

# 激光熔化沉积 TC17 钛合金光纤激光焊接特性

李 旭 刘 栋 汤海波\* 张述泉 王华明

(北京航空航天大学大型整体金属构件激光直接制造教育部工程研究中心, 北京 100191)

**摘要** 利用光纤激光对激光熔化沉积 TC17 钛合金与锻造 TC17 钛合金薄板进行了激光热导熔化焊接, 利用光学显微镜、扫描电镜、X 射线衍射仪和显微硬度计分析了接头的组织结构及显微硬度分布。结果表明, TC17 钛合金激光熔化沉积件及锻件薄壁板状试样激光焊接接头凝固组织为沿未熔母材外延定向生长的细小树枝晶组织。锻造钛合金焊缝热影响区(HAZ)大且热影响区  $\beta$  晶粒发生了严重的长大现象, 而激光熔化沉积钛合金焊缝热影响区小且热影响区  $\beta$  晶粒尺寸几乎无明显变化, 表现出优异的焊接热稳定性。无论锻造钛合金还是激光熔化沉积钛合金, 其焊缝区显微硬度高于母材, 热影响区显微硬度低于母材。

**关键词** 激光技术; 材料; 焊接特性; 激光焊接; 激光熔化沉积

**中图分类号** TG456.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0103010

## Fiber Laser Welding Characteristics of Laser Melting Deposited TC17 Alloy

Li Xu Liu Dong Tang Haibo Zhang Shuquan Wang Huaming

(Engineering Research Center of Ministry of Education on Laser Direct Manufacturing of Large Metal Components, Beihang University, Beijing 100191, China)

**Abstract** Laser melting deposited TC17 alloy and forged TC17 alloy are welded by fiber laser. The microstructure, phase constitution and mechanical properties of the weld joint are studied by optical microscopy, scanning electron microscopy, X-ray diffraction and microhardness tests. Results indicate that the fusion zone (FZ) mainly consists of fine dendrite which nucleated and epitaxially grows from the substrates. The heat input makes the  $\beta$  grain of forged TC17 grow more seriously than that of laser melting deposited TC17. The heat affected zone (HAZ) of laser melting deposited TC17 is much narrower than that of forged TC17. Laser melting deposited TC17 exhibits better thermal stability than forged TC17. The microhardness of FZ is higher than that of the base metal, and the microhardness of HAZ is lower than that of the base metal.

**Key words** laser technique; material; welding characteristics; laser welding; laser melting deposition

**OCIS codes** 350.3390; 350.3850; 160.3900

## 1 引 言

TC17 钛合金是一种富  $\beta$  相稳定元素的  $\alpha + \beta$  型钛合金, 该合金具有强度高、断裂韧度好、淬透性高等优点, 广泛用于制造航空发动机风扇、压气机整体盘等大截面构件<sup>[1,2]</sup>。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”技术, 利用激光熔化沉积技术制造钛合金构件具有快速、无需模具、材料利用率高、机械加工量小等优点, 可望为 TC17 钛合金压气机盘、整体叶盘、大型关键复杂构件的低成本短周期成形制造提供一条新的技

**收稿日期**: 2011-08-26; **收到修改稿日期**: 2011-10-13

**基金项目**: 国家 973 计划(2010CB731705, 2011CB606305)资助课题。

**作者简介**: 李 旭(1985—), 男, 硕士研究生, 主要从事钛合金激光焊接、钛合金的激光熔化沉积等方面的研究。

E-mail: yongjian0516@126.com

**导师简介**: 王华明(1962—), 男, 博士, 教授, 主要从事大型金属结构件的激光直接制造方面的研究。

E-mail: wanghm@buaa.edu.cn

\* **通信联系人**。E-mail: tanghb@gmail.com

术途径<sup>[3~6]</sup>。

目前,针对传统塑性成形钛合金的焊接性,其焊接工艺方法、接头组织和力学性能变化规律等研究相对已较为成熟<sup>[7~11]</sup>。激光熔化沉积钛合金的显微组织与传统塑性成形钛合金存在很大不同,这种显微组织的差异无疑会使激光熔化沉积钛合金具有不同于传统塑性成形钛合金的焊接特性。激光熔化沉积钛合金焊接性能的好坏很大程度上决定着这种新材料在工程实际中的应用前景,而目前国内外针对激光熔化沉积钛合金焊接性能的相关研究相对还较少。光纤激光具有波长短、吸收率高、光束质量好等优点,是近年来发展起来的一种新型激光器<sup>[12,13]</sup>。利用光纤激光焊接热影响区小、工件变形小及焊接残余应力小,非常适合钛合金等精密零部件的焊接。

材料的焊接性主要表现在焊接接头处,包括焊缝凝固区(FZ)及热影响区(HAZ)<sup>[11,14,15]</sup>,而焊接热输入对组织的影响及接头组织演变是焊接特性的重要方面,因此本文对比研究了激光熔化沉积与锻造TC17钛合金薄板试样的高纯氩气激光热导熔焊接特性,重点分析了两种材料焊接热稳定性的差异及焊接接头组织的变化规律与机理,为激光熔化沉积TC17钛合金的焊接奠定技术基础。

## 2 试验方法

激光熔化沉积TC17试验在YLS-4000型4 kW光纤激光快速成形设备上,成形腔中的高纯氩气气氛氧含量在 $8 \times 10^{-5}$ (体积分数)以下,使用粒度为50~100  $\mu\text{m}$ 的真空等离子体旋转电极雾

化TC17钛合金粉末为原料,其名义化学成分为Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Mo-4Cr(质量分数)。TC17钛合金激光熔化沉积件和锻件均按840  $^{\circ}\text{C}/1 \text{ h}/\text{AC}+800 \text{ }^{\circ}\text{C}/4 \text{ h}/\text{WQ}+630 \text{ }^{\circ}\text{C}/8 \text{ h}/\text{AC}$ (AC表示空气冷却,WQ表示水淬)热处理工艺进行热处理。

由于薄板在焊接过程中传热截面小,冷却较慢,相同焊接热输入下薄板的热影响区组织对焊接热输入的反映更强烈,本文选用厚度为3 mm的薄壁板状试样进行TC17钛合金激光熔化沉积件(简称激光成形件)和锻件进行激光热导对接拼焊试验。试样不开坡口,焊前使用丙酮清洗表面,为将板材焊透,先进行单面的激光热导焊,然后在其反面进行第二道激光热导焊,如图1所示。通过两次焊接热输入可以增大焊接过程的热输入,从而加强了焊接热输入对两种材料组织的影响,有利于进行两种材料焊接特性的对比。在优化了焊接工艺参数下最终采用焊接参数为:功率4 kW,束斑直径4 mm,扫描速率1000 mm/min,所用激光器为YLS-4000型号光纤激光器,焊接过程在高纯氩气成形腔中进行,气氛氧体积分数小于 $8 \times 10^{-5}$ 。

采用电火花线切割方法从焊接件上切取金相试样,使用HF-HNO<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O体积比为1:6:7的金相腐蚀剂。利用Olympus BX51M型光学金相显微镜和CS3400型扫描电镜(SEM)对焊接接头组织进行观察与分析。利用RigakuD/max2200旋转阳极X射线衍射仪(XRD,Cu-K<sub>α</sub>)结合组织分析来分析相组成。利用HXZ-1000型显微硬度测试仪测定焊接接头显微硬度分布,载荷为0.5 kg,加载时间为10 s。

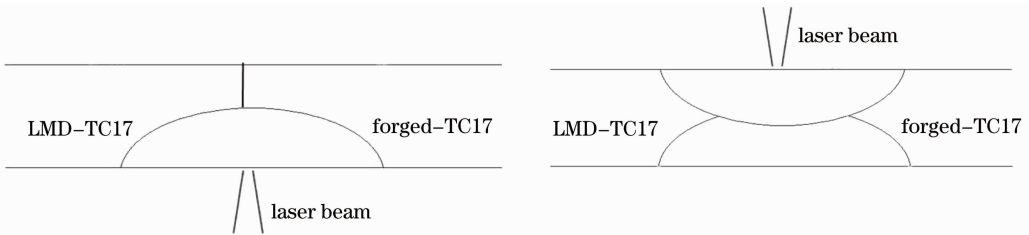


图1 焊接过程示意图

Fig. 1 Schematic illustration of welding process

## 3 试验结果与分析

### 3.1 焊接用母材显微组织

图2(a)为激光熔化沉积TC17钛合金的 $\beta$ 柱晶组织,由于激光熔化沉积过程温度梯度高,激光成形TC17钛合金具有明显沿沉积方向生长的柱状晶组织,组织致密、无疏松气孔、无裂纹。由于在激光成

形过程中的快冷作用,柱晶内部显微组织十分细小,由细小的针状 $\alpha$ 相和 $\beta$ 转变组织组成一种超细特殊双态显微组织,如图2(b)所示。图2(c),(d)为激光成形件和锻件经过840  $^{\circ}\text{C}/1 \text{ h}/\text{AC}+800 \text{ }^{\circ}\text{C}/4 \text{ h}/\text{WQ}+630 \text{ }^{\circ}\text{C}/8 \text{ h}/\text{AC}$ 热处理后的显微组织。经过热处理后,激光成形件 $\beta$ 柱晶内部显微组织由针状

初生  $\alpha$  和  $\beta$  转变组织组成,这种  $\beta$  转变组织由时效过程中析出的细小次生  $\alpha$  和残留  $\beta$  组织组成,初生  $\alpha$  片平均宽度约为  $1\ \mu\text{m}$ ,长度不均匀,短至  $2\ \mu\text{m}$ ,长至  $20\ \mu\text{m}$  左右。锻件的显微组织为双态组织,由平

均直径约  $5\ \mu\text{m}$  的近似球状初生  $\alpha$  和  $\beta$  转变组织组成,这种  $\beta$  转变组织由时效过程中析出的片层状次生  $\alpha$  和残留  $\beta$  组成,如图 2(d)所示。

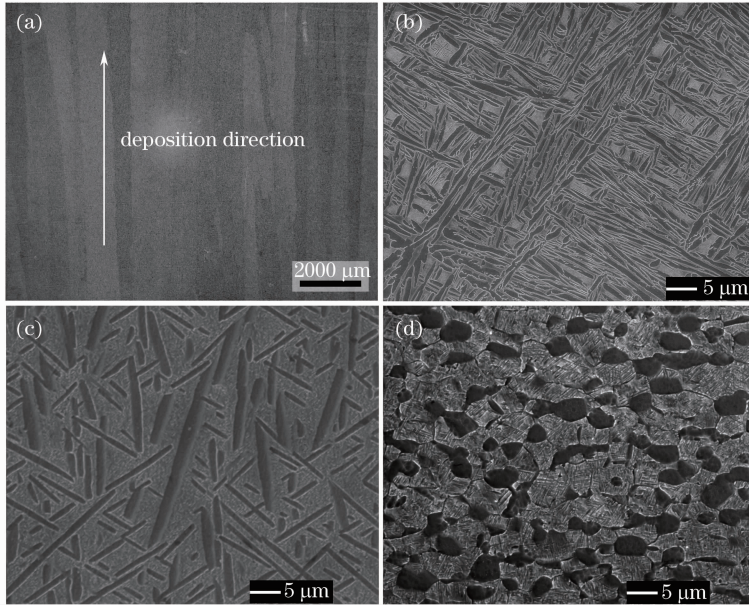


图 2 TC17 钛合金激光成形件和锻件显微组织。(a)激光成形件  $\beta$  柱晶组织;(b)激光成形件原态显微组织;(c)热处理后激光成形件显微组织;(d)热处理后锻件显微组织

Fig. 2 Microstructures of the laser melting deposited TC17 and the forged TC17 alloy. (a)  $\beta$  columnar grains of the laser melting deposited TC17 alloy; (b) microstructure of the laser melting deposited TC17; (c) microstructure of the laser melting deposited TC17 after heat treatment; (d) microstructure of the forged TC17 after heat treatment

### 3.2 焊接接头凝固组织

将激光成形件和锻件 TC17 钛合金板材经过双面光纤激光热导熔化焊接后得到如图 3 所示的焊接接头形貌。图 4 为焊接接头两端的凝固组织。相对于母材,接头凝固组织难以腐蚀出来,利用光学显微镜的微分干涉衬观察,可观察到两端的凝固组织分别是激光成形件和锻件为形核基体外生长而成的具有十分细小树枝晶亚结构的  $\beta$  柱状树枝晶组织。对焊缝中心进行了 XRD 分析,图 5 给出的 XRD 分析结果显示凝固组织为单一的  $\beta$  相。这种单一  $\beta$  相的树枝晶形态在钛合金的焊接中较少发现,大多数钛合金的焊缝凝固组织在冷却过程中多发生相变,未经热处理的钛合金的焊缝凝固组织多以马氏体组织组成<sup>[8,9,11]</sup>。而 TC17 钛合金由于其马氏体转变开始温度低于室温,不发生马氏体转变,另外,由于快冷过程  $\beta$  相难以发生  $\alpha$  转变,使  $\beta$  相在冷却过程中得以保留下来形成亚稳  $\beta$  相。

第二道焊缝中部的凝固组织不同于焊缝两端的凝固组织,它是第一道焊缝的凝固组织作为形核

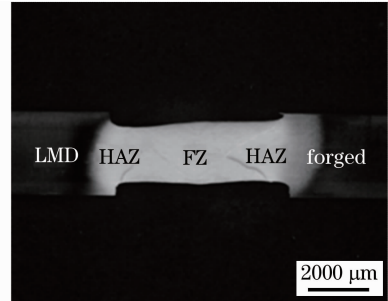


图 3 焊缝截面形貌

Fig. 3 Welding section form

基体外生长而成的,如图 6 所示。图 6(b)和(c)分别给出了第二道焊缝中部凝固组织的底部和上部的微观组织特征。可以看出底部初始的胞晶较细密,在随后的生长过程中部分胞晶消失,剩余的胞晶长大变粗,长大的胞晶随后生长出二次臂发展为树枝晶组织,树枝晶发展到熔池上部时,一次臂间距变小。一次臂间距和凝固速度、温度梯度相关。第二道焊缝中部的凝固组织是以第一道焊缝中部未熔的胞晶作为形核基体外生长而成的,在随后的生长

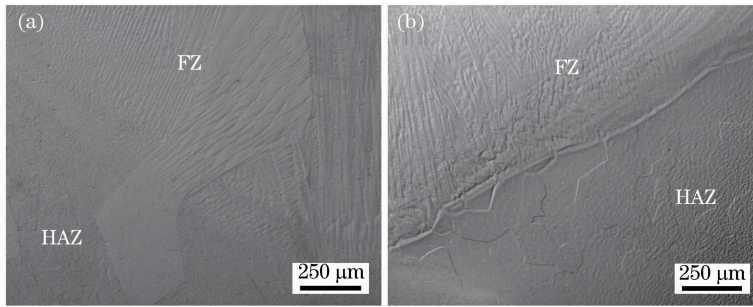


图 4 焊接接头凝固组织(微分干涉衬观察)。(a)激光成形件端;(b)锻件端

Fig. 4 Solidification structure of fusion zone (differential interference contrast observation).

(a) Laser melting deposited TC17; (b) forged TC17

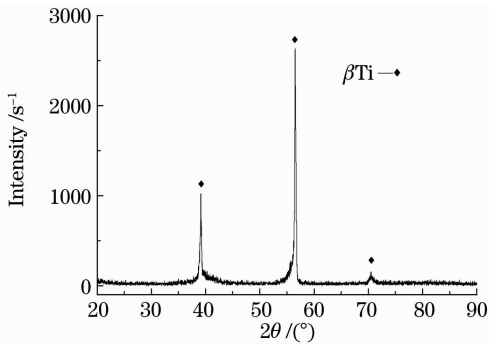


图 5 焊缝凝固区 XRD 衍射分析

Fig. 5 XRD analysis of the fusion zone

过程中由于散热速度变慢,使得温度梯度和凝固速率变小,较小的凝固速度和温度梯度使得胞晶间距变大,胞晶间距是通过胞晶间的竞相生长调整的。间距变大的胞晶由于成分过冷的增加,规则的胞晶出现二次臂从而发展为一次臂间距约  $50\ \mu\text{m}$ ,二次枝晶间距  $10\ \mu\text{m}$  的树枝晶。而在熔池上部,散热更为有利,使得温度梯度和凝固速率增加,进而使得一次臂间距变细,其一次臂间距的调整主要通过二次臂上的三次臂发展为新的一束树枝晶来实现,一次臂间距变小,调整为  $10\ \mu\text{m}$  左右,二次枝晶变得更加细小。

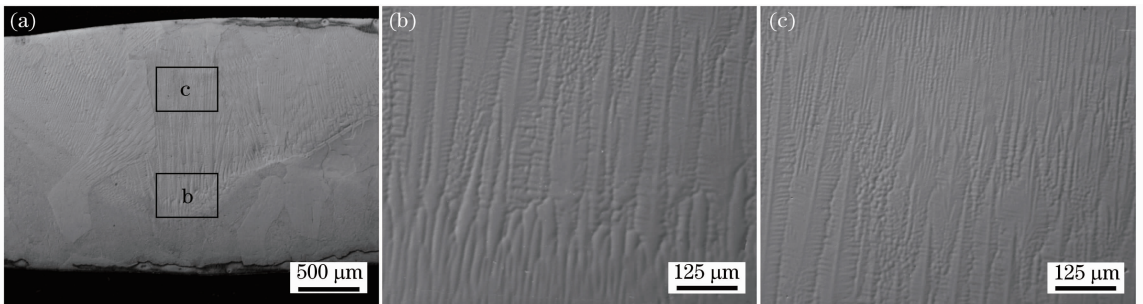


图 6 焊接接头凝固组织(微分干涉衬观察)

Fig. 6 Solidification microstructure of fusion zone (differential interference contrast observation)

### 3.3 热影响区组织

图 7 给出了双面激光热导焊热影响区的 SEM 显微组织。图 7(a),(c),(e)和(b),(d),(f)分别为激光成形件和锻件的基体、远离熔合线热影响区及靠近熔合线热影响区。

从图 7(c),(d)可以看出,在远离熔合线的热影响区,由于离焊接热源较远,在焊接过程中温度较低,不足以将所有  $\alpha$  相转变为  $\beta$  相。激光成形件的针状初生  $\alpha$  相基本未发生变化,而初生  $\alpha$  相间的  $\beta$  相转变组织发生变化, $\beta$  相转变组织中细小的次生  $\alpha$  相在快速升温过程中基本消失转变为  $\beta$  相,然后在快冷的过程中以  $\beta$  相相保留下来。锻件的近似球状

初生  $\alpha$  相也基本未发生变化,而初生  $\alpha$  相间的  $\beta$  相转变组织发生变化, $\beta$  相转变组织中细小的片层状次生  $\alpha$  相消失,转变为  $\beta$  相,形成不完全相变区。在靠近熔合线的热影响区,如图 7(e),(f)所示,由于在焊接过程中离热源较近,温度大幅度超过  $\beta$  相转变点,升温过程中使得初生  $\alpha$  相和次生  $\alpha$  相全部转变为  $\beta$  相,然后在随后的快冷过程中以亚稳  $\beta$  相保留下来,形成完全相变区。

图 8 为利用光镜的暗场相观察焊接接头热影响区的组织。经过两次焊接热输入,激光成形件热影响区  $\beta$  相晶粒尺寸未发生明显变化,如图 8(a)所示。而锻件热影响区  $\beta$  相晶粒发生了严重的长大现

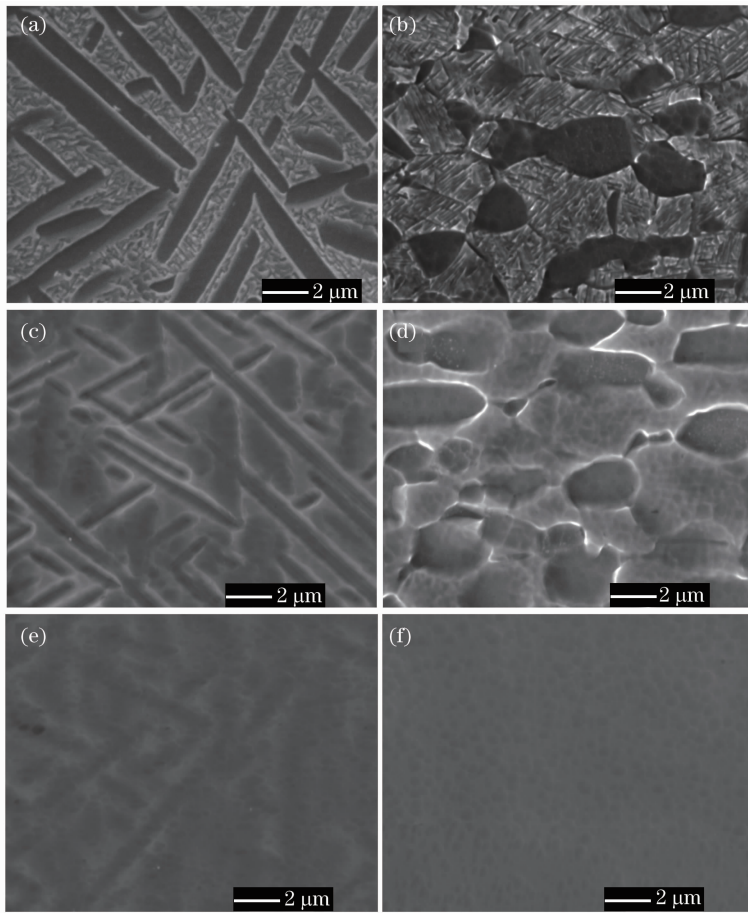


图 7 焊接热输入对显微组织的影响。(a), (c), (e)激光成形件热影响区;(b), (d), (f)锻件热影响区  
Fig. 7 Effect of heat input on microstructure. (a), (c), (e) HAZ of the laser melting deposited TC17;  
(b), (d), (f) HAZ of the forged TC17

象,特别是图 8(b)中的黑色三角区域,该区域的  $\beta$  相晶粒直径由初始的  $40\ \mu\text{m}$  最大长大到近  $300\ \mu\text{m}$ , 随着离焊缝距离的增加, $\beta$  相晶粒的长大程度减小。相对于激光成形件,锻件的  $\beta$  相晶粒尺寸要细小得多,从而锻件具有较大的晶界能,大的界面能在双重

热循环下易于晶粒长大,另外锻件虽经后续热处理,但内部仍然可能残留部分锻造时产生的变形能,在焊接过程中,热输入使得具有较大内能的锻件  $\beta$  相晶粒较容易长大。

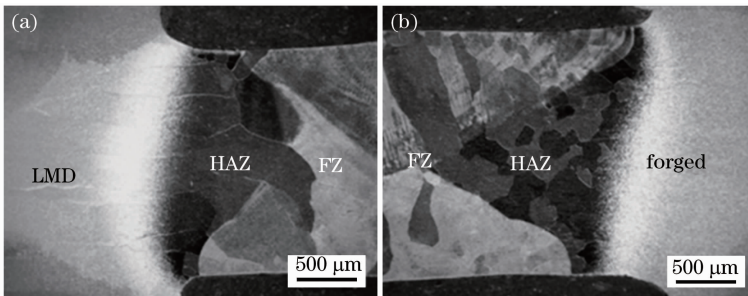


图 8 焊接热输入对热影响区  $\beta$  晶粒的影响(暗场相观察)。(a)激光成形件;(b)锻件  
Fig. 8 Effect of heat input on grain size of HAZ (dark field observation). (a) Laser melting deposited TC17;  
(b) forged TC17

图 9 为 TC17 钛合金激光成形件及锻件薄板光纤激光熔化焊接接头组织的示意图。从图中可以形象地看出 TC17 钛合金激光成形件组织对焊接热影

响不敏感,薄壁板状试样即使经过双面激光熔化焊接,其焊缝热影响区  $\beta$  晶粒仍无长大现象;而 TC17 钛合金锻件对焊接热敏感性高,其焊缝热影响区宽

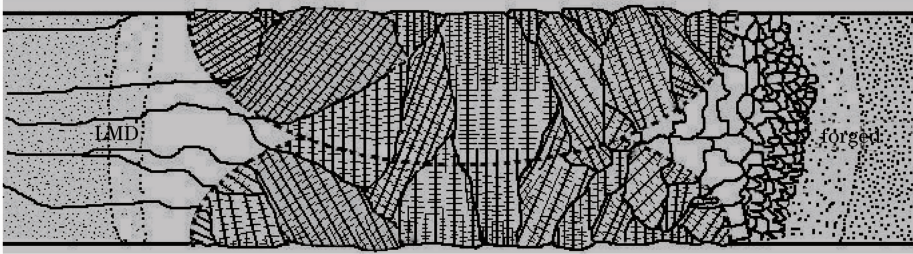


图 9 焊接接头组织示意图

Fig. 9 Schematic illustration of weld joint

且  $\beta$  晶粒发生了严重长大现象。焊缝凝固组织均以未熔母材为基体定向外延生长的快速凝固细小树枝晶组织。

### 3.4 显微硬度分析

分别对焊接接头上、中、下三区域进行横向显微硬度分布测试,显微硬度分布曲线如图 10 所示。激光成形件和锻件的母材硬度相当。焊缝区显微硬度最高,高于母材。热影响区硬度最低,低于母材。另外从三条显微硬度分布曲线上可以看出,激光成形件的热影响区范围要窄于锻件。

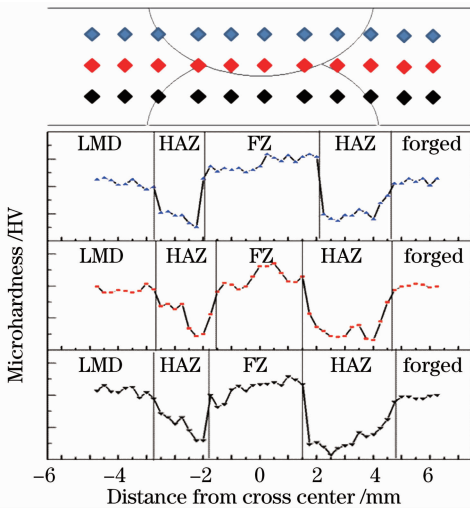


图 10 焊接接头显微硬度分布(载荷:0.5 kg; 加载时间:10 s)

Fig. 10 Microhardness distribution of weld joint (load: 0.5 kg; loading time: 10 s)

在焊接过程中接头的整个区域内合金元素成分没有变化,不存在由固溶元素含量变化而引起硬度变化的因素。焊缝区细小的树枝晶组织是其显微硬度较大的主要原因,树枝晶组织中细小的一次臂及二次臂起到了强化作用,使得显微硬度较大。完全相变热影响区由于  $\alpha$  相完全变为  $\beta$  相保留下来而失去了相界面的强化作用使得硬度降低,低于母材,而部分相变热影响区,由于作为时效强化的次生  $\alpha$  相发生了不同程度的  $\beta$  相转变,使得显微硬度发生了

不同程度的降低。在相同的焊接条件下,激光成形件具有较窄的热影响区,结合前面焊接热输入对两种材料热影响区  $\beta$  晶粒尺寸的影响差异,可以得出激光成形件相对于锻件具有更好的焊接热稳定性,焊接性能较好。

## 4 结 论

1) TC17 钛合金激光成形件组织对焊接热影响极不敏感,其薄壁板状试样即使经过双面激光熔化焊接,焊缝热影响区  $\beta$  晶粒仍无长大现象;而 TC17 钛合金锻件对焊接热敏感性高,其焊缝热影响区  $\beta$  晶粒发生了严重长大现象。

2) TC17 钛合金激光成形件及锻件薄板光纤激光熔化焊接焊缝凝固组织,均是以未熔母材为基体定向外延生长具有十分细小树枝晶亚结构的  $\beta$  柱状树枝晶组织,焊缝底部枝晶间距较大,熔池上部枝晶间距较小。

3) 激光成形件及锻件光纤激光焊接焊缝组织中细小树枝晶的强化作用使得焊缝区显微硬度高于母材,热影响区相界面强化作用的消失使得显微硬度均低于母材,显微硬度结果显示相比于锻件 TC17 钛合金激光成形件具有较窄的热影响区。

## 参 考 文 献

- 1 Editorial Board of China Aeronautical Materials Handbook. China Aeronautical Materials Handbook. Titanium Alloy & Copper Alloy (2nd Edition)[M]. Beijing: China Standards Press, 2002. 15~59
- 2 《中国航空材料手册》编辑委员会. 中国航空材料手册, 钛合金铜合金(第 2 版)[M]. 北京: 中国标准出版社, 2002. 15~59
- 3 Shi Changxu, Li Hengde, Zhou Lian. Material Science and Engineering Handbook[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004. 222~223
- 4 师昌绪, 李恒德, 周 廉. 材料科学与工程手册(上册)[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004. 222~223
- 5 He Ruijun, Wang Huaming. Microstructure features of laser deposited Ti-6Al-2Zr-Mo-V alloy[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2009, **29**(6): 18~22
- 6 贺瑞军, 王华明. 激光熔化沉积 Ti-6Al-2Zr-Mo-V 钛合金组织特征研究[J]. *航空材料学报*, 2009, **29**(6): 18~22

- 4 Steffen Nowotny, Siegfried Scharek, Eckhard Beyer *et al.*. Laser beam build-up welding: precision in repair, surface cladding, and direct 3D metal deposition [J]. *J. Thermal Spray Technol.*, 2007, **16**(3): 344~348
- 5 Wang Huaming, Zhang Lingyun, Li An *et al.*. Rapid solidification laser processing and forming of advanced aeronautical metallic materials [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2004, **30**(10): 962~967  
王华明, 张凌云, 李 安等. 金属材料快速凝固激光加工与成形 [J]. 北京航空航天大学学报, 2004, **30**(10): 962~967
- 6 Wang Junwei, Chen Jing, Liu Yanhong *et al.*. Research on microstructure of TC17 titanium alloy fabricated by laser solid forming [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(3): 847~851  
王俊伟, 陈 静, 刘彦红等. 激光立体成形 TC17 钛合金组织研究 [J]. 中国激光, 2010, **37**(3): 847~851
- 7 Zhang Li, S. L. Gobbi, I. Norris *et al.*. Laser welding techniques for titanium alloy sheet [J]. *J. Mater. Process. Technol.*, 1997, **65**(1-3): 203~208
- 8 Qi Yunlian, Deng Ju, Hong Quan *et al.*. Electron beam welding, laser beam welding and gas tungsten arc welding of titanium sheet [J]. *Mater. Sci. Engng. A*, 2000, **280**(1): 177~181
- 9 E. Akman, A. Demir, T. Canel *et al.*. Laser welding of Ti6Al4V titanium alloys [J]. *J. Mater. Process. Technol.*, 2009, **209**(8): 3705~3713
- 10 A. P. Wu, G. S. Zou, J. L. Ren *et al.*. Microstructures and mechanical properties of Ti-24Al-17Nb (at.%) laser beam welding joints [J]. *Intermetallics*, 2002, **10**(7): 647~652
- 11 Yao Wei, Gong Shuili, Chen Li. Microstructures and mechanical properties of titanium alloy laser beam welding joints [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2006, **27**(2): 69~72  
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
- 12 Zou Kuaisheng, Lu Min, Xiangli Bin *et al.*. Thermal effects in high power photonic crystal fiber lasers [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(1): 228~231  
邹快盛, 陆 敏, 相里斌等. 高功率光子晶体光纤激光器的热效应分析 [J]. 光子学报, 2008, **37**(1): 228~231
- 13 Zhao Baoyin, Duan Kailiang, Zhao Wei *et al.*. High-power fiber laser amplifiers based on a new pump coupling technology [J]. *Chinese J. Laser*, 2011, **38**(7): 0702014  
赵保银, 段开棕, 赵 卫等. 基于一种新型抽运耦合技术的光纤激光放大器 [J]. 中国激光, 2011, **38**(7): 0702014
- 14 Li Liqun, Chen Yanbin, Tao Wang. Research on dual-beam welding characteristics of aluminum alloy [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(11): 1783~1788  
李俐群, 陈彦宾, 陶 汪. 铝合金双光束焊接特性研究 [J]. 中国激光, 2008, **35**(11): 1783~1788
- 15 Tan Caiwang, Li Liqun, Chen Yanbin *et al.*. Characteristics of fiber laser and CO<sub>2</sub> laser welding of AZ31B magnesium alloys [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(6): 0603015  
檀财旺, 李俐群, 陈彦宾等. AZ31B 镁合金的光纤激光与 CO<sub>2</sub> 激光焊接特性 [J]. 中国激光, 2011, **38**(6): 0603015

栏目编辑: 宋梅梅