

特种成形

板材厚度对自冲铆接接头力学性能的影响

李旺珍^{1,2,3}, 孙有平^{1,2,3}, 张海¹, 罗国健⁴, 刘华桑¹

(1. 广西科技大学 机械与汽车工程学院, 广西 柳州 545006; 2. 广西科技大学 广西汽车零部件与整车技术重点实验室, 广西 柳州 545006; 3. 广西科技大学 高端工程装备广西高校工程研究中心, 广西 柳州 545006; 4. 柳州工学院 机械工程学院, 广西 柳州 545006)

摘要: 以 HC340/590DP、HC420/780DP 先进高强度钢和 AlSi10MnMg-T7 铸铝为原材料组合制备自冲铆接接头, 研究了不同型号钢板及铝板的厚度对自冲铆接接头成形质量和力学性能的影响。结果表明: 3.0 mm 厚度的下层铝板组合接头中, 峰值失效载荷随着上层钢板厚度的增加而减小, 且剪切拉伸试样最小峰值力大于 7.0 kN, 十字拉伸试样最小峰值力大于 2.5 kN; 6.0 mm 厚度的下层铝板组合接头的力学性能较为稳定, 剪切拉伸峰值力均大于 13 kN, 十字拉伸峰值力基本均大于 6.0 kN。当接头组合中上层钢板厚度为 1.2 mm 时, 接头能量吸收性能表现突出, 且能量吸收水平随板厚的增加呈下降趋势。当接头组合中下层铝板厚度为 3.0 mm 时, 接头的失效模式主要为铆钉随上两层板材整体脱离, 而当下层铝板厚度为 6.0 mm 时, 接头的失效模式主要为铆钉钉身断裂。

关键词: 高强度钢; 真空压铸铝; 自冲铆接; 力学性能; 能量吸收; 失效模式

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2025.05.025

中图分类号: TG938

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2025) 05-0203-08

Influence of plate thickness on mechanical properties for self-piercing riveted joints

Li Wangzhen^{1,2,3}, Sun Youping^{1,2,3}, Zhang Hai¹, Luo Guojian⁴, Liu Huashen¹

(1. School of Mechanical and Automotive Engineering, Guangxi University of Science and Technology, Liuzhou 545006, China; 2. Guangxi Key Laboratory of Automobile Components and Vehicle Technology, Guangxi University of Science and Technology, Liuzhou 545006, China; 3. Engineering Research Center of Advanced Engineering Equipment, University of Guangxi, Guangxi University of Science and Technology, Liuzhou 545006, China; 4. School of Mechanical Engineering, Liuzhou Institute of Technology, Liuzhou 545006, China)

Abstract: The self-piercing riveted joints were prepared by using advanced high-strength steels of HC340/590DP and HC420/780DP and AlSi10MnMg-T7 cast aluminum as the raw material combination, and the influences of thickness for different types of steel and aluminum plates on the forming quality and mechanical properties of self-piercing riveted joints were studied. The results show that the peak failure load in the combined joint with the lower aluminum plate thickness of 3.0 mm decreases with the increasing of the upper steel plate thickness, the minimum peak forces of shear and cross tensile specimens are greater than 7.0 kN and 2.5 kN, respectively. The mechanical properties of the combined joint with the lower aluminum plate thickness of 6.0 mm are relatively stable, the peak forces of shear and cross tensile are greater than 13 kN and 6.0 kN, respectively. When the upper steel plate thickness in the combined joint is 1.2 mm, the energy absorption performance of joint is outstanding, and the energy absorption level shows a downward trend as the plate thickness increases. When the lower steel plate thickness in the combined joint is 3 mm, the failure mode of joint is mainly the detachment of rivet with the upper two layers of plate as a whole, while when the lower aluminum plate thickness is 6.0 mm, the failure mode of joint is mainly the fracture of rivet body.

Key words: high strength steel; vacuum die-cast aluminum; self-pierce riveting; mechanical property; energy absorption; failure mode

随着汽车安全法规的日益严格, 以及对节能减

排的迫切需求^[1], 汽车的轻量化设计成为汽车设计与制造的重点^[2]。轻质材料在汽车轻量化中得到广泛应用, 尤其是高强度钢和铝合金, 因其强度高、密度小、成本低等优点成为主要使用的材料^[3]。然而, 由于异种材料之间的属性差异, 导致传统焊接工艺无法实现有效连接^[4]。自冲铆接 (Self-Piercing Riveting, SPR) 技术属于机械连接技术的一种, 通过使用特制铆钉穿透待铆接的板材, 并在板材内部张开形成互锁结构的方式实现两层或多层金属或非

收稿日期: 2024-06-02; 修订日期: 2024-09-05

基金项目: 柳州市科技计划项目 (2024AB0301D001, 2023PRJ0102, 2023PRJ0101); 广西科技重大专项项目 (桂科 AA23062089); 广西重点研发计划 (桂科 AB23026104)

作者简介: 李旺珍 (1986-), 女, 硕士, 高级实验师

E-mail: liwangzhen@gxust.edu.cn

通信作者: 孙有平 (1979-), 男, 博士, 教授

E-mail: syptaiji@126.com

金属板材的连接^[5-8]。

在多层板材连接方面,国内外诸多学者对此进行了研究。邓成江等^[9]开展了 5052-H32 铝合金 3 层板材的铆接实验,研究了不同接头的强度、失效形式以及能量吸收等特性。此外,于万元等^[10]采用双层开孔钢叠加压铸铝的方式评估了钢板厚度及下层板材料对接头成形质量的影响。罗国健等^[11]使用双层钢搭接铝的叠加方式,以不同的搭接形式对自冲铆接接头进行实验,探究了力学性能与搭接方式的关系,结果表明,3 层板材的铆接接头在实际应用中的可行性较高。

在双层板材连接方面, Karathanasopoulos N 等^[12]分析了不同的铆钉和模具设计参数对金属薄板自冲铆接的可行性和铆接质量的影响,通过实验和数值模拟研究了单层铝叠铝(AA2019/AA7075-F)和铝叠钢(AA7075-F/BA0270)接头的铆接性能。结果显示,当半空心铆钉壁厚和模具深度值在特定范围内时,可以成功实现较好的连接形式以及得到较高的互锁值。Achira S 等^[13]采用 980 MPa 钢与 5052 铝合金薄板进行自冲铆接,研究了薄板形态对薄板变形行为、铆钉强度和接头强度的影响,结果发现:当下层板为铝合金时,呈现的互锁值较大;当上下板材均为 A5052 铝合金、中间板材为 980 MPa 钢时,铆钉张开程度适中,得到的接头质量较好。Zhang X L 等^[14]提出了预孔自冲铆接(Pre-Holed Self-Piercing Riveting, PH-SPR)新工艺,与常规自冲铆接(Regular Self-

Piercing Riveting, R-SPR) 接头相比, PH-SPR 接头具有较好的母材表面硬化效果和较低的铆钉强度损失,采用 PH-SPR 可以获得较好的机械互锁,但其接头强度高度依赖于联锁长度,接头的静态破坏模式主要受铆钉头高度的影响^[15]。

综上,多层板材自冲铆接在实际应用中已经得到多方验证,且应用范围较广,但较少关注双层高强度钢板与车用压铸铝合金之间组合的研究方向。本文针对 HC340/590DP、HC420/780DP 先进高强度钢和 AlSi10MnMg-T7 铸铝材料组合,以板材厚度为主要变量参数,研究其对自冲铆接接头成形质量和力学性能的影响。

1 实验材料及方法

1.1 自冲铆接工艺

本文中涉及的接头由深圳市一浦莱斯精密技术有限公司(EPRESS)生产的液压伺服自冲铆接系统进行连接成形,铆接设备如图 1 所示。设备冲击力主要由伺服电机控制系统提供。首先,将待铆接的板材放置于模具上方,通过液压控制压边圈对板材进行压边紧固,防止铆接时走脱。然后,对冲头施加向下的冲力,带动铆钉从自动送钉带条中脱离并刺穿板材。随着压力的持续增加,铆钉完全穿入板材并向外张开形成互锁。最后,保压成形,退回冲头和压边圈,取下铆接件。

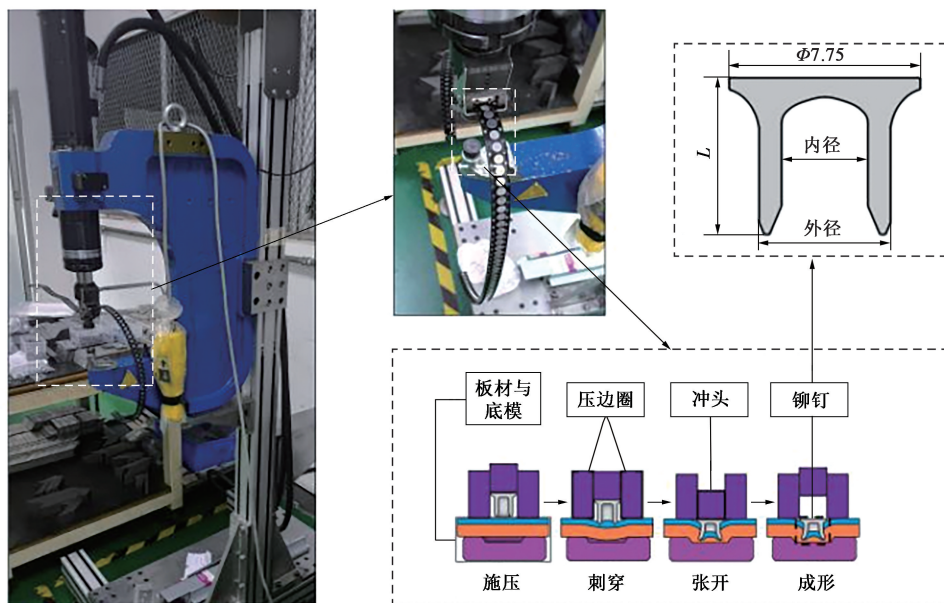


图 1 自冲铆接设备及工艺流程

Fig. 1 Equipment and flow process for self-pierce riveting

1.2 材料选择与接头组合

高强度钢的强度远高于普通钢，这是其最突出的优点之一。在保持高强度的同时，重量相对较轻，则可以减轻整车的重量，提高车辆的燃油效率，HC340/590DP 和 HC420/780DP 作为常用的高强度钢，具有较好的抗震性能，可以提高车辆的安全性，在车身的关键吸能位置得到广泛应用。此外，多方车企通过一体压铸的方式，将传统钢制零部件改为铸铝进行材料更替，如特斯拉某车型车身中率先使用一体压铸后底板结构，以及多家车企使用压铸铝作为减震塔首选材料，降低了零件数量和制造成本，同时实现了轻量化。高真空压铸 AlSi10MnMg-T7 铝合金的伸长率可达到 19%，具有较好的延展性，可

以有效降低铆接时出现开裂的几率。

为了研究不同板材厚度对接头力学性能的影响，设置了 6 种材料参数组合的接头，具体参数如表 1 所示。其中，实验中使用的半空心铆钉为深圳市一浦莱斯公司自主研发的产品，常用的硬度级别为 H4（维氏硬度约为 480 HV）以及 H6（维氏硬度约为 520 HV），本研究选用 H6 硬度的铆钉。将每种材料参数组合铆接为如图 2 所示的剪切拉伸接头和十字拉伸接头，共 12 组，对接头进行一字剪切以及十字拉伸实验工况下的力学性能测试，拉伸速率为 $2\sim 3\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ ，为保证数据的准确性，每组试样进行 3 次测试，去除异常值后使用平均值作为最终结果。

表 1 多层板材铆接材料参数
Table 1 Riveting material parameters for multi-layer plate

编号	上层板材		中层板材		下层板材		铆钉	
	材料	厚度/mm	材料	厚度/mm	材料	厚度/mm	尺寸/(mm×mm)	硬度
J1	HC420/780DP	1.2	HC340/590DP	1.2	AlSi10MnMg-T7	3.0	Φ5.3×7.5	H6
J2		1.6		1.2		3.0	Φ5.3×7.5	H6
J3		2.0		1.2		3.0	Φ5.3×7.5	H6
J4		1.2		1.2		6.0	Φ5.3×9.0	H6
J5		1.6		1.2		6.0	Φ5.3×9.0	H6
J6		2.0		1.2		6.0	Φ5.3×9.0	H6

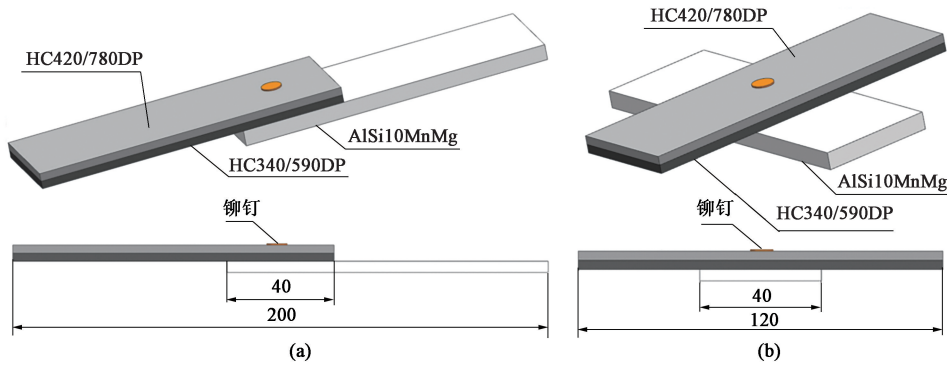


图 2 拉伸试样示意图

(a) 剪切拉伸 (b) 十字拉伸

Fig. 2 Schematic diagrams of tensile specimens

(a) Shear tensile (b) Cross tensile

2 结果与分析

2.1 接头质量

2.1.1 接头剖面金相组织

为了更好地对接头作出质量评定，使用物理切

割的方式对接头进行对半分，观察其剖面金相组织。由于未发生任何外部载荷或变形，故剪切拉伸和十字拉伸接头成形效果一致，以剪切接头为例，可得到图 3 所示的接头剖面图。可以看到：在所有组合接头中，铆钉在穿透钢板的过程中已经发生了严重的变形与压缩；随着上层钢板厚度的增加，铆

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

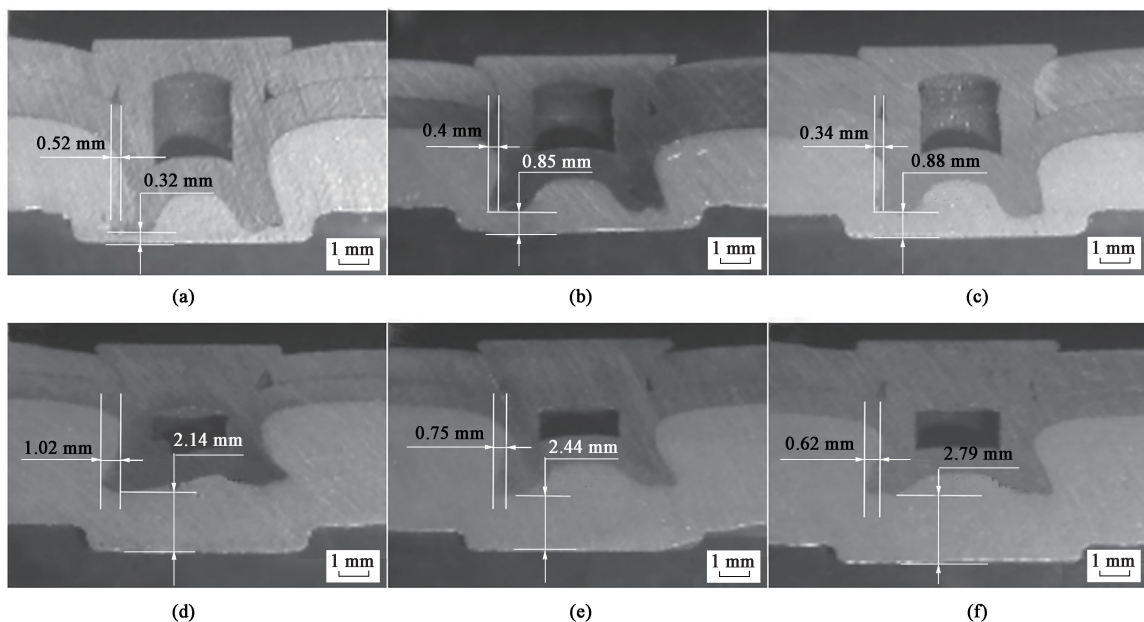


图 3 接头剖面成形参数

(a) J1 (b) J2 (c) J3 (d) J4 (e) J5 (f) J6

Fig. 3 Forming parameters of joint profile

钉在母材中的镦粗程度越高,其互锁值(即铆钉钉脚最边缘位置到最底层板材钉身初始变形位置的距离)随之降低;底层铸铝厚度增加且同时使用较长铆钉的情况下,铆钉的张开程度随底板厚度的增加而提高,形成的机械互锁更优。

2.1.2 成形参数分析

图 4 为从剖面金相组织(图 3)中整理出的成形参数趋势。从数值点的关系可以看出,底层板材的材料板厚对铆钉的压入与张开影响较小。从图 4a 中可以明显看到不同接头组合的互锁成形参数趋势,

总体均为随上层板厚的增加呈现降低的趋势。随着板厚的增加,铆钉在刺穿前两层的钢板所需的钉身长度越长,导致总体板厚增加的情况下,最底层板材中压入钉身的量越少,这也是互锁值降低的关键影响因素之一。图 4b 为接头的底部剩余厚度(铆钉垂直方向与底层板材之间最小距离量值),结果显示,底层板材剩余厚度与板厚成正相关,剩余量均超过 0.3 mm,并且下层铝板厚度为 6.0 mm 的接头(J4~J6)的底部剩余量超过 2.0 mm,可以满足实际工程要求。

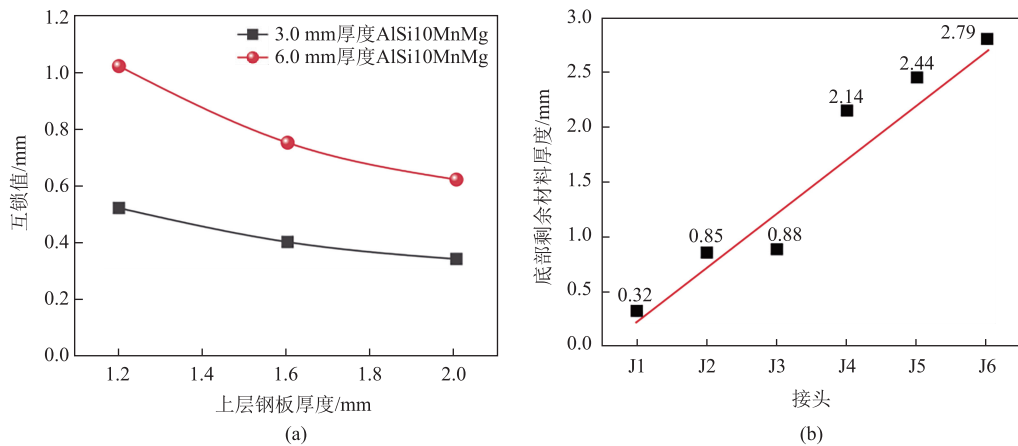


图 4 接头剖面成形参数趋势

(a) 互锁值曲线 (b) 底部剩余厚度曲线

Fig. 4 Trend of forming parameters for joint profile

(a) Curves of interlocking value (b) Curve of residual thickness of bottom

2.2 力学性能

2.2.1 力学曲线

图5a为J1~J6接头的剪切拉伸力-位移曲线。在初始变形阶段,上层钢板厚度较小的组合(J1、J4)呈现的力学曲线的斜率较大,逐渐增长至峰值,但曲线在达到峰值力前并未出现较大的波动,受载过程较为稳定;图5b为J1~J6接头的十字拉伸力-位移曲线,失效曲线的相似性证明了接头成形过程中的一致性。对比相同下层板材厚度组合的接头(J1~J3、J4~J6)可看到,随着上层板厚的增加,接头的峰值力逐渐降低,且失效位移与组合板总厚度成负相关关系。而以下层铝板厚度为变量因素的情况下,6.0 mm厚度的下层铝板组合接头相比于3.0 mm厚度的下层铝板组合接头,其峰值力有明显增加,且6.0 mm厚度的下层铝板组合接头在剪切

失效过程中未出现过大的失效波动,结合图3的接头剖面成形参数可以看到,较长的铆钉在较厚的铝板中会形成较优的互锁,以此增加接头的咬合力,在剪切载荷施加过程中,铆钉受力面积增加,两者的共同作用促使了该类组合接头的失效力显著提升;但由于底模深度的局限性,在同一底模深度的情况下,3.0 mm厚度的铝板在刺穿至下层板材时易受到模具的内向约束力,而6.0 mm厚度的铝板并未受到过多约束,所以,其铆钉张开程度会明显高于前者,即出现J4~J6组合接头互锁值均大于J1~J3组合接头的情况(图3、图4)。但同时铆钉的过度张开成形会促使钉身严重弯曲,造成局部应力集中,甚至在冲压过程中就已经出现了裂纹,导致在接头受到外部载荷时出现力学紊乱的现象,甚至造成铆钉的崩断。

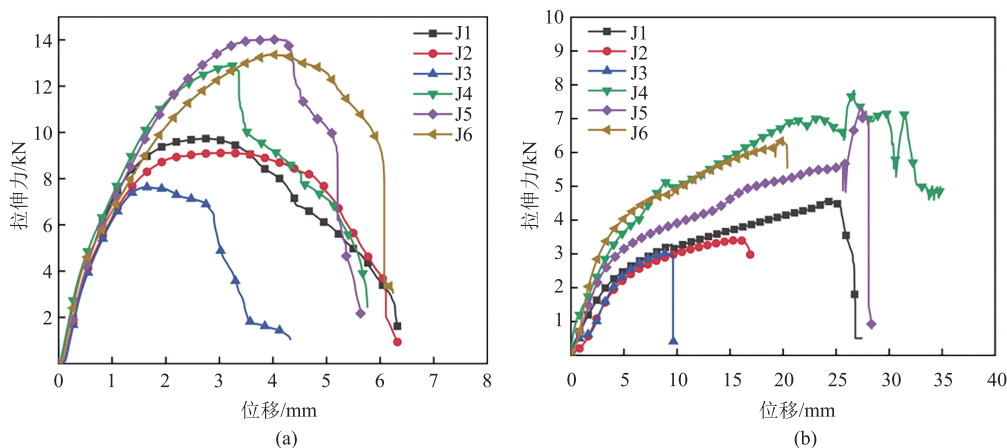


图5 不同接头的拉伸力-位移曲线

(a) 剪切拉伸 (b) 十字拉伸

Fig. 5 Tensile force-displacement curves of different joints

(a) Shear tensile (b) Cross tensile

2.2.2 峰值载荷与能量吸收

图6a和图6b分别为各组合接头的剪切与十字拉伸峰值载荷(峰值力)曲线图。由数据显示可以看到,剪切接头的峰值力均大于7 kN,十字接头的峰值力均大于2.5 kN,两项数据均满足一般工艺生产的使用标准。由数据可以看出,两种类型的接头在力学增减趋势上呈现相同的变化关系,证明了接头的成形稳定性与测试结果的一致性。在3.0 mm厚度的下层铝板组合接头中(J1~J3),随着上层板材厚度的增加,其峰值力呈现降低的趋势,结合图4中的互锁值曲线可以判定,该下层铝板厚度下接头的力学性能主要受互锁值影响,即板厚增加造成互锁值降低从而使得内部咬合力降低;而在6.0 mm厚度的下层铝板的组合接头中,由于模具的局限性

造成铆钉钉身的局部应力集中,互锁值的大小并不是力学性能的主要影响因素,铆钉长度决定了剪切过程中的受力面积,互锁值决定了十字拉伸时所受的阻力,所以,6.0 mm厚度的下层铝板组合接头的峰值力展现出较为平稳的趋势。使用力-位移曲线面积积分的方式对接头进行能量值计算,结果如图6c和图6d所示。在3.0 mm厚度的下层铝板组合接头中,随着板厚的增加,失效位移逐渐减小,呈现的能量吸收值越低,这是因为:在同一厚度参数下,塑性更高的AlSi10MnMg-T7铝合金在受载荷的同时会产生更多的柔性缓冲。而在6.0 mm厚度的下层铝板组合接头中,由于铆钉张开程度较大,形成了显著的机械互锁结构,位移响应主要来源于机械互锁结构的变形,而铆钉钉体发生严重弯曲变

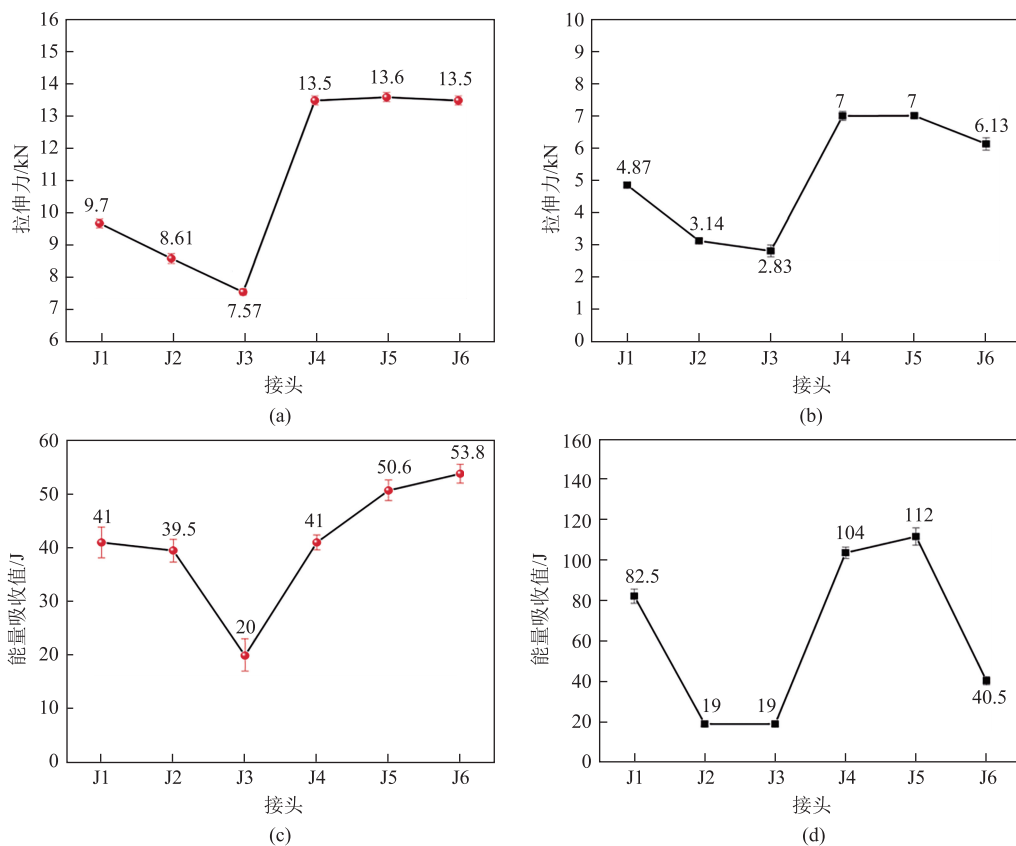


图 6 不同参数下接头的峰值载荷和能量吸收值

(a) 剪切接头的峰值力平均值曲线 (b) 十字接头的峰值力平均值曲线 (c) 剪切接头的能量吸收值曲线 (d) 十字接头的能量吸收值曲线

Fig. 6 Peak loads and energy absorption values of joints under different parameters

(a) Average peak force curve of shear joints (b) Average peak force curve of cross joints (c) Energy absorption value curve of shear joints (d) Energy absorption value curve of cross joints

形导致局部应力集中效应加剧, 进而提高了铆钉断裂的失效概率。且钉身弯曲程度严重, 出现应力集中的可能性较大, 在剪切和十字拉伸过程中极易出现铆钉崩断从而导致位移的突变, 所以, 在能量统计方面会出现如图 6c 和图 6d 中显示的不确定性或规律不稳定变化。

2.3 失效模式

图 7 为各组合接头的宏观失效图, 其中图 7a~图 7c 均为 3.0 mm 厚度的下层铝板组合接头的失效模式, 可以看到铆钉均为随上层整体板材 (包括上层和中层板材) 脱离下层母材, 在图 7a 中明显看到剪切拉伸试样在失效过程中会出现母材拉脱变形的现象, 而在十字拉伸中会出现母材拉断的趋势。由图 3 结果可知, 上层板厚较小的组合会形成较大的互锁量, 从而在接头中形成较大的咬合力, 所以, 在承受载荷过程中对下层母材的撕裂程度会高于其他组合。图 7d~图 7f 为 6.0 mm 厚度的下层铝板接头的失效模式, 可以看到基本为铆钉断裂失效。由

于下层铝板厚度较大导致铆钉受到底模的内向约束力较小, 铆钉的张开度增大, 钉身弯曲程度变大导致应力集中, 在受外部载荷时铆钉从钉身弯曲较大处断裂, 证明了接头的力-位移曲线波动性较大与能量吸收值不稳定的原因。

图 8 为剪切接头断裂处及周围明显变形位置的扫描电子显微镜 (Scanning Electron Microscope, SEM) 图。图 8a~图 8c 为铆钉断裂的断口形貌, 可以看到断口处均为沿晶断裂, 明显的解理面说明铆钉的断裂属于宏观脆性断裂, 其中并未出现较大差异的断裂面, 以此排除铆钉存在物理上的缺陷。且从图 8a 中可以看到, 断口形貌较为平齐, 断裂处无明显的塑性变形, 属于突然断裂, 结合前文的研究, 依此判断形成该断裂方式的主要原因为铆钉因展开程度过大使得钉身弯曲变形严重, 在周围形成应力集中层, 从而在受到载荷作用时出现脆性断裂。图 8d~图 8f 为剪切试样中 AlSi10MnMg-T7 铝合金下层板材沿拉力方向受挤压形成的挤压带及局部放大图。



图7 接头宏观失效图

(a) J1 (b) J2 (c) J3 (d) J4 (e) J5 (f) J6

Fig. 7 Macroscopic failure diagrams of joints

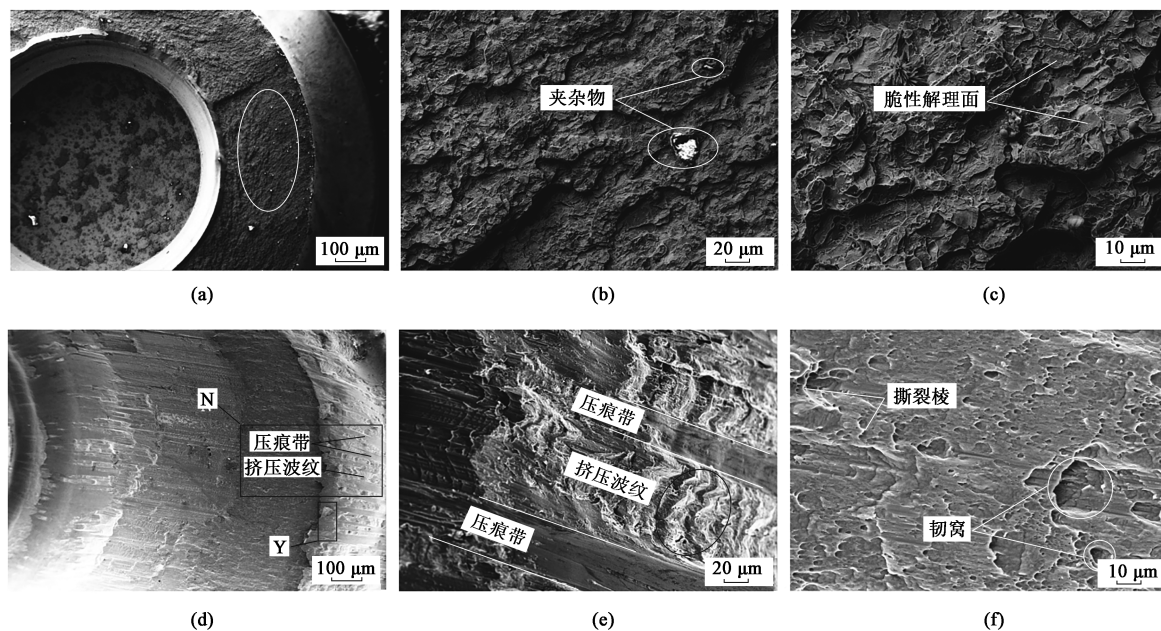


图8 接头断裂处及明显变形位置的 SEM 图

(a) 断口形貌, 低倍 (b) 断口形貌, 中倍 (c) 断口形貌, 高倍 (d) 下层板材形貌 (e) N 处放大图 (f) Y 处放大图

Fig. 8 SEM images of fracture and location of obvious deformation for joint

(a) Morphology of fracture, low-magnification (b) Morphology of fracture, medium-magnification (c) Morphology of fracture, high-magnification
(d) Morphology of lower plate (e) Enlarged view at N position (f) Enlarged view at Y position

从图 8d 可以看到, 压力带逐层向外拓展形成色调较为明显的圈层。图 8e 为图 8d 的局部放大图 (图 8d

中 N 处), 可以看到明显的波浪状挤压褶皱, 说明在接头剪切拉伸过程中下层板材产生了较大的挤压

变形,且表面存在较多的挤压棱线,在挤压变形处并未发现明显因应力集中产生的裂纹或解理趋势,初步断定该失效为非脆性断裂失效。继续放大图 8d 的断层局部区域进行观察,图 8f 为挤压带被压平区域(图 8d 中 Y 处),该失效位置存在大量撕裂棱以及较为密集的韧窝结构,进一步证明了该类接头在剪切拉伸过程中的失效行为中属于韧性断裂失效。

3 结论

(1) 3.0 mm 厚度的 AlSi10MnMg-T7 铝合金板材作为底层板材时,互锁值与底部剩余厚度增减趋势呈现相反的变化情况;而 6.0 mm 厚度的 AlSi10MnMg-T7 铝合金板材作为底层板材时,这两个成形参数的增减趋势相似。下层板材厚度较小的组合由于受到底模的内向阻力,铆钉的压缩程度比下层板材较厚时要高。

(2) 下层板材厚度为 6.0 mm 时,铆钉在压入过程中由于没有底模的约束,较大幅度地向外张开,导致钉身弯折处受应力集中影响,在载荷施加过程中会出现较大的波动性;在力学性能表现中,各组合接头的剪切拉伸力学性能表现趋势与十字拉伸的增长趋势相似,在相同下层板材厚度的组合中,随着总厚度的增加,接头力学性能呈现下降趋势。

(3) 下层板材较薄的组合中,失效模式主要为铆钉随上两层板材整体脱出,因铆钉的互锁程度较高,在十字拉伸时伴随有板材撕裂的情况出现;下层板材较厚的组合中,失效模式主要为铆钉断裂。对失效点及断裂铆钉进行微观检测,发现铆钉断裂形貌主要为沿晶断裂,即宏观脆性断裂失效;脱落点中存在大量撕裂棱,挤压后仍能看到大量韧窝,判断该类失效主要为韧性断裂失效。

参考文献:

- [1] 金杰,严晶晶.汽车尾气排放问题及节能减排的方法研究[J].工程技术,2023(2):154-157.
- Jin J, Yan J J. Research on automobile exhaust emissions and methods of energy conservation and emission reduction [J]. Engineering Technology, 2023 (2): 154-157.
- [2] 吴兵舰,张东凯,王斐.某汽车动力总成悬置支架的轻量化设计[J].长安大学学报(自然科学版),2023,43(3):134-144.
- Wu B J, Zhang D K, Wang F. Lightweight design of powertrain mounting bracket of commercial vehicle [J]. Journal of Chang'an University(Natural Science Edition), 2023, 43 (3): 134-144.
- [3] 李鹏.高强度钢在汽车轻量化中的应用研究[J].专用汽车,2022(11):61-64.

- Li P. Research on the application of high-strength steel in automobile lightweighting [J]. Special Purpose Vehicle, 2022 (11): 61-64.
- [4] 何景瓷.异种金属材料物理性质对焊接的影响分析[J].造纸装备及材料,2022,51(2):57-59.
- He J C. Analysis of the effect of physical properties of dissimilar metal materials on welding [J]. Papermaking Equipment & Materials, 2022, 51 (2): 57-59.
- [5] Wu J L, Chen C, Ouyang Y W, et al. Recent development of the novel riveting processes [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 117 (1-2): 19-47.
- [6] Hua Q A. 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): 2.
- [7] Haque R, Durandet Y. Investigation of self-pierce riveting (SPR) process data and specific joining events [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2017, 30: 148-160.
- [8] Karim M A, Jeong T E, Noh W, et al. Joint quality of self-piercing riveting (SPR) and mechanical behavior under the frictional effect of various rivet coatings [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 58: 466-477.
- [9] 邓成江,何晓聪,邢保英,等.基于3层板材搭接的自冲铆连接性能研究[J].机械设计,2015,32(6):83-87.
- Deng C J, He X C, Xing B Y, et al. Joinability analysis on self-pierce riveting based on three-layer sheets [J]. Journal of Machine Design, 2015, 32 (6): 83-87.
- [10] 于万元,王超,龙广鹏,等.钢-钢-铝三层板自冲铆接成形质量及力学性能研究[J].锻压技术,2024,49(4):153-160.
- Yu W Y, Wang C, Long G P, et al. Study on forming quality and mechanical properties of self-piercing riveting for steel-steel-aluminum three-layer sheet [J]. Forging & Stamping Technology, 2024, 49 (4): 153-160.
- [11] 罗国健,孙有平,李旺珍,等.多层钢-铝板材搭接形式对铆接件的剪切力学性能的影响[J].锻压技术,2024,49(4):131-137.
- Luo G J, Sun Y P, Li W Z, et al. Influence of lap form for multi-layer steel-aluminum sheet on shear mechanical properties for riveted parts [J]. Forging & Stamping Technology, 2024, 49 (4): 131-137.
- [12] Karathanasopoulos N, Pandya K S, Mohr D. An experimental and numerical investigation of the role of rivet and die design on the self-piercing riveting joint characteristics of aluminum and steel sheets [J]. Journal of Manufacturing Process, 2021, 69: 290-302.
- [13] Achira S, Abe Y, Mori K I. Self-pierce riveting of three thin sheets of aluminum alloy A5052 and 980 MPa steel [J]. Materials (Basel), 2022, 15 (3): 1010.
- [14] Zhang X L, He X C, Xing B Y, et al. Pre-holed self-piercing riveting of carbon fibre reinforced polymer laminates and commercially pure titanium sheets [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2020, 279: 116550.
- [15] 张子鑫.6061Al-CFRP 焊铆复合连接工艺研究与成形调控[D].大连:大连理工大学,2021.
- Zhang Z X. 6061Al-CFRP Welding and Riveting Composite Connection Process Research and Molding Control [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2021.