



Experimental Study on Electrically Assisted Pressure Solid-State Welding of Titanium Alloy Plate

Yongfang Li, Yali Yang

School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai, China
Email: muzicandy@126.com

How to cite this paper: Li, Y.F. and Yang, Y.L. (2020) Experimental Study on Electrically Assisted Pressure Solid-State Welding of Titanium Alloy Plate. *Open Access Library Journal*, 7: e6892.

<https://doi.org/10.4236/oalib.1106892>

Received: October 12, 2020

Accepted: November 6, 2020

Published: November 9, 2020

Copyright © 2020 by author(s) and Open Access Library Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

In this paper, the electrically assisted pressure solid-phase welding of titanium alloy plate is studied. Two different sizes of dies are used to apply pressure to the specimens. At the same time, electric current is applied to the specimens which are in plastic compression deformation. After welding, the joint strength is evaluated by tensile tests. The results show that for the small dies, the optimal thickness reduction corresponding to the maximum fracture load for a given current intensity exists. And the fracture mode changes from shear failure mode to fracture failure mode. While for bigdies, the fracture failure load is greatly increased for the increase of welding area, and the fracture mode is only fracture failure mode.

Subject Areas

Electric Engineering

Keywords

Electrically Assisted Pressure Welding, Titanium Alloy Plate, Solid State Welding

1. 引言

钛合金具有密度低、比强度高、耐蚀性好、导热率低、无毒无磁、生物相容性好、表面可装饰性强等特性，广泛应用于航空、航天、化工、石油、电力、医疗、建筑、体育用品等领域[1]。但钛合金的可焊性较差，极易氧化、氮化和脆化，常见的焊接缺陷主要有接头脆化、裂纹和气孔，传统的熔焊方法已不能满足要求[2]。对于钛合金的焊接，一方面正向高能量密度熔焊技术

发展,如激光焊、电子束焊和等离子弧焊等,另一方面,新型的固相(非熔化)焊接方法正成为国际焊接领域研究的前沿。电流辅助压力固相焊接作为一种新的焊接方法,正引起国内外学者的广泛关注。这种焊接技术具有快速的局部加热、工艺设备简单、成本效益高、加工时间短(数秒钟)等技术优势,使该焊接技术具有广阔的工程应用前景。

电流辅助压力焊接方法充分利用焊接过程电阻热的热效应和电致塑性的非热效应相耦合,在较低温度下大幅度提高原子的扩散能力和位错的移动能力[3] [4] [5] [6],促进和实现固态焊接过程的冶金结合,改善焊接界面的机械和材料性能。Peng [7]等最先提出利用该焊接方法进行试验,研究 SS316L 不锈钢与黄铜金属超薄板(0.1 mm 和 0.15 mm)的固相连接工艺,并分析了各种焊接参数(电流密度、焊接压力、温度、变形量等)对焊接强度的影响。Ng [8]等成功实现了超薄(0.127 mm)铝片与铝片以及铝片与铜片之间的电流辅助动态辊压焊接,该焊接仍然利用的是电流辅助压力固相焊接技术的原理,通过动态轧制实现焊接。Li 等[9]利用该焊接技术成功焊接 1 mm 厚钛合金板,通过接头微观结构(OM 和 EBSD)分析发现,该试验成功制备出了所选钛合金的良好焊接接头。本文基于前期研究[9],仍以钛合金板为研究对象,进行电流辅助压力固相焊接,探讨不同压头尺寸对接头强度的影响,以便更深入地理解该种焊接方式的焊接机理。

2. 试验材料及方法

试验选用 1 mm 厚的 Grade 1 钛合金轧制板为研究对象,其主要化学成分见表 1 所示。焊件尺寸为 120 mm × 10 mm × 1 mm。实验前,用丙酮对试件进行清洗以去除表面油污。

电流辅助压力焊接实验装置示意图[9]如图 1(a)所示。试验中,采用硬度 HRC > 60 的碳钢材料制作上、下压模,压模顶端直接接触待焊试件的部位称为压头,压头也充当电极的作用。为了比较不同尺寸的压头对接头性能的影响,本研究采用两种不同尺寸的压头(小压头和大压头)进行试验。对于小压头,端面为半径为 2 mm 的半圆形(图 1(b));对于大压头,在端面的顶部增加一长度为 4 mm 的平台(图 1(c)),这样可以增大待焊试样的接触面积。

在焊接过程中,首先通过压力机对试样施加约 100 N 的预紧力,确保压头(电极)与试样之间的良好接触,避免它们之间产生火花,然后以 12 mm/min 的位移速率对待焊试件施加轴向压力直至最大位移量,施加压力的同时通过电极对试件施加持续时间为 10 s 的连续电流。对于小压头焊接试验施加电流强度为 1.4 kA,大压头焊接试验施加的电流强度为 2.8 kA,这样小压头上的名义电流密度值略大于大压头的,如表 2 所示。因此,本文中,可变的实验

Table 1. The nominal chemical compositions of Grade 1 Ti alloy (mass fraction, %)

表 1. Grade 1 钛合金化学成分(质量分数%)

Ti	C	Fe	H	N	O
余量	≤0.1	≤0.2	≤0.015	≤0.03	≤0.18

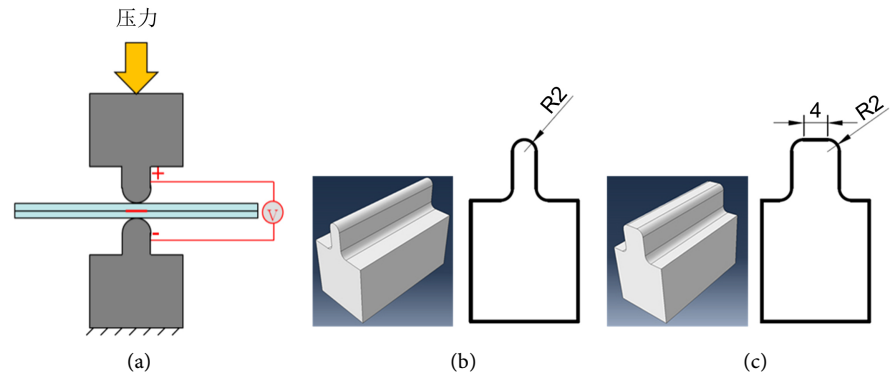


Figure 1. (a) Schematic of the experimental set-up, (b) small die and (c) big die

图 1. (a) 焊接试验示意图, (b) 小压头和(c) 大压头

Table 2. Parameters of welding experiment

表 2. 焊接试验参数

电流强度 (kA)	最大位移量 (mm)	厚度降 (%)	名义电流密度 (A/mm ²)
1.4 (小压头)	0.9	43.2	56.5
	1.1	50.5	50.5
	1.3	56.7	47.9
	1.5	67.2	46.8
2.8 (大压头)	1.3	38.7	44.0
	1.5	43.8	43.1
	1.7	47.8	42.5
	1.9	53.0	41.7

参数包括施加轴向压力过程中上压模向下移动的最大位移和施加的电流强度, 如表 2 所示。每个电流强度对应 4 个不同的最大位移。为简便起见, 结合电流强度和最大位移对参数进行标记。例如, 参数 1.4 kA 1.3d 表示电流为 1.4 kA, 上压模向下移动的最大位移量为 1.3 mm。为了验证结果的重复性, 每组参数至少测试三个样本。

3. 试验结果与讨论

塑性变形是电流辅助压力焊接过程中的重要因素之一。由于上压模在压缩过程中向下移动的最大位移并不能真正反映焊件的变形量, 因此, 本文用厚度降即试样减少的厚度与原试样厚度之比来评价焊接结束时工件的塑性变形量。焊接结束后通过对试样厚度的测量并计算出每组试验参数下的厚度降如表 2 所示, 随着最大位移量的增大, 工件的厚度降(塑性变形量)增加。

表 2 中还列出了每组试验参数的名义电流密度。名义电流密度是利用电流强度除以通过试件的电流面积来计算。电流面积可以利用数学几何关系计算而得[10], 如图 2 所示。最终计算的名义电流密度见表 2 所示。结果表明,

随着厚度降(变形量)增加, 电流面积增加, 因而名义电流密度下降, 且大压头对应的电流密度值略小于小压头对应的电流密度值。

图 3 显示了典型的焊接接头外观。在接头处均可见明显压痕, 且 2.8 kA 大压头试验的焊接件由于压头尺寸大, 压痕明显变宽。此外, 由于高温氧化, 接头区有明显的蓝色。

焊接过程中的压力载荷和最高温度曲线选择 1.4 kA 1.5d (小压头)和 2.8 kA 1.9d (大压头)两组参数的试验结果进行对比, 如图 4 所示。温度曲线图 4(b)可以分为三个不同的阶段: 第一阶段, 温度迅速上升到一个较高的数值。同时, 压力载荷图 4(a)迅速增加; 第二阶段为高温保持阶段, 两种压头的焊接温度值相差不大且变化缓慢(基本维持在 500°C, 远低于母材熔点温度)。这主要是由于两种参数试验的名义电流密度相差较小导致的(表 2)。压力载荷仍然继续升高直至指定位置, 但由于大压头接触面积大, 压力载荷升高更快; 第三阶段, 断开电流阶段, 温度下降, 结束试验。第二阶段对形成坚固焊接接头是非常重要的, 因为大多数的界面原子扩散都发生在这一阶段。

焊接试验结束后, 用位移率为 1 mm/min 的拉伸试验测量焊接接头的失效载荷。结果发现, 存在两种不同的断裂模式: 界面剪切失效和接头拉伸失效, 如图 5 所示。对于界面剪切断裂模式(图 5(a)), 断裂发生在焊接界面上。对于拉伸断裂模式, 有两种类型的断裂: 一种是断裂发生在沿着接合区域边缘的一块金属板上(用蓝色箭头标记)(图 5(b1)); 另一种是断裂直接发生在焊接区中心位置(图 5(b2))。试验结果表明, 只有当厚度降达到临界值(本研究中约 75%)时, 才能发生第二种拉伸断裂。由于塑性变形量过大, 接头过薄, 第二种拉伸断裂模式的拉伸断裂载荷非常低。因此, 为了保证尽可能大的拉伸断裂载荷, 本研究只考虑厚度降小于 75% 的第一种拉伸断裂模式。

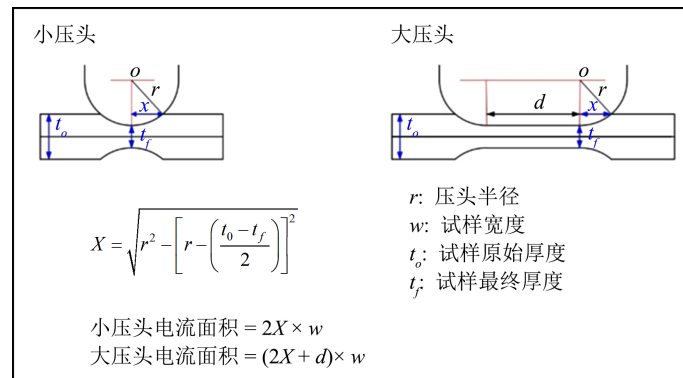


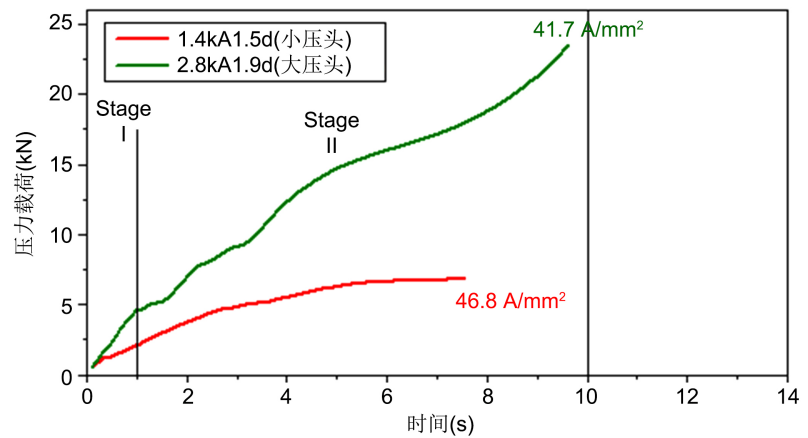
Figure 2. Calculation of current area

图 2. 电流面积的计算

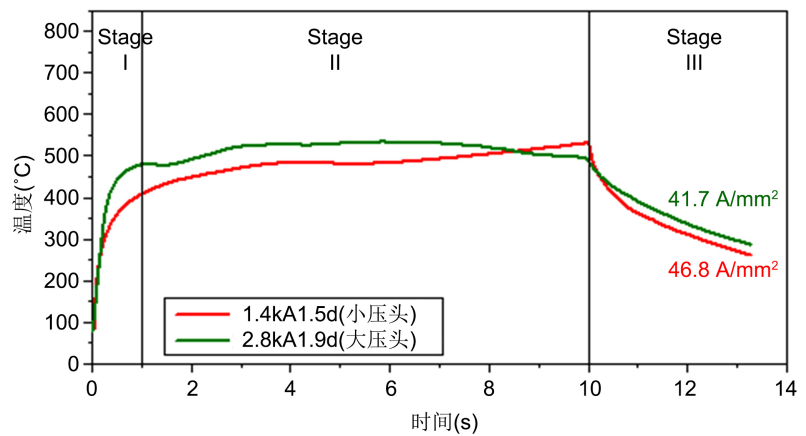


Figure 3. Appearance of welding samples

图 3. 焊接试样的外观



(a)



(b)

Figure 4. (a) Pressure load; (b) maximum temperature curves of welding process
图 4. (a) 焊接过程压力载荷曲线; (b) 最高温度曲线

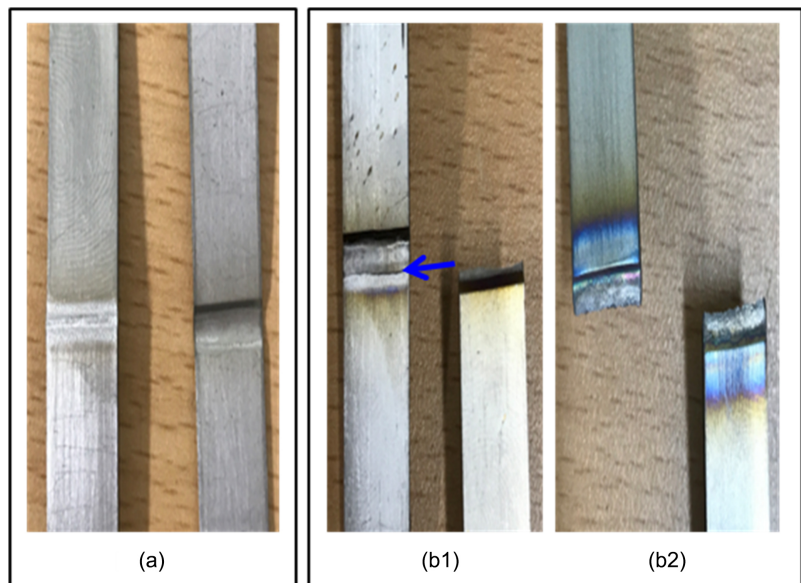


Figure 5. (a) Shear fracture; (b1) and (b2) tensile fracture
图 5. (a) 剪切断裂; (b1) 和 (b2) 两种拉伸断裂

显然，接头拉伸试验过程中同时存在剪切和拉伸过程，其荷载分别称为剪切断裂荷载 F_S 和拉伸断裂荷载 F_N 。如果 $F_S < F_N$ ，则发生剪切断裂，最终断裂荷载等于剪切断裂荷载 ($F = F_S$)；否则发生拉伸断裂，最终断裂荷载等于拉伸断裂荷载 ($F = F_N$)。两种压头的焊接接头拉伸试验的断裂荷载分布如图 6 所示。在 1.4 kA 小压头焊接接头中，可以明显观察到两种不同的断裂模式(剪切断裂和拉伸断裂)。当厚度降较小时，发生剪切断裂；随着厚度降增加，剪切断裂荷载明显增大。这是因为越来越多的金属原子在界面扩散，形成冶金结合。当厚度降超过临界值时，就会发生拉伸断裂；随厚度降的增加拉伸断裂荷载呈近似线性下降。这主要是接头厚度太薄和断裂区域应力集中造成的 [7]。与 1.4 kA 小压头焊接相比，2.8 kA 大压头焊接的名义电流密度均较小(表 2)，而断裂荷载却很高(约 3.5 Kn)，而且几乎维持在一个水平。接头断裂模型均为拉伸断裂，没有剪切断裂。主要原因是焊接面积增大导致剪切断裂荷载大大增加，即 $F_S > F_N$ ，而拉伸断裂荷载主要与厚度有关，厚度变化不大，所以断裂荷载也几乎不变。因此，大压头增大了焊接面积可以获得较高的断裂力。接头横截面 OM 宏观图也进一步说明这个问题(图 7)。

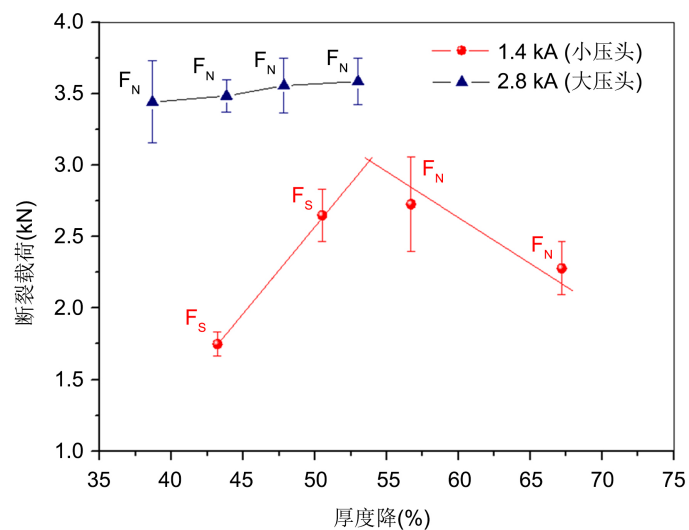


Figure 6. Fracture load distribution in tensile tests

图 6. 拉伸试验断裂荷载分布

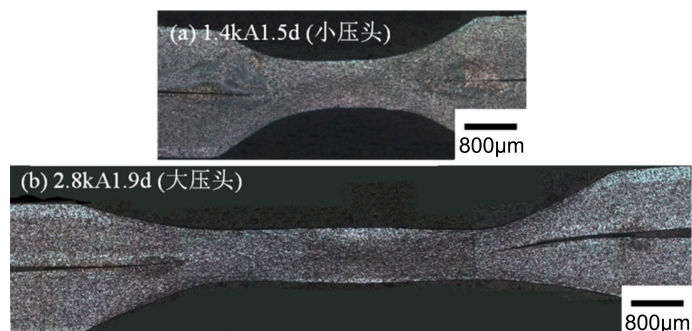


Figure 7. OM images of joint cross section

图 7. 接头横截面 OM 宏观图

4. 结论

在两种不同尺寸压头及工艺条件下，电流辅助压力焊接方法在 500°C 左右成功焊接了 1 mm 厚的钛合金板。通过对接头进行拉伸试验，小压头焊接接头的断裂载荷先升高后减小，存在最优厚度降，且失效模式由剪切失效模式过渡到断裂失效模式；而对于大压头焊接，由于显著增大的焊缝面积，断裂载荷大大提高，且仅存在拉伸断裂失效模式。

Conflicts of Interest

The authors declare no conflicts of interest regarding the publication of this paper.

References

- [1] 贾海涛, 张睿伟. 钛及钛合金的焊接性分析与应用[J]. 焊接技术, 2020, 49(1): 55-60.
- [2] 孙培洲. 钛合金管道焊接技术要点[J]. 化学工程与装备, 2016(8): 218-220.
- [3] Kim, M., Lee, M., Hariharan, K., *et al.* (2017) Electriccurrent-Assisted Deformation Behavior of Al-Mg-Si Alloy under Uniaxial Tension. *International Journal of Plasticity*, **94**, 148-170. <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2016.09.010>
- [4] 杜浩, 汤泽军, 章锦涛, 等. 6063T4 铝合金脉冲电流辅助拉伸力学性能实验研究[J]. 材料科学与工艺, 2018, 26(1): 54-61.
- [5] Stolyarov, V. (2018) Features of Electroplastic Effect in Alloys with Martensite Transformation. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, **31**, 1305-1310. <https://doi.org/10.1007/s40195-018-0747-z>
- [6] 王国峰, 李骁, 李丹峰, 等. 脉冲电流在塑性加工中的应用[J]. 航空制造技术, 2017(18): 2-28.
- [7] Peng, L., Xu, Z. and Lai, X. (2014) An Investigation of Electrical-Assisted Solid-State Welding/Bonding Process for Thin Metallic Sheets: Experiments and Modeling. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B Journal of Engineering Manufacture*, **228**, 582-594. <https://doi.org/10.1177/0954405413506193>
- [8] Ng, M.K., Li, L., Fan, Z., *et al.* (2015) Joining Sheet Metals by Electrically-Assisted Roll Bonding. *CIRP Annals—Manufacturing Technology*, **64**, 273-276. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2015.04.131>
- [9] Li, Y.F., Das, H., Hong, S.T., *et al.* (2018) Electrically Assisted Pressure Joining of Titanium Alloy. *Journal of Manufacturing Processes*, **35**, 681-686. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.09.015>
- [10] Mahabunphachai, S., Koç, M. and Ni, J. (2009) Pressure Welding of Thin Sheet Metals: Experimental Investigations and Analytical Modeling. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, **131**, Article ID: 041003(1)-(9). <https://doi.org/10.1115/1.3160597>

Appendix (Abstract and Keywords in Chinese)

钛合金板电流辅助压力固相焊接试验研究

摘要：本文以钛合金板为研究对象进行电流辅助压力固相焊接试验。采用两种不同尺寸的压头对待焊工件施加压力，与此同时，施加电流到正处于塑性压缩变形的工件上。焊接结束后对接头采用拉伸试验以检验接头强度。结果表明，对于小压头焊接，存在与接头最大断裂载荷相对应的最佳厚度降，且断裂模式由剪切失效模式过渡到断裂失效模式；而使用大压头焊接，由于焊接面积增加，大大提高了断裂失效载荷，断裂模式只有断裂失效模式。

关键词：电流辅助压力焊接，钛合金板，固态焊接