铝合金一体化车架螺栓连接可靠性评价

回义龙 翟龙 宋盈盈 郝斌斌

（中信戴卡股份有限公司，秦皇岛 066011）

摘要：为评价商用车铝合金一体化车架螺栓连接的可靠性，采用疲劳试验扭矩统计、安装面布氏硬度测试、螺纹连接副极限扭矩验证试验及道路载荷谱耐松动试验的系统方法开展研究。结果表明：1.5×10^5次正弦疲劳载荷后关键连接点残余扭矩保持率均高于70%；安装面硬度为65~115 HBW，分布不均且均值约86.5 HBW，硬度测试冲击球直径3 mm、冲击能量11 mJ，经换算得到等效布氏硬度，下控制臂连接点硬度最低；M12~M18螺栓连接安全系数均不低于1.55；道路载荷谱下最大扭矩与轴向力衰减率分别为15.3%、14.9%。

关键词：铝合金一体化车架 螺栓连接可靠性 残余扭矩 硬度测量 耐松动试验

中图分类号：U467.3 **文献标志码：**B **DOI:** 10.19710/J.cnki.1003-8817.20260019

Reliability Assessment of Bolt Connections in Integrated Aluminum Alloy Frames

Hui Yilong, Zhai Long, Song Yingying, Hao Binbin

(CITIC Dicastal Co., Ltd., Qinhuangdao 066011)

Abstract: To evaluate the bolt-connection reliability of the integrated aluminum alloy frame for commercial vehicles, this study adopts a systematic method including torque statistics after fatigue test, Brinell hardness test of mounting surfaces, ultimate torque verification test of threaded connection pairs, and anti-loosening test under road load spectrum. The results show that after 1.5×10^5 cycles of sinusoidal fatigue loading, the residual-torque retention rates of all critical connection points are higher than 70%; the hardness of mounting surfaces ranges from 65 to 115 HBW with uneven distribution and an average value of about 86.5 HBW. The equivalent Brinell hardness is converted from test data obtained using an impact ball with a diameter of 3 mm and an impact energy of 11 mJ, and the connection point of the lower control arm has the lowest hardness; the safety factors for M12~M18 bolt connections are no less than 1.55; under road-load-spectrum loading, the maximum attenuation rates of torque and axial force are 15.3% and 14.9%, respectively.

Key words: Integrated aluminum alloy frame, Bolt connection reliability, Residual torque, Hardness measurement, Loosening resistance test

1 前言

汽车轻量化技术是改善环境污染和交通安全等问题的有效途径之一[1]。其中，以铝合金为代表的轻质材料在车身及底盘结构件上的应用日益广泛，一体化高压铸造技术作为实现大型复杂构件整体成型的关键工艺，在汽车结构件中的应用正处于快速发展阶段。然而，大型一体化铸造构件在结构设计、与车身及底盘系统的连接、压铸装备开发及智能化控制、模具开发及成型工艺等方面仍面临诸多挑战[2]。尤其是螺栓连接的可靠性，已成为汽车工程设计与质量控制中亟待解决的关键问题。螺栓连接在动态载荷下易产生预紧力衰减、承压面压溃及螺纹副磨损等失效现象，直接影

作者简介：回义龙（1986—），男，高级工程师，学士学位，研究方向为汽车底盘零部件试验技术和试验设备研发。

通信作者：郝斌斌（1989—），男，高级工程师，学士学位，研究方向为汽车底盘零部件试验技术和失效分析。

参考文献引用格式：

回义龙，翟龙，宋盈盈，等. 铝合金一体化车架螺栓连接可靠性评价[J]. 汽车工艺与材料，2026(9)：36-42.

HUI Y L, ZHAI L, SONG Y Y, et al. Reliability Assessment of Bolt Connections in Integrated Aluminum Alloy Frames[J]. Automobile Technology & Material, 2026(9): 36-42.

响整车的结构完整性、操纵稳定性与安全耐久性。目前,国内外针对铝合金车架螺栓连接可靠性的研究多集中于单一失效模式或静态力学性能,尚未形成从材料属性、静态强度到动态耐久性的完整评价体系。在模拟真实工况的复合载荷谱下,对螺栓连接系统开展系统性、多指标的综合评价研究仍不充分。

基于此,本研究以某商用车铝合金一体化车架为对象,通过涵盖疲劳性能、材料硬度、静态极限强度和动态防松性能的综合性试验方案,对其螺栓连接可靠性进行系统评估,以期验证连接系统是否满足设计标准与安全要求,识别相对薄弱环节,并建立可复用的车架连接可靠性评价方法,为同类产品的设计与验证提供数据支持和理论依据。

2　试验设计与方法

2.1　试验对象

如图 1 所示,本研究的核心对象为某商用车的铝合金一体化车架及其连接系统。车架采用 AlMgSi 系压铸铝合金,主要合金元素包含镁、硅、锰、钛,其余为铝及少量杂质元素。重点考察以下 4 类关键连接部位:一体化车架前端与钢制车架连接点竖直面,主要涉及 M12 螺纹孔;一体化车架前端与钢制车架连接点水平面,主要涉及 M14 螺纹孔;一体化车架与上控制臂连接点,主要涉及 M16 螺栓通孔;一体化车架与下控制臂连接点,主要涉及 M18 螺栓通孔。

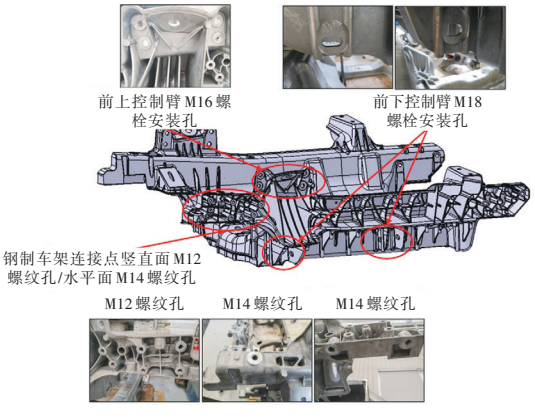


图 1　一体化车架螺栓可靠性评价连接点

为进行横向对比,本研究还选取了某车型的转向节控制臂安装面和另一车型的车轮法兰面作为参照样本,以评估该铝合金一体化车架连接可靠性在行业中的相对水平。

2.2　试验设备与流程

2.2.1　疲劳试验与扭矩统计

本文采用 Z 向正弦位移加载方式模拟车架垂向动态疲劳工况,以循环试验后的残余扭矩保持率为核心指标评价螺栓连接的抗疲劳松弛性能。

一体化车架 Z 向(垂向)正弦疲劳试验台架如图 2 所示。

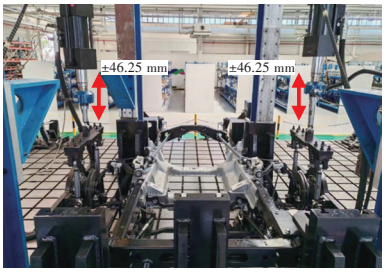


图 2　一体化车架 Z 向正弦疲劳试验台架

依据主机厂技术要求,对左右侧轮心施加 Z 向载荷;采用位移控制方式设定初始姿态,轮心垂向位移 H_d=580 mm,初始载荷为 12.32 kN。加载波形为振幅±46.25 mm、左右侧相位差 180°的正弦波,加载曲线如图 3 所示。

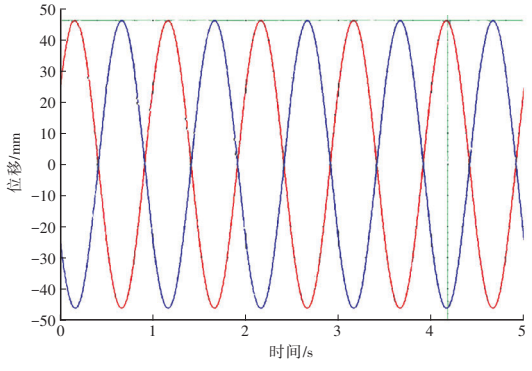


图 3　台架加载曲线

试验循环次数要求为 15 万次,高于常规道路模拟试验的基本循环要求。

试验结束后,使用经校准的扭矩扳手,对所有目标螺栓的残余扭矩进行逐点测量,并计算残余扭矩与初始扭矩的比值(以百分数表示)。

2.2.2　安装面硬度测量

本测量针对各关键连接部位的螺栓承压面开展,用以评估连接面的抗塑性变形能力与抗挤压失效风险。

测量对象为一体化车架、转向节及车轮的螺栓安装面。采用便携式里氏硬度计(Leeb hardness

tester，型号VICTOR 853A）进行测量，测量结果自动换算为布氏硬度，以便与传统硬度数据进行对比。

在每个安装孔的机加工平面上，均匀选取5个无毛刺、无油污的测量点，剔除明显异常测点后取算术平均值作为该安装孔的最终硬度值。试验操作执行GB/T 17394.1-2025《金属材料 里氏硬度试验 第1部分：试验方法》[3]的基本要求。

2.2.3 螺纹连接副极限扭矩验证试验

本试验通过连续加载拧紧至连接发生失效，测定各连接点的极限承载扭矩与典型失效模式，校核螺栓连接的静态强度安全裕度。

利用经校准的扭矩扳手，以连续、平稳的速度拧紧螺栓，同步记录扭矩与转角，直至发生以下任一失效模式：车架内螺纹剥离（螺纹失效）；螺栓颈缩或断裂（螺栓屈服/断裂失效）。如未发生失效，则在达到扳手最大扭矩时自动停止。

2.2.4 连接螺栓耐松动试验

试验系统包含一体化车架Z向道路载荷谱试验台架（图4）、动态应变采集系统及专用夹具。

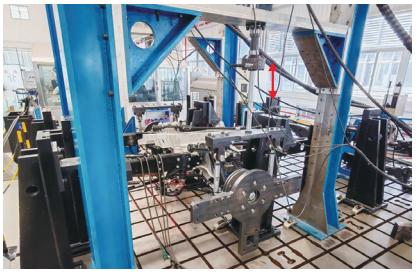


图4 一体化车架Z向道路载荷谱试验台架

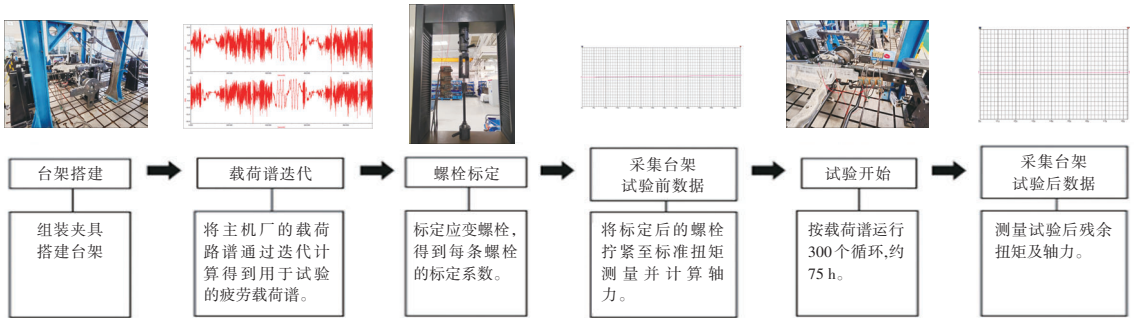


图5 一体化车架道路载荷谱试验流程

试验流程如图5所示：

a. 台架搭建与夹具组装：确保试件安装状态与实车一致。

b. 载荷谱迭代：将主机厂提供的实际道路载荷谱，通过迭代算法在试验台架上复现。

c. 应变螺栓标定：在所有试验螺栓内部埋设应变片，进行轴向力-应变系数标定。

d. 初始数据采集：将所有螺栓拧紧至标准扭矩，记录初始扭矩与轴向力。

e. 试验运行：按照迭代后的载荷谱运行300个完整循环（约75 h）。

f. 最终数据采集：试验结束后，立即测量各螺栓的残余扭矩与轴力。

3 试验结果与分析

3.1 疲劳试验后扭矩统计分析

对完成15万次疲劳试验的车架进行检测，未发现任何疲劳裂纹，重点关注的螺栓连接点扭矩保持情况，如见表1所示。由表1可知，所有测点的残余扭矩保持率均满足大于70%的设计要求，表明连接系统在主机厂规定的疲劳载荷条件下具有整体可靠性。值得注意的是，

表1 Z向正弦疲劳试验后关键连接点残余扭矩统计

具体位置	螺栓规格	螺栓孔数	安装扭矩/N·m	残余扭矩范围/%	残余扭矩均值/%	失效风险评估
一体化车架前端与钢制车架连接点竖直方向	M12	12	100	83.6~95.5	88.7	低风险
一体化车架前端与钢制车架连接点上下水平方向	M14	6	160	75.6~86.3	81.8	关注
一体化车架与上控制臂连接点	M16	8	250	90.7~95.1	91.7	低风险
一体化车架与下控制臂连接点	M18	4	380	90.5~94.1	92.2	低风险

一体化车架前端与钢制车架连接点的M14螺栓表现相对较弱,其最小残余扭矩保持率为75.6%,接近70%的安全边界,需在后续设计优化中予以重点关注。

3.2　车架安装面硬度测量结果

硬度是评估连接面抗压溃能力的关键指标。将一体化车架30个安装点以及对比样件的测量结果汇总,如表2所示。

表2　一体化车架关键螺栓连接点硬度测量结果

具体位置	螺栓规格	螺栓孔数	硬度范围/HBW	硬度均值/HBW	备注
一体化车架前端与钢制车架连接点竖直方向	M12	12	88~103	94.7	硬度最高区域
一体化车架前端与钢制车架连接点上下水平方向	M14	6	75~92	83.7	表现良好
一体化车架与上控制臂连接点	M16	8	72~84	78.3	数据均匀
一体化车架与下控制臂连接点	M18	4	65~77	70.3	重点关注,硬度最低
转向节各控制臂安装面和卡钳耳(对比)	M12&M14	5	80~115	94.8	作为行业标杆
车轮法兰安装面(对比)	M14	5	90~100	97	作为行业标杆

由表2可知,铝合金一体化车架硬度分布呈现显著的不均匀性。下控制臂连接点的硬度最低值仅65 HBW,远低于其他点位,表明该区域在长期使用过程中存在承压面压溃的风险。一体化车架前端与钢制车架连接点竖直方向M12螺纹孔区域硬度最高(大于88 HBW),推测与该区域承担关键载荷、设计时进行了局部强化处理有关。与转向节、车轮法兰等成熟产品相比,铝合金一体化车架的平均硬度偏低,说明在材料选择或铸造工艺方面仍有优化空间,以兼顾轻量化与连接刚性。

需要指出的是,一体化高压铸造(High-Pressure Die Casting, HPDC)技术对材料选择有特定要求,部分高熔点合金元素尚难以通过该工艺实现有效成形[4]。因此,探索适用于一体化高压铸造的高性能铝合金材料,是推动该技术向更大应用平台拓展的关键。

3.3　螺纹连接副极限扭矩验证试验

旨在探明连接系统的极限静载能力,其结果直接关系到装配工艺参数的设定和防错边界的确定。试验结果汇总如表3所示。

表3　一体化车架关键螺栓连接点螺栓扭矩压溃试验结果

具体位置	螺栓规格	螺栓孔数	安装扭矩/N·m	极限扭矩范围/N·m	极限扭矩均值/N·m	安全系数	典型失效模式	破坏转角范围/(°)	平均破坏转角/(°)
一体化车架前端与钢制车架连接点竖直方向	M12	12	100	155~185	169	≥1.55	车架内螺纹失效	354~540	474
一体化车架前端与钢制车架连接点上下水平方向	M14	6	160	342~373	356	≥2.14	车架内螺纹失效	368~555	484
一体化车架与上控制臂连接点	M16	8	250	411~457	430	≥1.64	螺栓屈服断裂	718~884	811
一体化车架与下控制臂连接点	M18	4	380	760	760	≥2	未失效(套筒损坏)	≥360	≥360

所有规格螺栓连接的安全系数均不低于1.55,满足汽车底盘螺栓连接设计中安全系数≥1.5的通用要求[5],具有适当的设计裕度。

M12和M14螺栓连接的失效模式均为车架内螺纹滑脱,如图6所示,即铝合金车架的内螺纹发生剪切失效。而M16及以上规格螺栓的失效模式转变为螺栓屈服断裂,如图7所示。这表明,对于小规格螺栓连接,系统的薄弱环节在于铝合金件的内螺纹强度。对于大规格螺栓连接,螺栓本体的强度则成为制约因素。



图6 M14螺栓连接点的车架内螺纹滑脱失效



图7 M16螺栓屈服断裂

M18螺栓极高的极限扭矩表明其连接冗余度非常大，在正常使用中几乎无风险。然而，对于M12、M14螺栓连接点，尽管安全系数满足要求，但其失效模式为车架本体螺纹失效，一旦在装配或维修过程中发生过拧，将导致车架螺纹孔永久失效，维修成本较高。因此，在压铸铝合金车身件螺纹孔中加装钢丝螺套，可改善螺纹连接条件，有效提高压铸铝合金结构件螺纹连接的可靠性与使用寿命[6]。

3.4 车架连接螺栓耐松动试验

螺栓耐松动试验采用道路载荷谱加载，可真实模拟车辆实际行驶工况，且能够同步监测扭矩与轴向力的变化，可有效反映螺栓连接的长期防松稳定性。耐松动试验后各连接点的扭矩与轴向力衰减率统计结果如表4所示。

表4 道路载荷谱耐松动试验后各连接点扭矩与轴向力衰减率

连接点位置	螺栓规格	螺栓孔数	安装扭矩/N·m	扭矩衰减率范围/%	扭矩衰减率均值/%	初始轴力/kN	轴力衰减率范围/%	轴力衰减率均值/%
一体化车架前端与钢制车架连接点竖直方向	M12	12	100	5.3~11.5	8.0	33.5~36.4	5.3~10.9	7.5
一体化车架前端与钢制车架连接点上下水平方向	M14	6	160	13.4~17.0	15.3	38.4~45.2	9.2~21.6	14.9
一体化车架与上控制臂连接点	M16	8	250	5.4~14.8	9.6	46.3~57.9	8.0~19.0	13.1
一体化车架与下控制臂连接点	M18	4	380	7.6~10.5	9.0	101.6~111.2	7.3~9.4	8.6

扭矩与轴向力衰减率在不同连接点间差异显著。其中，一体化车架前端与钢制车架连接点水平方向M14螺栓连接点、上控制臂M16螺栓连接点的衰减率整体偏高，是松动风险相对较高的区域，这与前述正弦疲劳试验识别的薄弱环节规律一致，可相互印证。

研究发现，轴向力衰减率与扭矩衰减率并非完全同步，例如，上控制臂连接点的扭矩衰减率均值为9.6%，而轴向力衰减率平均值达13.1%。其原因在于螺纹副与承压面的摩擦因数存在离散性，会显著影响扭矩-轴向力的转化关系[7]，因此仅通过扭矩测量评估螺栓预紧状态存在局限性。在关键安全连接部位，采用超声波轴力检测等直接或间接轴向力监测技术具有重要的工程应用价值[8]。

对比正弦疲劳载荷与道路载荷谱下的试验结果可知，2种加载条件下各连接点的最小残余扭矩保持率均满足设计要求，且识别出的系统薄弱环节一致，均为M14螺栓连接点。

4 综合讨论

本研究通过疲劳性能、硬度测试、螺纹副静态极限扭矩验证、动态防松4个维度的试验，对铝合金一体化车架螺栓连接系统进行了多指标综合表征，并进一步分析了各性能指标间的内在关联规律。

4.1 多试验指标关联性分析

4.1.1 硬度与静态承载及承压面塑性变形

下控制臂连接点硬度最低值仅65 HBW，尽管其在螺纹连接副极限扭矩验证试验中未发生失效，但较低的表面硬度是耐松动试验后承压面出现压痕（图8）的主要原因；连接承压面发生塑性变形是造成预紧力损失，进而导致轴向力永久性衰减

的重要机制之一。

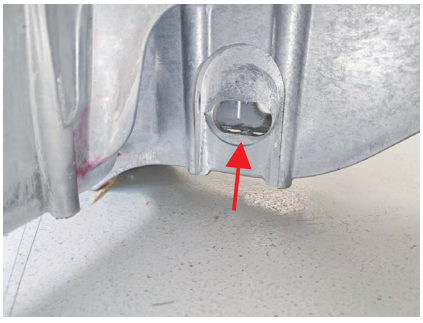


图8　表面压痕

4.1.2　硬度与耐松动性能

硬度较高的前端竖直面M12螺栓连接点（平均硬度94.7 HBW），在耐松动试验中表现出最低的扭矩与轴向力衰减率（轴向力衰减率平均值7.5%），表明较高的承压面硬度有助于维持连接刚度、抑制预紧力衰减，对提升连接防松性能具有积极作用。

4.1.3　失效模式与预防性维护

M12螺栓、M14螺栓连接点的失效模式为铝合金内螺纹滑脱，提示在售后维修过程中，需重点检查该类连接点的螺纹孔完好状态，必要时可采用钢丝螺套等螺纹修复手段进行加固[9]。

4.2　工程改进建议

基于上述多维度试验结果与关联分析，提出以下针对性工程改进建议：

a. 材料与工艺优化：针对下控制臂连接点等低硬度区域，建议开展压铸工艺优化研究，可通过调控模具温度、浇注参数及局部冷却工艺等方式，改善铸件局部组织，提升表面硬度与尺寸精度，降低凝固应力与变形量[10]，以将该区域硬度提升至80 HBW以上。

b. 连接结构设计优化：针对风险较高的前端水平方向M14螺栓连接点，可优化连接结构设计，如增设止动垫圈等机械防松结构，或采用螺纹锁固胶等化学防松措施[11]，进一步提升连接防松性能。

c. 制造过程质量控制：在总装工序中，对M12螺栓、M14螺栓连接点推行扭矩-转角法监控与扭矩比率监控相结合的拧紧策略[12]，以更精准地控制螺栓轴向预紧力，避免欠拧或过拧失效。

d. 售后维护体系优化：将M12、M14、M16螺栓关键连接点纳入车辆定期保养检查清单；在高端车型的维护检修中，可引入超声波轴力检测技术[8]，以获取更精准的螺栓预紧力数据，提升维护可靠性。

5　结束语

多维度系统试验结果表明，商用车铝合金一体化车架螺栓连接系统的可靠性主要取决于连接部位材料硬度的均匀性，以及螺栓规格与基材强度的匹配程度。在1.5×10^5次正弦疲劳载荷作用下，各连接点的残余扭矩保持率均高于70%；M12~M18规格螺栓连接的安全系数均不低于1.55，证实采用一体化高压铸造技术制备的车架连接系统可满足商用车动态服役的安全性与耐久性要求。同时，小规格螺栓（M12、M14）连接以车架内螺纹滑脱为典型失效模式，大规格螺栓（M16、M18）连接以螺栓本体屈服断裂为典型失效模式，该失效模式分化规律反映了轻质合金基材与螺栓强度匹配的普遍特性，可为同类一体化构件的连接选型与结构设计提供参考依据。

本研究所有试验均在室温环境下开展，未考虑温度循环条件下铝合金与钢制连接件热膨胀系数差异对连接预紧力的影响，也未引入腐蚀介质模拟盐雾、潮湿等恶劣环境对连接界面的侵蚀作用。此外，研究证实轴向力与扭矩衰减存在非同步特性，且HPDC工艺对铸件局部硬度分布的精准调控方法仍有待深入研究，以解决下控制臂连接点硬度偏低的问题。

后续研究开展热-机耦合载荷下的螺栓松弛行为分析，并基于大量试验数据，建立螺栓连接可靠性的数字孪生模型，用于预测不同载荷下的寿命与维护周期。

参考文献：

[1] 徐世伟, 纪志康, 肖培杰, 等. 汽车轻量化技术研究现状及展望[J]. 汽车安全与节能学报, 2025, 16(1): 16-31.

[2] 查敏, 顾焘, 马品奎, 等. 轻合金大型一体化结构部件压铸成形技术研究进展[J]. 特种铸造及有色合金, 2024, 44(8): 1009-1022.

[3] 全国钢标准化技术委员会. 金属材料里氏硬度试验 第1部分：试验方法：GB/T 17394.1—2025[S]. 北京：中国标准出版社, 2025.

[4] 郑敬明, 潘帅, 王玉, 等. 免热处理铝合金大型结构件一体压铸研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2025, 35(6): 1869-1894.

[5] 孙艳, 杨万杰, 邴雪峰. 重型商用车转向节臂失效分析及结构优化[J]. 时代汽车, 2024(19): 165-167.

[6] 徐清魁, 饶旭东, 王跃,等. 钢丝螺套在一体化压铸铝合金车身结构件上的应用[J]. 农业装备与车辆工程, 2025, 63(7): 128-131.

[7] 贾金龙, 刘文敏, 张桂明. 螺纹摩擦对螺栓轴向力-伸长量特征曲线的影响[J]. 理化检验(物理分册), 2021, 57(3): 37-40+45.

[8] 徐晓, 姜涛, 靳超, 等. 基于超声波的高强螺栓轴力检测技术研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2024, 38(12): 163-172.

[9] 管刚. RIC系统螺纹修复工具研发[J]. 今日制造与升级, 2025(7): 164-166.

[10] 但昭学, 林韵, 万里, 等. 一体化压铸成形技术的现状及发展[J]. 特种铸造及有色合金, 2024, 44(8): 1023-1031.

[11] 涂海慧, 池辉, 涂权浩. 质量稳定性视域下汽车螺栓拧紧方法与防松措施研究[J]. 汽车测试报告, 2025(12): 85-87.

[12] 王将辉, 彭东, 雷晓宇, 等. 比率监控在螺栓拧紧过程管控方面的应用[J]. 汽车实用技术, 2025, 50(11): 78-82.

AT&M