

激光熔化沉积快速成形 TC4 钛合金的焊接性能

王 群¹ 王鲲鹏¹ 王端志¹ 康 黎² 戎 磊²

(1 北京宇航系统工程研究所,北京 100076)

(2 航天材料及工艺研究所,北京 100076)

文 摘 为了探索激光熔化沉积快速成形技术制备 TC4 钛合金的焊接性能,分别采用电子束焊、激光焊两种方法制备接头试样,并借助金相、硬度试验等方法获得接头力学性能、显微组织及硬度。结果表明:两种焊接方法得到的接头抗拉强度最高达 953 MPa,焊接系数均>0.9;激光和电子束焊接焊缝为网篮状 α' 相马氏体组织,热影响区为 α 相和针状马氏体组织组成。激光熔化沉积快速成形 TC4 钛合金和传统工艺制造的 TC4 钛合金在焊接特性方面表现相当。

关键词 激光熔化沉积快速成形,钛合金,焊接特性

中图分类号: TG456.3

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2017.04.013

Welding Characteristics of Titanium Alloy TC4 Fabricated by Laser Melting Deposition Manufacturing

WANG Qun¹ WANG Kunpeng¹ WANG Duanzhi¹ KANG Li² RONG Lei²

(1 Beijing Institute of Astronautical System Engineer, Beijing 100076)

(2 Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology, Beijing 100076)

Abstract In order to study the welding mechanical properties of titanium alloy TA15 fabricated by laser melting deposition manufacturing, the specimen of welding joints were welded using electron beam and laser beam to obtain the welding mechanical properties, microstructure and microhardness by metallographic test, hardness test etc.. The results show that the highest tensile strength of two different welding ways can reach 953 MPa and the welding coefficient is greater than 0.9. Furthermore, the microstructure is mainly α' basket-weave martensite structures; and the heat affected zone is consisted of α phase and an acicular structure. Finally, titanium alloy TC4 fabricated by laser melting deposition manufacturing performs similar welding characteristics with that by traditional manufacturing.

Key words Laser melting deposition manufacturing, Titanium alloy, Welding characteristics

0 引言

激光熔化沉积快速成形(LMD)技术,利用快速原型制造(RPM)技术在无需任何模具和工装条件下快速制造任意复杂形状零件的全数字化快速制造基本原理,以新材料快速凝固激光冶金制备技术为手段,通过金属材料的激光逐层熔化沉积,直接由零件CAD模型一步完成高性能“近终形”复杂金属零件的快速成形,是一种代表着先进制造技术发展方向、将高性能结构材料制备与“近终形”复杂零件直接成形有机融为一体的无模、非接触、数字化成形制造新技术^[1]。LMD技术解决了以往制造复杂钛合金结构件存在的工艺繁杂、制造成本高、材料利用率低、生产周期长等缺点。迄今,快速成形等“3D打印”技术越来

越受到各行各业的青睐与重视,并在一些工程应用中替代了传统铸造或锻造钛合金^[2]。目前,LMD成形钛合金的研究主要集中在增材制造成形技术方面,而关于其焊接特性的研究,国内外鲜见相关报道。为了探索LMD工艺成形TC4钛合金的焊接性能,本文选用LMD与传统工艺成形TC4钛合金,分别采用电子束焊、激光焊两种焊接方法,对比两种工艺成形TC4钛合金的接头拉伸性能、显微组织、显微硬度,以期获得基于LMD增材制造技术TC4钛合金的焊接特性。

1 试验

1.1 材料与设备

材料为LMD工艺制备的退火态TC4钛合金及市售退火态TC4钛合金板材。

收稿日期:2017-06-12

第一作者简介:王群,1987年出生,硕士,工程师,研究方向为壳体及特殊功能结构设计。E-mail:wangqun_calt@163.com

焊接方法包括电子束焊、激光焊两种,其焊接设备分别为 26M3 真空电子束焊机、光纤激光器。

1.2 试样制备

按表 1 中相关工艺参数制备焊接接头,对接头取样并加工,其中试样长度方向为激光熔化沉积增高方向。对接头试样进行编号,LMD 成形 TC4 合金试样编号记为 L,传统工艺成形 TC4 合金板材试样编号记为 B;激光焊接编号记为 J,电子束焊接编号记为 D。

表 1 两种焊接方法工艺参数

Tab.1 Parameters of three welding methods

焊接方式	焊接参数
	焊接:激光功率 1.6~2.0 kW,焊接速度 1.2 m/min,离焦量 0 mm,Ar 保护,流量 30~40 L/min
J	修饰焊:激光功率 2.0~2.2 kW,离焦量+30 mm,其余同上
	焊接:加速电压 60 kV,电子束电流 20~25 mA,聚焦电流 452~454 mA,焊接速度 1.0 m/min,工作距离 330 mm
D	修饰焊:电子束电流 19~21 mA,聚焦电流 468~470 mA,其余同上

1.3 性能测试

焊接完成后,对试样焊缝进行 X 射线检测,均达到 GJB1718A—2005 I 级焊缝要求。按照 GB/T228—2002 要求进行室温、高温(500℃)拉伸性能测试;按照 GB/T 4340.1—2009 要求进行接头组织显微硬度测试。

2 结果及讨论

2.1 接头拉伸性能

两种工艺成形 TC4 钛合金母材以及接头试样的拉伸性能如表 2 所示,表中数据均为 6 个子样的平均值。

表 2 TC4 母材及焊接接头拉伸性能

Tab.2 Tensile properties of TC4 alloy

base metal and welding joints

试样	测试温度 /℃	抗拉强度 /MPa	延伸率 /%	断裂位置
母材	L 室温	903	15.5	-
	L 500	553	17.5	-
	B 室温	982	16	-
	B 500	645	17.0	-
J	L+B 室温	930	12.3	母材(LMD)
	L+B 500	584	15.4	母材(LMD)
	L+L 室温	911	12.3	母材(LMD)
	L+L 500	558	11.9	母材(LMD)
D	L+B 室温	958	9.6	母材(LMD)
	L+B 500	565	13.3	母材(LMD)
	L+L 室温	920	11.7	母材(LMD)
	L+L 500	562	12.2	母材(LMD)

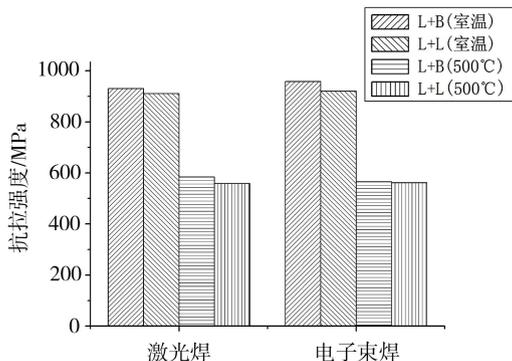


图 1 同种焊接方法焊接接头抗拉强度对比

Fig.1 Comparison of tensile strength of welding joints by the same welding method

对于同一种焊接方法,“L+B”和“L+L”焊接后室温和高温下抗拉强度变化趋势如图 1 所示。可以看出,两种材料之间的接头力学性能差异很小,但“L+B”接头的室温及高温拉伸性能明显要高于“L+L”间的拉伸性能。并且通过表 2 可以看出接头断裂位置均在母材(LMD)侧,这主要和其焊接过程中形成的显微组织差异相关。

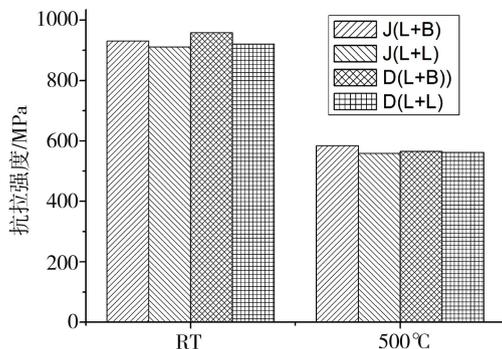


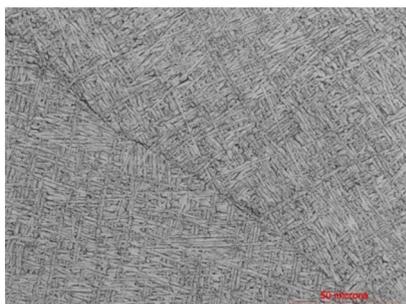
图 2 不同焊接方法焊接接头抗拉强度对比

Fig.2 Comparison of tensile strength of welding joints by different welding method

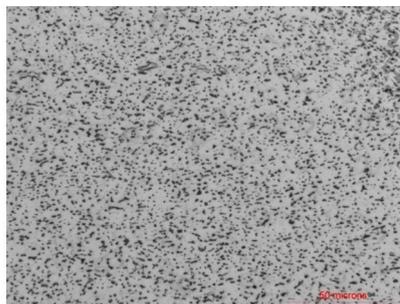
采用不同焊接方法,焊接后接头室温和高温下抗拉强度变化趋势如图 2 所示,可以看出,电子束焊试样的抗拉强度比激光焊接试样略高一些,但相差不超过 5%,通过计算可以得出两种方法的接头焊接系数均大于 0.9。

2.2 接头显微组织

观察两种工艺 TC4 钛合金母材及焊接接头显微组织,如图 3、图 4 所示。如图 3(a),具有明显的网篮组织,其中 α 相呈网篮状交织分布,该组织的抗蠕变性能、冲击和断裂韧性较好,但塑性稍差;图 3(b)为典型的 $\alpha+\beta$ 双相组织,其基体相为 α 相,原始 β 晶已充分破碎,弥散分布,该组织强度和韧性较高,但热稳定性较差^[3]。两者母材组织形貌的不同,主要取决于合金成分、成形工艺和热处理制度的差异。



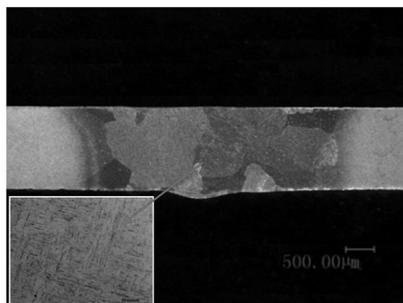
(a) 母材(L)



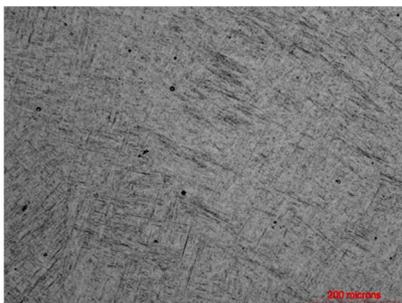
(b) 母材(B)

图3 TC4 钛合金母材显微组织

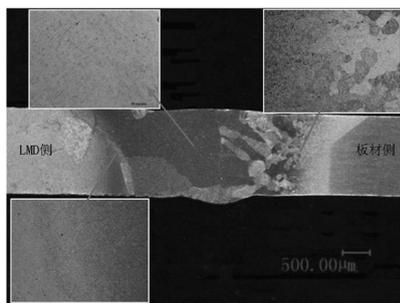
Fig.3 Microstructures of TC4 alloy base metal



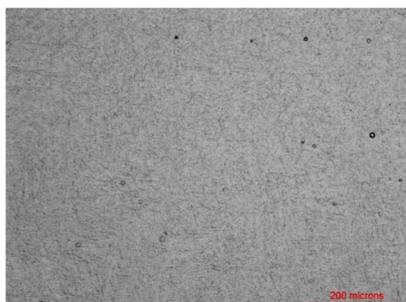
(a) J(L+L)



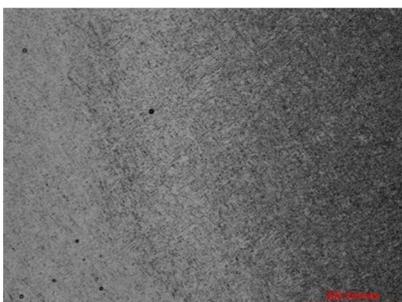
(b) J(L+L) 焊缝中心放大



(c) J(L+B)



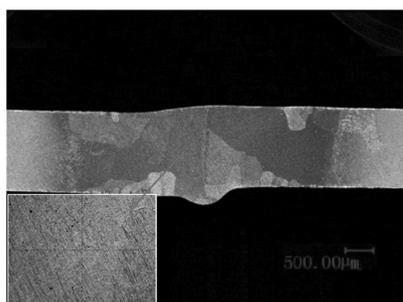
(d) J(L+B) 焊缝中心放大



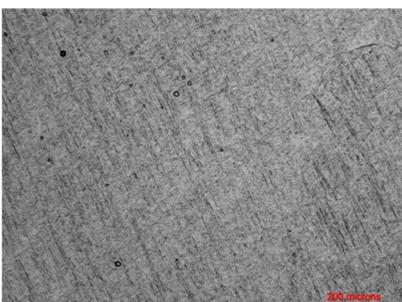
(e) J(L+B)-L 侧熔合线放大



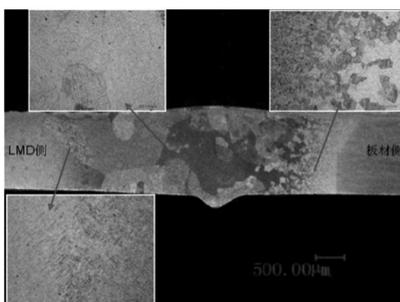
(f) J(L+B) B 侧熔合线放大



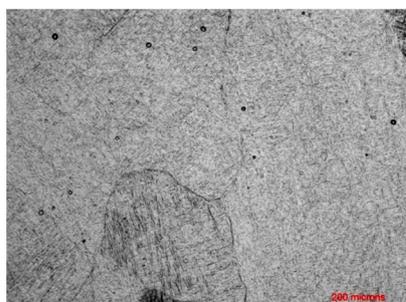
(g) D(L+L)



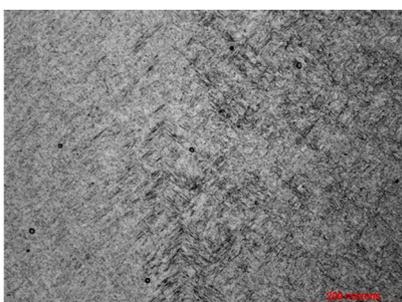
(h) D(L+L) 焊缝中心放大



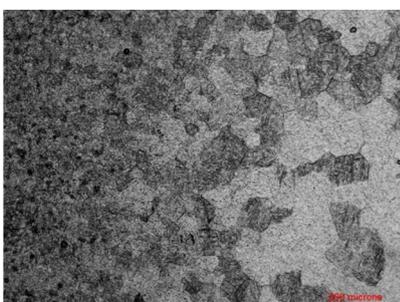
(i) D(L+B)



(j) D(L+B) 焊缝中心放大



(k) D(L+B) L 侧熔合线放大



(l) D(L+B) B 侧熔合线放大

图4 TC4 钛合金焊接接头显微组织

Fig.4 Microstructures of TC4 alloy welding joints

观察“L+L”和“L+B”激光焊接接头显微组织,可以看出两者焊缝中心均形成网篮状马氏体组织[图4(b)和(d)],主要是因为激光焊接时,处于高温的 β 相快速冷却时,原始的 β 晶粒再结晶,晶粒内析出大量的细针状过饱和 α' 相马氏体组织。焊接接头断裂位置在LMD母材侧,这也表明了 α' 相马氏体的强度高于母材的初始 α 相和 β 相组织^[4]。对比接头两侧热影响区[图4(e)和(f)],可以看出,“L+B”熔合区两侧组织表现出一定的差异性,主要是因为LMD和板材母材组织差异造成的。板材侧母材组织为 $\alpha+\beta$ 双相组织,在焊接过程中, β 晶粒转变成 α' 相,同一个晶粒内针状 α' 相取向基本相同, β 相晶界清晰可见。焊缝在冷却过程中, α' 首先以靠近熔合线附近未熔的固态金属为基向焊缝中心生长,形成马氏体,由于焊缝冷却速度较快,过冷度大,导致焊缝中心呈比较细小的针状马氏体组织。热影响区受到焊接热循环的作用后组织明显变化,在距离焊缝中心比较近区域组织形成较焊缝更细小的针状马氏体 α' ,主要是因为该区域温度要比焊缝的温度低,且冷却速度要比焊缝的大所致。距焊缝较远靠近母材的区域受热后,有部分 α 相转变为 β 相,部分未发生转变,受到焊接热循环作用后 β 粒长大,冷却时只在局部出现少量 α' 相,组织为 $\alpha+\alpha'$ (少量)。

观察电子束焊接接头显微组织,其表现特征和激光焊接接头显微组织规律基本一致^[5],主要区别在于由于激光焊接的激光束能量密集,所以其热影响区相对电子束较窄。

通过分析比较,可以得出,两种钛合金材料除了个体母材组织不同外,焊缝显微组织间无显著差异。

2.3 接头显微硬度分布

对TC4激光焊、电子束焊试样分别进行显微硬度测试,结果如图5所示。

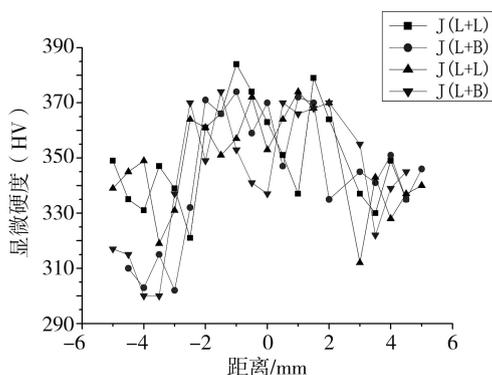


图5 接头区域显微硬度分布

Fig.5 Microhardness distribution of laser-welded joints

从图5可以看出,接头各区域(包括焊缝和热影

响区)的显微硬度均高于母材平均硬度,形成了“软+硬+软”三明治式的硬度分布结构^[6]。钛合金焊接接头各区域组成相的显微硬度遵循针状马氏体 $\alpha'>\alpha$ 相 $>\beta$ 相的一般规律^[7]。图6中硬度分布与焊接过程中加热和冷却过程中 β 相的过冷转变有关。加热和冷却速度较快使得焊缝处形成了大量细长的 α' 相, α' 相交错排列,具有高的位错密度,且孪晶针状组织造成了大量的相界,因此使得接头区域的显微硬度高于母材基体;从焊缝中心到热影响区,硬度不断降低,这是由于热影响区冷却速度相对缓慢, α' 相数量相对减少;从图6左侧可以看出,LMD侧母材的硬度高于板材侧,还是因为两者显微组织不同所造成的差异。

总体来看,“L+B”和“L+L”两种状态焊缝区硬度无明显差异。

3 结论

(1)LMD成形TC4钛合金具有优异的焊接性能,通过两种焊接方法得到的接头拉伸性能都较好,焊接系数均大于0.9。LMD与传统工艺成形TC4钛合金之间焊接接头的室温及高温拉伸性能明显要高于LMD成形TC4钛合金自身的焊接。

(2)激光和电子束焊接焊缝为网篮状 α' 相马氏体组织,热影响区为 α 相和针状马氏体组织组成。但“L+B”熔合区两侧组织表现出一定的差异性,主要在于两者母材组织不同所致。

(3)LMD成形的TC4钛合金接头焊缝组织冶金效果良好,焊缝及热影响区的显微硬度普遍高于母材基体硬度。

(4)综合分析,基于LMD成形的TC4钛合金对焊接拉伸性能、显微组织、硬度分布没有显著影响,和传统工艺制造的TC4钛合金焊接特性表现相当。

参考文献

- [1] 王华明,李安,张凌云,等.激光熔化沉积快速成形TA15钛合金的力学性能[J].航空制造技术,2008(7):26-29.
- [2] 王华明.激光熔化沉积快速成形TA15钛合金切削加工性能研究[J].航空制造技术,2010,15:77-81.
- [3] 周义刚,曾卫东,俞汉清.近 β 锻造推翻陈旧理论发展了三态组织[J].中国工程科学,2001,3(5):61-66.
- [4] 董志军,吕涛,雷正龙,等.激光焊接TC4钛合金组织性能研究[J].航天制造技术,2013(1):27-30.
- [5] 陈新民,耿雅辉,何迎春,等.异种状态TC4钛合金电子束焊接性能分析[J].宇航材料工艺,2016,46(2):39-43.
- [6] 姚伟,巩水利,陈俐.钛合金激光焊接接头的组织和力学性能[J].焊接学报,2006,27(2):69-72.
- [7] 张翥,王群娇,莫畏.钛合金的金属学与热处理[M].北京:冶金工业出版社,2009.