

# 不同热处理状态的 $Ti_2AlNb$ 合金激光焊接接头组织与性能

刘博<sup>1</sup>, 雷正龙<sup>2\*</sup>, 周恒<sup>2</sup>, 汪宏辉<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 中国石油化工股份有限公司天然气分公司, 北京 100029;

<sup>2</sup> 哈尔滨工业大学先进焊接与连接国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001

**摘要** 研究了热轧态、1080 °C/40 min/水冷热处理(HT1)和 980 °C/3 h/油冷热处理(HT2)Ti-22Al-27Nb 合金板材的激光焊接接头组织与力学性能。在激光功率为 1500 W、焊接速度为 1 m/min 的工艺参数下得到成形良好的焊缝。热轧态、HT1 和 HT2 板材的组织分别为 B2+O+ $\alpha_2$  相、B2 相、B2+O+ $\alpha_2$  相。热轧态和 HT2 板材接头的热影响区组织从熔合线到母材方向依次为 B2 相区、B2+ $\alpha_2$  相区和 B2+O+ $\alpha_2$  相区, 而 HT1 板材接头的热影响区组织为单一的 B2 相。热轧态板材接头在室温和 650 °C 下的抗拉强度分别为 1023 MPa 和 675 MPa, 延伸率分别为 5.48% 和 2.56%, 而 HT2 板材接头的抗拉强度分别为 860 MPa 和 680 MPa, 延伸率分别为 7.04% 和 4.97%。

**关键词** 激光光学; 激光焊接;  $Ti_2AlNb$  基合金; 热处理状态; 微观组织; 力学性能

中图分类号 TG456.7

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.101404

## Microstructures and Properties of Laser Welded $Ti_2AlNb$ -Based Alloy Joints Under Different Heat Treatment States

Liu Bo<sup>1</sup>, Lei Zhenglong<sup>2\*</sup>, Zhou Heng<sup>2</sup>, Wang Honghui<sup>2</sup>

<sup>1</sup> China Petroleum & Chemical Corporation, Gas Company, Beijing 100029, China;

<sup>2</sup> State Key Laboratory of Advanced Welding and Joining, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China

**Abstract** The microstructures and mechanical properties of laser welded Ti-22Al-27Nb alloy sheet joints are investigated under hot rolling, heat treatment of 1080 °C/40 min/water-cooling (HT1), and heat treatment of 980 °C/3 h/oil-cooling (HT2). The well-formed welds are obtained with the process parameters of laser power of 1500 W and welding speed of 1 m/min. The microstructures of hot rolled, HT1 and HT2 sheet joints are B2+O+ $\alpha_2$  phase, B2 phase, and B2+O+ $\alpha_2$  phase, respectively. From the fusion line to the base metal, the microstructures of heat affected zones for hot rolled and HT2 sheet joints are the B2, B2+ $\alpha_2$ , and B2+O+ $\alpha_2$  phase zones, respectively, however, those of HT1 sheet joints are only single B2 phase. The tensile strengths of hot rolled sheet joints at room temperature and 650 °C are 1023 MPa and 675 MPa, and the elongations are 5.48% and 2.56%, respectively. In contrast, the tensile strength of HT2 sheet joints are 860 MPa and 680 MPa, and the elongations are 7.04% and 4.97%, respectively.

**Key words** laser optics; laser welding;  $Ti_2AlNb$ -based alloy; heat treatment states; microstructure; mechanical properties

**OCIS codes** 140.3390; 140.3460; 140.3510; 140.3590

## 1 引言

$Ti_2AlNb$  基合金具有比强度高、比刚度高、断裂

韧性好、高温抗氧化、热膨胀系数低等优点, 这种轻质耐高温材料在航空航天领域的应用越来越广泛, 得到了各国研究人员的重视, 具有广阔的应用前

收稿日期: 2018-10-31; 修回日期: 2018-11-30; 录用日期: 2018-12-21

基金项目: 黑龙江省博士后科研启动金资助(LBH-Q15038)

\* E-mail: leizhenglong@hit.edu.cn

景<sup>[1-2]</sup>。Ti-22Al-27Nb 合金是 Ti<sub>2</sub>AlNb 基合金的一种,其组织由 B2 相(体心立方结构)、O 相(有序正交结构)和  $\alpha_2$  相(密排六方结构)组成<sup>[3]</sup>,是一种力学性能优异的材料。

为了拓展 Ti<sub>2</sub>AlNb 基合金的应用,焊接技术的研究工作是其应用推广的关键技术之一。目前国内学者针对 Ti<sub>2</sub>AlNb 基合金的焊接技术的研究主要集中于激光焊<sup>[4]</sup>、电子束焊<sup>[5]</sup>、搅拌摩擦焊<sup>[6]</sup>、钎焊<sup>[7]</sup>等领域。激光焊接技术具有能量密度高<sup>[8]</sup>、热输入小<sup>[9]</sup>、焊接速度快<sup>[10]</sup>等优点,因此, Ti<sub>2</sub>AlNb 基合金的激光焊接技术具有很高的研究价值。Ti<sub>2</sub>AlNb 基合金的激光焊接技术的研究热点主要集中于焊接组织与性能的关系,鲜有学者研究不同热处理板材的焊接组织与性能的关系。但是 Ti<sub>2</sub>AlNb 基合金的组织演化与热处理工艺的选择密切相关,通过改变材料组织状态可以有效地改变接头的力学性能。Ti<sub>2</sub>AlNb 基合金的焊接接头的脆性已经得到国内外学者广泛认可<sup>[11-12]</sup>。为了提高焊接接头的塑性性能,通过改变焊接板材的组织形态来提高焊接接头的塑性变形能力具有重要的意义。

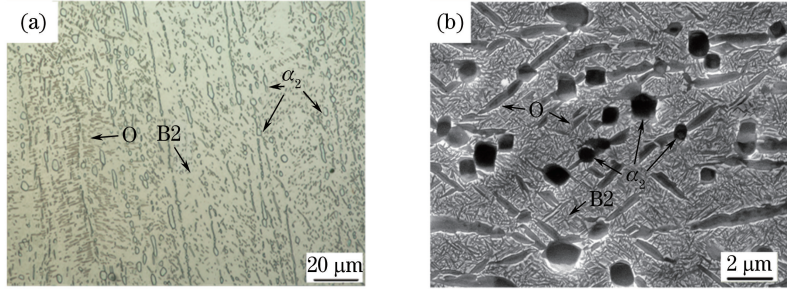


图 1 Ti-22Al-27Nb 合金的微观组织。(a)金相微观组织;(b) SEM 图

Fig. 1 Microstructure of Ti-22Al-27Nb alloy. (a) Metallographic microstructure; (b) SEM image

试验设备采用光纤激光器(YLS-5000, IPG 光电公司,美国),最大输出功率为 5000 W,输出波长为 1060 nm。焊接过程采用试板正面和背面同时保护的方式,正面和背面的保护气流量分别为 15 L/min 和 5 L/min,保护气体为高纯氩气。为得到成形良好的焊缝,焊接参数可选为激光功率 1500 W,焊接速度 1 m/min、离焦量 0 mm。热处理试验所采用的高温热处理炉(SX-2-10-13 箱式电阻炉,无锡建仪实验器材有限公司,无锡)的额定功率为 10 kW,额定温度为 1300 °C。为得到单一的 B2 相板材和部分  $\alpha_2$  相溶解于晶内的板材,分别进行 1080 °C 下保温、40 min 后水冷淬火(HT1)和 980 °C 下保温、3 h 油冷淬火处理(HT2)。由于钛合金在

本文主要研究 3 种组织状态的 Ti-22Al-27Nb 合金板材的激光焊接组织与性能的关系,分别是热轧态[B2 + O(针状) +  $\alpha_2$ (棒状,晶内)]、1080 °C/40 min/水冷态(HT1, B2 相)和 980 °C/3 h/油冷态[HT2, B2 + O(细小的棒状) +  $\alpha_2$ (晶界不连续析出、晶内部分溶解)],分析热处理过程和焊接过程中 Ti-22Al-27Nb 合金的组织演变规律,研究力学性能与组织之间的内在关系,探索出可以提高激光焊接接头塑性的板材组织状态。

## 2 研究方法

试验材料为 2 mm 厚的 Ti-22Al-27Nb 合金板材,合金的主要成分如表 1 所示。Ti-22Al-27Nb 合金的微观组织主要由 B2、O 和  $\alpha_2$  相组成,针状的 O 相和棒状的  $\alpha_2$  相均匀地分布在 B2 相基体上,如图 1 所示,其中 SEM 表示扫描电子显微镜。

表 1 Ti-22Al-27Nb 合金化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical compositions of Ti-22Al-27Nb alloy (mass fraction, %)

Element	Al	Nb	V	O	N	H	Ti
Content	10.62	45.22	5.42	≤0.08	≤0.02	≤0.01	Bal.

高温下极易与空气中的气体发生反应,为防止空气中的气体造成 Ti<sub>2</sub>AlNb 的性能下降,将试件密封在真空的玻璃管中进行热处理试验。

组织分析的试验件采用线切割切成 5 mm × 3 mm 的试样,依次使用 60 #、200 #、240 #、400 #、600 # 和 800 # 的金刚石砂纸打磨。然后采用电解抛光的方式进行抛光,抛光液为甲醇:正丁醇:高氯酸体积比为 6:3:1 的混合溶液。在液氮冷却的条件下,采用抛光电流为 1 A、抛光电压为 20 V 的参数进行抛光。组织观察分别在金相显微镜(VHX-1000E, Keyence, 日本)和场发射扫描电子显微镜(Quanta-200, FEI 公司,美国)上进行,扫描电子显微镜的观察模式采用二次电子模式。接头的室

温和 650 °C 力学性能分别在拉伸试验机 (Instron 5569, 扬州中朗, 扬州) 和高温拉伸试验机 (Instron 5500R, 扬州中朗, 扬州) 上进行, 室温和 650 °C 拉伸

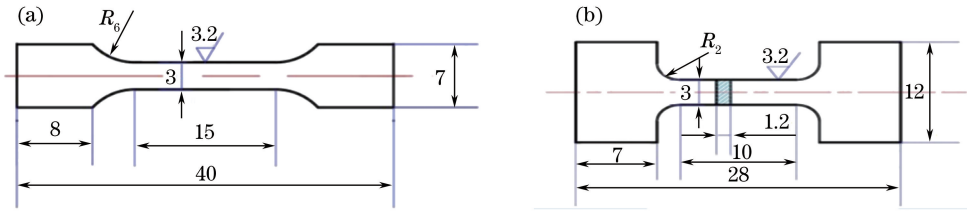


图 2 拉伸试样尺寸。(a) 室温; (b) 650 °C

Fig. 2 Size of tensile specimen. (a) Room temperature; (b) 650 °C

## 3 结果与讨论

### 3.1 热轧态板材激光焊接接头组织

Ti-22Al-27Nb 合金的热轧制板材的组织存在 B2 相、O 相和  $\alpha_2$  相 3 种不同的相结构。Ti-22Al-27Nb 合金的激光焊接焊缝组织为单一的 B2 相, 液态金属冷却后首先进入了 B2 相区, 由于激光焊接熔池的冷却速度可到 500 K/s 以上<sup>[13-14]</sup>, 较快的冷却速度严重抑制了 B2 相向 O 相和  $\alpha_2$  相的转变, 因此 B2 相得以保留至室温状态。焊缝的晶粒形态为粗大的柱状晶, 与母材的晶粒保持着良好的联生结晶的位向关系, 如图 3 所示。

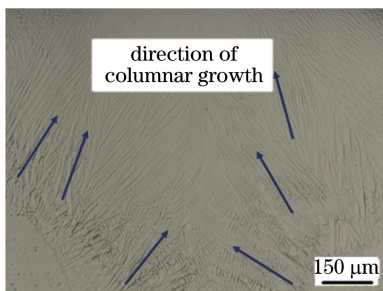


图 3 热轧制板材的激光焊接接头组织

Fig. 3 Microstructure of laser welded sheet joint under hot rolling

图 4(a) 为热轧态 Ti-22Al-27Nb 合金热影响区的金相组织照片, 根据相组成的不同, 可以将热影响区分成 3 个区域。图 4(b) 为热影响区中远离焊缝的区域, 该部分受到激光热源的作用较小, 母材中的少量 O 相向 B2 相基体中溶解。由于温度未达到  $\alpha_2$  相向 B2 相的溶解温度,  $\alpha_2$  相大量保留在 B2 相基体中, 因此该部分为 B2 +  $\alpha_2$  + 残余 O 相组织。在热影响区的中部, 激光热源的热量使得母材中 O 相全部溶解到 B2 相基体中, 少量的  $\alpha_2$  相溶解到 B2 相基体中, 如图 4(c) 所示, 因此热影响区中部为 B2 + 残余

试样的尺寸如图 2 所示, 其中 R 代表半径。650 °C 拉伸时拉伸试件需在 650 °C 下保温 5 min 后进行高温力学性能测试。

$\alpha_2$  相组织。对于热影响区中靠近焊缝的区域, 激光热源使得该区域的温度超过 B2 相转变点并存在足够长的高温停留时间以完成 O 相和  $\alpha_2$  相向 B2 相的转变过程, 在随后的冷却过程中, 快速的冷却速率有效抑制了 B2 相的分解相变, 该过程与焊缝中单一 B2 相的形成过程一致。因此, 热影响区中的该区域为单一的 B2 相组织, 如图 4(d) 所示。

### 3.2 HT1 板材激光焊接接头组织

Ti-22Al-27Nb 合金的性能与组织结构存在强烈的内在关系, 相组成、尺寸与数量均对合金的力学性能产生较大的影响。文献[15]研究了 Ti-22Al-XNb 合金的相图, 对于 Ti-22Al-27Nb 合金来说, B2 相转变温度为 1060 °C。前期研究结果<sup>[11]</sup>表明, Ti-22Al-27Nb 合金的激光焊接接头具有明显的室温与高温脆性, 为了提高焊接接头的延伸率, 对焊材在 B2 相区进行热处理, 得到单一的 B2 相的母材。B2 相为体心立方结构, 理论上可以开动的滑移系最多为 48 个, 相对于  $\alpha_2$  相 (密排六方结构,  $\langle a \rangle$  型位错可以开动) 和 O 相 (斜方结构,  $\langle a \rangle + \langle c + a/2 \rangle$  位错可以开动, 其中 a 和 c 代表滑移方向), 试图通过改变板材中的相组成来改善接头的力学性能。

1080 °C 位于 Ti-22Al-27Nb 合金的 B2 相区内, 1080 °C/40 min 的热处理过程使得原始材料中的 O 相和  $\alpha_2$  相向 B2 相基体中全部溶解, 形成单一的 B2 相组织, 水冷淬火处理可以抑制 B2 相的分解析出行为, 单一的 B2 相组织得以保留至室温, 如图 5 所示。以 HT1 热处理后的板材为焊接材料, 开展了相关激光焊接试验, 激光焊接的工艺参数与热轧态板材的相同。图 6 为试验所得到的激光焊接接头的热影响区组织, 热影响区的组织同样为单一的 B2 相组织, 热影响区的高温停留时间较短, O 相和  $\alpha_2$  相来不及在 B2 相基体中析出。



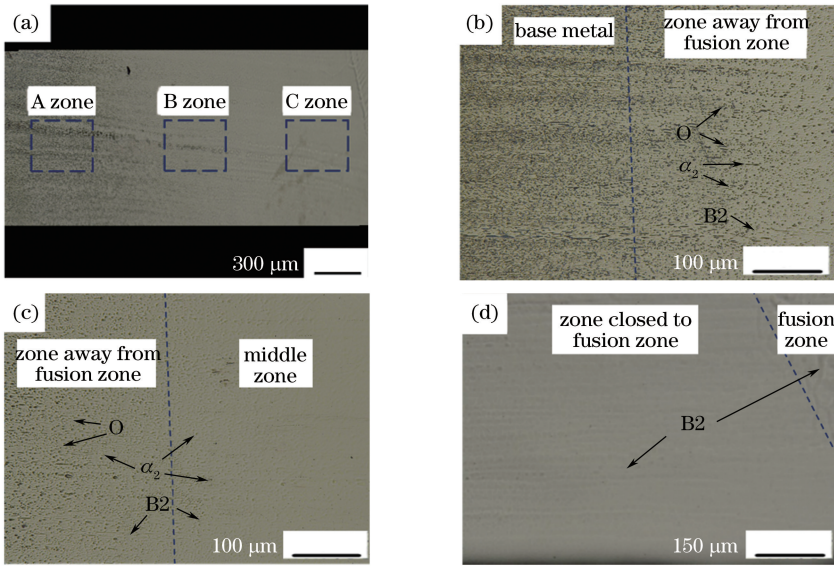


图 4 热轧制板材的激光焊接接头热影响区组织。(a)热影响区宏观组织;(b)远离焊缝侧(A区);(c)中部区域(B区);(d)靠近焊缝侧(C区)

Fig. 4 Microstructure of heat affected zone of laser welded sheet joint under hot rolling. (a) Macrostructure of heat affected zone; (b) zone away from fusion zone (A zone); (c) middle zone (B zone); (d) zone close to fusion zone (C zone)

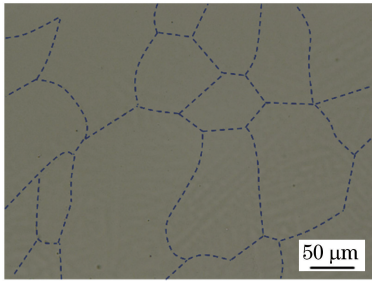


图 5 HT1 板材的组织

Fig. 5 Microstructure of HT1 sheet

HT1 板材激光焊接焊缝组织如图 7 所示,激光焊接焊缝的组织与热轧态板材的焊缝组织基本相同,焊缝由单一的 B2 相构成,其也同样是由较快的

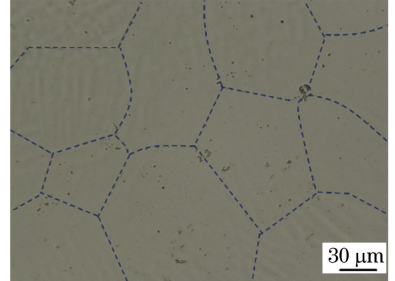


图 6 HT1 板材的热影响区组织

冷却速度造成的。焊缝的晶粒为粗大的柱状晶,晶粒从熔合线附近向焊缝中心斜向生长,如图 7(b)所示,较大的温度梯度是产生以上结果的重要原因。

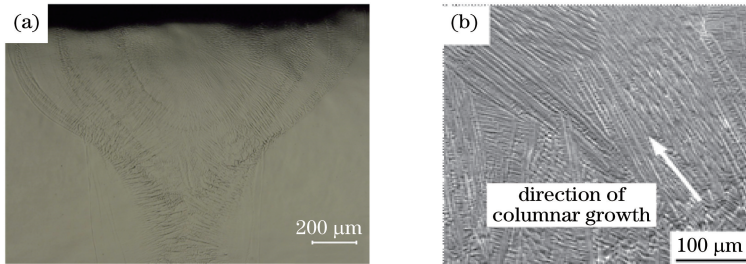


图 7 HT1 板材的焊缝组织。(a)金相微观组织;(b) SEM 图

Fig. 7 Microstructure of weld of HT1 sheet. (a) Metallographic microstructure; (b) SEM image

### 3.3 HT2 板材激光焊接接头组织

980 °C 位于 Ti-22Al-27Nb 合金相图的 B2 + O 双相区和 B2 + O +  $\alpha_2$  三相区交界处,在该温度下热

处理可以促进 O 相的溶解和  $\alpha_2$  相的不连续析出。由图 8 可见,经过 HT2 热处理后的母材组织由 B2 + O +  $\alpha_2$  三相构成,其中短棒状的 O 相十分细



小,并且呈无序分布; $\alpha_2$ 相断续析出于B2相晶界上,且 $\alpha_2$ 相有逐渐溶于基体B2相的趋势,这是由于980℃处理温度处于B2+O两相区中的较高温度,

部分 $\alpha_2$ 相开始发生转变。 $\alpha_2$ 相部分呈等轴状,部分转变为四边形状和其他不规则状。

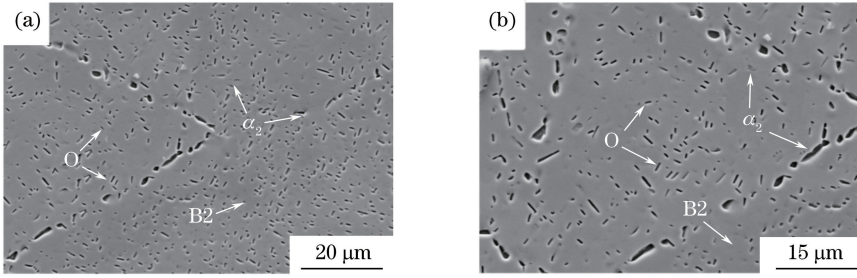


图8 HT2 板材的组织。(a)晶界;(b)晶内

Fig. 8 Microstructure of HT2 sheet. (a) Grain boundary; (b) within grains

HT2 板材的激光焊接热影响区由于受激光热源的热作用不同,可以分为3个区域:B2相区、B2+ $\alpha_2$ 相区和B2+O+ $\alpha_2$ 相区,如图9所示。热影响区中靠近焊缝的区域,热循环温度较高,O+ $\alpha_2$ 相受热完全溶解于B2相基体中,形成单一的B2相区。热影响区的中部为B2+ $\alpha_2$ 相组织,晶粒内部的大量O相受热溶解到基体中, $\alpha_2$ 相也发生部分溶解,残余的 $\alpha_2$ 相主要分布在晶界上,少量分布在晶粒内部。远离焊缝的热影响区主要存在B2+O+ $\alpha_2$ 相组织,在焊接过程中,热量使得少量的O相发生溶解,大部分的O相仍然保留在B2相基体上。图10为焊缝区域的金相照片,焊缝的组织仍为单一的B2相,与热轧态和HT1热处理板材的焊缝组织基本相同,焊缝中晶粒为粗大的柱状晶。

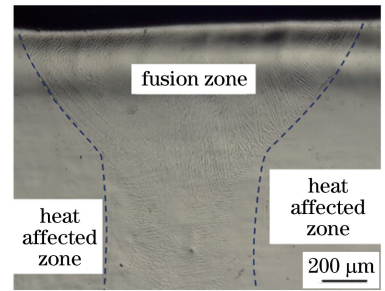


图10 HT2 板材的焊缝组织

Fig. 10 Microstructure of weld of HT2 sheet

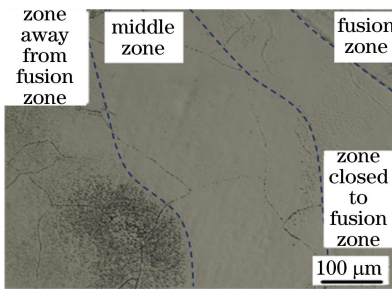


图9 HT2 板材的热影响区组织

Fig. 9 Microstructure of heat affected zone of HT2 sheet

### 3.4 激光焊接接头的力学性能

图11和图12分别为不同状态板材激光焊接接头的室温拉伸性能和拉伸曲线,热轧态的抗拉强度最高,可达1023 MPa,但是其延伸率较低(5.48%)。其接头断裂在焊缝的中心,主要由粗大的柱状晶引起。HT1处理的板材接头抗拉强度和延伸率具有明显的下降趋势,接头断裂在热影响区,单一的粗化的B2相抵抗位错滑移的能力相对较弱,因此该接

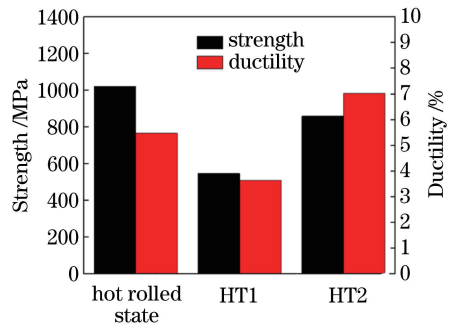


图11 不同状态板材激光焊接接头室温力学性能

Fig. 11 Mechanical properties at room temperature of laser welded sheet joints under different states

头的力学性能明显下降。HT2处理板材的接头抗拉强度为860 MPa,其断裂在熔合线附近,熔合线两侧柱状晶和粗大等轴晶的变形不协调是造成断裂的主要原因,其延伸率为7.04%,塑性相比与热轧板材有了明显的提高。

图13和图14分别为不同状态板材的激光焊接接头的650℃拉伸性能和拉伸曲线。不同状态板材的650℃力学性能趋势与室温性能趋势基本相同。热轧态板材的焊接接头抗拉强度为675 MPa,延伸率为2.56%。HT1处理的板材接头在650℃条件

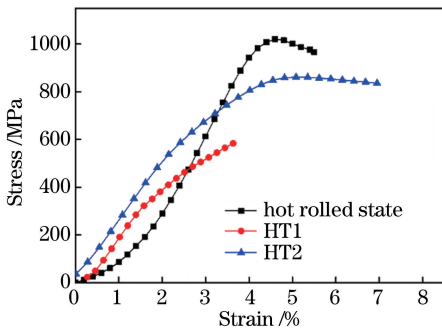


图 12 不同状态板材激光焊接接头室温拉伸曲线  
Fig. 12 Tensile curves at room temperature of laser welded sheet joints under different states

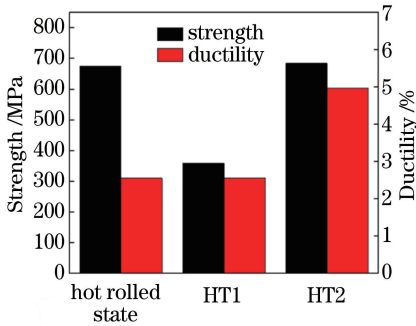


图 13 不同状态板材激光焊接接头 650 °C 的力学性能  
Fig. 13 Mechanical properties at 650 °C of laser welded sheet joints under different states

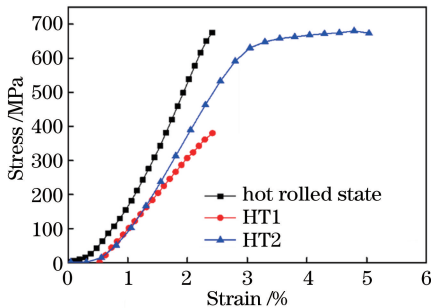


图 14 不同状态板材激光焊接接头 650 °C 拉伸曲线  
Fig. 14 Tensile curves at 650 °C of laser welded sheet joints under different states

下抗拉强度和延伸率同样出现了明显的下降,断裂在热影响区处,B2相晶粒在热处理过程中明显粗化,其力学性能急剧下降。HT2处理板材的接头650 °C抗拉强度(680 MPa)与热轧态板材基本相当,延伸率提高为4.97%,断裂也发生在焊缝中心。HT2的板材接头的延伸率由焊缝、热影响区和母材三者共同提供,考虑到焊缝均为粗大的柱状晶结构,对延伸率提高的贡献不明显。母材和热影响区中的 $\alpha_2$ 相溶解于基体,位错的滑移变得更加容易,因此接头的塑性变形能力提高。

## 4 结 论

$Ti_2AlNb$ 基合金性能对组织非常敏感,目前关于不同热处理状态的 $Ti_2AlNb$ 基合金激光焊接技术研究还未展开。论文研究了热轧态、HT1态和HT2态等3种不同热处理状态下 $Ti_2AlNb$ 基合金板材组织与激光焊接接头的组织演变,3种不同状态 $Ti_2AlNb$ 基合金的焊缝组织均为单一的B2相,但热影响区的组织有所不同。

$Ti_2AlNb$ 基合金的激光焊接接头具有明显的脆性问题,HT2态板材接头具有很高的延伸率,对提高接头的塑性具有很大的意义。后期可以开展焊后不同热处理工艺对 $Ti_2AlNb$ 基合金激光焊接接头组织与性能的影响研究,以进一步提高激光焊接接头的塑性。

## 参 考 文 献

- [1] Boyer R R. An overview on the use of titanium in the aerospace industry [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 1996, 213(1/2): 103-114.
- [2] Veiga C, Davim J P, Loureiro A J R. Properties and applications of titanium alloys: a brief review [J]. *Reviews on Advanced Materials Science*, 2012, 32(2): 134-148.
- [3] Yang S J, Nam S W, Hagiwara M. Investigation of creep deformation mechanisms and environmental effects on creep resistance in a  $Ti_2AlNb$  based intermetallic alloy [J]. *Intermetallics*, 2004, 12(3): 261-274.
- [4] Martin G S, Albright C E, Jones T A. An evaluation of  $CO_2$  laser beam welding on a  $Ti_3Al-Nb$  alloy [J]. *Welding Journal*, 1995, 74(2): 77-82.
- [5] Feng J C, Wu H Q, He J S, *et al.* Microstructure evolution of electron beam welded  $Ti_3Al-Nb$  joint [J]. *Materials Characterization*, 2005, 54(2): 99-105.
- [6] Chen X, Xie F Q, Ma T J, *et al.* Microstructure evolution and mechanical properties of linear friction welded  $Ti_2AlNb$  alloy [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2015, 646: 490-496.
- [7] Cao J, Dai X Y, Liu J Q, *et al.* Relationship between microstructure and mechanical properties of  $TiAl/Ti_2AlNb$  joint brazed using  $Ti-27Co$  eutectic filler metal [J]. *Materials & Design*, 2017, 121: 176-184.
- [8] Lei Z L, Li B W, Zhu P G, *et al.* Effect of wavelength on droplet transition behaviors in laser-CMT hybrid welding process [J]. *Chinese Journal of*

- Lasers, 2018, 45(10): 1002006.
- 雷正龙, 黎炳蔚, 朱平国, 等. 波长对激光-CMT 复合焊熔滴过渡行为的影响[J]. 中国激光, 2018, 45(10): 1002006.
- [9] Xie C J, Yang S L, Liu H B, *et al.* Microstructures and mechanical properties of 7050 ultrahigh-strength aluminum alloy joints by laser welding[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(3): 031403.
- 谢超杰, 杨尚磊, 刘浩博, 等. 7050 高强铝合金激光焊接接头的组织性能[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(3): 031403.
- [10] Cao Y, Zhao L, Peng Y, *et al.* Effect of heat input on microstructure and mechanical properties of laser welded medium Mn steel joints[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(11): 1102008.
- 曹洋, 赵琳, 彭云, 等. 热输入对激光焊中锰钢接头组织和力学性能的影响[J]. 中国激光, 2018, 45(11): 1102008.
- [11] Wu A P, Zou G S, Ren J L, *et al.* Microstructures and mechanical properties of Ti-24Al-17Nb (at. %) laser beam welding joints[J]. Intermetallics, 2002, 10(7): 647-652.
- [12] Zhang K Z, Liu M, Lei Z L, *et al.* Microstructure evolution and tensile properties of laser-TIG hybrid welds of Ti<sub>2</sub>AlNb-based titanium aluminide [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2014, 23(10): 3778-3785.
- [13] Liu X X. Study on the control of laser welding deformation of titanium alloy thin sheet [D]. Changsha: Hunan University, 2014: 33-37.
- 刘西霞. 钛合金薄板激光焊接变形控制研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2014: 33-37.
- [14] Huang S. Study on measurement of temperature field and weld seam's characteristics in laser welding of TA15 titanium alloy[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2012: 34-45.
- 黄松. TA15 钛合金激光焊接温度场的测量与焊缝特征研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2012: 34-45.
- [15] Dong Z J. Study on characteristics of laser welded Ti<sub>2</sub>AlNb-based alloys [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012: 18-23.
- 董智军. Ti<sub>2</sub>AlNb 基合金激光焊接特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012: 18-23.