

加热时间对钛合金热自压连接接头组织和性能的影响

邓云华^{1,2}, 关桥^{1,2}, 陶军², 吴冰², 王西昌²

(1. 北京航空航天大学, 北京 100191)

(2. 北京航空制造工程研究所 高能束流加工技术重点实验室, 北京 100024)

摘要: 对不同加热时间下获得的钛合金刚性拘束热自压连接接头进行了连接界面的光学显微镜观察, 背散射电子衍射组织分析和接头拉伸力学性能测试, 分析了加热时间对连接接头界面缺陷、组织和力学性能的影响。同时, 利用热弹塑性有限元模型分析了连接中热应力应变演变过程, 阐明了加热时间对连接接头界面焊合质量、组织和力学性能影响的原因。结果表明: 在加热峰值温度相当的情况下, 随加热时间增加, 界面金属高温存在时间和受压应力作用时间以及横向压缩塑性变形增加, 促进界面两侧原子扩散, 界面未焊合缺陷减少, 接头综合力学性能提高。加热时间至 300 s 以上时, 可以获得界面焊合质量好, 组织均匀, 综合力学性能优异的固相连接接头。

关键词: 加热时间; 刚性拘束热自压连接; 组织; 性能; 有限元分析

中图分类号: TG456.9

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2017)06-1620-06

刚性拘束热自压连接是作者提出的一种新的固相连接方法, 原理如图 1 所示。利用集中热源非熔化局部加热刚性拘束的待连接材料, 形成热拘束应力应变场, 对连接处热塑性状态金属产生自挤压, 从而在无外力作用条件下的扩散和连接^[1]。与同样利用集中热源局部加热的熔化焊接方法相比, 刚性拘束热自压连接能避免熔化焊接头中产生的铸态组织^[2]以及可能存在的气孔^[3]、裂纹^[4]等缺陷; 同时, 与利用高温和外加压力持续作用而促使被焊材料两侧原子相互扩散实现固相连接的扩散连接方法相比, 刚性拘束热自压连接不需要外加的压力, 局部加热方式简单, 且连接时间较短, 效率较高。

前期的研究工作中使用电子束为热源, 对 TC4 钛

合金进行了刚性拘束热自压连接, 获得了组织均匀且综合力学性能优异的连接接头, 验证了刚性拘束热自压连接原理的可行性^[1]。本研究在此基础上, 利用实验和数值模拟相结合的方法分析了刚性拘束热自压连接过程中加热时间变化对热应力应变过程演变及连接接头界面焊合质量、组织和力学性能的影响。

1 实验

实验材料为 5 mm 厚 TC4 钛合金, 母材原始组织由等轴 α 和 β 转变组织构成, 如图 2 所示。

试样尺寸 59 mm (L) \times 50mm (W), 使用磨床精加工试样对接面, 焊前酸洗清理试样, 如图 1 装卡。加热热源为电子束热源, 设备为 ZD150-15MH CV3M 真

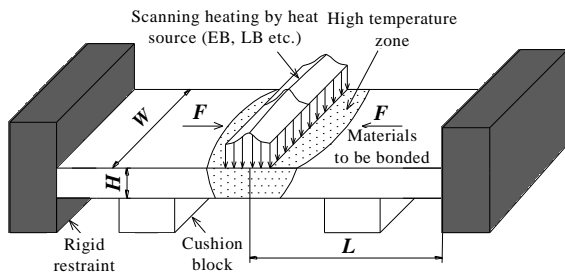


图 1 刚性拘束热自压连接原理示意图

Fig.1 Illustration of rigid restraint thermal self-compressing



图 2 TC4 钛合金母材显微组织

Fig.2 Microstructure of TC4 base metal

收稿日期: 2016-05-16

基金项目: 国家自然科学基金 (50935008)

作者简介: 邓云华, 男, 1987 年生, 博士生, 北京航空制造工程研究所高能束流加工技术重点实验室, 北京 100024, 电话: 010-85701574, E-mail: yunhuadeng@emails.bjut.edu.cn

空电子束焊机。利用多束流控制系统(如图 1 所示)沿对接面扫描加热, 进行刚性拘束热自压连接, 扫描长度与板宽相同, 为 50 mm, 扫描频率 100 Hz。前期实验研究表明, 加热温度对刚性拘束热自压连接有显著影响, 加热峰值温度处于 TC4 合金相变点附近时, 能够获得组织均匀且综合力学性能较好的固相连接接头^[1]。为避免加热峰值温度不同对实验结果的影响, 实验中根据加热时间相应调整束流, 使各不同加热时间的刚性拘束热自压连接峰值温度均处于 TC4 合金 β 相转变点附近。加热工艺参数如表 1 所示。

刚性拘束热自压连接后, 沿垂直于对接面方向机加工切取金相试样, 进行相应的打磨、抛光和腐蚀处理。利用 Leica DM6000M 金相显微镜对连接接头界面焊合质量和组织进行分析。使用背散射电子衍射(EBSD)方法对连接接头的显微组织特征进行分析。机加工制备母材和垂直于对接面的连接接头拉伸试样, 母材和不同加热时间连接接头各 3 件, 试样尺寸根据国家标准 GB2651-2008 选择。并使用 QUANTA 250FEG 扫描电镜对母材和不同加热时间连接接头拉伸试样断口进行分析。

2 有限元数值分析

利用热弹塑性有限元模型, 借助于 Abaqus 软件对不同加热时间下钛合金刚性拘束热自压连接热应力应变过程进行分析。考虑分析模型的对称性, 取其 1/2 进行三维数值模拟。界面附近几何模型和网格划分如图 3 所示, 对接面附近网格尺寸为 1 mm × 1 mm × 0.5 mm, 远离区域采用稀疏网格以兼顾求解精度和计算效率。

采用顺序温度-应变方法分析刚性拘束热自压连接过程热应力应变的演变。假设材料各向同性, 用热传导模拟整个热过程, 应力与应变场依据热弹塑性理论进行计算, 材料的屈服遵循 von Mises 屈服准则。

计算中考虑材料热物理性能和热力学性能随温度变化的特性, 相关数值参考文献[5-7]选取。

在热源模型选择方面, 考虑到刚性拘束热自压连接中电子束热源非熔化扫描加热特点, 选择带状高斯热源模型, 如图 4 所示。

表 1 刚性拘束热自压连接非熔化加热工艺参数

Table 1 Parameters of rigid restraint thermal self-compressing bonding

No.	Beam voltage, U_b/kV	Focus current, I_f/mA	Beam current, I_b/mA	Heating time, t_h/s
1			2.4	120
2	150	2759	2.2	150
3			1.9	300
4			1.8	450

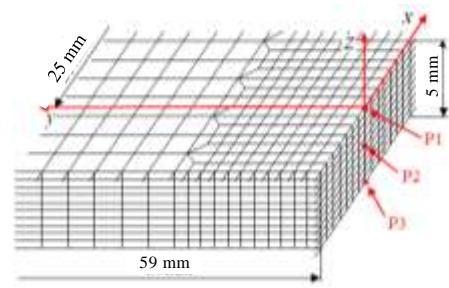


图 3 界面附近网格划分

Fig.3 Mesh generation near the bond interface

使用热电偶测温法对加热时间为 300 s 的连接试样下表面对接线中心位置进行了热循环测试, 测试结果与模拟结果如图 5a 所示。由图 5a 可以看出, 模拟结果与测试结果较为吻合, 仅数值上略有差异。同时, 采用 X 射线衍射应力测试的方法, 对试样上表面垂直于对接面的中心线上残余应力分布进行了测试, 测试结果与模拟结果如图 5b 所示。纵向残余应力实验与模拟结果吻合较好, 横向残余应力分布实验和模拟结果分布规律相同, 但数值上略有差异。热循环和残余应力分布实验测试和数值模型结果的差异主要原因在于实验测试本身误差和数值模型中对材料性能和热源形式所做的假设与实际情况有所差异。

3 结果与分析

3.1 加热时间对刚性拘束热自压连接热应力应变过程的影响

不同加热时间下 TC4 钛合金刚性拘束热自压连接时对接面不同位置 (图 3 所示) 热循环如图 6 所示。由图 6a 可见, 加热时间为 120、150、300 和 450 s 时, 上表面对接线中点 P1 处峰值温度分别为 1028.1、1020.8、1005.8 以及 997.0 °C。在所选择的电子束束流下, 各加热时间的加热峰值温度相近, 均处于 TC4

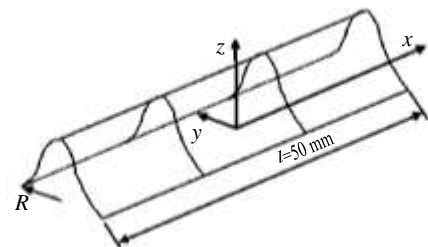


图 4 带状高斯热源示意图

Fig.4 Schematic demonstration of the elongated Gaussian heat source

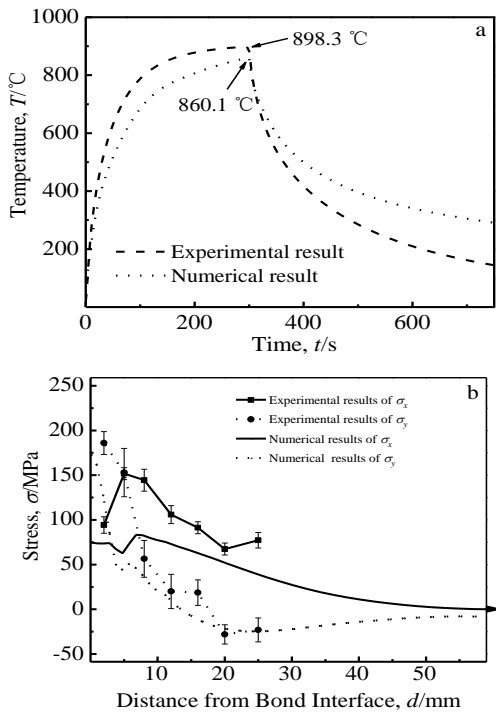


图 5 热循环和残余应力分布的数值模拟与实验测试结果对比
 Fig.5 Comparison between the numerical and experimental results of thermal cycles (a) and residual stresses distributions (b)

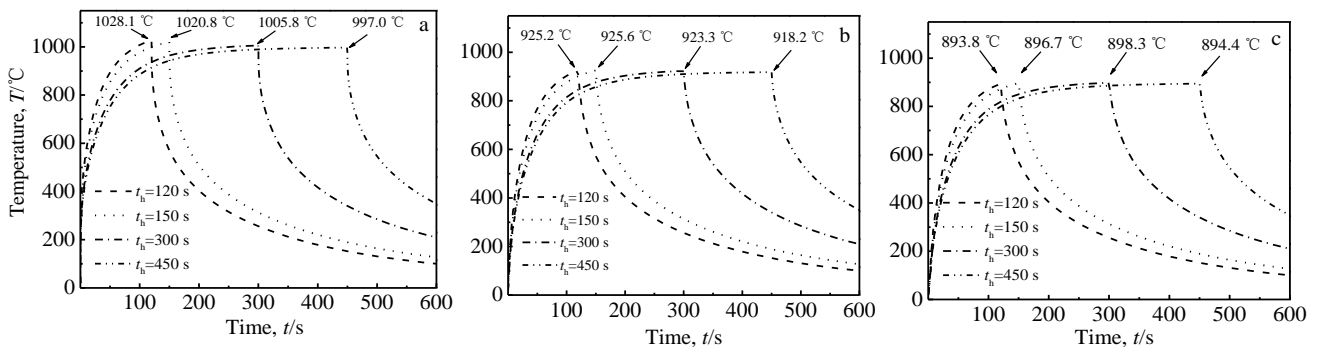


图 6 不同加热时间下对接面图 3 所示不同位置热循环：上表面对接线中点 P1，对接面中心点 P2，下表面对接线中点 P3
 Fig.6 Thermal cycles of P1 point (a), P2 point (b) and P3 point (c) illustrated in Fig. 3 during bonding at different heating time

冷却过程中，因界面高温金属的收缩受到周围金属的约束，变形不协调，界面金属受到拉伸作用，压缩弹性应变逐渐向拉伸弹性应变转变，横向应力随之由压应力逐渐向拉应力转变，连接结束时为残余拉应力。

加热时间为 150、300 和 450 s 时，连接过程中横向应力和应变的演变规律与加热时间 120 s 时情况相同，最大横向压应力峰值相近。同时，也可以看出，加热时间越长，因界面热挤压作用的持续存在，界面金属压缩弹性变形逐渐增大。

3.2 加热时间对刚性拘束热自压连接界面焊接质量影响

合金的 β 相变点转变温度($995 \pm 15^\circ\text{C}$)附近。但是，同时可以看出：随着加热时间的增加，界面金属高温区 ($\geq 800^\circ\text{C}$) 停留时间显著增加。以试样下表面对接线中心点 P3 为例：加热时间为 120 和 150 s 时，高温区停留时间分别约为 52.7 和 72.0 s，当加热时间为 300 s 时，高温区停留时间增至约 183.2 s，加热时间为 450 s 时，高温区停留时间进一步增加，至约 328.5 s。

不同加热时间刚性拘束热自压连接过程中对接面中心点 P2 横向应力和应变演变如图 7 所示。加热时间为 120 s 时，如图 7a，在加热过程中，横向应力一直处于压应力状态，原因在于：连接过程中因局部加热，温度沿试样长度方向分布不均匀，界面附近金属温度高，高温金属的膨胀受到周围冷金属的限制，相应地受到横向挤压作用，产生压缩弹性应变及随后的压缩塑性应变，横向应力为压应力状态。同时可以看出，加热前期，因热挤压效应随温度的增加而显著增加，横向压应力相应增加，至 $t=33.6$ s 时，横向压应力达到峰值为 -223.3 MPa。随后，因材料强度随温度的升高而下降，横向压应力相应地逐渐减小，加热结束时横向压应力为 -64.5 MPa。但横向压缩塑性应变在加热过程中因界面高温金属受到热挤压作用的存在而持续增加，加热结束时横向压缩塑性应变达到 -0.099 。在

不同加热时间时，TC4 钛合金刚性拘束热自压连接接头界面的光学显微镜照片如图 8 所示。

加热时间为 120 s 时，如图 8a，界面处存在较多的孔洞。当加热时间增加至 150 s 时，界面处仍有残留未焊合孔洞，但与加热时间 120 s 连接界面相比，孔洞数量明显减少。当加热时间进一步增加至 300 s 和 450 s 时，原对接线完全消失，未发现未焊合缺陷。因此，可以看出，加热时间对界面焊接质量影响显著，加热时间延长，界面焊接质量提高。主要原因在于：根据数值分析结果可知，虽然不同加热时间下，连接

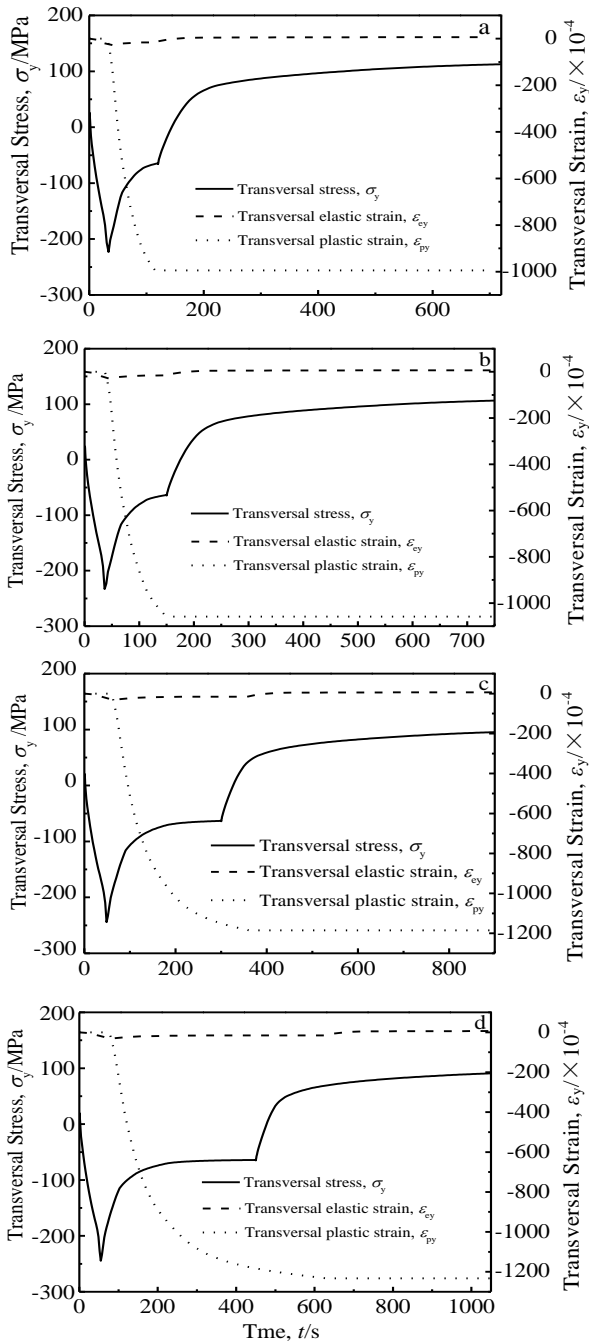


图 7 不同加热时间下对接面中心点 P2 横向应力和应变演变
 Fig.7 Transversal stress and strain histories of P2 during bonding at the heating time of 120 s (a), 150 s (b), 300 s (c), and 450 s (d)

过程中受到的压应力峰值相当, 但是随着加热时间的增加, 界面金属高温停留时间以及受热挤压应力作用时间明显增长, 且塑性变形增加, 从而促进了连接过程中原子扩散的进行, 有利于界面孔洞的闭合, 界面焊合质量提高。

3.3 加热时间对刚性拘束热自压连接接头组织的影响

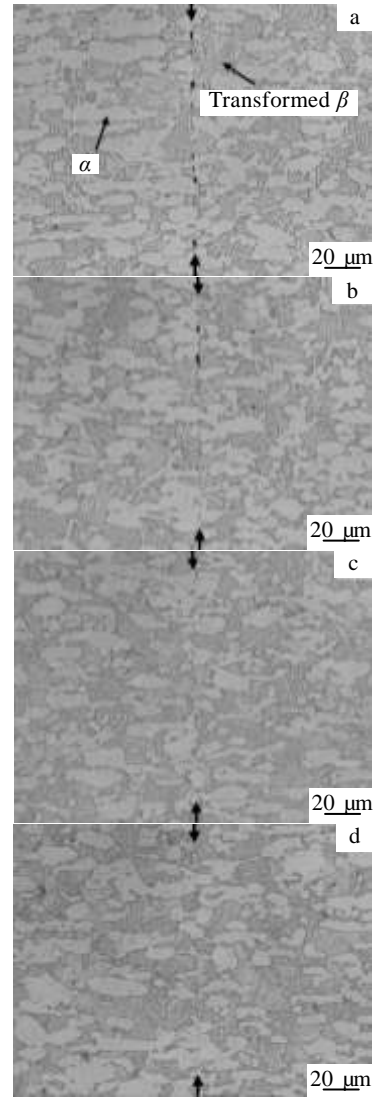


图 8 不同加热时间下连接界面光学显微镜组织
 Fig.8 OM microstructures of the bond interfaces obtained at the heating time of 120 s (a), 150 s (b), 300 s (c), and 450 s (d)

加热时间为 120 s 时, 接头加热区组织如图 8a 所示。可以看出, 界面附近加热区组织由等轴 α 和 β 转变组织组成, 与母材组织相似。加热时间为 150、300 和 450 s 时, 接头加热区组织同样由等轴 α 和 β 转变组织组成。同时, 进一步对加热时间为 150 s 连接接头母材区和界面加热区进行背散射电子衍射(EBSD)分析, 晶粒取向分布如图 9 所示。由图可以看出, 连接接头加热区晶粒取向分布与母材相比, 无显著变化。因此, 可以看出, 在不同加热时间下, 刚性拘束热自压连接后, 接头连接区组织与母材组织相似, 接头组织均匀。

TC4 合金焊接接头组织主要取决于焊接过程中加热峰值温度和冷却速度。电子束热源熔化焊接时, 加热峰值温度高, 远超过 TC4 材料熔点, 局部高温金属

熔化形成熔池，冷却过程中熔池凝固生成由粗大柱状 β 晶粒组成的一次结晶组织，冷却进行至 β 相转变温度附近时，发生固态相变。因熔化焊接时冷却速度快，生成马氏体组织，接头区组织不均匀^[2,8,9]。但在刚性拘束热自压连接过程中，电子束热源为非熔化加热且功率较低，各种情况下加热峰值温度仅在 β 相转变点附近(如图 6)，同时，冷却速度较平缓， β 相以原子扩散的方式向 α 相转变，室温组织与母材组织相似。

3.4 加热时间对刚性拘束热自压连接接头力学性能的影响

母材和连接接头拉伸力学性能测试结果如图 10 所示。加热时间为 120 s 时连接接头拉伸力学性能如表 2 所示。由表 2 可以看出，加热时间为 120 s 时，拉伸试样抗拉强度与母材相当，但接头延伸率结果分散，接头断裂位置不统一(见图 11a)，拉伸试样 120s-2 断裂于母材，断口形貌如图 11b，呈明显韧窝韧性断裂

特征，但试样 120s-1 和 120s-3 断裂于界面，接头延伸率低，由其断口形貌图 11c 可以看出，断面较平整，韧窝较浅，且断面上存在有较多孔洞。

加热时间为 150、300 及 450 s 时，接头拉伸力学性能如图 10 所示。接头的抗拉强度和延伸率均与母材相当，断裂位置均在母材处。因此，可以看出：随着加热时间的增加，接头强度和延伸率均增加，当加热时间大于 150 s 时，接头强度和延伸率与母材相当。

由图 8 可知，各加热时间下，连接接头界面加热区组织相似，因此连接接头的力学性能主要取决于不同加热时间下界面焊合质量。当加热时间为 120 s 时，

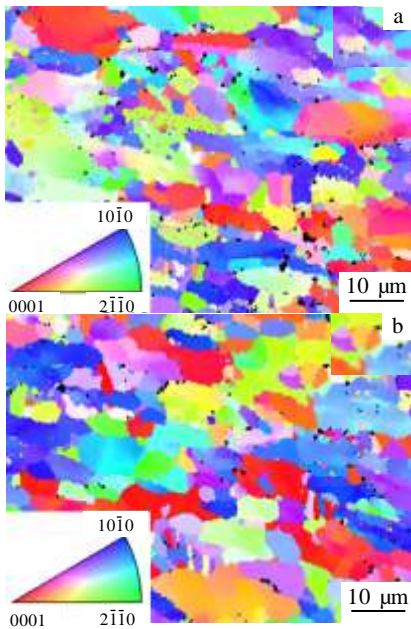


图 9 母材和加热时间 150 s 界面焊合区晶粒取向分布图
Fig.9 Orientation maps of base metal (a) and bonded zone at heating time of 150 s (b)

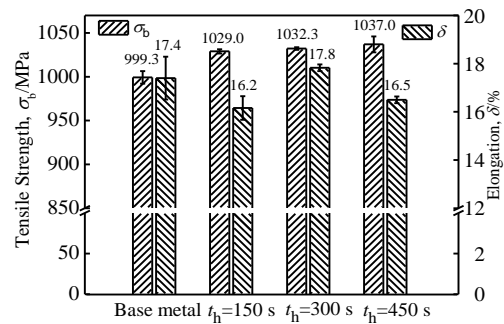


图 10 母材和连接接头拉伸性能测试结果
Fig.10 Tensile mechanical properties test results of base metal and the joints at the heating time of 150 s, 300 s and 450 s

表 2 加热时间 120 s 时连接接头力学性能测试结果及断裂位置

Table 2 Mechanical properties test results and fracture locations of the joint at the heating time of 120 s

Heating time, t_h /s	Tensile strength, σ_b /MPa	Elongation, δ /%	Fracture location
120	987.6	0.4	Bond interface
120	1017.7	12.7	Base metal
120	1019.6	6.7	Bond interface

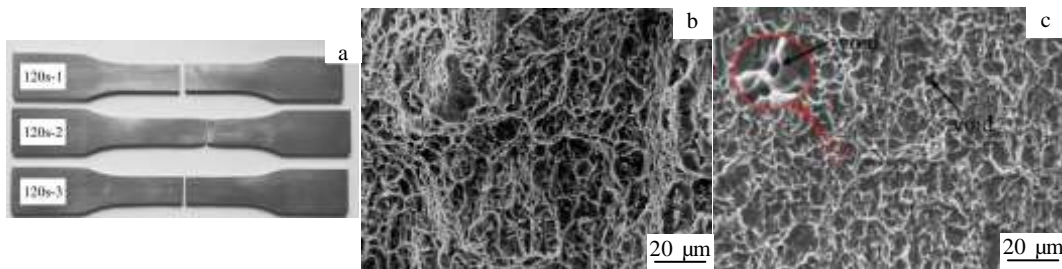


图 11 加热时间 120 s 时连接接头拉伸试样断口位置和试样编号 120s-2 和 120s-3 断口形貌
Fig.11 Fracture location of the joint produced at the heating time of 120 s (a) and the fracture morphologies of the tensile samples: (b) 120s-2 sample and (c) 120s-3 sample

由图 8a 可知, 界面处存在较多的残留未焊合孔洞, 孔洞导致拉伸过程中界面处缺陷附近危险应力峰的增大, 当此应力峰达到该处断裂强度水平时, 出现局部的破裂, 且因界面处孔洞分布较多, 从而导致裂纹沿界面快速失稳扩张直至试样最后断裂, 断裂过程中未发生明显缩颈, 延伸率差; 同时由图 8a 可以看出, 孔洞的分布并不均匀, 因此 120s-2 拉伸试样界面处孔洞的数量可能较少, 从而未使断裂发生于界面处。当加热时间为 150 s 时, 虽然界面处存在未焊合孔洞, 但数量和尺寸均较小(见图 8b), 因此, 未断裂在界面处。当加热时间为 300 s 和 450 s 时, 因界面焊合质量好, 且接头组织均匀, 因此综合力学性能好。

4 结 论

1) 钛合金刚性拘束热自压连接过程中, 在加热峰值温度相当的情况下, 随加热时间增加, 界面金属高温存在时间和受压应力作用时间以及横向压缩塑性变形增加, 从而促进界面两侧原子扩散, 界面未焊合缺陷减少, 连接接头焊合质量改善。

2) 加热峰值温度处于 TC4 合金相变点附近时, 因钛合金自身组织转变特性, 加热时间变化对接头界面加热区组织影响较小, 且不同加热时间均能获得组织均匀的连接接头。

3) 加热时间较短时, 因界面未焊合缺陷的存在, 接头综合力学性能较差; 加热时间增加, 因界面焊合质量改善, 接头综合力学性能随之提升; 当加热时间超过 300 s 时, 能获得界面焊合质量好、组织均匀且综合力学性能优异的连接接头。

参考文献 References

- [1] Deng Y H, Guan Q, Wu B *et al.* *Mater Lett*[J], 2014, 129: 43
- [2] Lu Wei(卢伟). *Research on Fracture Assessment of Electron Beam Welded Joint for Thick-Walled Titanium Alloy*(厚壁钛合金电子束焊接接头断裂安全评定方法研究)[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2012
- [3] Huang J L, Warnken N, Gebelin J C *et al.* *Acta Mater*[J], 2012, 60: 3215
- [4] Zhang Wenyue(张文钺). *Welding Metallurgy*(焊接冶金学)[M]. Beijing: China Machine Press, 2007: 215
- [5] Mills K C. *Recommended Values of Thermophysical Properties for Selected Commercial Alloys*[M]. London: Woodhead Publishing Limited, 2002: 217
- [6] China Aeronautical Materials Handbook Edit Committee (中国航空材料手册编委会). *China Aeronautical Materials Handbook, Volume 4* (中国航空材料手册, 第四卷)[M]. Beijing: China Standard Publishing Company, 2002: 9
- [7] Cai Yun(蔡云). *Research on Superplastic Tensile Mechanical Properties and Microstructural Evolution of TC4 Titanium Alloy at High Temperature*(TC4 钛合金高温超塑性拉伸力学性能研究和组织演变)[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2009
- [8] Balasubramanian T S, Balakrishnan M, Balasubramanian V *et al.* *Sci Technol Weld Joi*[J], 2011, 16 (8): 702
- [9] Suresh N, Pillai M G, Mathewa J *et al.* *J Mater Process Tech*[J], 2007, 192-193: 83

Effect of Heating Time on Rigid Restraint Thermal Self-Compressing Bonding of TC4 Alloy

Deng Yunhua^{1,2}, Guan Qiao^{1,2}, Tao Jun², Wu Bing², Wang Xichang²

(1. Beihang University, Beijing 100191, China)

(2. Science and Technology on Power Beam Processes Laboratory, Beijing Aeronautical Manufacturing Technology Research Institute, Beijing 100024, China)

Abstract: TC4 alloy was bonded by a new solid-state bonding process named as rigid restraint thermal self-compressing bonding at different heating time. Effect of heating time on bond interface, microstructure and mechanical properties was investigated through the optical microscope observation, scanning electron microscope analysis and mechanical properties test to the joints produced at different heating time. In the meantime, thermal stress-strain history during bonding was analyzed by finite element analysis. Results show that with the increase of heating time, the dwell time over high temperature, the action time of compressive stress and the transversal compressive plastic strain increase which promote the atom diffusion between butt-specimens and thus the number of voids retained at bond interface decreases. When the heating time is improved to more than 300 s, sound solid-state joint with good bond interface, homogeneous microstructure and good mechanical properties is obtained.

Key words: heating time; rigid restraint thermal self-compressing bonding; microstructure; mechanical properties; finite element analysis

Corresponding author: Deng Yunhua, Candidate for Ph. D., Beijing Aeronautical Manufacturing Technology Research Institute, Beijing 100024, P. R. China, Tel: 0086-10-85701574, E-mail: yunhuadeng@emails.bjut.edu.cn