

激光焊接 Ti-4.5Al-3V-2Fe-2Mo 合金 的超塑成形组织及性能

付明杰^{1,2,3}, 陈 俐^{1,4}, 曾元松^{1,2,3}

(1. 北京航空制造工程研究所, 北京 100024)

(2. 塑性成形技术航空科技重点实验室, 北京 100024)

(3. 数字化塑性成形技术与装备北京市重点实验室, 北京 100024)

(4. 高能束流加工技术重点实验室, 北京 100024)

摘 要: 对光纤激光焊接的 SP700 钛合金的超塑变形性能、组织演化及变形后的力学性能进行研究。结果发现, 800 °C 锥形件变形时, 焊接方向平行轧制方向具有更优的超塑变形性能, 最大成形压力为 0.8 MPa, 最大成形高度为 75 mm, 较母材高 20 mm。随着变形量的增加, 焊缝区粗大的柱状晶和焊接接头咬边逐渐消失, 晶粒得到细化。经过 33% 的超塑变形量后, 焊接方向平行和垂直轧制方向的抗拉强度均有所下降, 但平行轧制方向、775 °C 成形的抗拉强度下降最小, 仅为 2.2%。锥形件和盒形件拉伸试样的断裂失效位置均在母材上。

关键词: SP700 钛合金; 激光焊接; 超塑性; 显微组织; 抗拉强度

中图分类号: TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2018)08-2555-06

超塑成形 (SPF) 技术经历了 45 年的发展, 钛合金的超塑成形/激光焊接 (SPL) 组合工艺的开发在缩短制造周期、提高零件成品率方面较超塑成形/扩散连接 (SPF/DB) 工艺具有突出优势^[1,2]。波音公司与华盛顿州立大学对 SPL 工艺的研究结果表明, 该工艺可获得隔墙结构、正弦波形和椭圆形格子等夹芯结构, 在空心超塑成形构件的高效、低成本制造中发挥重要作用。

($\alpha+\beta$) 型钛合金 SP700 (Ti-4.5Al-3V-2Fe-2Mo) 是日本 NKK 公司开发的可在低于 800 °C 获得高超塑性的低成本中等强度钛合金, 2001 年 SP700 钛合金被美国国家宇航机构 (包括联邦航空管理局) 收录至飞机用金属材料一览表。SP700 钛合金以其优异的低温超塑性、可热处理调整性能、良好的加工及焊接工艺性, 在航空、医疗器械、汽车、体育等领域广泛应用^[3-8]。Brewer^[9] 等在对 SP700 钛合金电阻焊与 SPF/DB 组合工艺 (RW/SPF/DB) 的研究结果表明, 超塑成形过程中, 焊接接头周围板材减薄较为严重。台湾学者 Tasy^[10-12] 开展了 SP700 钛合金 YAG 激光焊接和 CO₂ 激光焊接性研究, 显示其具有较好的激光焊接性, 焊后热处理可致 ($\alpha+\beta$) 组织的晶粒粗化从而减小 SP700 钛合金激

光焊缝的缺口敏感性。但对于 SP700 钛合金激光焊接件的超塑变形行为的研究鲜见报导。

本研究采用更为先进的光纤激光焊接的方法, 对 SP700 钛合金薄板对焊后的超塑成形性能及组织演变进行了研究, 为 SP700 钛合金 SPL 工艺提供参考和依据。

1 实 验

实验材料为由西部钛业有限责任公司提供的 0.8 mm 厚的 M 态 SP700 钛合金板材, 实测化学成分如表 1 所示。原始组织如图 1 所示, α 晶粒尺寸为 2~8 μm 。

采用锥形件和盒形件的超塑成形评价母材和激光拼接板的超塑成形性能及力学性能, 成形温度分别选取为母材的最佳超塑性温度 775 °C 和扩散连接温度 800 °C, 采用高纯氩气进行加压, 加压速率为 0.02 MPa/min, 直至材料胀破。

SP700 钛合金激光拼接焊接采用 5 kW 的 IPG 光

表 1 SP700 钛合金的化学成分
Table 1 Chemical composition of as-received SP700 titanium alloy ($\omega/\%$)

Al	V	Fe	Mo	O	C	N	H
4.32	3.04	1.83	2.06	0.13642	0.017	0.018	0.00153

收稿日期: 2017-08-15

基金项目: 航空基金项目 (2015ZE25017)

作者简介: 付明杰, 男, 1981 年生, 博士, 高级工程师, 北京航空制造工程研究所, 北京 100024, 电话: 010-85701254, E-mail: fumj@bamtri.com

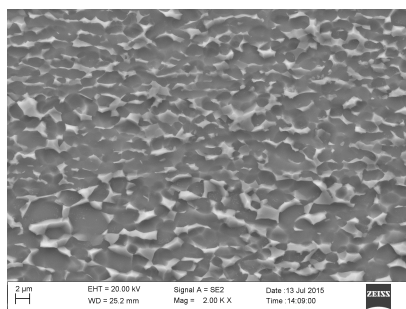


图 1 SP700 钛合金板材原始组织

Fig.1 SEM image of as-received SP700 titanium alloy

纤激光器进行焊接, 焊接加工头的聚焦镜长度为 300 mm, 光纤传输芯径为 300 μm, 焦斑直径为 0.28 mm。激光焊接头由机器人驱动焊接, 光束焦点作用在工件表面, 激光功率 2 kW, 焊接速度 6 m/min, 所获得的焊缝截面形状及焊缝中心组织特征如图 2 所示, 典型的相向生长的柱状晶, 晶内为马氏体针状组织。

LWA1 和 LWA2 激光焊缝平行轧制方向, LWA3 激光焊缝垂直轧制方向, 焊后射线探伤无气孔裂纹缺陷。采用 OLYMPUS BX41M 金相显微镜和美国 FEI 的 Quanta250 FEG 场发射扫描电子显微镜进行显微组织观察分析。

2 结果与分析

2.1 锥形件超塑成形性能

锥形件超塑成形后的胀破压力及成形高度是评价

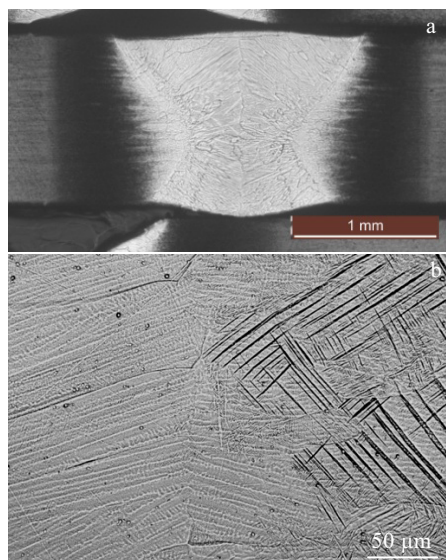


图 2 SP700 钛合金板材激光焊缝形状及组织

Fig.2 Weld cross-section of laser welding SP700 titanium alloy (a) and weld microstructure (b)

材料受平面应力作用的超塑性能有效方法之一, 主要变形过程是锥顶高度不断增加、应变增大壁厚减薄, 锥壁逐渐与模具贴合, 贴合后壁厚不再减薄。胀破的压力越低、成形高度越高, 则表明材料的超塑性越好。3 种工艺试验的胀破压力及成形高度如表 2 所示。可见, 对比母材 (BM) 的成形高度, LWA1 和 LWA2 的成形高度较母材高, 而胀破压力也较母材的高出 0.2 MPa。这表明, 带激光焊缝的 SP700 钛合金综合超塑变形能力更强。由于激光焊缝设置在板料中间, 变形过程中此处应该是变形最大区, 但最终胀破口的位置均不在激光焊缝处, 而是在母材处。超塑变形过程实际是变形区不断硬化和软化的过程, 即超塑性较好, 表明抵抗颈缩的能力强。从实验结果来看, 带激光焊缝的胀破压力较母材的略高, 说明激光焊缝在高温下的强度较母材略高, 并且与母材具有较好的变形协调性。另外, 从变形后母材表面产生的波纹是母材具有显著的各向异性所致, 由此也会影响母材的超塑变形能力。LWA3 的焊缝成形质量良好, 但成形高度较 LWA1 和 LWA2 的要低, 分析原因是母材的强烈的各向异性, 且焊缝垂直轧制方向, 起到阻碍变形的作用, 因此变形高度要低。可见, 在工艺设计中, 应尽量避免采用横向焊缝。锥形件焊缝成形后的外观如图 3 所示。

2.2 焊缝及母材的微观组织演变

锥形件超塑变形后的微观组织如图 4 所示。对比超塑变形前的焊缝组织形貌, 可以明显发现, 经过超塑变形后, 原始焊缝的咬边明显减小, 焊缝尺寸变薄、变长, 但仍较母材的厚度要大, 如图 4a 所示; 另外, 随着变形量的增加, 原始的粗大柱状晶组织消失, 晶粒得到细化, 次生 α 相间距显著减小, 晶粒取向完全发生改变, 基本沿双向拉应力方向, 伴有晶粒带, 可能是由于原始板材的带状组织的存在导致的, 如图 4b 所示。还可以发现, 经过超塑变形后的热影响区几乎消失, 焊缝区与热影响区的组织差别明显, 如图 4c 所示, 焊缝区为长条、取向明显的组织, 而热影响区几乎与母材相同, 均为等轴的细小组织。对比超塑成形温度为 775 和 800 °C 的微观组织, 无论焊缝还是母

表 2 锥形件超塑成形后的胀破压力及成形高度
Table 2 Max. pressure and deformation height of SP700 titanium cone

No.	Deformation temperature/°C	Max. gas pressure/MPa	Final height/mm
LWA1	775	1.0	66
LWA2	800	0.8	75
LWA3	775	0.82	62
BMA1	775	0.8	55
BMA2	800	0.6	55

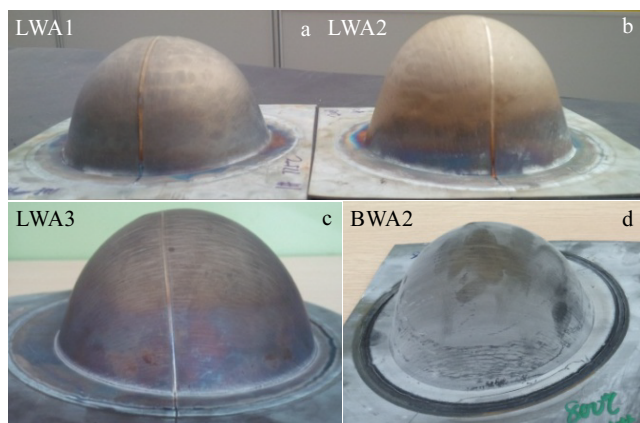


图 3 SP700 钛合金锥形件外观

Fig.3 Cone features of SP700 titanium alloy: (a) LWA1, (b) LWA2, (c) LWA3, and (d) BWA2

材, 几乎没有显著形貌上的影响, 如图 4d 和 4e。图 4f 为焊缝垂直轧制方向经超塑变形后的焊缝区组织, 即原始焊缝的柱状晶的取向与母材的轧制方向相同, 由成形结果来看, 这种取向的一致相对而言并未给超塑性带来显著的改善, 焊缝区显微组织与 LWA1 和 LWA2 相近, 但焊缝区的变形长度略短, 这与 LWA3 锥形件整体变形量相对小有关。对于常用的 TC4 钛合金或 TA15 钛合金的锥形件超塑成形而言, 随着应变的增加, 晶粒尺寸逐渐增大, 最终导致失效。而激光

焊缝区的组织为粗大的柱状晶组织, 这种组织在高温条件下具有很好的抗蠕变性能, 因此, 锥形件成形过程中, 焊缝区由于强度高, 主要协调变形被分配在焊缝两侧, 这也是破裂位置在母材上的主要原因。

2.3 超塑成形后拉伸性能

采用 SPF 后的盒形件, 对激光焊缝 SPF 成形后的拉伸性能进行评价。盒形件尺寸及拉伸试样取样示意图如图 5 所示。经对成形后盒形件底面的壁厚测量, 平均变形量为 33%。拉伸后均断裂在母材, 但靠近焊缝, 表明经过超塑成形后激光焊缝的强度高于母材。LWA1、LWA2、LWA3 及母材焊缝的抗拉强度对比如图 6 所示 (其中横坐标代表测试试样编号), 其平均值分别为 1121、1071、932、1005 MPa (焊缝垂直于轧制方向) 和 1146 MPa (焊缝平行于轧制方向), 可见, 经过超塑成形后, 带焊缝的抗拉强度均有所下降, 对于 LWA1 和 LWA2, 抗拉强度降幅较小, 分别下降 2.2% 和 6.5%, 而 LWA3 的抗拉强度降幅为 7.2%。775 °C 为 SP700 钛合金的最佳超塑性温度, 而 800 °C 则为其最佳扩散连接温度, 因此, 采用 SP700 钛合金 SPF/DB+LW 组合工艺时应综合考虑由于超塑温度和扩散温度不同而引起性能下降程度不同对构件带来的影响, 并且应平行轧制方向施焊。

如图 7 所示为盒形件激光焊缝 SPF 后微观组织。在该变形量下, 低倍焊缝仍保留粗大的柱状晶组织。高倍下观察焊缝区及焊缝区与母材交界组织, 柱状晶

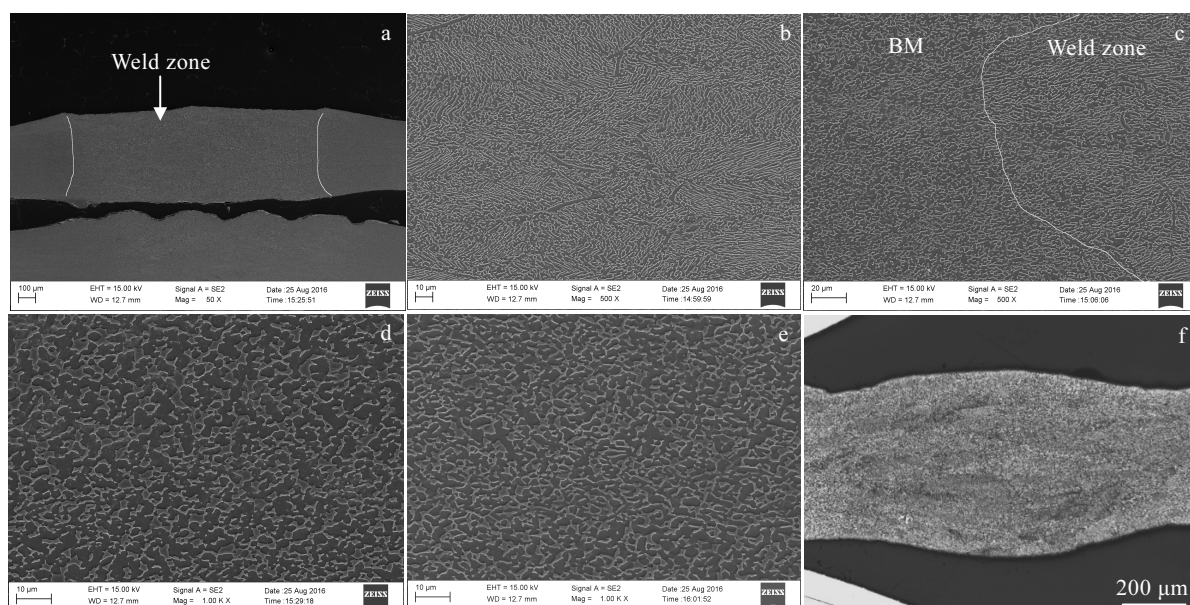


图 4 不同变形条件的焊缝及母材微观组织

Fig.4 Microstructures under different deformation conditions: (a) macroscopic image of LWA1 welding, (b) microstructure of LWA1 welding, (c) LWA1 boundary microstructure between welding and heat effected zone, (d) microstructure of LWA1 BM zone, (e) microstructure of LWA2 heat affected zone, and (f) macroscopic image of LWA3 welding

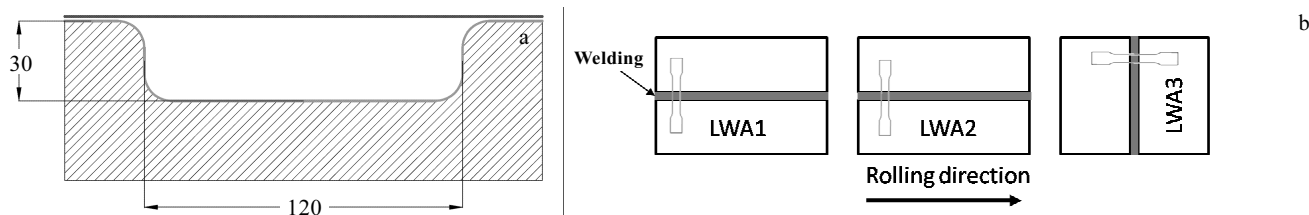


图 5 盒形件及拉伸试样取样示意图

Fig.5 Dimension of SPF box (a) and feature after SPF (b)

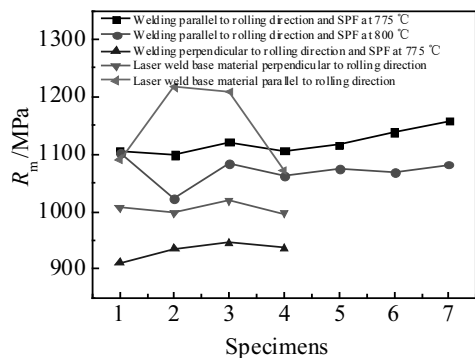


图 6 SPF 后与母材焊缝的抗拉强度对比

Fig.6 Comparison of welding ultra strength between SPF and base material

晶界明显, 局部柱状晶晶界的初生 α 相长大, 形成细小长条状, 晶内均含有细小长条的次生 α 相; 焊缝区与母材区的微观组织特征区别明显, 如图 7b 和 7c 所示; LWA3 的焊缝区具有相似的特征, 但晶内次生 α 相较 LWA1 和 LWA3 的要短, 如图 7d 所示。图 8 所示为 3 个参数条件下拉伸断口形貌, 由细小的韧窝可以判断出断裂失效发生在母材区, 属于韧性断裂。而强度上的主要差别源于母材的强烈各向异性所致。图 9 所示为母材横向(垂直轧制方向)和纵向(平行轧制方向)的抗拉强度对比(其中横坐标代表测试试样编号), 可见, 横向的抗拉强度远高于纵向的, 其平均值分别为 975 和 1218 MPa。根据上述拉伸结果可以判断, 这种各向异性并未通过超塑成形过程而消失, 但略有减小。

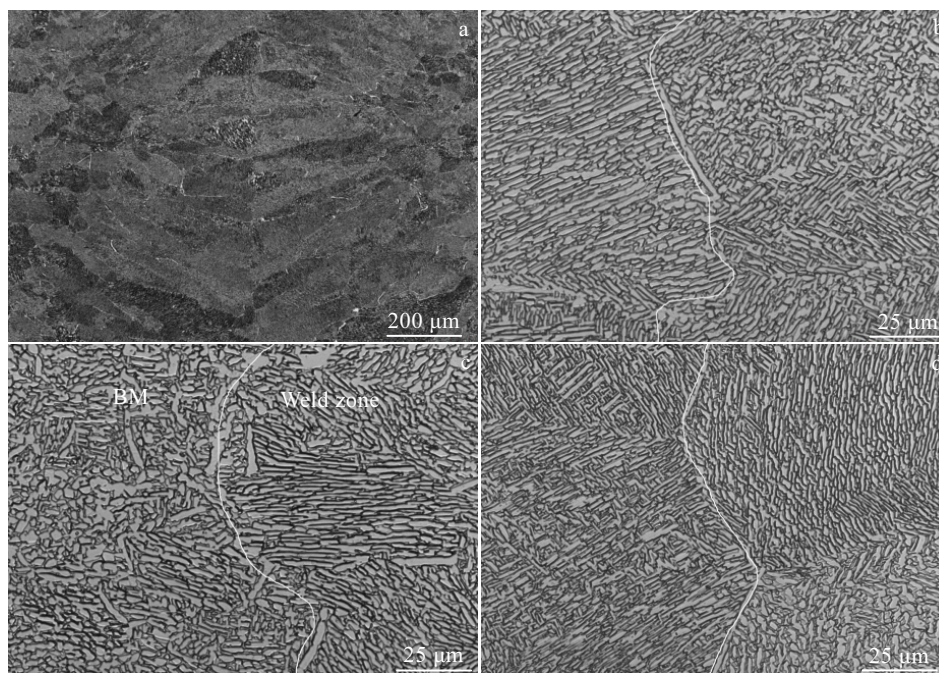


图 7 不同条件下成形盒形件的显微组织

Fig.7 Structure of box part under different deformation conditions: (a) macroscopic image of LWA1 welding, (b) microstructure of LWA2 welding, (c) boundary microstructure between welding and base material of LWA2, and (d) microstructure of LWA3 welding

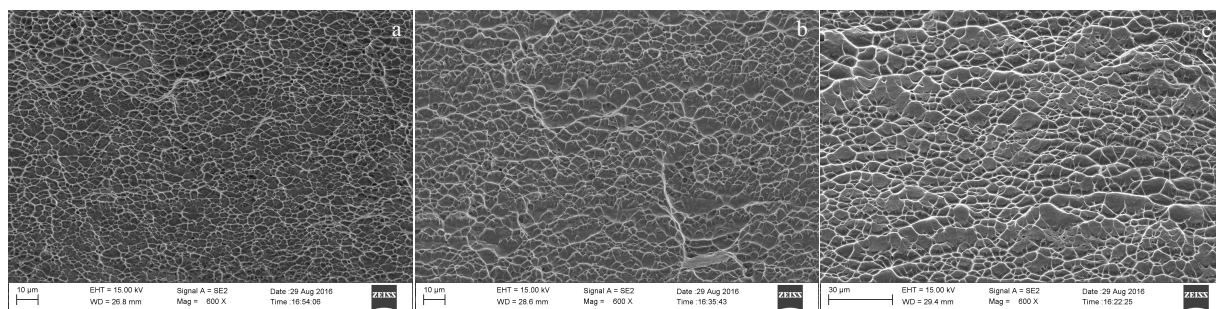


图 8 室温拉伸断口形貌

Fig.8 Morphologies of RT tensile fracture: (a) LWA1, (b) LWA2, and (c) LWA3

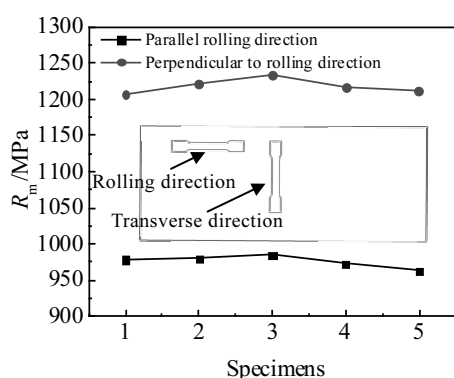


图 9 母材横向和纵向的抗拉强度对比

Fig.9 Ultimate tensile strength of base material at rolling and transverse direction

3 结 论

1) 采用锥形件超塑成形的方法评价了 SP700 钛合金带有与板材轧制方向平行和垂直的激光焊缝的超塑变形能力, 在 800 °C 超塑成形, 平行轧制方向焊缝具有更加优异的超塑性。

2) 经超塑大变形后, SP700 钛合金的激光焊缝咬边几乎消失, 粗大的柱状晶组织得到细化, 热影响区与母材微观组织区别不明显, 且组织稳定, 仍为等轴晶, 并无晶粒长大。

3) 对比母材焊缝的室温抗拉强度, 平行垂直轧制方向的焊缝分别经过 775 和 800 °C 盒形件超塑成形后, 平均抗拉强度分别下降 2.2% 和 6.5%, 而垂直轧制方向的焊缝成形后抗拉强度下降 7.2%; 均在母材上断裂失

效, 经超塑成形后可略改善原始板材的各向异性。

参考文献 References

- [1] Langdon T G. *Materials Science Forum*[J], 2016, 838-839: 3
- [2] Guo Heping(郭和平), Zeng Yuansong(曾元松), Han Xiuquan(韩秀全) *et al. Welding & Joining*(焊接)[J], 2008(11): 41
- [3] Cai Jianming(蔡建明), Xu Chao(许超), Hao Mengyi(郝孟一) *et al. Journal of Aeronautical Materials*(航空材料学报)[J], 2006, 26(3): 71
- [4] Huang Jinchang(黄金昌). *Rare Metals and Cemented Carbides* (稀有金属与硬质合金)[J], 1998(3): 58
- [5] Zeng Liying(曾立英), Zhao Yongqing(赵永庆), Li Danke(李丹柯) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2005, 34(12): 1940
- [6] Wang Xiaochao(王小朝), Zhang Mingxiang(张明祥), Wen Zhigang(文志刚) *et al. Acta Metallurgica Sinica*(金属学报)[J], 2002, 38(SI): 407
- [7] Gunawarman A, Niinomi M, Fukunaga K *et al. Mater Sci Eng A*[J], 2001, 308(1-2): 216
- [8] Gunawarman A, Niinomi M, Eylon D *et al. Metall Mater Trans A*[J], 2003, 34(2): 267
- [9] Brewer W D, Bird R K, Wallace T A. *Mater Sci Eng A*[J], 1998, 243(1-2): 299
- [10] Tsay L W, Jiang Y C, Chen C. *Mater Trans*[J], 2009, 50(10): 2396
- [11] Tsay L W, Ding Y S, Chung W C *et al. Metall Mater Trans A*[J], 2010, 41(6): 1502
- [12] Chu C Y, Hsieh C T, Tsay L W. *Materials and Design*[J], 2014, 63: 14

Superplastic Deformation Microstructure and Property of Laser Welded Ti-4.5Al-3V-2Fe-2Mo Alloy

Fu Mingjie^{1,2,3}, Chen Li^{1,4}, Zeng Yuansong^{1,2,3}

(1. Beijing Aeronautical Manufacturing Technology Research Institute, Beijing 100024, China)

(2. Aeronautical Key Laboratory for Plastic Forming Technology, Beijing 100024, China)

(3. Beijing Key Laboratory of Digital Plasticity Forming Technology and Equipment, Beijing 100024, China)

(4. Key Laboratory for High Energy Density Beam Processing Technology, Beijing 100024, China)

Abstract: The superplastic forming ability, microstructure evolution and tensile property of fiber laser welding SP700 titanium alloy after superplastic forming (SPF) were investigated. Results indicate that when deformed at 800 °C, the cone part has better superplasticity with the welding direction parallel to the rolling direction of base material. Its max. pressure is 0.8 MPa and the cone height is 75 mm, which is 20 mm higher than that of base material. With the increase of deformation, the coarse columnar grains and weld undercut are eliminated gradually and the grains are comparably fine. With about 33% deformation reduction, the tensile strength of materials with two welding directions all decreases, and tensile strength of the specimen formed at 775 °C with welding direction parallel to the rolling direction only decreases by 2.2%. The fracture positions are all on the base material for the cone part and tensile specimen.

Key words: SP700 titanium alloy; laser welding; superplasticity; microstructure; tensile strength

Corresponding author: Fu Mingjie, Ph. D., Senior Engineer, Beijing Aeronautical Manufacturing Technology Research Institute, Beijing 100024, P. R. China, Tel: 0086-10-85701254, E-mail: fumj@bamtri.com