

一体化压铸铝合金压铆技术的开发

何绍勇¹ 孙永明¹ 万里^{1,2} 伍宝坚¹ 黄志垣¹ 卢涛² 钟宇毅² 林宇飞¹

(1. 广东鸿图科技股份有限公司, 肇庆 526108; 2. 广东鸿图汽车零部件有限公司, 广州 510700)

摘要 围绕一体化压铸铝合金压铆技术, 阐述其工作原理与工艺要求, 并介绍技术开发与工艺参数优化, 包括设备、材料、选型、视觉引导、检验工具及评估。分析了压铆连接的质量缺陷并给出改善措施。结果表明, 压铆压力在 45~50 kN 时, M10 压铆螺母性能与外观良好。随着自动化程度提高, 该技术有望实现大规模生产, 加快汽车组装线速度、降低成本并推动汽车轻量化发展, 满足大型车身结构件连接需求。

关键词 一体化压铸; 车身结构件; 前机舱; 压铆

中图分类号 TG249.2 文献标志码 A DOI: 10.15980/j.tzzz.Z20240033

Development of Press-riveting Technology for Integrated Die-casting Aluminum Alloy

HE Shaoyong¹, SUN Yongming¹, WAN Li^{1,2}, WU Baojian¹, HUANG Zhiyuan¹, LU Tao², ZHONG Yuyi², LIN Yufei¹

(1. Guangdong Hongtu Technology Co., Ltd., Zhaoqing 526108; 2. Guangdong Hongtu Automotive Parts Co., Ltd., Guangzhou 510700)

Abstract: Focusing on the riveting technology for integrated die-casting aluminum alloy, the working principle and process requirements were expounded, and the technology development as well as process parameter optimization was introduced, including equipment, materials, mold selection, visual guidance, inspection tools, and evaluation. The results indicate that the performance and appearance of M10 rivet nut is desirable with the rivet pressure of 45~50 kN. The quality defects of rivet connections were analyzed and improvement measures were provided. With the improvement of automation degree, the technology is expected to achieve large-scale production, accelerating the speed of automobile assembly lines, reducing costs, promoting the development of lightweight automobiles, which can meet the connection needs for large-scale body structural components.

Key Words: Integrated Die-casting, Vehicle Structural Components, Front Cabin, Press-riveting

压铆是一种使用压力将铆钉与被连接部件紧密连接的方法, 可满足大多数机械连接的强度要求, 其承载能力通常在标准值的 1.5~2 倍之间, 具有连接强度高、可靠性好、精度高、适用范围广等特点。压铆工艺的连接精度在 0.02 mm 以内, 可连接各种材料和形状的部件, 在飞机、汽车、船舶、桥梁等领域广泛应用。此外, 压铆作为一种工业化生产工艺, 生产效率较高。

与传统的钢车身零件的 SPR (Self-Piercing Riveting)、焊接、FDS (Flow Drill Screwing) 等连接不同, 压铆连接技术在一体化压铸铝合金零件中的应用存在较多未知的问题^[1-4]。通过试验对一体化压铸铝合金前机舱零件, 应用机器自动压铆的方法, 对安装好的螺母质

量进行评估, 包括螺母的外观质量、前机舱表面外观质量、无损检测和力学性能测试 4 个部分, 旨在为相关生产提供参考。

1 压铆技术的工作原理及工艺要求

1.1 压铆技术的工作原理

压铆是利用专门设计的铆接头, 在两个或多个工件之间形成坚固的连接。其原理是通过拉伸、挤压、弯曲等变形力, 使铆钉的尾部强行扩张, 填满预先钻好的孔洞, 同时使两个工件受到相互挤压, 生成一定的压力和摩擦力, 从而形成坚固的连接。常见的紧固件压铆连接方式为自穿刺、自扣紧以及翻铆, 见图 1, 其中自穿刺

收稿日期: 2024-10-29; 修订日期: 2024-11-25

基金项目: 国家工信部高质量发展资助项目 (2340STCZB1927)

第一作者简介: 何绍勇, 男, 1991 年出生, 工程师, E-mail: hsy@ght-china.com

通信作者: 万里, 男, 1970 年出生, 教授级高工, E-mail: wanli@ght-china.com

引用格式: 何绍勇, 孙永明, 万里, 等. 一体化压铸铝合金压铆技术的开发[J]. 特种铸造及有色合金, 2025, 45(5): 651-655.

HE S Y, SUN Y M, WANG L, et al. Development of press-riveting technology for integrated die-casting aluminum alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2025, 45(5): 651-655.

压铆连接,安装的工件不需要进行预开孔,而自扣紧与翻铆类型的压铆连接,工件需要进行预开孔设计。

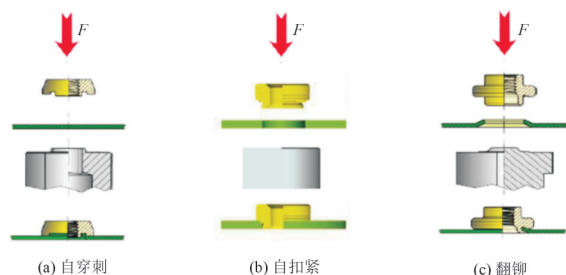


图1 3种紧固件压铆连接方式

Fig.1 Rivet connection modes of fasteners

1.2 压铆技术的工艺要求

以某一体化压铸前机舱零件压铆工艺要求为例,零件需安装 M10 压铆螺母^[5-6],安装数量共 12 个,安装点位见图 2。性能要求见表 1。

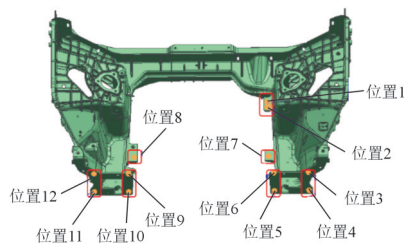


图2 前机舱的紧固件压铆点位图

Fig.2 Riveting point diagram of fasteners in the front cabin

表1 紧固件 M10 压铆螺母的性能要求

Tab.1 Performance requirements for fastener M10 rivet nut

数量	破坏扭矩/(N·m)	剥离扭矩/(N·m)	推出力/N
12	≥90	≥90	≥2 000

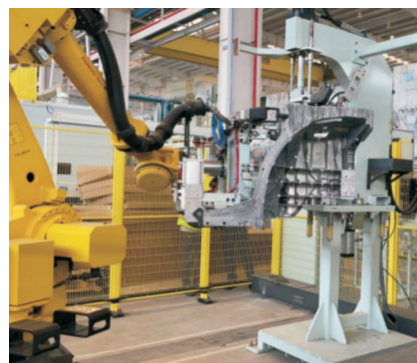
2 压铆技术开发及工艺参数优化

2.1 压铆技术开发

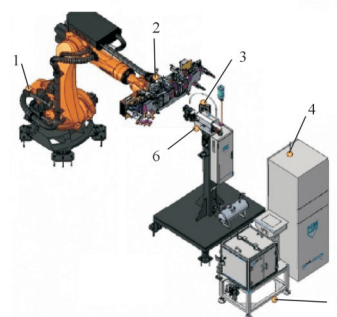
2.1.1 压铆设备

结合一体化压铸零件的特性,开发了一款机器人抓工件方式的压铆自动单元^[7]设备,包括压铆机、送料机构、重载机器人、电液伺服增压系统^[8]及视觉引导系统(PEM 双目三维传感器)^[9]。选取压铆紧固件与某前机舱零件作为研究对象,以测试设备的通用性和适应性。结果表明,送料机器人在速度适中时具有最佳的送料准确性和响应时间;重载机器人在旋转多个角度时表现出良好的稳定性和灵活性,并能够在压铆过程实现随行功能,避免铸件受力变形;压铆机压力选型范围则结合设计要求,选最大压铆力^[10]为 80 kN 的压铆设备,能够精确控制压力,实现稳定的压铆效果,但需注意过高的压力会导致工件变形。视觉引导系统有效提

高了压铆作业的准确性和效率,准确补偿因铸件、配件及定位时的精度误差,引导机器人准确对中并完成压铆工作。图 3 为压铆自动单元的实物图与原理图。



(a) 压铆自动单元设备实物图



(b) 设备原理图

图3 压铆自动单元设备

Fig.3 Automatic riveting unit equipment

1. 压铆机器人 2. 夹手 3. CCD 视觉系统 4. 控制柜 5. 送料器 6. 压铆机

2.1.2 紧固件与铸件材料

使用控制变量法进行了紧固件 M10 压铆螺母(材料牌号为 10B21)在前机舱(牌号为 C611)上的压铆效果试验。采用符合要求的紧固件 M10 压铆螺母和前机舱,分别见表 2 和图 4。

表2 紧固件 M10 压铆螺母相关信息

Tab.2 Related information of fastener M10 rivet nut

板材开孔要求直径/mm	适应板材最小厚度/mm	适应最小孔边距/mm
16~16.1	5.5	16

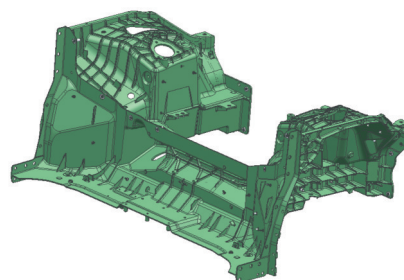


图4 某一体化前机舱

Fig.4 An integrated front cabin

2.1.3 机器人的选型

在进行前机舱(质量约 56 kg)与紧固件压铆作业的试验中,根据实际需求进行机器人的选型。考虑到手抓设计质量为 140~160 kg,加上前机舱的质量,计算出所需机器人的负重能力应满足 ≥ 216 kg。同时,机器人需要将夹持的零件移动到固定压铆机处进行压铆,通过前期的仿真模拟分析^[7,10],确定了机器人手腕的最大工作半径需大于 3 060 mm。基于这些参数,选择 KR280 R3080 库卡机器人,其最大负载达到 280 kg,最大工作半径达到 3 080 mm,可以满足试验需求。

2.1.4 视觉引导设计

视觉引导系统采用 PEM 双目三维传感器内置双目工业级相机和工业级投影仪,PEM 用户通过一次拍照即可实现对目标物的三维特征重建和三维质量检测,能精确实现各种不同大小、形状复杂物体的完整扫描,并且提高产品的检测效率进而降低成本和提高生产效率,尤其是一体化前机舱零件在压铆工艺点位置的尺寸一致性。这些位置的尺寸通常会因铸件变形或加工错误而存在较大的差异,视觉引导系统能消除这些误差叠加带来的一致性问题的,有效提高设备生产的连续性与稳定性。

2.1.5 检验结果

采用数显扭力计来检测破坏扭矩与转动扭矩,同时利用推拉力测试仪来验证推出力。从背面(即抽紧螺母方向)拧入等级 10.9 以上的螺栓,并使用数显游扭力计逐渐施加扭力,直至紧固件发生破坏,此时记录的最大弯矩即为破坏扭矩。其次,从法兰端面拧入螺栓,并使用数显游扭力计逐渐施加扭力,当紧固件开始发

生转动时,记录的最大扭矩即为剥离扭矩(也称为转动扭矩)。最后,再次从背面拧入等级 10.9 以上的螺栓,但不拧至极限,然后使用推拉力测试仪从法兰面施加推力,直至紧固件被推出,此时记录的最大力即为推出力,见图 5。压铆质量的评价分为外观质量、性能强度。评价标准见表 3。

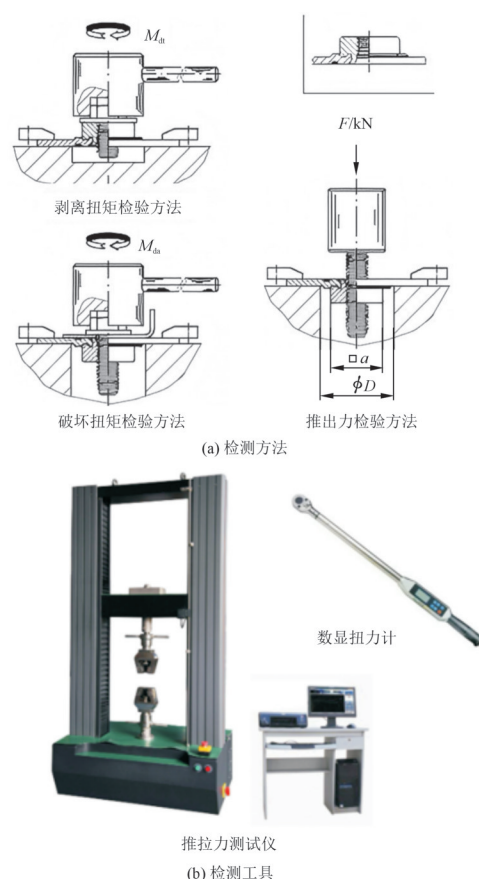


图 5 测试的方法与所需工具

Fig.5 Testing method and required apparatus

表 3 压铆评价标准

Tab.3 Evaluation criteria for riveting

评价项	外观评价要求	评价方法	评价项	扭矩值评价要求	评价工具
压偏	不允许	目视	破坏扭矩	M8 压铆螺母 ≥ 16.2 N·m	数显扭力计
压铆不到位	不允许紧固件压铆后没有贴合母材 不允许压裂			M10 压铆螺母 ≥ 90 N·m	
板材完整性	不允许变形		剥离扭矩	M8 压铆螺母 ≥ 18 N·m	数显扭力计
螺牙完整性	紧固件螺牙不允许被损失或破坏			M10 压铆螺母 ≥ 90 N·m	
压铆过度	不允许出现有台阶的压印		推出力	M8 压铆螺母 $\geq 1\ 500$ N	推拉力测试仪
漏铆	不允许			M10 压铆螺母 $\geq 2\ 000$ N	
错铆	不允许				

2.2 工艺参数优化

2.2.1 压铆螺母紧固件质量关联关系

DOE 全因子试验仅采用 M10 压铆螺母+前机舱 (C611) 样件,主要压铆参数^[11]为:压铆力(40~60 kN),

压铆速度(150~200 mm/s),保压时间(0.5~1.5 s)。试验发现,压铆力、压铆速度与破坏扭矩和剥离扭矩相关性很强,紧固件压铆质量关联关系见图 6。可以看出,影响因素由大到小排序为:压铆力>压铆速度>保压时间。

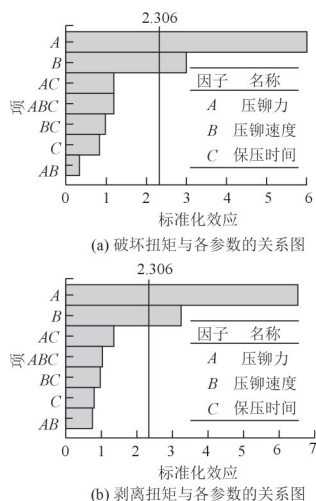
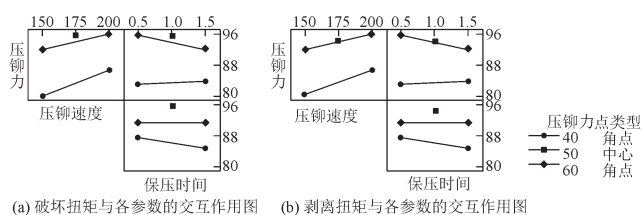


图6 紧固件压铆质量关联关系图

Fig.6 Correlation diagram of fastener riveting quality

2.2.2 多参数综合影响

破坏扭矩、剥离扭矩两个性能受压铆力、压铆速度以及保压时间的相互影响关系基本相同。研究发现,在压铆力相同的情况下,压铆速度越快,紧固件压铆后的破坏扭矩与剥离扭矩性能变大,而保压时间的增大对性能影响并没有直接关系。在压铆速度相同的情况下,施加的压铆力越大,紧固件压铆后破坏扭矩与剥离扭矩性能就越大,而保压时间的增大对性能影响并没有直接关系。在压铆时间相同的情况下,紧固件压铆后的破坏扭矩与剥离扭矩随压铆力与压铆速度增大而变大。参数的关系曲线见图7,图7a中横轴表示压铆速度($\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$),纵轴表示破坏扭矩($\text{N}\cdot\text{m}$);图7b中横轴表示保压时间(s),纵轴表示剥离扭矩($\text{N}\cdot\text{m}$)。



(a) 破坏扭矩与各参数的交互作用图 (b) 剥离扭矩与各参数的交互作用图

图7 多参数关系曲线

Fig.7 Multi-parameter relationship curves

2.2.3 试验结果

设置压铆速度(180 mm/s)与保压时间(1 s)为固定值,针对紧固件M10压铆螺母(牌号10B21)在前机舱(材料牌号C611)上进行压铆试验,见表4。以破坏扭矩、剥离扭矩以及推出力作为重要的评价指标,试验得出压铆压力控制在45~50 kN时,对于前机舱连接紧固件M10螺母,其压铆性能及外观良好。

根据试验结果,推出力、破坏扭矩和剥离扭矩均具有稳定的数值范围。破坏扭矩的平均值达到了预期的高水平,表明紧固件在承受极端扭力时具有良好的强度

表4 不同压力对压铆性能及外观的影响

Tab.4 Effects of different pressures on riveting performance and appearance

压铆力/kN	破坏扭矩	剥离扭矩	推出力	外观
10	NOK	NOK	NOK	良
15	NOK	NOK	NOK	良
20	NOK	NOK	NOK	良
25	NOK	NOK	NOK	良
30	NOK	NOK	NOK	良
35	NOK	NOK	NOK	良
40	NOK	NOK	NOK	良
45	OK	OK	OK	良
50	OK	OK	OK	良
55	OK	OK	OK	较差
60	OK	OK	OK	分层

注:NOK表示不合格。

和韧性。此外,剥离扭矩的数值相对稳定,表明紧固件在转动时具有一定扭矩,不易松动。推出力测试结果表明紧固件在受到推力作用时承载能力良好,见图8。

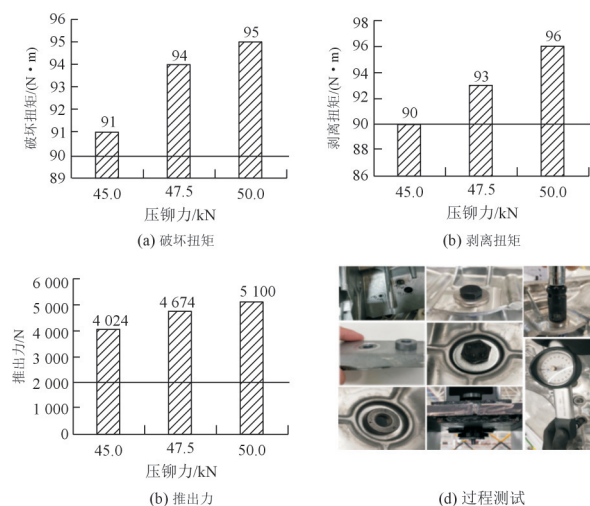


图8 M10压铆螺母的测试数据

Fig.8 Test data of M10 rivet nut

可以看出,该紧固件在破坏扭矩、剥离扭矩和推出力方面表现出色,压铆压力为45~50 kN时,压铆螺母的破坏扭矩为91~95 $\text{N}\cdot\text{m}$,剥离扭矩为90~96 $\text{N}\cdot\text{m}$,推出力为4 024~5 100 N,符合设计和使用要求。此外,试验结果的可靠性和稳定性证明了试验方法的科学性和有效性,这对紧固件选型、设计优化和生产流程的后续改进提供了有力的数据支持。

3 压铆连接的质量缺陷与改善措施

压铆连接过程常见的缺陷有:压偏、压铆不到位、母材变形^[9]、压铆过度、漏铆及错铆等,见图9。通过实践经验,对于一体化铸件前机舱在构成件压铆过程出现的常见缺陷,总结相关的改善途径,见表5,其改善效果显著有效。

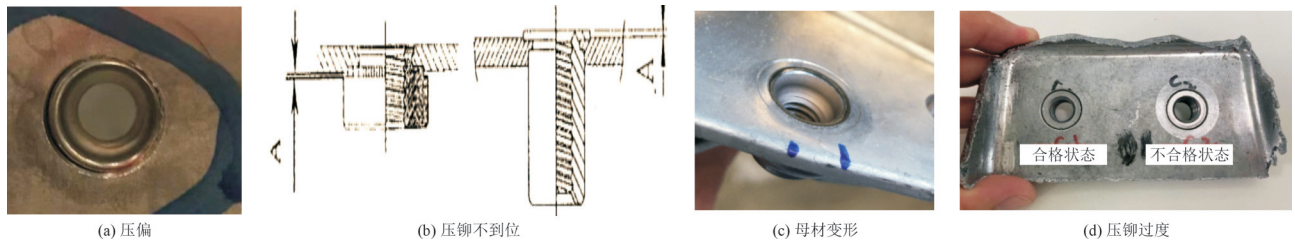


图9 压铆连接常见的缺陷

Fig.9 Common defects in rivet connections

表5 压铆连接常见的缺陷解决办法^[12-14]

Tab.5 Solutions for common defects in rivet connections^[12-14]

缺陷描述	说明	解决方法
压偏	紧固件与零件预开孔中心不对中,或紧固件压铆后,出现倾斜现象。	1.保证铸件来料与紧固件尺寸的一致性; 2.使用视觉引导系统,补偿加工或紧固件尺寸的误差,避免压偏。
压铆不到位	压铆螺母法兰面没有完全贴合装配面,间隙过大,属于压不到位。	1.检查零件压铆孔与紧固件尺寸是否有问题; 2.检查压缸、液压站等是否有故障异常; 3.检查压铆设备压铆力、位移等参数的设置是否有改动。
母材变形	压铆后,铸件表面出现凸起、变形、裂纹等。	1.零件加工的压铆孔的中心到边的距离 $\geq$ 孔径的1.5倍; 2.找出适合紧固件的压铆的力、速度及保压时间等参数进行控制,并设置监控区间; 3.机器人抓取工件压铆的形式,机器人必须具备压铆过程自动随行的功能; 4.检查铆接墩头 ^[15] 是否与零件发生干涉导致变形。
压铆过度	压铆后,母材出现分层的破坏性压印。	通过重复的参数验证,找出最适合紧固件压铆的力、速度及保压时间等参数进行控制,并设置监控区间。
漏铆或错铆	紧固件装配过程出现漏压铆或错安装相似紧固件的情况。	1.可以使用自动化的PLC进行计数功能,统计合格的压铆数量,解决漏铆问题; 2.压力与位移曲线监控功能,压铆力与位移的差异,能有效识别出相似规格紧固件的错误装配。

4 压铆技术实际应用与推广

以一体化压铸前机舱展开的压铆技术开发、参数验证等研究,在其他同类型车身结构构件中大型一体化压铸铝合金件中,也得到了广泛的应用,见图10。

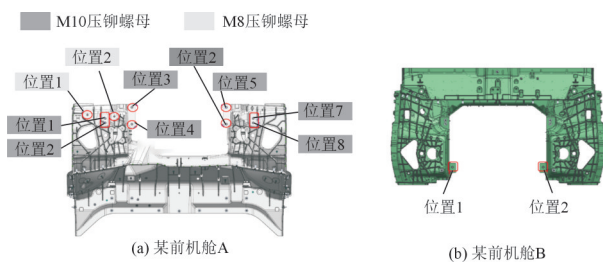


图10 应用压铆技术的其他一体化压铸前机舱

Fig.10 Other integrated die-casting front cabin by riveting technology

5 总结与展望

本研究讨论了一体化压铸铝合金压铆方法。首先,介绍了压铆技术的工作原理和工艺要求,包括3种连接方式以及对前机舱压铆的特定要求。讨论了压铆技术的发展和工艺参数优化,包括压铆设备、紧固件和铸件材料、机器人选型、视觉引导设计、检验工具和评估。结果表明,压铆力控制在45~50 kN时M10压铆螺母压铆后展现出来的性能和外观良好。分析了质量缺陷并提出了改进的方法。随着压铆过程的自动化程

度提高,大规模生产成为可能,这将加快汽车组装线生产速度、降低成本并促进汽车轻量化的发展。

参 考 文 献

- [1] 何延余,于德水,李东洋,等.一体化压铸技术的发展历程及应用现状[J].汽车工艺师,2024(7):60-64.
- [2] 于永初.《节能与新能源汽车技术路线图2.0》引领中国汽车产业发展[J].汽车工艺师,2020(11):8-10.
- [3] 郭玉琴,朱新峰,杨艳,等.汽车轻量化材料及制造工艺研究现状[J].锻压技术,2015,40(3):1-6.
- [4] 闫旭东,杨博.压铆连接技术在白车身的应用[J].汽车工艺师,2018(6):50-52.
- [5] 方瑞海.一种汽车用轻质铝合金压铆螺母:CN202221394555.5[P].2022-11-29.
- [6] 温欢,谢建良,钟智祎.压铆螺母强度及疲劳寿命试验研究[J].内燃机与配件,2021(22):32-33.
- [7] 许永松,马钢.一种压铆机:CN201921355706.4[P].2024-10-29.
- [8] 武华,宋来田,王军.YM-40变量液压枪枪液压系统[J].现代化农业,1989(2):29-30.
- [9] 余建华,杨瑞进,高剑烽,等.双目视觉图像定位技术在自动压铆机数控托架系统上的应用[J].航空精密制造技术,2013(2):4-9.
- [10] 刘平,李原,张开富,等.压铆过程阶段划分与压铆力计算[J].机械科学与技术,2009,28(4):514-516,521.
- [11] 陆凯雷,宋伟伟,刘贵.压铆连接参数化建模及性能分析[J].机械制造与自动化,2018,47(6):134-135,139.
- [12] 吕晓敏,杨帅,董鹏,等.叠层钣金结构铆接变形过程仿真及分析[J].中国机械,2023(12):2-6,12.
- [13] 冯晓旻,谢兰生.铆接变形的有限元分析[J].机械制造与自动化,2009,38(2):3-8.
- [14] 黄亚文.白车身压铆接头力学性能与工艺研究[D].合肥:合肥工业大学,2015.
- [15] 黄涛,侯红玲,吴浪,等.干涉配合铆接墩头尺寸与干涉量关系[J].塑性工程学报,2023,30(12):113-120.

(编辑:彭瑾)