

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.02.021

# 关于乘用车车轮螺栓紧固转矩损失问题分析

郭宙, 韩卫强

(北京新能源汽车股份有限公司, 北京 100176)

**摘要:**乘用车车轮紧固后在外载工况下会发生转矩损失的情况。基于不同工况试验的设计,明确紧固螺栓转矩损失并非由螺栓发生角位移所致。确认各工况试验中螺栓转矩损失主要由螺栓受温度影响所致。通过螺栓转矩复紧操作可以有效地保持车轮螺栓预紧力和转矩要求,同时明确车轮螺栓与孔锥面制造公差也是影响紧固转矩损失的主要因素。

**关键词:**车轮;螺栓;转矩损失

**中图分类号:**U466    **文献标志码:**B    **文章编号:**1671-5276(2025)02-0109-05

## Analysis of Torque Decreasing of Vehical Wheel Bolt

GUO Zhou, HAN Weiqiang

(Beijing Electric Vehicle Co., Ltd., Beijing 100176, China)

**Abstract:** Vehicle wheel bolt torque decreases after bolt is fastened under external load conditions. Based on the design of different test conditions, it is determined that the torque loss is not caused by the angular displacement of wheel bolt, but due to the temperature increase of bolt. It is clarified that the bolt refastened operation can effectively maintain the pre-tightening force and torque specification of the wheel bolts, and the manufacturing tolerance of the wheel bolts and hole are the main factors affecting the loss of bolt tightening torque as well.

**Keywords:** vehicle wheel; bolt; torque decreasing

### 0 引言

汽车车轮主要与刹车盘、轮毂轴承法兰配合安装,并经车轮螺栓锁紧。在日常使用中,车轮圆周方向外载荷主要由车轮安装面、刹车盘安装面、轮毂轴承法兰面间紧固后的摩擦力承担,车轮轴向向外载荷主要由车轮螺栓轴向紧固力承担。车轮安装面、刹车盘安装面、轮毂轴承法兰面间的摩擦力与相互之间的正压力直接相关,且该正压力又通过车轮螺栓紧固后获得,因此车轮轴向向外载荷和圆周方向外载荷都对车轮螺栓紧固性能有直接影响。某车型在试验场耐久路试过程中发现车轮螺栓紧固转矩损失严重,并经过静置降温后测量发现螺栓紧固转矩恢复一部分,但仍然距螺栓设计紧固转矩要求存在较大差距,后续把紧固螺栓按标称转矩复紧后继续耐久路试,经过对比测量发现紧固螺栓转矩损失情况缓解了很多。基于此,结合外载荷、温度、螺栓复紧 3 个因素设计以下试验,验证车轮螺栓紧固力矩在不同工况下产生损失的主要影响因素。

### 1 试验部分

为有效明确试验规范,首先定义以下 3 种试验工况及试验要求,主要包括:

1) 车轮温升工况试验,环形试验场直线段速度先加速至 45 km/h 后,再制动减速至 20 km/h,弯道转弯无制动(15 km/h 通过),试验持续 40 min,测试温度对车轮螺栓紧固转矩的影响;

2) 车轮轴向外载工况试验,环形试验场转弯段,车速约 40 km/h 进行弯道转弯,全程无制动,试验持续 40 min,考察纯外载对转矩的影响;

3) 复合工况试验,环形试验场直线段加速至 55 km/h,进入弯道前制动至 40 km/h,进入弯道进行弯道转弯操作(转弯无制动),试验持续 40 min,考察外载荷及温升复合作用下转矩衰退情况。

基于以上 3 种工况,设计以下 5 种单一工况和组合工况试验。试验前,准备试验车辆(纯电前驱乘用车)及测试仪器(红外测温仪、数显转矩扳手),对测试车辆车轮螺栓均编号并标记,车辆绕环形场地逆时针行驶。考虑到每个车轮有 5 颗紧固螺栓,试验数据仅体现平均温度及平均转矩。

车轮与紧固螺栓采用锥面结构设计,为目前乘用车主要设计形式,如图 1 所示。理论上车轮及制动盘等被挤压,紧固区域会发生微观变形,从而使螺栓拉伸量缩短,导致螺栓锁紧力矩衰减,且锥形配合转矩衰减率较差<sup>[1]</sup>。车轮螺栓锁紧标称转矩为 170 Nm,转矩合格性判断:路试后车轮螺栓紧固转矩不低于标称转矩的 70% ( $\geq 119$  Nm) 则认为螺栓转矩合格。

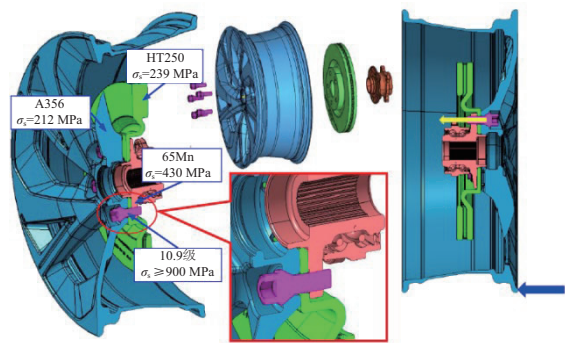


图 1 车轮及紧固螺栓装配关系

试验 1:温升工况试验。  
按温升工况试验要求进行试验,试验样车采用全新车轮和全新螺栓,装车后螺栓转矩拧紧至标称转矩,并做好防松标记,记录数据并进行温升工况试验,验证温度变化对转矩的影响。初始制动盘及螺栓温度均在 31℃ 左右,40 min 后前轮制动盘升温至 230℃ 以上,螺栓升温至 95℃ 左右,前后车轮螺栓转矩均降低,详细结果如表 1 所示。

表 1 温升工况下试验前后车轮螺栓转矩对照表

| 测试项目 |         | 左前<br>车轮 | 右前<br>车轮 | 左后<br>车轮 | 右后<br>车轮 |
|------|---------|----------|----------|----------|----------|
| 试验前  | 螺栓温度/℃  | 31       | 31       | 30       | 31       |
|      | 制动盘温度/℃ | 31       | 31       | 30       | 31       |
|      | 转矩均值/Nm | 170.40   | 170.50   | 170.56   | 170.36   |
| 试验后  | 螺栓温度/℃  | 98       | 95       | 38       | 38       |
|      | 制动盘温度/℃ | 260      | 230      | 40       | 40       |
|      | 转矩均值/Nm | 82.02    | 72.60    | 146.94   | 141.20   |

试验后观察前后车轮螺栓,漆笔防松标记点均未发生移位,故转矩损失并非由螺栓角位移导致。从试验数据可以明显看出,前轮在几乎无侧向(轴向)载荷作用下,仅温升导致的螺栓转矩损失非常显著;而无侧向载荷、升温幅度较低的后轮

同样存在转矩损失情况,但幅度较低。区别在于后轮温度变化小,原因在于前轮制动力大于后轮,导致前轮制动盘产热量远高于后轮,故前制动盘温度远高于后制动盘,可以看出温度对车轮螺栓紧固转矩影响较大。

试验 2:外载工况试验。

按车轮轴向外载工况试验要求进行试验,试验车辆更换新车轮和螺栓,转矩拧紧至 170 Nm,螺栓进行防松标记,进行外载工况试验。初始制动盘及螺栓温度均在 25℃ 左右,40 min 后制动盘和螺栓温度均在 45℃ 左右,前车轮转矩降低至 120 Nm 左右,后车轮转矩也存在显著降低情况,幅度比前轮稍低,但基本在转矩所要求的合格范围内,详细结果如表 2 所示。

表 2 外载工况下试验前后车轮螺栓转矩对照表

| 测试项目 |         | 左前<br>车轮 | 右前<br>车轮 | 左后<br>车轮 | 右后<br>车轮 |
|------|---------|----------|----------|----------|----------|
| 试验前  | 螺栓温度/℃  | 25       | 25       | 25       | 25       |
|      | 制动盘温度/℃ | 25       | 25       | 25       | 25       |
|      | 转矩均值/Nm | 171.63   | 171.38   | 170.72   | 171.72   |
| 试验后  | 螺栓温度/℃  | 45       | 45       | 45       | 45       |
|      | 制动盘温度/℃ | 45       | 45       | 45       | 45       |
|      | 转矩均值/Nm | 120.52   | 120.78   | 130.76   | 131.20   |

试验后观察前后车轮螺栓,漆笔防松标记点均未发生移位,故转矩损失并非由螺栓角位移导致。从试验数据看,由于无制动要求,车轮主要承受侧向(轴向)外载荷,制动盘及车轮紧固螺栓温度升高幅度较低,相比温升工况要低很多;紧固螺栓转矩损失率也较低,前轮转矩损失率远小于温升工况,结合温升工况试验,可以再次确认较高的温度对车轮螺栓紧固转矩损失有较大的影响。

试验 3:转矩复紧后重复外载工况试验。

对外载工况试验车辆车轮螺栓转矩复紧至标称转矩并静置 2 h 后测量制动盘、车轮螺栓温度和转矩并记录,评估温度降低对螺栓转矩的影响;然后进行外载试验,40 min 后记录温度及转矩数据,对比两次外载工况试验下车轮螺栓转矩损失情况;之后对紧固螺栓按标称转矩复紧并静置 2 h 后再次安排进行外载试验,评估转矩复紧条件下再次经历外载工况试验后转矩损失的情况。以上各步骤均详细记录数据,如表 3 所示。

表3 外载工况下试验前后车轮螺栓转矩测试对照表

| 工况        | 测试项目    | 左前车轮   | 右前车轮   | 左后车轮   | 右后车轮   |
|-----------|---------|--------|--------|--------|--------|
| 静置 2 h 测量 | 螺栓温度/℃  | 38     | 37     | 36     | 36     |
|           | 制动盘温度/℃ | 38     | 37     | 36     | 36     |
|           | 转矩均值/Nm | 132.84 | 123.84 | 133.32 | 136.00 |
| 外载工况验证    | 螺栓温度/℃  | 43     | 44     | 40     | 40     |
|           | 制动盘温度/℃ | 43     | 44     | 40     | 40     |
|           | 转矩均值/Nm | 123.78 | 112.48 | 126.66 | 130.50 |
| 转矩复紧      | 螺栓温度/℃  | 37     | 37     | 37     | 37     |
|           | 制动盘温度/℃ | 37     | 37     | 37     | 37     |
|           | 转矩均值/Nm | 172.34 | 172.12 | 172.36 | 172.98 |
| 再次外载验证    | 螺栓温度/℃  | 42     | 42     | 39     | 39     |
|           | 制动盘温度/℃ | 42     | 42     | 39     | 39     |
|           | 转矩均值/Nm | 207.12 | 192.28 | 210.30 | 206.92 |

试验后观察前后车轮螺栓,漆笔防松标记点均未发生移位,故转矩损失并非由螺栓角位移导致。从表3中数据看出:1)试验2结束车辆静置2 h后测量,车轮螺栓转矩均不同程度恢复一部分,但并未恢复至标称转矩;2)静置车辆进行外载工况试验40 min后,制动盘温度及车轮螺栓温度增加了大约5℃,车轮螺栓转矩损失一部分,损失率与试验2相比水平相当;3)对螺栓转矩复紧至标称转矩后采集数据并再次进行40 min外载工况验证,所有车轮制动盘及螺栓温度增加2℃~5℃,但车轮螺栓转矩未损失,相反增加至200 Nm左右,说明在温度变化较小情况下螺栓复紧对转矩损失有较好的抑制作用,同时车轮螺栓转矩复紧后使得螺栓与车轮及轮毂轴承紧固配合关系得到优化并达到理想公差配合状态。

试验4:转矩复紧后进行温升工况试验。

测量试验3样车螺栓初始转矩并进行防松标记,进行温升工况试验;观察螺栓防松标记变化情况,测试并记录前车轮转矩,静置降温后,再次测试并记录螺栓转矩,详细结果如表4所示。

试验后观察前后车轮螺栓,漆笔防松标记点均未发生移位。数据表明40 min后前轮制动盘升温至130℃以上,螺栓升温至85℃,螺栓防松标记均未移位,前车轮螺栓转矩降低至140 Nm左右,再静置降温后,螺栓转矩均恢复至200 Nm以上,螺栓温升工况转矩衰退已能满足转矩要求,且温度降低后,转矩可恢复至初始水平;温升试验后螺栓转矩的衰退在降温后恢复,可以推断温升导致的转矩衰退并非预紧力松懈导致,螺栓复紧对温升工况转矩衰退情况亦有较明显改善作用。此外车轮螺栓一般采用电镀工艺,电镀层对车轮螺

栓摩擦因数基本没有影响<sup>[2]</sup>,故此处排除螺栓电镀层对转矩损失的影响。另外本试验中制动盘及车轮紧固螺栓温度变化较大,尤其制动结束后,车轮紧固螺栓温度较高产生线性膨胀导致预紧力降低,最终造成紧固转矩损失的表象<sup>[3]</sup>;并且当温度恢复至常温后,由于螺栓线性膨胀恢复至初始状态,螺栓转矩亦同步恢复。

表4 转矩复紧后温升工况下车轮螺栓转矩测试对照表

| 工况         | 测试项目    | 左前车轮   | 右前车轮   | 左后车轮   | 右后车轮   |
|------------|---------|--------|--------|--------|--------|
| 静置 2 h 测量  | 螺栓温度/℃  | 32     | 32     | 30     | 31     |
|            | 制动盘温度/℃ | 32     | 32     | 30     | 31     |
|            | 转矩均值/Nm | 218.82 | 205.48 | 215.60 | 205.88 |
| 温升工况验证     | 螺栓温度/℃  | 85     | 82     | 37     | 37     |
|            | 制动盘温度/℃ | 130    | 160    | 40     | 38     |
|            | 转矩均值/Nm | 142.74 | 142.40 | 216.28 | 213.60 |
| 再静置 2 h 测量 | 螺栓温度/℃  | 41     | 36     | 35     | 33     |
|            | 制动盘温度/℃ | 41     | 36     | 35     | 33     |
|            | 转矩均值/Nm | 208.02 | 207.52 | 221.38 | 232.82 |

试验5:复合工况试验。

更换全新车轮及螺栓,按标称转矩拧紧螺栓并做防松标记。实验前复紧螺栓转矩,环形试验场直线段加速至55 km/h,进入弯道前制动至40 km/h,进入弯道进行转弯操作,试验持续40 min,即制动与高速转弯复合试验,评价外载荷及温升复合作用下转矩衰退情况,数据如表5所示。

表5 复合工况下车轮螺栓转矩测试对照表

| 工况      | 测试项目    | 左前车轮   | 右前车轮   | 左后车轮   | 右后车轮   |
|---------|---------|--------|--------|--------|--------|
| 新栓初始转矩  | 螺栓温度/℃  | 37     | 37     | 37     | 37     |
|         | 制动盘温度/℃ | 37     | 37     | 37     | 37     |
|         | 转矩均值/Nm | 176.34 | 177.68 | 174.08 | 174.80 |
| 实验前复紧螺栓 | 螺栓温度/℃  | 37     | 37     | 37     | 37     |
|         | 制动盘温度/℃ | 37     | 37     | 37     | 37     |
|         | 转矩均值/Nm | 179.00 | 180.38 | 177.78 | 178.40 |
| 复合工况试验后 | 螺栓温度/℃  | 50     | 51     | 35     | 38     |
|         | 制动盘温度/℃ | 50     | 70     | 38     | 40     |
|         | 转矩均值/Nm | 164.74 | 149.18 | 178.54 | 171.14 |

试验后观察前后车轮螺栓,漆笔防松标记点均未发生移位。试验数据表明,初始转矩拧紧至标称转矩后制动盘及螺栓温度均在37℃左右,实验开始前复紧螺栓转矩,40 min复合工况试验后制动盘升温至60℃左右,前车轮螺栓温度至50℃,前车轮螺栓转矩降低至140 Nm左右。由于螺栓材料强度远高于车轮铝材,复紧后螺栓对车轮螺栓孔有冷加工效果,故复紧可减小螺栓锥

面配合偏差;复紧作用后的车轮和新螺栓配合,转矩衰退情况已得到显著改善。

在以上全部试验工况中,均需要考虑一个因素,即路况通过轮胎反馈到车轮的激励因素。由于车辆行驶时车轮高速旋转,路面状态不规则,路面激励被轮胎过滤掉一部分后仍会残留部分振动反馈到车轮直至悬架和转向系统,因此振动因素也需要考虑。由于提高螺栓预紧力后可以有效降低振动对预紧力和紧固转矩的损失,因此振动振幅和频率也需要考虑<sup>[4]</sup>。由于以上试验在特定试验场的固定跑道进行,且螺栓紧固转矩按设计标准执行,故振幅和预紧力在全部试验中状态一致。

## 2 分析研究部分

试验后对车轮螺栓在全新状态、复紧前状态和复紧后状态进行拍照对比,在排除了外部撞击痕迹导致螺栓松脱的风险(无异常撞击<sup>[5]</sup>、螺栓强度系数设计不足导致的松脱风险(实际螺栓无松脱)<sup>[6]</sup>以及车轮螺栓锥孔安装面漆面导致的松脱风险<sup>[7]</sup>外(锥孔配合面无喷漆),可以明显看出螺栓在复紧前后有效承担预紧力部分螺纹色泽有明显区别,复紧后螺栓预紧螺纹颜色偏深,说明复紧后螺栓螺纹配合更加紧密,有效接触面积增大,螺纹部分及锥面部分配合偏差得到被动优化,车轮螺栓复紧前后状态对比如图2所示。

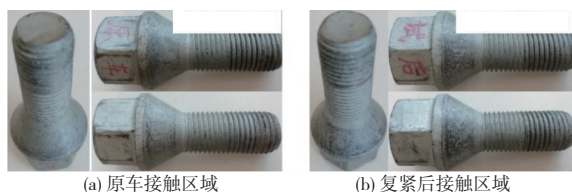


图2 车轮螺栓复紧前后状态对比

车轮螺栓孔受力锥面角度设计尺寸为 $59.5^{\circ} \sim 60^{\circ}$ ,螺栓配合锥面角度设计尺寸为 $60^{\circ} \sim 61^{\circ}$ ,螺栓锥面角度略微大于配合孔锥面角度。从实际现场抽检来看也符合设计状态,车轮螺栓孔锥面角度均值 $59.56^{\circ}$ ,螺栓锥面角度均值 $60.678^{\circ}$ 。

对车轮孔及螺栓配合锥面在试验前后涂色进行了对比,发现锥面大径部分着色剂残留少,说明该区域为重点受力和承载区域;锥面小径部分着色剂留存较多,说明该区域非主要承载区域。从结构受力角度分析,该锥面配合角存在一定的设计偏差,螺栓锥面角度略微大于配合孔锥面角度的观点在此处得到印证,如图3所示。

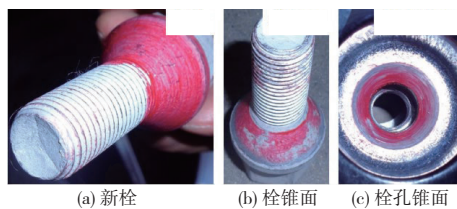


图3 配合锥面预紧前后状态对比

以上试验前后实物状态对比分析结果,均有效支撑了多次复紧可以有效保持车轮螺栓预紧力,同时验证了实物满足设计要求及装配后配合公差亦符合设计要求。

基于产品设计公差范围,同时考虑到螺栓锥度配合状态,建立理想配合( $60^{\circ}$ )和偏差配合( $61^{\circ}$ )的轮边模型,结合试验表现情况,采用螺栓预紧力48 kN、温升范围 $25^{\circ}\text{C} \sim 110^{\circ}\text{C}$ 及转向外载仿真计算,分别模拟仿真在螺栓预紧(图4)、螺栓预紧+制动温升(图5)、螺栓预紧+制动温升+转向外载(图6)3种工况下的对比结果。

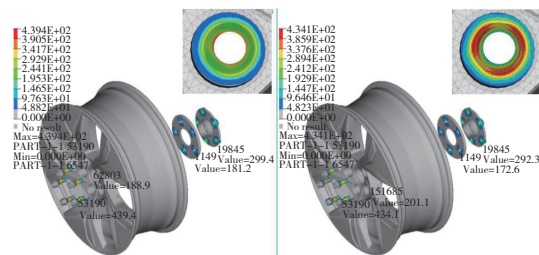


图4 预紧工况应力分布

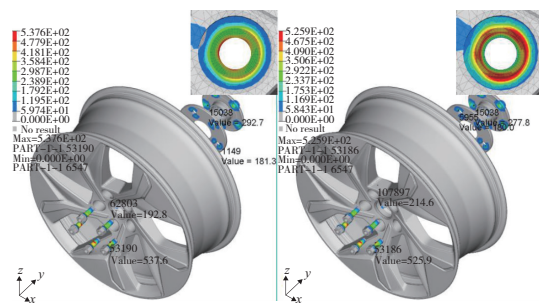


图5 螺栓预紧+制动工况应力分布

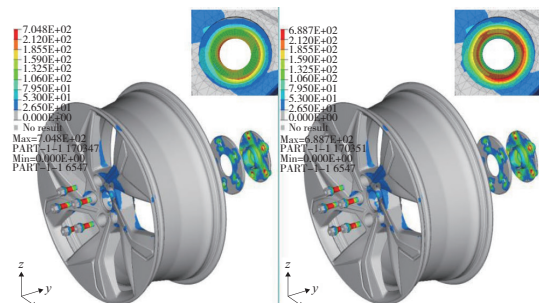


图6 螺栓预紧+制动+转向工况应力分布

在预紧载荷工况下,车轮螺栓孔紧固部位应力偏差配合工况(201.1 MPa)较理想配合工况(188.9 MPa)高,说明偏差配合区域应力较高,但尚未达到屈服状态;在螺栓预紧和温升工况中,车轮螺栓孔配合锥面在偏差配合工况下发生变形,达到屈服强度,其余零件应力均较理想工况低,说

明温升工况下,螺栓孔承载区域开始发生变形,螺栓紧固效果变差;在螺栓预紧、温升及转向外载工况下,车轮锥孔配合部位发生变形加剧,远超屈服强度,螺栓紧固效果持续变差。3种工况仿真数据分析结果如表6所示,仿真结果与试验结果一致。

表6 不同工况下材料最大应力仿真模拟结果

单位:MPa

| 零件   | 材料     | 螺栓预紧  |       | 螺栓预紧+温升 |       | 螺栓预紧+温升+转向 |       | 屈服强度 |
|------|--------|-------|-------|---------|-------|------------|-------|------|
|      |        | 理想配合  | 偏差配合  | 理想配合    | 偏差配合  | 理想配合       | 偏差配合  |      |
| 螺栓   | SCM435 | 439.4 | 434.1 | 537.6   | 525.9 | 704.8      | 688.7 | ≥900 |
| 车轮   | A356   | 188.9 | 201.1 | 192.8   | 214.6 | 220.3      | 227.8 | 212  |
| 制动盘  | HT250  | 181.2 | 172.6 | 181.3   | 180.0 | 191.3      | 187.6 | 239  |
| 轮毂轴承 | 65Mn   | 299.4 | 292.3 | 292.7   | 277.8 | 357.4      | 341.8 | 430  |

以上仿真试验结果表明,车轮螺栓孔锥面偏差配合工况及较高温度影响均会增大车轮锥孔承载区域应力,转向工况加剧了温度提升幅度,并使应力持续增大且超过屈服强度,导致锥面配合紧固效果变差。

### 3 结语

结合本次车轮螺栓转矩衰退现场试验的验证情况和仿真分析结果,结论如下:

1) 螺栓转矩衰退非预紧力释放导致的转矩衰退,而是由于螺栓受温度升高导致线性膨胀,造成转矩损失,当温度降低后紧固转矩可适当恢复;

2) 螺栓和螺栓孔锥度配合多数处于偏差配合,以此进行的仿真分析表明螺栓锥面与锥孔在预紧过程中存在轻微屈服变形;

3) 多次复紧后的螺栓因高温引起的转矩衰退在降温后可恢复,说明温度主要影响摩擦因数和材料膨胀系数,并非导致转矩衰退的本质原因;

4) 仿真试验表明,螺栓与车轮锥孔面存在制造偏差是螺栓转矩衰退的主要影响因素,应对车轮锥孔和螺栓锥面质量一致性水平进行重点管控,同时在使用过程中应对车轮螺栓进行定期的紧固维护。

此外汽车行业内不同主机厂铝车轮与紧固螺

栓的安装尺寸各有不同,材料及公差标准和规范各自成体系,从可持续和绿色发展角度出发,建议对铝车轮和紧固螺栓材料及安装尺寸进行标准化探讨<sup>[8]</sup>,深入践行新发展理念,推动车轮及紧固螺栓行业高质量发展。

### 参考文献:

- [1] 钱海挺,饶丽芳,韩愈琪. 车轮螺栓夹紧力的影响因素分析[J]. 机械强度,2015,37(3):440-444.
- [2] 李大维. 影响紧固件摩擦系数检测的因素[J]. 汽车与配件,2012(28):33-35.
- [3] 李粟裕,胡小山,孙传喜,等. 线膨胀系数对轮盘紧固螺栓力学性能的影响[J]. 大连交通大学学报,2022,43(1):43-47.
- [4] 陈华隆,孙戡,张守京. 横向振动下的螺栓连接松动分析[J]. 机械制造与自动化,2023,52(2):48-50.
- [5] 侯明仁. 防止车轮螺栓松动的措施[J]. 汽车技术,1986(3):63-64.
- [6] 卓纳麟. 某叉车轮辋螺栓松动问题分析与改进[J]. 机械工程与自动化,2023(4):78-80.
- [7] 张忠雷,王木生,杜喜阳,等. 商用车车轮螺栓力矩衰减改进方案[J]. 汽车科技,2021(2):91-95,113-114.
- [8] 王孝东. 践行新发展理念高质量推动车轮行业发展:乘用车车轮安装尺寸标准化探讨[J]. 中国质量万里行,2022(8):62-63.

收稿日期:2023-07-06