

稀土 Yb_2O_3 对 TC4 钛合金激光焊接头超塑变形行为的影响

程东海¹, 张夫庭¹, 刘士伟², 李海涛¹, 王德¹, 熊震宇¹

(1. 南昌航空大学 航空制造工程学院, 江西 南昌 330063)

(2. 空军装备部驻辽阳地区军事代表室, 辽宁 沈阳 110031)

摘要: 通过添加稀土 Yb_2O_3 提高 TC4 钛合金激光焊缝的超塑性变形能力, 改善接头的超塑性变形均匀性。结果表明, Yb_2O_3 的加入能够降低焊缝超塑性变形流变应力, 提高延伸率, 增加接头变形均匀系数值。随着 Yb_2O_3 含量的增加, 焊缝纵向峰值流变应力先降低再升高, 延伸率先升高再降低。在 Yb_2O_3 含量为 6% (质量分数, 下同) 时峰值流变应力最低为 11.9 MPa, 延伸率最高为 592.3%, 此时焊缝区域组织等轴化程度最高, 焊缝的超塑性最好。横向变形时随着 Yb_2O_3 含量的增加, 接头变形均匀系数 K 值呈现先增加后减小的趋势, Yb_2O_3 含量为 6% 时的试样 K 值取得最大值为 0.209。

关键词: Yb_2O_3 ; 钛合金; 激光焊; 超塑性变形

中图分类号: TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2023)12-4361-06

钛合金焊接超塑成形技术具有轻量化、制造灵活、节约材料和高效生产等优势, 在航空航天领域得到广泛的应用^[1-4]。激光焊/超塑成形技术虽然具备成形效率高、焊接质量好和加工窗口大等优点, 但焊缝与母材区域之间的组织性能差异导致结构件成形不均匀, 限制了该技术的进一步发展^[5-10]。

国内外学者对钛合金超塑性进行了大量的研究工作^[11-16]。但是关于钛合金激光焊接头超塑性变形均匀性调控的研究很少, 主要集中在置氢处理和热处理等方面。江训焱^[17]等人研究了氢热处理后钛合金激光焊接头超塑性变形的组织性能, 结果表明, 在置氢量 0.05% (质量分数), 900 °C 淬火, 880 °C/ 10^{-4} s⁻¹ 的条件下达到延伸率最大值为 563.60%。曹泽安^[18]等人研究了氢热处理、淬火温度及变形条件对钛合金激光焊接头超塑性均匀变形的影响。结果表明, 在置氢量为 0.05% (质量分数), 980 °C (淬火), 920 °C/ 10^{-4} s⁻¹ 的条件下接头变形均匀化系数 K 为 0.793。然而这些研究中, 接头超塑性变形均匀性提高是以牺牲母材的变形能力为代价的, 即母材的变形量越小, 接头变形均匀性越高, 这限制了激光焊/超塑成形工艺的实际应用。

稀土元素具有调节焊接过程、提升焊接效率、细化焊缝晶粒^[19-20]等优点, 可用来调控材料组织结构, 优化性能。Postnikova^[21]等人主要研究了质量分数 0.01%~2%B

对 Ti-4Al-3Mo-1V 合金组织和性能的影响。结果表明, 添加 1%B 的钛合金在 875 °C 时表现出超塑性, 延伸率约为 500%。

本研究通过添加稀土氧化物 Yb_2O_3 /TC4 混合粉末, 对 TC4 钛合金进行填粉焊接, 以期提升焊缝超塑性变形能力, 提高接头超塑性变形均匀性, 为钛合金激光焊超塑成形的实际应用提供具备实验依据的理论支持。

1 实验

试验材料为 60 mm×40 mm×2 mm 尺寸规格的退火态 TC4 钛合金板, 焊缝填充粉末为 TC4 钛合金粉末与 Yb_2O_3 粉末混合球磨而成, 将混粉比例设置如下几种: TC4+0% Yb_2O_3 , TC4+2% Yb_2O_3 , TC4+4% Yb_2O_3 , TC4+6% Yb_2O_3 , TC4+8% Yb_2O_3 , TC4+10% Yb_2O_3 (质量分数, 下同)。其中 TC4 钛合金粉末粒径为 35 μm , 纯度为 99.9%; Yb_2O_3 粉末粒径为 10 μm , 纯度为 99.98%。

焊接过程采用的激光焊接设备为德国 IPG Photonics 公司制造的 IPG YLS-6000 系列光纤激光器, 添加 Yb_2O_3 粉末与 TC4 钛合金粉末激光焊选定焊接工艺参数为: $P=2000$ W, 焊接速度 $v=2.2$ m min⁻¹。

超塑变形试验在 CMT4104 型高温拉伸机上进行, 图 1 为高温拉伸试样尺寸。选定超塑性变形工艺参数为: 高温变形温度 880~920 °C, 初始应变速率分别为: 1×10^{-2} 、

收稿日期: 2023-06-02

基金项目: 国家自然科学基金 (51965045); 江西省自然科学基金 (20212BAB204044)

作者简介: 程东海, 男, 1984 年生, 博士, 副教授, 南昌航空大学航空制造工程学院, 江西 南昌 330063, E-mail: 70269@nchu.edu.cn

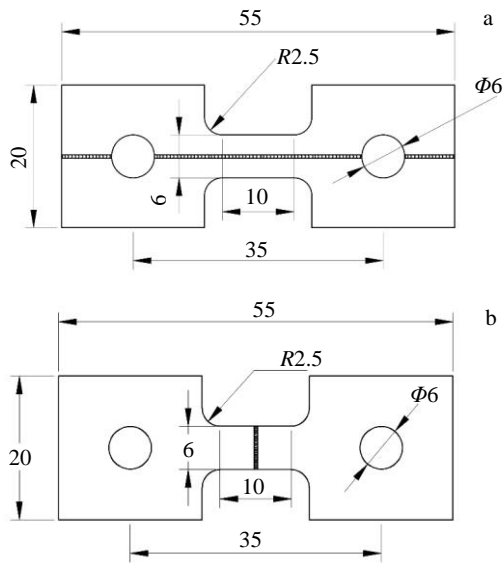


图 1 高温拉伸试样尺寸

Fig.1 Size of high temperature tensile samples: (a) longitudinal sample and (b) transverse sample

$1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 。采用纵向接头高温试样与横向接头高温试样分别研究添加 Yb_2O_3 对接头变形能力及变形均匀性的影响。采用金相显微镜、扫描电子显微镜观察试样组织结构。

2 结果与分析

2.1 Yb_2O_3 对接头超塑变形能力的影响

图 2 为变形温度为 $920 \text{ }^\circ\text{C}$ ，应变速率为 $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 条件下接头纵向超塑性变形应力-应变曲线。由图 2 可以看到，随着应变量的增加，试样流变应力迅速达到峰值，然后缓慢下降，变形过程平稳持续。而且应力-应变曲线

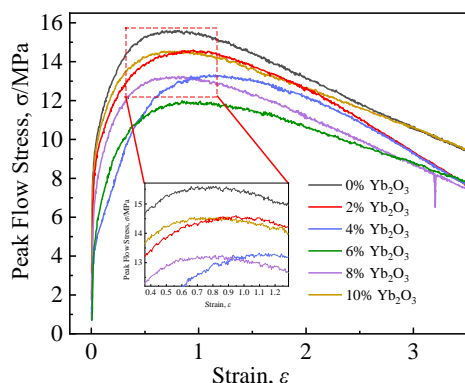


图 2 变形温度为 $920 \text{ }^\circ\text{C}$ 、应变速率为 $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 纵向拉伸试样应力-应变曲线

Fig.2 Stress-strain curves of longitudinal tensile sample under the deformation temperature of $920 \text{ }^\circ\text{C}$ and the strain rate of $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$

呈锯齿状上下波动，说明试样的拉伸具有颈缩与抗颈缩过程，试样呈现了超塑变形的特征。另外，添加 Yb_2O_3 能够使得应力应变曲线整体下移，且曲线更加平稳，持续时间更长。因此，添加 Yb_2O_3 可有效提高 TC4 钛合金激光焊接头的超塑性能。

图 3 为 Yb_2O_3 含量对纵向接头峰值流动应力及延伸率的影响。由图 3 可知，在试验进行的 880 、 900 、 $920 \text{ }^\circ\text{C}$ 变形温度、 1×10^{-2} 、 $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 应变速率范围内，接头呈现了低应力、高延伸率的超塑性变形特征。当焊缝中 Yb_2O_3 的含量为 6% 时，在变形温度为 $900 \text{ }^\circ\text{C}$ ，应变速率在 $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 条件下，纵向试样的峰值流变应力为 16.3 MPa ，此时最大延伸率达到 592.3% 。随着 Yb_2O_3 的加入，接头峰值流变应力先降低后升高，延伸率先升高后降低。这说明 Yb_2O_3 的加入能够有效促进接头超塑性变形进程，提高纵向接头超塑变形能力。尤其是在 $920 \text{ }^\circ\text{C}/1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 的变形条件下，未加 Yb_2O_3 的峰值流变应力为 15.5 MPa ，试样延伸率为 372% 。当 Yb_2O_3 加入量在 6% 时峰值流变应力达到最低 11.9 MPa ，断后延伸率增至 572.2% 。这是由于，一方面稀土在焊接过程具有活性作用，会提高焊接效率，降低焊缝的宽度，减少试样中焊缝的量，从而使接头的超塑性能整体向母材靠近；另一方面，焊接过程中稀土氧化物能够提供更多的异质形核核心，有效地降低了非均质成核相单位区域

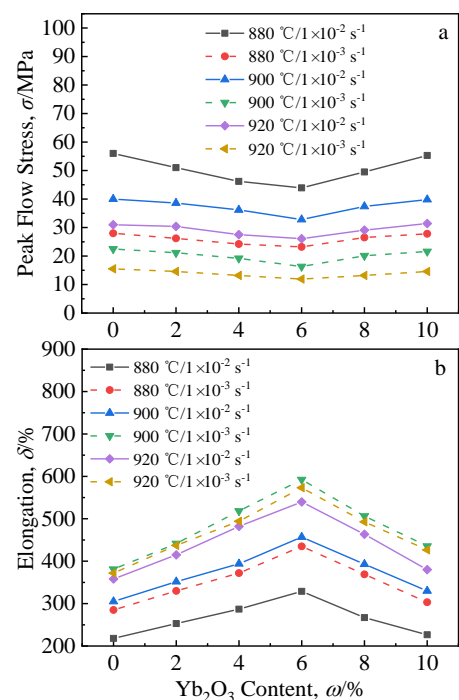


图 3 Yb_2O_3 含量对纵向接头试样变形能力的影响

Fig.3 Effects of Yb_2O_3 content on peak flow stress (a) and elongation (b) of longitudinal joint samples

的表面能, 促使晶粒长大的驱动力降低, 晶粒有效形核数目增加, 从而降低了原始 β 晶粒尺寸, 进而细化了 β 晶粒内的马氏体组织, 使得焊缝组织在超塑性变形过程中更容易破碎、滑移, 最终致使焊缝区域峰值流变应力降低、超塑性能提高。当 Yb₂O₃ 含量大于 6% 时, 随着 Yb₂O₃ 的加入, 试样峰值流动应力反而升高, 延伸率下降。这主要是因为稀土氧化物过多时, 对焊缝组织的细化作用降低, 且在超塑性变形过程中会有缺陷钉扎的作用, 阻碍超塑性变形的进行, 降低接头超塑性变形能力。

2.2 Yb₂O₃ 对接头超塑变形均匀性的影响

图 4 为接头横向高温拉伸宏观试样。由图 4 可知, 相对于母材区域, 接头区域变形较小并呈现“竹节状”, 这表明接头的变形能力低于母材区域; 另外, 接头两侧的母材区域变形并不一致, 与颈缩断裂一侧母材相比另一侧的母材变形量较小。这是因为接头与母材的变形差异大, 两侧的材料在颈缩与抗颈缩的过程受到接头阻碍, 当一侧发生颈缩后, 其受力低于另一侧, 此后变形主要在一侧发生。因此, 提升接头与母材的变形均匀性具有重要意义。

图 5 为 Yb₂O₃ 含量对接头横向延伸率的影响, 其中图 5a 为母材的延伸率, 图 5b 为接头的延伸率。由图 5a 可知, 在相同变形参数条件下, 母材的延伸率并不会因为 Yb₂O₃ 的变化出现特别明显的变化。在接头横向超塑性变形过程中, 母材与接头同时变形, 且母材的超塑性能优于接头, 因此试样峰值流动应力由母材决定, 而母材不曾受到 Yb₂O₃ 的影响, 因此母材的延伸率不受 Yb₂O₃ 的影响 (图 5a)。而接头的延伸率随着 Yb₂O₃ 的加入呈现先增大后减小的变化趋势 (图 5b), 这与接头

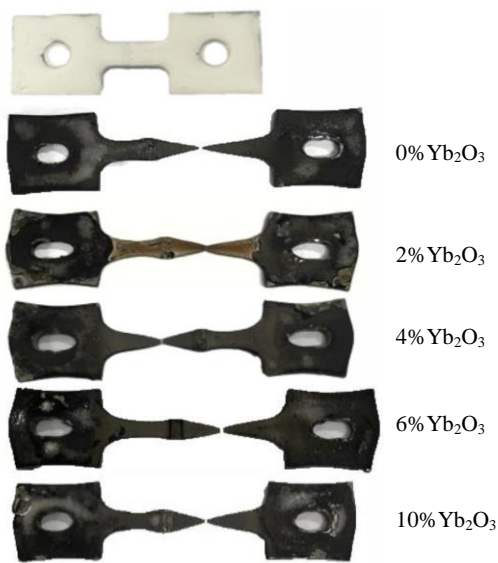


图 4 横向接头高温拉伸试样

Fig.4 High temperature tensile samples of transverse joints

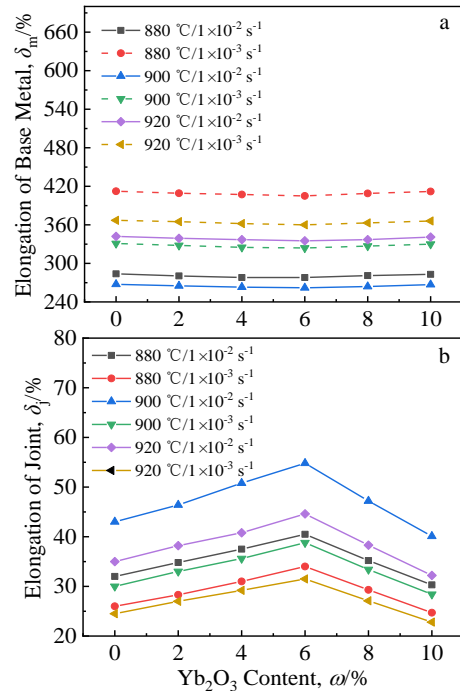


图 5 Yb₂O₃ 含量对接头横向延伸率的影响

Fig.5 Effects of Yb₂O₃ content on elongation of transverse joint samples at high temperature: (a) base metal and (b) joint

纵向接头断后延伸率的变化趋势一致。这是因为当接头承受的应力条件一定时, 接头超塑性变形能力越强, 延伸率越大。

在接头横向变形时, 母材的延伸率约为 250%~420%, 远高于接头区域的 54.8%, 这使得试样变形存在较大的非均匀性。为了更直观地表示 Yb₂O₃ 含量对接头部分高温变形均匀性的影响, 采用变形协调系数 *K* 来评价横向接头高温试样接头变形均匀性。

$$K = \frac{\delta_j}{\delta_m} \quad (1)$$

式中, δ_j 为接头的延伸率, δ_m 为母材的延伸率。

图 6 为 Yb₂O₃ 对接头横向变形均匀系数 *K* 的影响。由图 6 可知, 随着焊缝中 Yb₂O₃ 含量的增加, *K* 值呈现先增加后减小的趋势, 这表明 Yb₂O₃ 的加入能够改善横向变形试样的均匀性。当变形温度为 900 °C, 应变速率为 1 × 10⁻² s⁻¹ 时, 添加 Yb₂O₃ 含量为 6% 时的试样 *K* 值取到最大值为 0.209, 相较于未添加 Yb₂O₃ 含量的试样 *K* 值的 0.161 增加了 29.8%。虽然均匀性低于文献报道经氢热处理的 TC4 钛合金接头超塑变形均匀性 (最佳均匀系数 0.793)^[15], 但氢热处理的方法是以降低母材的变形能力为代价的, 而 Yb₂O₃ 的添加可在不影响母材变形能力的基础上, 通过提高焊缝的变形能力实现均匀性的提高, 更有利于钛合金激光焊/超塑性变形工艺的推广应用。

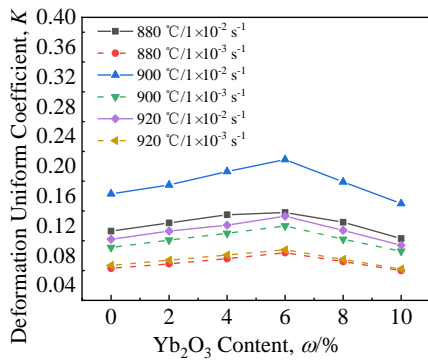


图 6 Yb₂O₃ 含量对接头变形均匀系数 K 的影响

Fig.6 Effects of Yb₂O₃ content on deformation uniform coefficient K of the joint

2.3 Yb₂O₃ 对接头超塑变形后组织的影响

图 7 为变形温度 900 °C、变形速率 $1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 条件下 Yb₂O₃ 含量对接头纵向超塑变形后焊缝显微组织的影响。由图 7a 可知，未添加 Yb₂O₃ 情况下焊缝区由板条状 α 相和晶间 β 相构成，针状马氏体 α' 以垂直分布的形式存在，超塑变形后的 α 晶粒在流变应力的作用下马

氏体 α' 发生 $\alpha' \rightarrow \alpha + \beta$ 相变，并且针状组织片层化、而后发生断裂细化。随着焊缝中 Yb₂O₃ 的加入，如图 7b~7d 所示，片层组织细化程度逐渐增加，当焊缝中 Yb₂O₃ 含量为 6% 时，焊缝组织出现了较多短棒状 α 晶粒以及再结晶生成的细小等轴 α 晶粒。这是由于 Yb₂O₃ 的加入细化了焊缝中原始组织，原始焊缝组织越细小，相变生成的 α 相也趋向于等轴化，这些细小的等轴晶具有良好的滑动和转动特性，因此焊缝获得了较大的断后延伸率。

为了比较不同状态下组织的超塑性变形能力，特以焊缝组织中 α 晶粒的平均宽度和长度比作为焊缝组织等轴化系数 J ， J 值越趋近于 1，焊缝组织等轴化程度越高。表 1 为不同 Yb₂O₃ 含量下焊缝组织的等轴化系数。由表 1 可知，焊缝组织中 Yb₂O₃ 的加入能有效提高焊缝组织的等轴化系数，随着 Yb₂O₃ 含量的增加，等轴化系数先增加后下降。当 Yb₂O₃ 含量为 6% 时，等轴化系数达到最高值 0.26，是未添加 Yb₂O₃ 时的 4.2 倍。然而，随着 Yb₂O₃ 含量进一步增加，原始焊缝组织的细化效果减弱，导致焊缝区域的晶粒重新呈现板条状，从而降低了焊缝的超塑性变形能力。

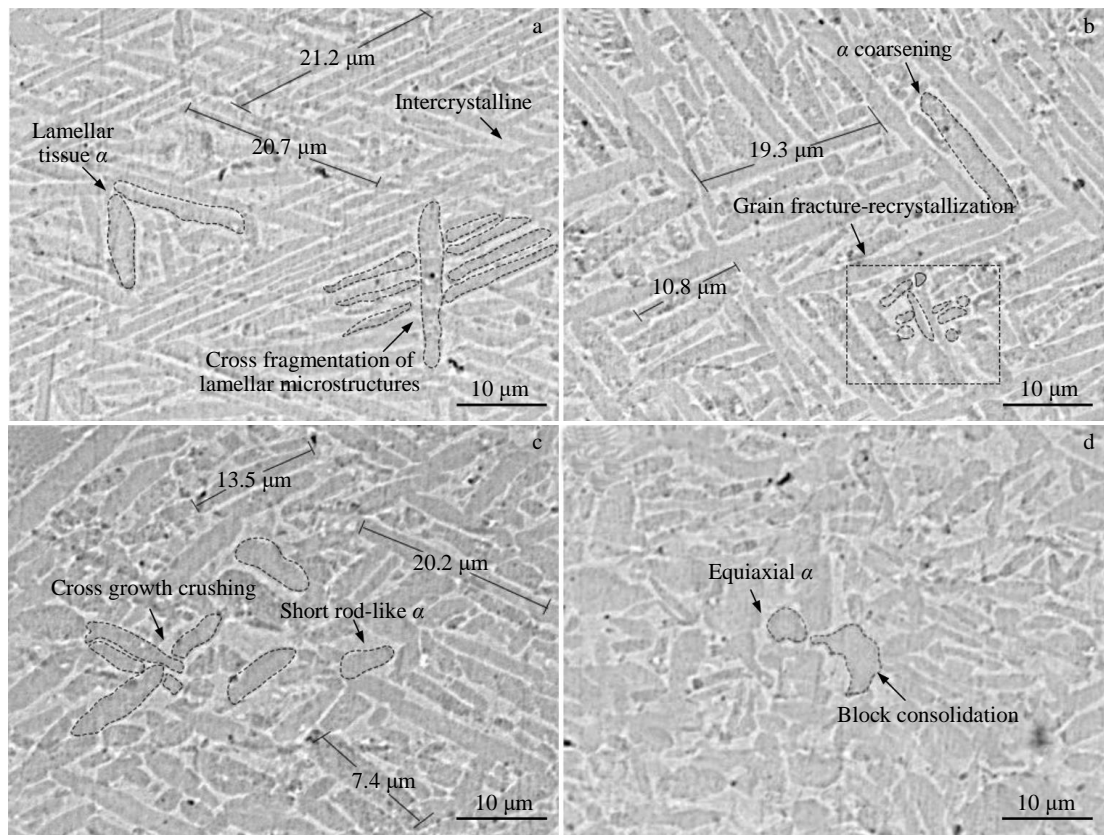


图 7 变形温度 900 °C、变形速率 $1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 条件下 Yb₂O₃ 含量对焊缝超塑变形后显微组织的影响

Fig.7 Effects of Yb₂O₃ content on microstructure of weld after superplastic deformation under the deformation temperature of 900 °C and deformation rate of $1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$: (a) 0%, (b) 2%, (c) 4%, and (d) 6%

表 1 不同 Yb₂O₃ 含量下焊缝组织的等轴化系数Table 1 Isoaxial coefficient of weld microstructure of the joints with different Yb₂O₃ contents

Yb ₂ O ₃ content, ω/%	Average width, D/μm	Average length, L/μm	Isoaxial coefficient, J
0	1.17	22.3	0.05
2	2.05	18.6	0.11
4	2.12	15.6	0.14
6	1.94	7.5	0.26
8	2.51	14.7	0.17
10	2.13	16.3	0.13

3 结 论

1) Yb₂O₃ 的加入能够有效降低接头变形过程中的流变应力, 促进接头超塑变形过程的进行。当焊缝中 Yb₂O₃ 的含量为 6% 时, 在变形温度为 900 °C, 应变速率在 $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 条件下, 纵向试样的峰值流变应力为 16.3 MPa, 此时的纵向试样能获得最高 592.3% 的断后延伸率, 超塑变形能力最佳。

2) Yb₂O₃ 的加入能够改善接头横向变形均匀性。随着焊缝中 Yb₂O₃ 含量的增加, 接头变形均匀系数 K 值呈现先增大后减小的趋势, 当变形温度为 900 °C, 应变速率为 $1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 时, 添加 Yb₂O₃ 含量为 6% 时的试样 K 值取到最大值为 0.209。

3) 随着焊缝中 Yb₂O₃ 含量的增加, 针状细化程度更充分, 当焊缝中 Yb₂O₃ 含量为 6% 时, 焊缝区域组织等轴化程度最高, 焊缝的超塑性更好。

参考文献 References

- [1] Xu Liang(许良), Su Juji(苏居季), Zhou Song(周松) *et al.* *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2016, 45(9): 2282
- [2] Zhou X, Xu D, Geng S *et al.* *Materials Characterization*[J], 2021, 179: 111 302
- [3] Cooke K O, Atieh A M. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*[J], 2020, 4(2): 39
- [4] Ridley N. *Superplastic Forming of Advanced Metallic Materials*[J], 2011, 8(16): 3
- [5] Fu Mingjie(付明杰), Chen Li(陈俐), Zeng Yuansong(曾元松). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2018, 47(8): 2555
- [6] Fang Naiwen(方乃文), Huang Ruisheng(黄瑞生), Long Weimin(龙伟民) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2023, 52(5): 1725
- [7] Ma Xuyi(马旭颐), Duan Aiqin(段爱琴), Lu Wei(芦伟) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2021, 50(7): 2300
- [8] Hou Jijun(侯继军), Dong Junhui(董俊慧), Xu Aiping(许爱平). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2021, 50(12): 4236
- [9] Xu Z, Dong Z, Yu Z *et al.* *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2020, 30(5): 1277
- [10] Wang K, Liu G, Politis D J *et al.* *Materials Characterization*[J], 2017, 133: 196
- [11] Wang Zheng(王政), Dong Hongbo(董洪波), Ling Zhiwei(凌志伟). *Journal of Netshape Forming Engineering*(精密成型工程)[J], 2012(6): 4
- [12] Luo Z A, Xie G M, Ma Z Y *et al.* *Journal of Materials Science & Technology*[J], 2013, 29(12): 1116
- [13] Mosleh A, Mikhaylovskaya A, Kotov A *et al.* *Metals*[J], 2018, 8: 819
- [14] Ratochka I V, Naydenkin E V, Mishin I P *et al.* *Journal of Alloys and Compound*[J], 2022, 891: 161 981
- [15] Zhang Jingqi(张景祺), Lin Jian(林健), Hu Xiao(呼啸) *et al.* *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2020, 30(5): 1019
- [16] Tian N, Song X Y, Ye W J *et al.* *Journal of Materials Research and Technology*[J], 2023, 25: 1150
- [17] Jiang Xunyan(江训焱). *Thesis for Master*(硕士论文)[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2018
- [18] Cao Zean(曹泽安), Cheng Donghai(程东海), Hu Dean(胡德安) *et al.* *Transactions of Materials and Heat Treatment*(材料热处理学报)[J], 2018, 39(12): 129
- [19] Dudek M A, Chawla N. *Metallurgical and Materials Transactions A*[J], 2010, 41: 610
- [20] Cai Y C, Liu R P, Wei Y H *et al.* *Materials & Design*[J], 2014, 62: 83
- [21] Postnikova M N, Kotov A D, Bazlov A I *et al.* *Materials*[J], 2023, 16(10): 3714

Effect of Rare Earth Yb₂O₃ on Superplastic Deformation Behavior of Laser Welded TC4 Titanium Alloy

Cheng Donghai¹, Zhang Futing¹, Liu Shiwei², Li Haitao¹, Wang De¹, Xiong Zhenyu¹

(1. School of Aeronautical Manufacturing Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

(2. Military Representative Office of Air Force Armaments Department in Liaoyang Region, Shenyang 110031, China)

Abstract: Rare earth Yb₂O₃ of different contents was added to improve the superplastic deformation ability of laser weld of TC4 titanium alloy, and the superplastic deformation uniformity of the joint. The results show that the addition of Yb₂O₃ can reduce the flow stress of weld superplastic deformation, improve the elongation and increase the deformation uniformity coefficient K of the joint. With the increase in Yb₂O₃ content, the longitudinal peak flow stress and elongation of the weld first decrease and then increase, and the minimum peak flow stress is 11.9 MPa and the highest elongation is 592.3% when the Yb₂O₃ content is 6wt%. With the increase in Yb₂O₃ content in transverse deformation, the joint deformation uniformity coefficient K increases first and then decreases. When the Yb₂O₃ content is 6 wt%, the maximum K value of the sample is 0.209.

Key words: Yb₂O₃; titanium alloy; laser welding; superplastic deformation

Corresponding author: Li Haitao, Ph. D., Lecturer, Superconducting Material Center, School of Aeronautical Manufacturing Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, P. R. China, E-mail: 3514452130@qq.com