

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.05.018

高强度螺栓新型拧紧策略研究

刘良刚, 郑鑫, 王光辉

(苏州汇川联合动力系统股份有限公司, 江苏 苏州 215104)

摘要:针对某款新能源变速箱合箱紧固连接位置的需求,通过背景评估、仿真计算、夹紧力理论计算、紧固件原材料表面处理优化和性能测试,以及线下和线上的工艺验证评估等手段,设计开发新型表面处理的高强度螺栓以及对应的角度拧紧控制策略。通过对产线实际落地验证的直通率和质量表现跟踪表明:该技术获得了成功,具备大面积推广的条件。

关键词:高强度螺栓;表面处理;夹紧力;转矩加转角拧紧策略;仿真

中图分类号:TH131 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2025)05-0094-06

Study of High Strength Bolt New Tighten Strategy

LIU Lianggang, ZHENG Xin, WANG Guanghui

(Suzhou Inovance Automotive Co., Ltd., Suzhou 215104, China)

Abstract: In order to meet the requirement of NEV gear box fastener joint position tightening, new surface treatment high strength bolt and tighten strategy was designed and developed with background investigation, simulation calculation, clamp force theory calculation, incoming fastener surface optimization and capability test, process evaluation online and offline. The first pass yield and quality behavior tracking verified by actual assembly line show that the designed technique is successful with capability of massive promotion.

Keywords: high strength bolt; surface treatment; clamp force; torque plus angle tighten strategy; simulation

0 引言

随着新能源汽车行业的高速发展和竞争日益加剧,从业者为了持续提高产品核心竞争力,都在不断研发新材料、新技术、新设备和新工艺。螺纹紧固连接依然作为汽车行业的主流装配连接工艺。为了获得更好的螺纹紧固质量和效率,螺纹紧固连接本身也在推陈出新。在一些高强度螺栓应用场景下,越来越多地采用转角法控制替代原有传统的转矩法控制。但对于新能源汽车变速箱合箱紧固连接位置,采取何种紧固件表面处理方式,制定更好的角度控制策略,能够在实现理想夹紧力的同时,降低输出转矩提高可制造性方面的研究相对较少。本文将结合具体案例做相关内容介绍,供从业者参考。

1 需求背景

1.1 产品需求背景

为满足产品进一步降本增效目的,产品 3D 示意如图 1 所示。而原供应商变速箱所使用的螺

栓规格为 M8×35,螺栓等级为 10.9 级^[1],螺栓数量为 16 颗,并不在公司采购体系内,且该紧固连接位置需要克服高频振动和密封双重需求。因此,需要重新开发公司采购体系内的新紧固件。

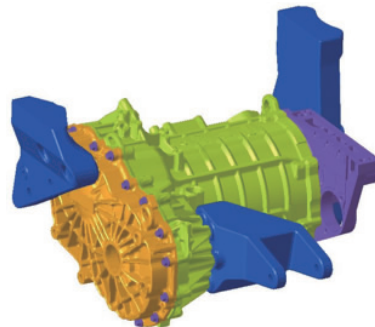


图 1 产品示意图

1.2 仿真计算

为确认该位置紧固螺栓能否满足产品相关密封性能要求,需要对此进行仿真测算^[2]。根据仿真计算结果,实际测算在部分紧固连接位置,当夹紧力在 15 kN 以下时,COPE 开合度不符合要

第一作者简介:刘良刚(1984—),男,江苏宿迁人,工程师,学士,研究方向为装配拧紧控制和螺纹紧固失效分析,237532673@qq.com。

求,存在泄漏风险,如图2所示。

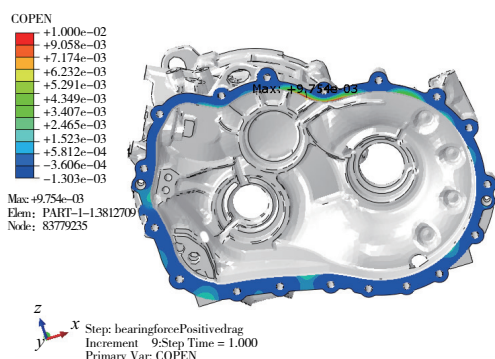


图2 基于12 kN夹紧力的螺栓仿真开合度特征

不同夹紧力对应的开合度情况如表1所示,确认夹紧力在21 kN可达到理想需求。

表1 夹紧力和开合度对照表

因素	开合度(<0.01 mm)			
	1	2	3	4
1倍转矩下				
夹紧力/kN	10	12	15	21
开合度/mm	0.020 0	0.016 0	0.010 0	0.009 7
状态	NO	NO	OK	OK

1.3 紧固性能需求背景

现有类似规格 M8×35 螺栓采用锌镍表面处理^[3],该紧固件盘头大小为 18 mm,尺寸偏大,工艺转矩要求为 31 Nm,而套筒外壁为 19.5 mm,存在一定干涉和虚假转矩风险。利用 SCHATZ 超声波夹紧力测量设备,实测夹紧力低于 15 kN,如图3所示。

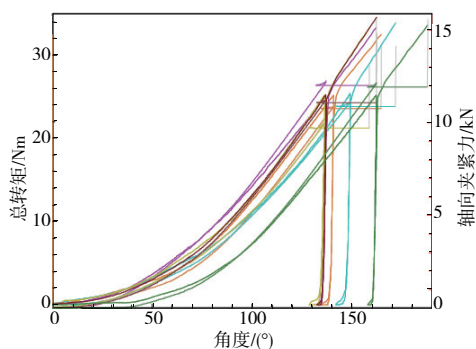


图3 现有螺栓和工艺要求对应夹紧力

2 正向设计过程

2.1 流程设计

按照螺纹紧固件正向设计开发^[4-6]的策略要求,在进行正式设计前,系统梳理紧固正向设计^[7]

的相关流程和验证项目要求。整体来看,正向设计主要包含7个环节,如图4所示。

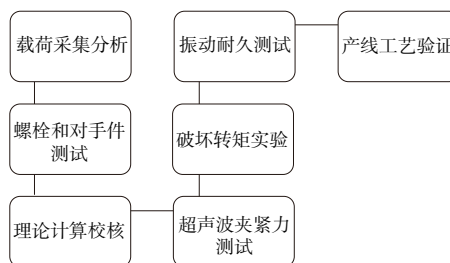


图4 螺栓紧固正向设计流程

紧固正向设计的第1步为载荷采集分析,包括根据仿真等方式测量获取能够满足产品设计要求的最小夹紧力需求,该内容在第1节已经进行了介绍。紧固正向设计的第2步为螺栓和对手件的测试,包括外形尺寸、摩擦因数、硬度等相关性能的测试确认。紧固正向设计的第3步是理论计算校核,需要考虑紧固件和相配合件之间的摩擦因数、有效螺纹接触面积等因素计算获得理论转矩范围大小。紧固正向设计的第4步是超声波夹紧力测试,该步骤通过实测手段获得该部位的实际夹紧力分布情况,用来进一步校核第3步的理论计算结果。紧固正向设计的第5步是对紧固连接的破坏转矩进行实测确认,记录拧紧的屈服角度和转矩,以及拧紧全过程的曲线,以便进一步地复核确认前期理论计算的实际效果。另外,该步骤也可以初步确认动态和静态转矩的初始范围大小。紧固正向设计的第6步是将完成设计的紧固件和对手件搭载到实际产品上进行振动耐久测试,确认产品在耐久试验情况下,静态转矩衰减情况和防松情况等,确认紧固件有无松脱风险以及产品有无泄漏风险。

在以上步骤完成后,再进行紧固正向设计的第7步,跟踪产线的直通率和静态转矩表现情况。

经过上述7步的系统验证后,完成了系统全面的紧固正向设计评估和验证。

2.2 紧固件表面处理选择

表面处理的选择,首先需要考虑产品工况需求,即该紧固连接位置的盐雾能力要求。汽车行业通常对产品盐雾能力要求是720 h以上,因此采用普通电镀锌处理无法满足要求。其次,需要考虑不同紧固件表面处理的特性和目的。表面处理的目的主要包括:美观、防护、提高制品润滑性及附着性、提高制品导电性、渗碳和氮化的防止、增

加硬度及耐磨性等。具体如表 2 所示。

表 2 不同表面处理性能对照表

技术指标	螺栓表面处理类目			
	电镀锌	热浸镀锌	锌铝涂覆	锌镍合金
渗层厚度/ μm	5.0~25.4	15~130	8~20	8~15
厚度均匀性	较好	较差	一般	均匀
硬度/HV	75~88	75~88	2~6	350~550
附着强度	强	强	弱	强
氢脆性	有氢脆	较少氢脆	无氢脆	较少氢脆
盐雾能力/h	96	240	1 000	720
环保污染	很严重	严重	严重	无

另外,还需要考虑到原有夹紧力不能够满足需求,而增大夹紧力的方式从表面处理角度,就需要减小摩擦因数。根据表 2 可以看出,综合商务价格和产品表面处理性能,最终选择锌镍合金表面处理方式。

2.3 性能测试

从减小摩擦因数角度来看,基于 ISO 16047 摩擦因数测试标准,需要分别对不同表面处理方式^[8-9]的摩擦因数进行测试对比。利用 Minitab^[10-13]的数据显示分析功能,如图 5 所示,其中客供涂胶螺栓(图 6(a))为原始外供螺栓表面处理,状态 1 为原体系内锌镍表面处理方式螺栓(图 6(b)),状态 2 为更改为 Geomet720 表面处理方式,状态 3 为将盘头尺寸改小后表面处理与状态 2 相同实测摩擦因数。

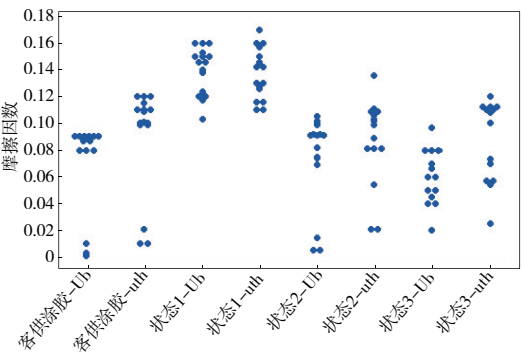


图 5 不同表面处理摩擦因数对照表



(a) 客供螺栓



(b) 状态1螺栓

图 6 客供螺栓和状态 1 螺栓外观

通过实测发现,在表面处理优化提升后,可以达到甚至优于外供螺栓类似或者更优的摩擦因数表现,为后续开发工作奠定坚实基础。

针对螺栓的相关其他性能要求,需要采用高强度螺栓,基于 ISO 898 标准要求,此处抗拉强度应该满足在 1 000 MPa 以上。

新开发的紧固件选取 4 个批次螺栓,对抗拉强度和屈服强度等指标进行检测,确认螺栓符合设计开发需求。具体测量结果如表 3 所示,具体测量曲线如图 7 所示。

表 3 螺栓单体性能测试数据表

因素	螺栓性能检测样品			
	1	2	3	4
最大受力/N	40 226	40 583	40 521	40 561
断裂应力/(N/mm)	708	715	728	689
最大应变/%	0.21	0.37	0.34	0.31
屈服强度/MPa	1 073	1 077	1 084	1 050
抗拉强度/MPa	1 099.60	1 108.84	1 107.13	1 108.21
断后伸长率/%	9.75	25.56	24.22	20.78
整体评价	OK	OK	OK	OK

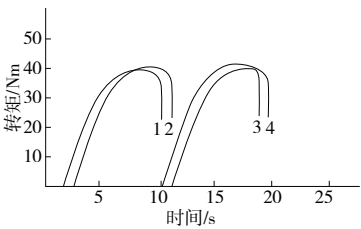


图 7 螺栓实测破坏扭力分步

2.4 摩擦因数测量确认

考虑到摩擦因数不仅与螺栓有关,也与相配合件的表面粗糙度有关。为此,我们对相配合件压铸件的表面粗糙度也进行测量,确认摩擦因数实测值。具体如表 4 所示。

表 4 摩擦因数测试数据 单位: μm

因素	表面粗糙度测量			
	1	2	3	4
相配合件	0.830	0.737	0.865	0.790
客供涂胶螺栓	2.115	1.392	2.432	1.259
状态 1 螺栓	0.655	0.827	0.705	0.822
状态 2 螺栓	0.339	0.312	0.356	0.341

2.5 超声波夹紧力测试^[14]

夹紧力测量通常采用轴力螺栓、超声波测量、压力垫圈-测量应力、压力垫圈-喷溅 DTI、压敏薄膜、填入应变传感器-胶固定测量轴力 6 种测量方式。

基于现有资源和实验条件,最终选择超声波夹紧力测量方式。超声波测量夹紧力主要包含以下几个步骤:螺栓加工处理,夹持长度测量,标定,拾取,后期数据处理。

第 1 步,将螺栓盘头加工为平面,并张贴陶瓷片,如图 8 所示。

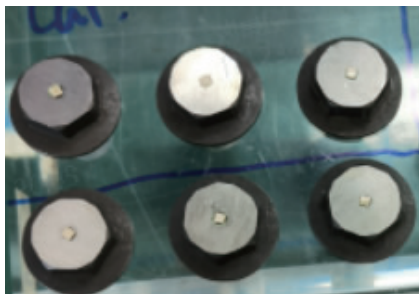


图 8 螺栓特殊加工后状态

第 2 步,测量确认螺栓与壳体实际装配装夹长度,如图 9 所示。

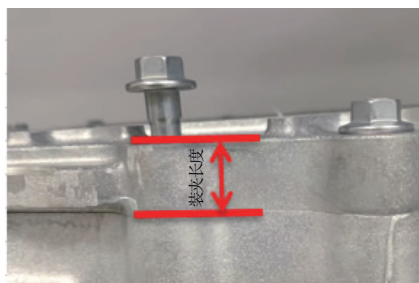


图 9 螺栓装夹长度测量

第 3 步,等同实际装配装夹长度,运用 SCHATZ 摩擦因数仪拧紧作标定,如图 10 所示。

第 4 步,运行 iFast 超声波拾取设备对超声波进行拾取,如图 11 所示。

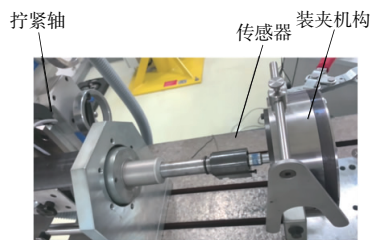


图 10 SCHATZ 设备装夹示意图



图 11 超声波拾取过程示意图

第 5 步,对获取的数据进行分析和处理。

2.6 正向理论计算

在进行装配紧固时,更多体现的是拧紧转矩,而连接的最终目的是保证足够的夹紧力。根据 VDI 2230^[15-16]产生预载的总拧紧转矩 M_A 是由螺纹转矩 M_G 和头部或螺母摩擦转矩 M_K 组成。计算公式如下。

$$M_A = M_G + M_K \quad (1)$$

当采用测量时或为了防止松弛,螺纹和头部摩擦转矩可能增加。这种情况下,需要考虑过渡螺栓的转矩。

$$M_{A,S} = M_G + M_K + M_{\ddot{U}} + M_{KZu} \quad (2)$$

在高预载的连接情况下, $M_{\ddot{U}}$ 可以忽略。源于倾斜平面的平衡条件,可以获得装配预紧力和螺纹中转矩作用之间的相互关系。利用节径 d_2 和螺纹的螺旋角度,可得:

$$M_G = F_M \cdot \frac{d_2}{2} \tan(\varphi + \rho') \quad (3)$$

利用节距 P 和螺纹侧面角 α ,对于公制螺纹:

$$\tan \varphi = P / (\pi \cdot d_2) \quad (4)$$

$$\tan \rho' = \mu'_G = \mu_G / \cos(\alpha/2) \quad (5)$$

按螺纹侧面角 $\alpha = 60^\circ$, $\mu'_G = 1.155\mu_G$, 以及按简化的方式得

$$\tan(\varphi + \rho') \approx \tan \varphi + \tan \rho' = P / (\pi \cdot d_2) + 1.155\mu_G \quad (6)$$

$$\text{因此 } M_G = F_M (0.16 \cdot P + 0.58 \cdot d_2 \cdot \mu_G) \quad (7)$$

利用用于克服承压区域和头部或螺母之间的摩擦所要求的转矩

$$M_K = F_M \cdot \frac{D_{Km}}{2} \mu_K \quad (8)$$

可以得到:

$$M_A = F_M \left(0.16 \cdot P + 0.58 \cdot d_2 \cdot \mu_G + \frac{D_{Km}}{2} \mu_K \right) \quad (9)$$

利用平面圆环承压区域,获得计算等效接触范围。

$$D_{Km} = \frac{2(d_o^3 - d_h^3)}{3(d_o^2 - d_h^2)} \quad (10)$$

将螺母支撑面外径 $d_o = 14.9 \text{ mm}$, 螺栓孔直径 $d_h = 9 \text{ mm}$, 带入式(10)得到螺母与工件表面的接触范围 $D_{Km} = 12.19 \text{ mm}$ 。

将该 D_{Km} 值以及前面章节提到的优化降低之后的螺纹副之间摩擦因数 $\mu_G = 0.11 \pm 0.03$ 、螺母与工件表面之间的摩擦因数 $\mu_K = 0.15 \pm 0.03$ 、 P 范围 1.25 以及此前演算的计算公式均带入式(9), 从而计算获得理论最小转矩为 25.3 Nm, 最大的转矩为 37.6 Nm。

3 工艺验证

3.1 破坏转矩及极限角度测试

为了找寻到相关的边界条件,通过实际拧紧设备和工装获取极限屈服断裂角度均在 500° 以上,如图 12 所示。而 $25 \text{ Nm} + 30^\circ$ 对应角度分布在 100° 以内,角度安全余量充足。根据曲线^[17-18]分步情况,获得最大破坏转矩为 50 Nm, 而工艺规范要求为 $25 \text{ Nm} + 30^\circ$ 的拧紧策略后,确认安全余量充足,不存在螺栓过屈服或断裂风险,如图 13 所示。

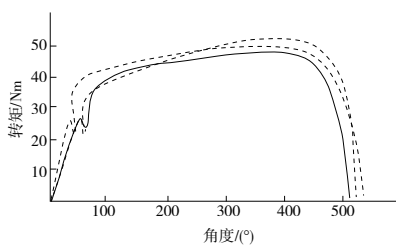


图 12 破坏拧紧曲线

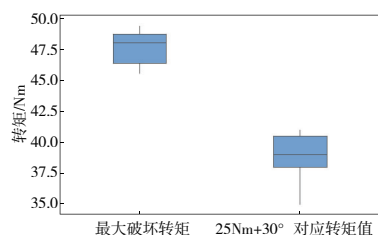


图 13 最大破坏转矩和 $25 \text{ Nm} + 30^\circ$ 转矩值分布

3.2 拧紧策略选择

不同紧固连接位置从发生问题的严重度以及频度可以定义为关键连接、重要连接和普通连接。该紧固连接位置因为涉及密封和振动载荷工况,造成后果较为严重,被识别为关键连接。而为了保证该关键连接的紧固过程,需要采用高精度拧紧工具和合适的拧紧策略。

汽车行业主流的拧紧策略包括转矩控制拧紧、转角控制拧紧、屈服控制拧紧和差分转矩(贴合点)控制拧紧等。其中,转矩控制拧紧策略的优点是拧紧工具成本低廉、编程易于实现,是最常用的紧固策略。目前,汽车行业 90% 以上的紧固连接均采用转矩控制拧紧策略。缺点是夹紧力受摩擦因数影响大,夹紧力波动比较大。转矩控制策略示意图如图 14 所示。

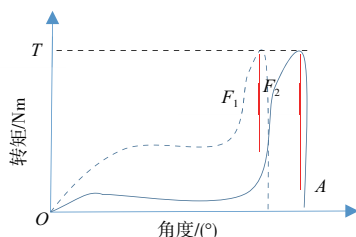


图 14 转矩控制策略示意图

转角控制策略主要应用于高强度螺栓,可以获得稳定的夹紧力以及受对手件表面粗糙度和摩擦因数的影响相对较小。在同样输出转矩情况下,获得夹紧力相比较转矩控制更大。不足的是投资成本较高,原材料不稳定会导致输出转矩波动大。另外,由于大部分螺栓紧固在塑性变形区域,螺栓本身不可回用。转角控制如图 15 所示。

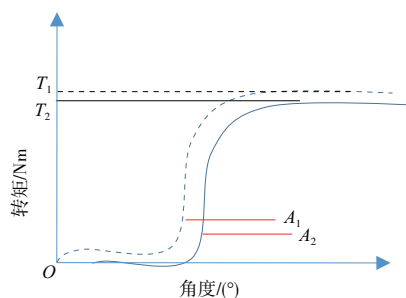


图 15 转角控制策略示意图

差分转矩控制主要适用于小规格自攻钉拧紧,因其会对斜率精准控制,在预防浮钉失效方面,具有独特优势。缺点是编程复杂,原材料一致性不佳情况下,误报比较频繁。

根据不同拧紧策略的优劣势对比。该紧固连

接最终选择转角控制策略 $25\text{ Nm} + 30^\circ$, 转矩选择 25 Nm 。

3.3 动静态转矩测试

通过产线拧紧设备导入 $25\text{ Nm} + 30^\circ$ 拧紧策略后, 实际拧紧验证并获取批量拧紧曲线分析, 如图 16 所示, 进一步复核确认所有拧紧均在弹性变形区间, 无屈服迹象。

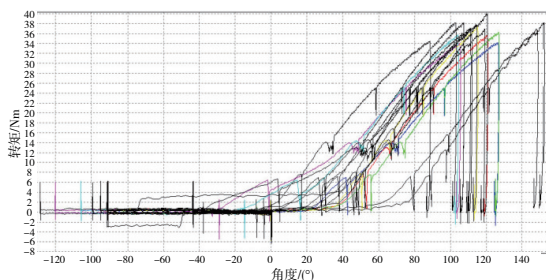


图 16 转矩对转角拧紧曲线

基于以上拧紧曲线, 获取动态转矩和静态转矩值实际分布^[19] 情况如图 17 所示, 根据 $\pm 3\sigma$ 原则, 制定动态转矩范围为 $30 \sim 45\text{ Nm}$, 静态转矩范围为 $25 \sim 40\text{ Nm}$ 。

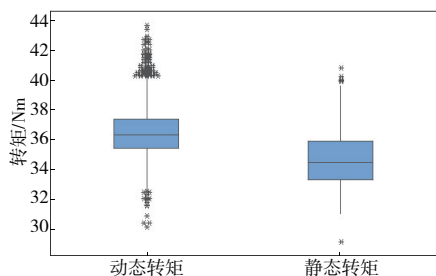


图 17 动静态转矩值分布

4 结语

通过跟踪后续 PV 产品样件走线导入验证跟踪, 超过 1 000 台产品确认一次通过率在 99% 以上。另外, 日常静态转矩^[20] 抽检均合格, 未发现显著异常情况。

该技术导入在当年实现紧固件降本超过 40%, 3 年预期收益 1 000 万左右。同时, 通过该技术的系统评估和导入, 实现夹紧力大幅提升 80%, 如在同等夹紧力输出情况下抗转要求下降 40%。该技术通过表面处理优化、正向设计计算、转矩加转角拧紧策略导入等一系列系统手段, 最终实现了可制造性和产能、性能的显著提升和改善。

参考文献:

- [1] 冯小强. 高强螺栓的摩擦面处理、检验方法及其施工应注意的问题[J]. 科学大众, 2009(6): 152.
- [2] 黄稳, 杜伟, 凡志磊, 等. 复合材料结构中螺栓拧紧的有限元仿真研究[J]. 机械制造与自动化, 2022, 51(6): 127-131.
- [3] 汪绍武. 表面处理对高强度紧固件机械性能的影响探讨[J]. 南方农机, 2017, 48(17): 99, 101.
- [4] 肖芳, 曹玲玲, 王永健. 浅谈整车螺纹接头正向设计开发[J]. 中国汽车, 2019, 29(3): 53-55.
- [5] 王迪, 熊万川, 周盼泉, 等. 某车型悬置支架紧固件松动分析及装配正向设计[J]. 汽车工艺与材料, 2022(10): 12-18.
- [6] 梁鹏, 王迪, 周志成. 某车型电池包支架紧固件装配工艺正向开发[J]. 汽车工艺与材料, 2022(2): 40-45.
- [7] 王婕, 冯健华, 冯韶伟, 等. 弹箭体紧固连接系统正向设计数字化技术研究[J]. 强度与环境, 2022, 49(5): 107-112.
- [8] 裕莉莉, 柴之龙, 李琨, 等. 表面处理工艺对螺纹紧固件装配性能影响的研究[J]. 汽车工艺与材料, 2016(1): 17-20.
- [9] 李银花, 黎敏, 周林. 汽车紧固件常见锈蚀案例及解决方案[J]. 电镀与涂饰, 2025, 44(3): 89-94.
- [10] 李盛, 程恒. 基于 Minitab 的试验设计在轮胎总成装配中的运用[J]. 时代汽车, 2022(10): 157-159.
- [11] 李博. 基于 Minitab 的航空维修优化设计研究[J]. 中国新技术新产品, 2024(14): 40-42.
- [12] 王猛, 赵天永, 任飞. 基于 Minitab 的质量管理模式在航空零备件镀覆中的应用[J]. 航空维修与工程, 2023(12): 110-114.
- [13] 梁华锋, 卢群英. 关于提高某汽车同步器合格率的研究[J]. 南方农机, 2021, 52(14): 115-117.
- [14] 吕奉阳, 全锋, 杨万庆, 等. 螺栓预紧力超声波测量方法及应用[J]. 汽车实用技术, 2023, 48(17): 144-149.
- [15] 李东林, 黄佳, 丁晓宇. 基于 VDI 2230 标准的螺栓连接载荷系数仿真计算与试验验证[J]. 强度与环境, 2023, 50(3): 10-18.
- [16] 黄彪, 方明刚, 金文伟, 等. 基于 VDI 2230 标准的轴装制动盘螺栓设计方法研究[J]. 轨道交通装备与技术, 2019(5): 7-10.
- [17] 张俊. 利用螺栓拧紧曲线调整优化拧紧策略[J]. 现代制造技术与装备, 2021, 57(9): 89-91.
- [18] 刘良刚, 刘占锋, 王光辉. 追溯曲线在分析拧紧问题中的应用[J]. 汽车实用技术, 2023(2): 152-156.
- [19] 樊宇, 杨建业. 大数据在拧紧数据分析中的应用[J]. 汽车工艺与材料, 2022(6): 27-32.
- [20] 李小龙. 变速箱装配拧紧质量控制策略. [J] 机械管理开发. 2021(10): 309-310.

收稿日期: 2023-10-31