

TC4 钛合金激光焊接接头超塑性变形力学行为研究

程东海¹, 黄继华¹, 杨静¹, 张华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: 采用高温拉伸试验研究 TC4 钛合金激光焊接接头超塑性变形力学行为, 引进变形不均匀系数 K 表征激光焊板超塑性变形过程中焊接接头与母材的变形不均匀性。结果表明: TC4 钛合金激光焊接接头可承受高温超塑性变形而不破坏, 当初始应变速率低于 10^{-2} s^{-1} 时流变应力小于 60 MPa; 接头的变形率及试样的变形不均匀系数随变形温度及应变速率的升高均先升高再降低。在 $900 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 10^{-2} s^{-1} 时, 接头超塑性变形率和试样的变形不均匀系数 K 值同时达到最高值 46% 和 0.18, 说明焊接接头具有较高的超塑性变形能力, 应变速率敏感性指数 m 值大于 0.5。

关键词: 钛合金; 激光焊接; 超塑成形

中图分类号: TG456.7

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2010)02-0277-04

钛合金具有密度小、比强度高、耐蚀性和高温抗蠕变性能好等特点, 是航空航天和电力工业中重要的结构材料。TC4 钛合金在一定的温度和应变速率下具有良好的超塑性变形能力, 超塑性成形技术在钛合金结构件加工制造中的运用越来越广泛。采用 (SPF/DB) 组合工艺技术生产的飞行器异形件具有成形压力小、模具寿命长, 可一次精密成型、成型质量好等优点, 还可以极大程度减轻结构质量, 降低生产成本, 实现极大的结构设计与制造的灵活性, 尤其在多层板结构的制造方面具有极大优越性^[1]。然而, 随着航空航天工业的发展, 传统的 SPF/DB 工艺暴露出相当多的局限性和不足, 主要表现在: 扩散连接时必须在成形部位的不连接部分预先涂敷止焊剂, 对后续的超塑性成形模具密封性要求很高, 而且增加了工序。若涂层厚度不均匀, 位置不准还会使结构件外表面产生沟槽。此外, 更要求严格控制扩散连接温度和保温时间, 以防止晶粒过度长大, 否则可能导致超塑性成形时零件的破裂。

近年来, 国内外学者开始积极寻找替代扩散连接的其他焊接方法与超塑性成形工艺组合, 对不同的焊接接头超塑性能力和零件性能等方面进行了研究, 并取得良好的研究成果。这些研究主要集中在搅拌摩擦焊、等离子弧焊、真空电子束焊等焊接方法上^[2-4]。

激光焊接具有能量密度和焊接速度高、焊缝及热影响区窄、焊件变形小、焊缝组织细小、质量高等优点, 将激光叠焊与超塑性成形工艺组合, 将有望获得性能更好的零件。目前, 关于焊接接头超塑性变形能力的报道很

少, 且关于激光焊接接头超塑性变形的力学行为的研究还未见报道。本实验研究 TC4 钛合金激光焊接接头高温拉伸的力学行为, 以及超塑性变形特征, 为超塑性成形/激光焊接的实际应用提供理论和试验基础。

1 实验

试验所用材料为厚 0.8 mm TC4 钛合金薄板, 焊接接头形式为对接接头。焊前板材清理工序: 5%~10% NaOH 乙醇溶液碱洗除油, 清水冲洗, 5% HF+30% HNO₃ 水溶液酸洗去除表面氧化物, 清水冲洗, 烘干并保存在干洁器皿中。

焊接试验使用功率范围为 100~4000 W 的 CO₂ 轴流激光器, 模式为 TEM01 模, 激光束采用透镜聚焦, 焦距为 190.5 mm, 聚焦后的光斑直径 $\leq 0.2 \text{ mm}$ 。试验工艺参数: 离焦量 $\Delta f = -0.5 \text{ mm}$, 激光功率 $P = 900 \text{ W}$; 焊接速度 $V = 3.0 \text{ m/min}$ 。焊接过程气体保护良好, 焊缝呈银白或淡黄色, 经 X 射线探伤仪检测焊缝内部没有观察到气孔或裂纹。

高温拉伸试验在 Instron 5582 型拉伸试验机上进行。拉伸前在试样表面涂 Ti-5 玻璃防护涂料, 该涂料在 800~1000 $^\circ\text{C}$ 下都有很好的保护效果, 且高温流动性较好。试验选择工艺范围为: 初始应变速率, $10^{-3} \sim 10^{-1} \text{ s}^{-1}$; 变形温度, 870~920 $^\circ\text{C}$; 随炉冷却, 拉伸试样尺寸如图 1 所示。

高温拉伸试样设计两套标距, 分别为 $L_1 = 2 \text{ mm}$, $L_2 = 15 \text{ mm}$ 。设拉伸破坏后两套标距内长度分别为: L_1' ,

收稿日期: 2009-03-20

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

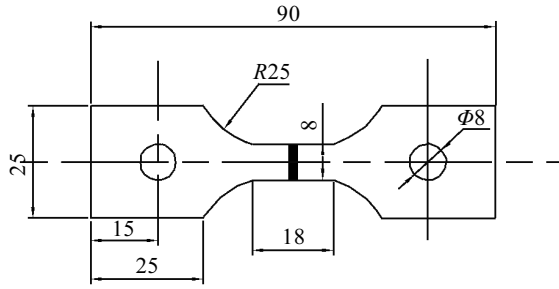


图 1 高温拉伸试样尺寸示意图

Fig.1 Dimension of samples for hot tensile tests

L_2' 。则焊缝的变形率为:

$$\delta_j = (L_1' - L_1) / L_1$$

母材的延伸率为:

$$\delta_M = (L_2' - L_2) - (L_1' - L_1) / (L_2 - L_1)$$

2 结果及分析

2.1 高温力学性能分析

图 2 所示为焊接试样高温拉伸前后的宏观照片。由图可以看出,焊接试样呈现良好的超塑性变形能力,试样断裂位置在母材,说明激光焊接接头具有承受焊板超塑性变形的能力。

超塑性拉伸过程中,变形温度和初始应变速率是影响试样流变应力的两个重要因素,它们对 TC4 钛合金激光焊板峰值流变应力的影响如图 3 所示。由图 3 可以看出,试样峰值流变应力随变形温度的升高而减小、随初始应变速率的增加而增加。这是因为随变形温度的升高,热激活作用增强,可降低临界切变应力并提高原子的自由能,促进晶界滑移及提高扩散蠕变

能力^[6],此外动态回复及再结晶引起的软化程度也随温度的升高而增大,从而导致合金的应力水平下降。如图 3,当初始应变速率恒定为 10^{-3} s^{-1} 时,变形温度从 $870 \text{ }^\circ\text{C}$ 升高到 $920 \text{ }^\circ\text{C}$,流变应力从 29 MPa 降低至 10 MPa 。在同一变形温度下,流变应力随着应变速率的增大而增大,这是由材料的应变速率敏感性决定的。当应变速率较高时,位错密度增加较快,晶粒内出现位错线,引起位错塞积,扩散蠕变和位错滑移不能有效地对其晶界滑动起协调作用;合金的晶粒尺寸并非完全一致,其形状也不绝对等轴,所以晶粒在滑动和转动过程中必然在一些地方受阻,从而引起应力集中。因此材料内部变形的协调来不及进行,应变硬化不能充分消除,从而导致流变应力增大。当温度恒定为 $900 \text{ }^\circ\text{C}$,应变速率从 10^{-3} s^{-1} 增加至 10^{-1} s^{-1} 时,流变应力从 13.5 MPa 增加至 130.5 MPa ,与不同温度下变化趋势相反。

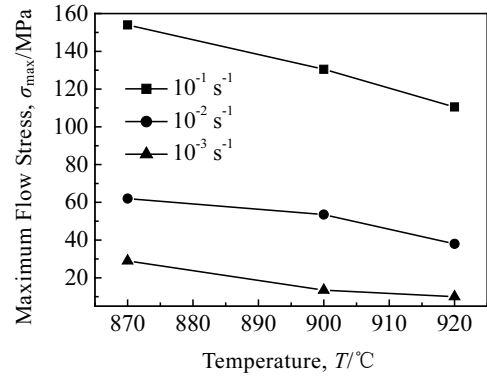


图 3 拉伸参数对峰值流变应力的影响

Fig.3 Relationship between maximal flow stress and tensile parameters

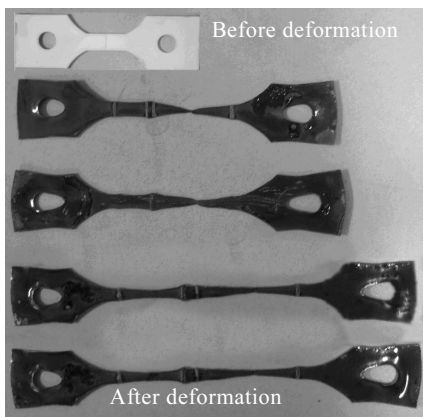


图 2 试样超塑变形前后照片

Fig.2 Photos of specimens before and after superplastic deformation

2.2 母材及焊缝变形分析

图 4 所示为高温拉伸参数对母材延伸率的影响。由图可以看出,母材的延伸率在 10^{-3} s^{-1} 、 $870 \text{ }^\circ\text{C}$ 时达到最大值 405.31% ,并且当应变速率较高(10^{-1} s^{-1})时,延伸率随变形温度增加而增加,而在低应变速率下则应选择较低的变形温度以得到较高的延伸率。这种现象是由于在高应变速率下,材料内部再结晶和变形协调来不及进行,应变硬化不能充分消除,而温度的升高有助于促进晶界滑移及扩散蠕变能力的提高,并加强了再结晶软化作用,从而有助于应变硬化的消除,有利于延伸率的提高;在低应变速率下,一方面应变速率的降低有利于再结晶和变形的协调,增加材料的延伸率;另一方面随温度的升高,试样拉伸时间过长,晶粒长大,且试样容易被氧化,造成材料延伸率的下

降。例如变形温度在 870 °C 时试样延伸率较高, 而 900 °C 后由于相变和再结晶软化的作用超过了晶粒长大和氧化的影响, 使延伸率开始回升。920 °C、 10^{-2} s^{-1} 条件下母材所得延伸率已接近 920 °C、 10^{-3} s^{-1} 条件下母材的延伸率, 并将持续增长趋势。

图 5 所示为高温拉伸参数对焊接接头变形率的影响。由于试样断裂位置不在焊接接头, 在此用变形率来表示焊接接头的变性程度。在超塑拉伸过程中, 接头变形率随温度的升高先增加, 在 900 °C 达到峰值后又逐渐减小。温度的升高有利于接头内部针状马氏体组织的球化, 提高超塑性变形能力, 增加塑性变形率; 而过高的变形温度会使针状马氏体的形态聚集、粗大, 且粗大的片状组织在应力作用下不容易发生破碎、再结晶, 也会使已近球化的组织聚集, 不利于材料的超塑性变形。因此, 当温度过高时, 接头塑性变形率反而下降。由图 5 还可看出, 接头塑性变形率随应变速

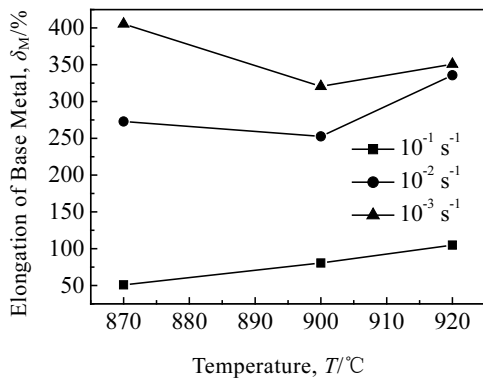


图 4 拉伸参数对母材延伸率的影响

Fig.4 Relationship between elongation of base metal and tensile parameters

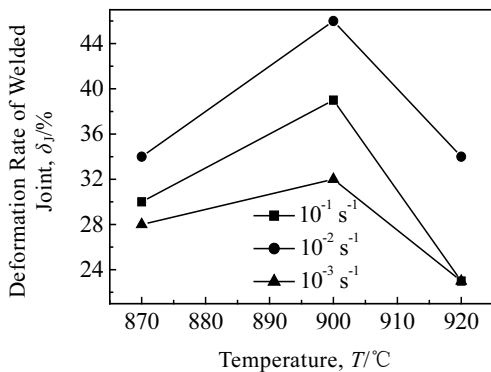


图 5 拉伸参数对接头塑性变形率的影响

Fig.5 Relationship between plastic deformation rate of weld joint and tensile parameters

率的变化趋势与母材不同, 随着应变速率的增加, 变形率先增加, 在 10^{-2} s^{-1} 达到峰值后逐渐减小。这与低应变速率下拉伸时间过长, 片层组织的粗大有关。焊接接头的塑性变形率在 10^{-2} s^{-1} 、900 °C 达到最大值 46%, 可以看出在一定变形条件下激光焊接接头具有较高的超塑变形能力。

2.3 流变应力对应变速率的敏感系数 (m 值)

超塑变形的最大特性是其流变应力敏感于应变速率和变形温度, m 是超塑性变形的重要参数, 它表征材料变形时能够抑制颈缩扩展的能力。

$$m = d \log \sigma / d \log \dot{\epsilon} \quad (1)$$

图 6 所示为不同变形温度下流变应力与应变速率之间的关系。根据式 (1) 可以计算不同温度下焊接试样的 m 值分别为: $m_{870}=0.36$, $m_{900}=0.5$, $m_{920}=0.51$ 。由此可知: TC4 钛合金激光焊接板在 10^{-2} s^{-1} 应变速率以下具有较好的超塑性变形能力, m 值大于 0.5。说明 TC4 钛合金激光焊接板具有较好的超塑性变形能力。

2.4 变形不均匀性

由于母材和焊接接头的相组成、显微组织形态和分布都存在差异, 使得在超塑性拉伸过程中二者的变形行为也不同, 即母材和焊缝的变形存在不均匀性问题。为了定量衡量焊板超塑成形时母材和焊接接头的变形不均匀性, 同时评估不同变形条件下对接头对焊板整体变形的贡献, 引进焊接接头超塑性变形不均匀系数 K 。定义接头变形不均匀系数 K 为焊接接头超塑性变形率与母材超塑性延伸率的比值即:

$$K = \delta_J / \delta_M \quad (2)$$

式中, δ_J 为焊接接头超塑性变形率, δ_M 为母材超塑性延伸率。

由上述分析可知: 在任何条件下焊接接头变形能力

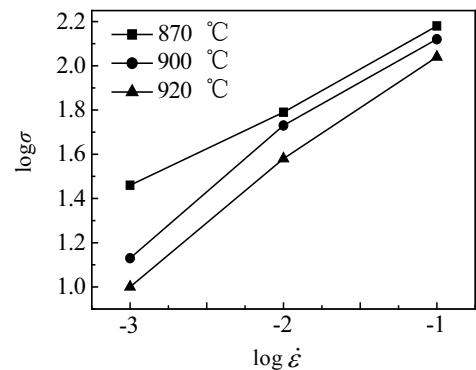


图 6 流变应力与应变速率及变形温度的关系

Fig.6 Relationship between flow stress and strain rate at different temperatures

均小于母材, 因此 K 值总小于 1。 K 值越大, 焊接接头对焊板变形的贡献越大, 接头与母材变形的不均匀程度越小, 变形协调性越好, 但由于焊接接头的变形率与母材相比变化较小, 过大的 K 值也在一定程度上反映母材的延伸率较差。如 870 °C, 10^{-1} s^{-1} 条件下, 接头塑性变形率为 30%, 但由于此变形条件下母材延伸率只为 50% 左右, 导致 K 值达到了 0.59, 这时接头与母材变形协调性高是以牺牲母材变形能力为代价的。

图 7 为变形不均匀系数 K 值与变形温度及应变速率之间的关系。可以看出, 当应变速率较高时, 随着变形温度升高 K 值降低; 当应变速率小于或等于 10^{-2} s^{-1} 时, K 值随变形温度的升高先升高再降低, 并且在 900 °C、 10^{-2} s^{-1} 时达到最大值 0.18。 K 值在一定应变速率范围内可以表征焊接接头超塑性变形时接头与母材的变形不均匀性。

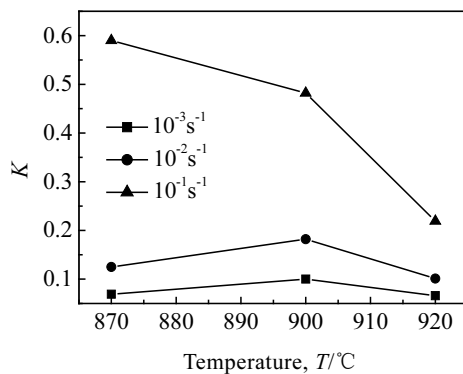


图 7 均匀系数 K 值与变形温度及应变速率间的关系

Fig.7 Relationship between K value and deformation temperature

3 结 论

1) TC4 钛合金激光焊接接头可承受焊板高温超塑变形而不破坏; 焊接板具有良好的超塑性变形行为, 在拉伸速率低于 10^{-2} s^{-1} 时, 试样峰值流变应力小于 60 MPa, 最低可达 10 MPa。

2) 激光焊接接头变形率随变形温度及应变速率的升高均先升高再降低, 在 900 °C、 10^{-2} s^{-1} 时达到最高值 46%, 具有较高的超塑性变形能力。

3) TC4 钛合金激光焊接板在 10^{-2} s^{-1} 应变速率以下具有较好的超塑性变形能力, m 值大于 0.5。

4) 焊接接头超塑性变形不均匀系数 K 值可以表征焊接接头超塑性变形时接头与母材的变形不均匀性, 当应变速率小于或等于 10^{-2} s^{-1} 时, K 值随变形温度的升高先升高再降低, 并且在 900 °C、 10^{-2} s^{-1} 时达到最大值 0.18。

参考文献 References

- [1] Han Wenbo, Zhang Kaifeng, Wang Guofeng. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2007, 183(2-3): 450
- [2] Ma Z Y, Mishra R S, Mahoney M W. *Acta Materialia* [J], 2002, 50(17): 4419
- [3] Salem H G, Reynolds A P, Lyons J S. *Scripta Materialia*[J], 2002, 46(5): 337
- [4] Huang J C, Shen Y D, Hou N J. *Materials Science and Technology*[J], 1994, 10(6): 647
- [5] Guo Hongzhen(郭鸿镇), Zhang Wei(张 维), Zhao Zhanglong(赵张龙) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2005, 34(12): 1935

Superplastic Deformation Mechanical Behavior of Laser Welded Joints of TC4 Titanium Alloys

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

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

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

Abstract: Superplastic deformation mechanical behavior of laser welded joints of TC4 alloys was investigated by hot tensile tests. Non-uniform deformation coefficient K was introduced to characterize the non-uniform deformation between welded joints and base metal during superplastic deformation. Results show that the laser welded joints of TC4 alloys can bear high-temperature superplastic deformation without damage. When the initial strain rate was below 10^{-2} s^{-1} , the flow stress was below 60 MPa. Both the deformation rate of joints and K value of specimens were first increased and then decreased with increase of the deformation temperature and strain rate. At 900 °C and 10^{-2} s^{-1} , superplastic deformation rate of joints and K value reach their maximum of 46% and 0.18, respectively at the same time. It reveals that the welded joints have better superplastic deformability, and sensitive index of strain rate m is bigger than 1.5.

Key words: Ti-6Al-4V alloy; laser welding; superplastic forming

Corresponding author: 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