

# 动车组客室座椅靠背螺栓断裂问题分析及整改措施

毕 凯 贾 旭

(中车长春轨道客车股份有限公司国家轨道客车工程研究中心, 130062, 长春)

**摘 要** [目的] 高速铁路动车组座椅靠背螺栓断裂, 将导致靠背支撑性能失效及角度调节功能失效。检修发现, 靠背螺栓断裂的发生频次较高, 且断裂形式趋于一致, 需要找出螺栓断裂的原因, 并提出相应的整改措施。[方法] 对螺栓进行了化学成分检查和拉伸检查, 以及剪切试验、硬度试验等力学性能试验, 核查了螺栓自身的质量。采用金相组织和电镜扫描, 对螺栓断口的宏观形貌和微观形貌进行了分析, 找出螺栓断裂的形式。最后对螺栓的服役工况理论进行了分析, 确定螺栓断裂的主要原因。对既有结构进行了整改, 增加辅助固定支架, 以改善螺栓的受力工况。[结果及结论] 螺栓断裂并非螺栓自身质量引起, 其断裂为韧性疲劳断裂。悬臂结构下螺栓受不对称载荷作用产生弯曲, 导致螺栓的疲劳性能较低, 进而引起断裂。实施整改措施后, 高速铁路动车组投入运营 1 年, 没有再发生类似的螺栓断裂问题。

**关键词** 高速铁路; 动车组; 客室座椅; 靠背螺栓; 疲劳断裂

中图分类号 U271.913.8<sup>+</sup>7

DOI:10.16037/j.1007-869x.2025.02.031

## Analysis and Countermeasures of Bolt Fracture Issues in EMU Passenger Compartment Seat Backs

BI Kai, JIA Xu

(National Engineering Research Center of Railway Vehicles, CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., 130062, Changchun, China)

**Abstract** [Objective] The fracture of seat back bolts in high-speed railway EMU (electric multiple units) trains results in the back support performance failure and the angle adjustment feature malfunction. A high frequency of bolt fractures with consistent fracture pattern in seatbacks is found in maintenance inspections. Thus, it is necessary to identify the causes of the bolt fractures and propose corresponding countermeasures. [Method] Chemical composition checks, tensile tests and mechanical performance tests such as shear and hardness tests are conducted on the bolts, to evaluate the mechanical properties and verify the bolt quality. Metallographic analysis and electron microscopy scanning are employed to examine the macro and micro characteristics of the bolt fracture surfaces, identifying the types of bolt fracture. Theoretical analysis of the service conditions of the bolts is finally conducted to determine the primary cause of bolt fractures. Structural modifications are made, including the addition of auxiliary support brackets, to improve the loading conditions of bolts. [Result & Conclusion] The bolt fractures are not due to inherent quality issues but are identified as ductile fatigue fractures. The bolts are subjected to asymmetric loads under cantilever structures, and the resulted bending will lead to reduced fatigue performance and subsequent fractures. After implementing the countermeasures, no similar bolt fracture issues occurred during one year of high-speed railway EMU operation.

**Key words** high-speed railway; EMU; passenger compartment seat; seat back bolt; fatigue fracture

高速铁路动车组客室座椅是影响乘客乘坐安全性和舒适性最直接的设备<sup>[1]</sup>。座椅靠背螺栓断裂, 将导致靠背支撑性能失效、角度调节功能失效, 进而影响乘客乘坐的安全性和舒适性。售后检修过程中发现, 动车组客室座椅靠背螺栓断裂的发生频次较高, 且断裂形式趋于一致。为此, 本文对靠背螺栓的化学成分、力学性能、断口形态等进行分析, 找出螺栓断裂的原因, 并提出了整改措施。

## 1 客室座椅断裂普查

动车组客室座椅靠背螺栓的连接结构如图 1 所示。

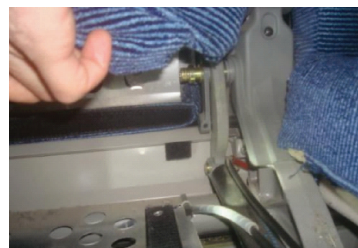


图 1 靠背螺栓连接结构

Fig. 1 Seat back bolt connection structure

从高速铁路上出现典型靠背螺栓断裂问题的

动车组中,选取了10列动车组(每列的编组数均为8节)进行普查。螺栓断裂位置均出现在螺纹与安装座交界处,失效螺栓和未失效螺栓的实物图对比如图2所示。

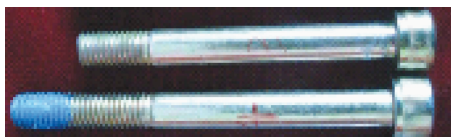


图2 失效螺栓和未失效螺栓的实物图对比

Fig. 2 Photo of failure bolt and non-failure bolt in comparison

螺栓断裂普查结果如表1所示。这10列动车组均投入运行了1~2年,靠背螺栓断裂的比例为4%~15%,这与其设计寿命30年的制造目标严重不相符。

表1 螺栓断裂普查结果

Tab.1 Survey results of bolt cracking

动车组 编号	失效螺栓 数量/个	失效螺栓 比例/%	动车组 编号	失效螺栓 数量/个	失效螺栓 比例/%
1	30	6.98	6	61	14.19
2	34	7.91	7	34	7.91
3	50	11.63	8	28	6.51
4	20	4.65	9	57	13.26
5	32	7.44	10	22	5.12

注:每列车上的靠背螺栓总数均为430个。

## 2 螺栓断口断裂性质分析

### 2.1 化学成分检查

选取失效螺栓进行化学成分检查,失效螺栓各主要化学元素的质量分数检查结果如表2所示。由表2可知:此结果符合GB/T 699—2015《优质碳素结构钢》表1中对35号钢对应化学成分的要求,也满足GB/T 3098.1—2010《紧固件机械性能 螺栓、螺钉和螺柱》表2中8.8级M8螺栓对应化学成分的要求。

### 2.2 拉伸检查

将失效螺栓加工成拉伸试样并进行拉伸试验。由于失效螺栓长度不足,只能测试其抗拉强度。失效螺栓拉伸试样的试验结果如表3所示。由表3可知:失效螺栓抗拉强度符合GB/T 3098.1—2010中8.8级M8螺栓的参数要求。

### 2.3 剪切试验

靠背螺栓受力主要为剪切力,因此,根据螺栓

的工作状态,分别对失效螺栓、未失效螺栓进行了剪切试验,其结果如表4所示。由表4可知,失效螺栓、未失效螺栓的剪切强度相近。

表2 失效螺栓中各主要化学元素的质量分数检查结果

Tab.2 Quality fraction inspection results of major chemical elements in failure bolts

化学 元素	2个标准规定的各化学元素 质量分数数值区间		失效螺栓各 化学元素的 质量分数
	GB/T 699—2015	GB/T 3098.1—2010	
C	0.320~0.390	0.150~0.40	0.340
Si	0.170~0.370		0.190
Mn	0.500~0.800		0.660
P	<0.035	<0.025	0.012
S	<0.035	<0.025	0.008
Cr	<0.250		0.030
Ni	<0.300		0.020
Cu	<0.250		0.010

表3 失效螺栓拉伸试样的试验结果及技术要求

Tab.3 Test results and technical requirements of failure bolt tensile specimens

项目	抗拉强度/ MPa	塑性延伸 强度/MPa	断裂后伸 长率/%
GB/T 3098.1—2010 规定的技术要求	>800	>640	>12.0
失效螺栓拉伸 试样的试验结果	946	898	15.5

表4 失效螺栓、未失效螺栓的剪切试验结果

Tab.4 Shear test results of failure and non-failure bolts

螺栓类型	剪切位置	剪切力/kN	剪切强度/MPa
失效螺栓	杆部	29.5	586
	螺纹	20.8	568
未失效螺栓	杆部	27.5	547
	螺纹	20.9	563

### 2.4 硬度试验

依据GB/T 3098.1—2010要求,将距螺纹末端部1个螺栓截面直径位置处的横截面作为维氏硬度的测试面。截取该测试面,在距测试面1/2个螺栓截面半径处进行维氏硬度试验。失效螺栓硬度的3次检测结果分别为302 HV、295 HV、300 HV,均符合GB/T 3098.1—2010中8.8级M8螺栓的硬度要求(250~320 HV)。

### 2.5 金相组织分析

按图3所示切割失效螺栓断口,其中:截面A-A

面为疲劳源切面, B-B 为非疲劳源切面。对截面 A-A 和截面 B-B 进行显微组织检测。

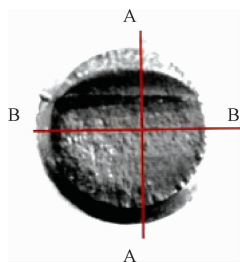


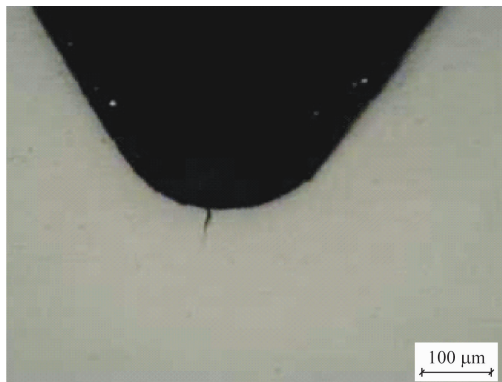
图3 金相切割示意图

Fig. 3 Diagram of metallographic cutting

经观察,截面 A-A 的螺纹根部有多处裂纹,且部分螺纹的根部产生了多根裂纹,其实物放大图如图 4 所示。由图 4 可知,截面 A-A 处螺栓的根部裂纹呈现一定规律性:与断口距离较近的螺纹根部产生了较深的或数量较多的裂纹;随着与断口距离的增加,螺纹根部裂纹逐渐变浅;距断口约 8 倍螺距及以上距离的螺纹根部均未发现裂纹。



a) 距断口约 2 倍螺距处



b) 距断口约 7 倍螺距处

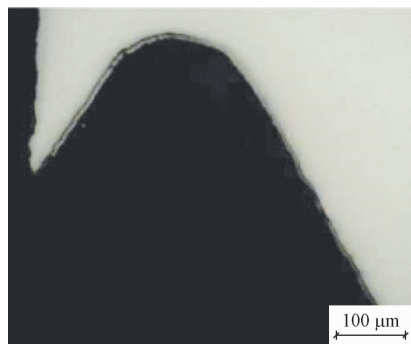
注:放大倍率为 100;100 μm 为标尺的比例尺寸。

图4 截面 A-A 螺纹根部裂纹放大图

Fig. 4 Enlarged view of section A-A crack at bolt root

进一步对截面 B-B 进行检测,发现螺纹根部出

现了裂纹,其实物放大图如图 5 所示。



注:图片为距断口约 0.5 倍螺距处截图;放大倍率为 100。

图5 截面 B-B 螺纹根部裂纹实物放大图

Fig. 5 Enlarged image of section B-B crack at bolt root

进一步对未失效螺栓进行观察。观察发现,未失效螺栓螺纹根部并未出现裂纹等缺陷。由此可推断,此裂纹为疲劳裂纹,且螺纹在使用过程中沿轴向方向断裂处的受力最大,截面 A-A 方向的受力明显高于截面 B-B 方向的受力。

对比失效螺栓及未失效螺栓的表面及其心部,二者的金相组织一致,均为回火索氏体,是由等轴状铁素体和细粒状碳化物构成的复相组织,且组织状态正常。失效螺栓的晶粒度级别为 6 级,未失效螺栓的晶粒度级别为 8~9 级,失效螺栓的晶粒较未失效螺栓略显粗大。失效螺栓非金属夹杂物级别为 D 类细 0.5 级,未见异常。

另发现失效螺栓螺纹及未失效螺栓螺纹的表面均存在脱碳现象。对比 GB/T 3098.1—2010 中 8.8 级 M8 螺栓的参数要求(未脱碳层最小高度不小于 0.384 mm),失效螺栓的未脱碳层高度为 0.539 mm,未失效螺栓的未脱碳层高度为 0.525 mm,均符合 GB/T 3098.1—2010 的要求。

## 2.6 电镜扫描分析

### 2.6.1 断口宏观分析

图 6 为失效螺栓断口的宏观形貌,可看出此断裂为疲劳断裂,螺栓断口可见明显的疲劳贝纹线。一般情况下,疲劳断口分为疲劳源、疲劳扩展区和瞬断区 3 个部分,疲劳扩展区以疲劳源为中心向外侧扩展,呈现贝纹线形貌,疲劳辉纹垂直于裂纹扩展方向。根据图 6 的贝纹线扩展方向,可推断出该螺栓断口疲劳起源于相对的螺纹表面两侧。同时发现螺栓杆部磨损位置与疲劳源 2 处于同一环向位置,与疲劳源 1 处于相对位置。图 6 中,断口较粗糙的区域为最后的瞬断区。由此可进一步推断螺栓



断口处承受了双向弯曲交变载荷。此外,失效螺栓杆部出现了磨损,且疲劳源1处产生的疲劳扩展区面积较疲劳源2大,这进一步表明了弯曲载荷呈不对称分布,载荷更集中于疲劳源1处。

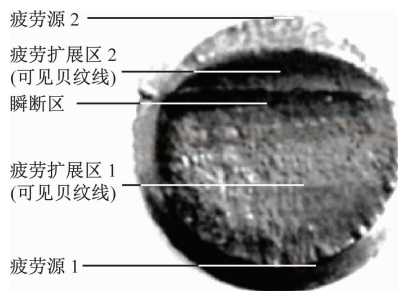


图6 断口宏观形貌截图

Fig. 6 Screenshot of fracture surface macroscopic morphology

### 2.6.2 断口微观形貌

观察疲劳源1和疲劳源2处的断口形貌。在裂纹扩展过程中,疲劳源1和疲劳源2受外力作用不断相互摩擦进而导致磨损,但这2处位置均未发现明显的原材料缺陷。在疲劳扩展区1和疲劳扩展区2的断口形貌图中,发现了垂直于裂纹扩展方向的疲劳辉纹,同时扩展区可见二次裂纹(二次裂纹通常因承受较大载荷所致)。随着裂纹不断扩展,螺栓剩余截面积不足以抵抗外力作用,从而在瞬断区产生快速断裂。疲劳扩展区2及瞬断区的微观形貌如图7所示。图7中可见大量韧窝,其断口微观形貌表明螺栓断裂为韧性断裂。

综上所述,根据化学成分和力学性能检查结果,螺栓符合相关标准要求。螺栓螺纹表面存在一定量脱碳及晶粒稍微粗大现象,其疲劳强度因此有所下降,但仍在标准要求的范围内。通过螺栓断口分析可认定,此断裂为韧性疲劳断裂。

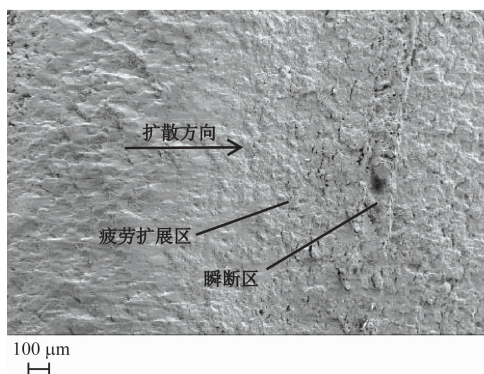
## 3 螺栓服役工况分析

### 3.1 理论分析

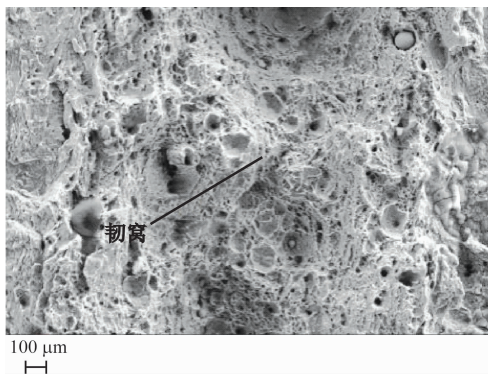
座椅的强度应执行 TB/T 3263—2011《动车组乘客座椅》的要求。靠背工况为简单的杠杆受力,按标准设计要求,靠背推力为 980 N。当力作用在靠背最上端时,力臂最长,此时安装螺栓位置处的转轴受力  $F_1$  最为严苛。座椅靠背骨架力臂示意图如图8所示。图8中,下部交接点至转轴点的距离  $d_1 = 94.0 \text{ mm}$ ,靠背上端至转轴点的距离  $d_2 = 739.5 \text{ mm}$ 。

螺栓受力变形示意图如图9所示。根据材料力

学悬臂梁的受力特点,可确定螺栓断裂处截面上螺栓轴所受压力  $F_2$  和弯矩  $M_c$  均为最大值,  $F_2 = 3852 \text{ N}$ ,  $M_c = 30 \text{ Nm}$ 。



a) 放大倍数为50倍的微观图



b) 放大倍数为500倍的微观图

图7 疲劳扩展区2及瞬断区的微观形貌截图

Fig. 7 Screenshots of microscopic morphology in fatigue expansion zone 2 and transient fracture zone

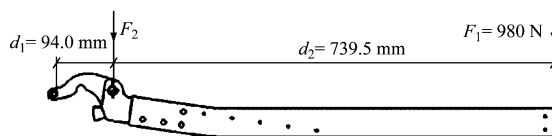


图8 座椅靠背骨架力臂示意图

Fig. 8 Diagram of seat back frame force arm

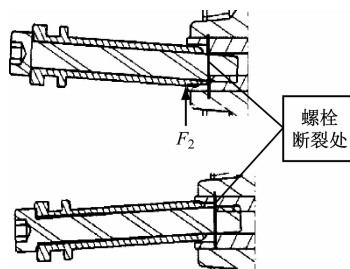


图9 螺栓受力变形示意图

Fig. 9 Diagram of bolt deformation under stress

#### 3.1.1 正应力强度校核

设  $W_z$  为圆形截面的弯曲截面系数,  $D_{Is}$  为螺栓

直径,其计算式为:

$$W_z = \pi D_{ls}^3 / 32 \quad (1)$$

经计算可得  $W_z = 0.046\ 58\ \text{mm}^3$ 。

最大正应力  $\sigma_{\max}$  发生在断裂截面的上、下边缘两点(上拉下压),其计算式为:

$$\sigma_{\max} = M_c / W_z \quad (2)$$

由此,可计算得到  $\sigma_{\max} = 644\ \text{MPa}$ ,该值大于 8.8 级 M8 螺栓的屈服强度 640 MPa。

### 3.1.2 切应力强度校核

危险截面上的最大切应力  $\tau_{\max}$  发生在断裂截面的中性轴处, $S$  为截面面积,则  $\tau_{\max}$  的计算式为:

$$\tau_{\max} = 4F_2 / (3S) \quad (3)$$

经计算可得  $\tau_{\max} = 107.5\ \text{MPa}$ 。

### 3.2 仿真计算

按理论计算工况进行仿真分析,仿真计算得到的应力云图如图 10 所示。靠背螺栓最大应力值为 651.36 MPa,与理论计算值几乎一致,略大于 8.8 级 M8 螺栓的屈服强度,远小于该型螺栓的断裂强度。

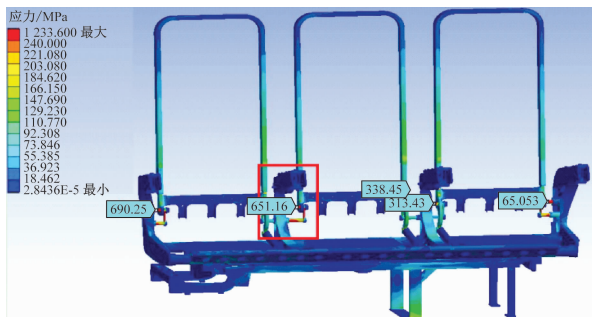


图 10 仿真计算得到的应力云图

Fig. 10 Stress nephogram obtained from simulation calculation

综上所述,伸缩式靠背座椅螺栓断裂由两个方面原因引起:一是在悬臂结构下,螺栓受载荷作用时发生弯曲,螺栓强度不足,导致螺栓的疲劳性能较低,进而导致韧性断裂;二是螺栓螺纹表面存在脱碳及晶粒稍微粗大现象,导致螺栓的疲劳强度有所下降。经分析,第一个原因是导致螺栓断裂的主要原因。

## 4 螺栓断裂的整改措施

增加固定支架,将悬臂受力更改为简支梁受力,以减少螺栓的变形,提升螺栓的抗疲劳性能。由于空间和结构限制,固定支架由高强度钢板焊接而成,并铆接于座椅骨架上,如图 11 所示。

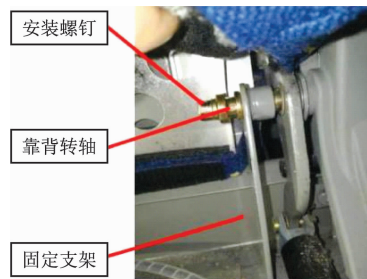


图 11 增加固定支架后的实物图

Fig. 11 Photo of added fixed bracket

对整改后的螺栓结构进行强度和耐久性试验,试验现场如图 12 所示。经试验验证,整改后的螺栓结构没有发生变形及开裂现象。根据此整改方案,对 1 列高速铁路动车组进行了整改,该动车组的螺栓数为 430 个。整改后,该列车投入运营的 1 年内,没有发生螺栓断裂问题。

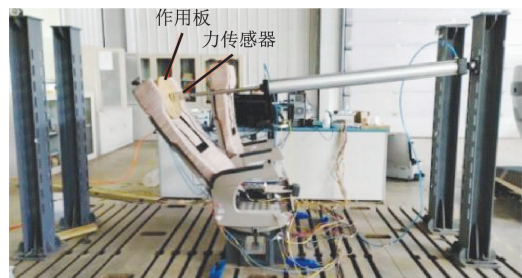


图 12 整改后螺栓结构的试验现场图

Fig. 12 Photo of bolt structure test site after modification

## 5 结语

本文对高速动车组列车靠背螺栓断裂进行了原因分析。经理论计算及试验验证,得出结论如下:

- 1) 根据化学成分和力学性能检查,螺栓符合标准要求,螺栓断裂非螺栓自身的原因导致。
- 2) 螺栓的宏观断口形貌有贝纹线,说明断裂为疲劳断裂。螺栓的微观断口形貌有大量韧窝,说明断裂为韧性断裂。
- 3) 螺栓在悬臂结构下受不对称载荷作用引起弯曲,导致疲劳性能较低,这是螺栓断裂的主要原因。
- 4) 优化螺栓结构,增加辅助固定支架,改善螺栓的受力工况,可有效解决螺栓断裂问题。

## 参考文献

- [1] 贾旭,战雪,周鑫弘. 动车组客室座椅椅腿开裂试验研究[J]. 城市轨道交通研究, 2019, 22(2): 79.

(下转第 156 页)

60 Hz、70 Hz 时,与 AC 380 V 供电变频空调机组相比,DC 600 V 供电变频空调机组的节能幅度分别为 11.48%、11.08%、5.33%、2.82%;

2) 送风机:与 AC 380 V 供电变频空调的送风机相比,DC 600 V 供电变频空调送风机的节能幅度为 14.80%;

3) 冷凝风机:与 AC 380 V 供电变频空调的冷凝风机相比,DC 600 V 供电变频空调冷凝风机的节能幅度为 9.52%。

## 4 结语

本文对 DC 600 V 供电变频空调机组在城市轨道交通车辆上的应用进行了理论分析及试验验证,结论以下:

1) DC 600 V 供电变频空调机组取消了车上 2 次能量转换,具有一定的节能优势。

2) 在不同的压缩机频率下,DC 600 V 供电变频空调机组的节能效果有所不同。压缩机低频运转时,其节能效果更加明显。

3) EC 风机可实现风量的多级调节,且具有功率因数高的特点。与传统异步电机风机相比,EC 风机更具节能性。

## 参考文献

[1] 廖全平,李红旗. 涡旋变频压缩机[J]. 流体机械,2002,30

(2):35.

LIAO Quanping, LI Hongqi. Scroll inverter compressor[J]. Fluid Machinery, 2002, 30(2): 35.

[2] 李剑,刘美堂,高福学. 城市轨道交通车辆变频空调系统节能及舒适性分析[J]. 城市轨道交通研究,2015,18(5):99.

LI Jian, LIU Meitang, GAO Fuxue. Analysis of energy-saving efficiency of air-conditioning system and vehicle comfort in urban rail transit[J]. Urban Mass Transit, 2015, 18(5): 99.

[3] 张丽,何昌艳. 城市轨道交通空调变风量控制对舒适性的影响研究[J]. 现代城市轨道交通,2019(6):44.

ZHANG Li, HE Changyan. Study on effect of vent variable air volume control on ride comfort of urban rail transit air conditioning[J]. Modern Urban Transit, 2019(6): 44.

[4] 李朴桓,孙天宝,刘强,等. EC 风机在精密空调节能改造领域的应用[J]. 洁净与空调技术,2021(2):97.

LI Puhuan, SUN Tianbao, LIU Qiang, et al. Application of EC fan in energy saving reformation of precision air conditioner[J]. Contamination Control & Air-Conditioning Technology, 2021 (2): 97.

· 收稿日期:2024-08-05 修回日期:2024-09-05 出版日期:2025-02-10

Received:2024-08-05 Revised:2024-09-05 Published:2025-02-10

· 第一作者:康伟,正高级工程师,kangwei.ck@crrecg.cc

通信作者:赵钧,高级工程师,jun.zhao@guoxiang.com.cn

· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议

© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第 152 页)

JIA Xu, ZHAN Xue, ZHOU Xinhong. Experimental study on the seat leg cracking problem in EMU passenger compartment[J]. Urban Mass Transit, 2019, 22(2): 79.

[2] 成大先. 机械设计手册-第 1 卷[M]. 6 版. 北京:化学工业出版社,2016.

CHENG Daxian. Handbook of mechanical design-volume I[M]. 6th ed. Beijing: Chemical Industry Press, 2016.

[3] 刘鸿文. 简明材料力学[M]. 2 版. 北京:高等教育出版社,2008.

LIU Hongwen. Concise mechanics of materials[M]. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press, 2008.

[4] 刘德林,胡小春,何玉怀,等. 从失效案例探讨钢制紧固件的

氢脆问题[J]. 材料工程,2011,39(10):78.

LIU Delin, HU Xiaochun, HE Yuhuai, et al. Hydrogen brittleness fracture of steel fasteners[J]. Journal of Materials Engineering, 2011, 39(10): 78.

· 收稿日期:2024-08-05 修回日期:2024-09-05 出版日期:2025-02-10

Received:2024-08-05 Revised:2024-09-05 Published:2025-02-10

· 第一作者:毕凯,正高级工程师,bikai.ck@crrecg.cc

通信作者:贾旭,正高级工程师,jiaxu20040902@163.com

· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议

© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

欢迎投稿《城市轨道交通研究》

投稿网址:tougao.umt1998.com