

沉台工艺对自冲铆接接头的力学性能的影响

易超¹, 于万元², 王超³, 陈涛^{1,3}

- (1. 湖南湖大艾盛汽车技术开发有限公司 整车性能集成部, 湖南 长沙 410205;
2. 柳州职业技术大学 汽车工程学院, 广西壮族自治区 柳州 545001;
3. 湖南大学 整车先进设计制造技术全国重点实验室, 湖南 长沙 410082)

摘要: 为了研究不同沉台工艺对自冲铆接接头的成形质量、力学性能和失效机理的影响, 针对 3.0 mm 厚度的 6063-T6 铝合金板材设计了两种沉台特征和 3 种沉台厚度。铝合金作为上层板与 1.2 mm 厚度的 DP590 高强度钢板完成连接, 并进行了剖面检查、力学测试和微观组织分析。结果表明, 3 种沉台厚度的接头均满足下层板为钢板时, 底切值和底部厚度大于 0.1 mm 的要求。U 型接头的特征设计增加了铝板的刚度, 相比 P 型接头在相同载荷下的变形更小。在剪切拉伸试验中, 6 种接头均表现出互锁失效。随着上层板厚度的增加, 失效后的铆钉的倾斜程度逐渐减小。相同沉台厚度下, U 型接头的峰值力和能量吸收比 P 型接头至少高 1.4% 和 6.2%。随着沉台厚度增加, U 型接头和 P 型接头的峰值力和能量吸收的增加幅度分别超过 22.4% 和 47.4%。

关键词: 沉台工艺; 铝合金; 自冲铆接; 失效机理; 力学性能

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2025.07.021

中图分类号: TG938

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2025) 07-0165-08

Effects of sinking process on mechanical properties of self-piercing riveted joints

Yi Chao¹, Yu Wanyuan², Wang Chao³, Chen Tao^{1,3}

- (1. Vehicle Performance Integration Department, Aisin AUTO R&D Co., Ltd., Changsha 410205, China;
2. College of Automotive Engineering, Liuzhou Polytechnic University, Liuzhou 545001, China;
3. State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacture for Vehicle Body, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: In order to investigate the influences of different sinking processes on the forming quality, mechanical properties and failure mechanism of self-pierce riveted joints, two sinker features and three sinker thicknesses were designed for 6063-T6 aluminum alloy sheet with the thickness of 3.0 mm. Then, aluminum alloy was used as the upper plate to complete the connection with the DP590 high-strength steel sheet with the thickness of 1.2 mm, and cross-section inspection, mechanical testing and microscopic analysis were conducted. The results show that the joints with three different sinking thicknesses all meet the requirement of undercut value and bottom thickness greater than 0.1 mm when the steel sheet is set as the lower layer. The U-type joint enhances the stiffness of the aluminum sheet, resulting in less deformation compared to the P-type joint under the same loading. In shear-tensile tests, six joints all exhibit interlock failure. As the upper sheet thickness increases, the inclination of the failed rivets gradually decreases. Under the same sinking thickness, the peak load and energy absorption of the U-type joint are at least 1.4% and 6.2% higher than those of the P-type joint, respectively. With the increasing of sinking thickness, the increase in peak load and energy absorption for the U-type and P-type joints exceeds 22.4% and 47.4%, respectively.

Key words: sinking process; aluminum alloy; self-pierce riveting; failure mechanism; mechanical properties

随着全球对节能减排和轻量化需求的增加, 传

统的焊接技术已难以满足现代汽车工业对材料连接的高要求^[1]。自冲铆接 (Self-Piercing Riveting, SPR) 技术因其能够在不同材料之间实现可靠连接, 尤其是在铝合金、镁合金、钢材等材料的连接上表现出优异性能, 因此, 在汽车制造业中得到了广泛应用^[2-3]。此外, 自冲铆接技术相较于传统连接技术具有以下优势: (1) 材料适应性广, 能够连接不同种类和厚度的材料, 包括异种金属和金属与非金属的连接; (2) 连接质量高, 接头形成封闭结构,

收稿日期: 2024-07-21; 修订日期: 2024-10-26

基金项目: 微小型纯包架构安全与节能关键技术研究 (桂科 AA23062064); 2024 年度广西高校中青年教师科研基础能力提升项目 (2024KY1097)

作者简介: 易超 (1987-), 男, 硕士, 工程师

E-mail: yichao0926@163.com

通信作者: 于万元 (1987-), 女, 硕士, 工程师

E-mail: ywy196364@126.com

抗腐蚀性能好,疲劳寿命长;(3)生产效率高,无需预先钻孔,简化了生产流程,缩短了生产周期;(4)环境友好,连接过程中无火花、无有害气体产生,符合环保要求;(5)易于实现自动化,适合于自动化生产线,提高了生产效率和产品质量的一致性^[4]。随着技术的不断进步和应用领域的拓展,自冲铆接技术有望在未来的工业制造中发挥更加重要的作用。

自冲铆接接头的质量受多种因素影响,主要包括:板材特性、铆钉和铆模设计,以及铆接压力、速度等。其中,板材的材料属性、厚度、伸长率和表面状态等均会影响接头质量^[5]。Han L 等^[6]研究了板材涂层对 SPR 接头质量和性能的影响。接头剖面尺寸参数表明,涂层可以改善互锁值,但接头强度略有下降。Cheng A G 等^[7]研究了总厚度对 3 层 SPR 接头成形质量和力学性能的影响,发现降低总厚度和中间板材厚度可以得到更好的成形质量和力学性能。Huang Z C 等^[8]将喷丸处理与 SPR 工艺相结合,对 SPR 接头进行了静态和疲劳试验,结果表明:喷丸处理使接头的静态强度提高约 9.5%,疲劳强度提高约 9.2%。Wang C 等^[9]研究表明,SPR 可连接性随着板材厚度比的增加而降低,当厚度比超过 1.47 时,SPR 可连接性接近零。温中令等^[10]对比研究了钢-铝和铝-钢两种搭接顺序下接头的成形质量和剪切强度,研究结果显示,钢-铝搭接顺序下接头的成形质量较为稳定,缺陷较少,而且剪切接头的峰值力明显高于铝-钢搭接顺序下的接头。吕枫等^[11]研究发现,厚板作为下层板可以获得较佳的成形质量参数和接头强度。

以上关于板材参数的影响研究主要关注板材本身的特性,而关于板材在进行机加工后对 SPR 成形质量和力学性能的研究较少。其中,Ren X Q 等^[12]采用平面无铆连接工艺对具有倾斜表面的异种铝合金板材进行了连接,该工艺特别适用于连接厚板材。钢/铝混合结构中,在需要避免结构干涉的特殊部位,通常需要对较厚的铝板进行沉台机加工处理。本文为 6063-T6 铝合金和 DP590 高强度钢组成的铝-钢接头设计了 U 型和 P 型两种沉台方案,并考虑沉台厚度参数,研究了沉台方案对成形质量、力学性能和失效模式的影响,最后分析了接头失效的微观特征。

1 试验材料及方法

1.1 材料属性及样件制备

试验中使用的板材为厚度为 3.0 mm 的 6063-T6

挤压铝合金板和厚度为 1.2 mm 的 DP590 高强度钢板,两种板材的尺寸均为 120.0 mm×40.0 mm。表 1 列出了所用板材的力学性能。本文使用深圳一浦莱斯(ePRESS)公司制造的 SPR 伺服铆接设备制作铝-钢接头,该铆接机能够施加 80 kN 的最大铆接压力,如图 1a 所示。为了制造符合质量要求的 SPR 接头,在正式试验前进行了初步的铆接测试,并为不同沉台厚度的铝合金板材选择了 3 种铆钉长度和 1 种铆模(商用代号 9019)。铆钉的硬度均为 H6(520 HV),铆钉腿部直径为 $\Phi 5.3$ mm,钉头直径为 $\Phi 7.7$ mm;铆模直径为 $\Phi 9.0$ mm,深度为 1.9 mm。铆钉和模具的具体尺寸参数分别如图 1b 和图 1c 所示。

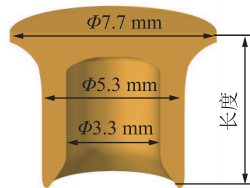
表 1 板材的力学性能

Table 1 Mechanical properties of sheets

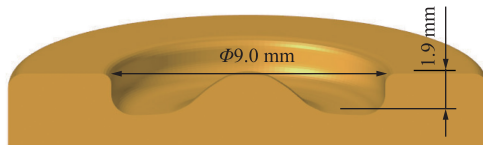
材料	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量/ GPa	屈服强度/ MPa	抗拉强度/ MPa
DP590 高强度钢	7.83×10^3	210	369	760
6063-T6 铝合金	2.70×10^3	70	244	307



(a)



(b)



(c)

图 1 铆接工具的外观和尺寸参数

(a) 铆接设备 (b) 铆钉 (c) 铆模

Fig. 1 Appearance and dimension parameters of riveting tools

(a) Riveting equipment (b) Rivet (c) Riveting die

图2说明了铆接接头3个关键几何指标的测量方式:(1)铆钉头高度 Δh ,即从铆钉头表面到上层板上表面的距离;(2)底切值 Δu ,其定义为从变形的铆钉尖端到上层板刺穿点的距离;(3)底部厚度 Δb ,表示铆接过程完成后下层板的最小厚度。在SPR试验之前,铆接设备的设定压力是预先确定的,并根据不同的接头配置进行调整,确保每个接头的 Δh 为 (0 ± 0.1) mm。

U型和P型两种沉台方案分别如图3a和图3b

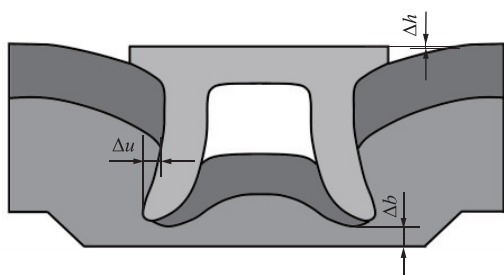


图2 成形质量参数示意图

Fig. 2 Schematic diagram of forming quality parameters

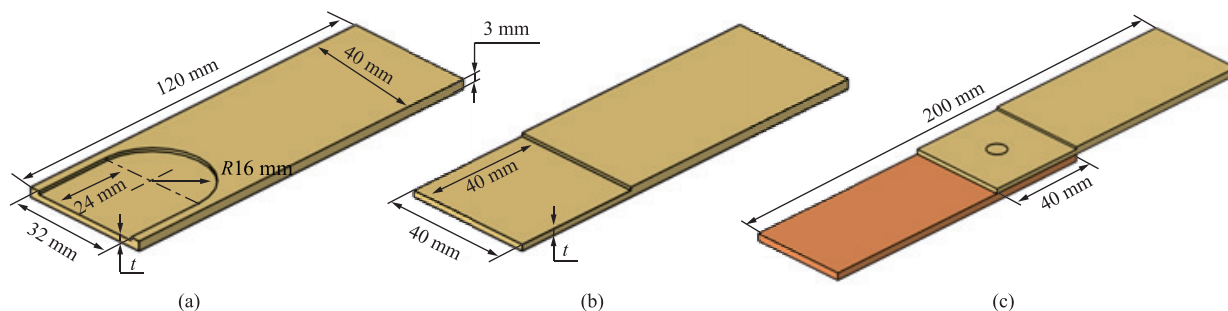


图3 沉台方案及剪切样品

(a) U型 (b) P型 (c) 剪切接头

Fig. 3 Sinking schemes and shear samples

(a) U-type (b) P-type (c) Shear joint

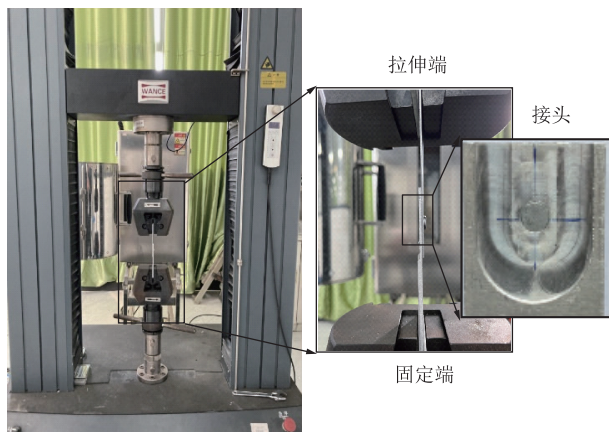


图4 剪切拉伸测试

Fig. 4 Shear tension test

所示,通过数控机床在3.0 mm厚度的铝板上加工出所需要的沉台特征,沉台长度尺寸均为40.0 mm,沉台厚度 t 有1.5、2.0和2.5 mm这3种,分别对应5.0、6.0和6.5 mm这3种长度的铆钉。剪切接头示意图如图3c所示,搭接长度为40.0 mm,共有6组接头,分别为U-1.5、U-2.0、U-2.5、P-1.5、P-2.0和P-2.5。

1.2 力学测试

使用最大负载为100 kN的深圳万测(WANCE)ETM105D拉伸试验机完成接头剪切试验来评价SPR接头的力学性能。图4为剪切实力学测试试验图,6063-T6铝板位于固定端,DP590钢板位于拉伸端,两端分别增加等厚度的垫片,保证测试过程中样件的对中。所有接头的试验均在室温下进行,拉伸速度为 $3.0 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$,每组接头重复3次试验,得到的接头峰值力和能量吸收值为3个样件的平均值。根据失效模式的不同,使用蔡司(ZEISS)扫描电子显微镜对失效位置进行微观观察分析。

2 试验结果与讨论

2.1 成形质量

图5为不同沉台厚度对应的接头剖面形状,并测量了剖面中的底切值和底部厚度。所有接头的钉头与上层板上表面基本平齐,均满足下层板为钢时,底切值和底部厚度大于0.1 mm的要求^[13],可以确保接头的力学性能和稳定性。通过分别使用不同长度的铆钉,将3种沉台厚度的接头的底切值控制在0.13~0.19 mm的一个相对较小的范围内。这说明在不同的沉台厚度条件下,使用不同长度铆钉成形的接头在底切值上表现出一致性,这种一致性对于其后续的力学性能对比非常重要。

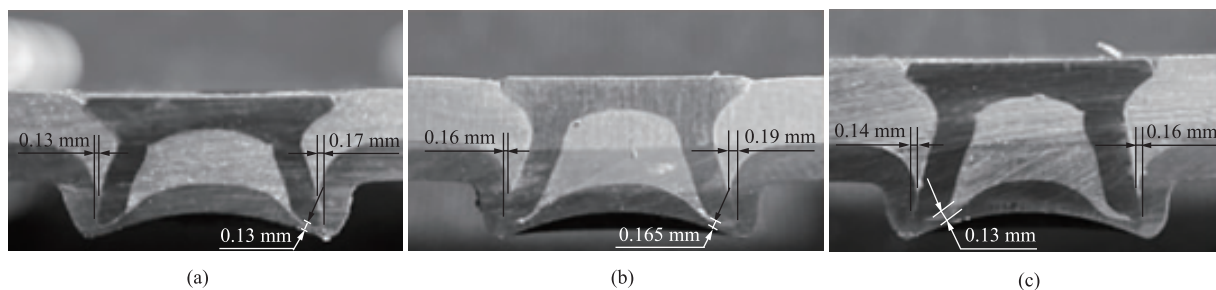


图 5 不同沉台厚度对应的接头成形质量参数

(a) 1.5 mm (b) 2.0 mm (c) 2.5 mm

Fig. 5 Forming quality parameters of joints corresponding to different sinking thicknesses

2.2 拉伸过程

图 6 为 6 组接头在剪切拉伸试验中的变形过程, 所有接头均经历了上层铝板的弯曲变形, 然而不同类型的接头在变形程度上存在差异。具体来说, U 型接头的弯曲程度小于 P 型接头。这主要归因于 U 型接头的特征设计, 这些设计增加了铝板的刚度, 使其在相同载荷下的变形更小。在试验过程中, 随

着沉台厚度的增加, 铝板的弯曲变形程度逐渐降低。这是因为更厚的沉台提供了更大的支撑力, 从而减少了铝板在受力状态下的弯曲量。P 型接头的上层铝板弯曲的折弯位置位于沉台过渡处, 如图 6d 和图 6e 所示, 这些变形主要是铝板的局部塑性变形。在实际应用中, P 型接头在受力时会在这一定区域产生明显的应力集中, 可能影响接头的整体性能和寿命。

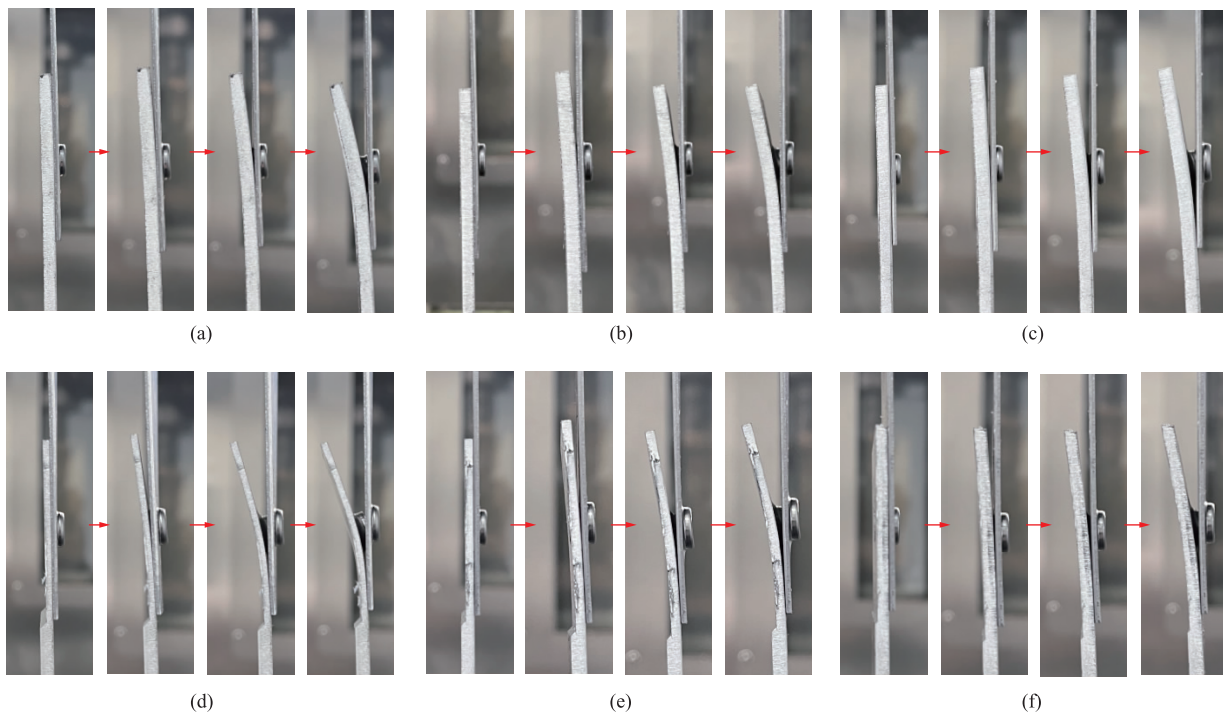


图 6 6 组接头的失效过程

(a) U-1.5 (b) U-2.0 (c) U-2.5 (d) P-1.5 (e) P-2.0 (f) P-2.5

Fig. 6 Failure processes of six sets of joints

2.3 力学性能

图 7 显示了从剪切拉伸试验中获得的接头的力-位移曲线, 每个试样进行了 3 次重复试验, 可以看出所有曲线的变化趋势基本相同, 随位移的增大, 剪切载荷逐渐增加, 然后缓慢降低。在剪切载

荷增加阶段, 曲线几乎重合, 剪切载荷随位移的增加基本呈线性增加; 达到峰值载荷后, 上下板重叠形成的不对称结构产生弯矩, 导致剪切载荷逐渐减小, 直至剪切拉伸试验完成。沉台厚度为 1.5 mm 的 U-1.5 和 P-1.5 接头的曲线趋势基本重合, 剩余

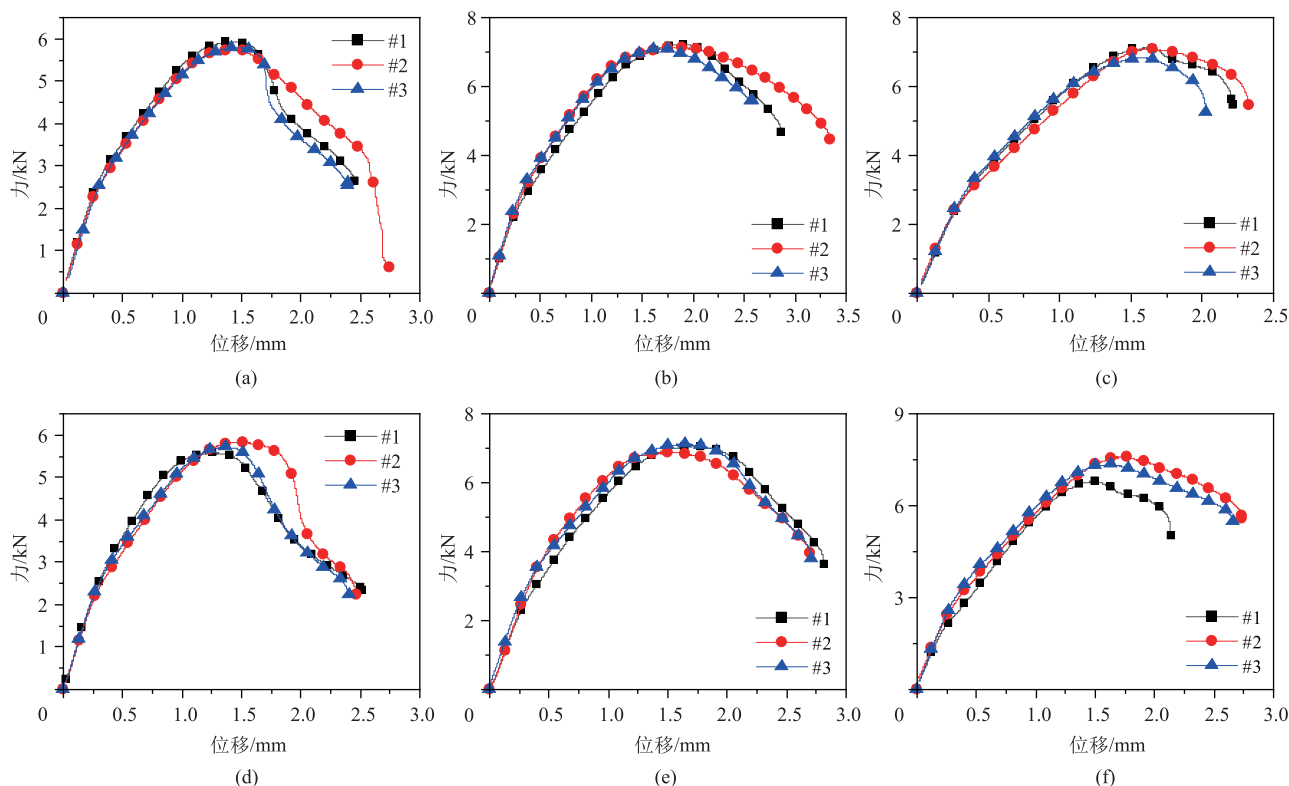


图7 6组接头的剪切拉伸试验中的力-位移曲线

(a) U-1.5 (b) U-2.0 (c) U-2.5 (d) P-1.5 (e) P-2.0 (f) P-2.5

Fig. 7 Force-displacement curves in shear tension test for six sets of joints

的其他4种接头的曲线趋势基本重合,这说明沉台厚度对接头的变形影响更大。

对图7中的曲线提取峰值力并进行积分,得到图8所示的接头的峰值力和能量吸收值。峰值力直接反映了接头的强度,表示接头在实际应用中能承受的最大载荷。如果接头的峰值力较高,意味着接头具有较强的抗断裂能力和良好的承载性能。在一些动态载荷或冲击载荷的应用场景中,能量吸收值是一个关键指标。高能量吸收能力的接头可以有效缓冲和吸收冲击能量,减少结构的损伤和破坏风险。相同沉台厚度下,U型接头的峰值力和能量吸收高于P型接头,且能量吸收差异最大。其中,U型接头的峰值力比P型接头高1.4%~2.8%,而U型接头的能量吸收比P型接头高6.2%~22.1%。同种沉台类型,随着厚度的增加,峰值力和能量吸收逐渐增加,U型接头相对更加敏感。其中,沉台厚度由1.5 mm增加到2.0 mm时,峰值力和能量吸收增加显著,U型接头的峰值力和能量吸收的增加幅度分别为22.4%和68.9%,P型接头的峰值力和能量吸收的增加幅度分别为22.8%和47.4%。

2.4 失效分析

在剪切拉伸试验中,6种接头均表现出相同的

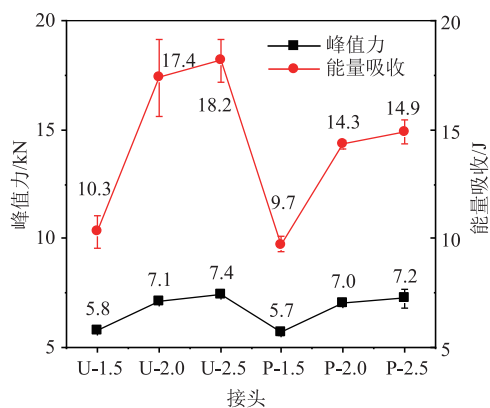


图8 剪切拉伸试验中接头的力学性能

Fig. 8 Mechanical properties of joints in shear tension test

失效模式,即互锁失效。这种失效模式的典型特征为铆钉从下层板脱出,如图9所示。尽管较厚的沉台可以提供更大的承载能力,但沉台厚度为2.0和2.5 mm的接头的底面钢板均出现脱落风险,底面断裂情况如图9b和图9d所示。这是因为在剪切过程中,接头承受了较大载荷,铆钉尖端对下层钢板产生向下的压力,导致底部厚度最小的位置产生断裂。在铆钉从下层钢板脱出的过程中,铆钉和下层钢板之间的挤压和摩擦作用显著。由于铆钉在受力时不

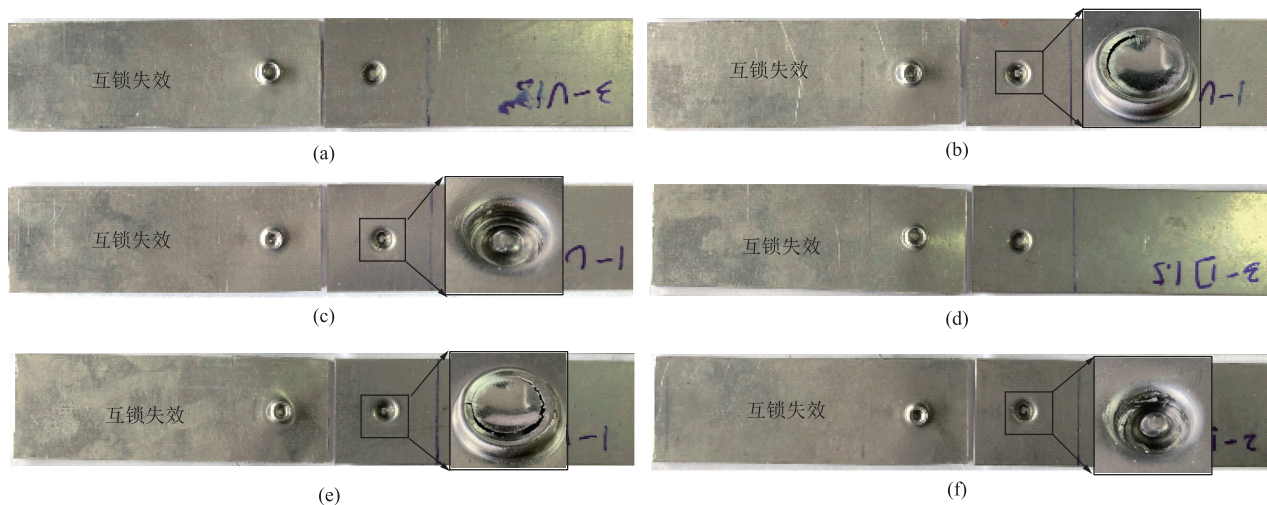


图 9 6 组接头的失效模式

(a) U-1.5 (b) U-2.0 (c) U-2.5 (d) P-1.5 (e) P-2.0 (f) P-2.5

Fig. 9 Failure modes of six sets of joints

断与下层钢板发生摩擦, 导致下层板表面出现明显的刮痕, 如图 9c 和图 9e 所示。这些刮痕不仅反映了铆钉和钢板之间的剧烈摩擦, 还表明下层钢板的铆接位置在失效过程中承受了相当大的摩擦力和剪切力。

图 10 为 6 组接头失效后的铆钉形态。相比于铆接后铆钉相对于上层铝板的垂直状态, 接头失效后铆钉相对于上层铝板发生倾斜。随着上层铝板厚度的增加, 倾斜程度逐渐减小。此外, 在铆钉前方位置的铝板上可以观察到月牙形的变形区, 这是因为

铆钉倾斜后, 接头处更容易产生弯矩^[14], 使得铆钉头对此处产生更大的挤压力, 同时也导致了上层铝板产生更大程度的弯曲变形。

通过扫描电子显微镜, 对 U-2.5 接头的互锁失效和 U-2.0 接头的底面断裂两种特征进行了微观组织分析, 如图 11 所示。图 11a 中的互锁失效, 在剪切方向的位置 B 处可以发现明显的刮痕和不连续的材料切除特征。铆钉在从下层钢板脱出过程中, 铆钉对下层钢板存在挤压力, 因此, 铆钉尖会切除小部分的材料。在剪切方向的侧面位置 C 处, 铆钉与

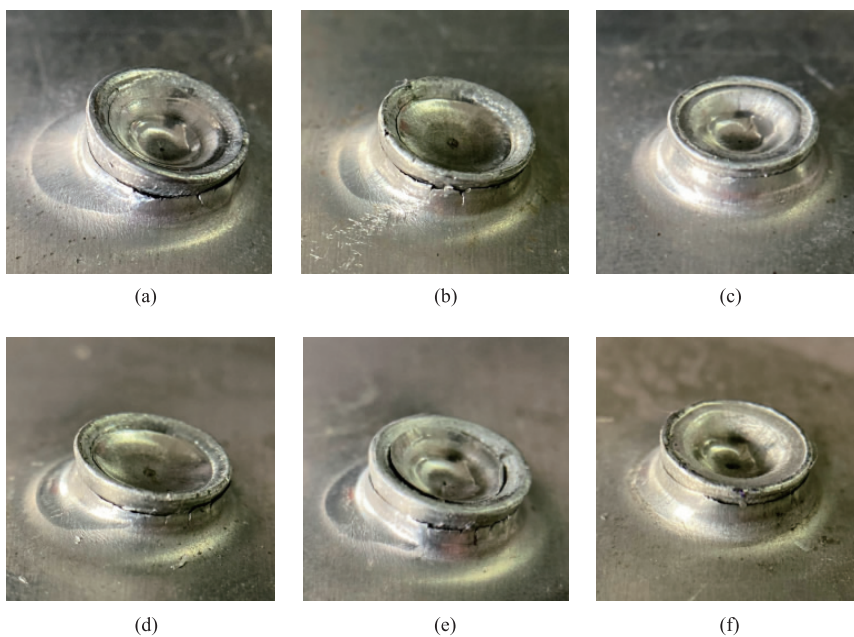


图 10 6 组接头失效后的铆钉形态

(a) U-1.5 (b) U-2.0 (c) U-2.5 (d) P-1.5 (e) P-2.0 (f) P-2.5

Fig. 10 Shapes of rivets after failure for six sets of joints

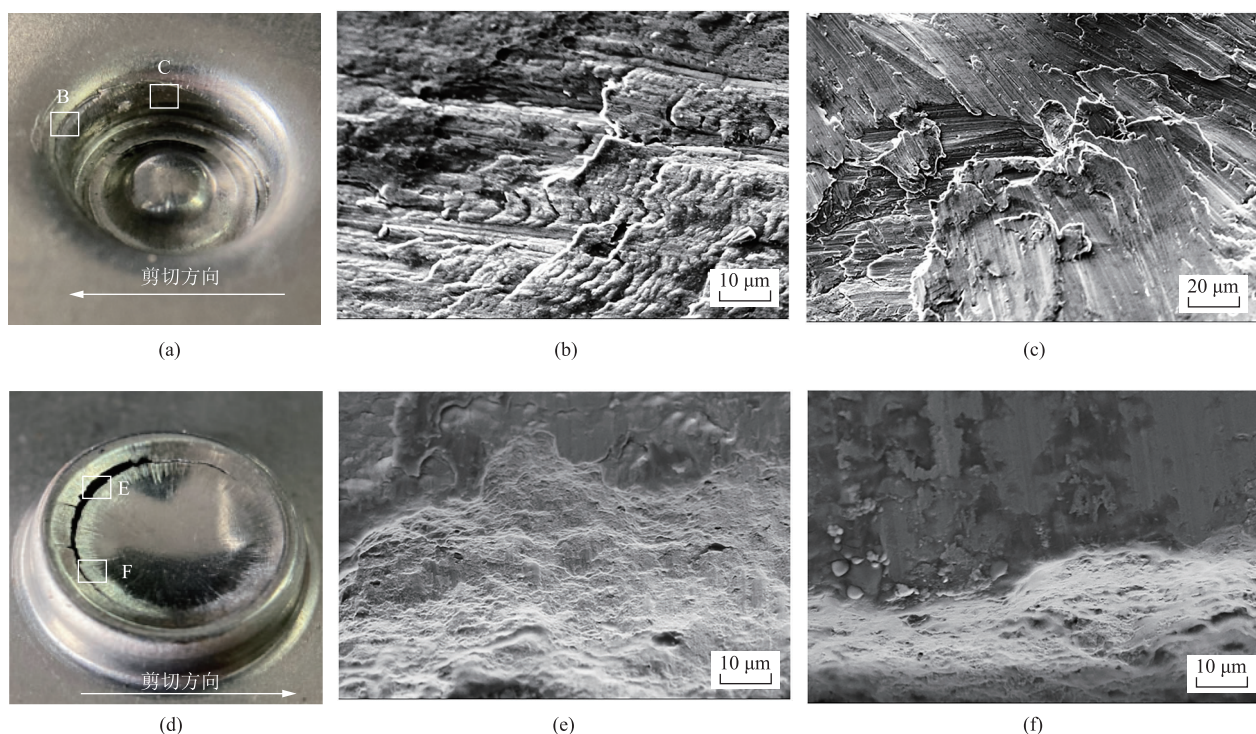


图 11 U-2.5 和 U-2.0 接头的失效分析结果

(a) U-2.5 接头的宏观失效特征 (b) 区域 B 的放大图像 (c) 区域 C 的放大图像
(d) U-2.0 接头的宏观失效特征 (e) 区域 E 的放大图像 (f) 区域 F 的放大图像

Fig. 11 Failure analysis results of U-2.5 and U-2.0 joints

(a) Macroscopic failure characteristics of U-2.5 joint (b) Enlarged image of region B (c) Enlarged image of region C
(d) Macroscopic failure characteristics of U-2.0 joint (e) Enlarged image of region E (f) Enlarged image of region F

下层板之间有相对较小的挤压力,在下层钢板中出现刮痕和挤压痕,并未观察到明显的材料切除现象。图 11d 中的底面断裂失效,下层钢板表面存在划痕,这是在铆接过程中下层钢板与铆模之间的摩擦所生成的。断裂位置处无明显的韧窝或解理面,推断是由于铆接过程中此处受到巨大的挤压力,导致了局部的硬化。

3 结论

(1) 3 种沉台厚度的接头的底切值具有较高的一致性,可用于接头力学性能的对比。剪切拉伸试验中 U 型接头的铝板弯曲程度小于 P 型接头,而且随着沉台厚度的增加,铝板的弯曲变形程度逐渐降低。

(2) 相同沉台厚度下, U 型接头的峰值力和能量吸收高于 P 型接头,且能量吸收差异最大。其中, U 型接头的峰值力比 P 型接头高 1.4%~2.8%,而 U 型接头的能量吸收比 P 型接头高 6.2%~22.1%。同种沉台类型下,随着沉台厚度的增加,

峰值力和能量吸收逐渐增加, U 型接头相对更加敏感。其中,沉台厚度由 1.5 mm 增加到 2.0 mm 时,峰值力和能量吸收增加显著。U 型接头峰值力和能量吸收的增加幅度分别为 22.4% 和 68.9%, P 型接头的增加幅度分别为 22.8% 和 47.4%。

(3) 沉台工艺未改变接头失效模式,均为互锁失效。在剪切过程中,接头承受了较大载荷,铆钉尖端对下层钢板产生向下的压力,导致底部厚度最小位置处产生断裂。由于铆钉在受力时不断与下层钢板发生摩擦,导致下层钢板表面出现明显的刮痕。

参考文献:

- [1] 闫春雷,田明生,沈利,等. 电磁能对半连续铸造 Al-Si-Cu-Mg 合金微观组织与成分偏析的影响 [J]. 稀有金属, 2023, 47 (2): 203-209.
Yan C L, Tian M S, Shen L, et al. Microstructure and composition segregation of DC-casting Al-Si-Cu-Mg alloy with electromagnetic energy [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2023, 47 (2): 203-209.
- [2] 李冰,陈星合,付博文,等. 7075 铝合金线材连续流变挤压

- 与双级时效热处理研究 [J]. 稀有金属, 2023, 47 (9): 1195-1203.
- Li B, Chen X H, Fu B W, et al. Continuous rheo-extrusion and double aging heat treatment of 7075 aluminum alloy wire [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2023, 47 (9): 1195-1203.
- [3] 于万元, 王超, 陈涛, 等. 自冲铆接和预穿孔自冲铆接的钢/铝板成形质量的数值模拟研究 [J]. 锻压技术, 2025, 50 (4): 183-194.
- Yu W Y, Wang C, Chen T, et al. Numerical simulation study on forming quality for steel/aluminium sheet by self-piercing riveting and pre-punched self-piercing riveting [J]. Forging & Stamping Technology, 2025, 50 (4): 183-194.
- [4] Li D Z, Chrysanthou A, Patel I, et al. Self-piercing riveting-A review [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 92 (5-8): 1777-824.
- [5] Ang H. An overview of self-piercing riveting process with focus on joint failures, corrosion issues and optimisation techniques [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2021, 34 (1): 1-25.
- [6] Han L, Young K, Hewitt R, et al. Effect of sheet material coatings on quality and strength of self-piercing riveted joints [J]. SAE Technical Paper Series, 2006: 62817270.
- [7] Cheng A G, Wang C, Sun Y P, et al. Effects of hole sizes and stack thicknesses on mechanical properties and failure behavior of pre-holed self-piercing riveted steel-aluminum joints [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2024, 34 (11): 1-20.
- [8] Huang Z C, Zhou Z J, Jiang Y Q. Effect of shot peening on static and fatigue properties of self-piercing riveting joints [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022, 18: 1070-1080.
- [9] Wang C, Du Z, Cheng A G, et al. Numerical investigation of joint-ability and forming quality improvement on self-piercing riveting process with varying sheet stack combinations [J]. Thin-Walled Structures, 2024, 201: 112017.
- [10] 温中令, 雷鸣, 潘华. 不同铆接速度下板材搭接顺序对钢/铝异种金属铆接头性能的影响 [J]. 有色金属材料与工程, 2023, 44 (3): 9-17.
- Wen Z L, Lei M, Pan H. Effect of plate lapping sequence on the performances of steel/aluminum dissimilar metal riveted joints under different riveting speeds [J]. Nonferrous Metal Materials and Engineering, 2023, 44 (3): 9-17.
- [11] 吕枫, 邓将华, 陈如明, 等. 板料组合方式对铝/钢异种金属板自冲铆接头性能的影响 [J]. 塑性工程学报, 2019, 26 (4): 134-141.
- Lyu F, Deng J H, Chen R M, et al. Effect of sheet combination modes on joints properties of aluminum/steel dissimilar metal sheets under self-piercing riveting [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2019, 26 (4): 134-141.
- [12] Ren X Q, Chen C. Research on mechanical clinching process for dissimilar aluminum alloy sheets with inclined surface [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2023, 89: 362-370.
- [13] Du Z P, Duan L B, Jing L J, et al. Numerical simulation and parametric study on self-piercing riveting process of aluminium-steel hybrid sheets [J]. Thin-Walled Structures, 2021, 164: 107872.
- [14] Wang C, Du Z P, Cheng A G, et al. Influence of process parameters and heat treatment on self-piercing riveting of high-strength steel and die-casting aluminium [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 26: 8857-8878.

欢迎关注“锻压技术杂志”微信公众号

@杂志动态 @行业信息 @企业宣传



• 锻造 • 冲压 • 钣金 • 模具 • 加热 • 标准化 •