

上层板厚度对 HC340/590DP- $\text{AlSi}_{10}\text{MnMg}$ 自冲铆接接头力学性能的影响

覃清钰¹, 韦超忠¹, 张发晖¹, 廖祖煜²

- (1. 上汽通用五菱汽车股份有限公司 广西新能源汽车实验室, 广西 柳州 545007;
2. 湖南湖大艾盛汽车技术开发有限公司柳州分公司, 广西 柳州 545007)

摘要: 为了探究上层板厚度对 HC340/590DP 高强钢和 $\text{AlSi}_{10}\text{MnMg}$ 压铸铝合金自冲铆接接头力学性能的影响, 通过热处理提高了 $\text{AlSi}_{10}\text{MnMg}$ 压铸铝合金的伸长率, 随后将其与不同厚度的 HC340/590DP 高强钢铆接, 并测试接头的力学性能。实验结果表明, 采用 T7 热处理工艺时, $\text{AlSi}_{10}\text{MnMg}$ 压铸铝合金具有最优的铆接成形性能, 其伸长率达到 19%, 相比铸态伸长率 (11%) 提升了 72%。铆接过程中, 铆钉刺穿上层板的压力随上层板厚度的增大而增大。当上层板厚度为 0.8~2.0 mm 时, SPR 接头的失效载荷随上层板厚度先增大后减小, 并且具有函数关系: $y = e^{-1.02x^2 + 3.41x - 0.57}$ 。当上层板厚度为 1.6 mm 时, SPR 接头具有最大失效载荷 (9.8 kN) 和最大能量吸收值 (31.7 kJ)。

关键词: 上层板厚度; 自冲铆接; 压铸铝合金; 热处理; 失效载荷; 能量吸收

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.12.014

中图分类号: TG306

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2023) 12-0100-06

Influence of upper plate thickness on mechanical properties for HC340/590DP- $\text{AlSi}_{10}\text{MnMg}$ self-piercing riveted joint

Qin Qingyu¹, Wei Chaozhong¹, Zhang Fahui¹, Liao Zuyu²

- (1. Guangxi Laboratory of New Energy Automobile, SAIC GM Wuling Automobile Co., Ltd., Liuzhou 545007, China;
2. Hunan University Aisin Automobile Technology Development Co., Ltd. Liuzhou Branch, Liuzhou 545007, China)

Abstract: In order to investigate the influence of upper plate thickness on the mechanical properties of self-piercing riveting (SPR) between HC340/590DP high-strength steel and $\text{AlSi}_{10}\text{MnMg}$ die-cast aluminum alloy, the elongation of $\text{AlSi}_{10}\text{MnMg}$ die-cast aluminum alloy was improved by heat treatment, and then riveted with HC340/590DP high-strength steel of different thicknesses, and the mechanical properties of joints were tested. The experimental results show that when using the T7 heat treatment process, $\text{AlSi}_{10}\text{MnMg}$ die-cast aluminum alloy has optimal riveting formability, with an elongation of 19%, which is 72% higher than the as cast elongation (11%). During the riveting process, the pressure of the rivet piercing the upper plate increases with the increasing of upper plate thickness. When the thickness of upper plate is 0.8~2.0 mm, the failure load of SPR joint first increases and then decreases with the increasing of upper plate thickness, and has the functional relationship: $y = e^{-1.02x^2 + 3.41x - 0.57}$. When the thickness of upper plate is 1.6 mm, the SPR joint has the maximum failure load (9.8 kN) and the maximum energy absorption value (31.7 kJ).

Key words: upper plate thickness; self-piercing riveting; die-cast aluminum alloy; heat treatment; failure load; energy absorption

随着碳达峰、碳中和目标的提出, 我国在环保方面的法规日益严格。众所周知, 汽车轻量化结构

设计是实现节能、减少温室气体排放的有效手段^[1-2]。以轻质高强材料 (如铝合金、镁合金、碳纤维复合材料等) 代替传统钢材已成为实现车身减重目标的重要策略^[3-6]。综合考虑性能及成本, 现阶段钢/铝混合结构在车身设计制造中的应用潜力最大。然而, 由于物理性能、力学性能及焊接过程中脆性金属间化合物的生成, 传统电阻点焊无法实现钢/铝混合材料结构的有效连接^[7]。

自冲铆接 (Self-piercing Riveted, SPR) 是一种

收稿日期: 2023-09-07; 修订日期: 2023-10-13

基金项目: 广西科技重大专项 (2023AA04004, 2023AA04007);
柳州市科技计划项目 (2020GAAD0601)

作者简介: 覃清钰 (1994-), 男, 博士, 工程师

E-mail: qyqin17s@163.com

通信作者: 韦超忠 (1979-), 男, 学士, 高级工程师

E-mail: Chaozhong.Wei@sgmw.com.cn

冷加工机械连接工艺，因其铆接质量稳定、接头牢固、铆接过程无粉尘污染、易于实现自动化，近年来被越来越多的汽车制造商用于车身钢/铝混合结构连接，并引起了许多学者的关注^[8-12]。Zhang Y C 等^[13]研究了板材堆叠顺序对 B1500HS 钢/AA5052 铝合金 SPR 接头力学性能的影响，发现当钢板置于铝板上时 SPR 接头的失效位移、能量吸收值是铝板置于钢板上时 SPR 接头的 2 倍多。Zhou Z J 等^[14]研究了铆钉长度对 SPFC440 钢/AA5052 铝合金 SPR 接头力学性能的影响，结果表明，当铆钉长度比板材总厚度大 2.5 mm 时，其接头的疲劳性能优异。冯震等^[15]通过腐蚀周浸实验研究了 DP590 钢/AA5052 铝合金 SPR 接头分别在 0.6 mol · L⁻¹ 的 NaCl 溶液和 0.02 mol · L⁻¹ 的 NaHSO₃ 溶液腐蚀环境的静力学性能，结果表明，SPR 接头在酸性环境中的腐蚀速率大于盐性环境，然而其在盐性环境的静力学性能的衰减速率大于酸性环境。廖品翔等^[16]通过有限元仿真和剪切拉伸实验研究了下层铝合金板材厚度对 CR590 钢/AA6022-T4 铝合金以及 CR590 钢/S-6000-IH 铝合金 SPR 接头剪切强度的影响，结果表明，SPR 接头的剪切强度随下层铝合金板材厚度的增大呈先增大后保持不变的趋势。

在实际生产中，单个铸造铝合金零部件可能需要与多个不同厚度的高强钢零部件相连接，然而关于不同厚度的高强钢/单一厚度压铸铝合金 SPR 接头的相关研究报道较少。因此，本文通过热处理改善 3.0 mm 厚度的 AlSi₁₀MnMg 压铸铝合金板的伸长率，随后分别采用 0.8、1.2、1.4 和 1.6 mm 厚度的 HC340/590DP 高强钢板作为上层板与其进行 SPR 连接，并利用万能力学实验机分析上层板厚度对 SPR 接头静力学性能的影响。

1 实验材料与方法

1.1 实验材料

本实验所用高强钢为 HC340/590DP，其主要成分（%，质量分数）为：0.081 C，0.32 Si，1.81 Mn，0.008 P，0.002 S，余量为 Fe。所用压铸铝合金为 AlSi₁₀MnMg，其主要成分（%，质量分数）为：10.41 Si，0.61 Mn，0.42 Mg，0.015 Sr，0.12 Fe，0.002 Cu，0.001 Zn，0.09 Ti，余量为 Al。

1.2 压铸铝合金热处理

压铸铝合金铸态的伸长率较低，在 SPR 铆接时容易开裂。为了提高压铸铝合金的铆接性能，通常

需要对其进行热处理，本实验所用 AlSi₁₀MnMg 压铸铝合金的热处理工艺参数如表 1 所示。

表 1 热处理工艺参数
Table 1 Process parameters of heat treatment

热处理	工艺参数
T5	在 180 ℃ 固溶处理温度下保温 20 min
T6	在 515 ℃ 固溶处理温度下保温 60 min，空冷至室温，随后在 175 ℃ 时效处理温度下保温 120 min
T7	在 460 ℃ 固溶处理温度下保温 60 min，水冷至室温，随后在 175 ℃ 时效处理温度下保温 150 min

为了分析不同热处理状态下 AlSi₁₀MnMg 压铸铝合金的力学性能，根据 ASTM B557M-15^[17] 加工拉伸试样，其尺寸如图 1 所示。采用万能力学实验机（ETM504D，深圳万测设备有限公司）进行拉伸测试，拉伸速率为 2 mm · min⁻¹。

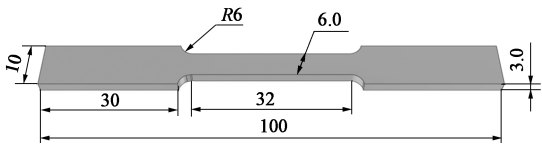


图 1 AlSi₁₀MnMg 压铸铝合金拉伸试样示意图
Fig. 1 Schematic diagram of AlSi₁₀MnMg die-cast aluminum alloy tensile specimen

1.3 SPR 连接及力学性能测试

采用 SPR 连接设备（EP-CTF-75SC，EPRESS）对试片进行铆接，如图 2 所示。其中，HC340/590DP 高强钢的厚度分别为 0.8、1.2、1.4、1.6 和 2.0 mm，AlSi₁₀MnMg 压铸铝合金的厚度为 3.0 mm。

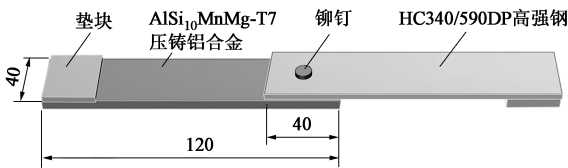


图 2 SPR 接头示意图
Fig. 2 Schematic diagram of SPR joint

为了避免剪切拉伸过程中因上下板材厚度不同而产生扭矩，需要对接头粘贴垫块，使夹持端的厚度相等（图 2）。通过万能力学实验机对 SPR 接头的静力学性能进行测试，拉伸速率为 2 mm · min⁻¹。

2 实验结果与讨论

2.1 压铸铝合金热处理分析

不同热处理状态下 AlSi₁₀MnMg 压铸铝合金的力

学性能如图 3 所示。由图 3 可以看出, 铸态 $\text{AlSi}_{10}\text{MnMg}$ 压铸铝合金的抗拉强度为 272 MPa, 伸长率为 11%。进行 T5 热处理后, 抗拉强度提升至 305 MPa, 伸长率略有减小, 为 10%。进行 T6 热处理后, 抗拉强度大幅减小到 206 MPa, 然而伸长率大幅提升至 17%。与 T6 热处理相比, T7 热处理后的 $\text{AlSi}_{10}\text{MnMg}$ 压铸铝合金的抗拉强度和伸长率均有所提升, 分别为 212 MPa 和 19%。为了减小 $\text{AlSi}_{10}\text{MnMg}$ 压铸铝合金在铆接成形过程中发生开裂的风险, 需要其具有较高的伸长率。综合考虑抗拉强度及铆接成形性能, 对待铆接的 $\text{AlSi}_{10}\text{MnMg}$ 压铸铝合金试样进行 T7 热处理。

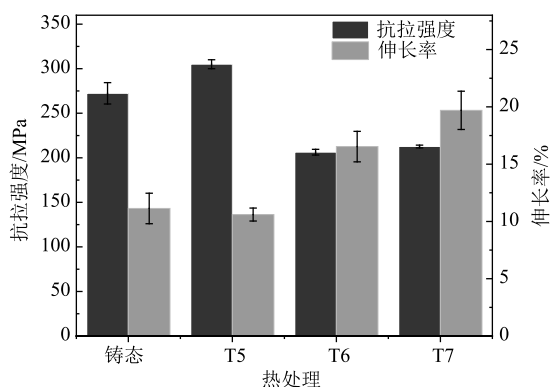


图 3 不同热处理状态 $\text{AlSi}_{10}\text{MnMg}$ 压铸铝合金的力学性能

Fig. 3 Mechanical properties of $\text{AlSi}_{10}\text{MnMg}$ die-cast aluminum alloy under different heat treatment conditions

2.2 铆接压力分析

铆接过程中不同阶段的铆接压力不同, 图 4 为铆接压力随位移的变化曲线。铆接压力代表铆接过程中铆钉刺入板材所受到的阻力, 位移代表铆钉刺入板材后向下运动的距离, SPR 接头的上层板厚度为 0.8、1.2、1.4、1.6 和 2.0 mm 时的位移分别为 5.2、4.8、6.9、6.9 和 6.9 mm。铆钉的位移均大于接头上下板的总厚度, 并且上层板厚度为 1.4、1.6 和 2.0 mm 时的铆钉位移相等。此外, 当铆钉刺穿上层板时, 铆接压力-位移曲线会出现明显的拐点。由图 4 可知, SPR 接头的上层板厚度为 0.8、1.2、1.4、1.6 和 2.0 mm 时刺穿压力分别为 9.5、14.6、16.2、19.8 和 20.1 kN, 刺穿压力随上层板厚度的增大而增大。

2.3 SPR 接头截面形貌分析

图 5 为不同上层板厚度时 SPR 接头的截面形貌, 所有接头的成形状况均良好, 未出现铆钉偏转或底部开裂。不同上层板厚度时 SPR 接头的截面参数如表 2 所示。当上层板厚度为 0.8 mm 时, 接头

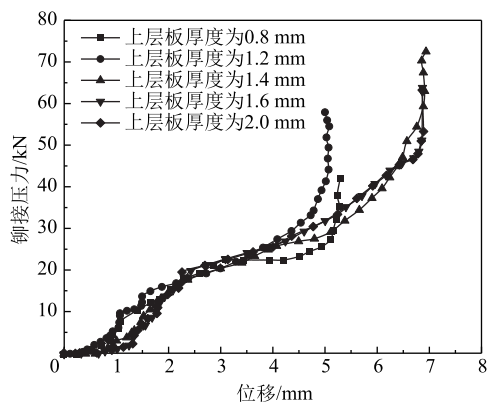


图 4 不同上层板厚度时 SPR 接头的铆接压力-位移曲线

Fig. 4 Riveting pressure-displacement curves of SPR joint with different upper plate thicknesses

的头高为 -0.27 mm, 低于上层板表面; 左右互锁值分别为 0.94 和 0.82 mm, 大于其他几种上层板厚度时 SPR 接头的互锁值。当上层板厚度分别为 1.2、1.4 和 1.6 mm 时, SPR 接头的头高为 0 mm, 与上层板表面平齐, 并且左右互锁值接近。当上层板厚度为 2.0 mm 时, SPR 接头的头高为 0 mm, 但其左右互锁值最小, 分别为 0.50 和 0.42 mm。所有上层板厚度的 SPR 接头的底切值均大于 1.0 mm, 接头发生开裂的风险小。

2.4 SPR 接头力学性能测试

图 6 为不同上层板厚度时 SPR 接头的剪切拉伸结果。在弹性变形阶段, 随着上层板厚度增大, 弹性变形阻力增大。当上层板厚度达到 1.6 mm 时, 弹性阶段拉伸曲线的斜率减小, 表明弹性变形的阻力有所减小。当上层板厚度为 2.0 mm 时, 其拉伸曲线与上层板厚度为 1.6 mm 时拉伸曲线弹性变形阶段的形状相近。此外, 图 6a 显示当上层板厚度为 1.4 和 2.0 mm 时, SPR 接头的拉伸失效位移约为 1.5 mm, 而其余上层板厚度时 SPR 接头的拉伸失效位移均大于 4.0 mm。图 6b 为不同上层板厚度时 SPR 接头的失效载荷, SPR 接头失效载荷随上层板厚度的增大呈先增大后减小的趋势。当上层板厚度为 0.8 mm 时, SPR 接头的失效载荷为 5.5 kN; 当上层板厚度为 1.6 mm 时, SPR 接头的失效载荷最大, 为 9.8 kN; 当上层板厚度增大至 2.0 mm 时, SPR 接头的失效载荷减小到 8.6 kN, 接近于上层板厚度为 1.4 mm 时的失效载荷。根据失效载荷随上层板厚度变化的图像, 利用式 (1) 对 SPR 接头的失效载荷进行拟合, 拟合后相关系数 R^2 为 0.9973, 调整后相关系数 R^2_{adj} 为 0.9946, 表明拟合结果收敛 (图 6b)。因此, SPR 接头失效载荷与上层板厚度具有如式 (2) 所示关系。

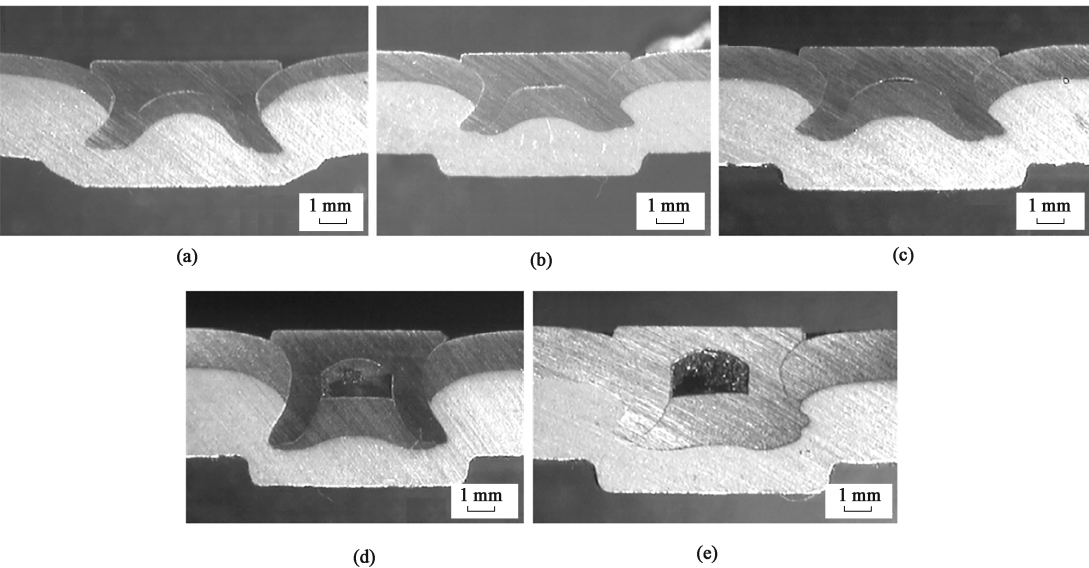


图 5 不同上层板厚度时 SPR 接头的截面形貌
(a) 0.8 mm (b) 1.2 mm (c) 1.4 mm (d) 1.6 mm (e) 2.0 mm
Fig. 5 Section morphologies of SPR joints with different upper plate thicknesses

表 2 不同上层板厚度时 SPR 接头的截面参数 (mm)
Table 2 Section parameters of SPR joints with different upper plate thicknesses (mm)

上层板厚度	左互锁值	右互锁值	头高	底切值
0.8	0.94	0.82	-0.27	1.19
1.2	0.71	0.61	0	1.35
1.4	0.63	0.63	0	1.52
1.6	0.65	0.74	0	1.27
2.0	0.50	0.42	0	1.38

$$y = e^{a+bx+cx^2} \quad (0.8 \leq x \leq 2.0) \quad (1)$$

$$y = e^{-1.02x^2+3.41x-0.57} \quad (0.8 \leq x \leq 2.0) \quad (2)$$

式中： y 为失效载荷； x 为上层板厚度； a 、 b 、 c 为常数。

能量吸收值反映了接头的减震缓冲能力，通过对 SPR 接头的载荷-位移曲线进行积分可获得拉伸过程接头的能量吸收值。图 7 为不同上层板厚度时 SPR 接头的能量吸收值。当上层板厚度为 0.8 和 1.2 mm 时，剪切拉伸过程中 SPR 接头的能量吸收值接近，分别为 17.4 和 19.5 kJ。当上层板厚度为 1.4 和 2.0 mm 时，SPR 接头的能量吸收值明显小于其他条件，分别为 8.1 和 7.7 kJ。当上层板厚度为 1.6 mm 时，接头能量吸收值最大，为 31.7 kJ，相比其他条件至少提升了 63%。

接头的剪切刚度反映了其抵抗剪切拉伸变形的能力，通过对图 6a 中的剪切拉伸曲线数据进行处

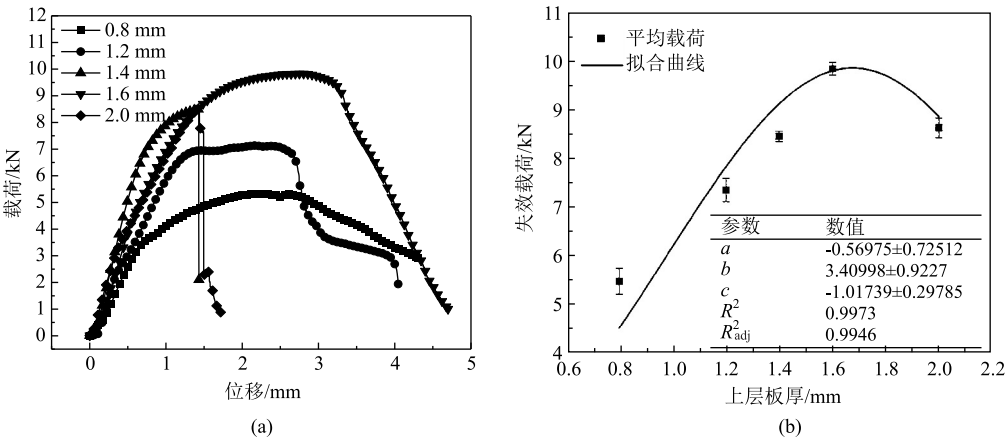


图 6 不同上层板厚度时 SPR 接头的剪切拉伸结果
(a) 载荷-位移曲线 (b) 失效载荷
Fig. 6 Shear tensile results of SPR joints with different upper plate thicknesses
(a) Load-displacement curve (b) Failure load

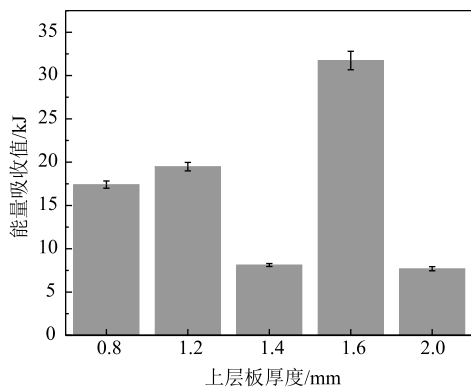


图 7 不同上层板厚度时 SPR 接头的能量吸收值

Fig. 7 Energy absorption values of SPR joints with different upper plate thicknesses

理, 计算剪切拉伸载荷和位移之比, 可以得到剪切拉伸过程中不同上层板厚度的 SPR 接头的剪切刚度随位移的变化曲线 (图 8)。从图 8 中可以看出, 在经历短距离弹性变形后, 不同上层板厚度的 SPR 接头的剪切刚度出现明显差异。当上层板厚度为 1.4 和 2.0 mm 时, 剪切拉伸过程中 SPR 接头的剪切刚度值迅速提高, 在达到最大值后迅速下降, 直至断裂。当上层板厚度为 0.8、1.2 和 1.6 mm 时, 他们的剪切刚度曲线的变化趋势相似, 在达到最大值后缓慢下降。

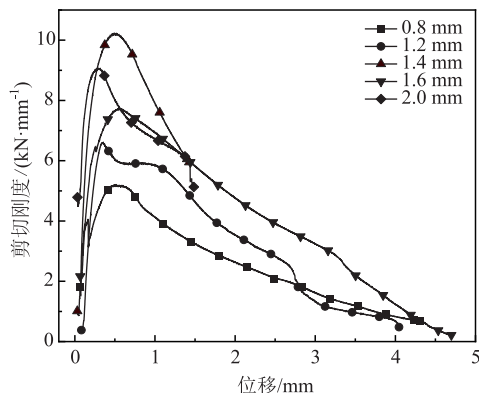


图 8 接头的剪切刚度曲线

Fig. 8 Shear stiffness curves of joints

3 结论

(1) 采用 T7 热处理工艺时, $\text{AlSi}_{10}\text{MnMg}$ 压铸铝合金具有最优的铆接成形性能, 其伸长率达到 19%, 相比铸态 $\text{AlSi}_{10}\text{MnMg}$ 压铸铝合金的伸长率 (11%) 提升了 72%。

(2) 铆接过程中, 铆钉刺穿上层板的压力随上层板厚度的增大而增大。

(3) 当上层板厚度为 0.8~2.0 mm 时, SPR 接头的失效载荷随上层板厚度的增大呈先增大后减小的趋势, 并且具有函数关系: $y = e^{-1.02x^2 + 3.41x - 0.57}$ 。

(4) 当上层板厚度为 1.6 mm 时, SPR 接头具有最大的失效载荷 (9.8 kN) 和最大的能量吸收值 (31.7 kJ), 综合静力学性能优异。

参考文献:

- [1] Zheng K, Politis D J, Wang L, et al. A review on forming techniques for manufacturing lightweight complex-shaped aluminium panel components [J]. International Journal of Lightweight Materials and Manufacture, 2018, 1 (2): 55-80.
- [2] 朱上, 李志辉, 闫丽珍, 等. 预时效对汽车用新型 Al-Mg-Si-Cu-Zn 合金烘烤硬化性的影响 [J]. 稀有金属, 2022, 46 (3): 281-288.
- [3] Zhu S, Li Z H, Yan L Z, et al. Bake-hardening response in a novel Al-Mg-Si-Cu-Zn alloy with pre-aging [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2022, 46 (3): 281-288.
- [3] 宋承裕, 何晓聪, 魏文杰, 等. 粘接剂对复合材料/钢自冲铆接头力学性能的影响 [J]. 有色金属工程, 2020, 10 (3): 13-17.
- [4] Song C Y, He X C, Wei W J, et al. Effect of adhesive on mechanical properties of composite/steel self-piercing joints [J]. Nonferrous Metals Engineering, 2020, 10 (3): 13-17.
- [4] 王世鹏, 何晓聪, 刘佳沐, 等. 三明治结构自冲铆接头力学性能及失效模式分析 [J]. 有色金属工程, 2020, 10 (8): 27-32.
- [5] Wang S P, He X C, Liu J M, et al. Analysis of mechanical properties and failure modes of sandwich structure self-piercing riveting joint [J]. Nonferrous Metals Engineering, 2020, 10 (8): 27-32.
- [5] 刘文伟, 王耀奇, 韩玉杰, 等. 二级时效对热冲压固溶 7B04 铝合金组织与性能的影响 [J]. 稀有金属, 2022, 46 (9): 1146-1152.
- [6] Liu W Y, Wang Y Q, Han Y J, et al. Microstructure and properties of hot stamping solution state 7B04 aluminum alloy with two-step aging treatment [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2022, 46 (9): 1146-1152.
- [6] 霍小乐, 赵伦, 许龙, 等. 超声振动对 5A06 铝合金自冲铆接头静力学性能影响 [J]. 材料科学与工艺, 2023, 31 (2): 44-49.
- [7] Huo X L, Zhao L, Xu L, et al. Effect of ultrasonic vibration on static properties of 5A06 aluminum alloy self-piercing riveting joints [J]. Materials Science and Technology, 2023, 31 (2): 44-49.
- [7] 刘亚, 刘亚玲, 彭浩平, 等. Al-3B 变质对铸造 Al-10Si 合金显微组织与力学性能的影响 [J]. 稀有金属, 2021, 45 (2): 154-162.
- [7] Liu Y, Liu Y L, Peng H P, et al. Al-3B modification on microstructure and mechanical properties of Al-10Si alloy [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2021, 45 (2): 154-162.

(下转第 110 页)