

TC4钛合金激光焊接接头组织与性能

杨 静¹, 程东海¹, 黄继华¹, 张 华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 100083)

摘 要: 分析不同激光焊接工艺参数下焊缝的微观组织特征, 并测试焊缝的力学性能。结果表明: TC4 钛合金激光焊接焊缝为针状马氏体 α' 组成的网篮组织和少量 α'' 相; 随着焊接热输入量的增加, 由于熔池搅拌、焊接应力、合金元素烧损等原因, 马氏体的分布更加散乱和密集; 焊接工艺参数对焊缝相组成和各相相对含量的影响均不显著。合理的焊接工艺参数下, 接头的强度高于母材。

关键词: TC4 钛合金; 激光焊; 显微组织; 性能

中图分类号: TG146.2⁺3

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2009)02-0259-04

TC4 钛合金具有优良的耐蚀性、小的密度、高的比强度及较好的韧性和焊接性等一系列优点, 在航空航天、石油化工、造船、汽车, 医药等部门都得到成功的应用^[1]。以往的研究表明, 激光焊接方法非常适合钛合金材料的焊接, 尤其在钛合金薄板及精密零件的焊接上具有广阔的应用前景^[2]。激光焊接接头的组织、性能严重影响到焊接结构件的寿命与安全性, 对其进行深入研究有重要的意义。从以往的研究来看, 钛及钛合金焊接接头组织和性能分析等方面已有报道^[3-7]。国内外学者对钛合金激光焊接接头的残余应力、断裂韧性、疲劳性能、焊缝的组织及力学性能等方面都进行了广泛而深入的研究, 关于焊接工艺参数对激光焊接焊缝成形的影响也有较多报道, 但针对焊接工艺参数对微观组织、相组成的影响研究甚少。激光焊接是在温度、化学成分及应力极不平衡的条件下发生的, 是一个十分复杂的物理化学过程, 对于不同的焊接工艺条件, 必定对应特定的接头性能与微观组织结构^[8]。本研究通过激光焊接试验, 对不同焊接工艺参数下焊接接头的微观组织进行观察, 着重分析了激光焊接工艺参数对接头显微组织和相组成的影响, 并研究在不同焊接工艺下接头的力学性能, 观察断口形貌。

1 材料及方法

试验所用材料为TC4钛合金试板, 厚度0.8 mm。采用HS-40高功率轴流CO₂激光器进行焊接, 其额定输出功率为4 kW, 光束模式为TEM01, 透射镜聚焦,

焦距 $f=190.5$ mm, 最小焦斑直径为0.4 mm。焊前用钢丝刷或砂纸打磨试样表面, 并对板面和待焊端面进行除油处理和酸洗以去除板表面的油污和氧化层。除油使用自行配制的碱洗液, 配方为5%~10%NaOH+乙醇。酸洗液配方为5%HF+30%HNO₃+H₂O。焊接过程中使用多路气体对接头及温度超过400 °C以上的区域进行全方位保护, 以防止氧化和消除等离子屏蔽的影响。

采用扫描电镜和透射电镜对焊接接头不同区域进行微观组织分析。显微组织的侵蚀采用Keller试剂: 2 mL HF+10 mL HNO₃+88 mL H₂O。透射电镜所用电解液配方为6%高氯酸+34%正丁醇+60%甲醇。母材与焊接接头的室温拉伸试验试样形状尺寸设计参考GB/T228-2002与GB/T2651-1989国家标准, 焊缝位于试样的中心。拉伸试验在MTS810试验机上进行, 最大载荷2.5 t, 加载速率0.05 mm/s; 使用Leo-1450型扫描电镜对断口形貌进行观察。

2 结果及讨论

2.1 接头显微组织分析

图1为母材与焊接接头的金相组织照片。试验所用TC4钛合金母材原始组织是由等轴的 α 和晶间分布的 β 两相组织组成, 晶粒平均尺寸在5 μ m左右。

焊缝为针状马氏体组成的网篮组织, 粗大的 β 柱状晶边界依稀可见。焊后熔合区自 β 相区快速冷却过程中, β 相来不及通过扩散转变成平衡的 α 相, 而是通过 β 相中原子作集体有规律的近程迁移而实现切变相变, 形成针状马氏体相。X射线衍射表明, 焊缝中

收到初稿日期: 2008-01-25; 收到修改稿日期: 2008-10-14

作者简介: 杨 静, 女, 1983 年生, 硕士, 北京科技大学材料与工程学院, 北京 100083, 电话: 010-62334859, E-mail: chengdonghaicdh@yahoo.com.cn

主要形成 α' 相。焊缝中针状 α' 马氏体在 β 柱状晶晶粒边界和晶粒内部同时形核长大，首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界，分割为转变的 β ，接着形成一系列相对细小的二次针状 α' ，导致焊缝形成典型的网篮状马氏体组织(图 1b)。这种网篮状组织的塑性、蠕变抗力及高温持久强度等综合性能都较好。

热影响区是由初生的 α 相和针状马氏体组成，这种组织与从 720~980 °C 下淬火的组织相似^[9]。由于热影响区的最高加热温度低，大都在 β 转变温度之下，且由于受熔合区传热的影响，冷却速度相对焊缝较低，因此该区域的针状马氏体相对于焊缝少很多，也更加细小。焊接过程中以熔合区为中心的温度梯度的存在造成热影响区组织分布的不均匀性，热影响区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 1c, d)。

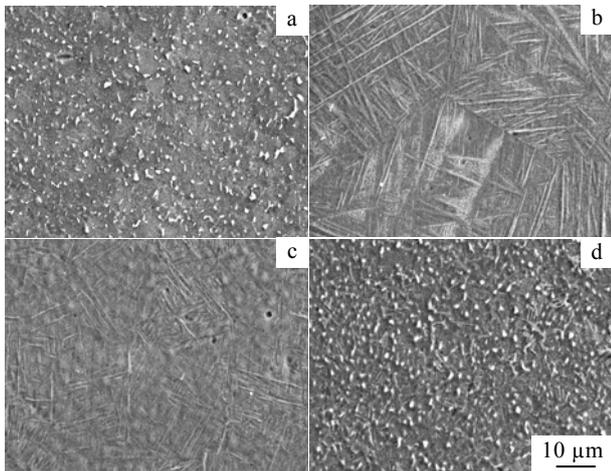


图 1 母材和焊接接头的显微组织

Fig.1 Microstructures of base metal and the welded joint: (a) base metal; (b) fusion area; (c) heat-affected zone near the fusion area; and (d) heat-affected zone far away from fusion area

2.2 焊接工艺参数对焊缝显微组织的影响

不同焊接工艺参数下焊缝的扫描电镜分析表明，柱状晶内部针状马氏体的尺寸和形态与焊接工艺参数有关(图 2a、2b)。焊接热输入较小时，马氏体多以平行的单向长针状分布，一根或若干根长针之间穿插着大量小而细的短针，呈网状分布。这种平行的单向长针状马氏体形态对应着较大的冷却速度。随热输入的增大，马氏体更加粗大，且大多以多向针的形式存在，分布更加散乱。这可能是由于熔池搅拌、焊接应力、合金元素烧损 3 方面的综合作用造成的。一方面，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易于破碎，造成更多的形核核心。此外，大热能量也会促使马氏体提前形核，增加形核核心，大量马氏体针交互生长造成分布更加散乱的网篮状组织。另一方面，焊接时，高温区材料的热膨胀受周围材料的约束而使其受到焊接应力的作用，焊接热输入量越大，造成的这种焊接应力也越大，此焊接应力的存在相当于给马氏体相变一个外加的应力，一方面容易使成长中的马氏体针断裂，另一方面容易诱发马氏体相变，从而打乱单向针的生长形态。此外，伴随热输入的增大，熔池最高加热温度上升，合金元素烧损严重，造成马氏体转变开始温度 M_s 的相对升高，形成的马氏体针更加粗大，大线能量焊缝冷却速度减小，过冷度的减小抑制马氏体针的单向生长。焊缝结构中多向分布的晶粒形态对提高接头的性能有利^[10]，但是线能量的增大又会使焊缝中得到粗大的柱状晶，大大增加接头脆性，影响接头性能。当线能量选择适当时，一方面可以使得马氏体的排列接近杂乱无章状态，焊缝变形更加均匀，且有效阻碍裂纹的传播，一方面相对于大线能量焊接时晶粒更加细小，对于焊缝的塑性有所改善，同时可以避免小线能量下的咬边缺陷。

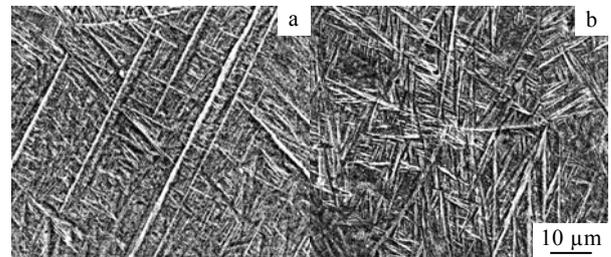


图 2 不同焊接工艺参数下焊缝的微观组织

Fig.2 Microstructures of the welded joint with different welding parameters: (a) $p=1300$ W, $v=3.0$ m/min and (b) $p=1300$ W, $v=2.5$ m/min

2.3 工艺参数对相组成的影响

图 3 所示为不同焊接工艺参数下焊缝的 XRD 谱图。可见，TC4 钛合金激光焊接焊缝主要由 α' 相和 β 相组成， β 相的相对含量远远小于 α' 相，焊缝中没有其他析出相。在钛合金的快冷组织中，一定条件下还会有 ω 相的生成，造成合金强度、硬度和弹性模量的提高，而塑性却急剧降低，但在本实验条件下焊缝中并没有发现 ω 相的生成。不同焊接工艺参数下焊缝的

XRD 分析结果显示, 焊接工艺参数的改变对相组成基本没有影响, 各相的相对含量随焊接线能量的变化也不显著。

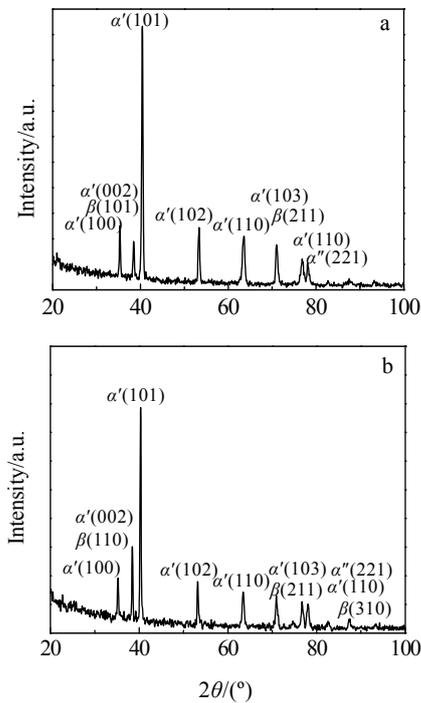


图3 不同焊接工艺参数下焊缝的X射线衍射图谱

Fig.3 X-ray diffraction pattern of the weld metal: (a) $p=1300$ W, $v=3.0$ m/min and (b) $p=1300$ W, $v=2.5$ m/min

2.4 TEM 分析

图4为母材和焊缝区域的透射电镜照片。母材的组织为等轴结构, β 相分布在等轴的 α 相之间。母材 α 相内位错密度极低, 在 β 相内存在大量的亚晶结构(图4a、b)。焊缝主要由 α' 相和其间分布的 β 相组成, 焊缝区的组织为呈一定角度分布的马氏体集束(图4c), 同一集束内马氏体针的取向差很小。焊缝内位错密度高于母材, 局部能发现呈网状分布的高密度位错, 高密度位错在高温、高应力作用下更容易移动, 当位错排列成稳定的小角度晶界时形成完整的亚结构。此外, 大量的位错表明, α' 相变的应力松弛主要是通过位错的形成和迁移来完成的。焊接过程中还伴随极少量斜方马氏体 α'' 的生成(图4d)。在光学显微镜下 α'' 相与 α' 相都显示马氏体浮雕效应, 很难区分, 但在透射电镜下可以发现确实有 α'' 相的生成, 从照片中可以清晰地看到 α'' 具有密集的李晶结构。当焊缝中这种斜方马氏体数量增多时, 将会导致焊缝强度、硬度以及屈服强度的下降。

2.5 焊接接头拉伸力学性能

当焊接线能量大于 24 J/mm 时, 通过对拉伸试样

的断裂部位观察, 发现试样均断裂于离焊缝中心较远的母材上, 说明此时焊缝的抗拉强度与母材等强或高于母材, 这归因于焊缝处形成的大量针状马氏体。延伸率计算结果表明, 激光焊接接头延伸率约为母材的 $67\% \sim 78\%$, 明显低于母材, 这主要是由于焊缝先共析粗大的 β 晶粒而严重增加焊接接头的脆性。当线能量小于 24 J/mm 时, 由于焊缝咬边缺陷严重造成大的应力集中, 试样均断于焊缝区。由于热输入的减小导致 β 晶粒尺寸粗大现象不明显, 延伸率可达母材的 87% 。微观断口形貌观察发现, 母材和焊缝的微观断口形貌呈韧窝断口特征(图5)。但焊缝的断口韧窝较小, 这说明焊缝的韧性是明显低于母材的, 这与延伸率的试验结果相吻合。

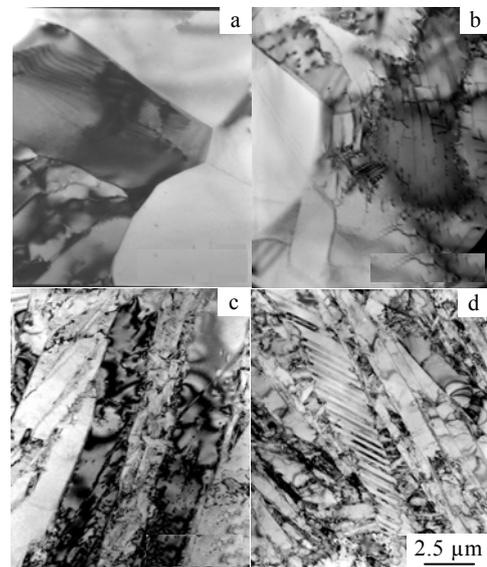


图4 母材与焊缝的TEM照片

Fig.4 TEM images of the base metal and weld bead: (a) the base metal; (b) the subcrystalline structure in β phase; (c) martensite α' ; and (d) the α'' phase in weld bead

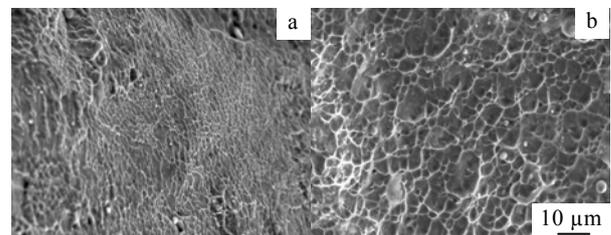


图5 试样室温拉伸断口形貌

Fig.5 The morphologies of fracture surface of (a) the weld, (b) the base metal

3 结 论

1) TC4钛合金母材原始组织由 α 和 β 两相组成, 焊缝主要为针状马氏体 α' 组成的网篮组织, 此外焊缝中还含有少量的 α'' 相。热影响区组织是由初生的 α 相和马氏体 α' 相组成, 热影响区组织分布不均匀, 靠近熔合线的区域晶粒更为粗大, 针状马氏体数量多且更加密集。

2) 随着焊接热输入量的增加, 马氏体的形态由平行的单向长针状分布转变为多向针的分布形态, 马氏体更加粗大, 分布更加散乱。焊接工艺参数的改变对相组成基本没有影响, 各相的相对含量随焊接线能量的变化也不显著。

3) 焊缝区的组织为呈一定角度分布的马氏体集束, 同一集束内马氏体针的取向差很小。焊缝内位错密度高于母材。焊接过程中还伴随极少量斜方马氏体 α'' 的生成, 针状的 α'' 具有密集的李晶结构。

4) 焊接线能量大于 24 J/mm 时, 试样均断裂于离焊缝中心较远的母材上, 接头延伸率约为母材的 67%~78%。当焊接线能量小于 24 J/mm 时, 试样均断于焊缝区, 但接头的延伸率可达母材的 87%。母材和焊缝的微观断口形貌都显示韧窝断口特征, 但焊缝的断口韧窝相对较小。

- [1] Turner M W, Crouse P L, Li L. *Applied Surface Science*[J], 2006, 252(13): 4792
- [2] Peters M, Williams J C. *Metallurgical Transactions*[J], 1984, 15A(8): 1589
- [3] Shinoda T, Matsunaga K, Akaishi T. *Journal of Light Metal Welding and Construction*[J], 1990, 28 (2): 1
- [4] Liu J, Watanabe I, Yoshida K *et al.* *Dental Materials*[J], 2002(18): 143
- [5] Caiazza F, Curcio F, Darrello G *et al.* *Mechanical and Morphological Characterization*[J], 2004, 149(1~3): 546
- [6] Kishore Babu N, Ganesh Sundara Raman S, Mythili R *et al.* *Materials Characterization*[J], 2007, 58: 581
- [7] Mazumder J, Steen Wm. *Metallurgical Transactions A*[J], 1982, 13A(5): 865
- [8] Zhao Hui(赵 晖), Han Zhong(韩 忠), Chen Xiaofeng(陈晓风). *Transactions of the China Welding Institution*(焊接学报) [J], 2005, 26(1): 78
- [9] Wang Xinying(王新英), Xie Chenmu(谢成木). *Special Casting & Nonferrous Alloys*(特种铸造及有色合金)[J], 2001, 12(6): 16
- [10] Han Z, Zhao H, Chen X F *et al.* *Materials Science and Engineering*[J], 2008, 227 A: 38

参考文献 References

Microstructure and Mechanical Properties of Ti-6Al-4V Joints by Laser Beam Welding

Yang Jing¹, Cheng Donghai¹, Huang Jihua¹, Zhang Hua¹, Zhao Xingke¹, Guo Heping²

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

(2. Beijing Aeronautical Manufacturing Technology Research Institute, Beijing 100083, China)

Abstract: The microstructure of Ti-6Al-4V joints by laser beam welding with different welding parameters was studied, and the tensile properties were investigated. The microstructure of welding seam by laser beam welding consists mainly of α' martensite phase as well as some α'' phase. By increasing the weld heat input, the distribution of martensite becomes more dispersive and glomerate due to the molten pool stirring, the welding stress and the burning loss of alloy elements. However, the welding parameters have no obviously effects on both the phase composition and the phase ratio. The tensile strength of joints is higher than basal metal when welded with reasonable parameters.

Key words: Ti-6Al-4V alloy; laser beam welding; microstructure; property

Biography: Yang Jing, Master, 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