

多铆钉自冲铆试件的力学性能和失效形式

张奥^{1,2}, 肖钢¹, 赵伦¹, 李激光², 叶凯¹, 张昊含³, 张兰¹, 卢杰豪^{1,2}

(1. 深圳职业技术大学 超声技术研究所, 广东 深圳 518055; 2. 辽宁科技大学 材料与冶金学院, 辽宁 鞍山 114051;
3. 云南开放大学 机电工程学院, 云南 昆明 650599)

摘要: 为探究铆钉数量及排布对 AA5052 铝合金自冲铆试件力学性能和失效形式的影响, 制备 9 种铆钉数量和 2 种不同铆钉排布共 15 组自冲铆试件。通过拉伸-剪切试验得到试件的峰值载荷和能量吸收值, 并进行对比, 分析试件的力学性能; 分析试件的宏观失效形式, 并采用扫描电子显微镜对断口进行观察, 分析其失效机理。结果表明: 铆钉数量会影响试件的力学性能和失效形式, 铆钉排布仅影响试件的力学性能。试件的峰值载荷和能量吸收值随铆钉数量的增大先增大后减小; 铆钉数量相同时, 铆钉纵向排布的试件可以获得更好的力学性能。铆钉数量 <6 时, 试件的失效形式为铆钉拔出, 越靠近板材的边缘, 铆钉对板材的破坏程度越大; 铆钉数量 ≥ 6 时, 试件的失效形式为板材断裂并且断口处有大量韧窝, 越靠近铆钉, 韧窝越浅且越小。

关键词: 自冲铆接; 铆钉数量; 铆钉排布; 峰值载荷; 能量吸收值; 失效形式

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.08.019

中图分类号: TH131.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2024) 08-0132-06

Mechanical properties and failure modes on SPR specimens with multiple rivets

Zhang Ao^{1,2}, Xiao Gang¹, Zhao Lun¹, Li Jiguang², Ye Kai¹, Zhang Haohan³, Zhang Lan¹, Lu Jiehao^{1,2}

(1. Institute of Ultrasonic Technology, Shenzhen Polytechnic University, Shenzhen 518055, China;
2. Faculty of Materials and Metallurgy, University of Science and Technology Liaoning, Anshan 114051, China;
3. Mechanical and Electrical Engineering Faculty, Yunnan Open University, Kunming 650599, China)

Abstract: To investigate the influence of rivet quantity and arrangement on the mechanical properties and failure modes of AA5052 aluminum alloy self-piercing riveting (SPR) specimens, fifteen sets of SPR specimens with nine types of rivet quantity and two types of rivet arrangements were prepared. The mechanical properties of the specimens were analyzed by comparing the peak load and energy absorption values of the specimens obtained from the tensile and shear experiment. Then, the macroscopic failure mode of the specimens were analyzed, and the fracture was observed by SEM to research the failure mechanism of the specimens. The results show that the rivet quantity affects both the mechanical properties and failure mode of the specimens, while the rivet arrangement only affects the mechanical properties of the specimen. The peak load and energy absorption values of the specimens increase first and then decrease with the increasing of the rivet quantity. When the rivet quantity is same, the specimen with rivet longitudinal arrangement can achieve better mechanical properties. When the rivet quantity is less than six, the failure mode of the specimen is rivet pulling out, and the closer it is to the edge of the sheet, the greater the damage of the rivet to the sheet. When the rivet quantity is equal to or greater than six, the failure mode of the specimen is fracture of sheet with a large number of ductile dimples at the fracture, and the closer to the rivets, the shallower and smaller the ductile dimples.

Key words: self-piercing riveting; rivet quantity; rivet arrangement; peak load; energy absorption value; failure mode

近年来新能源汽车飞速发展, 却一直受困于续航问题, 使用铝、镁等轻金属代替传统钢材的轻量化技术是解决续航问题最有效的方式, 但这些金属由于其自身的物理、化学性能而不适合采用焊接

等传统连接手段^[1-3]。自冲铆接 (Self-piercing Rivet, SPR) 作为一种快速高效的机械冷成形工艺, 相较于传统连接手段, 它不仅可以有效地连接这些材料, 还具有绿色环保和成本低廉等优点, 使其在汽车、航空航天等工业中得到了广泛应用^[4]。

得益于 SPR 技术的优异性能, 在过去的 20 多年里, 众多研究人员广泛研究了 SPR 技术。何晓聪等^[5]研究了影响 SPR 接头成形质量的影响因素, 主要包含铆钉及模具的几何尺寸、被连接板材的厚度参数及性能参数、板材的组合情况、冲头速度、行程参数和铆钉的连接压强等工艺参数。同时, 归纳总结了影响铆接接头成形质量的因素为钉头高度、残余底厚

收稿日期: 2023-12-12; **修订日期:** 2024-03-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (12104324); 深圳职业技术大学高端人才科研启动项目 (6022310046k); 深圳大-新栋力超声波焊接技术研发中心项目 (602331009PQ); 深圳职业技术大学博士后出站后期资助项目 (4103-6023271014K1)

作者简介: 张奥 (2000-), 男, 硕士研究生

E-mail: zhangao2514@163.com

通信作者: 肖钢 (1973-), 男, 硕士, 副教授

E-mail: xiaosteel@szpu.edu.cn

和自锁值。Zhao L 等^[6]研究了基板厚度对 5052 铝合金 SPR 接头力学性能的影响，发现基板厚度和铆钉长度的提升可以有效地提升接头的成形质量和力学性能。Xing B Y 等^[7]研究了 5052 铝合金单铆钉和多铆钉 SPR 接头的力学性能，发现多铆钉 SPR 接头的静载强度和疲劳寿命明显大于单铆钉 SPR 接头，在铆钉数量相同但铆钉分布方式不同的情况下，多铆钉 SPR 接头的破坏特征不同。Yan W M 等^[8]研究了薄壁钢 SPR 试件抗剪强度的影响因素，发现试件的最大剪切荷载会随着铆钉端距、铆钉间距和铆钉数量的增大而增大，纵向（铆钉线与受力方向平行）排布铆钉可以获得更高的强度。

上述学者的研究主要集中于单颗铆钉 SPR 试件的成形质量、力学性能和失效形式，对于多颗铆钉 SPR 试件的研究较少。本文对不同铆钉数量和铆钉排布的 5052 铝合金 SPR 试件的力学性能和失效形式进行对比研究，探究铆钉数量和排布对 5052 铝合金 SPR 试件力学性能和失效形式的影响，为汽车结构轻量化研究提供数据支持。

1 试验

1.1 试验材料

采用 5052 铝合金作为板材材料，铝合金板材的尺寸为 200 mm×60 mm×2 mm（长度×宽度×厚度）。铆钉采用 Böllhoff 公司生产的硼钢 36MnB4 铆钉，铆

钉头的直径为 $\Phi 7.7$ mm，铆钉腿的直径为 $\Phi 5.3$ mm，铆钉的长度为 6 mm。在 MTS-CMT4304 微机控制电子万能试验机上通过引伸计（标距为 20 mm）测试板材和铆钉材料的力学性能，结果如表 1 所示。

表 1 板材的力学性能
Table 1 Mechanical properties of sheet

材料	杨氏模量/GPa	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%
5052 铝合金	69.45	234.18	185.26	13.78
36MnB4 硼钢	206	1595.6	1719.7	22

1.2 样品制备

试件采用深圳一浦莱斯公司生产的 EPRN-TF 型自冲铆接设备制备，对两片相同的铝合金板材进行单搭 SPR 试验。图 1 为所有试件的尺寸和排布示意图。试验中有两种不同的排布方式，即：纵向排布（L 排布）和水平排布（H 排布）。纵向排布是指铆接区域两侧部位排布的铆钉更多，且铆钉最多的铆钉线方向与拉伸力方向平行；水平排布是指铆接区域中心部位排布的铆钉更多，且铆钉最多的铆钉线方向与拉伸力方向垂直。为了探究铆钉数量和铆钉排布对试件的力学性能和失效形式的影响，制定了如表 2 所示的试验计划，其中，I 代表铆钉拔出失效，II 代表板材断裂失效。铆钉拔出失效是指在板材强度大于自锁结构强度时，铆钉在外力作用下从下板脱出；而板材断裂失效是指在板材强度小于自

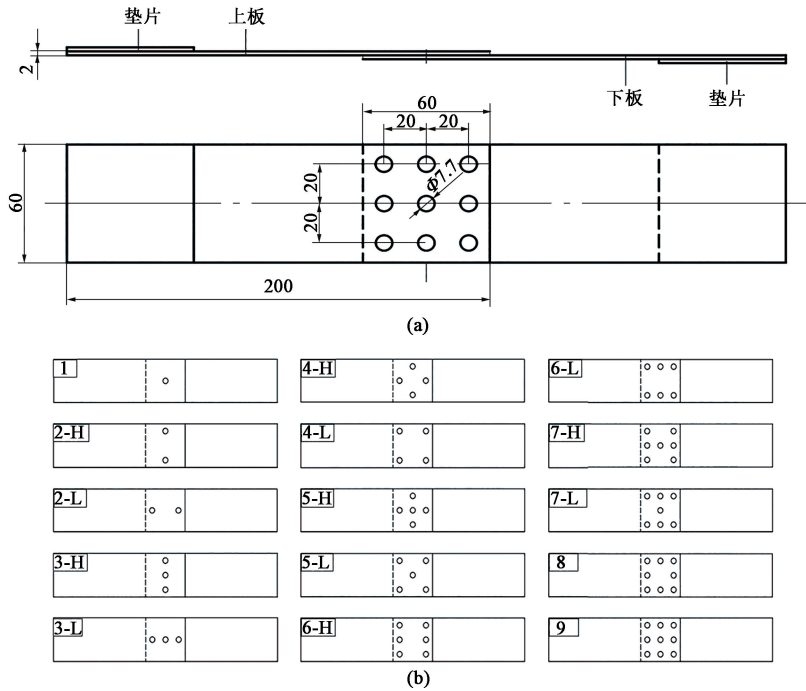


图 1 所有试件的尺寸 (a) 和排布 (b) 示意图

Fig. 1 Schematic diagrams for sizes (a) and arrangement (b) of all specimens

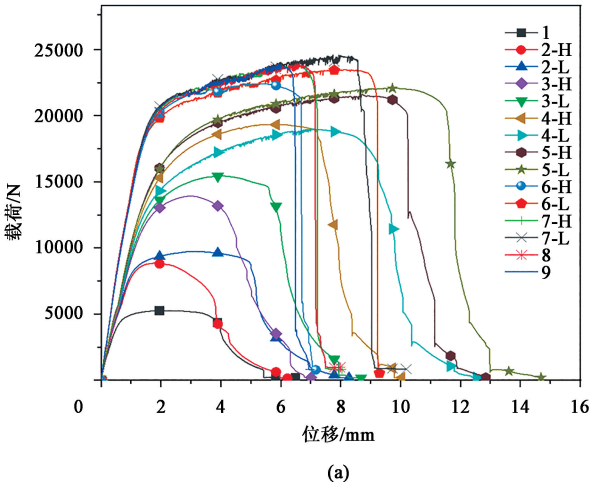
特种成形栏目由中国机械总院集团北京机电研究所有限公司赞助刊出

表 2 试验方案和结果

Table 2 Schemes and results of experiment

试件 编号	铆钉数量/ 个	铆钉 排布	峰值载荷/ N	能量吸收/ J	失效 形式	试件数量/ 个
1	1	—	5278.0	21.4	I	3
2-H	2	H	8865.4	31.6	I	3
2-L	2	L	9746.9	49.4	I	3
3-H	3	H	13929.2	60.0	I	3
3-L	3	L	15452.5	84.6	I	3
4-H	4	H	19014.0	160.2	I	3
4-L	4	L	19347.3	131.3	I	3
5-H	5	H	21600.5	197.0	I	3
5-L	5	L	22087.1	228.5	I	3
6-H	6	H	22425.5	129.4	II	3
6-L	6	L	23487.2	187.8	II	3
7-H	7	H	23850.2	145.1	II	3
7-L	7	L	24590.0	187.6	II	3
8	8	—	23969.4	144.0	II	3
9	9	—	23905.3	128.1	II	3

锁结构强度时, 板材在外力作用下发生断裂^[9]。试件 1 仅有一颗铆钉, 不存在排布问题; 试件 8、9 由于铆接区域的限制, 能够对称排布且铆钉之间不互相影响的方式也仅有一种, 因此也没有排布方式。



1.3 拉伸试验

拉伸试验在 WANCE-TSE305D 型电子万能试验机上进行。试验过程中, 下夹具固定不动, 上夹具以 $5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 的恒定位移速率向上运动, 直至试件发生失效^[10]。为了消除拉伸过程中试件两端出现受力不对中而导致附加扭矩的问题, 拉伸时在试样两端的夹紧区增加了一个垫片, 垫片的尺寸为 $60 \text{ mm} \times 60 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 。为保证试验结果的准确性和稳定性, 取与平均值最接近的一组数据作为结果。通过拉伸剪切试验得到所有试件的载荷-位移曲线和失效图, 结果如表 2 和图 2 所示。

2 结果分析

2.1 力学性能

试件的载荷-位移曲线分为 3 个阶段: 弹性阶段 (曲线线性上升)、塑性阶段 (曲线非线性上升)、快速失效阶段 (曲线快速下降)。由图 2a 可以看到, 铆钉数量越大, 试件的载荷-位移曲线弹性阶段的斜率越大。这说明铆钉数量越大, 试件抵抗弹性变形的能力越强。铆钉数量较小时, 板材的强度远大于自锁结构的强度, 试件的受力主体为板材, 试件抵抗弹性变形的能力由板材决定。铆钉数

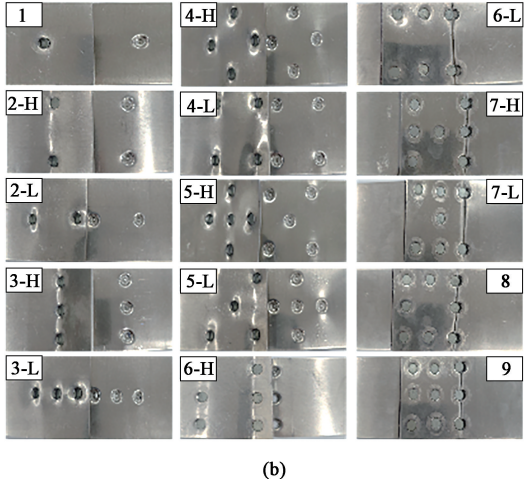


图 2 试件的载荷-位移曲线 (a) 和失效图 (b)

Fig. 2 Load-displacement curves (a) and failure diagrams (b) of specimens

量的增大会提升自锁结构的强度, 这使得铆钉将在弹性阶段承受更多的力, 试件抵抗弹性变形的能力由铆钉和板材共同决定。铆钉数量越大, 自锁结构的强度越大, 铆钉对试件抵抗弹性变形能力的影响越大, 且铆钉材料的杨氏模量远大于板材材料的杨氏模量, 所以, 铆钉数量的增加使得试件抵抗弹性变形的能力提升^[11]。

图 3 为试件力学性能参数均值。如图 3a 所示, 随着铆钉数量的增大, 试件的峰值载荷先增大后减小, 在铆钉数量为 7 时, 峰值载荷达到最大值。这是因为更多的铆钉能够产生更多的自锁结构, 从而提升试件的峰值载荷, 但铆接过程中更多的铆钉会刺穿上板更多的区域从而降低板材的强度, 由于板材性能的限制, 试件的峰值载荷存在极限值。如图 3b 所示,

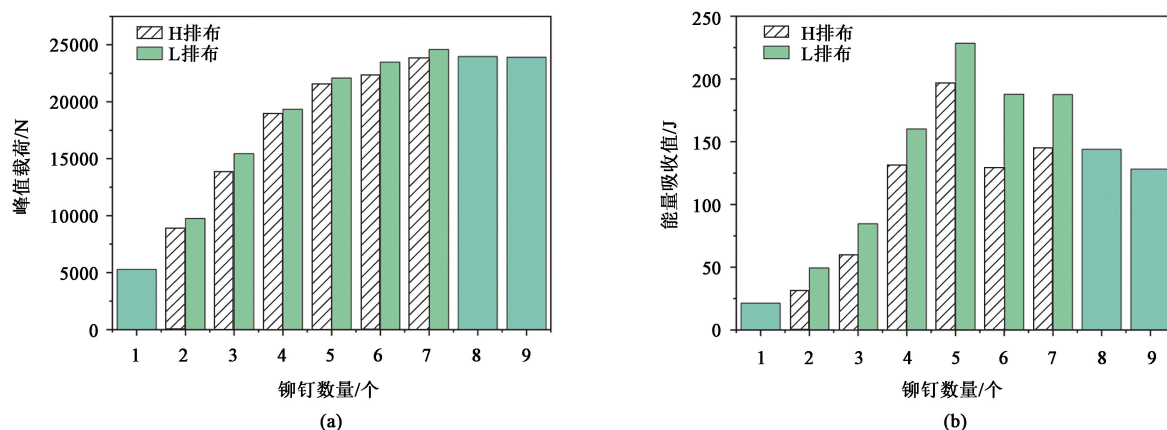


图3 试件力学性能参数均值

(a) 峰值载荷 (b) 能量吸收值

Fig. 3 Average values of mechanical property parameters for specimens

(a) Peak load (b) Energy absorption value

随着铆钉数量的增大,试件的能量吸收值先增大后减小,在铆钉数量为5时达到最大值。这是因为试件的能量吸收值主要受剪切载荷的影响,所以会和峰值载荷表现出相同的变化趋势。两者达到最大值时铆钉数量不同的原因是失效形式的改变,铆钉数量为5时,试件发生I型失效,此时受力主体为铆钉;铆钉数量为7时,试件发生II型失效,此时受力主体为板材。铆钉的强度大于板材,所以I型失效的能量吸收值也大于II型失效的能量吸收值,铆钉数量为5时试件的能量吸收值大于铆钉数量为7时试件的能量吸收值。值得注意的是,当铆钉数量相同时,L排布的峰值载荷和能量吸收值均大于H排布,这说明L排布的试件能够获得更好的力学性能。

2.2 失效形式

从表2可知,当铆钉数量 <6 时,试件的失效形

式为I型;铆钉数量 ≥ 6 时,试件的失效形式为II型;铆钉数量相同时,两种铆钉排布的试件的失效形式一致。这是因为:铆钉数量的增加会导致自锁结构的强度增大及板材的强度降低,铆钉数量较小时,自锁结构的强度大于板材的强度,试件发生I型失效。铆钉数量增大至6时,自锁结构的强度开始小于板材的强度,试件发生II型失效。

图4为不同铆钉排布的试件开口端的形貌图。拉伸过程中板材的翘曲会导致板材承受到的剪切力转变为对铆钉的拉拔力,翘曲幅度越大,铆钉受到的拉拔力就越大,试件更早发生失效,峰值载荷也就越小^[12]。如图4所示,当铆钉数量相同时,L排布的试件板材的翘曲幅度小于H排布的试件,所以,L排布的试件具有更大的峰值载荷,这与2.1节的结论相同。

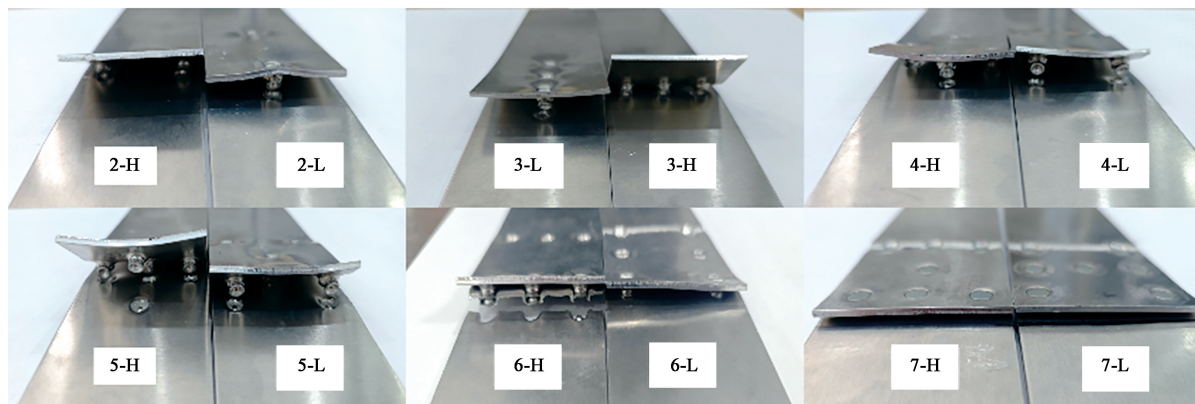


图4 不同铆钉排布的试件开口端的形貌

Fig. 4 Morphologies of open-end for specimens with different rivet arrangements

2.3 微观组织分析

图5为3-L试件和7-L试件的断裂面和断口形

貌。如图5所示,3-L试件的3颗铆钉对于板材的破坏程度不同,越靠近板材边缘,铆钉对板材的破坏

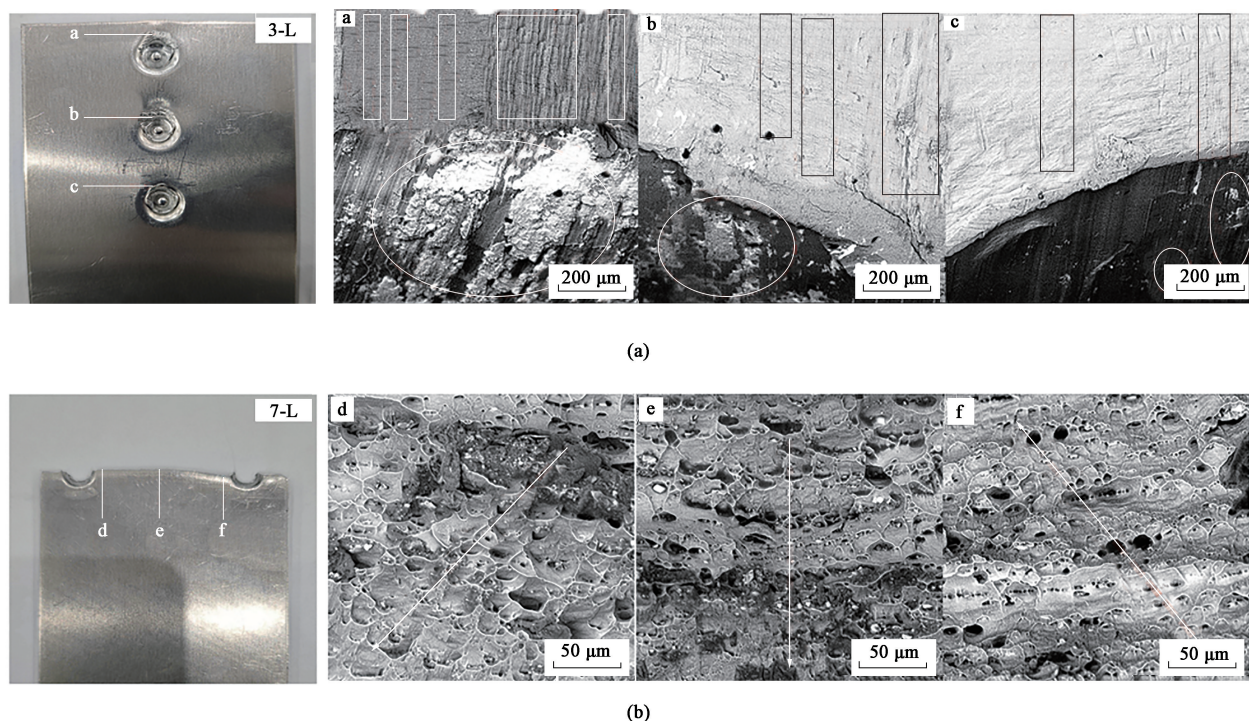


图 5 试件断裂面和断口形貌

(a) 3-L (b) 7-L

Fig. 5 Fracture surfaces and fracture appearances of specimens

程度越大。3 个区域均存在划痕和残留物（图 5 中方形框选部分为划痕，椭圆形框选部分为残留物），区域 a 处的划痕和残留物最多，其次为区域 b 处，区域 c 处最少。这些划痕和残留物是铆钉从下板拉出的过程中，板材与铆钉钉脚之间的摩擦力 f 导致的， f 越大，残留物和划痕越多。这说明越靠近板材的边缘，铆钉与板材之间的 f 越大，铆钉承受的力越大。7-L 试件的区域 e、区域 d 和区域 f 处均存在大量的 U 形韧窝，越靠近铆钉的部位 U 形韧窝的深度越浅，尺寸越小。这说明越靠近铆钉部位的板材的塑性越差，材料抵抗塑性变形的能力就越差。这是由于：铆接过程中，铆钉刺入板材的时候，被刺入的部分发生了加工硬化，导致塑性降低。越靠近铆钉，加工硬化的现象越明显，板材的塑性就越差。U 形韧窝的走向（图 5b 中箭头方向）代表受力方向，区域 d 和区域 f 处 U 形韧窝的走向与拉伸力方向呈 45° ，区域 e 处 U 形韧窝的走向与拉伸力方向平行，由此可以判定出，区域 d 和区域 f 处受到的力为切应力，区域 e 处受到的力为正应力。

3 结论

(1) 试件的峰值载荷随着铆钉数量的增大先增

大后减小，铆钉数量为 7 时，试件的峰值载荷达到最大值（24590.0 N）；试件的能量吸收值随着铆钉数量的增大先增大后减小，铆钉数量为 5 时，试件的峰值载荷达到最大值（228.5 J）；铆钉 L 排布的试件可以获得更好的力学性能。

(2) 试件共有两种失效形式：铆钉数量 < 6 时，为铆钉拔出失效；铆钉数量 ≥ 6 时，为板材断裂失效。铆钉数量相同时，铆钉排布不能改变试件的失效形式，但可以改变板材的翘曲幅度。

参考文献：

- [1] He X C, Pearson I, Young K. Self-pierce riveting for sheet materials; State of the art [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 199 (1-3): 27-36.
- [2] 王付才, 陆卫中, 杨海. 轻量化汽车自冲铆接头腐蚀行为的研究进展 [J]. 材料保护, 2021, 54 (8): 132-138.
Wang F C, Lu W Z, Yang H. Research progress on corrosion behavior of lightweight automobile self-piercing riveting joint [J]. Materials Protection, 2021, 54 (8): 132-138.
- [3] 赵伦, 何晓聪, 卢毅, 等. 基板厚度对自冲铆接头静力学性能的影响及其失效机理 [J]. 热加工工艺, 2015, 44 (17): 1-5.
Zhao L, He X C, Lu Y, et al. Influence of basilar sheet thickness on static performance of self-piercing riveted joints and its failure mechanism [J]. Hot Working Technology, 2015, 44 (17): 1-5.

- [4] 张娜,李海鹏,葛广跃,等. 车身轻量化设计方法及应用[J]. 汽车实用技术, 2022, 47 (10): 179-183.
Zhang N, Li H P, Ge G Y, et al. Lightweight design methods and applications of body [J]. Automobile Applied Technology, 2022, 47 (10): 179-183.
- [5] 何晓聪,何家宁,柯建宏,等. 自冲铆接接头的质量评价[A]. 2010 年中国汽车车身技术国际研讨会论文集[C]. 长沙, 2010.
He X C, He J N, Ke J H, et al. Quality evaluation of self-piercing riveted joints [A]. Proceedings of the 2010 China International Symposium on Automotive Body Technology [C]. Changsha, 2010.
- [6] Zhao L, He X C, Lu Y. Study on clinching of titanium alloy [J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 633-634: 86-89.
- [7] Xing B Y, He X C, Zeng K, et al. Mechanical properties of self-piercing riveted joints in aluminum alloy 5052 [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 75 (1-4): 351-361.
- [8] Yan W M, Mu T T, Xie Z Q, et al. Experimental investigation of typical connections for fabricated cold-formed steel structures [J]. Advances in Structural Engineering, 2019, 22 (1): 141-155.
- [9] 郭子鑫,赵伦,郭媛媛,等. 航空铝合金薄板自冲铆接头静力学性能的研究[J]. 热加工工艺, 2024, 53 (9): 39-44.
Guo Z X, Zhao L, Guo Y Y, et al. Study on static mechanical performance of self-piercing riveted joints of aviation aluminum alloy sheets [J]. Hot Working Technology, 2024, 53 (9): 39-44.
- [10] GB/T 16957—2012, 复合钢板焊接接头力学性能试验方法[S].
GB/T 16957—2012, Mechanical tests on welded joints in clad plates [S].
- [11] 雷乐,赵伦,高山凤,等. 铝钛异种薄板冷连接工艺及力学性能研究[J]. 锻压技术, 2023, 48 (7): 100-106.
Lei L, Zhao L, Gao S F, et al. Cold joining process and mechanical property study for Al-Ti dissimilar [J]. Forging & Stamping Technology, 2023, 48 (7): 100-106.
- [12] 丁文有,何晓聪,邢保英,等. 铆向组合对双铆钉自冲铆接头力学性能的影响[J]. 塑性工程学报, 2018, 25 (5): 234-239.
Ding W Y, He X C, Xing B Y, et al. Effect of riveting orientation combination on mechanical properties of double rivet self-piercing riveted joint [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2018, 25 (5): 234-239.

(上接第 131 页)

- Li G Y, Ni T, Guo H. Technical progress and application of carbon fiber composites for rail transit [J]. China Textile Leader, 2020 (7): 24-29.
- [3] 周骥,丁新静,苏亚玘. 碳纤维复合材料在轨道交通领域中的应用[J]. 纤维复合材料, 2021, 38 (4): 90-94.
Zhou Q, Ding X J, Su Y D. Application prospective of carbon fiber composite materials in rail vehicles [J]. Fiber Composites, 2021, 38 (4): 90-94.
- [4] Mucha J, Witkowski W. Mechanical behavior and failure of riveting joints in tensile and shear tests [J]. Strength of Materials, 2015, 47 (5): 755-769.
- [5] Marannano G, Zuccarello B. Numerical experimental analysis of hybrid double lap aluminum-CFRP joints [J]. Composites Part B, 2015, 71: 28-39.
- [6] Mitsuhiro O, Ryo N. Mechanical properties of the riveted connecting forming of CFRP plates [J]. International Journal of Material Forming, 2018, 11 (2): 225-232.
- [7] 毛才文,莫凡,彭亚南,等. 碳纤维增强环氧树脂复合材料层合板结构及间隙尺寸对铆接性能的影响[J]. 复合材料学报, 2018, 35 (12): 3280-3287.
Mao C W, Mo F, Peng Y N, et al. Carbon fiber composite laminate structure and effect of clearance on riveting properties [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2018, 35 (12): 3280-3287.
- [8] 石智辉,王瑞强,洪俊杰,等. 托板螺母用抽芯铆钉的仿真与实验研究[J]. 锻压技术, 2022, 47 (2): 113-118.
Shi Z H, Wang R Q, Hong J J, et al. Simulation and experimental research on blind rivets for plate nuts [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (2): 113-118.
- [9] 赵乐天,黄祺,左杨杰,等. CFRP 构件抽芯铆接损伤及拉伸剪切性能[J]. 锻压技术, 2023, 48 (4): 162-168.
Zhao L T, Huang Q, Zuo Y J, et al. Damage and tensile shearing property on core pulling riveting for CFRP components [J]. Forging & Stamping Technology, 2023, 48 (4): 162-168.
- [10] GB/T 38825—2020, 民用飞机复合材料制件铆接要求[S].
GB/T 38825—2020, Requirements of riveting connection in civil aircraft of composite parts [S].
- [11] 中国航空研究院. 复合材料连接手册[M]. 北京: 航空工业出版社, 1994.
Chinese Aeronautical Establishment. Composite Connection Manual [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 1994.
- [12] Cherry Maxibolt® Process Manual [EB/OL]. www. cherryaerospace.com, 2009.
- [13] GB/T 3098.18—2004, 紧固件机械性能 盲铆钉试验方法[S].
GB/T 3098.18—2004, Mechanical properties of fasteners—Blind rivets testing [S].
- [14] 李文中,李振兴,吴皓亮,等. 碳纤维复合材料与铝合金连接方式选型研究[J]. 汽车工艺与材料, 2021 (3): 48-52.
Li W Z, Li Z X, Wu H L, et al. Selection study on joining of carbon fiber reinforced polymer and aluminum alloy [J]. Automobile Technology & Material, 2021 (3): 48-52.