

钛合金刚性拘束热自压连接及接头组织与力学性能

邓云华^{1,2}, 关桥^{1,2}, 吴冰², 王西昌², 陶军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, 北京 100024)

摘要: 提出了一种新的固相连接方法——刚性拘束热自压连接技术, 基本原理是: 在无外力作用的条件下, 利用集中热源非熔化局部加热刚性拘束的待连接材料, 形成热弹性应力应变场, 对连接处热塑性状态金属产生自挤压, 实现扩散和固相连接。在真空条件下, 利用电子束热源对 TC4 进行了刚性拘束热自压连接, 验证了刚性拘束热自压连接的可行性, 并分析了连接温度对刚性拘束热自压连接的影响。结果表明: 热自压连接方法原理可行, 加热温度显著影响钛合金接头的组织和性能, 在 TC4 合金相变点以下温度加热时, 接头组织均匀, 综合力学性能优异。

关键词: 刚性拘束热自压连接; 钛合金; 组织; 力学性能; 扩散

中图分类号: TG44

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2016)03-0788-05

随着新型飞行器及其动力装置的快速发展, 对结构的高性能、长寿命和高可靠性的要求越来越高, 焊接/连接技术作为航空制造领域不可缺少的加工方法, 也面临着结构功能和完整性(强度、刚度、耐久性和损伤容限)的高要求^[1-3]。

熔化焊和固相连接是目前航空制造领域中广泛使用的两类焊接方法。熔化焊接, 尤其是以电子束为代表的高能束流焊接方法, 因热源功率密度高, 可获得大深宽比、小变形和高精度的焊接接头, 广泛用于航空制造领域。但熔化焊接, 因热源在焊接区域的高温热循环作用, 经熔化/凝固, 焊缝中产生铸态组织, 焊缝中可能产生气孔、裂纹等缺陷, 导致接头的断裂与疲劳性能相比母材有所降低^[4,5], 焊后需要进行退火热处理才能有所改善^[6], 满足设计的需要, 但增加了生产周期和成本。与熔化焊相比, 在较低温度下, 利用热力共同作用促使原子扩散而实现固相连接的扩散焊方法, 连接过程中温度相对较低, 对母材的热损伤小, 并能避免熔化焊接中铸态组织以及气孔和裂纹等缺陷, 连接接头的综合力学性能较好^[7,8], 同时能进行异种材料的连接^[9,10], 能很好的满足航空结构材料连接中结构功能和完整性的高要求。但是, 通常的固相连接方法尤其是扩散连接方法较大程度上依赖外力作用, 其可实施性和应用范围受到局限。

本研究提出了一种新的材料固相连接方法——

刚性拘束热自压连接方法。利用焊接集中热源进行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, 无需施加外力, 对连接处热塑性状态金属产生自挤压, 从而实现在无外力作用条件下的扩散和连接。同时, 在真空条件下, 利用电子束热源对航空领域常用的钛合金材料进行了刚性拘束热自压连接, 验证了刚性拘束热自压固相连接原理的可行性, 对连接接头焊合率、组织和力学性能进行了测试和分析, 并研究了连接温度对刚性拘束热自压连接的影响。

1 刚性拘束热自压连接

刚性拘束热自压固相连接的基本原理如图 1 所示。利用热源(电子束、激光等)非熔化局部扫描加热刚性拘束的待连接材料对接区, 在热源作用下, 对接

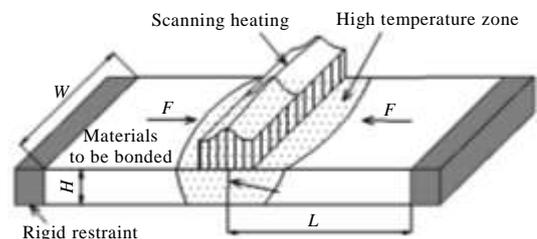


图 1 刚性拘束热自压连接原理示意图

Fig.1 Illustration of rigid restraint thermal self-compressing bonding

收稿日期: 2015-03-16

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, 北京 100024, 电话: 010-85701574, E-mail: yunhuadeng@emails.bjut.edu.cn

界面区金属升温膨胀，但因周围冷金属和刚性固定的拘束，界面区高温金属的膨胀受到限制，在挤压力 F 和温度作用下，实现对接界面材料的扩散和固相连接。

在刚性拘束热自压连接过程中，热源并未熔化待连接材料，属于固相连接方法。同时，与通常由外加压力作用的扩散焊接相比，所提出的这种方法是利用刚性拘束和热源非熔化加热接头时高温区金属与周围冷金属之间温差效应产生的热弹塑性应力应变场，实现对接头连接处热塑性状态金属的挤压、扩散和连接，而非通过施加外力的方式来促使扩散过程的进行。因此，连接过程中不需施加外力，简单易行。

2 实 验

实验材料为 TC4 钛合金，名义化学成分如表 1 所示。对接试样尺寸为 100 mm (L) × 50 mm (W) × 5 mm (H)。为促进连接过程中对接面两侧原子扩散连接，精加工试样对接面，并酸洗去除表面油脂及氧化物等污染物，酸洗液成分为：HF:HNO₃:H₂O=5:20:75，制备后试样如图 1 所示对接装卡。

连接过程中，加热热源选择为电子束热源，使用 ZD150-15MH CV3M 真空电子束焊机进行 TC4 钛合金刚性拘束热自压连接实验。利用束流控制系统沿对接面扫描加热，扫描长度与板宽相同，为 50 mm，扫描频率 100 Hz。确定加热热源和加热方式后，主要工艺参数为电压 U_b 、聚焦电流 I_f 、束流 I_b 和加热时间 t ，如表 2 所示。

实验中对刚性拘束热自压连接过程的热循环进行了测试，以确定连接过程中温度特征。测试方法为热电偶接触测温法，为避免电子束流对热电偶的影响，测点布置于试样下表面对接界面中心处。热电偶为 B 型（铂铑 30-铂铑 6），偶丝直径 0.5 mm。数据采集设备为 YOKOGAWA DX1012 记录仪。

利用线切割在垂直于连接界面方向切取接头试样，经打磨、抛光和腐蚀制备成金相试样。采用 Leica

DM6000M 金相显微镜对连接接头组织进行分析。

根据国家标准 GB2651-2008 制备母材和连接接头拉伸力学性能测试试样各 3 个，尺寸如图 2 所示，使用 Z100 电子万能材料试验机测试母材和连接接头力学性能，测试结果取 3 个试样结果的平均值。并使用 QUANTA 250FEG 扫描电镜对母材和连接接头拉伸试样断口进行分析。

3 实验结果

3.1 刚性拘束热自压连接热循环

2 种连接参数的刚性拘束热自压连接中实测热循环曲线如图 3 所示。

2 种参数下加热时温度均小于 TC4 材料的熔点 (1640 °C)，但因束流功率不同，2 种参数加热时材料下表面峰值温度差距较大，接头 1 连接时，下表面峰值温度超过 TC4 钛合金 ($\alpha+\beta$)→ β 转变温度 (995 °C) 达到 1267.8 °C，温度比接头 2 连接时的峰值温度 (866.5 °C) 高约 400 °C。同时，因接头 1 连接时，束流功率大，加热时升温速度也高于接头 2 连接时相应值。

3.2 连接接头显微组织

母材显微组织如图 4a 所示。可以看出母材为等轴组织，由初生 α 相和转变 β 组织构成。

不同参数刚性拘束热自压连接接头加热区组织如图 4b 和 4c 所示。由图 4b 可以看出，接头 1 加热区组

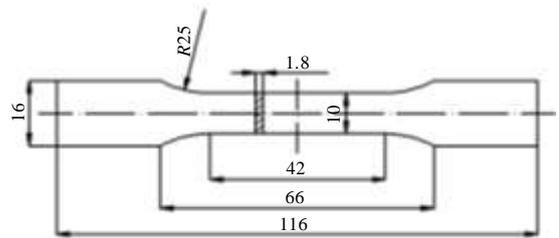


图 2 拉伸力学性能测试试样尺寸图

Fig.2 Dimensions of the tensile specimen

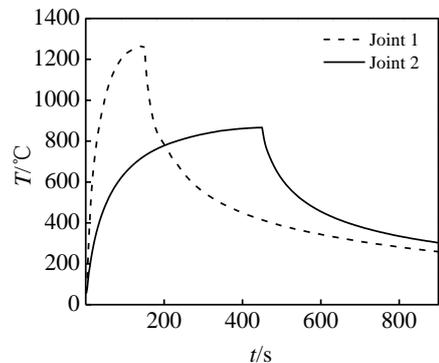


图 3 刚性拘束热自压连接实测热循环曲线

Fig.3 Thermal cycles of bonding with different parameters

表 1 TC4 钛合金化学成分

Table 1 Chemical composition of TC4 titanium alloy ($\omega/\%$)

Al	V	Fe	O	C	N	H	Ti
5.5~6.8	3.5~4.5	≤0.3	≤0.2	≤0.1	≤0.05	≤0.015	Bal.

表 2 刚性拘束热自压连接非熔化加热工艺参数

Table 2 Parameters of rigid restraint thermal self-compressing bonding

Joint	Beam voltage, Focus current, Beam current, Heating			
	U_b/kV	I_f/mA	I_b/mA	time, t/s
1	150	2759	5.2	150
2	150	2759	1.8	450

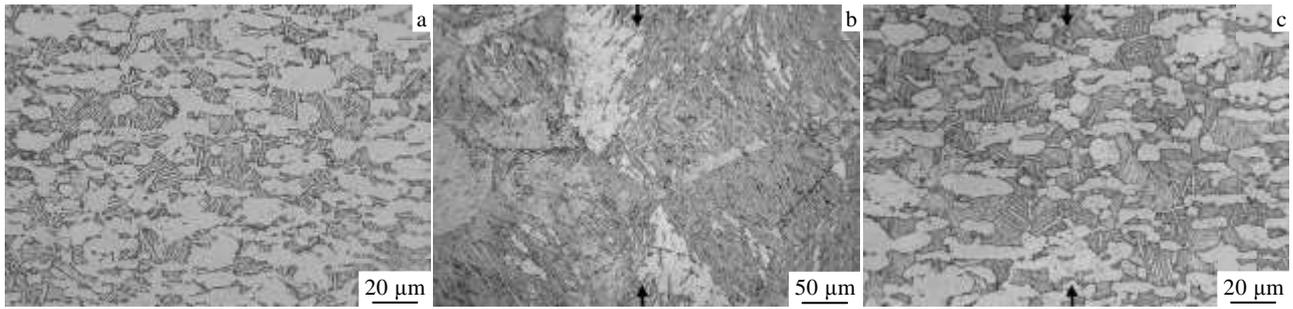


图 4 TC4 钛合金母材及连接接头显微组织

Fig.4 Microstructures of TC4 base metal and bonded joints: (a) base metal, (b) joint 1, and (c) joint 2

织为针状魏氏体组织和原始晶界 β 组织，接头加热区组织与母材组织显著不同，且晶粒粗大。接头 2 加热区显微组织如图 4c 所示，为初生 α 相和转变 β 组织组成，与母材组织相似，接头组织较均匀。显微组织检测结果表明，连接过程中，加热温度的峰值和温升过程对刚性拘束热自压连接接头组织影响显著。

与使用相同热源的熔化焊接相比，刚性拘束热自压固相连接避免了熔化焊接中液态金属凝固时，因垂直于熔合线定向散热而从熔池两侧成对地择优生长至焊缝中心的柱状晶铸态组织。

图 4b 和 4c 中箭头所在处为原对接界面线上下位置，由光学显微镜结果可以看出，原接头对接线消失，界面两侧原始组织形成共生晶粒，表明在经热自压连接后，两侧金属连接，形成原子间结合的连接接头。这表明刚性拘束热自压连接方法原理可行，能获得良好焊合率的连接接头。

3.3 接头力学性能与分析

母材和不同参数刚性拘束热自压连接接头拉伸力学性能测试结果如表 3 所示。

从表 3 可以看出，接头 1 的抗拉强度与母材抗拉强度相当，但接头的延伸率相比母材下降严重。接头 2 的抗拉强度、屈服强度和延伸率均与母材相当，综

合力学性能较好。拉伸试验结果表明，刚性拘束热自压连接可以获得与母材抗拉强度相当的连接接头，但温度对连接接头的力学性能影响显著，加热峰值温度小于 TC4 钛合金 $(\alpha+\beta)\rightarrow\beta$ 转变温度加热时，接头可获得与母材相当的综合力学性能。

接头 1 拉伸试样断裂位置为中间加热区，接头 2 拉伸试样断裂位置为母材。母材拉伸试样、接头 1 拉伸试样和接头 2 拉伸试样的断口形貌分别如图 5a、5b 和 5c 所示。

由图 5 可以看出母材的微观断口存在大量韧窝，呈延性断裂特征，接头 1 拉伸断口呈解理断裂和少量韧窝的混合断口特征，且伴有撕裂特征，与母材相比接头 1 韧窝较浅，并表现出脆性断裂的特征，接头塑性较差。接头 2 拉伸试样断于母材处，断口位于母材上，表现出延性韧窝断裂特征。试样断口观察结果与

表 3 母材和接头力学性能测试结果

Table 3 Results of tensile mechanical properties for base metal and bonded joints

Mechanical properties	Base metal	Joint 1	Joint 2
Ultimate tensile strength, σ_b /MPa	999.3	997.2	1037.0
Yield strength, $\sigma_{0.2}$ /MPa	944.7	901.5	972.3
Elongation, δ /%	17.4	3.48	16.5

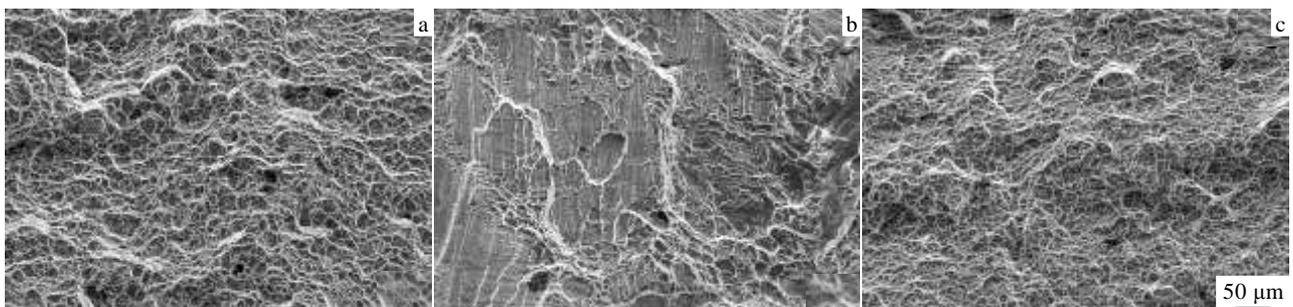


图 5 拉伸试样 SEM 断口形貌

Fig.5 SEM images of fracture surface of the tensile specimen: (a) base metal, (b) joint 1, and (c) joint 2

拉伸试验结果吻合。

4 分析讨论

4.1 热循环对刚性拘束热自压连接组织的影响

钛合金焊接接头的组织与钛合金组织转变特点和焊接过程中热循环有关。对于 TC4 钛合金材料, 当加热温度超过 $(\alpha+\beta)\rightarrow\beta$ 转变温度(995 °C)时, α 相转变 β 相, 在随后的冷却过程中, 取决于冷速的快慢, 可能生成马氏体 $\alpha'+\beta$ 组织(淬火组织)、针状 $\alpha+\beta$ (空冷组织)或条状 $\alpha+\beta$ 组织(炉冷组织)^[11]。

按接头 1 参数加热时, 由测温结果可知下表面峰值温度已达到 1267.8 °C。因此, 可以确定加热时整个对接界面附近区域温度均超过 $(\alpha+\beta)\rightarrow\beta$ 转变温度(995 °C), 加热过程中 α 相完全转变为 β 相。加热结束后, 因试样温度均匀化过程以及试样辐射散热和卡具的热传导散热, 温度逐渐下降, 试样冷却; 由热循环测温结果计算可知接头 1 连接过程中, 在相变点附近冷却速度约为 10~15 °C/s, 冷却速度介于水冷和炉冷之间。因此, 在冷却过程中 β 相晶粒内部通过原子扩散产生针状 α 相, 冷却至室温时得到针状 $(\alpha+\beta)$ 和原始晶界 β 组织。同时, 钛合金由于导热性较差, 热容量大, 加热过程中 $\alpha\rightarrow\beta$ 相转变生成的 β 相极易快速长大, 形成粗大的 β 晶粒, 随后冷却过程中, β 晶界保留至室温, 导致晶粒粗大。

按接头 2 参数加热时, 束流功率较小, 下表面峰值温度为 866.5 °C, 低于 $\alpha\rightarrow\beta$ 转变温度(995 °C)。考虑沿厚度方向的温度梯度, 工件上表面温度会高于下表面温度, 但因束流较小, 升温速度慢, 热量可充分沿厚度传导, 沿厚度方向温度梯度较平缓, 试样上、下表面温差较小, 整个厚度上温度均低于 $(\alpha+\beta)\rightarrow\beta$ 转变温度。对于钛合金材料, 在相变点以下加热时, 由于合金元素在相中扩散速度慢, 边界相起着抑制作用, 晶粒长大缓慢, 且刚性拘束连接过程中, 加热时间短, 因此未发生明显组织转变, 室温下接头加热区组织与母材组织相似, 接头组织较均匀。

4.2 温度对刚性拘束热自压连接力学性能的影响

钛合金接头力学性能与基体组织形态和接头的组织均匀性有关, 因此, 温度对刚性拘束热自压连接接头力学性能的影响, 主要在于温度对刚性拘束热自压连接接头组织的影响。接头 1 因加热温度超过 $(\alpha+\beta)\rightarrow\beta$ 转变温度, 接头加热区冷却后得到针状 $(\alpha+\beta)$ 和原始晶界 β 组织, 且晶粒粗大, 导致断裂发生在加热区。另一方面, 因接头组织不均匀, 在拉伸时, 与母材相比试样的变形不协调性严重, 导致应力应变场的不均匀, 引起金属中已有缺陷附近危险应力峰的增大, 当此应

力峰达到该断裂强度水平时, 出现局部破裂, 随后裂纹失稳扩张至试样最后断裂, 断裂过程中未发生明显缩颈, 延伸率较小。

接头 2 因加热时温度均低于 $(\alpha+\beta)\rightarrow\beta$ 转变温度, 加热区组织与母材组织相同, 接头组织均匀, 因此接头的抗拉强度和屈服强度与相应母材值相当。同时, 因接头组织比较均匀, 与接头 1 相比, 静拉伸时形变的不协调性不至引起明显的局部应力增长, 因而不会出现接头 1 在极少形变下即断裂的情况。而是, 随着塑性变形的发展, 形变硬化作用赶不上塑性变形发展速度, 出现缩颈。接头 2 的延伸率测试结果与母材相当, 表明接头塑性较好。因此, $(\alpha+\beta)\rightarrow\beta$ 转变温度以下加热时, 刚性拘束热自压固相连接接头的综合性能较好。

5 结论

1) 提出了一种新的材料固相连接方法, 即刚性拘束热自压连接方技术, 基本原理是: 在无外力作用的条件下, 利用集中热源非熔化加热刚性拘束的待连接材料, 形成热弹塑性应力应变场, 对连接处热塑性状态金属产生自挤压, 实现扩散和连接。

2) 利用电子束热源实现了 TC4 钛合金刚性拘束热自压连接, 获得了具有良好焊合率的固相连接接头。验证了刚性拘束热自压连接原理的可行性。

3) 热循环过程对钛合金刚性拘束热自压连接接头组织和性能影响显著, 峰值温度超过 $(\alpha+\beta)\rightarrow\beta$ 转变温度加热时, 连接接头组织不均匀, 母材组织由初生 α 相和转变 β 组织组成, 加热区组织为针状魏氏组织和原始晶界 β 组织, 接头抗拉强度与母材相当, 但接头塑性较差; 峰值温度低于 $(\alpha+\beta)\rightarrow\beta$ 转变温度加热时, 加热区组织为与母材组织相似, 均由初生 α 相和转变 β 组织组成, 连接接头组织较均匀, 接头抗拉强度和延伸率与母材相应指标相当, 接头综合力学性能好。

参考文献 References

- [1] Nesterenko G I, Nesterenko B G. *Int J Fatigue*[J], 2009, 31: 1054
- [2] Arrieta A J, Striz A G. *Struct Multidiscip O*[J], 2005, 30: 155
- [3] Guan Qiao(关 桥), Shao Yichen(邵亦陈). *Aeronautic Manufacturing Technology*(航空制造技术)[J], 2012, 409(13): 34
- [4] Oh J, Kim N J, Lee S *et al. Mat Sci Eng A*[J], 2003, 340: 232
- [5] Lu Wei(芦 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: 23

- [6] Thomas G, Ramachandra V, Ganeshan R. *J Mater Sci*[J], 1993, 28: 4892
- [7] Lee H S, Yoon J H, Yi Y M. *J Mater Process Tech*[J], 2008, 201: 280
- [8] Wu Y E, Lo Y L. *Theor Appl Fract Mec*[J], 2002, 38: 71
- [9] Kurt B, Orhan N, Evin E *et al. Mater Lett*[J], 2007, 61: 1747
- [10] Wang Juan(王娟), Li Yajiang(李亚江), Ma Haijun(马海军). *Acta Metallurgica Sinica*(金属学报) [J], 2005, 41(9): 989
- [11] Zhang Zhu(张翥), Wang Qunjiao(王群娇), Mo Wei(莫畏). *Metallurgy and Heat Treatment of Ti Alloy*(钛的金属学和热处理)[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2009: 87

Microstructure and Mechanical Properties of the Titanium Alloy Joints by Rigid Restraint Thermal Self-Compressing Bonding

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

(1. Beihang University, Beijing 100191, China)

(2. Beijing Aeronautical Manufacturing Technology Research Institute, Beijing 100024, China)

Abstract: A new solid state joining method named as rigid restraint thermal self-compressing bonding is proposed. Solid joints can be produced using a localized heating method without the use of external force. The butted surfaces of the rigid restrained plates is locally heated to produce a thermal elastic-plastic stress-strain field to compress the zones to be bonded, and in its turn to facilitate the diffusion of interface atoms to form solid joint. Experiments were conducted on TC4 titanium plates to show the feasibility of rigid restraint thermal self-compressing bonding using electron beam as heat source. Thermal cycles of rigid restraint thermal self-compressing bonding were measured. Microstructure and mechanical properties of bonded joint were investigated. Moreover, effects of temperature on rigid restraint thermal self-compressing bonding were analyzed. Results show that a perfect solid state joint can be performed. The effects of thermal cycles and the peak temperature on microstructure and mechanical properties of the bonded joint are notable. Peak temperature lower than the β transus temperature of TC4 alloy is recommended to perform homogeneous microstructure of the solid state bonded joint with high mechanical properties equal to base metal.

Key words: rigid restraint thermal self-compressing bonding; titanium alloy; microstructure; mechanical properties; diffusion

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