

Ti60 钛合金扩散连接界面组织及剪切性能

廖子颖¹, 李保永¹, 刘伟¹, 秦中环¹, 吴迪鹏², 吴腾飞², 武永²

(1. 北京航星机器制造有限公司, 北京 100013; 2. 南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016)

摘要: 在保温温度为 900~960 ℃、保压压力为 1~3 MPa、保温保压时间为 0.5~3.0 h 的条件下 Ti60 钛合金进行了扩散连接试验, 测得扩散连接界面的剪切强度, 并采用金相法测定了扩散连接界面的焊合率, 分析了扩散连接条件对原始板材轧制方向室温拉伸性能的影响。试验结果表明: 随着保温温度、保压压力增大以及保温保压时间延长, Ti60 钛合金板材扩散连接界面的焊合率增加, 剪切强度增大; 在 960 ℃/2 MPa/2 h 的试验条件下, 焊合率达到 98.5%, 剪切强度达到 559.6 MPa。Ti60 钛合金板材经 940 ℃/2 h 高温保温后, 室温抗拉强度由 1154.5 MPa 降低至 994.1 MPa; 保温温度达到 940 ℃后, 升高温度和延长保温保压时间对 Ti60 钛合金的室温强度影响不大。

关键词: Ti60 钛合金; 扩散连接; 剪切强度; 界面组织; 焊合率

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.06.021

中图分类号: TG131

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2024) 06-0172-07

Microstructure and shear properties of diffusion bonding interface for Ti60 titanium alloy

Liao Ziying¹, Li Baoyong¹, Liu Wei¹, Qin Zhonghuan¹, Wu Dipeng², Wu Tengfei², Wu Yong²

(1. Beijing Hangxing Machine Manufacturing Co., Ltd., Beijing 100013, China;

2. College of Mechanical & Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The diffusion bonding experiments of Ti60 titanium alloy were carried out under the conditions of the holding temperature of 900~960 ℃, the holding pressure of 1~3 MPa and the holding time of 0.5~3.0 h. The shear strength of diffusion bonding interface was measured, and the bonding rate of diffusion bonding interface was measured by metallographic method. The effect of diffusion bonding conditions on the tensile properties of original sheet at room temperature in the rolling direction was analyzed. The experiment results show that the bonding rate and the shear strength of diffusion bonding interface for Ti60 titanium alloy sheet increase with the increasing of holding temperature, holding pressure and holding time. The bonding rate reaches 98.5% and the shear strength reaches 559.6 MPa under the experiment condition of 960 ℃/2 MPa/2 h. The tensile strength of Ti60 titanium alloy sheet at room temperature decreases from 1154.5 MPa to 994.1 MPa after holding at 940 ℃ for two hours. When the holding temperature reaches 940 ℃, increasing the temperature and holding time have little effect on the strength of Ti60 titanium alloy at room temperature.

Key words: Ti60 titanium alloy; diffusion bonding; shear strength; interface microstructure; bonding rate

高温钛合金具备高比强度和良好的热稳定性, 其在飞行体等结构上的应用已取得了良好的减重效益^[1-5]。Ti60 钛合金是在 IMI834 合金的基础上开发的近 α 型高温钛合金, 加入了更多的 Si 元素和少量的 Ta 元素, 可以控制 α_2 相少量析出, 使 α_2 相与硅

化物作为强化相, 以改善高温蠕变和持久性能, 已在飞机发动机压气机叶片、轮盘、鼓筒以及整体叶盘等关键零部件上得到应用^[6-9]。

扩散连接是将材料紧压在一起, 置于真空或保护气氛中, 加热至一定温度, 然后对其施加压力使连接界面紧密接触, 而后经原子相互扩散而形成牢固的冶金结合的一种连接方法^[10], 材料未发生熔化, 成形零件缺陷少, 无残余应力。刘继雄等^[11]研究了扩散连接温度与连接时间对 SP-700 钛合金热轧板扩散连接质量的影响, 发现连接时间的延长、连接温度的升高可促使连接界面焊合率增大, 升高连接温度有助于缩短界面完全结合所需的连接时间。

收稿日期: 2023-12-04; **修订日期:** 2024-03-05

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2023YFB3407000);

国防基础科研计划 (JCKY2021204A004)

作者简介: 廖子颖 (1998-), 男, 硕士研究生

E-mail: 1821946291@qq.com

通信作者: 李保永 (1984-), 男, 博士, 正高级工程师

E-mail: libaoyonght239@163.com

Hamilton C H^[12]首次明确提出待扩散连接表面接触时波峰对波峰,波谷对波谷的扩散连接数学模型。吴会平^[13]基于连接界面表面形貌差异提出了一个可以预测完全焊接接头的扩散连接时间、焊合率、不同时刻空洞分布状态与空洞尺寸的双峰模型。国内外目前关于 Ti60 钛合金扩散连接的研究较少,合适的扩散连接工艺参数尚不明确。本文进行了 Ti60 钛合金板材在不同保温温度、保温保压时间、保压压力条件下的扩散连接试验,分析了 Ti60 钛合金板材扩散连接界面的焊合率和剪切强度随工艺参数的变化,促进了 Ti60 钛合金扩散连接的工程化应用。

1 试验材料及方法

本文采用中国科学院金属研究所提供的热轧退火态 Ti60 钛合金板材,厚度为 2 mm。原始板材轧制方向(RD)的室温单向拉伸工程应力-工程应变曲线见图 1,屈服强度为 1139.7 MPa,抗拉强度为 1154.5 MPa,断后伸长率为 15.2%。原始板材微观组织见图 2,其中 TD 为轧件的横向。可以看出, Ti60 钛合金组织由初生 α 相和晶间 β 相组成, α 相

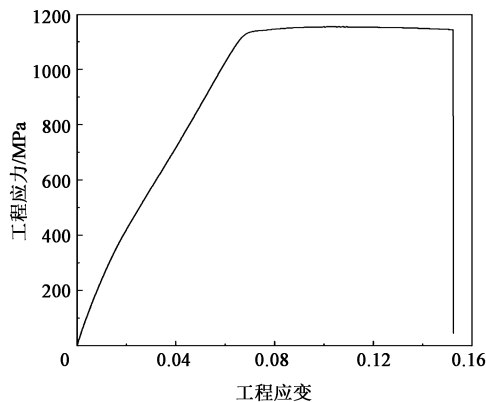


图 1 原始板材室温单向拉伸工程应力-工程应变曲线

Fig. 1 Engineering stress-engineering strain curve of uniaxial tensile for original sheet at room temperature

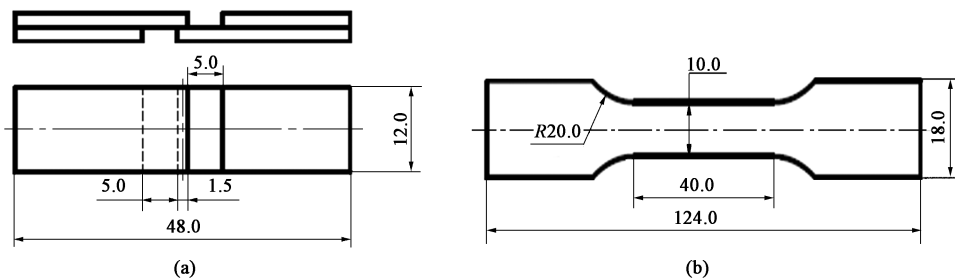


图 3 拉剪试样 (a) 和随炉热处理拉伸试样 (b) 尺寸图

Fig. 3 Size diagrams of tensile shear specimen (a) and tensile specimen for heat treatment in furnace (b)

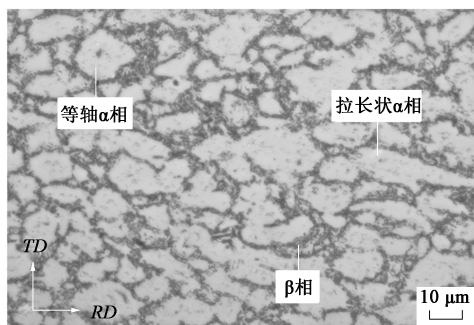


图 2 原始板材微观组织

Fig. 2 Microstructure of original sheet

呈等轴状和轧制形成的拉长状,分布较为均匀,平均体积分数约为 58.0%,平均晶粒尺寸为 33.2 μm 。

本文以扩散连接界面的剪切强度和焊合率为依据来衡量扩散连接效果。采用如图 3a 所示的拉剪试样按照 GB/T 6396—2008^[14]进行单向拉伸试验,断裂过程中最大力与试样中部搭接面积比值即为剪切强度,试样长度方向为轧制方向。对线切割得到的试片待连接表面进行打磨、抛光和酸洗处理,去除表面杂质和氧化物。将试片沿 RD 方向对齐放入真空扩散炉内进行扩散连接试验。为衡量保温温度和保温保压时间对原始板材室温力学性能的影响,采用线切割加工得到如图 3b 所示的随炉热处理单向拉伸试样,与扩散连接试片一同放入真空扩散炉内进行随炉热处理,扩散连接试验条件如表 1 所示。采用深圳三思纵横科技股份有限公司生产的 UTM5504X 型电子万能试验机对拉剪试样和随炉热处理拉伸试样进行室温单向拉伸试验,测定试样力学性能;采用南京江南永新有限公司生产的 MR5000 型光学显微镜观察扩散连接界面上的微观组织,分析微观组织变化,测定焊合率。

2 试验结果

2.1 保温温度对扩散连接界面的影响

在保压压力为 2 MPa、保温保压时间为 2 h 的

表 1 扩散连接试验工艺参数

Table 1 Process parameters of diffusion bonding experiment

| 编号 | 保温温度/℃ | 保温保压时间/h | 保压压力/MPa |
|----|--------|----------|----------|
| 1 | 900 | 2.0 | 2.0 |
| 2 | 920 | 2.0 | 2.0 |
| 3 | 940 | 2.0 | 2.0 |
| 4 | 960 | 2.0 | 2.0 |
| 5 | 940 | 0.5 | 2.0 |
| 6 | 940 | 1.0 | 2.0 |
| 7 | 940 | 1.5 | 2.0 |
| 8 | 940 | 3.0 | 2.0 |
| 9 | 940 | 2.0 | 1.0 |
| 10 | 940 | 2.0 | 1.5 |
| 11 | 940 | 2.0 | 2.5 |
| 12 | 940 | 2.0 | 3.0 |

条件下, 保温温度对扩散连接界面组织和焊合率的

影响分别如图 4 和图 5 所示。结合图 4 和图 5 可以看到, 当保温温度为 900 ℃ 时, 扩散连接界面存在较多的长条状孔洞, 如图 4a 所示, 未焊合区域较多, 焊合率仅为 70.0%。随着保温温度逐渐升高, 扩散连接界面处的孔洞数量逐渐减少, 形状逐渐转变为球状, β 相的体积分数逐渐减少, 焊合率逐渐升高, 如图 4b 所示。当保温温度大于或等于 940 ℃ 时, 扩散连接界面处的绝大部分结合区域被晶界和晶粒占据, 如图 4c 和图 4d 所示。从图 5 中可以看出, 随着保温温度升高, 焊合率的增大速度逐渐减缓, 当保温温度达到 960 ℃ 时, 焊合率达到 98.5%。

保温温度对扩散连接界面剪切强度的影响如图 6 所示。在 900 ℃ 时, 试样扩散连接界面的剪切强度仅为 196.0 MPa, 随着保温温度的升高, 扩散连接界面的剪切强度也逐渐升高, 在 940 ℃ 时大幅度提高, 达到 547.9 MPa, 之后随着保温温度升高, 扩散连接界面的剪切强度的增大速度减缓, 960 ℃ 时剪切强度达到 559.6 MPa。

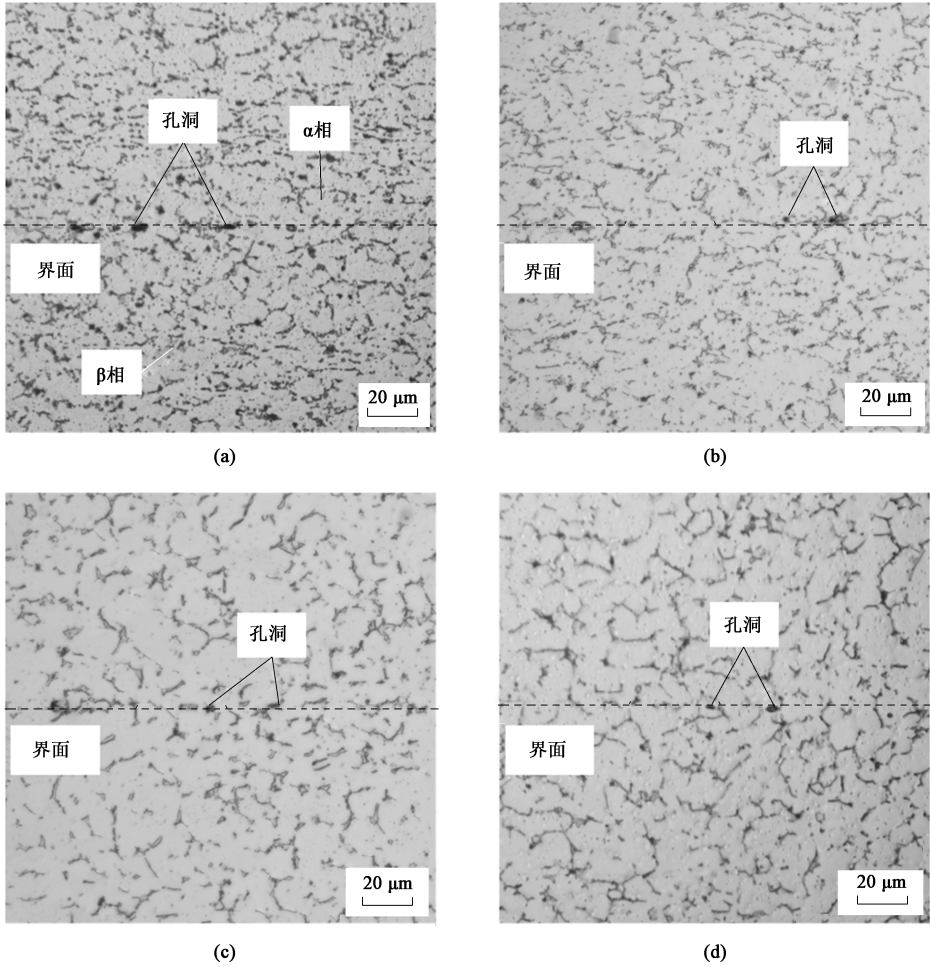


图 4 保温温度对扩散连接界面组织的影响

(a) 900 ℃ (b) 920 ℃ (c) 940 ℃ (d) 960 ℃

Fig. 4 Effect of holding temperature on microstructure for diffusion bonding interface

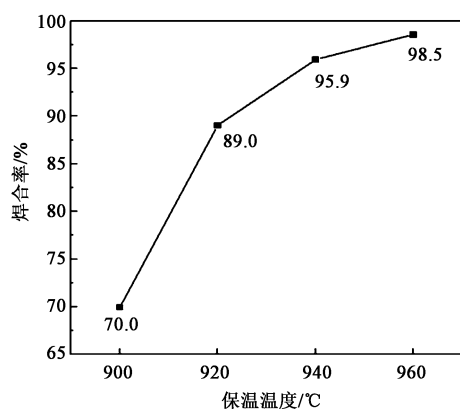


图5 保温温度对扩散连接界面焊合率的影响

Fig. 5 Effect of holding temperature on bonding rate for diffusion bonding interface

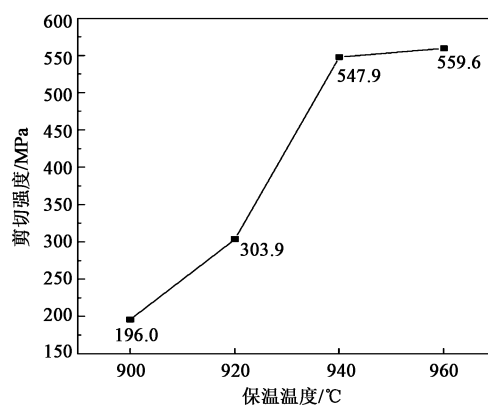


图6 保温温度对扩散连接界面剪切强度的影响

Fig. 6 Effect of holding temperature on shear strength for diffusion bonding interface

2.2 保温保压时间对扩散连接界面的影响

在保温温度为 940 ℃、保压压力为 2 MPa 的条件下, 保温保压时间对扩散连接界面组织和焊合率的影响分别如图 7 和图 8 所示。结合图 7 和图 8 可以看到, 当保温保压时间为 0.5 h 时, 扩散连接界面分布有数量较多的长条状和球状孔洞, 如图 7a 所

示, 焊合率为 84.9%。随着保温保压时间的延长, 孔洞数量减少, β 相的体积分数明显减少。当保温保压时间小于或等于 1.5 h 时, 晶粒大小变化不明显, 如图 7a~图 7c 所示。当保温保压时间大于或等于 2.0 h 时, 连接界面处的孔洞基本消失, 如图 4c、图 7d 所示。从图 8 中可以看出, 随着保温保压时间

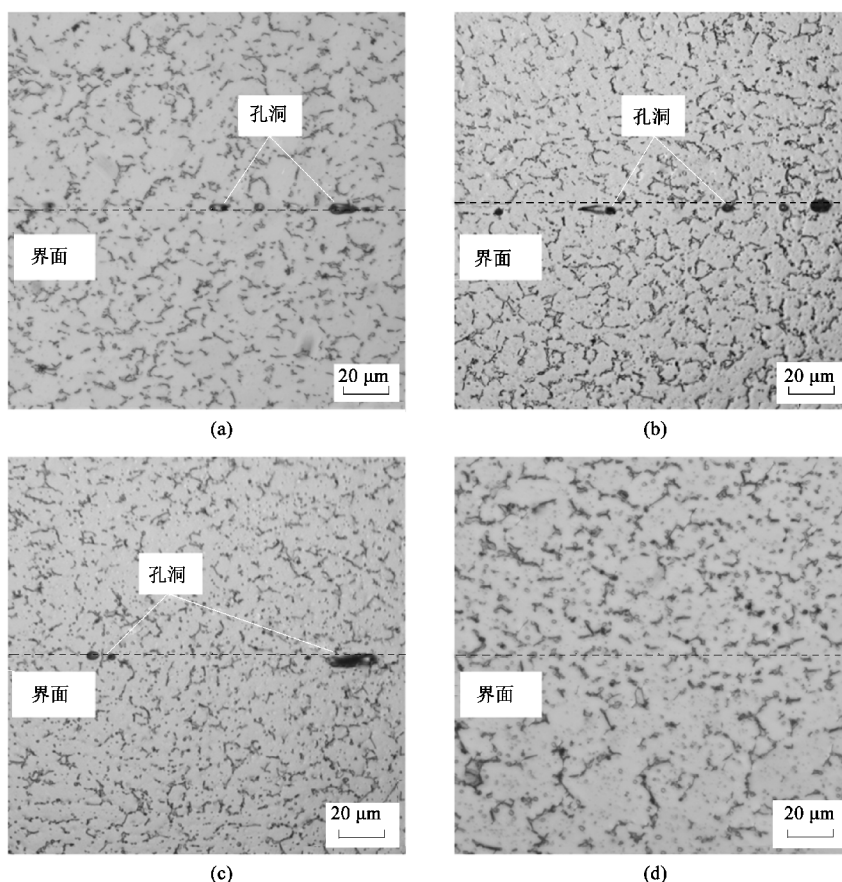


图7 保温保压时间对扩散连接界面组织的影响

(a) 0.5 h (b) 1.0 h (c) 1.5 h (d) 3.0 h

Fig. 7 Effect of holding time on microstructure for diffusion bonding interface

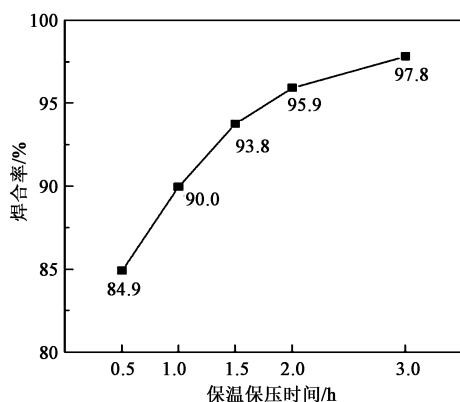


图 8 保温保压时间对扩散连接界面焊合率的影响

Fig. 8 Effect of holding time on bonding rate for diffusion bonding interface

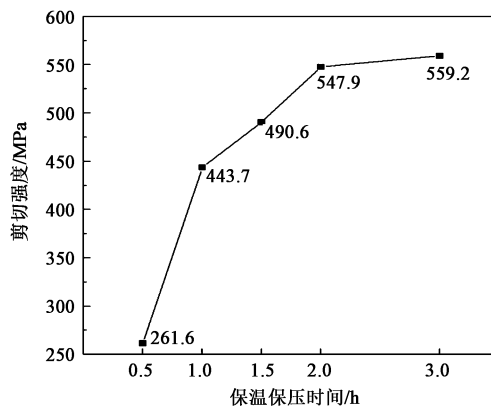


图 9 保温保压时间对扩散连接界面剪切强度的影响

Fig. 9 Effect of holding time on shear strength for diffusion bonding interface

的延长, 焊合率的增大速度逐渐减缓, 保温保压时间为 3.0 h 时, 焊合率达到 97.8%。

保温保压时间对扩散连接界面剪切强度的影响如图 9 所示。经过 0.5 h 的保温保压, 连接界面的剪切强度为 261.6 MPa。随着保温保压时间的延长, 剪切强度逐渐升高, 上升幅度逐渐减缓, 保温保压时间为 2.0 h 时, 剪切强度达到 547.9 MPa, 保温保压时间为 3.0 h

时, 剪切强度达到 559.2 MPa, 上升幅度明显降低。

2.3 保压压力对扩散连接界面的影响

在保温温度为 940 ℃、保温保压时间为 2 h 的条件下, 保压压力对扩散连接界面组织和焊合率的影响分别如图 10 和图 11 所示。结合图 10 和图 11 可知, 在 1.0 MPa 的保压压力条件下, 界面处分布有较多孔洞, 如图 10a 所示, 焊合率为 89.0%。当

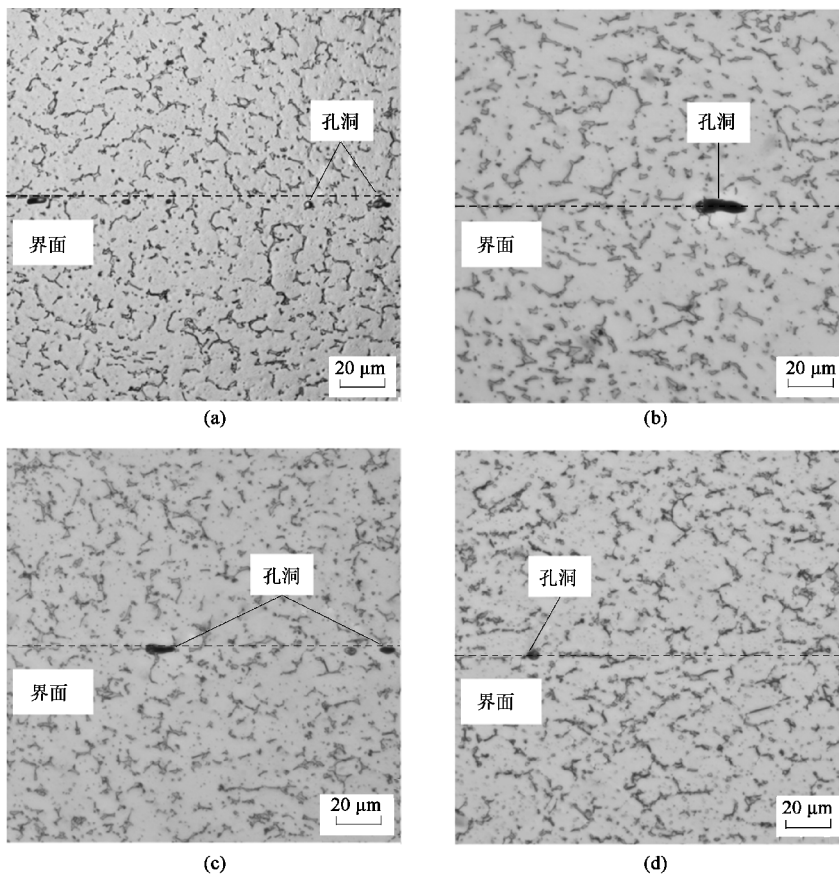


图 10 保压压力对扩散连接界面组织的影响

(a) 1.0 MPa (b) 1.5 MPa (c) 2.5 MPa (d) 3.0 MPa

Fig. 10 Effect of holding pressure on microstructure for diffusion bonding interface

保压压力小于或等于 2.0 MPa 时, 升高压力会促进孔洞弥合, 使孔洞数量减少、尺寸减小, 如图 10a、图 10b 和图 4c 所示。当保压压力达到 2.0 MPa 时, 焊合率为 95.9%。当保压压力为 2.5 MPa 时, 焊合率出现些许下降, 如图 11 所示, 认为是由于采用刚性扩散时连接界面受力并不均匀, 使得局部区域连接界面未贴合, 孔洞无法完全消除, 如图 10c 所示。在 3.0 MPa 的保压压力下, 连接界面处的孔洞基本消失, 如图 10d 所示, 焊合率达到 97.4%。

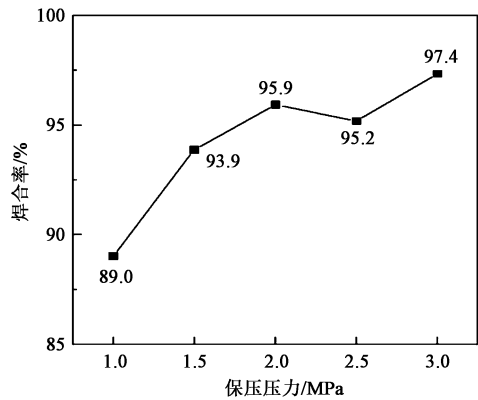


图 11 保压压力对扩散连接界面焊合率的影响
Fig. 11 Effect of holding pressure on bonding rate for diffusion bonding interface

保压压力对扩散连接界面剪切强度的影响如图 12 所示, 在 1.0 MPa 的保压压力下, 连接界面的剪切强度为 439.7 MPa, 随着保压压力的升高, 剪切强度逐渐升高。保压压力为 2.0 MPa 时, 剪切强度达到 547.9 MPa, 当保压压力大于 2.0 MPa 时, 剪切强度的提升速度明显减缓, 当保压压力为 2.5 MPa 时, 连接界面的剪切强度与 2.0 MPa 保压压力时相当, 这与图 11 所示的保压压力为 2.5 MPa

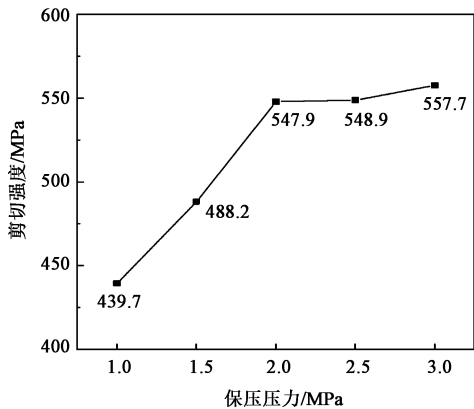


图 12 保压压力对扩散连接界面剪切强度的影响
Fig. 12 Effect of holding pressure on shear strength for diffusion bonding interface

时的焊合率有所下降有关。当保压压力为 3.0 MPa 时, 扩散连接界面的剪切强度达到 557.7 MPa。

2.4 保温保压时间和保温温度对原始板材力学性能的影响

为研究扩散连接过程中, 加热对 Ti60 钛合金力学性能的影响, 在 940 和 960 ℃ 两个保温温度下进行扩散连接时放入随炉热处理拉伸试样, 并测试其室温力学性能, 如表 2 和表 3 所示。经高温保温和随炉冷却后, 与 Ti60 钛合金原始板材性能进行对比, 随炉热处理拉伸试样的抗拉强度降低了 13% ~ 14%, 这与加热过程中的相变、晶粒长大等相关。当保温温度达到 940 ℃ 后, 升高温度和延长保温保压时间, Ti60 钛合金的室温强度不再继续降低。

表 2 保温保压时间为 2 h 时保温温度对原始板材力学性能的影响
Table 2 Effect of holding temperature on mechanical properties for original sheet at holding time of 2 h

| 保温温度/℃ | 屈服强度/MPa | 抗拉强度/MPa |
|--------|----------|----------|
| 室温 | 1139.7 | 1154.5 |
| 940 | 981.1 | 994.1 |
| 960 | 984.5 | 990.6 |

表 3 保温温度为 940 ℃ 时保温保压时间对原始板材力学性能的影响

Table 3 Effect of holding time on mechanical properties for original sheet at holding temperature of 940 ℃

| 保温保压时间/h | 屈服强度/MPa | 抗拉强度/MPa |
|----------|----------|----------|
| 1.5 | 987.3 | 1001.0 |
| 2.0 | 981.1 | 994.1 |
| 3.0 | 985.5 | 996.1 |

3 结论

(1) 保温温度升高使得 Ti60 钛合金母材软化, 扩散系数增大, 在相同保压压力和保温保压时间条件下, 孔洞弥合得更充分, 扩散连接界面的焊合率随之增大。原子的扩散迁移需要时间, 延长保温保压时间使得界面焊合率增大。增大保压压力可以加速界面原子激活, 促进孔洞愈合, 增大焊合率。在 940 ℃/2 h/2 MPa 的条件下, 连接界面的焊合率达到 95.9%, 已接近 100%, 继续升高保温温度、延长保温保压时间、增大保压压力, 焊合率提升空间不大, 提升速度明显减缓, 在 960 ℃/2 h/2 MPa 条件下, 焊合率达到 98.5%。

特种成形栏目由中国机械总院集团北京机电研究所有限公司赞助刊出

(2) Ti60 钛合金扩散连接界面的剪切强度与焊合率基本呈正相关, 焊合率反映连接界面受力面积大小, 焊合率越高, 连接界面剪切强度越高, 在 960 ℃/2 h/2 MPa 条件下, 剪切强度达到 559.6 MPa。

(3) Ti60 钛合金板材经高温保温后, RD 方向的室温强度明显降低, 经过 940 ℃ 高温保温 2 h 后, Ti60 钛合金的室温抗拉强度由 1154.5 MPa 降低至 994.1 MPa, 下降约 14%, 主要是因为保温过程中 Ti60 钛合金 α 晶粒逐渐等轴粗化和发生回复再结晶。为获得与母材性能接近的力学性能, 需对扩散连接后零件进行热处理等工艺的优化处理。当保温温度达到 940 ℃ 后, 升高保温温度和延长保温保压时间, 对 Ti60 钛合金的室温强度影响不大。

参考文献:

- [1] 周贤军, 武永, 秦中环, 等. TA15/Ti2AlNb 扩散连接界面组织及变形研究 [J]. 塑性工程学报, 2022, 29 (9): 120-126.
Zhou X J, Wu Y, Qin Z H, et al. Study on interface microstructure and deformation during the diffusion bonding of TA15/Ti2AlNb [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2022, 29 (9): 120-126.
- [2] 吴迪鹏, 武永, 周贤军, 等. TC4 钛合金点阵/4 层混合结构舵翼超塑成形/扩散连接工艺 [J]. 塑性工程学报, 2022, 29 (5): 92-97.
Wu D P, Wu Y, Zhou X J, et al. SPF/DB process of rudder wing with lattice/four-sheet hybrid structure of TC4 titanium alloy [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2022, 29 (5): 92-97.
- [3] Lütjering G, Williams J C. Titanium [M]. 2nd Edition. Berlin Heidelberg: Springer, 2007.
- [4] Wang B N, Zeng W D, Zhao Z B, et al. Effect of micro-texture and orientation incompatibility on the mechanical properties of Ti60 alloy [J]. Materials Science and Engineering: A, 2023, 881: 145419.
- [5] 李保永, 秦中环, 刘伟, 等. Ti60/TA15 合金四层结构舵面超塑成形/扩散连接技术研究 [J]. 航空制造技术, 2019, 62 (8): 76-80.
Li B Y, Qin Z H, Liu W, et al. Research on superplastic forming/diffusion bonding for four-sheet structure rudder of Ti60/TA15 alloy [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 62 (8): 76-80.
- [6] Jia W J, Zeng W D, Zhou Y G, et al. High-temperature deformation behavior of Ti60 titanium alloy [J]. Materials Science and Engineering: A, 2011, 528 (12): 4068-4074.
- [7] Jia W J, Zeng W D, Liu J R, et al. On the influence of processing parameters on microstructural evolution of a near alpha titanium alloy [J]. Materials Science and Engineering: A, 2011, 530: 135-143.
- [8] Moiseyev V N. Titanium Alloys: Russian Aircraft and Aero-space Applications [M]. Florida: CRC Press, 2006.
- [9] 刘莹莹, 陈子勇, 金头男, 等. 600 ℃ 高温钛合金发展现状与展望 [J]. 材料导报, 2018, 32 (11): 1863-1869.
Liu Y Y, Chen Z Y, Jin T N, et al. Present situation and prospect of 600 ℃ high-temperature titanium alloys [J]. Materials Reports, 2018, 32 (11): 1863-1869.
- [10] 于卫新, 李森泉, 胡一曲. 材料超塑性和超塑成形/扩散连接技术及应用 [J]. 材料导报, 2009, 23 (11): 8-14.
Yu W X, Li M Q, Hu Y Q. Superplasticity and application of superplastic forming/diffusion bonding technology [J]. Materials Reports, 2009, 23 (11): 8-14.
- [11] 刘继雄, 王文君, 黄拓, 等. 扩散连接工艺对 SP-700 钛合金热轧板连接界面结合性能的影响 [J]. 机械工程材料, 2020, 44 (8): 23-26.
Liu J X, Wang W J, Huang T, et al. Effect of diffusion bonding process on connection interface bonding property of SP-700 titanium alloy hot rolled sheet [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2020, 44 (8): 23-26.
- [12] Hamilton C H. Titanium Science and Technology [M]. New York: Plenum Press, 1973.
- [13] 吴会平. 钛合金扩散连接的界面力学性能及机理研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2020.
Wu H P. Study on Mechanical Properties and Mechanism of Diffusion Bonding Joint for Titanium Alloys [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2020.
- [14] GB/T 6396—2008, 复合钢板力学及工艺性能试验方法 [S].
GB/T 6396—2008, Clad steel plates—Mechanical and technological test [S].

警惕不法网站, 保障投稿安全

近期, 本刊接到多名作者投诉, 网络上出现冒充《锻压技术》杂志官方网站的伪网站, 如 www.dyjszz.cn, 这些网站盗用本杂志官网内容及相关行业信息, 误导和欺骗广大投稿作者, 骗取文章版面费、套取作者文章及个人信息, 侵犯了广大作者的切身利益。

特此声明, 本刊唯一官方网站为 www.fstjournal.net, 投稿方式为网站注册登录投稿, 不接受邮箱投稿。请作者投稿时务必认准杂志官方网站, 谨防受骗。

本刊郑重警告伪网站相关人员尽快停止违法行为, 否则将严肃对待, 并将运用一切法律手段维护本刊的权利。

请广大读者协助本刊监督网络上的不法行为, 一经发现, 请联系本刊, 本刊将及时处理, 共同努力营造良好的期刊网络氛围。

《锻压技术》杂志联系方式: fst@263.net; 010-62920652。

《锻压技术》编辑部