

[文章编号] 1004-0609(2002)05-0982-04

TB₂ 钛合金扩散连接与分形维数^①

王国峰, 张凯锋, 吴 为

(哈尔滨工业大学 材料科学与工程学院, 哈尔滨 150001)

[摘 要] 在不同温度、压力、保温时间下对 TB₂ 钛合金进行了扩散连接实验, 利用 SEM 观察了扩散连接接头断口形貌并进行了分形维数计算, 通过剪切实验得到了不同条件下的扩散连接接头的剪切强度。结果表明, 连接温度、保温时间、连接压力对 TB₂ 钛合金扩散连接接头的剪切强度和分形维数都有影响。剪切强度和分形维数呈正相关, 工艺参数为扩散连接温度 850 ℃, 保温时间 30 min, 连接压力 5 MPa 时接头的剪切强度最高(890 MPa), 同时, 表面分形维数最大(2.23)。

[关键词] 扩散连接; TB₂ 钛合金; 剪切强度; 分形维数

[中图分类号] TG 4

[文献标识码] A

钛合金具有比强度高、耐腐蚀性能好等优点, 在航空航天领域得到了广泛应用^[1,2], 尤其在 20 世纪 70 年代美国首先研制出钛合金的超塑成形/扩散连接整体构件后, 钛合金的超塑成形/扩散连接技术得到了很大发展^[3~5]。通常在进行超塑成形与扩散连接技术中采用 $\alpha+\beta$ 型的钛合金, 如 TC₄, 但其超塑温度及扩散连接温度都很高, 接近 1 000 ℃, 对加热装置要求很高^[6,7]。而 TB₂ 钛合金具有塑性好、强度高、淬透性深和断裂韧性高等优点^[8], 因此研究其扩散连接性能非常必要。

大量研究表明^[9,10], 金属断口表面是分形结构, 分形维数与金属内部的组织和性能相关。Perry 等^[11]对钛合金的断口分形特征与动态撕裂能的关系进行了研究, 龙期威等^[12]研究了金属的断裂韧性和断裂表面分形维数的关系。但是, 对于钛合金扩散连接接头强度和分形维数的关系尚未见报导。

本文作者在不同温度下对 TB₂ 钛合金进行了扩散连接实验, 测定了不同温度下的扩散连接接头的剪切强度, 得到了最佳扩散连接温度。利用 SEM 观察了扩散连接接头拉伸断口形貌并进行了分形维数计算, 以探讨分形维数和接头强度的关系。

1 实验

选用的实验材料为国产的亚稳态 β 型 TB₂ 冷轧板材。

实验试样尺寸为 30 mm × 12 mm × 0.7 mm, 扩散连接搭接宽度为 5 mm。连接前采用化学清理方法: 丙酮去油污 → 30% ~ 50% 氢氟酸 + 30% ~ 40% 硝酸溶液清洗 → 水清洗 → 热风吹或晾干。

扩散连接采用电阻加热 Gleeble-1500 型热/力模拟试验机, 连接温度用 Ni-Cr/Ni-Al 热电偶测量, 实验时热电偶焊在距连接接缝 1.5 mm 处, 真空度为 1×10^{-4} Pa。扩散连接时选取不同参数: 连接温度、保温时间及压力, 并确定其对扩散连接接头强度的影响, 连接后利用 Instron-1186 型电子万能试验机测定接头剪切强度, 并对断口进行 SEM 观察。

2 结果与讨论

在万能试验机上测定 TB₂ 连接接头剪切强度, 结果如图 1 所示。在 800, 850, 900 ℃扩散连接的试件沿焊合区域开裂, 而在 950 ℃扩散连接的试件在基体与焊合区域的连接处发生断裂。800~900 ℃时随扩散温度升高, 接头强度值也随之升高, 在 900 ℃时, 接头的强度最高(890 MPa), 此后, 随温度升高, 剪切强度反而降低。

由 Arrhenius 方程可知, 扩散系数 D 与温度有指数关系, 即:

$$D = D_0 \exp(-Q/RT) \quad (1)$$

式中 D_0 为常数, T 为扩散温度, R 为气体常数, Q 为扩散激活能。

① [基金项目] 国防科工委“九五”预研资助项目(18.8.12)

[收稿日期] 2002-01-05; [修订日期] 2002-04-04

[作者简介] 王国峰(1973-), 男, 博士研究生。

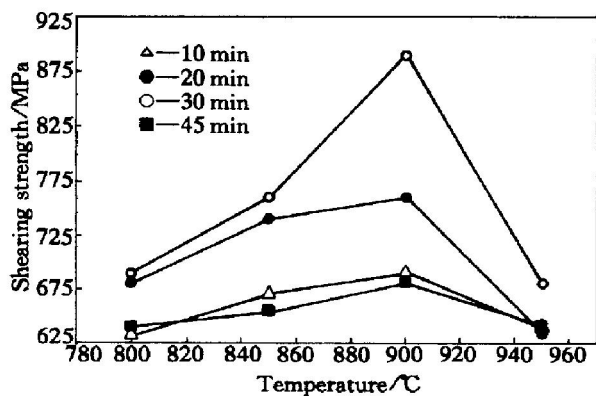


图 1 连接温度对接头剪切强度的影响

Fig. 1 Influence of welding temperature on shearing strength of joint

由公式(1)可知, 温度越高, 扩散系数越大, 供给金属原子扩散的能量越高, 界面间原子互扩散的程度就越大, 同时, 温度越高, 金属的塑性变形能力也越好, 有利于扩散连接的进行。因此, 在 800 ~ 900 °C 连接时, 随扩散温度升高, 接头强度也随之升高, 当达到 900 °C 时, 接头强度达最大值(890 MPa)。但是当温度超过其相变点, 晶粒长大趋势增大, 材料性能又将降低。实验中, 900 °C 以后, 随温度升高, 强度反而降低。950 °C 连接的试件拉伸时在基体与焊合区域的连接处发生断裂, 强度只有 670 MPa。这主要是由于在 950 °C 进行扩散连接时, 虽然扩散良好, 但其晶粒长大非常严重, 基体材料塑性下降, 首先断裂。

从图 1 可以看出, 在其它条件相同的情况下, 30 min 所得到的接头剪切强度最高, 时间过长或过短都不好。扩散连接所需要的保温扩散时间与温度、压力和对接头成分及组织均匀化的要求密切相关, 如果时间太短, 原子来不及进行充分扩散, 无法形成高强度的连接接头。保温时间适当, 原子可以进行更均匀、更充分的扩散, 因而, 接头强度好。但是, 时间过长, 由于扩散连接温度范围在(0.4~0.8) T_m (T_m 为材料母材熔点) 之间, 易造成接头晶粒长大, 反而使材料变脆, 接头性能下降。因此, 连接时间需适宜, 过短和过长都会对接头强度产生不利影响。

对以化学方法清除了表面氧化膜的钛合金来说, 结合界面上的挤压力是消除或减少表面微观凹凸不平, 使材料之间直接接触的面积增加, 以至达到原子间距, 所以它是影响热压扩散连接质量的重要因素之一, 而挤压力的宏观表现即为接头的变形量的大小。为此, 选用温度为 900 °C, 时间为 30

min, 压力为 1, 3, 5, 7 MPa 进行比较, 结果如图 2 所示。

可以看出, 在一定条件下, 随着扩散连接接头变形程度提高, 剪切强度增大, 超过 5 MPa, 剪切强度增大效果减弱, 而接头变形过大。它表明: 压力的选择也有一个范围, 压力过小, 两板界面间未能达到原子间距, 扩散连接进行就不会充分, 接头的质量也不会好; 当压力增大时, 接头表面变形量增加, 变形聚集的能量增加, 促进了扩散的进行。而压力过大, 使两板料产生过大的变形, 在扩散连接过程中, 会影响零件的形状, 而且, 对设备的要求也高。因此, 压力选取要适中。

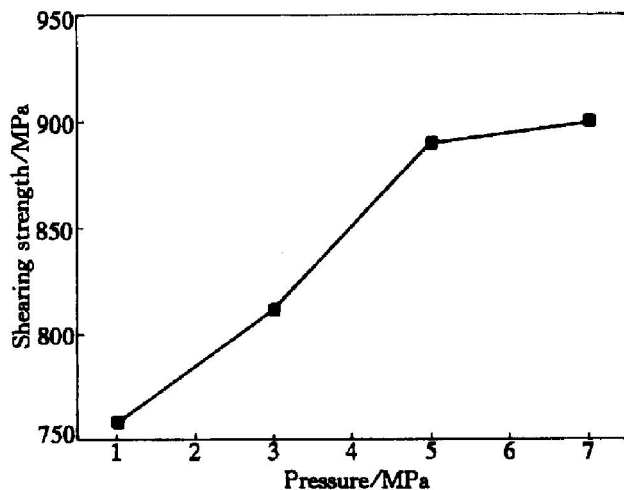


图 2 连接压力对接头剪切强度的影响

Fig. 2 Influence of welding pressure on shearing

30 min, 5 MPa 不同连接温度试件连接界面拉伸断口的形貌如图 3 所示。可以看出, 这些图像确实存在差别, 但用语言来清楚地表述这些差别却很困难。借助分形维数可以定量地表述图 3 中这些图像的差别。分形维数的计算采用了计盒维数法, 将图形在图像处理软件中进行二值化处理后在图形上覆盖不同尺寸的正方形网格, 通过图形与网格的交点数 N 和正方形网格边长 m 的如下关系来得到分形维数 D_s ,

$$\ln N = (1 - D_s) \ln m + C \quad (2)$$

式中 C 为常数, D_s 为断口分形维数。公式(2)表明分形维数 D_s 可以通过 $\ln N$ 与 $\ln m$ 的斜率得到。拟合结果如图 4 所示。可见, 900 °C 连接断口分形维数最高, 为 2.23。

分形维数和剪切强度的关系可以通过 Griffith 断裂理论来研究,

$$G = 2\gamma \quad (3)$$

式中 G 为断口比表面能, γ 为断口比表面积。由公式(3)可知, 断口比表面积越大, 断口比表面能

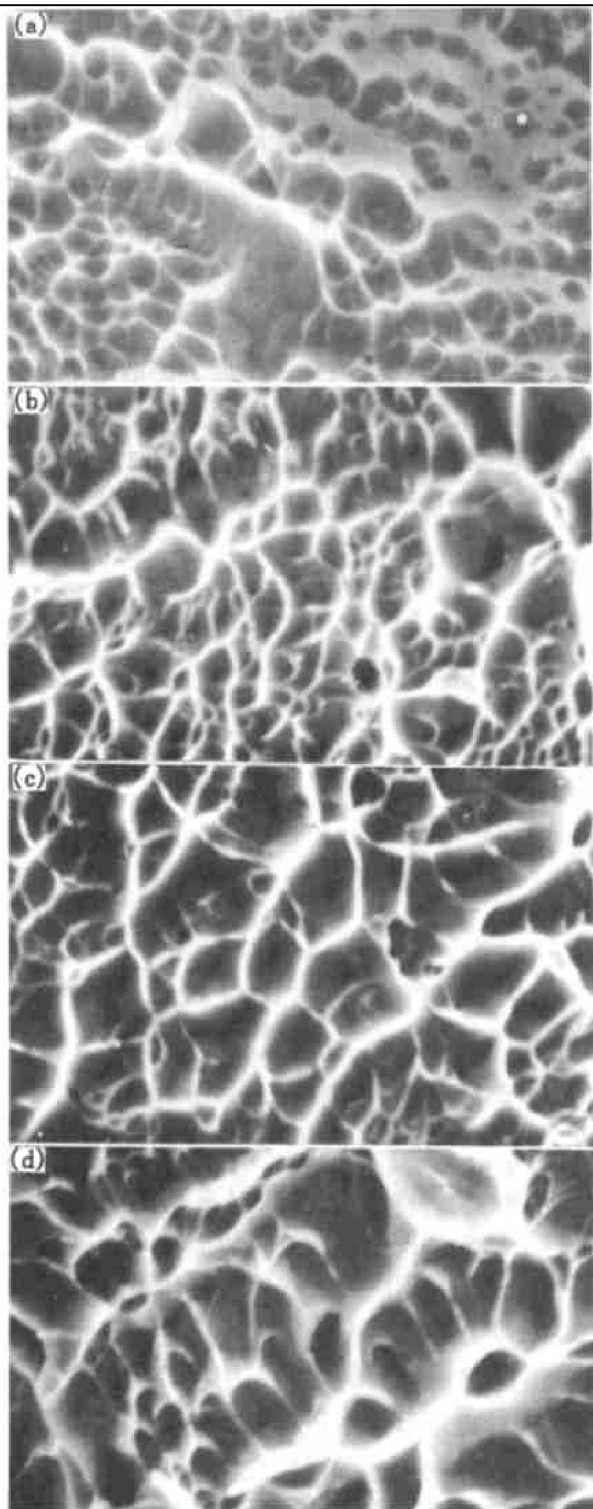


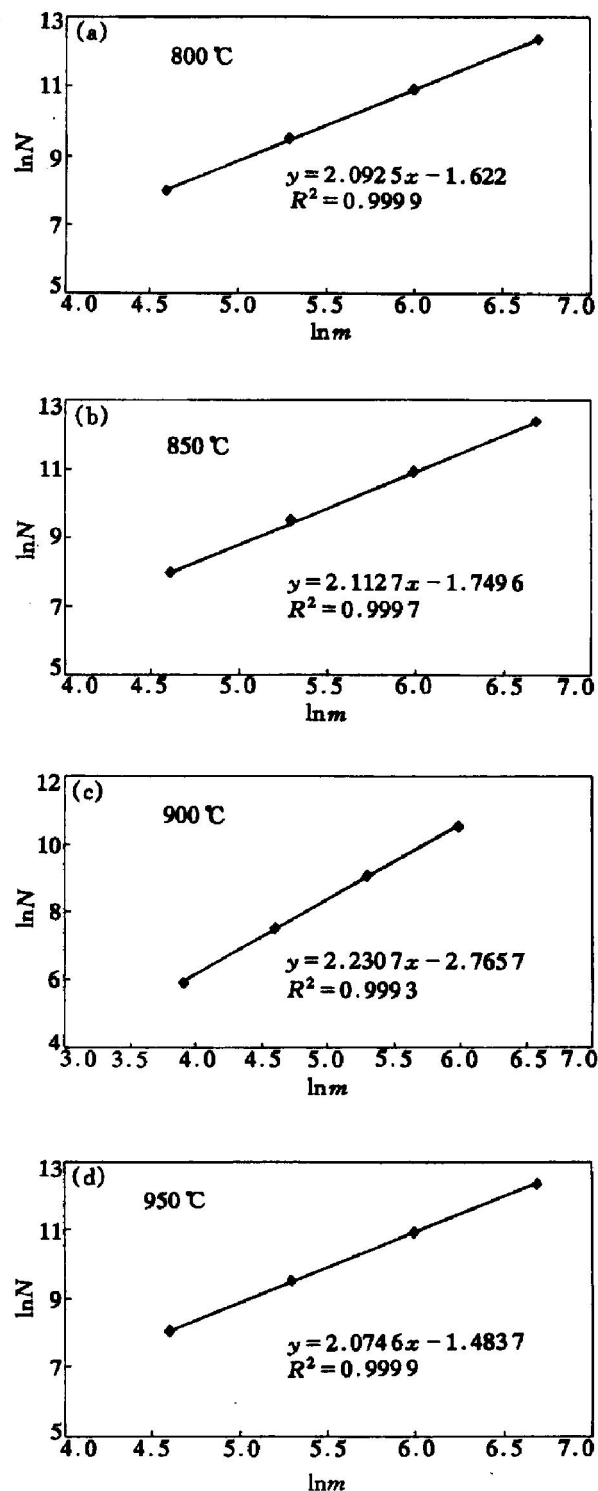
图3 焊接接头断口形貌

Fig. 3 Fracture surfaces of welding joints

(a) -800 °C; (b) -850 °C; (c) -900 °C; (d) -950 °C

越高,也就是说,断口表面越粗糙,接头强度越高。众所周知,分形维数是断口粗糙程度的定量描述。因此,断口分形维数和接头剪切强度必然存在一定关系。

根据计算得到剪切强度和分形维数的关系如图5所示。可见,剪切强度和分形维数呈正比关系,断口分形维数越大,连接接头剪切强度越高。但是,图5中数据点的分散性表明剪切强度和分形维

图4 $\ln N - \ln m$ 拟合线Fig. 4 Fitting lines of $\ln N$ vs $\ln m$

数的关系并非如此简单,仍有待深入研究。

断裂机理的分形研究表明,理想的沿晶断裂断口分形维数为 2.26,理想的穿晶断裂断口分形维数为 2.37。而本实验得到的连接接头断口分形维数都小于 2.26,说明连接接头断裂机理以沿晶断裂为主,焊合面积都未达到 100%,分形维数越高,焊合面积比例越大。从这个角度来看,分形维数也是判断接头连接质量的重要参数。

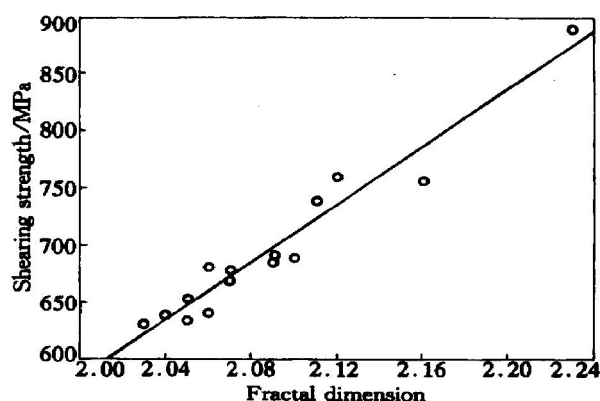


图 5 接头剪切强度和分形维数关系图

Fig. 5 Relationship between shearing strength of joint and fractal dimension

[REFERENCES]

- [1] Albrecht J. Comparing fatigue behavior of titanium and nickel-based alloys[J]. *Materials Science and Engineering*, 1999, 263(2): 176– 186.
- [2] 萧今声, 许国栋. 提高高温钛合金性能的途径[J]. *中国有色金属学报*, 1997, 7(4): 97.
XIAO Jin-sheng, XU Guo-dong. Several ways to improve mechanical properties of high-temperature Ti-based alloys[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 1997, 7(4): 97.
- [3] Xun Y W, Tan M J. Applications of superplastic forming and diffusion bonding to hollow engine blades[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2000, 99: 80– 85.
- [4] Hamilton C H. Superplastic forming and diffusion bonding of titanium alloys. *Titanium Science and Technology* [M]. New York: Plenum Press, 1973. 621– 627.
- [5] Williamson J R. Aerospace applications of SPF/DB[A]. *Superplastic Forming of Structural Alloys*. Warrendale [C], PA: TMS-AIME, 1982. 291– 306.
- [6] Ghosh A K, Hamilton C H. Mechanical behavior and hardening characteristics of a superplastic Ti-6Al-4V alloy [J]. *Metal Trans*, 1979, 10A: 359.
- [7] Safiullin R V, Lutfullin R Ya. Solid state joint formation of the titanium alloy VT6S under superplastic forming conditions[A]. Chokshi A E. *ICSAM'97* [C]. Switzerland: Trans Tech Publications, 1997. 763– 768.
- [8] Huang J C, Chuang T H. Progress on superplasticity and superplastic forming in Taiwan during 1987– 1997[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 1999, 57(3): 195– 206.
- [9] Mandelbrot B B, Passoja D E. Fractal character of fracture surfaces of metals[J]. *Nature*, 1984, 308: 721.
- [10] Kaminsky C, Othmani A. Three dimensional fractal analysis of sheet metal surfaces[J]. *Wear*, 1998, 214 (2): 147– 150.
- [11] Perry A J. The surface topography of titanium nitride made by chemical vapor deposition [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2000, 132(1): 21– 25.
- [12] Lung C W, Wang S G, Long Q Y. Elastic fracture in driven media[J]. *Physica B*, 2000, 279: 139– 141.

Diffusion welding of TB₂ titanium alloy and fractal dimension

WANG Guo-feng, ZHANG Kai-feng, WU Wei

(School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

[Abstract] The diffusion welding experiment on TB₂ titanium alloy was carried out on Gleeble-1500 simulation tester. The microstructures of the welding joints in the experiment were analyzed through SEM and fractal dimensions of fracture surface were calculated. In addition, the shearing strengths of the welding joints under various experimental conditions were obtained through shearing experiment and some investigations on the strength of the joint were carried out. The experiments show that the welding temperature, time and pressure have great influence on the shearing strength and fractal dimension of the diffusion welding joints. The shearing strength of the diffusion bonding joint and fractal dimension have positive relation. The highest shearing strength of the joint (890 MPa) and the highest fractal dimension arrive at the same time when the welding process parameters are 900 °C, 30 min and 5 MPa.

[Key words] diffusion welding; TB₂ titanium alloy; shearing strength; fractal dimension

(编辑 彭超群)