

文章编号: 0258-7025(2002)Supplement-0535-04

# 合金激光表面改性组织的超塑扩散连接特性\*

吴国清<sup>1,2</sup> 黄正<sup>1</sup> 阮中健<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 北京航空航天大学材料科学与工程学院, 北京 100083)  
(<sup>2</sup> 华中科技大学激光技术国家重点实验室, 武汉 630074)

**提要** 对  $\gamma$ -TiAl 基合金试样表面激光表面快速熔凝处理后进行超塑扩散连接, 探讨了激光快速熔凝组织在热处理过程中的转变规律及其超塑扩散连接规律。研究表明, 激光处理后试样表面熔凝区的枝晶组织经后续热处理可转变为细小的等轴晶粒组织, 形成了良好的超塑连接条件。连接工艺结果表明, 连接工艺主要参量间的共同作用对材料的连接效果有着重要的影响, 其中选择合适的连接温度尤为重要。

**关键词** TiAl 基合金, 显微组织, 激光表面处理, 连接, 热处理

**中图分类号** TG146.2; TG457.19; TG113.26 **文献标识码** A

## Superplastic/diffusion Bonding Characteristic of Laser Surface Melted Alloy

WU Guo-qing<sup>1,2</sup> HUANG Zheng<sup>1</sup> RUAN Zhong-jian<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Department of Materials Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083)  
(<sup>2</sup> State Key Lab. of Laser Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

**Abstract** After laser surface treatment of TiAl alloy, superplastic forming/diffusion bonding (SPF/DB) was carried out. The structure transformation of laser surface melted TiAl intermetallic alloy and its rule of SPF/DB were discussed. The results show that, during the annealing treatment, the dendritic structure formed by laser surface melting will be transformed into fine-grained structure, which offers a good structural basis to SPF/DB. And the SPF/DB results show that the main bonding parameters influence on bonding effect commonly, thereinto, the choice of fitting temperature plays a key role.

**Key words** TiAl based alloy, microstructure, laser surface treatment, bonding, annealing treatment

## 1 引言

超塑扩散连接因其操作简易以及节约制造成本成为一项重要的固态连接技术<sup>[1-3]</sup>。复杂、大面积的零件可以在一次工序中连接而成, 提高了设计的自由度, 减少了零部件的数量, 简化了装配工序。对超塑连接来说, 通常细小的组织和晶粒是实现理想连接的前提<sup>[4,5]</sup>。激光表面重熔以及随后的自淬冷却, 直接在工件表面上形成了非常细小的微观组织, 有助于提高扩散能力, 降低连接温度<sup>[6]</sup>。同时, 由于熔化仅发生在工件极薄的表层上, 保持了工件所需的整体性能, 这一点对于高温结构材料尤其重要。

为此, 本文探讨了采用激光表面处理技术在  $\gamma$ -TiAl 基合金试样拟连接表面获取细小组织的可能性及其规律, 并在此基础上进行了超塑扩散连接试验, 探讨了合金激光表面改性组织的超塑连接规律。

## 2 试验方法

以 Ti-45Al-2Mn-2Nb + 0.8vol% TiB<sub>2</sub> (Ti-45Al) 合金作为研究材料, 经 1350 °C 保温 10 min 后随炉冷却处理, 得到全片层组织。

激光表面处理在 HGL-84 横流电激励 CO<sub>2</sub> 激光器上进行, 其工艺参数为: 输出功率 1.2 kW, 扫描速率 10 mm/s, 光斑直径 3 mm。

在 HT-100 超高温金相显微镜上原位分析合金激光熔凝组织在不同温度下的组织转变特征。加热

\* 国家自然科学基金(59971004)、激光技术国家重点实验室开放基金资助课题。

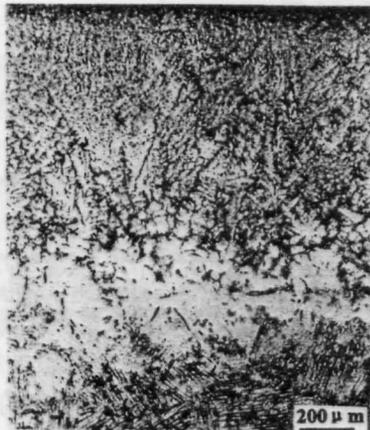
升温速率为 200 °C/min, 温度分别为 800 °C, 850 °C, 900 °C, 950 °C。

对经处理后的试样进行了超塑扩散连接试验, 试验在 GLEEBLE 热模拟机上进行。连接采用惰性气体保护。试样尺寸为 4.5 mm×2.5 mm×6 mm。

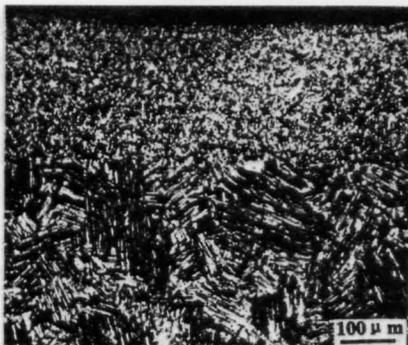
在 NEOPHOT-2 型光学显微镜和 S-530 型扫描电镜下对合金显微组织结构、连接效果进行了观察分析。

### 3 试验结果及分析

图 1(a)为 Ti-45Al 合金经过表面激光处理后的显微组织。由图可以看出,材料基体组织为片层畴和等轴  $\gamma$  晶粒组成的混合组织。表层形成了与基体组织完全不同的两个区域,即表层熔凝区和固态相变区。合金表层熔凝区主要由枝晶组织和胞状组织组成,胞状晶的大小为 10~20  $\mu\text{m}$ ,柱状枝晶的直径约为 5~10  $\mu\text{m}$ ,长度约为 40~60  $\mu\text{m}$ 。表层熔凝



(a)



(b)

图 1  $\gamma$ -TiAl 基金属试样表层典型的金相组织。

(a) 激光表面处理; (b) 激光表面处理 + 后续热处理(900 °C, 0.5 h)

Fig.1 The representative microstructure of  $\gamma$ -TiAl.

(a) laser surface treatment; (b) laser surface treatment + heat-treatment at 900 °C for 0.5 h

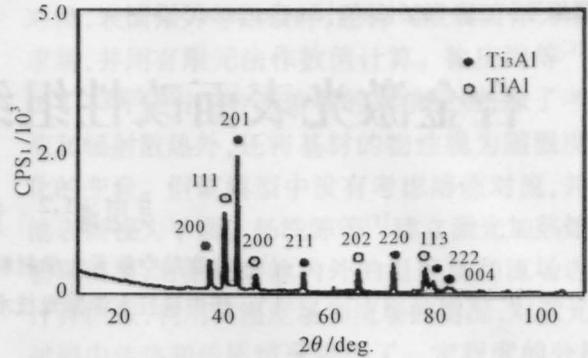


图 2  $\gamma$ -TiAl 基金属试样激光表面处理后熔凝区的 X 射线衍射分析谱

Fig.2 X-ray diffraction pattern of the surface melt area of the laser surface treated  $\gamma$ -TiAl sample

区组织的 X 射线衍射分析结果表明,该组织由  $\alpha_2$  和  $\gamma$  相组成,从衍射峰的强度可知,  $\alpha_2$  相占有较大的体积分数(图 2)。固态相变区作为一个过渡区域存在于基体和熔凝区之间,在激光束的作用下,该区域迅速加热到  $\alpha$  相区或  $\alpha + \gamma$  相区发生相变,在冷却过程中形成了与基体不同的显微组织。由于激光加热具有较大的加热速率,能在很短时间内使试样表面熔化并随之冷却,由表及里形成了一个很大的温度梯度,因此,在经过激光表面熔凝处理后的试样表面得到的是过饱和  $\alpha_2$  相的亚稳组织,在其后续的热处理过程中,组织将发生分解而析出  $\gamma$  相,在一定条件下,熔凝层中的枝晶组织可转化为细小的等轴晶组织[图 1(b)]。超高温金相显微镜下采用摄像原位观察技术,对该组织转变的观察和分析结果表明:随着热处理温度的升高,组织出现明显变化或转化为等轴晶所需的时间将缩短,转变速度加快(图 3)。当温度在 900 °C 时,保温时间到 14 min 时其组织中的枝晶基本转变为细小的等轴晶,其晶

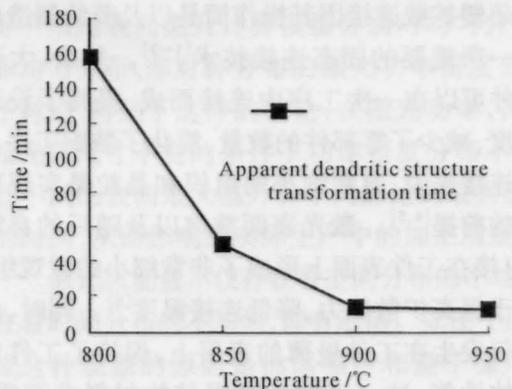


图 3 不同温度对枝晶细化速度的影响

Fig.3 The effect of different temperature on the rate of dendritic structure refinement

粒尺寸约  $1\sim 4\ \mu\text{m}$ 。在整个加热过程中热影响区和基体组织没有明显的组织变化,具有较高的热稳定性。显然,这类细小的等轴晶粒是较为理想的超塑连接组织。

为对上述表面组织超塑连接特征有一充分了解,对超塑连接工艺的主要参量:温度、压力、时间的影响进行了研究。结果表明,连接工艺主要参量间的共同作用对材料的连接效果有着重要的影响。其中选择合适的连接温度尤为重要,这一点可能与合金超塑温度与其晶粒尺寸存在直接的联系有关。图4给出了连接前后试样的变形量随连接工艺参数:连接温度、连接压力和连接时间的变化情况。可以看出,温度是决定连接前后试样的变形量的最主要

因素,显然,这种变形对于提高连接的效果具有重要的意义。在给定连接压力和连接时间的条件下,不同温度条件下的连接试验表明,在连接温度低于  $850\ \text{℃}$  [图5(a)]在个别接触点处形成冶金结合,原界面仍然存在,而当连接温度提高到  $900\ \text{℃}$  [图5(b)]连接效果显著改善,原始界面基本消失。而在一定的连接温度和连接时间的条件下,以增加连接压力来改善连接效果具有一定的局限性。在相同连接温度( $T=850\ \text{℃}$ )和连接时间( $t=1\ \text{h}$ )条件下,当连接压力增大到一定数值( $P=80\ \text{MPa}$ )后,压力的进一步增大对界面间隙变化的影响并不显著。在一定的连接温度和连接压力下,随着连接时间的延长,通过扩散和晶界滑移机制,可以改善连接效果。

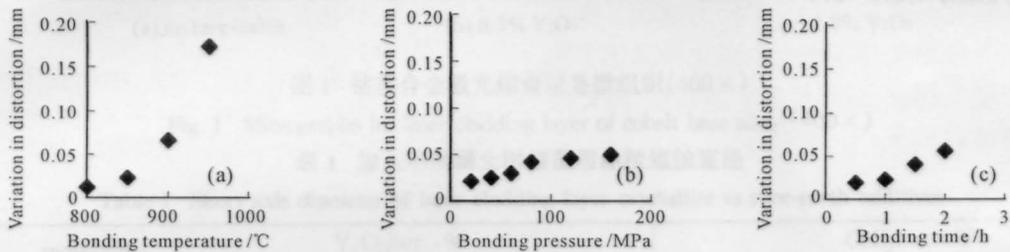


图4 试样连接前后的变形量随连接工艺参数变化的关系曲线。(a) 连接温度( $P/60\ \text{MPa}$ ,  $t/1\ \text{h}$ ); (b) 连接压力( $T/850\ \text{℃}$ ,  $t/1\ \text{h}$ ); (c) 连接时间( $T/850\ \text{℃}$ ,  $P/60\ \text{MPa}$ )

Fig.4 Variation in distortion with bonding parameters in samples before and after bonding. (a) bonding temperature ( $P/60\ \text{MPa}$ ,  $t/1\ \text{h}$ ); (b) bonding pressure ( $T/850\ \text{℃}$ ,  $t/1\ \text{h}$ ); (c) bonding time ( $T/850\ \text{℃}$ ,  $P/60\ \text{MPa}$ )

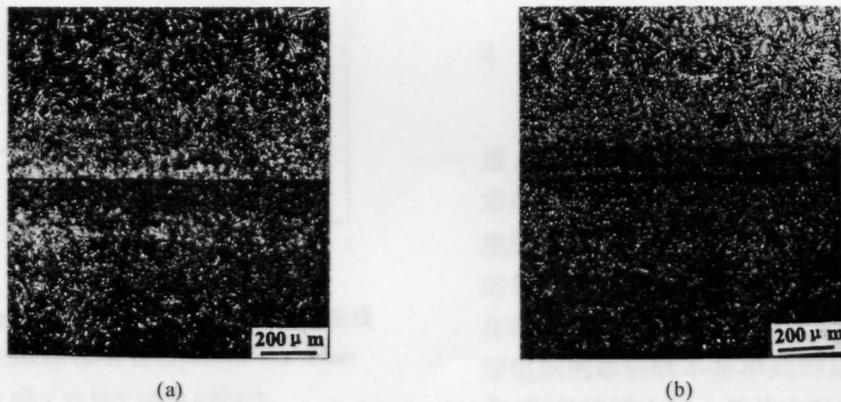


图5 连接温度对连接效果的影响( $P/60\ \text{MPa}$ ,  $t/1\ \text{h}$ ). (a)  $850\ \text{℃}$ ; (b)  $900\ \text{℃}$

Fig.5 Microstructure of the jointing interface at different temperature ( $P/60\ \text{MPa}$ ,  $t/1\ \text{h}$ ). (a)  $850\ \text{℃}$ ; (b)  $900\ \text{℃}$

另外,上述热处理试验和连接试验结果表明,经后续热处理所得的细晶组织的超塑连接温度与熔凝组织由枝晶转变为细小等轴晶的温度几乎相同,因此,在一定温度条件下,熔凝组织的细化转变与超塑连接可同时进行,使得直接利用激光熔凝组织进行连接成为可能。

## 4 结 论

1) 在一定条件下,激光处理后试样表面熔凝区的枝晶组织经后续热处理可转变为细小的等轴晶粒组织,枝晶的转化速度随温度升高而加快;当温度为  $900\ \text{℃}$  时,枝晶完成等轴晶转化的时间约  $14\ \text{min}$ ,细化后的晶粒尺寸约  $1\sim 4\ \mu\text{m}$ ,为超塑连接提供了较

为理想的组织状态。

2) 连接工艺主要参量间的共同作用对材料的连接效果有着重要的影响,其中选择合适的连接温度尤为重要。

3) 经后续热处理所得的细晶组织的超塑连接温度与熔凝组织由枝晶转变为细小等轴晶的温度几乎相同,因此,在一定温度条件下,熔凝组织的细化转变与超塑连接可同时进行,使得直接利用激光熔凝组织进行连接成为可能。

参 考 文 献

1 Y. Maehara, Y. Komizo, T. G. Langdon. Principles of superplastic diffusion bonding. *Materials Science and Technology*, 1988, 4:669~674

2 E. J. Tuegel, M. O. Pruitt, L. D. Hefti. SPF/DB. *Advanced Materials & Processes*, 1989, 7:36~40

3 O. A. Kaibyshev, R. Y. Lutfullin, R. V. Safiulin. Problems and promises of developing integral technology of superplastic forming and diffusion bonding (SPF/DB). *Mater. Sci. Forum.*, 1994, 170~172,241~249

4 J. Zhang, Y. L. Zhou, J. T. Niu. Study of superplastic forming and diffusion bonding of Al-6Mg. *J. Mater. Eng.*, 1995, 8:35~37

5 R. Y. Lutfullin. Superplasticity and solid state bonding of materials. In: A. E. Chokshi ed. ICSAM' 97. Switzerland: Trans Tech Publications Ltd, 1997. 681~686

6 A. Tiziant, L. Giordano, E. Ramous. Laser surface treatment by rapid solidification. In: E. A. Metzbower ed. *Lasers in Materials Processing*, American for Metals, 1983. 108~114

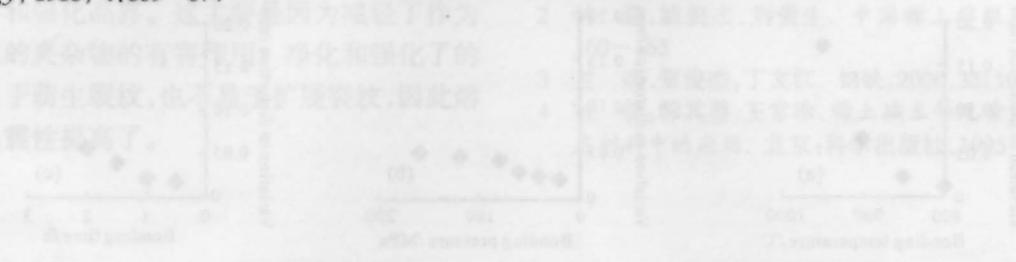


Fig. 4 Variation in diffusion bonding temperature in superplastic forming with loading program (a) bonding program (1) (200 MPa, 11 s); (b) bonding program (2) (200 MPa, 11 s); (c) bonding program (3) (200 MPa, 11 s)

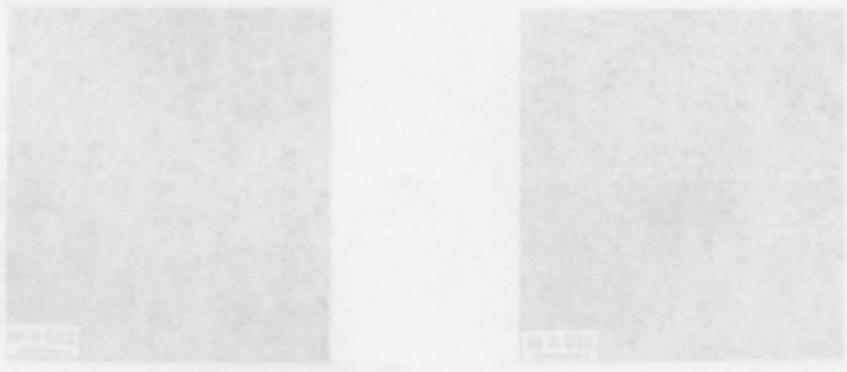


Fig. 5 Microstructure of the bonding interface at different temperatures (a) 200 MPa, 11 s; (b) 200 MPa, 11 s

参 考 文 献

1 王... 超塑... 连接... 温度... 影响... 重要... 选择... 连接... 温度... 尤为... 重要...

2 E. J. Tuegel, M. O. Pruitt, L. D. Hefti. SPF/DB. *Advanced Materials & Processes*, 1989, 7:36~40

3 O. A. Kaibyshev, R. Y. Lutfullin, R. V. Safiulin. Problems and promises of developing integral technology of superplastic forming and diffusion bonding (SPF/DB). *Mater. Sci. Forum.*, 1994, 170~172,241~249

4 J. Zhang, Y. L. Zhou, J. T. Niu. Study of superplastic forming and diffusion bonding of Al-6Mg. *J. Mater. Eng.*, 1995, 8:35~37

5 R. Y. Lutfullin. Superplasticity and solid state bonding of materials. In: A. E. Chokshi ed. ICSAM' 97. Switzerland: Trans Tech Publications Ltd, 1997. 681~686

6 A. Tiziant, L. Giordano, E. Ramous. Laser surface treatment by rapid solidification. In: E. A. Metzbower ed. *Lasers in Materials Processing*, American for Metals, 1983. 108~114