

[文章编号] 1004-0609(2001)05-0760-04

γ -TiAl 基合金的表面激光处理及超塑性扩散连接^①

吴国清, 阮中健, 黄 正

(北京航空航天大学 材料科学与工程系, 北京 100083)

[摘 要] 较系统地研究了 TiAl 基合金激光快速熔凝组织细化特征及该类组织的超塑连接规律。结果表明, 激光处理后试样表面熔凝区的组织主要为胞状枝晶组织, 经后续热处理可转变为细小的等轴晶粒组织, 并形成了良好的超塑连接条件。利用该表面组织对试样进行超塑扩散连接, 探讨了连接温度、压力和时间对连接效果的影响。表面细化组织试样与整体细化组织试样的超塑连接具有基本相同的连接规律。在连接温度 900 ℃, 连接压力 60 MPa, 连接时间 1 h 条件下, 可以实现试样的超塑扩散连接。

[关键词] TiAl 基合金; 显微组织; 激光表面处理; 连接

[中图分类号] TG 146.2; TG 457.19; TG 113.26

[文献标识码] A

γ -TiAl 基合金具有低密度、良好的高温性能, 在航空航天发动机上极具应用潜力。目前该合金的焊接技术有氩弧焊、电子束焊、激光焊、超塑扩散焊等^[1~4]。但由于 γ -TiAl 基合金塑性较低并具有较高的裂纹敏感性, 增大了工艺应用的难度。近年来, 研究者^[5, 6]对超塑状态下的固态连接工艺进行了广泛研究。Cam^[5]对片层组织的 Ti-47Al 合金试件, 在 1100 ℃条件下实施超塑扩散连接, 获得了良好的焊接效果。但在较低温度、较短时间实现合金超塑连接, 合金必须具有细小的等轴晶粒组织^[7~10], 而这种细晶组织的超塑能力与高温结构材料所需的高抗蠕变能力却构成了不可调和的矛盾。因此, 探讨在试件预连接表面上获得细晶组织的超塑扩散连接将成为解决这一矛盾的可能途径。作者采用激光表面熔凝处理的方法, 在不影响 γ -TiAl 基合金整体性能的条件下, 在拟连接表面形成细小的组织状态, 从而使表层在一定温度下呈现超塑性, 以期实现合金低温、短时、高质量连接。

1 实验

选用 Ti-45Al-2Mn-2Nb+0.8%TiB₂ 合金(体积分数, Ti-45Al)作为研究材料, 材料经 1350 ℃保温 10 min 后随炉冷却得到全片层组织。

激光表面处理在 HGL-84 横流电激励 CO₂ 激光器上进行, 其工艺参数为: 输出功率 2 kW, 扫描

速率 10 mm/s, 离焦量 32 mm。经过激光表面处理后的试样在不同温度条件下进行处理以探讨激光表面处理热处理工艺对材料组织的影响。

超塑扩散连接试验在 Gleeble 热模拟机上进行, 试样采用惰性气体保护, 试样尺寸为 4.5 mm × 2.5 mm × 6.0 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、连接效果进行观察。

2 结果与分析

2.1 材料表面组织特征

图 1 所示为材料激光表面处理前后的典型组织特征。材料原始组织为全片层组织, 以 γ 相为主, α_2 相以很窄的片层形式存在于 γ 相层之间。材料经激光快速熔凝表面处理后在合金表面形成了与基体组织完全不同的两个区域, 即表面熔凝区和固态相变区, 在合金表面的熔凝区, 由表及里, 其结晶组织的特征变化顺序为混晶组织 → 枝晶组织 → 胞状晶组织, 胞状晶的大小为 10~20 μ m, 柱状枝晶的直径约为 5 μ m。由于激光表面熔凝是一种快速的非平衡过程, 试样表面得到的是过饱和 α_2 相组织, 该组织不稳定, 在其后续的热处理过程中将发生分解而析出 γ 相。对激光表面处理后的材料在不同温度下进行热处理发现(图 2(a)), 当温度达到 850 ℃时枝晶和胞状晶组织开始发生明显的变化, 并且随着退

① [基金项目] 国家自然科学基金资助项目(59971004)

[收稿日期] 2000-12-25; [修订日期] 2001-03-23

[作者简介] 吴国清(1975-), 男, 博士研究生。

火温度的提高, 组织变化的速率加快, 经 950 °C, 1 h 的退火热处理, 表面熔凝区内的枝晶和胞状晶可基本消除。在退火过程中固态相变区组织和基体组织未发生变化, 保持着较高的稳定性(图 2(b))。

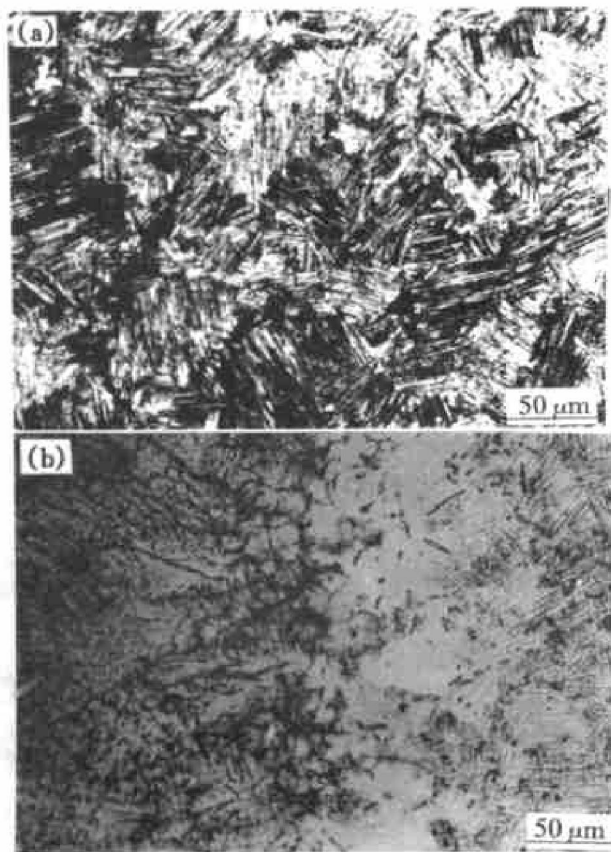


图 1 γ -TiAl 基合金激光表面处理前后的典型组织

Fig. 1 Representative microstructures before and after laser surface processing

(a) —Original microstructure;

(b) —Microstructure after laser surface melted

2.2 超塑连接工艺参数的影响

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。图 3 给出了在连接压力($p = 60$ MPa)和连接时间($t = 1$ h)固定条件下, 不同连接温度对连接效果的影响。可以看出, 在 800 °C 和 850 °C 的连接温度下, 在较短时间内达不到理想的连接效果, 连接时两侧合金在连接压力作用下, 两侧界面相互靠近, 只在个别接触点处形成冶金结合, 原界面仍然存在(图 3(a), (b))。当连接温度提高到 900 °C 以上时, 连接效果显著改善, 原始界面基本消失(图 3(c), (d))。由此可以看出连接温度对试样超塑连接效果所产生的重大影响。

图 4 所示为在连接温度($\theta = 850$ °C)和连接时间($t = 1$ h)相同条件下, 不同连接压力对连接效果的影响。可以看出, 随着连接压力的增大, 连接

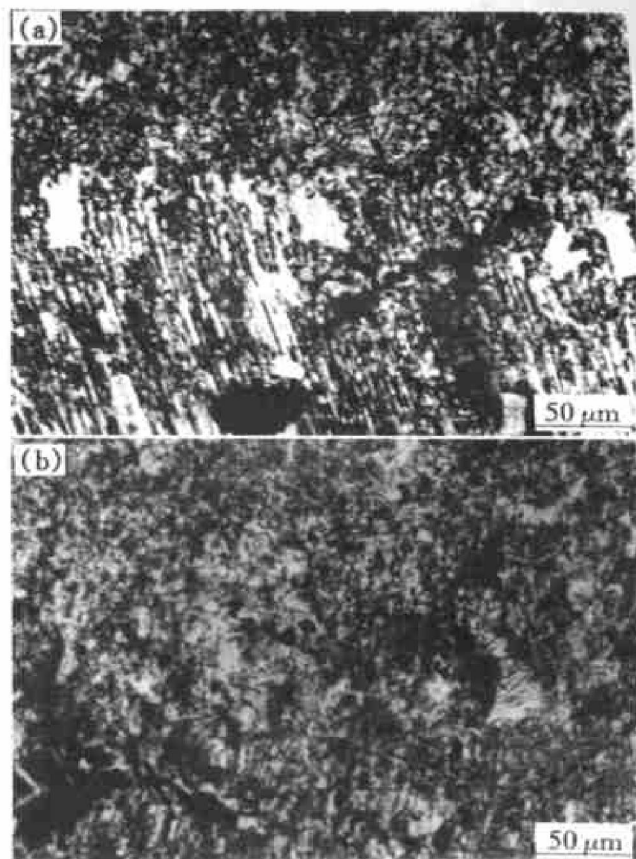


图 2 退火热处理后的 γ -TiAl 基合金表层组织

Fig. 2 Surface microstructures of γ -TiAl based alloy after annealing treatment

(a) —850 °C, 1 h; (b) —950 °C, 1 h

两侧的合金的连接界面相互靠近, 连接界面的间隙减少(图 4(a), (b)), 但当连接压力增大到一定数值($p = 80$ MPa)后, 压力的进一步增大对界面间隙的变化并不显著(图 4(c), (d))。因此, 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。

在温度、压力一定的条件下, 对连接效果随时间的变化进行分析, 可以发现随着连接时间延长, 材料表面细化组织的连接过程与材料整体超塑扩散连接过程基本相同, 整个连接过程可分为长波长孔洞的闭合(图 5(a))、短波长孔洞的闭合(图 5(b))、显微孔洞的消除(图 5(c)) 3 个阶段。在连接初期, 由于连接面微观上凹凸不平, 两连接面实际上以点接触, 界面间隙较宽, 随着时间延长, 连接两侧相接触的表层区发生塑性变形, 连接表面的接触点沿表面横向扩展, 使得相连接的面积不断增加, 大尺寸的孔洞消失, 形成均匀的中间界面。在第 2 阶段, 两连接界面已经足够近, 扩散机制开始变得比较重要, 加速了连接过程的进行, 界面上表现为尺寸较小的显微孔洞。在第 3 阶段, 随着扩散的进行, 连接界面上的孔洞已基本消除, 获得了良好的连接效果。

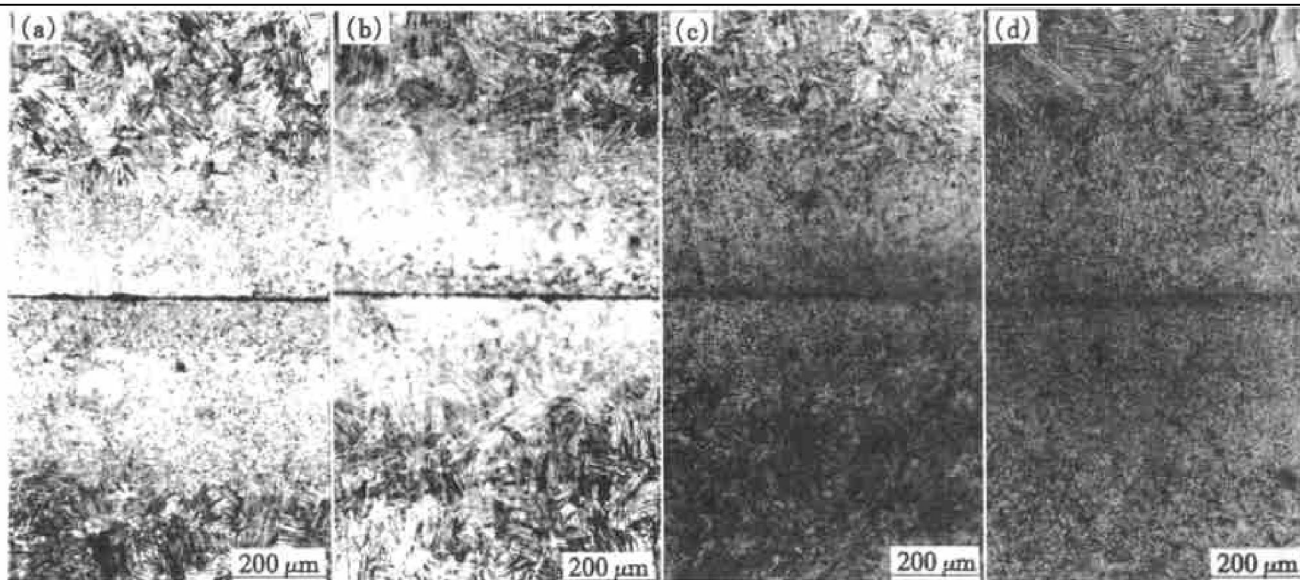


图 3 连接温度对连接效果的影响

Fig. 3 Microstructures of jointing interfaces at different temperatures(60 MPa, 1 h)

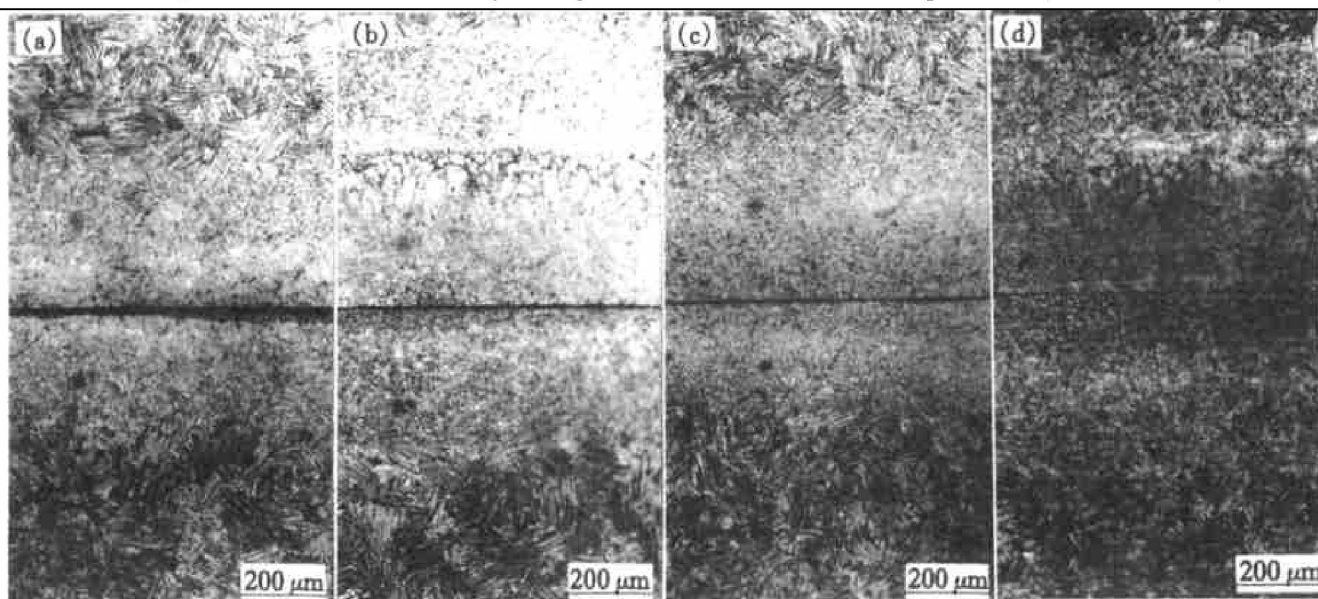


图 4 连接压力对连接效果的影响

Fig. 4 Microstructures of interfaces under different pressures (850 °C, 1 h)

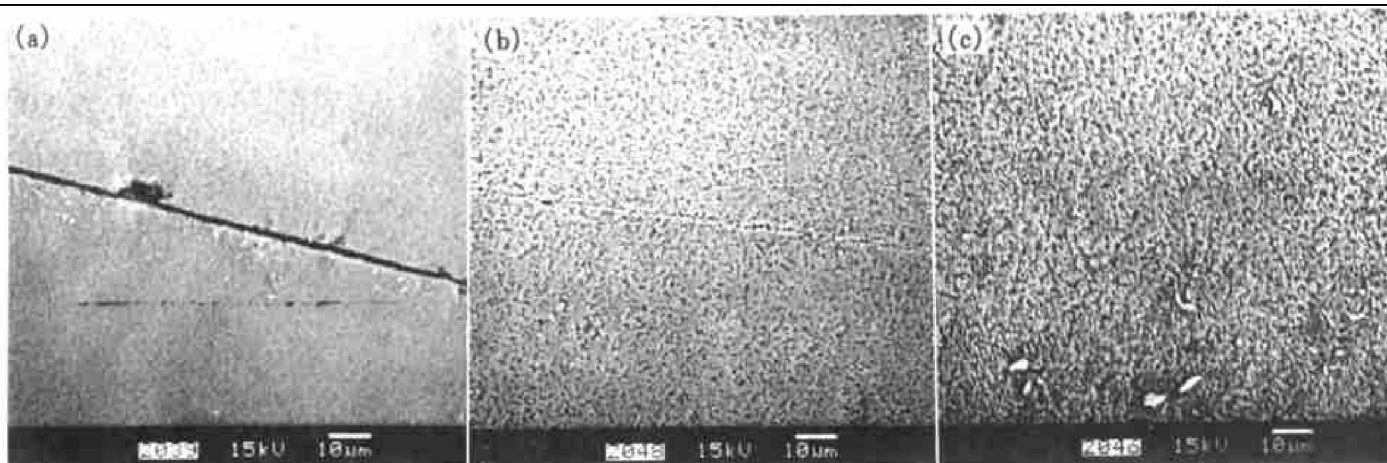


图 5 γ -TiAl 基合金超塑扩散连接不同阶段

Fig. 5 Microstructures of jointing interfaces at different phases(60 MPa, 1 h)

(a) —Close of long wavelength hole; (b) —Close of short wavelength hole; (c) —Eliminating of hole and diffusion

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。其中连接温度尤为重要, 可能与合金超塑温度与其晶粒尺寸存在直接的联系有关。在连接过程的前期, 由于连接面微观上凹凸不平, 两连接面实际是以点接触的, 塑变机制起主要作用, 随着连接过程的进行, 两个连接界面的距离达到原子尺度, 扩散机制开始变得比较重要, 因此, 连接压力对连接效果的影响较小。在一定的连接温度和连接压力下, 随着连接时间延长, 通过扩散和晶界滑移机制, 可以改善连接效果。

3 结论

1) 经过激光处理后, 在试样表面形成熔凝区和固态相变区, 其中熔凝区由表及里, 其结晶组织的特征变化顺序为混晶组织 $\rightarrow$ 枝晶组织 $\rightarrow$ 胞状晶组织, 激光处理后的表面组织与基体组织明显不同, 其组织构成以过饱和的 α_2 相为主。

2) 经激光处理后的表面组织在温度达到 850 $^{\circ}\text{C}$ 时开始发生由枝晶和胞状晶组织向细晶组织的明显转变, 并且随着退火温度的提高, 转变速率加快, 在退火过程中固态相变区组织和基体组织未发生变化, 仍保持着较高的稳定性。

3) 材料表面细化组织的连接过程与材料整体超塑扩散连接过程基本相同。

[REFERENCES]

[1] Baeslack III W A, Mascarella T J, Kelly T J. Weldabil-

ty of titanium aluminide [J]. Weld J, 1989, 68(12): 483- 498.

[2] David S A, Horton J A, Goodwin G M. Weldability and microstructure of a titanium aluminide [J]. Weld J, 1990, 69(4): 133- 140.

[3] Cieslak M J, Headley T J, Baeslack III W A. Effect of thermal processing on the microstructure of Ti-26Al-11Nb—applications to fusion welding [J]. Metal Trans, 1990, 21A: 1273- 1286.

[4] Lutfullin R Ya. Superplasticity and solid state bonding of materials [A]. Chokshi A E. ICSAM' 97 [C]. Switzerland: Trans Tech Publications Ltd, 1997. 681- 686.

[5] Cam G. The fracture behavior of diffusion-bonded duplex gamma TiAl [J]. JOM, 1996, 11: 66- 68.

[6] HE Yuehui(贺跃辉), HUANG Baiyun(黄伯云). TiAl 基合金固态连接 [J]. Acta Metallurgica Sinica(金属学报), 1998, 34(11): 1162- 1172.

[7] Winkler P J. Superplasticity and Superplastic Forming [A]. Hamilton C H, Paton N E. TMS [C]. 1988. 491.

[8] Tiziant A, Giordano L, Ramous E. Laser surface treatment by rapid solidification [A]. Metzbowen E A. Lasers in Materials Processing [C]. American for Metals, 1983. 108.

[9] Kumagai T, Abe E. The $\gamma \rightarrow \alpha$ phase transformation in γ -based TiAl alloy [J]. Scripta Mat, 1996, 34(2): 235 - 242.

[10] LI Zhenxi(李臻熙), SUN Fusheng(孙福生), CAO Chunxiao(曹春晓). Ti-48Al 合金全片层组织的稳定性 [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals(中国有色金属学报), 2000, 10(6): 779- 784.

Superplastic forming and diffusion bonding of laser surface melted TiAl intermetallic alloy

WU Guoqing, RUAN Zhongjian, HUANG Zheng

(Department of Materials Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, P. R. China)

[Abstract] The character of fine-grained structure obtained by laser surface processing and its rule of superplastic forming and diffusion bonding of TiAl based alloy were investigated systemically. The results show that, after laser surface processing, a melt layer with cellular-dendrite structure is formed, which could transform into very fine-grained structure during the annealing treatment. Superplastic forming and diffusion bonding between the surfaces with fine-grained structure was carried out, with which the bonding effects brought by temperature, stress and time were discussed respectively. Both the sample with surface fine-grained structure and that with integrate fine-grained structure have the same rule essentially. The results show that, at the condition of 900 $^{\circ}\text{C}$ and 60 MPa, sound superplastic diffusion bonding could be obtained after kept 1 h.

[Key words] TiAl based alloy; microstructure; laser surface treatment; bonding

(编辑 黄劲松)