

## Ti6Al4V 钛合金 LBW/SPF/DB 夹层结构微观组织研究

Research on Microstructure of Ti6Al4V Alloy Sandwich Structure  
Made by LBW/SPF/DB Process中航工业北京航空制造工程研究所 盖鹏涛 吴为 王飞  
中国人民解放军驻西飞公司军事代表室 涂刚

**[摘要]** 采用激光焊接/超塑成形/扩散连接(LBW/SPF/DB)组合工艺制作Ti6Al4V钛合金夹层结构试验件,分析超塑成形/扩散连接前后激光焊接区域及母材显微组织的变化。结果表明:超塑性变形过程中, $\beta$ 晶粒取向逐渐向拉伸方向转变,内部细小的片层状组织能使焊缝强硬度降低、塑性增加,从而能够承受拉伸过程中的弯曲、拉伸应力的联合作用。超塑成形后Ti6Al4V钛合金母材晶粒仍保持等轴状,其晶粒尺寸明显增大,焊缝中心区针状 $\alpha$ 相变大、变粗,焊缝中心两侧区域为粗大的魏氏组织,在热影响区内的针状马氏体 $\alpha'$ 相,形成与初生 $\alpha$ 相形态相似的短小 $\alpha$ 条。

**关键词:** Ti6Al4V 钛合金 夹层结构 LBW/SPF/DB 激光焊接 超塑成形

**[ABSTRACT]** The Ti6Al4V alloy sandwich structure is made by LBW/SPF/DB process. The evolvement of the microstructure in the LBW area is investigate before and after SPF/DB process. The results indicate that, during the SPF process, the orientation of the  $\beta$  grain changed gradually towards the tension direction and the fine lamellar structure formed which enables the hardness of the welded joint to be reduced but the plasticity increased can bear the combination of the bending and the tension stresses. The crystal grain of the as-received Ti6Al4V alloy remains equiaxed but larger after SPF/DB process and the needle-like  $\alpha$  phase is coarser in the central area of the welded joint and the coarse Widmanstatten structure exists in bilateral areas of the welded joint centre and in the heat-affected zone the needle-like  $\alpha'$  phase transforms into short and small  $\alpha$  banding.

**Keywords:** Ti6Al4V alloy Sandwich structure LBW/SPF/DB Laser beam welding Superplastic forming

超塑成形(SPF)和超塑成形/扩散焊接组合工艺(SPF/DB)技术在现代航空航天工业发展推动下,经过

近40年的开发研究和试验验证期,已进入实用阶段<sup>[1]</sup>。超塑成形和扩散连接(DB)的技术条件及工艺参数具有兼容性,在钛合金构件研制中把两种工艺组合在同一个温度循环中,同时实现成形和连接,可制备出常规工艺难以成形的整体结构件。此技术既可实现轻质高强的目的,又能有效地缩短构件制造周期。与传统的加工工艺相比,工序大为减少,生产成本大大降低。然而超塑成形构件在成形过程中经历较长时间的热曝露,性能会有一定程度的下降,所以尽可能地缩短坯料在高温下的停留时间,对减少性能的损失是十分有利的。

在航空航天领域,SPF/DB工艺制备夹层中空结构已进入应用阶段,随着应用要求的提高,中空夹层结构向着层数越来越多,尺寸越来越大,结构越来越复杂的方向发展。将具有高能量密度和焊接速度、变形小且容易实现自动化等优点的激光焊接(LBW)技术与SPF及SPF/DB工艺相结合,有望缩短常规SPF/DB构件的制造周期,并进一步降低生产成本,提高零件性能<sup>[2-3]</sup>。本课题采用LBW/SPF/DB工艺制作四层板夹层结构件,分析超塑成形对激光焊接焊缝区域及母材显微组织的影响,为LBW/SPF/DB组合技术的可行性提供理论依据。

## 1 试验过程

### 1.1 试验材料

试验材料为Ti6Al4V钛合金板材,厚度为0.8mm,其主要化学成分如表1所示。

表1 Ti6Al4V钛合金化学成分

元素	Al	V	Fe	C	O	N
质量分数/%	5.50~6.75	3.50~4.50	≤0.5	≤0.1	≤0.20	≤0.05

### 1.2 激光焊接试验

本试验采用SLCF-X1225型数控激光加工系统,功率范围为100~4000W,模式为TEM01模,激光束采用透镜聚焦,焦距为190.5mm,聚焦后的光斑直径≤0.2mm。

叠焊试验所用功率为 2350W,焊接速度为 2.0m/min,焊缝经 X 射线探伤表明没有气孔和裂纹,质量符合要求。

### 1.3 叠焊板材超塑成形 / 扩散连接试验

超塑成形试验采用四层板结构,由面板和芯板组成,其中芯板由激光焊接形成,面板覆盖在芯板表面,四周用氩弧焊封焊,保证有效的密封性,如图 1 所示。设计合理的气路,充入氩气进行气压涨形,温度-时间曲线如图 2 所示,最终可获得一个近净成形的形状。

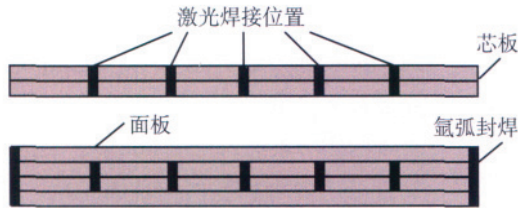


图1 Ti6Al4V合金四层板结构装配示意图

Fig.1 Assembly prepared for LBW/SPF /DB processing of Ti6Al4V alloy four-layer sheet

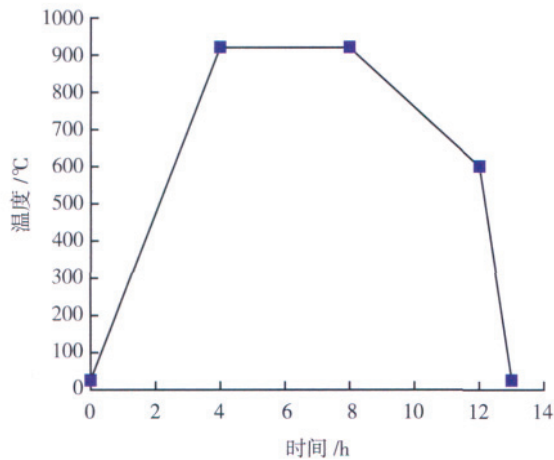


图2 超塑成形/扩散连接过程温度-时间曲线

Fig.2 Temperature-time curve during SPF/DB process

### 1.4 微观组织分析

将变形前后试样加工成金相试样,使用水砂纸对制好的金相试样进行粗磨、精磨后,再进行机械抛光。显微组织的侵蚀采用 Keller 试剂:2mlHF+10mlHNO<sub>3</sub>+88mlH<sub>2</sub>O,使用 OLYMPUS-BX41M 型金相显微镜观察焊缝形貌,分析微观组织。

## 2 结果与分析

### 2.1 激光焊接焊缝及母材微观组织

在平衡状态下, Ti6Al4V 主要由  $\alpha + \beta$  两相组织组成,两相的比例取决于合金成分的含量,特别是  $\beta$  稳定化元素的含量。本试验所用 Ti6Al4V 合金的母材组织

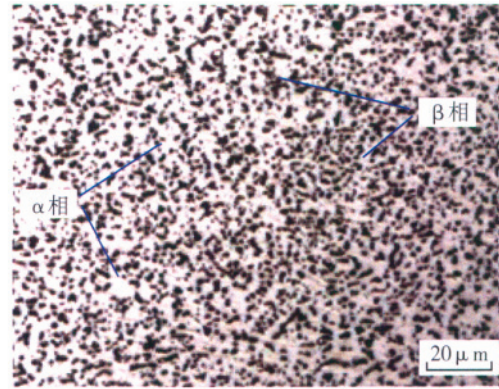


图3 Ti6Al4V钛合金母材微观组织

Fig.3 Microstructure of Ti6Al4V alloy base metal

为典型的等轴  $\alpha + \beta$  组织,如图 3 所示,由试样试验看出, Ti6Al4V 的等轴  $\alpha + \beta$  组织的晶粒非常细小,约为 3~5  $\mu\text{m}$ 。 $\alpha$  相为基体,  $\beta$  相分布在  $\alpha$  相边界处,均呈等轴或多边形。

Ti6Al4V 钛合金板材在叠焊过程中,焊接区域出现明显的分区现象,焊接接头与母材组织相比,发生了很大变化。图 4 为激光叠焊接头横截面的金相组织。

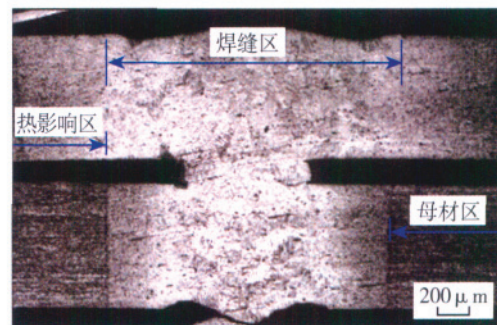


图4 激光叠焊接头横截面微观组织

Fig.4 Microstructure of cross section at laser stitch welding joint

由图 4 可见, Ti6Al4V 钛合金激光叠焊接头主要由焊缝区、热影响区和母材区组成。焊缝区是焊接时在热源直接作用下发生熔化的那部分区域, Ti6Al4V 钛合金激光焊焊缝区域宽度大约 2mm 左右。激光焊热影响区的宽度大约在 0.5mm 左右。从焊缝经热影响区过渡,直至母材,其显微组织发生了很大的变化。

Ti6Al4V 钛合金母材组织仍为等轴  $\alpha + \beta$  相,  $\beta$  相分布在  $\alpha$  相边界处,如图 5 (a) 所示。图 5 (b) 是母材与热影响区过渡区域的组织照片,焊缝热影响区组织为  $\alpha + \beta + \alpha'$  相,  $\alpha'$  相是由于焊后冷却速度极快,合金元素的扩散来不及进行,  $\beta$  相通过共格切变形成过饱和的  $\alpha$  固溶体,即六方结构的马氏体  $\alpha'$ 。叠焊接头热影响区由于热影响作用晶粒明显长大,并且  $\alpha$  相体

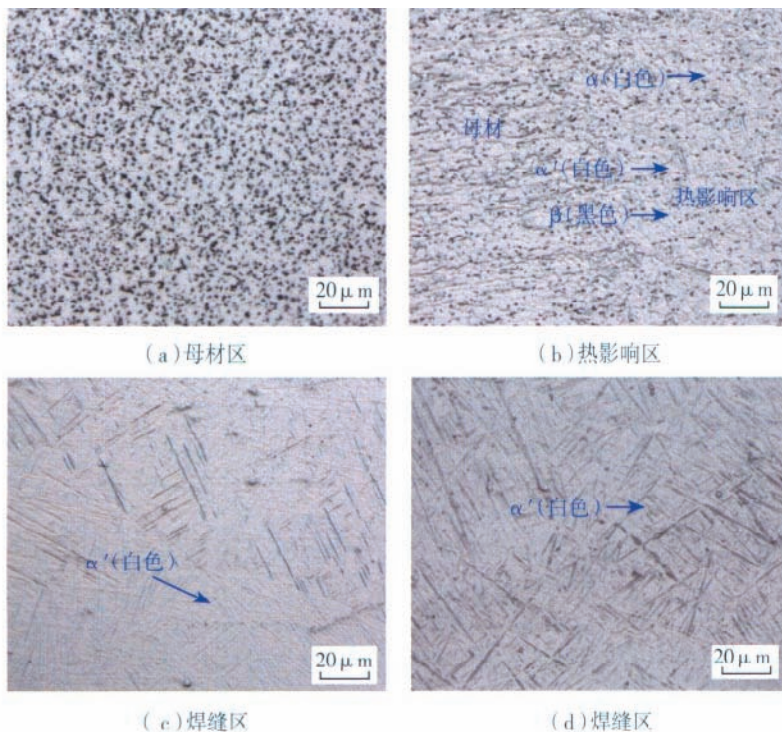


图5 激光焊叠焊接头不同区域显微组织

Fig.5 Microstructures of different zones at laser stitch welding joint

积分数增大。由于热影响区的最高加热温度和冷却速度都较低,马氏体相变相对较少,因此此区域的针状马氏体相对于焊缝少很多,且更加细小。

由于 $\beta$ 相中钛的自扩散能力极强,高温加热导致 $\beta$ 相长大倾向性强,因此在焊缝中形成粗大的 $\beta$ 柱状晶。柱状晶内部为针状马氏体组成的网篮组织,如图5(c)、(d)所示,焊缝中生成的针状马氏体相主要为 $\alpha'$ 相。针状 $\alpha'$ 马氏体相在原始 $\beta$ 柱状晶内部形核长大,先形成一根或若干根相互平行的一次 $\alpha'$ ,并在长距离内扩展贯穿整个晶粒,遇晶界停止;接着形成一系列相对细小的二次针状 $\alpha'$ ,遇晶界或一次马氏体而停止,致使焊缝形成了典型的网篮状组织,这种网篮状组织的强度、塑性、蠕变抗力和高温持久强度等综合性能都较好<sup>[4]</sup>。但焊缝区的组织不均匀,存在形态较细小且数量较少的 $\alpha'$ 相区(图5(c))和形态粗大且数量多的 $\alpha'$ 相区(图5(d)),这是因为在焊接过程中焊缝区的合金元素在凝固过程中发生再分配,而焊后熔合区冷却速度极快,合金元素分布不均匀,一些区域V的含量比Al高,等轴 $\beta$ 相组织向针状的 $\alpha'$ 相组织转变相应减少,形态也比较细小,另一些区域的Al含量比V高,形成数量较多的粗大 $\alpha'$ 相。

## 2.2 超塑成形 / 扩散连接后焊缝及母材显微组织

图6所示为920℃时激光叠焊板经高温超塑成形后各区域显微组织照片。图6(a)箭头所示为拉伸方向,

由图可知焊接接头及附近区域发生了较大的超塑性变形。钛合金Ti-6Al-4V的母材组织为典型的等轴 $\alpha + \beta$ 组织,超塑成形后其组织晶粒仍保持等轴状,但其晶粒尺寸都明显增大,约为8~9 $\mu\text{m}$ ,如图6(b)所示。这表明Ti6Al4V合金在超塑成形过程中,发生了高温下的静态长大和变形引起的应变诱发长大,但由于 $\alpha$ 、 $\beta$ 相之间的相互制约作用,晶粒虽然长大却仍然保持等轴状。与超塑成形 / 扩散连接组合工艺制作的结构件相比,在高温下成形的时间大大降低,限制了晶粒尺寸的持续增长,有利于提高零件的强度、韧性和疲劳性能,并且能够保证结构件的综合力学性能和使用寿命。

在焊缝中心区为网篮组织, $\alpha$ 束域尺寸较小,各片丛互相交错,呈编织网篮状,如图6(c)所示;焊缝中心两侧区域为粗大的魏氏组织,如图6(d)所示。魏氏组织的形成是由于超塑成形前,激光焊接的焊缝组织为互相交错的针状马氏体 $\alpha'$

相,随着超塑成形的开始,焊缝区要经历一个长时间的升温-保温-降温的热循环过程。在升温的过程中,由于温度升高,合金元素的扩散速率也不断升高,针状马氏体 $\alpha'$ 相中的过饱和合金元素逐渐扩散出去,形成 $\alpha$ 相,另外升温要达到920℃且要在此温度下保温约4小时。Ti6Al4V在温度达到900℃以上时,晶粒会发生明显的长大,且随着温度的升高,长大速率加快,所以针状 $\alpha$ 相变大、变粗,形成大量互相交错的板条状 $\alpha$ 相。又由于焊缝中心两侧区域变形量小,未引起板条状 $\alpha$ 相的变形扭曲,所以板条状 $\alpha$ 相都保持平直的状态。

焊缝中心区由于变形量大,在超塑成形过程中发生动态再结晶, $\alpha$ 相向等轴化发展,但在随后的降温过程中, $\alpha$ 相又沿散热速度最快的方向,即沿最大温度梯度方向生长成条状。又由于焊缝中心两侧面在变形过程中拉伸为曲面,所以对于焊缝中心区的 $\alpha$ 相的最大温度梯度方向是不同的,另外,由于晶体生长的择优取向原则, $\alpha$ 相的生长又受其最优生长取向的限制,不能完全按照最大温度梯度方向生长,而是有一定的夹角,所以 $\alpha$ 条在生长过程中取向趋于一致而相互之间又有一定夹角。降温过程相对较短,使焊缝中心的 $\alpha$ 条较短小,没有两侧的粗大。

在热影响区内,超塑成形前是由 $\alpha + \beta$ 相和针状马氏体 $\alpha'$ 相组成,其中 $\alpha$ 相占了较大比例。在超塑成形的过程中,由于 $\beta$ 相数量较少,对 $\alpha$ 相长大的约束

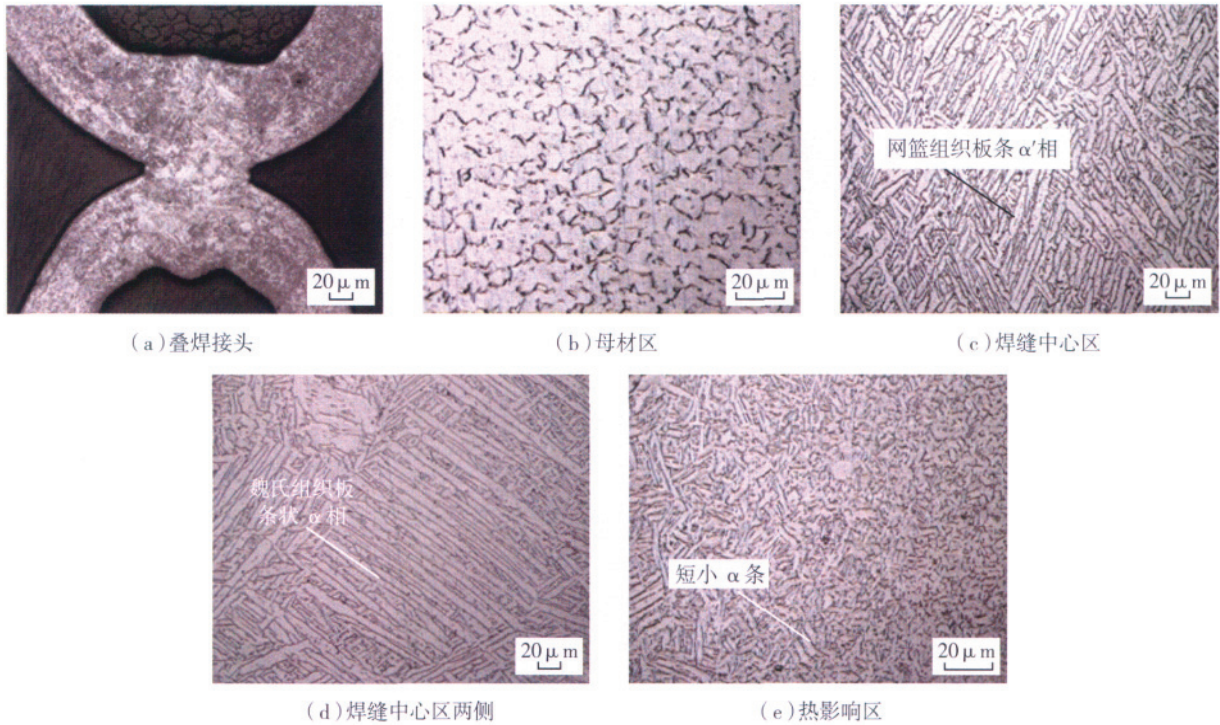


图6 超塑变形后激光焊叠焊接头不同区域显微组织  
Fig.6 Microstructures of different zones at laser stitch welding joint after SPF process

减小,  $\alpha$  相继续长大为条状和片状。其中的针状马氏体  $\alpha'$  相, 在超塑成形的过程中也变为条状  $\alpha$  相, 但由于初生  $\alpha$  相的限制, 不能长大成粗大的板条状  $\alpha$  相, 只能形成与初生  $\alpha$  相形态相似的短小  $\alpha$  条, 如图 6(e) 所示。

在超塑变形应力的作用下, 焊缝截面收缩, 原始  $\beta$  晶粒取向逐渐转变为沿拉伸方向。内部细小片层因各自长大相互施加剪切力, 与拉伸过程的变形作用力同时作用于各细小片层, 细小的片层状组织容易发生断裂和破碎。同时, 在片层内部也容易在  $\alpha$  相和延展性更好的  $\beta$  相界面上出现滑移, 片层组织在  $\alpha$  相晶粒边界破碎, 这些断裂和破碎出来的组织容易形成大致等轴的组织, 同时也能再结晶提供了更多的形核位置。焊缝由原始的针状组织逐渐发展成为片层状组织(图 6), 从而增加其塑性以及变形能力, 提高叠焊试样在超塑成形过程中对拉伸及弯曲应力的承受力, 有助于焊缝超塑性能力的提高。

### 3 结论

(1) Ti6Al4V 钛合金母材组织为等轴  $\alpha + \beta$  相; 焊缝中形成粗大的  $\beta$  柱状晶, 柱状晶内部主要为针状马氏体  $\alpha'$  组成的网篮组织; 焊缝热影响区组织为  $\alpha + \beta + \alpha'$  相, 但由于热影响区的最高加热温度和冷却速度都较低, 马氏体相变相对较少, 因此此区域的针状

马氏体相对于焊缝又少又细。

(2) 超塑成形 / 扩散连接后 Ti6Al4V 钛合金母材晶粒仍保持等轴状, 但其晶粒尺寸都明显增大; 焊缝中心区仍为网篮组织, 但针状  $\alpha$  相变大、变粗, 焊缝中心两侧区域为粗大的魏氏组织。在热影响区内, 超塑成形的过程中  $\alpha$  相继续长大为条状和片状, 其中的针状马氏体  $\alpha'$  相, 形成与初生  $\alpha$  相形态相似的短小  $\alpha$  条。

(3) 超塑性变形过程中, 在温度及变形应力的作用下焊缝截面收缩, 原始  $\beta$  晶粒取向逐渐向拉伸方向转变。内部细小的片层状组织容易发生断裂和破碎, 使焊缝强硬度降低、塑性增加, 从而能够承受拉伸过程中的弯曲、拉伸应力的联合作用。

### 参 考 文 献

- [1] 李志强, 郭和平. 超塑成形 / 扩散连接技术的应用与发展现状. 航空制造技术, 2004 (11): 50-52.
- [2] Han W B, Zhang K F, Wang G F. Superplastic forming and diffusion bonding for honeycomb structure of Ti-6Al-4V alloy. Journal of Material Processing Technology, 2007 (2-3): 450-454.
- [3] Huang J C, Shen Y D, Ho N J. Characterization of electron beam welding of superplastic 8090 Al-Li Alloys. Materials Science and Technology, 1994, 10 (7): 647-657.
- [4] 程东海, 黄继华. 激光叠焊板超塑性行为研究. 焊接试验研究, 2010 (7): 42-45.

(责编 三丰)