

Ti - 24Al - 17Nb 合金的激光焊接

吴爱萍 邹贵生 张红军

(清华大学机械工程系 北京 100084)

王国庆 谢美蓉

(首都航天机械公司 北京 100076)

文 摘 研究了 Ti - 24Al - 17Nb 合金的激光焊接及其接头的力学性能。研究表明,连续激光氦气双面保护可以获得保护效果可靠、无缺陷、成型良好的焊接接头。焊接热输入增大不利于接头的纵向弯曲塑性,而接头的横向拉伸强度与母材基本相同,塑性可以接近母材的塑性,达到 14 % ~ 17 %。

关键词 Ti₃Al 基合金,激光焊接,接头性能

Laser Welding of Ti-24Al-17Nb Alloys

Wu Aiping Zou Guisheng Zhang Hongjun

(Tsinghua University Beijing 100084)

Wang Guoqing Xie Meirong

(Capital Aerospace Machinery Corporation Beijing 100076)

Abstract Laser welding of Ti-24Al-17Nb alloys was conducted to investigate the weldability and the mechanical properties of the joints. The results indicate that defect-free joints with excellent appearance could be acquired by continuous laser welding with flowing helium from top and back sides. The bending ductility of the joints would decrease with the heat input increasing. The tensile strength of the joints is equal to that of the base material and the tensile ductility could reach 14 % ~ 17 % , which is near to that of the base material.

Key words Ti₃Al alloy, Laser welding, Joint mechanical property

1 前言

Ti₃Al 基合金具有良好的高温性能,其密度小、弹性模量高,与钛合金相比具有较高的使用温度,与镍基高温合金相比可减轻质量 40 %,是航空航天中温段耐热结构材料的有力竞争者^[1~5]。Ti₃Al 基合金的焊接性能影响其应用及其性能的发挥,虽然国外已开展一些 Ti₃Al 基合金的焊接性研究,但主要工作集中在 Ti - (24 ~ 25) Al - 11Nb(原子分数,下同)系列^[6~12]。随着对 Ti₃Al 基合金研究的深入,近年又开发了综合性能,尤其是室温塑性更好的高钽

Ti₃Al 基合金^[13~18],其焊接性能研究还鲜有报道。本文采用激光焊接方法,研究激光焊接工艺对 Ti - 24Al - 17Nb 合金焊缝成型和接头性能的影响规律,为 Ti₃Al 基合金的焊接应用和合理选择激光焊接工艺奠定基础。

2 材料与方法

2.1 母材

试验所用母材的加工过程是:真空自耗 + 真空凝壳熔炼; /B₂ 相区开坯; ₂ + B₂ 相区自由锻造; ₂ + B₂ + O 相区轧制; 最后进行 980 °C × 1 h 空冷的热

收稿日期:2001 - 08 - 26

吴爱萍,1963 年出生,博士,主要从事新材料与特种材料的连接研究和数值模拟技术在焊接中的应用研究工作

处理。母材的微观组织为 $\alpha_2 + B_2 + O$ 三相等轴组织。焊接所用的试板原始尺寸为 160 mm × 90 mm × 1.5 mm, 其成分及主要力学性能见表 1、表 2。

表 1 母材的化学成分

Tab.1 Chemical compositions of the base material
%(质量分数)

Al	Nb	O	N	H	C	Ti
13.2	31.4	0.056	0.015	3.1×10^{-4}	0.03	余量

表 2 母材的主要力学性能

Tab.2 Mechanical properties of the base material

室温			650		
0.2 /MPa	b /MPa	%	0.2 /MPa	b /MPa	%
865	1 060	22	565	780	23

2.2 激光焊接

焊接所用的激光器为额定功率 3 kW 的快速轴流 CO₂ 激光器。焊接时采用双面流动氦气保护。焊前去除母材表层的氧化皮并经丙酮去油、酒精去水吹干后使用。母材去除氧化皮后厚度为 1.1 mm ~ 1.3 mm。

2.3 接头力学性能试验方法

2.3.1 接头三点弯曲试验

采用三点弯曲试验检测激光焊接接头弯曲时裂纹的起裂应变和断裂应变。三点弯曲试样尺寸为 30 mm × 10 mm × 1 mm, 焊缝方向平行于母材轧向和弯曲时的拉伸方向, 试样表面磨至无划痕。弯曲试验所用的卡具见图 1。

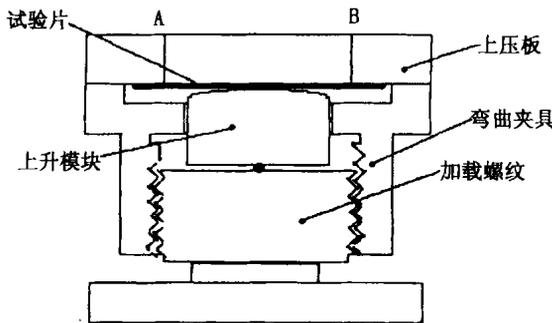


图 1 三点弯曲试验卡具示意图

Fig.1 Sketch of the clamp in three-point bending test
模块的半径为 7.5 mm, 试样上表面中心部位所受
宇航材料工艺 2001 年 第 6 期

的拉伸应变 可通过模块的上升距离来计算。小于 2% 时加载间隔为 0.5%, 超过 2% 后加载间隔为 0.25%, 每次加载后均用 100 倍的工具显微镜检查拉伸面, 将裂纹出现时的应变称为起裂应变, 断裂时的应变为断裂应变。

2.3.2 接头拉伸试验

拉伸试样尺寸及其在试板中的取样方式见图 2。试验温度为 20, 拉伸试验按 GB/T 228—87 标准进行。

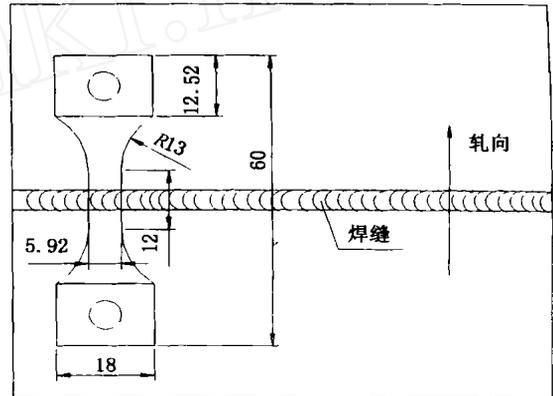


图 2 拉伸试样尺寸及其在试板中的取样方式

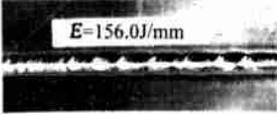
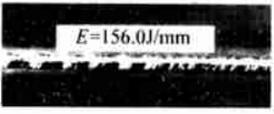
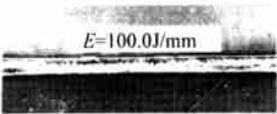
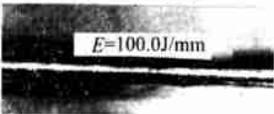
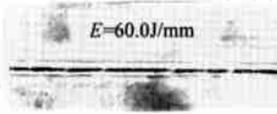
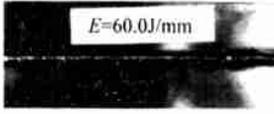
Fig.2 Dimension of the tensile sample and
its sampling location

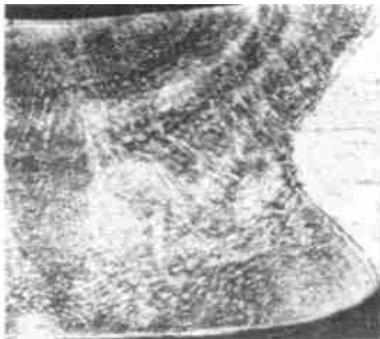
3 结果及分析与讨论

3.1 焊缝的成型情况

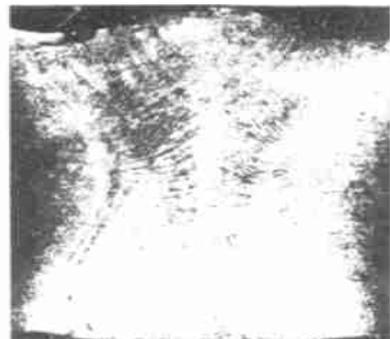
不同工艺参数下激光焊接接头的正、背面成型情况如表 3 中的图所示。在试验所用材料的板厚及工艺参数范围内 (连续激光: 功率 650 kW ~ 2 150 kW, 扫描速度 25 cm/min ~ 537.5 cm/min), 扫描速度过快时背面容易出现咬边和飞溅; 扫描速度过慢时, 正面容易出现咬边和下塌。用脉冲激光焊接时, 接头的正面和背面成型均不理想, 飞溅和咬边较严重。对于厚度为 1.1 mm ~ 1.3 mm 左右的 Ti₃Al 基合金板, 用连续激光功率为 1 000 W ~ 2 000 W, 扫描速度为 64 cm/min ~ 380 cm/min 时可以获得成型良好的接头。不同工艺参数下接头横截面的焊缝形貌如图 3 所示, 所有焊缝均已熔透。名义热输入 (激光功率 / 扫描速度) 大时焊缝熔宽较大, 1 535 J/cm 热输入时熔宽达 3.5 mm 左右, 而 316 J/cm 的热输入熔宽只有 1 mm 左右。正面的熔宽比背面大。所有接头及焊缝中均无裂纹、气孔及夹杂等缺陷。

表 3 连续激光焊接接头的成型情况
Tab.3 Appearance of laser welding joints

焊接工艺参数	焊缝正面成型	焊缝背面成型
功率:650 W 扫描速度:25.4 cm/min 热输入:1 535 J/cm	 E=156.0J/mm	 E=156.0J/mm
功率:1 000 W 扫描速度:63.5 cm/min 热输入:945 J/cm	 E=100.0J/mm	 E=100.0J/mm
功率:1 500 W 扫描速度:150 cm/min 热输入:600 J/cm	 E=60.0J/mm	 E=60.0J/mm
功率:2 000 W 扫描速度:380 cm/min 热输入:315.8 J/cm	 E=31.6J/mm	 E=31.6J/mm



(a) 热输入 1 535 J/cm



(b) 热输入 945 J/cm



(c) 热输入 600 J/cm



(d) 热输入 316 J/cm

图 3 焊接接头横截面的焊缝形貌 50 ×

Fig. 3 Optical microstructures of the joints
上半部位为焊缝正面,下半部位为焊缝反面。

3.2 接头弯曲试验结果及其分析

表4是在不同工艺条件下焊接接头的三点纵向弯曲试验结果。可以看出,名义热输入为600 J/cm的接头,起裂和断裂应变均比热输入为945 J/cm和1535 J/cm的接头还低,而且断裂应变与起裂应变相同。所有裂纹均起裂于焊缝区中。

表4 激光焊接接头三点纵向弯曲试验结果*

Tab.4 Three-point bending test results of the joint

E /J cm ⁻¹	起裂 / %	断裂 / %
240	4.30	>6.67
316	4.254	>6.43
600	0.787	0.787
945	1.735	>3.53
1535	1.522	2.238
母材	>7.06	>7.06

* > 表示到此应变值时未出现裂纹或断裂。

在光学显微镜和扫描电镜下观察纵向弯曲后表面的裂纹形貌与分布,发现裂纹主要是穿晶裂纹,热输入较大时裂纹较长,热输入为600 J/cm时裂纹十分平直。

对于成分一定的高Nb-Ti₃Al基合金,影响其塑性的主要因素包括相组成、晶粒大小以及晶粒形态^[4,17~19]。合适的 $\gamma_2 + O + B_2$ 三相组织、细晶与等轴晶均有利于塑性的提高。金相分析和相结构鉴定结果表明,在本试验的激光焊接条件下焊缝与近缝区均由B₂相组成。由于焊缝是柱状晶凝固组织,其变形协调性不如热影响区(HAZ)和母材,焊缝的组织形态最不利于纵向弯曲(纵向弯曲时可以观察到焊缝的变形最不均匀),裂纹往往先在焊缝中出现,而后再向HAZ和母材中扩展。由于焊缝及近缝区均为B₂组织,因此影响它们之间塑性差别的因素主要是晶粒大小和形态,对于焊缝的凝固组织,胞晶大小与柱状晶的方向性对塑性的影响显著。激光焊接时,热输入提高,晶粒和胞晶尺寸增大,因此热输入提高,总趋势是使塑性降低。而热输入为600 J/cm的焊缝,由于其明显的柱状晶方向性(而且正好垂直于最大拉伸应变方向),使其纵向弯曲塑性比热输入为945 J/cm和1535 J/cm接头的塑性还略低一些。

虽然焊缝及近缝区均由塑性相对较好的B₂相
宇航材料工艺 2001年 第6期

组成,但由于焊缝组织是柱状凝固组织,且晶粒比母材晶粒粗大,因此其变形协调与均匀性不如母材,弯曲试验时很容易发生变形不均匀而使局部产生很大的变形导致裂纹出现,使其宏观起裂应变低于母材。但当焊缝晶粒细小且方向性不明显时,虽然其产生裂纹的宏观应变低于母材,但裂纹进一步扩展却也比较困难,因此其裂纹均较短,断裂应变较高,与母材一样,纵向弯曲时应变接近7%也未发生断裂(在此卡具尺寸一定时)。

3.3 接头横向拉伸试验结果及其分析

接头横向拉伸试验结果见表5。图4是几种试样的断裂情况。拉伸试验时所有接头的断裂都发生在母材中。结果表明,接头横向拉伸强度均与母材相当,塑性低于母材。熔宽较小的接头塑性可以达到14%~17%。在该焊接条件下,焊接工艺对接头横向拉伸强度基本上没有影响。

表5 激光焊接接头横向拉伸试验结果

Tab.5 Results of the transverse tensile test

试样 类型	抗拉强度 σ/MPa	断后伸长率 / %
母材	990	21
焊 接	$E = 316$ J/cm	998
接	$E = 400$ J/cm	1020
接	$E = 600$ J/cm	930
头	$E = 945$ J/cm	925
		15
		14
		17
		12

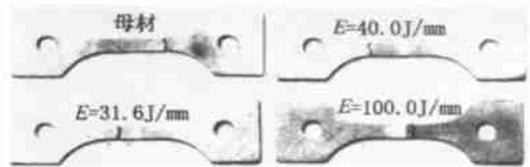


图4 接头横向拉伸时几种试样的断裂情况

Fig.4 Locations of fracture during transverse tensile test

激光焊接接头进行横向拉伸时,对于受力而言,母材、焊缝及HAZ为串联关系,而且焊缝及热影响区相对较窄。另外硬度结果表明焊缝、HAZ和母材的维氏硬度差别不大,都在37.24 MPa~41.16 MPa范围内,因此接头是软硬接近的组合。横向拉伸加载时,焊缝金属因其柱状凝固组织而不易变形,变形

主要集中在母材中,断裂也发生在母材中,所以强度值与母材基本相同。焊缝较窄的接头,由于标距内焊缝所占的比例较小,拉伸加载发生的塑性变形量与完全由母材组成的试样的变形量相差不大,因此其接头的横向拉伸塑性值与母材塑性值相差不大。

4 结论

(1)对所用的 Ti - 24Al - 17Nb 合金板材,用连续激光双面氦气保护下焊接,工艺条件合适时可以获得保护效果满意、无焊接缺陷、成型良好的接头。

(2)焊接名义热输入较大时,晶粒和晶胞尺寸较大,使接头的纵向弯曲塑性降低;而柱状晶方向性明显时,尤其是与受力方向垂直时,对纵向弯曲塑性更为不利。

(3)由于激光焊缝较窄且硬度与母材接近,接头横向拉伸时断裂发生在母材中,接头强度基本与母材相同,塑性低于母材,但可以达到 14% ~ 17%。

参考文献

- 1 任家烈,吴爱萍. 先进材料的连接. 北京:机械工业出版社,2000:272 ~ 273
- 2 仲增墉,韩雅芳. 高技术金属间化合物高温材料的研究进展. 钢铁研究学报,1997;9Z:1 ~ 8
- 3 邹敦叙,李世琼,仲增墉. 航天航空理想新材料 Ti₃Al 和 TiAl 金属间化合物合金的研究开发新进展. 钢铁研究学报,1997;9Z:45 ~ 50
- 4 李文,王晓光,靳学辉. Ti - Al 系金属间化合物脆性研究述评. 物理,1998;27(11):676 ~ 679,694
- 5 秦高梧,郝士明. Ti - Al 系金属间化合物. 稀有金属材料与工程,1995;24(2):1 ~ 7
- 6 David S A, Horton J A, Godwin G M et al. Weldability and microstructure of a titanium aluminide. Welding Journal, 1990;69(4):133 - s ~ 140 - s
- 7 Baeslack III W A, Mascarella T J, Kelly T J. Weldability of a titanium aluminide. Welding Journal, 1989;68(12):483 - s ~ 498 - s
- 8 Geslak M J, Headley T J, Baeslack III W A. Effect of thermal processing on the microstructure of Ti - 26Al - 11Nb: ap-

plications to fusion welding. Metallurgical Transactions A, 1990;21A(5):1273 ~ 1286

9 Baeslack III W A, Phillips D, Scarr G K. Characterization of the weld heat-affected zone in an alpha-two titanium aluminide. Materials Characterization, 1992;28:61 ~ 73

10 Martin G S, Albright C E, Jones T A. An evaluation of CO₂ laser beam welding on a Ti₃Al - Nb alloy. Welding Journal, 1995;74(2):77 - s ~ 82 - s

11 Baeslack III W A, Broderick T. Effect of cooling rate on the structure and hardness of a Ti - 26at %Al - 10Nb - 3V - 1Mn titanium aluminide. Scripta Metallurgica et Materialia, 1990;24:319 ~ 324

12 Gould J E, Stotler T V. Application of flash welding to a titanium aluminide alloy-microstructural evaluations. Transactions of the ASME/ Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1993;115:177 ~ 183

13 Ying Wu, Zezhuang Yang, Guiming Song. The formation mechanism of the O phase in a Ti₃Al - Nb alloy. Intermetallics, 2000;8:629 ~ 632

14 Zhang J W, Li S Q, Zou D X, Ma W Q, Zhong Z Y. Processing and microstructure control of (α + B₂ + O) alloy sheet in Ti - Al - Nb system. Intermetallics, 2000;8:699 ~ 702

15 张建伟,李世琼,邹敦叙等. Ti - 25Al - 17Nb - 1Mn 合金的微观组织及相转变研究. 钢铁研究学报,1997;9Z:174 ~ 178

16 Muraleedharam K, Gogia A K, Nandy T K, Banerjee D, Lele S. Transformations in a Ti - 24Al - 15Nb alloy: part I: phase equilibria and microstructure. Metallurgical Transactions A, 1992;23A(2):401 ~ 415

17 张建伟,张继,邹敦叙,李世琼,张志宏. 热机械处理对 Ti₃Al 基金板条组织形貌及室温拉伸性能的影响. 钢铁研究学报,1997;9Z:24 ~ 29

18 Imayev R M, Gabdullin N K, Salishchev G A, Senkov O N, Imayevan V M, Froes F H. Effect of grain size and partial disordering on ductility of Ti₃Al in the temperature range of 20 ~ 600 °C. Acta Mater., 1999;47(6):1809 ~ 1821

19 陈国良,林均品著. 有序金属间化合物结构材料物理金属学基础. 北京:冶金工业出版社,1999