

焊点形状对 TC4 钛合金激光点焊力学性能的影响

吕涛¹ 雷正龙¹ 陈彦宾¹ 李颖¹ 胡佩佩²

(¹ 哈尔滨工业大学先进焊接与连接国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)
² 上海航天精密机械研究所, 上海 201600)

摘要 设计了四种不同形状的焊点并进行 TC4 钛合金搭接接头激光非穿透焊工艺试验。研究了不同焊点的抗剪性能差异, 分析了典型焊点的断裂行为及其原因。结果表明, 焊点的抗剪载荷与熔合面面积有关; 双排断续焊点在同等的熔合面面积下具有最大的抗剪载荷; 焊点的断裂方式有界面断裂和横截面断裂两种; 相对于双排断续焊点, C 形焊点焊后残余应力的存在使得端点处应力集中进而降低了接头静载性能。

关键词 激光技术; TC4 钛合金; 激光非穿透点焊; 抗剪性能

中图分类号 TG456.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.1203002

Influence of Different Shapes on the Mechanical Properties of Laser Spot Weld of TC4 Titanium Alloy

Lv Tao¹ Lei Zhenglong¹ Chen Yanbin¹ Li Ying¹ Hu Peipei²

(¹ State Key Laboratory of Advanced Welding and Joining, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)
² Shanghai Spaceflight Precision Mechanism Institute, Shanghai 201600, China)

Abstract Four different shapes of weld are designed to execute the experiment of non-penetration welding of TC4 titanium alloy. Shear performance and fracture behavior of different welds are mainly researched. The shear performance has a relationship with the area of fusion surface. The double row of stitch weld has the highest shear performance. The weld will depart from the interface or break along the cross-section at the endpoints. The existence of the residual stress leads the stress concentrating at the endpoints and subsequently descends the static performance of C weld with respect to double row of stitch weld.

Key words laser technique; TC4 titanium alloy; non-penetration laser spot welding; shear performance

OCIS codes 140.3390; 350.3390; 160.3900

1 引言

目前对于 TC4 钛合金薄板非主承载构件的连接, 常规方法是采用电阻点焊工艺。电阻点焊具有产品定型后生产效率高, 易于实现机械化与自动化等优点。但是随着产品更新换代速度的加快, 电阻点焊灵活性较差等不足也日益突显。激光点焊作为一种新型的焊接技术, 具有高效灵活以及能够减轻构件重量等特点, 在薄板连接上表现出较大优势^[1-3]。

目前国内外对激光点焊的研究主要集中于焊接缺陷、工艺优化以及焊点质量预测等方面, 焊点力学性能方面的研究并不多。Masoumi 等^[4]利用田口法分析激光点焊工艺参数对接头质量的影响, 认为脉冲时间是影响焊点质量最主要的因素, 焊点撕裂是一种理想的韧性断裂模式, 接头承载能力也更高。Chang 等^[5]研究 NdFeB 永磁体与不锈钢激光点焊, 指出剪切试验的三种断裂模式: 焊核拔出型、界面断裂型以及母材断裂型, 认为冶金缺陷是焊核拔出型

收稿日期: 2013-05-17; 收到修改稿日期: 2013-07-31

基金项目: 国家自然科学基金(51105105)

作者简介: 吕涛(1988—), 男, 硕士研究生, 主要从事激光焊数值模拟方面的研究。E-mail: lvtaohit@126.com

导师简介: 雷正龙(1977—), 男, 副教授, 硕士生导师, 主要从事激光-电弧复合焊接基础与应用、激光焊接质量检测与控制、特种材料激光焊接。E-mail: leizhenglong@hit.edu.cn(通信联系人)

断裂的主要原因,其余两种断裂的主要影响因素是焊核及母材自身强度。Daneshpour 等^[6-7]在研究先进高强度钢激光点焊时,将焊点的形状由单个点变化成具有较小直径的环焊缝,通过试验与数值模拟得出激光点焊焊点的疲劳性能不低于电阻点焊,激光焊点周围存在更大的压应力区可延迟裂纹扩展提高承载力。Torkamany 等^[8]也提出相类似的激光环形焊点概念,认为提高激光功率可提高接头的承载能力。

本文将对激光点焊焊点形状进行重新设计,比较不同形状焊点力学性能,从断口特征等方面对其断裂行为和原因进行研究,并通过有限元方法分析

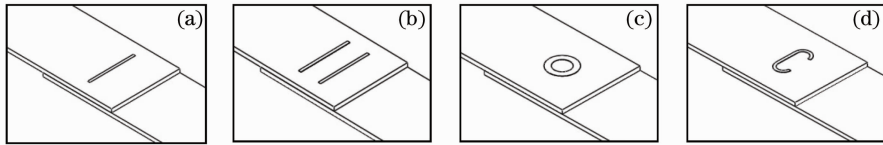


图1 不同形状焊点。(a)单排断续焊;(b)双排断续焊;(c)环形焊;(d)C形焊

Fig. 1 Four kinds of different shapes of weld spot. (a) Single row of stitch weld; (b) double row of stitch weld; (c) ring weld; (d) C weld

所设计的焊接及力学性能测试方法,采用薄板搭接非穿透焊形式,单个试片尺寸为 120 mm × 120 mm × 1.5 mm,搭接量为 30 mm,相邻焊点间距为 40 mm,如图 2 所示。焊后将 120 mm 试片等距切成 30 mm 宽的剪切试件。

试验采用的激光加工系统包括德国 IPG 公司 YLS-10000 光纤激光器,其波长为 1.07 μm,最大输出

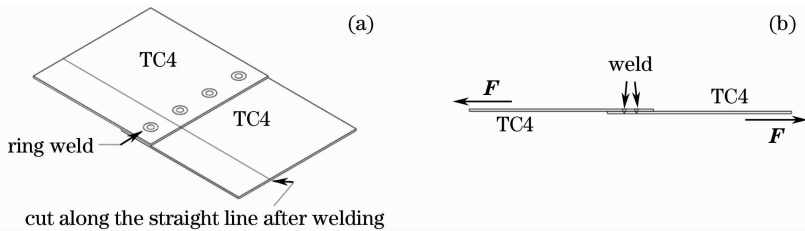


图2 (a)焊接和(b)剪切试验试件

Fig. 2 Specimens of (a) welding and (b) shear testing

3 试验结果与分析

3.1 不同形状焊点抗剪载荷比较

为了比较不同形状焊点的抗剪性能,对 TC4 钛合金薄板进行了搭接接头非穿透焊接工艺试验,图 3 是在激光功率 P 为 900 W,离焦量 Δf 为 -5 mm,焊接速度 v 为 1 m/min 情况下焊接所得到焊点的焊缝成形。对比表面成形发现焊点表面光滑无飞溅,背部有一定的氧化,可以保证适当的熔深。

焊接残余应力对接头静载力学性能的影响。

2 试验材料及方法

试验材料为厚度为 1.5 mm 的 TC4 钛合金轧制板材,屈服强度为 1006 MPa,抗拉强度为 1083 MPa,延伸率为 13.36%。试验设计了 4 种形状焊点,如图 1 所示,分别为单排断续焊点、双排断续焊点、环形焊点和 C 形焊点。其中单排断续焊点长 20 mm;双排断续焊点排间距 8 mm;环形焊点直径 D 有 4、6、8、10 mm 四种尺寸;C 形焊点圆弧直径 $D=8$ mm,圆心距 10 mm。

功率为 10 kW,焦距为 200 mm,最小光斑直径为 0.36 mm;德国 KUKA 公司的 KR16 机器人。焊前使用酸洗液[体积比 $V(\text{HF}):V(\text{HNO}_3):V(\text{H}_2\text{O})=3:30:67$]除去试件表面的氧化膜,冲洗吹干后放置于烘干箱干燥。正面采用气体压力 0.15~0.2 MPa 的纯度为 99.99% 的氩气保护,背部不加气体保护。

图 4 为不同离焦量下的焊点抗剪性能比较。发现在较大工艺参数范围内,双排断续焊点和 C 形焊点均具有较高的抗剪载荷,最大载荷分别能达到 24.7 kN 和 21.5 kN;相比之下,单排断续焊点和环形焊点所能承受的抗剪载荷较小;此外,对焊缝长度为单排断续焊点 2 倍的双排断续焊点,其抗剪载荷也几乎是单排断续焊点的 2 倍,这表明抗剪载荷与焊缝的长度有联系。

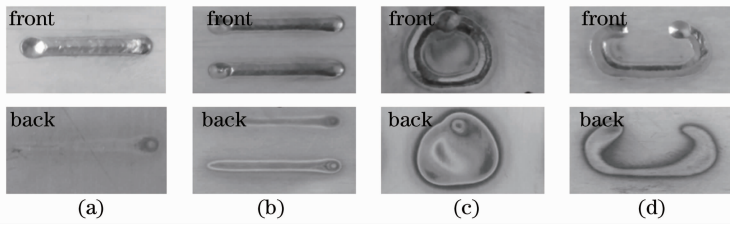


图 3 焊点表面成形。(a) 单排断续焊;(b) 双排断续焊;(c) 环形焊;(d) C 形焊

Fig. 3 Morphology of laser weld spot. (a) Single row of stitch weld; (b) double row of stitch weld (c) ring weld; (d) C weld

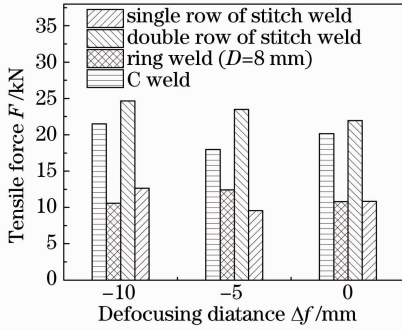


图 4 几种点焊方式抗剪载荷比较

Fig. 4 Comparison of shear loads between several kinds of laser weld spots

文献[9]提到焊点的抗剪性能还与熔合面宽度有关。认为焊点的抗剪载荷应该是熔合面宽度与焊点的几何长度综合作用的结果,即与熔合面面积 s 有关。图 5 显示,对于任意一种焊点,接头所能承受的抗剪载荷均随着熔合面面积的增加而增加,在熔合面面积较小的区间内,这种增加的趋势更加明显。与此同时,比较不同形状焊点之间抗剪载荷,发现随着熔合面面积增加,即使拥有相同熔合面面积,焊点的抗剪载荷也存在一些差异。C 形焊点和环形焊点分别比同尺寸的双排断续焊点抗剪载荷下降 7%~10%以及 41%~56%。双排断续焊点在相同熔合面面积下拥有最高的抗剪性能。

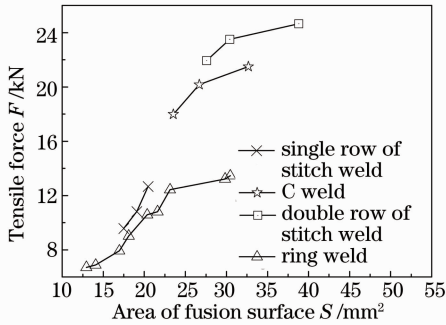


图 5 抗剪载荷与熔合面面积之间的关系

Fig. 5 Relationship between shear loads and the area of fusion surface

3.2 焊点断裂行为

与抗剪性能差异相对应,焊点的断裂方式也存在差别,如图 6 所示。双排与单排断续焊点断裂时上下两板完全分开,沿着熔合面上的焊缝拉断,发生“界面断裂”;C 形焊点与直径较大的环形焊点断裂时,沿着焊点端部开裂,进而扩展到母材将母材完全拉断,发生“横截面断裂”,端点所在断裂面垂直于拉伸力方向,而母材断裂面与拉伸力方向呈 45°角。

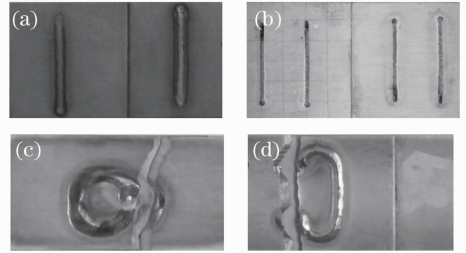


图 6 焊点断裂方式。(a) 单排断续焊;(b) 双排断续焊;(c) 环形焊(D=10 mm); (d) C 形焊

Fig. 6 Failure modes of spot weld. (a) Single row of stitch weld; (b) double row of stitch weld; (c) ring weld (D=10 mm); (d) C weld

为了明确两种断裂的断裂机制,对典型的双排断续焊点和 C 形焊点进行了断口扫描。双排断续焊点断口微观界面上[图 7(b)]存在着沿载荷方向被拉长的大变形韧窝,证明断口承受的是剪切应力;C 形焊点端点处[图 8(a)],断口宏观呈暗灰色,表面凹凸不平但整体垂直于拉伸力方向,微观界面上[图 8(b)]分布着较深的微孔。

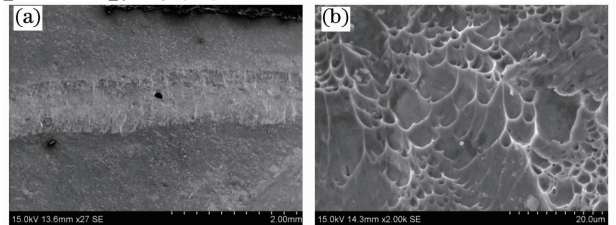


图 7 双排断续焊点断口的(a)宏观形貌和(b)微观形貌

Fig. 7 (a) Macro-morphology and (b) micro-morphology of double row of stitch weld

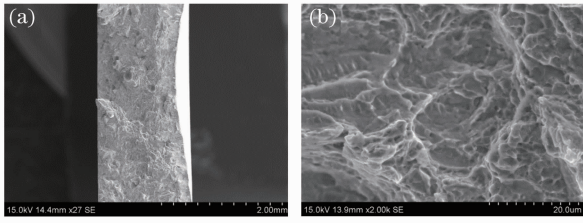


图 8 C 形焊点端点处断口的(a)宏观形貌与(b)微观形貌
Fig. 8 (a) Macro-morphology and (b) micro-morphology at the endpoints of C weld fracture

两种断裂方式的不同之处在于双排断续焊点完全是在剪切应力作用下发生的断裂;C 形焊点由于形状改变,虽然焊点总体承受的是抗剪载荷,但是端点处塑性变形受到限制,端点处的正应力优先达到材料最终断裂强度,焊点在此处断裂,并扩展到母材,从而形成横截面断裂,断裂的驱动力应该是拉伸应力。

3.3 焊接残余应力对接头抗剪性能的影响

一般认为材料如果具有足够的塑形,能进行塑性变形,焊接残余应力对静载强度没有影响,但是如果塑性材料呈现脆性状态,残余应力的存在会降低其静载能力。材料呈现脆性状态往往又是由于结构几何不连续以及应力集中造成。

利用 MSC. MARC 有限元软件建立双排断续焊点和 C 形焊点在焊接和拉伸过程中的有限元模型,比较典型焊点焊接残余应力对接头断裂行为的影响。采用双椭圆+高斯圆柱热源复合热源模型,计算时材料的热物理参数随温度变化参量如弹性模量 E 、屈服强度 R_{cl} 、热导率 λ 、热膨胀系数 α 以及比热容 C 参考文献[10];工件与空气及夹具热交换系数利用 Goldak 经验公式,得到综合表面换热系数 α :

$$\alpha = 24.1 \times 10^{-4} \epsilon T^{1.61} (\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}), \quad (1)$$

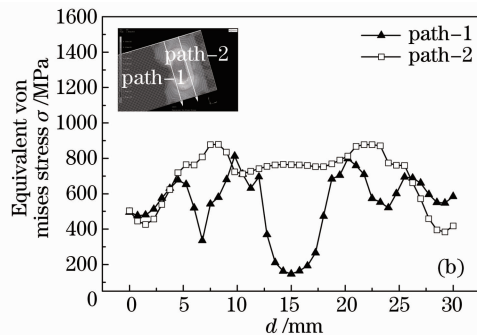
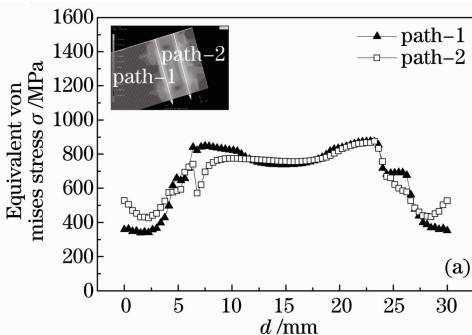


图 10 焊后残余应力分布曲线。(a) 双排断续焊点和(b) C 形焊点

Fig. 10 Residual stress distribution curves of (a) double row of stitch weld and (b) C weld

对整个焊点施加拉伸载荷(图 11)以后发现双排断续焊点两端会率先屈服并扩展到整个焊点,焊

式中 ϵ 为辐射率,针对 TC4 钛合金, $\epsilon = 0.35$; 由于焊接间隙的存在,定义缝隙上的接触,并近似认为 TC4 钛合金接触换热系数为 $4 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{K})$ [11]。采用小孔法对 C 型焊点背面焊点附近的残余应力进行测量以验证残余应力结果的准确性。图 9 为试板下表面残余应力计算值与实测值的比较曲线。曲线显示纵向残余应力与下板边缘距离 d 的变化关系,试验结果表明,模拟值与实测值吻合良好,但是应力较大的焊缝周围两者之间有一些偏差。这主要是由于焊点周围高应力区相对较窄,而小孔法测得的残余应力是一定尺寸范围内的平均值,无法表现出某个点的具体应力状态。

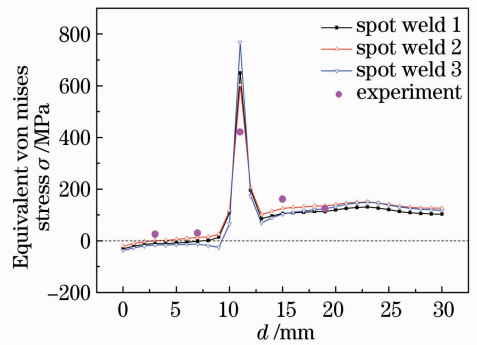


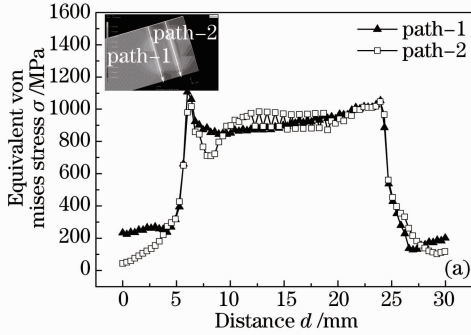
图 9 残余应力实测值与计算值比较

Fig. 9 Comparison between experimentation and simulation of residual stress

应力场计算服从 Von-Mises 屈服条件即受力物体内一点的等效力达到屈服极限时,该点就进入塑性状态。由于断裂发生在界面或试件上板处,所以重点关注上板与下板连接处的应力变化。比较焊点焊后残余应力分布如图 10 所示。可以看出形状的变化使得 C 形焊点内部区域残余拉应力值减小形成“凹坑”,C 形焊点端点处应力集中明显。

点会在切应力作用下断裂;沿着端点连线方向上,C 形焊点端点处首先达到屈服极限,由于结构几何不

连续,端点处的塑性变形受到周围母材的约束,使得材料呈现脆性状态,当应力峰值达到材料的抗拉强度后端点处会优先断裂,随后裂纹扩展到母材,使得整个接头断裂,从而印证了断口扫描特征。所以对



于 C 形焊点来说,焊接残余应力的存在造成端部应力集中,加上自身结构几何不连续使得端点处塑性变形能力不足,进而降低了 C 形焊点的承载能力。

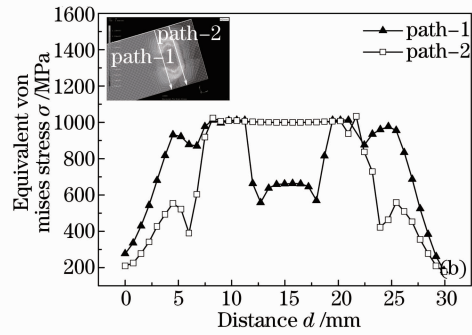


图 11 考虑焊接残余应力拉伸过程中 60 s 时刻等效应力分布曲线。(a) 双排断续焊点;(b) C 形焊点

Fig. 11 Equivalent von mises stress distribution curves of (a) double row of stitch weld and (b) C weld at the first 60 s

4 结 论

通过比较不同形状焊点的抗剪性能,发现焊点的抗剪载荷与熔合面面积有关,且随着熔合面面积的增加而增加。焊点形状的变化会影响其抗剪性能,C 形焊点和环形焊点会比具有相同熔合面面积的双排断续焊点抗剪载荷下降 7%~10% 以及 41%~56%。单排、双排断续焊点断裂方式为界面断裂,C 形焊点和直径较大的环形焊点断裂方式为横截面断裂。由于 C 形焊点自身几何形状的特点,焊点端点处焊接残余应力的存在造成了端部应力集中使得材料呈现脆性状态,降低了接头的抗剪性能。

参 考 文 献

- Zhang Jian, Yang Rui. Control of laser power during titanium alloy thin plate welding[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(1): 0103003.
- 张健,杨锐. 激光焊接钛合金薄板时的功率控制[J]. 中国激光, 2012, 39(1): 0103003.
- Y S Yang, S H Lee. A study on the joining strength of laser spot welding for automotive applications[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1999, 94(2-3): 151-156.
- N Siva Shanmugam, G Buvanashakaran, K Sankaranarayanan. Some studies on weld bead geometries for laser spot welding process using finite element analysis[J]. Materials and Design, 2012, 34: 412-426.
- M Masoumi, S P H Marashi, M Pouranvari, et al.. Assessment of the effect of laser spot welding parameters on the joint quality

using taguchi method[C]. Proceedings of 18th International Conference on Metallurgy and Materials, Hradec Nad Moravici, 2009.

- Baohua Chang, Shaojun Bai, Dong Du, et al.. Studies on the micro-laser spot welding of an NdFeB permanent magnet with a low carbon steel[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2010, 210(6-7): 885-891.
- S Daneshpour, S Riekehr, M Kocak, et al.. Mechanical and fatigue behavior of laser and resistance spot welds in advanced high strength steels[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2009, 14(1): 20-25.
- P Martinson, S Daneshpour, M Kocak, et al.. Residual stress analysis of laser spot welding of steel sheets[J]. Materials and Design, 2009, 30(9): 3351-3359.
- M J Torkamany, J Sabbaghzadeh, M J Hamedi. Effect of laser welding mode on the microstructure and mechanical performance of dissimilar laser spot welds between low carbon and austenitic stainless steels[J]. Materials and Design, 2012, 34: 666-672.
- Mei Lifang, Yi Jiming, Yan Dongbing. Comparative study on CO₂ laser overlap welding and resistance spot welding for galvanized steel[J]. Materials and Design, 2012, 40: 433-442.
- Peng Shande. Experiment and Numerical Simulation of Laser Welding for Titanium Alloy Lap-Joint[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2006. 35-38.
- 彭善德. 钛合金激光搭接焊及数值模拟[D]. 武汉: 华中科技大学, 2006. 35-38.
- Wang Yu, Liu Yuli, Yang He. Influence of friction on stress and temperature fields of die in TC4 blade forging process[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(1): 452-456.
- 汪宇,刘郁丽,杨合. TC4 叶片精锻过程中摩擦对模具应力及温度场的影响[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(1): 452-456.

栏目编辑:宋梅梅