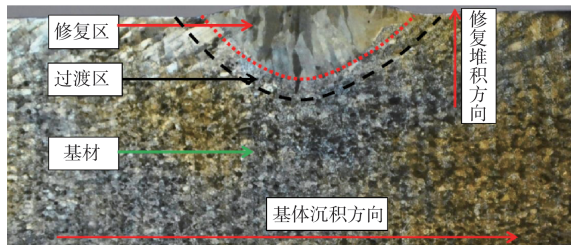


图6 激光成形TC18钛合金氩弧焊修复区截面宏观30%修复量组织照片

Fig.6 Macro tissue image of laser-formed TC18 Titanium alloy test piece by TIG welding 30% repaired

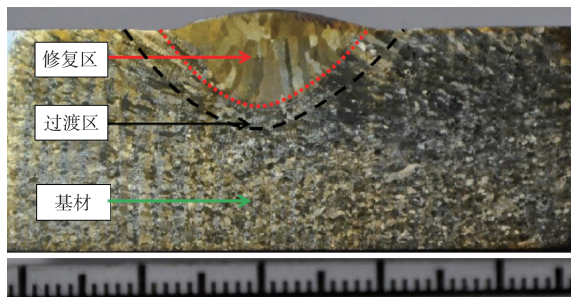


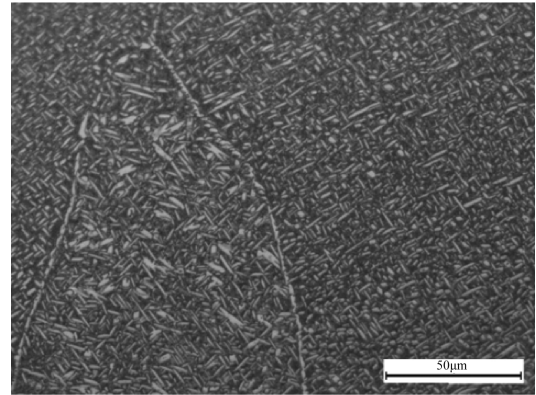
图7 激光成形TC18钛合金氩弧焊修复区截面宏观50%修复量组织照片

Fig.7 Macro tissue image of laser-formed TC18 Titanium alloy test piece by TIG welding 50% repaired

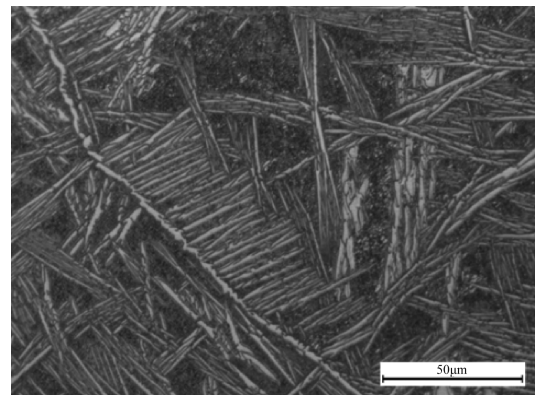
TC18钛合金氩弧焊修复光学显微镜和扫描电镜组织照片如图8、图9所示。

2.2 拉伸性能

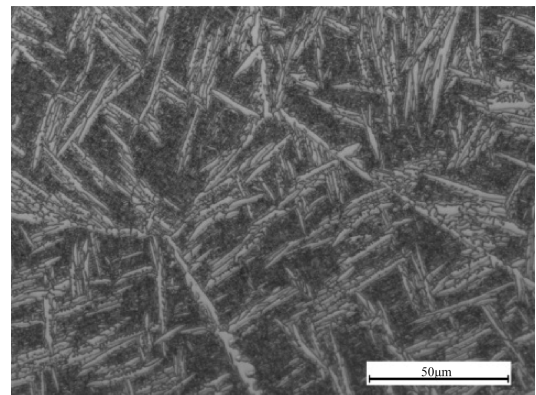
激光增材制造TC18钛合金氩弧焊修复件与锻件对比



(a) 修复区域



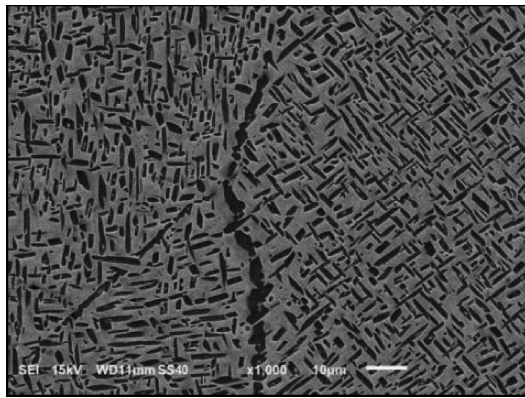
(b) 过渡区域



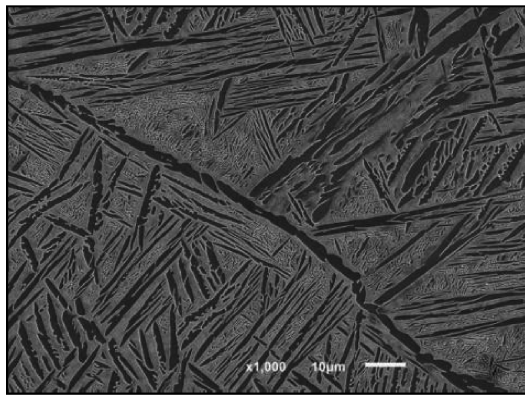
(c) 基材区域

图8 激光成形TC18钛合金氩弧焊修复光学显微镜照片 (修复量30%)

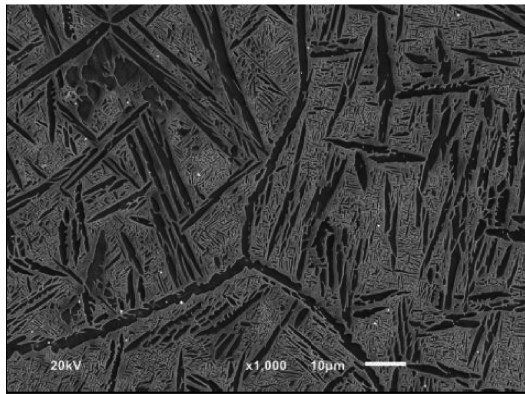
Fig.8 Optical microscope tissue image of laser-formed TC18 Titanium alloy test piece by TIG welding repairing (amount repaired is 30%)



(a) 修复区域



(b) 过渡区域



(c) 基材区域

图9 激光成形TC18钛合金氩弧焊修复扫描电镜组织照片(修复量为30%)

Fig.9 Canning electron microscope tissue image of laser-formed TC18 Titanium alloy test parts by TIG welding repairing (amount repaired is 30%)

件室温拉伸性能测试均值结果见表1,由表1可知:(1)与基材相比,激光增材制造TC18钛合金手工修复30%和50%时,室温抗拉强度几乎无变化(平均值差值不足10MPa),屈服强度略有提高(20~30MPa);塑性指标降低明显,断后延

表1 TC18钛合金氩弧焊修复拉伸性能测试(均值)

Table 1 Tensile performance test of TC18 Titanium alloy by TIG welding repairing(mean value)

修复量	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	$A/\%$	$Z/\%$
基材	1035	1035	9.8	15.6
30%	1095	1063	5.2	10.0
50%	1087	1057	4.5	9.0

伸率和断面收缩率分别降低47%~54%和36%~42%。(2)修复量从30%加大至50%时,室温拉伸强度无明显差别,修复区较基材塑性低,从而导致修复后塑性下降,随着修复量增大,塑性也呈现一定程度的下降。

激光增材制造TC18钛合金氩弧焊修复件室温拉伸试验件断口如图10所示。拉伸断口中修复区断面平整、无明显剪切唇,而基材区纤维区面积占比较大且存在明显塑性特征的剪切唇,因此相比于基材区,其断口呈现低塑性特征。结合拉伸试验测试结果表明:修复区较基材塑性低,从而导致修复后塑性下降,随着修复量增大,塑性也呈现一定程度的下降。

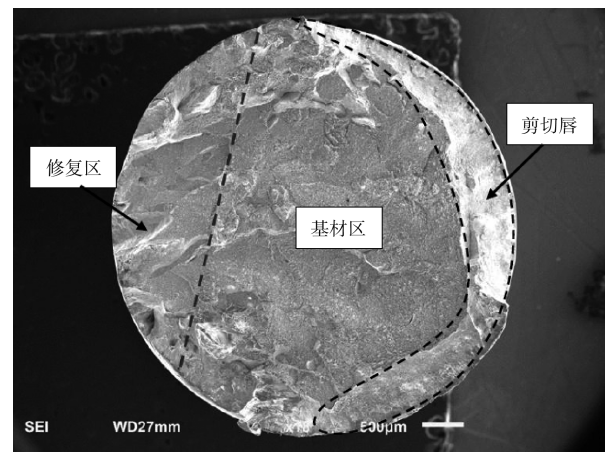


图10 激光增材制造TC18钛合金氩弧焊修复件室温拉伸试验件断口(修复量30%)

Fig.10 Fracture of room temperature tensile test piece of laser-formed TC18 Titanium alloy by TIG welding repairing (amount repaired is 30%)

2.3 室温冲击性能

激光成形TC18钛合金氩弧焊修复件及基材参比件室温冲击韧性对比测试结果见表2,可知:(1)与基材相比,激光成形TC18钛合金手工氩弧焊修复30%和50%时,修复试样室温冲击韧性无明显降低,其中50%修复后数据较分散,但平均值几乎无变化。(2)修复量从30%加大至50%时,

表2 手工氩弧焊修复量对激光成形 TC18 钛合金室温冲击韧性的影响

Table 2 Effect of repair quantity of TIG welding on impact toughness of TC18 Titanium alloy by laser forming at room temperature

修复量	$\alpha_{KU}/(J/cm^2)$					
	L1	L2	L3	L4	L5	平均
基材	30.00	28.13	33.13	23.50	25.63	28.1
30%	29.50	30.38	31.13	28.63	29.00	29.7
50%	33.50	23.63	30.88	22.50	—	27.6

室温冲击韧性略降,平均值降低约 7%。

激光成形 TC18 钛合金氩弧焊修复件室温冲击试验件断口如图 11 所示,冲击断口中修复区呈现沿柱晶解理特征,而基材区断面起伏较大,呈现韧性特征,与基材相比,修复区表现出低塑性特征。

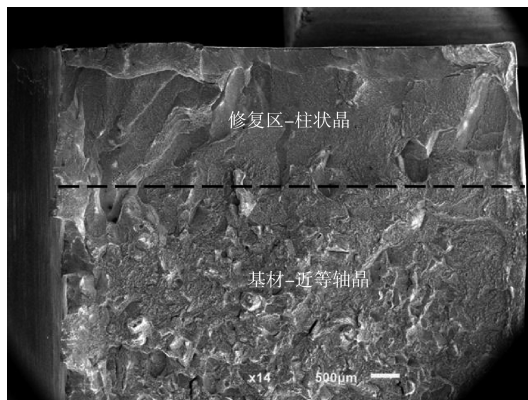


图 11 氩弧焊修复激光成形 TC18 钛合金室温冲击试验件断口(修复量 30%)

Fig.11 Fracture of room temperature shock test piece of laser-formed TC18 Titanium alloy by TIG welding repairing (amount repaired is 30%)

结合拉伸和冲击试验测试结果及断口特种可以推断:修复区较基材塑性低;由于冲击韧性还与强度相关,因此室温冲击韧性测试结果并未出现明显下降。

2.4 室温断裂韧性

激光增材制造 TC18 钛合金氩弧焊修复件及基材室温断裂韧性对比测试结果见表 3,可知:(1) 裂纹预制在修复区(A 组)和过渡区(B 组)的断裂韧性平均值相当;(2) 修复件的室温断裂韧性 K_{IC} 平均值与基材相当。从数据的分布范围来看,修复件 K_{IC} 数据分布范围略宽于基材。

图 12 为氩弧焊修复激光增材制造 TC18 钛合金室温断裂韧性试样宏观断口照片。从修复件的断口宏观照片可见

表3 TC18 钛合金氩弧焊修复室温断裂韧性性能测试结果对比表

Table 3 Comparison of test results of room temperature fracture toughness of TC18 Titanium alloy by TIG welding

修复量	预制裂纹位置	$K_{IC}/K_q/MPa^{1/2}$				
		试样 1	试样 2	试样 3	试样 4	平均值
30%	A 修复区	73.0	65.1	67.5	66.4	68.0
	B 过渡区	70.8	66.7	62.7	60.0	65.1
50%	A 修复区	70.7	55.6	66.6	63.2	64.0
	B 过渡区	60.5	65.5	68.9	78.6	64.7
基材	—	59.5	62.5	61.3	64.5	62.0

修复区内解理面呈柱状特征,而基材区 and 对比测试的基材试样无明显柱状解理特征。由此可见,晶粒尺寸和特征对断口的形貌有明显的影响。

从组织对断裂韧性的影响角度考虑,一般认为较粗大组织具有较高的断裂韧性。修复区和过渡区与基材组织的主要差别在于:修复区晶粒粗大且呈柱状,过渡区宏观和显微组织均为修复区向基材的过渡。因此,从宏观晶粒尺度角度判断,修复对断裂韧性无不良影响。同时,修复区、过渡区和基材差别并不显著。综合考虑,修复件断裂韧性并未明显降低是可以预见的。

3 结论

通过对激光增材制造 TC18 钛合金热处理前的手工氩弧焊修复件力学性能试验研究和结果进行分析,可以得到如下结论:

(1) 氩弧焊修复件的室温抗拉强度几乎无变化、屈服强度略有提高,但塑性指标降低,断后延伸率和断面收缩率分别降低 47%~54% 和 36%~42%,这与修复区的粗大组织和晶粒取向有关。

(2) 裂纹预制在修复区和过渡区的断裂韧性平均值相当,修复件的室温断裂韧性 K_{IC} 平均值与基材相当。修复件 K_{IC} 数据分布范围略宽于基材。

(3) 随着修复量由 30% 增大到 50%,室温拉伸强度和断裂韧性无明显变化、冲击韧性略有降低,平均值降低约 7%。

(4) 氩弧焊修复对激光增材制造结构件的强度、断裂韧性

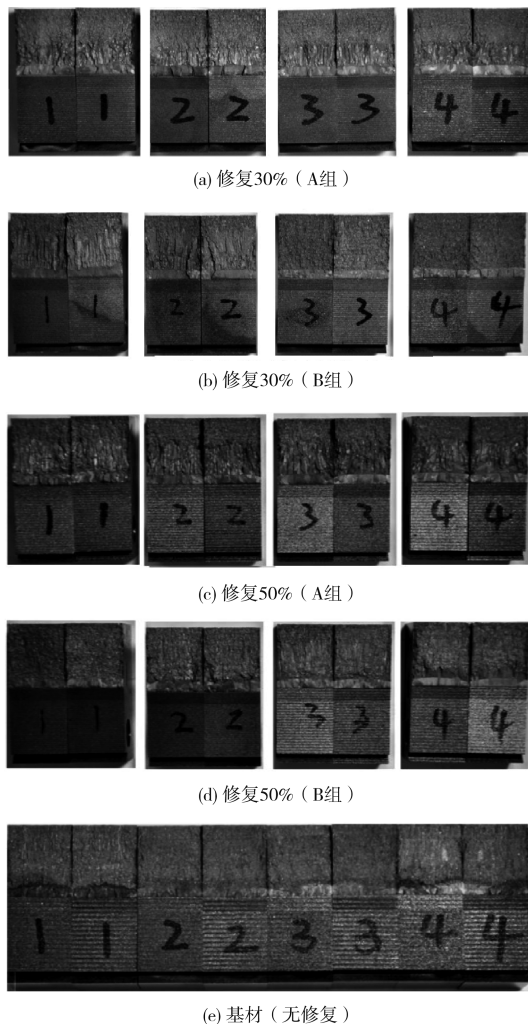


图12 手工氩弧焊修复激光增材制造TC18钛合金
室温断裂韧性试样宏观断口

Fig.12 Repairing the macro fracture of TC18 Titanium
alloy by TIG welding at room temperature

性影响较小,但修复后塑性降低,该修复工艺可在小修复量、低应力水平下使用。

AST

参考文献

- [1] 杨健. TC18钛合金焊接接头应用性能研究[J]. 航空制造技术, 2014(8): 17-22.
Yang Jian. Experimental study of TC18 Titanium alloy welding joint[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014(8): 17-22. (in Chinese)
- [2] 罗雷, 毛小南, 杨冠军. BT22钛合金简介[J]. 材料热处理技术, 2009, 38(14): 14-16.
Luo Lei, Mao Xiaonan, Yang Guanjuan. Brief introduction for BT22 Titanium alloy[J]. Hot Working Technology, 2009, 38(14): 14-16. (in Chinese)
- [3] 李旭, 刘栋, 汤海波, 等. 激光熔化沉积TC17钛合金光纤激光焊接特性[J]. 中国激光, 2012, 39(1): 1-7.
Li Xu, Liu Dong, Tang Haibo, et al. Fiber laser welding characteristics of laser melting deposited TC17 alloy [J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(1): 1-7. (in Chinese)
- [4] 沙爱学, 王庆如, 李兴无. 航空用高强结构钛合金的研究及应用[J]. 稀有金属, 2004, 28(1): 239-242.
Sha Aixue, Wang Qingru, Li Xingwu. Research and application of high strength Titanium alloys used in airplane structure[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2004, 28(1): 239-242. (in Chinese)
- [5] 胡俞刚, 王晓平, 周亮. TC18钛合金焊接技术在飞机起落架制造中的应用研究[J]. 航空制造技术, 2011(16): 72-74.
Hu Yugang, Wang Xiaoping, Zhou Liang. Application research on TC18 Titanium alloy welding technology in manufacture of aircraft landing gear[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2011(16): 72-74. (in Chinese)
- [6] 朱胜, 杜文博. 电弧增材再制造技术研究进展[J]. 电焊机, 2020, 50(9): 251-254.
Zhu Sheng, Du Wenbo. State-of-art of wire arc additive remanufacturing technology[J]. Electric Welding Machine, 2020, 50(9): 251-254. (in Chinese)
- [7] Gu J L, Ding J L, Cong B Q, et al. The influence of wire properties on the quality and performance of wire arc additive manufactured aluminium parts[J]. Advanced Materials Research, 2014, 1081: 210-214.
- [8] Branza T, Deschaux-Beaume F, Velay V, et al. A microstructural and low-cycle fatigue investigation of weld-repaired heat-resistant cast steels[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209(2): 944-953.
- [9] Yu Shengfu, Dai Yili, Yan Ning. Inclusion behavior and microstructure of weld metal with Ce in twin wire high input submerged-arc welding[J]. China Welding, 2017, 26(1): 29-36.
- [10] 杜博睿, 田象军, 王华明. 激光快速成形TA15钛合金氩弧焊接头组织及力学性能[J]. 焊接学报, 2014, 34(11): 65-68.
Du Borui, Tian Xiangjun, Wang Huaming. Microstructure and mechanical properties of MIG welded joint of laser melting deposited TA15 Titanium alloy[J]. Transactions of the China

Welding Institution, 2013,34(11): 65-68.(in Chinese)

[11] 侯慧鹏,田象军,刘栋,等. 氩弧焊修复激光成形 TC11 钛合金组织及高周疲劳性能[J]. 焊接学报,2016,37(8):9-12.

Hou Huipeng, Tian Xiangjun, Liu Dong, et al. Microstructure

and high-cycle fatigue properties of laser melting deposited TC11 Titanium alloy repaired by tungsten argon arc welding [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2016,37(8): 9-12.(in Chinese)

Effect of TIG Welding Restorations on the Mechanical Properties of Laser-Formed TC18 Titanium Alloy

Wang Zhigang¹, Zhu Xiaojun¹, Liu Dong²

1. AVIC the First Aircraft Institute, Xi'an 710089, China

2. Beihang University, Beijing 100191, China

Abstract: The tensile, impact and fracture toughness tests of TC18 Titanium alloy specimens made by laser with different amount of repair are carried out, and the mechanical properties of the base plate and transition zone are compared with those made by laser without repair area. The results show that the tensile strength at room temperature does not change obviously and the plasticity decreases slightly with the increase of the repair amount of laser-reinforced parts by TIG welding; the average fracture toughness K_{IC} of the repaired parts is the same as that of the base material; the average fracture toughness of the crack prefabricated in the repair zone and the transition zone is the same; the plasticity and fatigue life of the repaired parts decrease obviously after the repair. TIG welding to repair the laser-reinforced material manufacturing process should be limited in small repair amount and low stress level.

Key Words: TIG welding; additive manufacturing; titanium alloy; laser-formed restoration; mechanical properties