

动车组用螺栓重复使用可行性探讨

王 冬

(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//高级工程师)

摘 要 为探究动车组设备吊装用螺栓是否存在重复使用的可能性,在实验室内进行了螺栓的机械性能、反复加载、镀层耐腐蚀性、疲劳寿命等多项试验,获得了反复加载时力矩与夹紧力的变化规律。试验结果表明,在控制加载力矩或对镀层再处理的条件下,螺栓具备重复使用的可行性。

关键词 动车组用螺栓; 重复使用; 反复加载

中图分类号 U270.3; TH131.3

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2021.02.012

Discussion on EMU Bolts Reuse Feasibility

WANG Dong

Abstract In order to explore the possibility of reusing bolts from EMU equipment hoisting, a number of tests are carried out in the laboratory, including mechanical properties, repeated loading, corrosion resistance of the coating, fatigue life. The pattern of clamping force and torque change under repeated loading is obtained. Test results show that the bolt is feasible for reuse under the condition of controlling loading torque or coating retreatment.

Key words EMU bolts; reuse; repeated loading

Author's address CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., 130062, Changchun, China

螺栓是动车组装配的关键连接件之一,其性能对列车的稳定运行起到至关重要的作用。国内 8 辆编组的某高速动车组,其车下重型电气设备吊装、转向架安装、车钩安装均采用了 8.8 级以上的高强度螺栓^[1],规格有 M20、M24、M36 等,全列数量达到 600 枚以上。为保证结构的安全性,目前该类螺栓一旦拆卸则不允许再次使用。使用过的螺栓应该直接报废还是再次利用均无相应的理论依据及数据支持,因此有必要对螺栓的反复使用进行可行性论证,在保证安全的前提下尽量减少造修成本。

1 螺栓应用现状

螺纹连接结构广泛应用于建筑、轨道交通等领

域。根据应用环境的不同需求,设计者会选用相应规格、材质、数量、强度等级的螺栓,以获得合理的安全系数,并兼顾结构的可靠性及经济性。对于螺栓,尤其是高强度螺栓能否多次重复使用,我国并没有统一的规定。对于塔吊用高强度螺栓,一般螺栓重复使用次数不超过 2 次^[2]。对于建筑机械与设备用高强度紧固件,JB/T 5057.40—1995《建设机械与设备 高强度紧固件技术条件》规定:高强度螺栓在螺纹牙型、表面状态等方面无较大变化的情况下,允许螺栓拆卸后再次使用;GB 82—1991《钢结构高强度螺栓连接的设计、施工及验收规程》规定:考虑到扭矩系数变化的影响,不得使用高强度螺栓兼做临时螺栓;美国 AISC 规程明确规定:ASTM A490 螺栓和镀锌 ASTM A325 不得被重复利用^[3]。

2 动车组用螺栓重复使用的研究方法

要进行螺栓的反复使用可行性论证,首先需要了解螺栓的性能,对螺栓进行全面的性能检验,从而来判断该螺栓是否满足指标要求,以及是否存在重新利用的前提条件。然后还需研究在重复加载过程中螺栓的夹紧力和力矩的变化、表面镀层破坏程度、螺纹变形情况、拉伸性能变化、疲劳性能变化以及耐腐蚀性能等,研究反复加载过程中这些性能变化是否对螺栓的安全使用产生显著影响。同时,依据试验结果对螺栓的安全系数进行深入分析,从而判断螺栓重复利用的可行性。

2.1 新螺栓性能检验

采用荧光光谱仪对螺栓的化学成分进行分析,如表 1 所示。由表 1 可知,C、Mn 两种元素对螺栓强度发挥主要作用;Ni、Cu 等元素可提高耐蚀性;Cr 提高了钢的淬透性和回火稳定性,并有利于螺栓耐磨性和抗氧化;Mo 则可增加螺栓淬透性;杂质元素 P、S 含量较低,表明螺栓的冶金质量较好。

表 1 螺栓的化学成分

元素	质量分数/%	元素	质量分数/%
C	0.400	Cr	1.060
Si	0.200	Ni	0.130
Mn	0.710	Cu	0.250
P	0.012	Mo	0.037
S	0.025		

表 2 为 3 枚圆棒状螺栓试样的拉伸试验数据。ISO 898-1:2013 标准对 8.8 级螺栓规定:屈服强度 ≥ 660 MPa,抗拉强度 ≥ 830 MPa,延伸率 $\geq 12.0\%$,断面收缩率 $\geq 52\%$ 。由表 2 可知,试验数据均满足 ISO 898-1:2013 标准对 8.8 级螺栓规定的性能要求。

表 2 螺栓试样的拉伸性能数据

试样 编号	屈服强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	延伸率/ %	断面收缩率/ %
1	782	877	20.0	63
2	792	852	20.0	63
3	788	884	20.0	63

同时,对 V 型缺口冲击试样进行了冲击性能检验,在低温条件下的冲击功达到了 80 J 以上,远远高于标准要求的 20 J。

2.2 反复加载试验

2.2.1 加载试验方法

为获得在加载条件下螺栓所产生的轴向力,参照螺栓的实际结构,在实验室范围内进行工况模拟。螺栓设计紧固力矩为 275 Nm,试验时采用带数显的力矩扳手加载,螺栓的轴向力通过传感器在计算机中直接显示。图 1 为实验室范围内螺栓轴向力测量装置图。



图 1 实验室范围内螺栓轴向力测量装置图

2.2.2 相同力矩下夹紧力的变化

利用数显力矩扳手对螺栓加载至 275 Nm,当轴向夹紧力保持稳定后卸载,按此反复进行试验,以

研究相同的加载力矩、不同的加载次数对螺栓轴向夹紧力的影响。

表 3 为加载次数与轴向夹紧力之间的关系。由表 3 可知,首次加载时夹紧力为 114 kN,第 2 次加载时夹紧力明显升高,但随着加载次数的增加,夹紧力逐渐降低。加载到第 6 次时,夹紧力逐渐趋于稳定,但明显低于初始数值。

表 3 螺栓夹紧力与加载次数之间的关系

加载次数/次	夹紧力/kN	加载次数/次	夹紧力/kN
1	114.65	5	79.88
2	129.33	6	99.70
3	104.01	7	87.07
4	101.64	8	93.50

2.2.3 相同夹紧力下力矩的变化

对另一枚新螺栓加载 275 Nm,此时显示轴向力为 111.3 kN。卸载后再次加载,直到获得相同的轴向力,记录对应的扭矩数值。该试验用以研究在保持夹紧力不变的条件下,加载力矩的变化情况,见表 4。数据显示,保持轴向夹紧力不变时,第 2 次的扭矩低于第 1 次;而第 3 次的扭矩不仅远高于第 2 次,而且还高于第 1 次。这与夹紧力变化结果是吻合的。当加载次数超过 3 次以后,扭矩值变化较小。

表 4 相同轴向夹紧力下螺栓的扭矩变化

加载次数/次	扭矩/(Nm)	加载次数/次	扭矩/(Nm)
1	275	5	299
2	230	6	305
3	290	7	305
4	299	8	320

为了研究不同螺栓的加载规律,对 10 枚螺栓进行了该试验。其中,5 枚重复加载 5 次,其余 5 枚为 10 次,试验结果见图 2。由图 2 可知,加载前期的力矩整体呈下降趋势,且变化范围较小;当加载超过 4

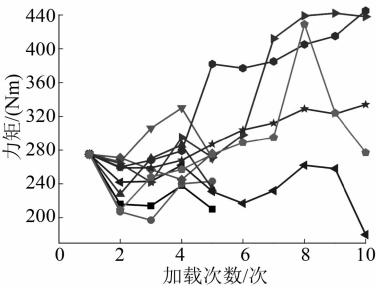


图 2 10 枚螺栓多次加载时扭矩变化图

次后,力矩的变化范围逐渐变大,尤其当加载至 10 次时,最大力矩达到了 440 Nm,而最小力矩仅为 180 Nm。力矩分散性加大时,表明螺栓不具备该条件重复使用的可能性。因此,螺栓的最多使用次数不应超过 3 次。

2.2.4 螺栓表面质量的变化

图 3 分别为经过 5 次、10 次加载后螺栓表面的破坏情况。由图 3 可知,经反复加载后,螺栓表面的镀锌层被完全破坏,这也是再次加载时螺栓的夹紧力和扭矩变化的重要原因之一。

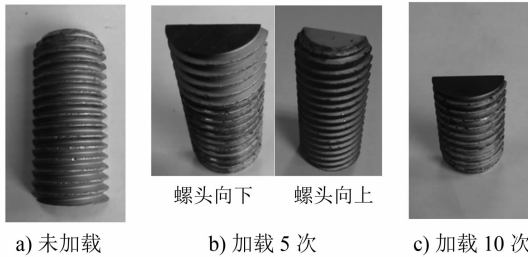


图 3 不同加载次数下螺栓表面的变化

2.2.5 螺纹形状的变化

图 4 为螺纹齿形的对比图。由图 4 可知,螺纹齿形变化不大,多次加载反而使得螺纹的齿形更加完整光滑。

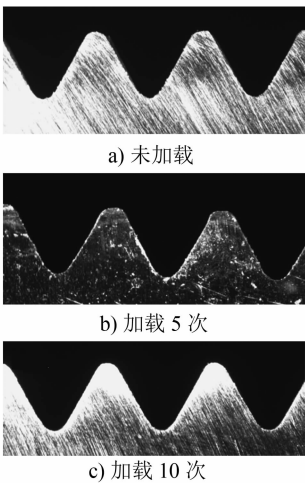


图 4 不同加载次数下螺栓螺纹形状的变化

2.2.6 螺栓拉伸性能的变化

表 5 为不同加载次数螺栓的拉伸性能变化规律。由表 5 可知,随着加载次数的增加,螺栓的强度和延伸率均未明显变化,甚至还略有增加,这是螺栓可重复加载使用的基础。

2.2.7 螺栓疲劳性能的变化

按照 GB 3075—1982《金属轴向疲劳试验方法》,

对不同加载次数的螺栓进行疲劳性能测试。加载波形为正弦波,应力比 $R=0.1$ 。测试结果见表 6。由表 6 可知,螺栓的应力极限约为 750 MPa,故以此为疲劳试验应力最大值。对于首次加载的新试样,允许的最大应力均超过 750 MPa,而加载 5 次的试样在 750 MPa 时对应的疲劳寿命波动较大,加载 10 次的试样的疲劳寿命又有所回升。本试验采用的是由螺栓加工的试样,与前文中螺栓的机械性能数据不完全一致。但通过上述数据可判定反复加载后的试样,其疲劳性能虽有所下降,但仍然保持在较高水平。

表 5 不同加载次数下螺栓拉伸性能对比

加载次数/次	屈服强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	延伸率/ %	断面收缩率/ %
1	782	877	20.0	63
	792	852	20.0	63
	788	884	20.0	63
5	819	904	20.0	60
	809	899	20.0	61
	818	905	20.0	62
10	802	890	20.0	62
	800	888	21.0	63
	797	886	21.0	64

表 6 不同加载次数下试样的疲劳性能对比

加载次数/次	试样编号	最大应力/MPa	疲劳寿命/次
1	1	800	93 351
	2	750	>10 000 000
	3	800	126 103
	4	775	6 028 922
	5	775	7 256 464
	6	750	>10 000 000
5	1	775	1 190 870
	2	775	>10 000 000
	3	800	86 672
	4	800	71 314
	5	750	4 543 122
	6	750	2 899 577
10	1	800	133 445
	2	775	178 548
	3	750	84 997
	4	700	3 332 314
	5	700	432 583
	6	700	>10 000 000

2.2.8 螺栓耐蚀性能的变化

反复加载后,螺栓表面镀层被破坏,耐蚀性能也将有所变化。为了更直观地证明镀锌层的作用,按照 GB/T 10125—1997《人造气氛腐蚀试验盐雾试验》,分别将带有镀锌层和脱掉镀锌层的两种螺栓置于实验箱中进行不同时间的中性盐雾试验。取出后去除腐蚀产物并称重。螺栓表面镀锌层的存在使其在 NaCl 溶液中几乎保持原状态,失重率非常低,4 周仅失重 0.05 g。相应去掉镀锌层的螺栓失重则达到 11.88 g。图 5 为盐雾腐蚀后螺栓表面情况对比。

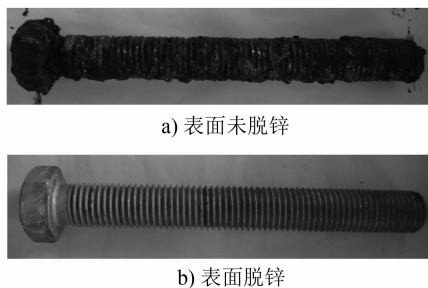


图 5 盐雾腐蚀后未除锈前的螺栓表面状态

3 试验分析

螺栓在反复加载过程中,有 8 个性能发生了改变,包括表面质量、夹紧力、力矩、螺纹形貌、拉伸性能、疲劳性能、耐腐蚀性能等。其中,螺栓的表面质量、力矩发生较大变化,而拉伸性能、耐腐蚀性能、螺纹形貌则变化较小,疲劳性能略有降低。如果螺栓需要重复使用,需分析上述因素对螺纹连接可靠性的影响。

在这些性能中,与螺栓使用直接相关的是螺栓的夹紧力和力矩的变化。对于一般螺栓而言,其扭矩和夹紧力需满足:

$$P = T / (KD) \quad (1)$$

式中:

P ——螺栓的夹紧力;

T ——扭矩;

K ——扭矩系数;

D ——螺栓的直径。

从式(1)可以看出,在预设夹紧力不变的情况下,扭矩与扭矩系数有关。而影响扭矩系数的因素主要包括螺牙表面状态、润滑情况、环境温度等,其中螺牙表面状态影响最为显著。螺栓反复加载时恰恰对螺纹表面状态的改变最为明显,大量镀锌层

被破坏,螺牙表面变得光滑,均对螺栓的耐蚀性能和夹紧力产生较大的影响。

3.1 螺纹表面再处理

若螺栓在沿海环境性气候、潮湿性气候以及具有腐蚀性气候等地域使用,螺栓表面的镀锌层极易受到环境腐蚀,甚至形成局部电池,破坏螺栓基体。同时,在雨水中酸性物质的作用下,可能存在电解氢,使得螺栓存在氢脆、延迟断裂的风险^[4]。在这种环境下,如果螺栓重复利用,则必须重新镀锌,以保护螺栓基体。镀锌后不仅可改善螺栓的耐蚀性能,而且也减小了相同力矩下螺栓夹紧力的分散性。

3.2 螺栓重复使用时的紧固方式

图 6 为不同螺栓均按 275 Nm 的力矩初次加载时所获得的夹紧力测试结果,其夹紧力范围为 95~115 kN。前文采用相同扭矩对同一螺栓进行反复加载,其夹紧力范围已扩大至 80~130 kN。通过换算得出两种加载方式下螺栓的应力范围分别为 387~469 MPa、326~530 MPa。试验测得螺栓的屈服强度为 780 MPa,对应的安全系数范围分别为 2.02~1.66、2.39~1.47。

采用相同力矩多次加载时,螺栓的应力变化幅度较大,安全系数分散性亦较大。故采用控制螺纹表面状态或控制力矩进行螺栓的重复利用,更符合实际应用条件,亦更有利于重复使用的螺纹连接的可靠性。

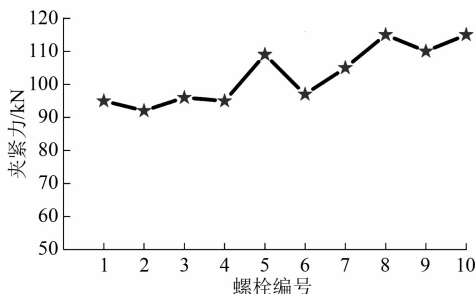


图 6 螺栓在初次加载时所获得的夹紧力

以 2.2.2、2.2.3 节中的数据为基础进行分析,选择同一螺栓反复加载时的力矩。图 7 为不同螺栓获得与初次加载相同夹紧力时第 2 次加载力矩的变化规律。由图 7 可以看出,螺栓在第 2 次使用时,其力矩范围为 200~270 Nm。考虑到数据的波动性,并为获得稳定的夹紧力,螺栓第 2 次使用时力矩可控制在 240~260 Nm。

当螺栓进行第 3 次加载时,其力矩的波动范围逐渐加大,见图 8。除第 1、第 2 和第 4 这 3 枚螺栓

外,其余螺栓力矩的稳定性亦较高,均在 240~260 Nm 范围内。从安全角度考虑,建议螺栓不进行第 3 次使用。

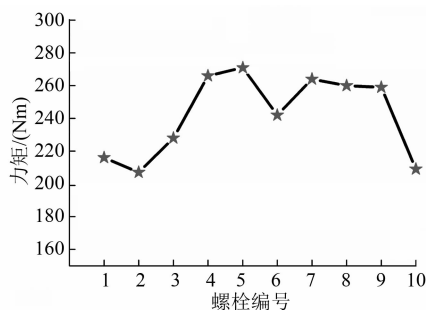


图7 不同螺栓第2次加载时的力矩变化图

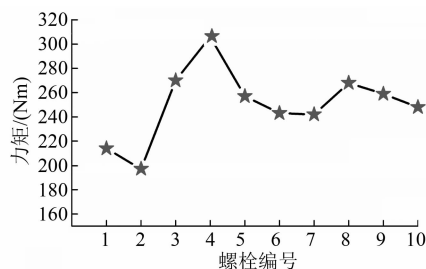


图8 不同螺栓第3次加载时的力矩变化图

4 结语

在实验室范围内研究了螺栓反复加载下力矩、夹紧力、螺纹状态、疲劳性能的变化。在有限的试验样本条件下,获得了螺栓能否重复使用的相关试验及评价方法,并为工程应用提供了数据支撑,形成的结论如下:

(上接第 45 页)

应按照企业发展的需求,制定适合企业发展且切实可行的改进计划,完成对标准体系的改进、宣贯和实施。同时依据 GB/T 19273—2017《企业标准化工作评价与改进》的要求,完成产品标准体系的自我评价,加强过程的控制与管理,避免所搭建的标准体系在设计、制造及检修等实际工作中未能运用的情况出现。通过开展产品标准体系的自我评价和改进,完成产品标准的全寿命周期管理,实现标准体系的不断完善及优化。

3 结语

搭建城市轨道交通车辆产品标准体系,对产品的创新发展具有重要的指导意义。建立一个科学

1) 螺栓的化学成分、机械性能等基础数据满足标准要求,低温冲击性能良好,具备可重复利用的基础条件。

2) 往复加载对螺栓的拉伸性能、疲劳性能以及螺栓基体的耐腐蚀性能影响不大。

3) 往复加载破坏了螺纹表面的镀锌层,使得螺栓的耐腐蚀性能显著下降。

4) 往复加载后,螺栓的夹紧力和力矩均发生明显的改变,但具有一定的规律性。

5) 对使用过的螺栓重新进行表面镀锌处理后,重复利用的可靠性更高。

6) 在不对螺栓表面重新处理的条件下,经筛选的螺栓第2次使用时,其加载力矩与初始设计力矩可能不同,具体以试验数据为准。

7) 对于本文中的试验螺栓,建议重复使用次数不超过2次。在实际工程应用中,需注意做好详细记录,避免超次数使用带来的安全风险。

参考文献

- [1] 王冬,于庆斌,邓海,等. 动车组关键部位螺栓应用分析[J]. 兰州交通大学学报,2014(6): 138.
- [2] 王保卫,邓伟,谢智全. 塔式起重机高强度螺栓的预紧力与重复使用[J]. 建筑安全,2010(11): 42.
- [3] AISC. Specification for structural joints using ASTM A325 or A490 bolts[S]. Chicago: Research Council on Structural Connections, 2000: 7.
- [4] 张先鸣. 高强度紧固件氢脆的产生及预防措施[J]. 汽车工艺师,2004(5): 81.

(收稿日期:2020-09-05)

合理的标准体系,实现产品标准体系的科学管理,可有效促进城市轨道交通行业健康稳定发展,同时可保证标准的先进性、适用性及有效性,避免各标准内容重复引用或者发生冲突,弥补标准的空白区域,对发挥标准效用最大化具有重要的现实意义。

参考文献

- [1] 何宗华. 城市轨道交通概论[M]. 北京:中国铁道出版社, 2014: 92-95.
- [2] 郭景裕. 轨道车辆技术标准体系的构建与优化[J]. 机车车辆工艺,2013(3): 33.
- [3] 吴伟,朱洁琳,徐力,等. 我国铁路技术标准体系分析[J]. 铁道技术监督,2016(11): 1.
- [4] 田葆桢. 国内外铁路技术标准体系的发展与分析[J]. 铁道技术监督,2012(3): 1.

(收稿日期:2020-09-05)