

退火处理对钛合金压印接头疲劳性能影响

张 越， 何晓聪， 邢保英， 程 强
(昆明理工大学 机电工程学院,昆明 650500)

摘 要: 文中实现了钛合金板材的压印连接,并将得到的压印接头分成两部分,一部分不予处理,一部分进行整体退火处理. 将得到的两组试件进行静拉伸试验和拉-拉疲劳试验. 结果表明,未处理的钛合金压印接头静拉伸最大载荷均值为 4 363.64 N,失效位移均值为 1.48 mm. 退火处理后,钛合金压印试件的静拉伸最大载荷均值为 3 879.74 N,失效位移均值为 1.85 mm;未处理的钛合金压印接头疲劳性能明显优于后者,前者的疲劳极限高于后者约 68%;两种接头的疲劳裂纹总是在压印点偏上的部位出现,SEM 分析显示该部位应力较为集中且存在多个疲劳源,两种断口的疲劳源呈脆性疲劳断裂特征,退火处理的接头颈部断裂断口为塑性断裂.

关键词: 钛合金; 压印连接; 退火处理; 疲劳试验

中图分类号: TG 386.3+4 文献标识码: A doi:10.12073/j.hjxb.20151004001

0 序 言

由于钛合金具有强度高、抗腐蚀性好、耐高温等一系列突出优点,被广泛应用在汽车工业、航空航天和国防工业中^[1]. 然而钛合金由于屈服强度高、缺口敏感性高以及塑性变形区范围窄等性质,使得传统的连接方法很难实现钛合金的连接,实现钛合金的有效连接是亟待解决的问题^[2]. 近年来,新兴的压印连接技术可以解决传统连接工艺存在的问题,它是一种通过挤压金属薄板材料使其发生冷变形的连接方法,利用上模和对应的下模对两层或多层板料进行压接,变形后可以形成一个摩擦互锁的连接点^[3]. 单搭接接头是应用最广泛的形式之一,文中以单搭接压印接头为研究对象.

目前对于压印连接的研究主要集中在连接过程的工艺参数和静强度方面^[4-7],对于疲劳性能的研究相对较少. Mori 等人^[8]通过对自冲铆、压印连接和点焊连接三种连接形式的疲劳研究证明压印连接有较好的疲劳性能;Carboni 等人^[9]分析了两颗铆钉纵向横向排列时的疲劳性能和残余应力,并从微观方面证明压印接头有较好的疲劳性能;刘福龙等人^[10]运用了金相观测等手段检测了热处理前与热处理后接头的组织硬度变化,并研究了局部热处理对 SPCC 冷轧钢压印接头组织及静力学性能的影响. 许竞楠等人^[11]分析了有铆自冲铆接和压印连接

的工艺特点,对比了两种不同连接方式的接头抗拉伸—抗剪强度,利用金相检测对接头机械自锁区材料的组织及流向进行观测. 目前压印连接的研究对象多为钢、铝和铜等工业应用较为广泛的金属,对于钛合金的研究较少,文中将以钛合金为对象进行压印连接试验,并对部分连接好的试件进行退火处理,检测处理前后两种接头的静力学性能,并在此基础上探究热处理对钛合金压印接头疲劳性能的影响.

1 压印连接试验

试验材料为钛合金(TA1)板材,力学性能参数如表 1 所示,试验过程发现钛合金硬度较大,且试验结果证明钛合金进行压印连接时形成的颈部厚度和镶嵌量不理想,因此使用丁烷焰对搭接部分加热到 700 ℃再进行压印连接.

表 1 TA1 力学性能参数
Table 1 Mechanical property of TA1

抗拉强度	屈服强度	弹性模量	断后伸长率	密度
R_m/MPa	R_{eL}/MPa	E/GPa	$A(\%)$	g/cm^3
430.5	396.8	98.5	33	4.51

被连接板材尺寸为 110 mm×20 mm×1.5 mm,搭接长度为 20 mm,压印连接件尺寸示意图如图 1 所示. 试验使用 RIVCLINCH 1106 P50 压印连接设备对钛合金接头进行压印连接,上下模具编号分别为 SR5707 和 SR60314,连接过程工作压力均设定为 0.6 MPa,在此基础上制备试件用于后续试验.

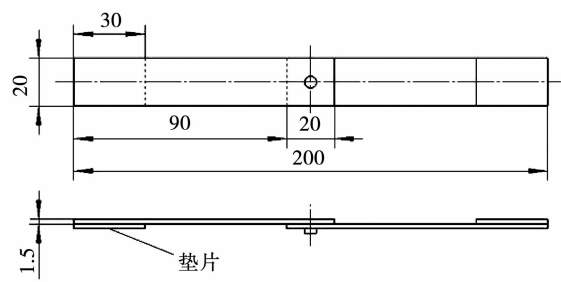


图 1 压印连接试样尺寸 (mm)

Fig. 1 Schematic diagram of clinched joint

2 热处理和静力学试验

将制备好的两组试件一组不做任何处理,命名为 CT 组,另一组进行整体退火处理,命名为 ACT 组. 退火试验在 RX3-30-9 型工业电炉上进行,退火工艺为:退火时试件随炉升温至 540 ℃,保温 1 h,空气冷却至室温^[12].

压印连接试件的静力学拉伸试验在 MTS Landmark100 试验机上进行,拉伸速率为 5 mm/min. 单搭接试件直接夹持会在接头上产生较大的弯矩,为尽量保证试验的精确度,试件受测时,在两端装夹相应厚度的垫片,试样尺寸如图 1 所示.

两种压印接头静强度试验获得的载荷-位移曲线如图 2 所示. 由图 2 可以看出,未经处理过的钛合金压印接头 CT 载荷均值为 4 363.64 N,失效位移均值为 1.48 mm;退火处理后的钛合金压印接头 ACT 载荷均值为 3 879.74 N,失效位移均值为 1.85 mm. 经过退火处理的钛合金压印接头失效载荷降低了 10.4%,变形位移比未处理的接头增加了 25%.

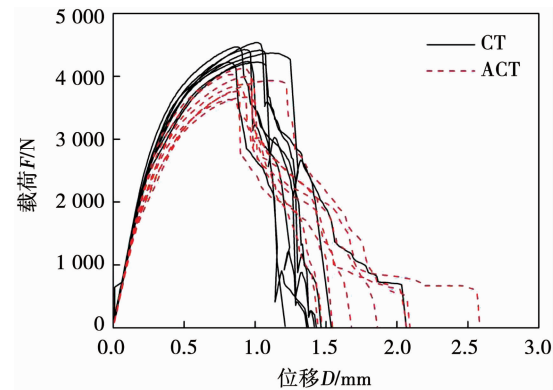


图 2 载荷-位移曲线

Fig. 2 Load-displacement curves

试验结果也显示两种接头均为上板颈部断裂失效,即试件受拉剪力作用时,上板金属流动在下板中

形成的颈状部位在逐渐增大的拉伸力的作用下被撕裂,上下板分离而导致拉伸-剪切过程结束. 且 ACT 组试件断口有被拉长的趋势,结合图 2 分析可知,CT 组试件载荷-位移曲线达到峰值后迅速降低为零,说明试件发生局部瞬间断裂. ACT 组试件载荷-位移曲线达到峰值后下降较为缓慢,且断口被拉伸的变形程度更高,初步判断试件经过退火处理后材料塑性有所提高,导致变形程度较高.

3 疲劳分析

3.1 疲劳试验

疲劳试验同样在 MTS landmark 疲劳试验机上进行. 为防止疲劳加载时薄板发生弯曲,加载的应力比为 $R = 0.1$,加载频率选用 $f = 20 \text{ Hz}$,选用正弦波进行拉-拉加载. 受测的压印连接件分离、出现明显裂纹或者循环周次达到循环基数 200 万次时,认为试件失效,试验停止. 以静强度为基础选取疲劳测试的载荷水平对试件进行疲劳测试,分别在短寿命区、中等寿命区和长寿命区进行试验. 经试验后确定:CT 组接头在平均静强度的 60%,50%,46% 三个应力水平下进行疲劳测试,每个应力水平做三个试件;ACT 组接头在在平均静强度的 60%,45%,33% 三个应力水平下进行疲劳测试,每个应力水平做三个试件. 得到的试验结果数据统计如表 2 所示.

表 2 压印接头疲劳寿命结果

Table 2 Fatigue life of TA1 clinched joints

组号	载荷水平 F/kN	疲劳寿命 N (周次)	疲劳失效 形式
CT	2.618	99 629,220 378,98 906	I, I, II
	2.182	459 748,695 827,770 643	II, II, II
	2.007	1 236 903,813 166,771 261	III, II, III
ACT	2.328	48 040,100 807,60 892	I, I, I
	2.182	304 386,366 751,414 893	II, II, II
	2.007	1 124 511,2 000 000,2 000 000	II, IV, IV

两种接头疲劳失效形式如下:应力水平较高时,两种接头失效形式均为上板颈部断裂且上板靠近压印点的位置出现纺锤形状裂口,定义为失效模式 (I);应力水平中等时,两种接头均为上板颈部断裂且上板在压印点处大部分断裂定义为失效模式 (II);应力水平较低时,CF 接头上板在压印点处断裂,颈部大部分断裂,定义为失效模式 (III);ACF 接头为达到 200 万次人为停止,试件基本未损伤,定义为失效模式 (IV).

3.2 疲劳寿命曲线和失效模式

根据试验数据和采用最小二乘法获得双对数坐标下接头最小二乘直线,并对数据进行拟合,获得测试数据及其拟合直线所组成的最大疲劳载荷-寿命 F-N 曲线,如图 3 所示,其代表了存活率为 50% 时循环次数与疲劳载荷的关系,能够真实地反映压印接头的疲劳寿命特性. 根据软件所得的最小二乘直线获得钛合金压印接头和退火处理后压印接头的中等寿命区域二参数幂函数 F-N 曲线方程分别为

$$N_{CT} = 10^{8.862} F^{-1.42694} \tag{1}$$

$$N_{ACT} = 10^{7.9014} F^{-1.32762} \tag{2}$$

式中: N 为疲劳寿命次数; F 为载荷水平.

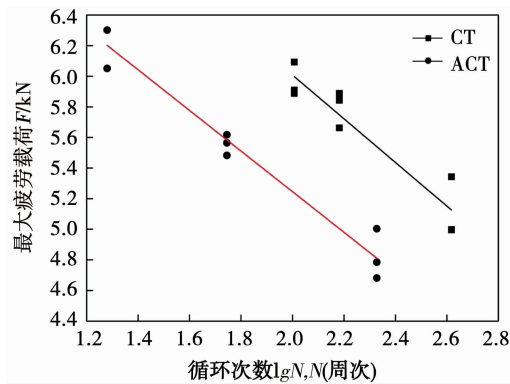


图 3 接头疲劳载荷-寿命曲线
Fig. 3 F-N curves of joints

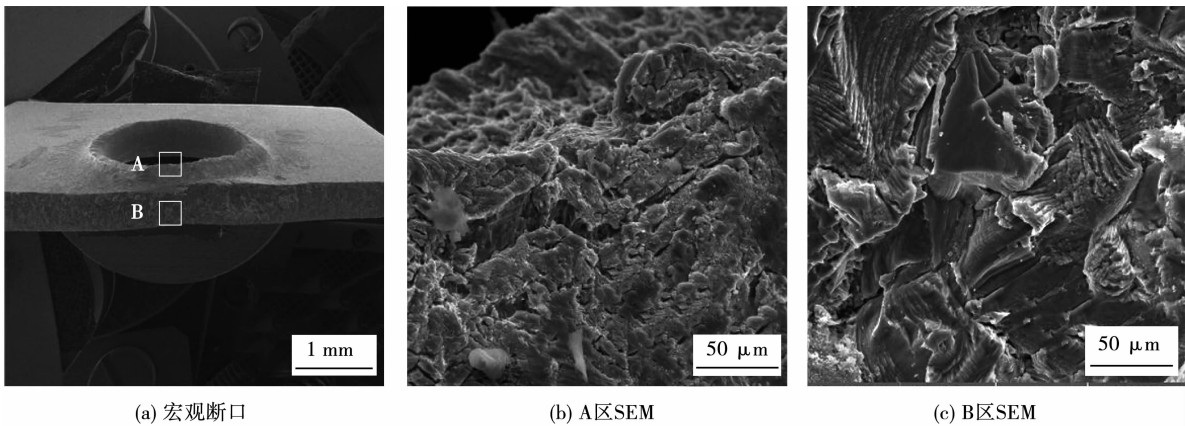


图 4 CT 接头疲劳断口 SEM 形貌
Fig. 4 SEM analysis of fatigue fracture of CT joint

分析对比图 4c 和图 5c 可知,疲劳裂纹处的断口均不同情况出现多系列分布不规则的疲劳条带,且疲劳条带方向与局部裂纹扩展方向垂直,因此断定该部位应力较为集中且存在多个疲劳源. 图 4c 中,疲劳条带间距较小,与加载应力幅较小相符,且图中显示晶体学平面以及类似解理河流花样的扇形

由图 3 可以看出随着循环次数的增加,载荷强度降低. 经计算可得未经过处理的钛合金压印接头的疲劳极限时的载荷约为 1.9 kN,退火处理后钛合金压印接头达到疲劳极限时的载何约为 1.3 kN,前者达到疲劳极限时的载荷明显优于后者,且高于后者约 68%. 分析是由于钛合金板材经过冷变形加工后,钛合金处于亚稳状态,其晶格发生畸变,内部晶格产生大量的缺陷和位错,导致钛合金内部能量升高,即存在畸变能. 而退火过程可以促使钛晶格发生点缺陷和位错运动,重新组合,并释放多余畸变能,从而提高钛合金塑性^[13]. 然而通常材料的强度与塑性呈反向变化,提高塑性、韧性的同时会导致强度的降低,这一点在静力学实验中已经有所体现,因此实际应用中要综合考虑工作条件来决定是否需要钛合金压印接头进行退火处理.

3.3 断口分析

为深入分析钛合金压印接头及退火处理后接头的疲劳失效机理,采用捷克 TESCAN 公司生产的型号为 VEGA3 SCAN 的扫描电子显微镜对断口不同位置进行扫描电镜(SEM)微观分析. 通过加工获得两种钛合金压印接头低应力加载情况下疲劳破坏裂纹所在位置的损伤表面,以及颈部断裂断口,并将两种接头对应的断口损伤表面进行比较. 钛合金压印接头疲劳失效断口如图 4 所示,退火后钛合金压印接头疲劳失效断口如图 5 所示.

瘠线及无特征断裂小平面,呈现脆性疲劳断裂特征^[14]. 相比之下,图 5c 中疲劳条带数量较少宽度较大,显示类解理穿晶断裂,表现了一定的氢脆现象,分析是由于在压印连接过程中在空气中加热板材时造成的. 通过比较颈部断裂的断口可知,退火处理后的断口(图 4b 和图 5b)中明显可见大量直径

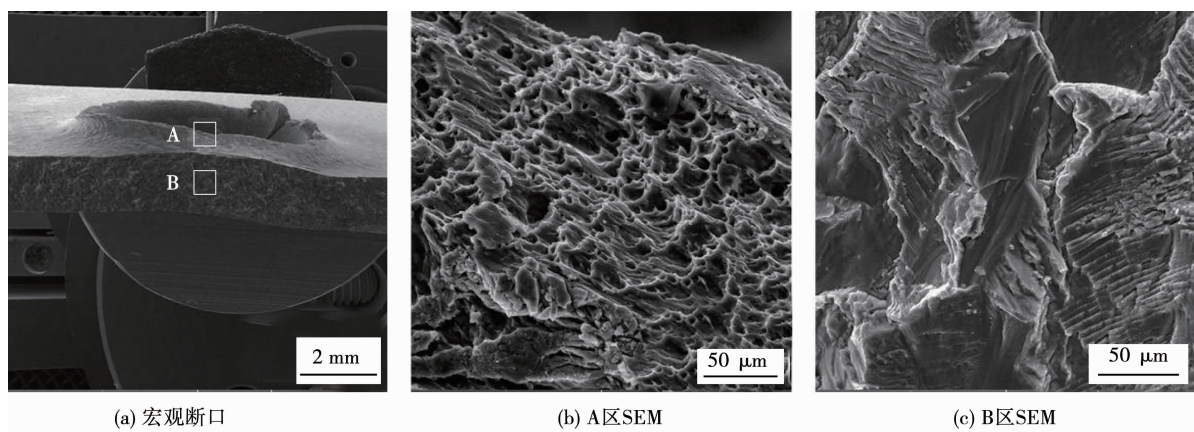


图 5 ACT 接头疲劳断口 SEM 形貌

Fig. 5 SEM analysis of fatigue fracture of ACT joint

较小的拉长韧窝,且韧窝大小较为均匀,说明塑性变形时较为稳定。这一现象也与前文中(3.2 节)所说的退火处理后试件塑性增强这一结论相一致。

4 结 论

(1) 压印连接可以实现钛合金板材的有效连接,未处理的钛合金压印接头静拉伸最大载荷均值为 4 363.64 N,退火处理后钛合金压印试件位移均值有所提高。

(2) 未经过处理的钛合金压印接头的疲劳强度约为 1.9 kN,退火处理的钛合金压印接头的疲劳强度约为 1.3 kN,前者的疲劳强度高于后者约 68%,即钛合金压印接头疲劳性能明显优于后者。

(3) 两种接头的疲劳裂纹总是在压印点偏上的部位出现,SEM 分析显示该部位应力较为集中且存在多个疲劳源,两种断口的疲劳源呈现脆性疲劳断裂特征,退火处理后的钛合金压印接头颈部断裂断口出现韧窝特征,为塑性断裂。

参考文献:

- [1] 许天才,彭晓东,姜军伟,等. 钛合金连接异种材料新技术的研究应用[J]. 稀有金属, 2014, 38(4): 711-719.
Xu Tiancai, Peng Xiaodong, Jiang Junwei, *et al.* Progress in welding of titanium alloy and dissimilar materials[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2014, 38(4): 711-719.
- [2] 陶春虎,刘庆琰,刘昌魁,等. 航空用钛合金的失效及其预防[M]. 国防工业出版社, 2013.
- [3] He X C, Gu F S, Ball A. Fatigue behavior of fastening joints of sheet materials and finite element analysis[C]//American Los Angeles. International Conference on Solid State and Materials 2012.
- [4] Mucha J. The analysis of lock forming mechanism in the clinching joint[J]. Materials and Design, 2011, 32(10): 4943-4954.

- [5] Lee C J, Kim J Y, Lee S K, *et al.* Design of mechanical clinching tools for joining of aluminium alloy sheets[J]. Materials and Design, 2010, 31: 1854-1861.
- [6] Varis J P. The suitability for round clinching tools for high-strength structural steel[J]. Thin-Walled Structures, 2002, 40(3): 225-238.
- [7] Varis J P. The suitability of clinching as a joining method for high-strength structural steel[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 132(1-3): 242-249.
- [8] Mori K, Abe Y, Kato T. Mechanism of superiority of fatigue strength for aluminum alloy sheets joined by mechanical clinching and self-pierce riveting[J]. Journal of materials processing technology, 2012, 212: 1900-1905.
- [9] Carboni M, Beretta S, Monno M. Fatigue behavior of tensile-shear loaded clinched joints[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2006, 73: 178-190.
- [10] 刘福龙,何晓聪,曾 凯,等. 局部热处理对 SPCC 冷轧钢压印接头组织及静力学性能的影响[J]. 焊接学报, 2015, 36(10): 41-43, 48.
Liu Fulong, He Xiacong, Zeng Kai, *et al.* Effect of local heat treatment on microstructure and statics properties of clinched joints for SPCC steel[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2015, 36(10): 41-43, 48.
- [11] 许竞楠,何晓聪,曾 凯,等. 自冲铆接头组织及性能分析[J]. 焊接学报, 2014, 35(7): 91-95.
Xu Jingnan, He xiacong, Zeng Kai, *et al.* Effect of the technology characteristics of self-piercing riveting[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2014, 35(7): 91-95.
- [12] 樊新民. 热处理工实用技术手册(第 2 版)[M]. 江苏科学技术出版社, 2009.
- [13] 张 翥,王群娇,莫 畏. 钛的金属学和热处理[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2009.
- [14] 钟群鹏,赵子华. 断口学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.

作者简介: 张 越,女,1990 年出生,博士研究生. 主要从事薄板材料连接新技术方面的研究. 发表论文 6 篇. Email: zhangyue2009@126.com

通讯作者: 何晓聪,男,教授. Email: xiacong_he@126.com