

基于 DEFORM 的 5052 铝合金板料防水铆接成形研究

王端义

(江苏建筑职业技术学院 智能制造学院, 江苏 徐州 221116)

摘要: 以新能源汽车电池包中两层 1.5 mm 厚度的 5052 铝合金板料铆接成形为研究对象, 基于板料铆接后的防水要求设计了一种新结构铆钉, 并借助 DEFORM-2D 有限元软件模拟了板料铆接成形过程, 利用安装模具和铆接设备对模拟结果进行试验验证。研究得到钉头高度、剩余厚度、铆钉与上层板的互锁长度以及下层板与上层板的互锁长度的有限元模拟值分别为 0.038、0.210、0.526 和 0.505 mm; 模拟值与试验值之间的相对误差分别为 7.89%、7.14%、6.08% 和 12.67%, 从而验证了 DEFORM 仿真应用于板料铆接成形模拟的可靠性。此外, 通过模拟分析得知: 铆接成形后的互锁长度随着铆接速度以及安装模具宽度的不断增大表现出增加的变化规律, 而随着安装模具深度的增加呈现出逐渐减小的变化趋势。

关键词: 防水铆钉; 5052 铝合金; 互锁长度; 剩余厚度; 钉头高度

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.12.011

中图分类号: TG386 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2023) 12-0081-06

Research on waterproof riveting for 5052 aluminum alloy sheet based on DEFORM

Wang Duanyi

(School of Intelligence Manufacturing, Jiangsu Vocational Institute of Architectural Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: For the riveting forming of two layers of 5052 aluminum alloy sheets with the thickness of 1.5 mm in the battery pack of new energy vehicles, a new structural rivet was designed based on the waterproof requirement after riveting of sheets. Then, the sheet metal riveting forming process was simulated based on finite element software DEFORM-2D, and the simulation results were verified by installing the die and riveting equipment. The simulation results show that the simulation values of head penetration, residual thickness, interlocking length between rivet and upper plate, and interlocking length between lower plate and upper plate are 0.038, 0.210, 0.526 and 0.505 mm respectively. The relative errors between numerical simulation and experimental values are 7.89%, 7.14%, 6.08% and 12.67% respectively. Therefore, the reliability of DEFORM simulation applied to the riveting is verified by experiments. In addition, through simulation analysis it is known that the interlock length increases with the increasing of riveting speed and die installation width, while it decreases with the increasing of die installation depth.

Key words: waterproof rivet; 5052 aluminum alloy; interlocking length; residual thickness; head penetration

随着新能源汽车行业的不断发展, 铝合金因具有低密度、高强度以及耐蚀性等特点而在新能源电池包中得到广泛应用。本文以新能源汽车电池包中两层 1.5 mm 厚度的 5052 铝合金板料的铆接成形为研究对象, 如图 1 所示, 利用自冲铆接 (Self-piercing Riveting, SPR) 对两层铝合金板料进行铆接时, 由于铆钉需要刺穿上层板进入下层板, 并在安装模具的作用下形成互锁^[1-6], 这便导致在两

层板料之间的缝隙加载一定的水压时, 水会从被铆钉刺穿的第 1 层板料进入电池包内部, 进而引起汽车电池短路等风险。基于板料铆接成形后的防水要求, 文中提出一种防水结构的铆钉, 当防水铆钉压入上层板料时, 铆钉与上层板以及上层板与下层板之间形成互锁而不会刺穿上层板料 (图 2), 使得水压不会进入上层板料, 从而实现板料铆接成形的防水目的。此外, 本文应用 DEFORM-2D 有限元软件模拟了防水铆钉铆接两层 1.5 mm 厚度的 5052 铝合金板料的铆接成形过程, 研究了工艺过程参数对铆接成形质量的影响, 从而节省新产品的研发成本, 缩短新产品的开发周期, 并且为电池包防水铆接成形的实际生产提供一定的

收稿日期: 2023-05-02; 修订日期: 2023-08-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (11402235)

作者简介: 王端义 (1976-), 男, 硕士, 教授, 高级工程师

E-mail: 519047033@qq.com

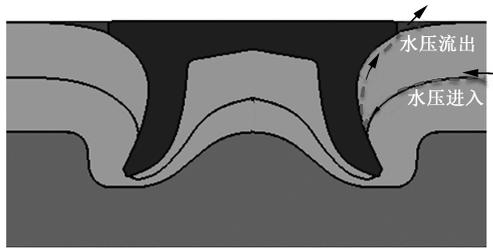


图 1 自冲铆接示意图

Fig. 1 Schematic diagram of self-piercing riveting



图 2 防水铆钉铆接示意图

Fig. 2 Schematic diagram of riveting by waterproof rivet

指导^[7-10]。

1 防水铆钉铆接成形的有限元模拟及试验验证

1.1 几何模型

借助 Pro/E 软件建立如图 3 所示的防水铆钉铆接成形的几何模型，利用 DEFORM-2D 有限元软件模拟板料铆接成形过程。在防水铆钉铆接成形的模拟过程中，上层板与下层板均为 1.5 mm 料厚的 5052 铝合金，铆钉材料为 10B33 冷镦钢，铆钉的尺寸规格为 $\Phi 5.3 \text{ mm} \times 5.5 \text{ mm}$ 。安装上模、安装下模以及压边圈均设置为刚性体，上层板、下层板以及铆钉均设置为弹塑性体。压边圈的压边力设置为 5 kN，铆接设备的铆接速度设置为 $35 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ，防水铆钉及模具与板料之间的摩擦因数设置为 0.12，材料的断裂准则选取 Normalized C & L^[11-13]。此外，为了保证防水铆钉铆接成形模拟的顺利进行，对板料铆接变形区域进行局部网格细化，并且每 4 步进行一次网格的自动重新划分。

1.2 材料模型

利用 MTS Landmak100 设备对 10B33 冷镦钢与 5052 铝合金材料进行拉伸试验，获得两种材料的应力-应变曲线，分别如图 4 和图 5 所示。其中，10B33 冷镦钢的弹性模量为 203500 MPa，抗拉强度为 1295 MPa；5052 铝合金的弹性模量为 69500 MPa，

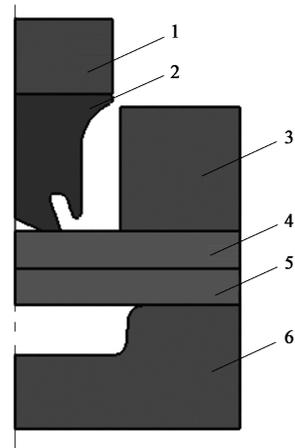


图 3 防水铆钉铆接的几何模型

1. 上模 2. 防水铆钉 3. 压边圈 4. 上层板 5. 下层板 6. 下模

Fig. 3 Geometric model of riveting by waterproof rivet

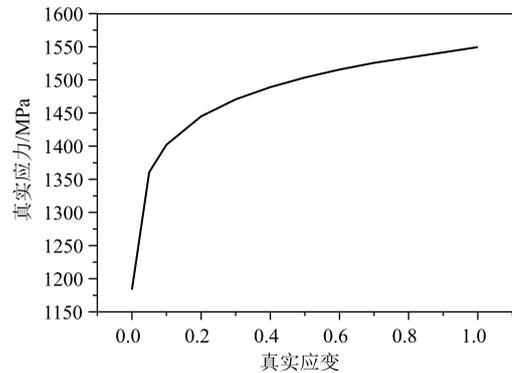


图 4 10B33 冷镦钢的真实应力-真实应变曲线

Fig. 4 True stress-true strain curve for 10B33 cold heading steel

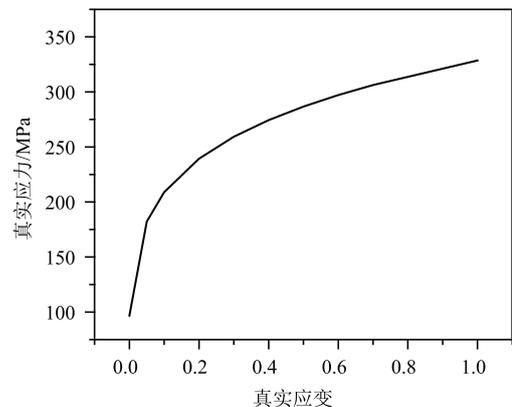


图 5 5052 铝合金的真实应力-应变曲线

Fig. 5 True stress-true strain curve for Al5052 aluminium alloy

屈服强度为 97 MPa，抗拉强度为 196 MPa，伸长率为 23.04%。

1.3 有限元模拟结果

板料铆接成形质量评价指标主要有钉头高度、剩余厚度以及互锁长度。在防水铆钉铆接成形过程

中，铆钉与上层板的互锁长度是指铆钉脚尖与钉脚柱外表面之间的水平距离；下层板与上层板的互锁长度是指下板变形圆角区与上板变形圆角区之间的水平距离。运用 DEFORM-2D 数值仿真软件，对防水铆钉铆接 5052 铝合金板料的成形过程进行有限元模拟，得到的模拟结果如图 6 所示。借助 DEFORM-2D 软件后处理的测量功能得知，钉头高度、剩余厚度、铆钉与上层板的互锁长度以及下层板与上层板的互锁长度的有限元模拟值分别为 0.038、0.210、0.526 和 0.505 mm。此外，对铆接后上层板的最薄区域进行测量，其数值为 0.124 mm。

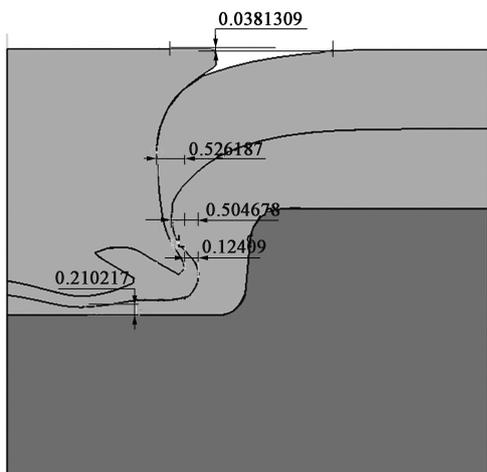


图 6 防水铆钉铆接的模拟结果

Fig. 6 Simulation result of riveting by waterproof rivet

1.4 防水铆钉铆接成形的试验验证

为了对 DEFORM 应用于防水铆钉铆接成形模拟的准确性及可靠性进行试验验证，借助安装模具和铆接设备对两层厚度为 1.5 mm 的 5052 铝合金板料进行铆接成形试验。

图 7 为试验采用的防水铆钉，其中铆接成形的试验参数为：铆钉直径为 $\Phi 5.3$ mm，铆钉长度为 5.5 mm，压边圈的压边力为 5 kN，铆接板料的速度为 $35 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ，并利用切割设备对防水铆钉的铆接试件沿接头的中心面进行切割，得出试件的剖面如图 8 所示。对于防水铆钉铆接成形，其成形质量主要通过钉头高度、剩余厚度和互锁长度进行评价。从图 8 中可以看出，铆接剖面的钉头高度为 0.041 mm，剩余厚度为 0.195 mm，铆钉与上层板的互锁长度为 0.558 mm，下层板与上层板的互锁长度为 0.569 mm。钉头高度、剩余厚度、铆钉与上层板的互锁长度以及下层板与上层板的互锁长度的有限元仿真值与试验值之间的相对误差分别为



图 7 防水铆钉实物图

Fig. 7 Physical diagram of waterproof rivets

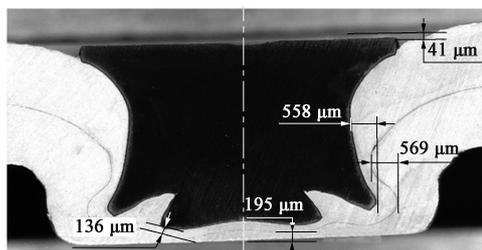


图 8 防水铆钉铆接的试验剖面

Fig. 8 Experimental cross-section for riveting by waterproof rivet

7.89%、7.14%、6.08%和 12.67%。此外，铆接后上层板的最薄区域出现在铆钉脚尖与上层板接触的区域，其数值为 0.136 mm。分析有限元仿真结果与试验结果产生误差的原因为：不同批次材料的性能差异、铆接成形的安装模具制造公差和铆接设备等多个因素会对防水铆钉铆接成形的试验结果产生综合影响，然而有限元仿真不能将上述所有的影响因素均综合考虑进去。但模拟值与试验值之间的相对误差可以满足企业实际生产应用的需求，从而验证了 DEFORM 模拟仿真应用于 5052 铝合金板料防水铆钉铆接成形过程的准确性与可靠性。

为了进一步验证铆钉铆接后的防水效果，采用伟仪 WEYII 气密测试仪对电池包进行测试，从进气口充气，施加 35 kPa 的压力，然后观察压力值的泄露情况。结果显示铆接后的铆钉通过了客户端的现场测试。此外，在铆钉区域喷洒水来观察铆钉区域是否有气泡产生，测试过程中未发现气泡产生，这也说明未发生漏气现象，即铆接后具有防水功能，测试如图 9 所示。

基于铆钉铆接后满足防水要求的基础上，在铆钉铆接成形后进行力学性能测试，包括剪切测试、剥离测试以及十字拉伸测试，如图 10~图 12 所示。每种试验测试 5 组，得到剪切力、剥离力以及十字拉伸力的平均值分别为 4054、1071 和 2096 N。此

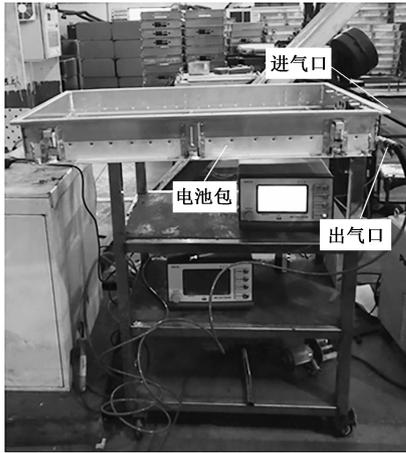


图 9 气密性测试
Fig. 9 Air tightness test

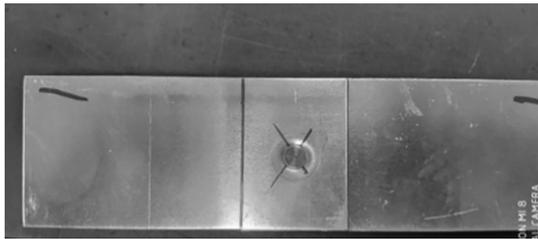


图 10 剪切测试
Fig. 10 Shear test

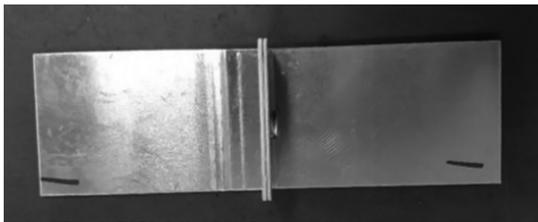


图 11 剥离测试
Fig. 11 Peeling test

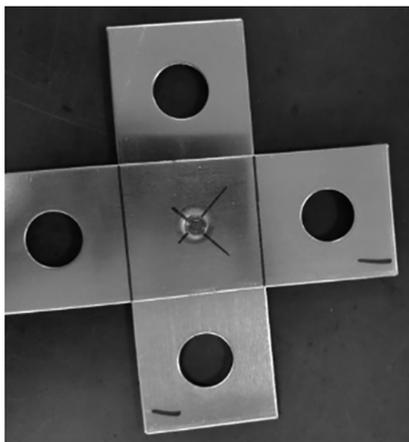


图 12 十字拉伸测试
Fig. 12 Cross tensile test

外,对同规格尺寸的自冲铆接铆钉进行铆接试验,得到剪切力、剥离力以及十字拉伸力的平均值分别为 3880、947 和 1823 N。相比于 SPR 铆接力,防水铆钉的剪切力、剥离力以及十字拉伸力的增加比例分别为 4.29%、11.58% 和 13.02%。

2 工艺参数对防水铆钉铆接质量的影响

在评价板料铆接成形质量的指标中,互锁长度是最重要的强度指标,因此,本文研究了安装模具的模具深度、模具宽度以及铆接设备的铆接速度对互锁长度影响的变化趋势。

2.1 模具深度对铆接质量的影响

为了研究安装模具深度对互锁长度的影响,文中将铆接速度设置为 $35 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, 模具深度分别为 1.8、1.9、2.0、2.1 和 2.2 mm, 利用 DEFORM-2D 有限元仿真软件的后处理功能测量出互锁长度的模拟值, 得出铆钉与上层板以及下层板与上层板的互锁长度与模具深度之间的变化趋势如图 13 所示。从图 13 中可以看出, 随着模具深度的不断增加, 铆钉与上层板以及下层板与上层板的互锁长度呈现逐渐减小的变化趋势。分析其原因为: 随着安装模具深度的逐渐增大, 其会对防水铆钉的成形过程与受力特点产生影响, 导致防水铆钉腿部压入上层板料时, 材料流入防水铆钉底部容槽的体积相对减小, 使得铆钉腿部未能充分展开, 而且模具深度的增加导致铆钉受到的安装模具的反作用约束力也较小。上述综合因素的影响致使防水铆钉与上层板以及下层板与上层板的互锁长度有一定程度的减小。

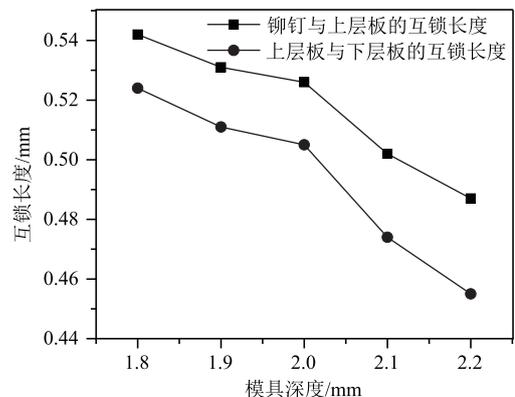


图 13 互锁长度与模具深度之间的关系曲线
Fig. 13 Relationship curves between interlocking length and die depth

2.2 模具宽度对铆接质量的影响

为了分析模具宽度对防水铆钉铆接成形后互锁长度的影响，文中选择模具宽度分别为 8.95、9.05、9.15、9.25 和 9.35 mm 进行有限元模拟，得出铆钉与上层板以及下层板与上层板的互锁长度与模具宽度之间的变化规律如图 14 所示。

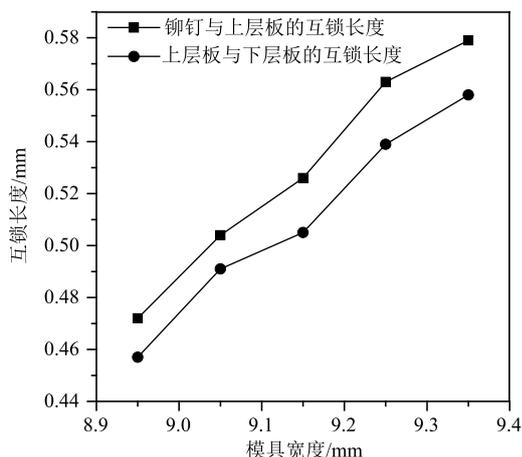


图 14 互锁长度与模具宽度之间的关系曲线

Fig. 14 Relationship curves between interlocking length and die width

由图 14 中可以得知，随着模具宽度的不断增大，板料铆接成形后的互锁长度表现出不断增大的变化规律。对其原因进行分析得知：当板料铆接成形的安装模具深度为定值时，安装模具型腔容纳材料的体积会随着安装模具宽度的逐渐增大而增加，而型腔容料体积的增加使得材料在安装模具的型腔内部更容易向两侧发生材料的流动与变形，其使得防水铆钉的腿部在压入 5052 铝合金板料的过程中易于向两侧展开，最终导致防水铆钉铆接板料成形的互锁长度增加。

2.3 铆接速度对铆接质量的影响

为了研究铆接速度对防水铆钉铆接成形质量的影响，本文将其他参数保持不变，选择铆接速度分别为 15、25、35、45 和 55 $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 进行模拟，得出铆钉与上层板以及下层板与上层板的互锁长度与铆接速度之间的变化关系如图 15 所示。由图 15 可以得知，随着铆接设备铆接速度的逐渐增大，铆接后的互锁长度呈现出逐渐增加的变化规律。分析其原因为：当增大铆接设备的铆接速度时，其会影响板料铆接成形过程中的最大铆接力，然而最大铆接力的增加会导致防水铆钉腿部向两侧展开变形时所

受到的作用力有一定程度增加。上述因素使得材料在安装模具的型腔内部更加容易发生材料流动与变形，从而有利于防水铆钉腿部挤入板料之中并展开。

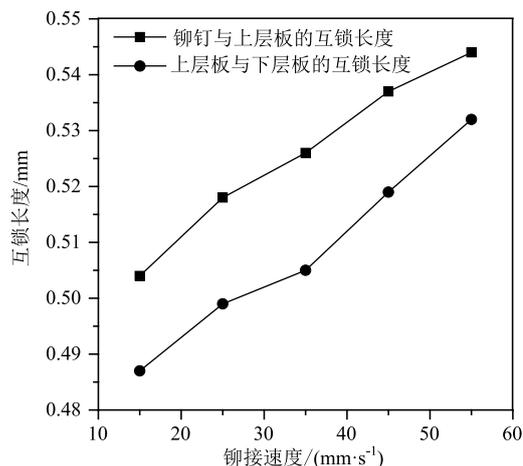


图 15 互锁长度与铆接速度之间的关系曲线

Fig. 15 Relationship curves between interlocking length and riveting speed

3 结论

(1) 利用防水铆钉对两层 1.5 mm 厚度的 5052 铝合金板料进行铆接成形，钉头高度、剩余厚度、铆钉与上层板的互锁长度以及下层板与上层板的互锁长度的有限元模拟值分别为 0.037、0.210、0.526 和 0.505 mm，其所对应的试验值分别为 0.041、0.195、0.558 和 0.569 mm。有限元模拟值与试验值之间的相对误差分别为 10.81%、7.14%、6.08% 和 12.67%。该误差值在企业能够接受的误差范围之内，从而为防水铆钉铆接板料成形的安装模具的设计提供重要的指导。此外，防水铆钉铆接成形后的剪切力、剥离力以及十字拉伸力的平均值分别为 4054、1071 和 2096 N，其性能相比于自冲铆接增加的比例分别为 4.29%、11.58% 和 13.02%。

(2) 铆钉与上层板以及下层板与上层板的互锁长度随着模具宽度与铆接速度的增加而不断增大，而随着模具深度的增加则呈现出逐渐减小的变化趋势。

参考文献：

- [1] 孙晓婷, 曾凯, 何晓聪, 等. 基于响应面法的铝合金自冲铆接头强度预测模型 [J]. 塑性工程学报, 2020, 27 (8): 199-204.

- self-piercing riveted joints of aluminum alloy based on response surface method [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2020, 27 (8): 199-204.
- [2] 曾凯, 何晓聪, 邢保英. 钉脚张开度对自冲铆构件机械内锁刚度的影响 [J]. 焊接学报, 2019, 40 (6): 143-147, 167.
Zeng K, He X C, Xing B Y. Effect of the degree of rivet opening on the rigidity of the interlock in self-piercing riveting joints [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2019, 40 (6): 143-147, 167.
- [3] 魏文杰, 何晓聪, 张先炼, 等. DP780/AA6061 薄板自冲铆接头微动损伤特性 [J]. 机械工程学报, 2020, 56 (6): 169-175.
Wei W J, He X C, Zhang X L, et al. Characteristics of fretting damage in hybrid DP780/AA6061 self-piercing riveted joints [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56 (6): 169-175.
- [4] 刘洋, 庄蔚敏, 施宏达. 自冲铆接头疲劳性能影响因素研究进展 [J]. 材料导报, 2019, 33 (11): 1825-1830.
Liu Y, Zhuang W M, Shi H D. Influencing factors on fatigue performance of self-piercing riveted joints: A review [J]. Materials Reports, 2019, 33 (11): 1825-1830.
- [5] 廖品翔, 林建平, 闵峻英, 等. 下板厚度对钢/铝自冲铆接头单搭剪切强度的影响 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (7): 145-153.
Liao P X, Lin J P, Min J Y, et al. Influence of lower plate thickness on single lap shear strength of joint in steel and aluminum self-piercing riveting [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (7): 145-153.
- [6] 黄志超, 张玉宽, 姜玉强. 不同夹层材料层合板与 AA5052 铝合金自冲铆接头成形质量与静强度对比 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (11): 87-94.
Huang Z C, Zhang Y K, Jiang Y Q. Comparison on forming quality and static strength for self-piercing riveting joints of laminated plates with different sandwich materials and AA5052 aluminum alloy [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (11): 87-94.
- [7] 郭子鑫, 赵伦, 郭媛媛, 等. TA1/5A06 同质自冲铆接头的力学性能 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (12): 135-141.
Guo Z X, Zhao L, Guo Y Y, et al. Mechanical properties for TA1/5A06 homogeneous self-piercing riveted joints [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (12): 135-141.
- [8] 贾颖莲, 何世松. 异种材质自冲铆接头成形质量研究 [J]. 现代制造工程, 2020, (7): 66-71.
Jia Y L, He S S. Study on forming quality of self-piercing riveting joints of different materials [J]. Modern Manufacturing Engineering, 2020, (7): 66-71.
- [9] 黄志超, 李玲玲, 李海洲. 碳纤维复合材料与 5052 铝合金空心与半空心自冲铆接静强度分析 [J]. 塑性工程学报, 2022, 29 (2): 20-27.
Huang Z C, Li L L, Li H Z. Static strength analysis of hollow and semi-hollow self-piercing riveting between carbon fiber composite and 5052 aluminum alloy [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2022, 29 (2): 20-27.
- [10] 丁文有, 何晓聪, 刘佳沐, 等. 碳纤维增强聚合物-AA5052 铝合金三层板自冲铆接性能 [J]. 科学技术与工程, 2018, 18 (25): 143-147.
Ding W Y, He X C, Liu J M, et al. Performance of self-pierce riveting based on carbon fiber reinforced polymer-AA5052 aluminum alloy three-layer sheets [J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18 (25): 143-147.
- [11] 张雨桐, 刘瑞军. 基于 Simufact Forming 的半空心铆钉自冲铆接参数对铆接成形的影响研究 [J]. 机械研究与应用, 2016, 29 (1): 4-7.
Zhang Y T, Liu R J. Impact research on self-piercing riveting parameters of half-hollow rivet on riveting forming based on the Simufact Forming simulation [J]. Mechanical Research and Application, 2016, 29 (1): 4-7.
- [12] 张永超, 黄志超, 贾颖莲. B1500HS 高强度钢与 AA5052 铝合金自冲铆接成形与力学性能分析 [J]. 塑性工程学报, 2021, 28 (10): 122-129.
Zhang Y C, Huang Z C, Jia Y L. Forming and mechanical properties analysis of self-piercing riveted joints of B1500HS high strength steel and AA5052 aluminum alloy [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2021, 28 (10): 122-129.
- [13] 邢保英, 何晓聪, 王玉奇, 等. 铝合金自冲铆接头静力学性能及失效机理分析 [J]. 焊接学报, 2015, 36 (9): 47-51.
Xing B Y, He X C, Wang Y Q, et al. Static mechanical properties and failure mechanism of self-piercing riveted aluminum alloy joint [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2015, 36 (9): 47-51.

警惕不法网站，保障投稿安全

近期，本刊接到多名作者投诉，网络上出现冒充《锻压技术》杂志官方网站的伪网站，如 www.dyjsz.cn，这些网站盗用本杂志官网内容及相关行业信息，误导和欺骗广大投稿作者，骗取文章版面费、套取作者文章及个人信息，侵犯了广大作者的切身利益。

特此声明，本刊唯一官方网站为 www.fstjournal.net，投稿方式为网站注册登录投稿，不接受邮箱投稿。请作者投稿时务必认准杂志官方网站，谨防受骗。

本刊郑重声明伪网站相关人员尽快停止违法行为，否则将严肃处理，并将运用一切法律手段维护本刊的权利。

请广大读者协助本刊监督网络上的不法行为，一经发现，请联系本刊，本刊将及时处理，共同努力营造良好的期刊网络氛围。

《锻压技术》杂志联系方式：fst@263.net；010-62920652。

《锻压技术》编辑部