

TC4 钛合金激光叠焊成形及显微组织

程东海¹, 黄继华¹, 杨 静¹, 赵兴科¹, 郭和平²

(1. 北京科技大学, 北京 100083)

(2. 北京航空制造工程研究所, 北京 100024)

摘 要: 研究 TC4 钛合金激光叠焊成形及焊缝显微组织特征, 提出表征叠焊接头焊合程度的指标——焊合率 ψ 。研究表明: 焊缝熔宽随着激光功率的升高和焊接速度的降低逐渐增加, 上板焊缝熔宽大于下板焊缝, 而连接焊缝处的熔宽最小; 焊合率随着叠焊两板间间隙的增加或焊接线能量的升高而降低; 焊缝组织为针状马氏体 α' 组成的“网篮”组织, 上板焊缝中马氏体分布更密集; 热影响区中存在少量细小马氏体组织, 且呈梯度分布。由于马氏体的界面增强效应, 使焊缝横向显微硬度沿焊缝中心向母材逐渐降低, 且上板焊缝显微硬度略高于下板焊缝。

关键词: 激光叠焊; TC4 钛合金; 焊合率

中图分类号: TG146.2³

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2009)02-0255-04

TC4 钛合金具有比强度和比刚度高、抗氧化、耐腐蚀等一系列优点, 在航空航天及其他工业领域应用日益广泛。现阶段, 钛合金的扩散/超塑成形组合工艺很受人们重视, 将扩散连接与超塑性成形工艺相结合 (DB/SPF) 生产复杂结构件, 可大大降低零件数量, 提高材料的利用率, 降低飞行器的质量^[1]。但是扩散焊接高温停留时间长, 晶粒长大严重, 易引起零件的力学性能下降^[2]。而激光焊接具有能量密度和焊接速度快、焊缝及热影响区窄、焊件变形小等优点, 将激光叠焊与超塑成形工艺组合, 将有望获得性能更好的零件。目前, 关于 TC4 钛合金激光焊缝组织与性能已有一些报道^[3-6], 但对 TC4 钛合金激光叠焊成形等问题国内外未见报道。本实验对 TC4 钛合金激光叠焊接头的成形规律, 以及接头显微组织、显微硬度的分布特征进行了研究。

1 材料及方法

试验所用材料为 0.8 mm 厚的 TC4 钛合金薄板, 接头形式为叠焊接头。

使用 SLCF-X1225 型数控激光加工系统进行焊接试验, 功率范围为 100~4000 W, TEM01 模, 透镜聚焦, 焦距为 190.5 mm, 聚焦后光斑直径 ≤ 0.2 mm。

试验选择 $\Delta f = 0.8$ mm 为离焦量。焊接试验工艺参数: 1) 激光功率 P , 由激光器控制面板给出, 分别选择 1400, 1600, 1800, 2000, 2150, 2350 W; 2) 焊接速率 V , 由数控机床给出, 分别选择 1.5, 2.0,

2.5, 3.0 m/min。焊缝成形良好, 表面呈白色或淡黄色, 经 X 射线探伤仪检测, 焊缝内部没有观察到气孔和裂纹。

采用金相显微镜、扫描电镜和透射电镜观察叠焊接头不同区域的显微组织形貌。金相组织侵蚀采用 Keller 试剂: 2 mL HF + 10 mL HNO₃ + 88 mL H₂O。透射电镜所用电解双喷液配方为 6%高氯酸 + 34%正丁醇 + 60%甲醇。使用维氏显微硬度仪测量焊接接头各部分显微硬度, 加载 300 g, 持续 15 s。并用 ImageTool 软件测量叠焊接头截面各部分尺寸。

2 结果及分析

2.1 TC4 钛合金激光叠焊成形规律

图 1 所示为 TC4 钛合金激光叠焊理想接头与实际接头截面示意图。由于叠焊两板之间存在间隙, 使得两板间连接焊缝不能达到理想焊合程度(如图 1a)而有一定收缩, 假定收缩后连接焊缝截面近似为矩形, 则

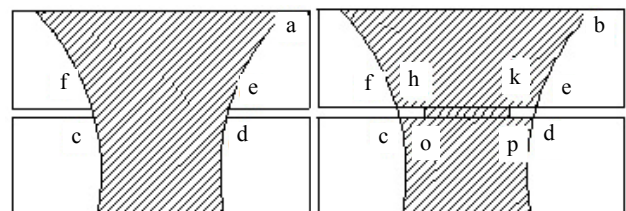


图 1 理想叠焊接头与实际叠焊接头截面示意图

Fig.1 Cross section of lap joints (a) idea, (b) real (trapezium “cdef”—idea, rectangle “hopk”—real)

收到初稿日期: 2008-01-25; 收到修改稿日期: 2008-11-05

作者简介: 程东海, 男, 1984 年生, 博士生, 北京科技大学材料学院, 北京 100083, 电话: 010-62334859, E-mail: chengdonghaicdh@yahoo.com.cn

实际叠焊接头(如图 1b)由上板焊缝、连接焊缝和下板焊缝 3 部分组成。

图 2a, 2b 分别为激光功率、焊接速度对实际叠焊接头熔宽的影响。由图可知, 随着激光功率的升高和焊接速度的降低, 焊缝熔宽逐渐增加。然而, 由于激光能量在熔池中分布不均匀, 使上板焊缝熔宽大于下板焊缝熔宽, 而连接焊缝处的熔宽最小。因此, 单独采用焊缝熔宽不能准确地表征叠焊接头的成形效果。

引进焊合率 Ψ 来表示叠焊接头的实际成形效果。定义焊合率 Ψ 等于叠焊两板间实际连接焊缝横截面积 S (即图 1b 中矩形 hopk 所示) 占理想连接焊缝横截面积 S' (即图 1b 中梯形 cdef 所示) 的百分比, 如式(1) 所示:

$$\psi = \frac{S}{S'} \times 100\% \tag{1}$$

结合图 1 焊缝截面示意图可得:

$$\psi = \frac{S}{S'} = \frac{S_{hopk}}{S_{cdef}} = \frac{2 \times op}{cd+ef} \tag{2}$$

式中: op 为实际连接焊缝宽度; cd 、 ef 为理想连接焊缝的上、下板熔宽。

由式(2)可知, 焊合率 ψ 反映连接焊缝处的宽度与上下板焊缝熔宽之间的关系。焊合率越高说明连接焊

缝处的宽度越接近上下板焊缝的熔宽, 即实际叠焊接头接近理想叠焊接头, 同时说明激光能量在焊缝中分配更加均匀。

图 3a, 3b 所示为不同板间间隙和不同焊接线能量下所得焊缝的真实 Ψ 值曲线。由图可知, 焊合率随上下板间隙的增加或焊接线能量的升高而减小。上下板间隙的增加会阻碍激光能量在焊缝中的均匀分配, 而导致焊合率下降。同时, 升高焊接线能量将使上板焊缝熔宽迅速增加, 而下板焊缝熔宽及连接焊缝处的熔宽增量较小, 其焊合率随之降低。因此, 激光叠焊过程中, 需综合考虑连接焊缝宽度和焊合率对叠焊成形的影响, 从而得到综合性能优良的焊缝。

2.2 TC4 钛合金激光叠焊焊缝显微组织

TC4 钛合金母材组织为等轴 $\alpha+\beta$ 相, β 相分布在 α 相交界处。图 4a 为叠焊接头横截面金相照片。由图可知, 焊缝中存在大量柱状晶, 内部为针状马氏体 α' 交织成的“网篮状”组织。熔池快速凝固过程中, 合金元素来不及扩散而形成在 α 相中的过饱和固溶体 α' 马氏体。 α' 在原始 β 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 α' , 并在长距离内扩展贯穿整个晶粒, 遇晶界停止。然后形成一系列相对细小的二次针状 α' , 遇晶界或一次马氏体而停止, 导致焊

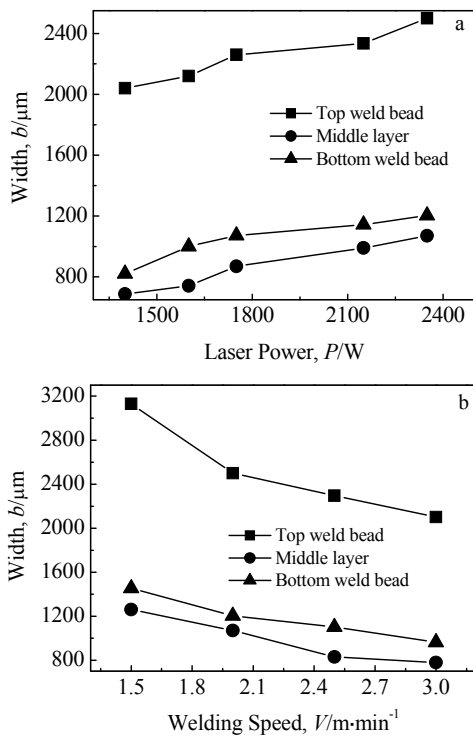


图 2 焊接工艺对焊缝截面尺寸的影响

Fig.2 Width of weld bead as functions of: (a) laser power and (b) welding velocity

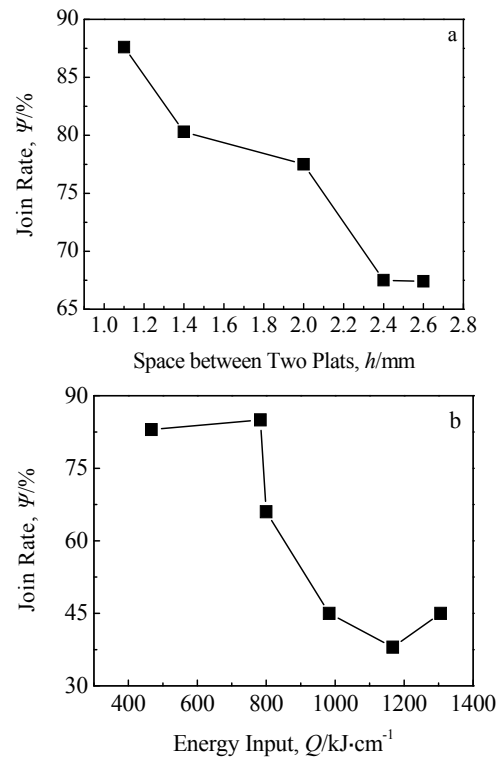


图 3 焊合率与焊接工艺条件的关系

Fig.3 Join rate as functions of: (a) plates space and (b) energy input

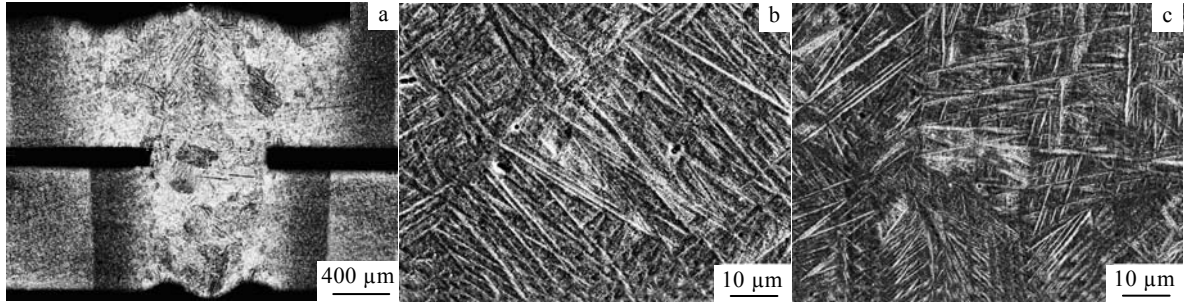


图 4 试样焊缝金相组织

Fig.4 Micrograph of welding joint in : (a) sectional graph; (b) top portion; and (c) bottom portion

缝形成典型的“网篮状”组织。图4b和4c分别为上板焊缝和下板焊缝内部组织照片。比较两图可以看出，上板焊缝内部马氏体分布更密集。这是由于上板焊缝吸收的激光能量大于下板造成的。在焊接过程中柱状晶形核长大的同时伴随着马氏体相变，大量金属蒸汽和等离子体的喷射使其对熔池的搅拌作用加剧，容易造成细小的针状马氏体的破碎或断裂，并会使生长中的枝晶破碎，造成更多的形核核心。激光能量作用越强，熔池的能量越高，其熔池搅拌作用也越强，因此马氏体针分布更加密集。

图5a, 5b分别为热影响区靠近母材和靠近焊缝一侧显微组织照片。热影响区 (HAZ) 为 $\alpha+\beta+\alpha'$ 组织，这是焊接过程中焊缝附近的金属被加热到较高温度后快速冷却造成的，该区域的针状马氏体比焊缝少，也

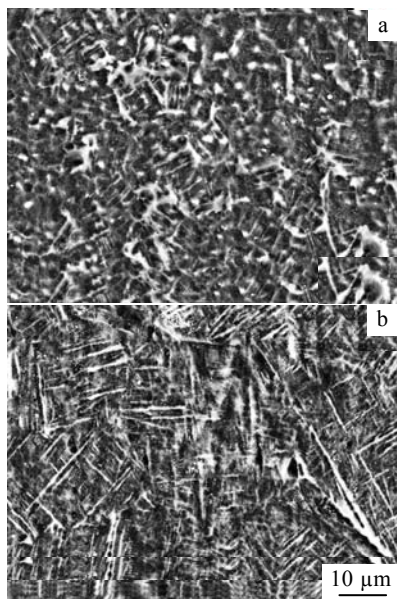


图 5 热影响区试样的显微组织

Fig.5 Micrograph of HAZ: (a) the side close to base metal and (b) the side close to fusion zone

更加细小。由于热影响区内各部分与熔池距离的不同，所受的影响也不同，靠近熔合线部分较之远离熔合线的区域晶粒更为粗大，针状马氏体数量多且更密集。

图6为母材及焊缝的透射电镜照片。母材的组织为等轴结构， β 相分布在 α 相之间。母材内存在一些位错 (图6a)，可能是板材轧制过程遗留下来的。焊缝主要由 α' 相和其间分布的 β 相组成，二次 α' 生长遇一次 α' 停止。马氏体针 α' 相内部有许多微小位错出现 (图6b)，证明 α' 相是富位错马氏体。位错迁移可以松弛变形过程中的应力，而且钛合金 α' 马氏体硬度与母材相当，因此由 α' 交织成的网篮组织具有良好的塑性和抗疲劳性能。

2.3 焊缝硬度分布

对叠焊接头截面进行显微硬度测试，结果显示：叠焊接头显微硬度从焊缝向母材逐渐降低，上板焊缝的显微硬度值略高于下板焊缝，如图7所示。马氏体 α' 本身的硬度与母材相差不大，然而，由于焊缝中马氏体组织细小，存在许多界面，界面能的增加使得焊缝整体能量上升，从而增加焊缝的硬度。而且，针状组织分布越密集，界面强化效果越显著。因此，焊缝中

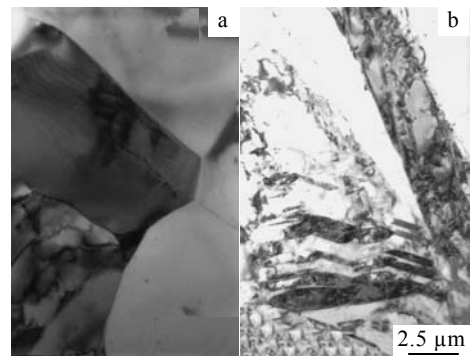


图 6 母材及焊缝透射电镜照片

Fig.6 TEM images of base metal and weld bead: (a) base metal and (b) martensite α' phase

心显微硬度高于焊缝边缘, 上板焊缝硬度略高于下板焊缝。热影响区在焊缝成形过程中晶粒有所长大, 但同样生成部分细小的马氏体组织, 使得热影响区的显微硬度也高于母材。

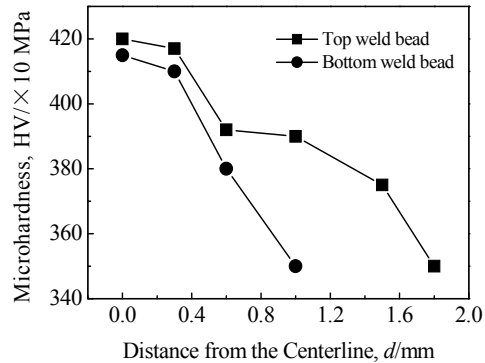


图 7 焊缝截面横向显微硬度分布

Fig.7 Microhardness of welding joint in the cross direction

3 结 论

1) 随着激光功率的升高和焊接速度的降低, 焊缝熔宽逐渐增加, 上板焊缝熔宽大于下板焊缝熔宽, 而连接焊缝处的熔宽最小。

2) 焊合率随着叠焊两板间间隙的增加或焊接线能量的升高而降低。

3) 叠焊焊缝组织为粗大的柱状晶, 内部为 α' 交织成的网篮组织, 且上板焊缝中马氏体分布更密集。热影响区中存在少量细小马氏体组织, 且呈梯度分布。

4) 细小密集针状马氏体的界面强化作用, 使得焊缝横向硬度由焊缝中心向母材逐渐降低, 上板焊缝略高于下板焊缝。

参考文献 References

- [1] Han Wenbo, Zhang Kaifeng, Wang Guofeng. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2007, 183(2~3): 450
- [2] Wang S H, Wei M D, Tsay L W. *Materials Letters*[J], 2003, 57(12): 1818
- [3] Casalino G, Curcio F, Memola Capece Minutolo F. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2005, 167(2~3): 422
- [4] Caiazzo F, Curcio F, Darrello G et al. *Journal of Materials Processing Technology* [J], 2004, 149(1~3): 546
- [5] Zhang Li, Gobbi S L, Norris I et al. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 1997, 65(1~3): 203
- [6] Wu Huiqiang(吴会强), Feng Jicai(冯吉才), He Jingshan(何景山) et al. *Journal of Aeronautical Materials(航空材料学报)*[J], 2005, 25(3): 21

Research on Microstructure and Formation Characteristic of Laser Welded Lap Joints of TC4 Titanium Alloy

Cheng Donghai¹, Huang Jihua¹, Yang Jing¹, Zhao Xingke¹, Guo Heping²

(1. University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

(2. Institute of Aerial Manufacturing Engineering Beijing, Beijing 100024, China)

Abstract: Microstructure and formation characteristic of laser welded lap joints of TC4 alloy were investigated, and a parameter named join rate ψ was introduced to evaluate the welding effect of lap welding. The results indicated: the width of weld bead increases with increasing laser power or decreasing welding velocity, the top width of weld bead is larger than the bottom width and the minimum is the middle layer. And the join rate decreases as plates space or energy input increases. Microstructure of weld bead consisted of α' martensite, and the martensite in the top portion is more concentrate than that in the bottom portion. There ate a small amount of martensite in HAZ, and distributed in gradient. For the strengthen effect of martensite, the microhardness reduces from the center of joints to base metal in cross direction, and the microhardness is higher in top weld bead.

Key words: laser lap welding; Ti-6Al-4V alloy; join rate

Biography: Cheng Donghai, Candidate for Ph.D., School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, P. R. China, Tel: 0086-10-62334859, E-mail: chengdonghaicdh@yahoo.com.cn