

# 基于微粒子喷丸处理的螺栓防松能力改善研究

薛海峰<sup>1</sup>, 张煜超<sup>1</sup>, 宗艳<sup>1</sup>, 沈训梁<sup>2</sup>, 张明远<sup>2</sup>

(1. 中车南京浦镇车辆有限公司, 南京 210031;

2. 西南交通大学 牵引动力国家重点实验室, 成都 610031)

**摘要:** **目的** 基于试验测试结果, 研究微粒子喷丸 (FPP) 技术对螺栓防松性能的影响及机理。**方法** 使用微粒子喷丸工艺处理了两种硬度不同的螺栓 (不锈钢螺栓和镀锌螺栓), 使用螺栓横向振动试验装置在液压伺服万能疲劳试验机上对以上两种类型的未喷丸螺栓及喷丸螺栓进行了反复加载振动试验。试验结束后, 使用扫描电镜 (SEM) 对螺纹配合处的螺栓螺牙进行了磨损形貌观察。**结果** 未喷丸情况下, 镀锌螺栓比不锈钢螺栓的防松能力低约 40%。微粒子喷丸处理后, 镀锌螺栓的防松能力提高了 28%, 而不锈钢螺栓的防松能力提高了 15%, 微粒子喷丸对镀锌螺栓的防松能力提高更加显著。螺纹表面的磨损程度越低, 螺栓的防松能力越强。**结论** 微粒子喷丸处理提高了螺牙表面的硬度, 减轻了螺牙的磨损程度, 从而改善了螺栓的防松性能。微粒子喷丸技术对螺栓防松能力的改善程度随着螺栓螺牙表面硬度的增加而增大。

**关键词:** 微粒子喷丸; 螺纹面; 磨损; 松动; 螺栓

**中图分类号:** TG668 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)02-0020-05

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.02.004

## Improvement of Anti-loosening Performance of Bolts Treated by Fine Particle Peening

XUE Hai-feng<sup>1</sup>, ZHANG Yu-chao<sup>1</sup>, ZONG Yan<sup>1</sup>, SHEN Xun-liang<sup>2</sup>, ZHANG Ming-yuan<sup>2</sup>

(1. CRRC Nanjing Puzhen Co., Ltd, Nanjing 210031, China;

2. State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**ABSTRACT:** The work aims to effects of fine particle peening (FPP) technology on anti-loosening performance of bolts based on experimental test results. Two types of bolts of different hardness (stainless steel bolts and galvanized bolts) were treated by applying FPP technology. Then, repeatedly vibration tests were performed to the aforesaid original and shot-peened bolts with a transverse vibration testing apparatus on a hydraulic servo fatigue tester. Wear morphology of bolt threads where screw-thread fit occurred with a SEM after the tests. The anti-loosening performance of galvanized bolts was 40% lower than that of stainless steel bolts. After the galvanized bolts and stainless steel bolts were treated by particle shot blasting, the anti-loosening performance of the two types of bolts increased by 28% and 15%, respectively. The anti-loosening performance of galvanized bolts improved more remarkably after particle shot blasting. The lower the wear degree was, the better the anti-loosening performance would be. Particle shot blasting treatment can improve hardness of thread surface, wear degree of thread and improve anti-loosening performance of bolts. Improvement effect of particle shot blasting technology on the anti-loosening performance of bolts increases as surface hardness of bolt threads increases.

**KEY WORDS:** FPP; thread flank; wear; looseness; bolts

收稿日期: 2017-08-12; 修订日期: 2017-11-12

Received: 2017-08-12; Revised: 2017-11-12

作者简介: 薛海峰 (1980—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为城市轨道交通车辆设计研发。

**Biography:** XUE Hai-feng (1980—), Male, Senior engineer, Research focus: R&D of the Urban Rail Transit.

螺纹连接具有操作简单、维护方便、连接可靠、容易更换等优点，在机械结构中被大量使用<sup>[1-3]</sup>。但是，当被连接件在服役过程中承受一定的振动或冲击载荷时，螺栓会逐步发生松动，预紧力逐渐下降，从而导致结构失效<sup>[4-6]</sup>。早期研究结果认为，引起螺栓松动的主要原因是内外螺牙表面发生相对滑移<sup>[7,8]</sup>。滑移导致内外螺牙沿着松动方向产生相对转动，即螺栓或者螺母发生相对转动，导致预紧力下降。此外，螺纹配合面上的微动磨损也会导致预紧力下降，使螺栓发生松动<sup>[9,10]</sup>。W. Eccles<sup>[9]</sup>认为，对内外螺牙进行油润滑会减小螺牙表面的磨损，提高螺栓的防松能力。但是，有关采用其他方式提高螺纹面抗磨损性，以改善螺栓防松能力的研究尚未见报道。

微粒子喷丸（Fine Particle Peening）技术作为一种新型表面处理工艺，与普通喷丸工艺相比，其采用的丸粒直径非常小，为 50~300 μm，而普通喷丸所采用的丸粒直径一般为 0.8~1 mm 左右，前者丸粒要小很多。该工艺使用压缩空气将丸粒加速到很高的速度，然后冲击被处理材料表面，使其形成硬度很高的表面硬化层，从而增强了抗磨损能力<sup>[11-12]</sup>。另外，由于丸粒直径非常小，所以被处理表面的粗糙度很小，能够达到 0.8 μm 以下。而且其表面均匀，机械加工产生的表面方向性均已被去除。FPP 不仅不会造成螺牙损伤，使螺纹副配合更加均匀，而且能够提高螺牙表面的抗磨损能力，从而提高螺栓的防松性能。因此，有必要研究 FPP 对螺栓防松性能的影响。

本文利用螺栓横向振动试验装置测试了不同螺栓在微粒子喷丸处理工艺前后的预紧力下降曲线，利用扫描电镜观察了试验前后的螺纹表面形貌，分析了微粒子喷丸工艺对螺栓防松性能的影响。

### 1 微粒子喷丸工艺原理

微粒子喷丸系统与常规喷丸系统基本一致，主要由喷射系统、储料系统、丸粒回收系统组成，其最主要的区别在于微粒子喷丸使用的丸粒直径非常小，可达到常规丸粒直径的 1/10 左右。丸粒与高压气体混合后以 100~150 m/s 的速度喷射到试样表面，喷射过程中，对试样最表层反复进行急加热及降温处理，

使试样表面产生的温度高于材料的相变温度，即在试样表面产生热处理的效果。与常规喷丸工艺相比，该工艺能够大幅度地提高试样的表面光洁度，同时可在加工试样表层形成富有韧性的微细组织，甚至可以使表面组织纳米化。

图 1 是喷砂、常规喷丸和微粒子喷丸三种不同喷射工艺表面对比图。由图可见，微粒子喷丸处理后的表面质量最高，韧窝结构消除了试样机加工刀痕的方向性，说明其具有很好的液体润滑特性。

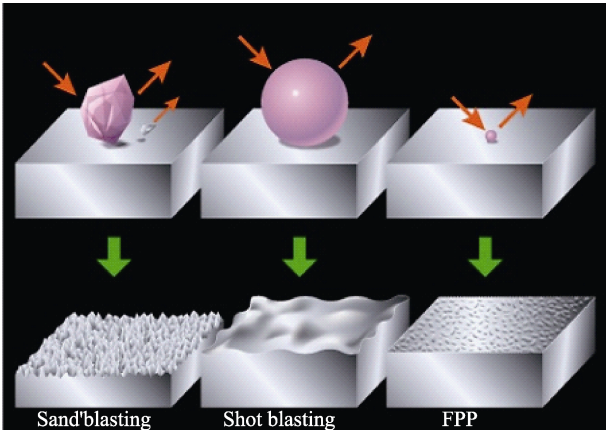


图 1 不同喷射工艺表面对比  
Fig.1 Comparison of surfaces treated with different shoot peening process

### 2 试验材料

本试验分别测试四种不同螺栓在横向振动载荷作用下的预紧力下降情况。试样分别是喷丸和未喷丸的镀锌螺栓（Zinc、Zinc-FPP）、喷丸和未喷丸的不锈钢螺栓（Stainless、Stainless-FPP）。其中，镀锌螺栓和不锈钢螺栓采用的微粒子喷丸工艺相同，工艺参数如表 1 所示。表中 300#筛号所对应的丸粒平均直径约为 50 μm。

表 2 为四种螺栓材料的性能参数。由表可见，喷

表 1 微粒子喷丸处理工艺参数  
Tab.1 Process parameters of FPP

丸粒材质	筛号	喷射压强 /MPa	喷射距离 /cm	覆盖率 /%
高速 工具钢	300#	0.6	10	200

表 2 试验螺栓材料性能参数  
Tab.2 Material property parameters of tested bolts

名称	编号	维氏硬度 HV <sub>0.2</sub>		表面硬化程 度/%	表面粗 糙度 Ra/μm	屈服强度/ MPa
		表面	基体			
镀锌	Zinc	186.4	187.8		0.252	320
微粒子喷丸镀锌	Zinc-FPP	240.1	199.1	20.6	0.673	
不锈钢	Steel	355.5	350.1		0.228	410
微粒子喷丸不锈钢	Steel-FPP	370.2	345.7	7.1	0.478	

丸前后,镀锌螺栓的硬度和屈服强度均低于不锈钢螺栓。喷丸后,镀锌螺栓表面硬度的提升幅度更大,且两种螺栓的表面粗糙度均增大。四种螺栓的尺寸均为 M5×25 mm,其实物如图 2 所示。

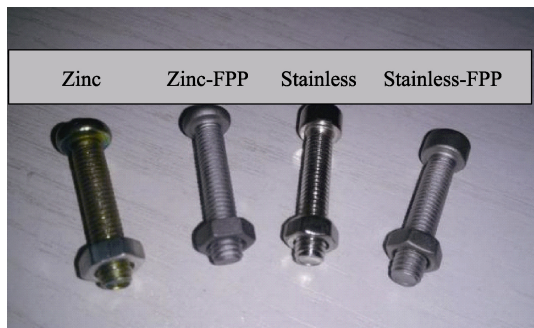


图 2 试验螺栓实物图  
Fig.2 Pictures of tested bolts

### 3 试验方法

采用图 3 所示的螺栓横向振动试验装置进行螺栓松动试验。试验过程中,激振器与安装基座均通过螺栓固定在底座的 T 型槽中。下钢板与安装基座固定连接,上钢板与激振器固定连接,上、下钢板的材质均为 45 钢,厚度 6.5 mm。用 AB 胶将加速度传感器固定在上钢板上。

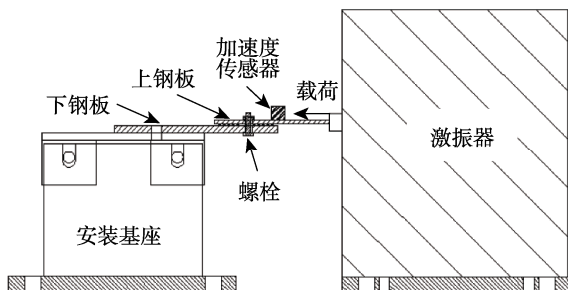


图 3 螺栓横向振动试验装置示意图

Fig.3 Schematic diagram of transverse vibration test device

施加在螺栓上的预紧力与预紧扭矩通过式 (1) 进行换算。

$$T = K \times F \times d \quad (1)$$

式中:  $T$  为拧紧力矩,  $K$  为拧紧系数(取值为 0.2)<sup>[13]</sup>,  $F$  为螺栓预紧力,  $d$  为螺栓外径。使用数显式扭矩扳手对螺栓连接结构进行预紧。

使用型号为 HEV-500 的激振器进行加载,通过监测上钢板的振动加速度,判断试验螺栓是否发生松动失效。试验前,先测试螺栓预紧力与上钢板振动加速度之间的关系,以便在松动试验中通过监测上钢板的振动加速度来判断预紧力的下降程度。对螺栓分别施加不同的预紧力,在松动的试验工况条件下(激振器加载幅值 250 N、频率 20 Hz),采集上钢板的振动加速度,从而得到不同预紧力对应的上钢板振动加速度。考虑试验结果的分散性,每组预紧力下测试 3 根试样,取均值。

试验过程中,激振器加载幅值和加载频率恒定。对于不同的预紧力工况,当预紧力下降到初始值的 20% 时,则认为该螺栓结构发生了松动<sup>[14]</sup>,此时的横向振动次数即为该工况下的螺栓松动寿命。当振动次数超过  $5 \times 10^5$  次,而螺栓没有发生松动,则认为该螺栓不发生松动失效,试验停止。

对于四种不同的螺栓试验,第一根试样的预紧力设定为螺栓屈服强度的 50%~70%,之后螺栓的预紧力根据前一根试样测得的试验结果来决定。如果螺栓发生松动,则加大施加的预紧力;若螺栓未发生松动,则减小施加的预紧力。逐步试验,最终获得该螺栓不发生松动的最小预紧力。每种螺栓取 4~5 级预紧力水平进行松动试验,每级预紧力水平重复 3 次试验,取其均值作为该预紧力水平下的螺栓松动寿命。

### 4 试验结果

#### 4.1 振动加速度与螺栓预紧力的关系

图 4 为四种螺栓的振动加速度与螺栓预紧力的关系。由图可知,随着预紧力逐步增加,振动加速度逐渐减小。当预紧力大小相同时,四种螺栓对应的振动加速度大体相等。因此,可假定四种螺栓对应的振动加速度与螺栓预紧力之间的函数关系一致。将 4 组试验数据合并起来,拟合得到函数关系式 (2)。

$$A = 4.397e^{-0.001226F} \quad (2)$$

式中:  $A$  为振动加速度,  $F$  为预紧力,函数拟合度为 0.9625。根据前述的松动准则,当预紧力下降至初始值的 80% 时,即认为螺栓发生松动,将其代入式 (2),即得到螺栓发生松动时的振动加速度。

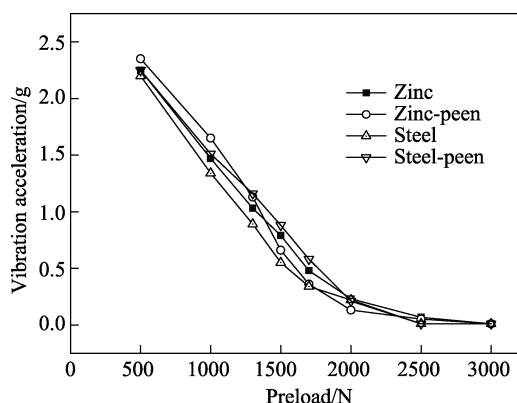


图 4 螺栓预紧力与上钢板振动加速度关系

Fig.4 Relation between bolt pretightening force and vibration acceleration of upper steel plate

#### 4.2 螺栓预紧力与松动寿命的关系

图 5 为螺栓松动寿命与预紧力大小的关系。采用幂函数模型对四种螺栓的预紧力与松动寿命间的关系进行拟合。由图可知,在双对数坐标下,预紧力与松动寿



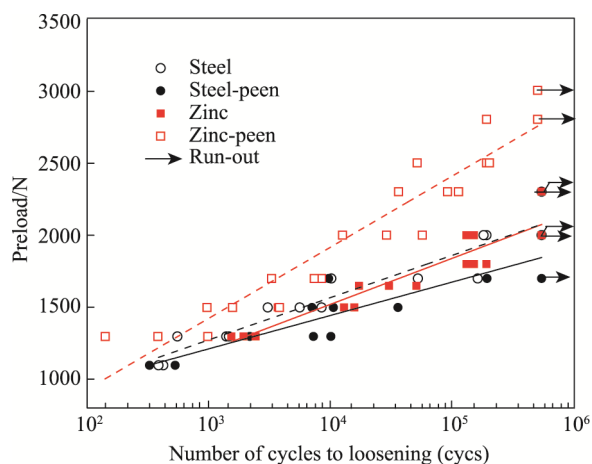


图 5 螺栓松动寿命与预紧力大小的关系

Fig. 5 Relation between pretightening force and looseness life of bolts

命呈线性关系，与疲劳  $S-N$  曲线相似。松动寿命及其分散性随着预紧力的增大而增加，并且存在一个最小

预紧力使试样具有无限松动寿命，该预紧力即为此螺栓的松动耐久极限。松动耐久极限的大小可以表征螺栓的防松性能，其值越小，防松性能越好。喷丸前，镀锌螺栓和不锈钢螺栓的松动耐久极限分别为 2800、2000 N，不锈钢螺栓防松性能优于镀锌螺栓。喷丸后，镀锌螺栓和不锈钢螺栓的松动耐久极限分别为 2000、1700 N，分别比喷丸前降低 800、300 N，对应的预紧力下降了 28%、15%，说明螺栓防松性能提升。

由以上结果可知，硬度越高的螺栓，防松能力越强。微粒子喷丸处理提高了螺牙表面的硬度，从而改善了螺栓的防松性能，改善程度随着表面硬度的增加而增大。

### 4.3 螺纹面的磨损形貌

为了研究试验过程中螺牙表面状态的变化，采用扫描电镜观察试验后螺栓螺牙表面的磨损形貌，结果如图 6 所示。由图可知，预紧力为 2300 N 时，未喷

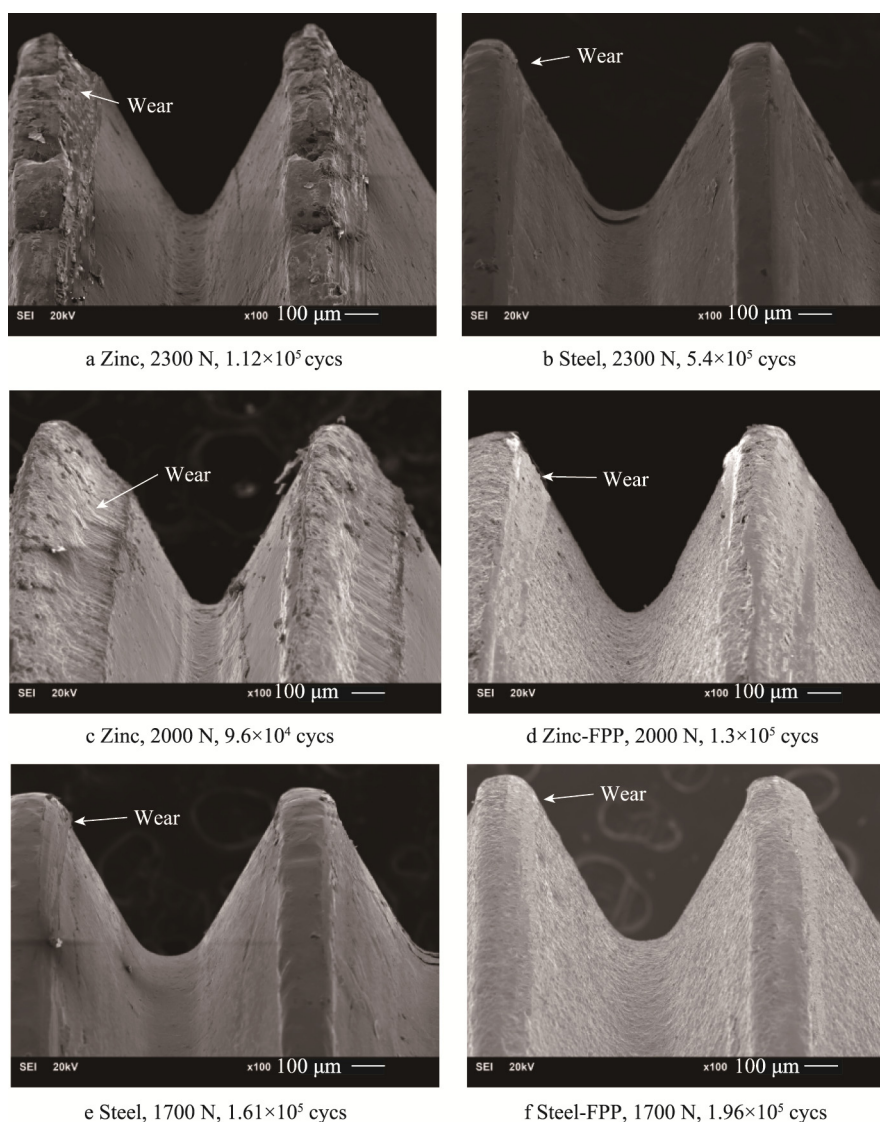


图 6 各种螺栓螺牙的磨损形貌

Fig.6 Worn morphology of various bolt threads

丸不锈钢螺栓经历的振动次数要远高于未喷丸镀锌螺栓,但前者的磨损程度比后者要轻微得多。预紧力为 2000 N 时,喷丸后镀锌螺栓的螺牙磨损程度降低了。而预紧力为 1700 N 时,喷丸前后不锈钢螺栓的磨损形貌差异较小,且都发生了相对较轻微的磨损。

## 5 分析与讨论

对螺栓进行预紧后,内外螺牙间形成正压力。对螺栓施加横向循环载荷时,会引起内外螺牙间的相对滑动,并伴随有磨损现象发生。螺纹面的磨损会造成螺纹副配合程度降低,从而导致螺栓预紧力降低,引起螺栓松动<sup>[10]</sup>。

由于不锈钢螺栓材质比镀锌螺栓硬,而硬度高的材料抗磨损能力强,所以这两种螺栓螺纹面的磨损形貌存在差异,这种差异正是造成两种螺栓防松能力不同的原因。镀锌螺栓材质较软,经喷丸处理后的表面硬化程度高,使镀锌螺栓在喷丸后的表面抗磨损能力明显提高。此外,丸粒对材料表面的冲击会导致表面粗糙度增加,从而引起摩擦系数增加。而螺栓摩擦系数的增加会抑制螺纹面间的相对滑移,从而有利于对螺栓松动的抵抗<sup>[15]</sup>。喷丸后,镀锌螺栓表面形成的硬化层及表面粗糙度的增加是抗松能力提高的原因。

不锈钢螺栓的表面硬度在喷丸前、后并没有发生明显变化,抗磨损能力同样没有表现出明显差异,但表面粗糙度明显变大。因此,喷丸不锈钢螺栓防松能力的提高受螺纹面粗糙度的影响。但由于抗磨损能力提高得不明显,喷丸对不锈钢螺栓抗松能力的改善程度有限。

## 6 结论

1) 镀锌螺栓比不锈钢螺栓的防松能力低 40%。微粒子喷丸处理后,镀锌螺栓的防松能力提高了 28%,不锈钢螺栓的防松能力提高了 15%。

2) 硬度高的螺栓防松能力强,微粒子喷丸处理提高了螺牙表面的硬度,从而改善了螺栓的防松性能,且改善程度随着表面硬度的增加而增大。

### 参考文献:

- [1] BHATTACHARYA A, SEN A, DAS S. An Investigation on the Anti-loosening Characteristics of Threaded Fasteners under Vibratory Conditions[J]. Mechanism and Machine Theory, 2010, 45: 1215-1225.
- [2] FERNANDO S. Mechanisms and Prevention of Vibration Loosening in Bolted Joints[J]. Australian Journal of Mechanical Engineering, 2005, 2(2): 73-92.
- [3] ZAKI A M, NASSAR S A, YANG X. Vibration Loosening Model for Preloaded Countersunk-Head Bolts[C]//ASME 2010 Pressure Vessels and Piping Division/K-PVP Conference. Washington: American Society of Mechanical Engineers, 2010: 361-371.
- [4] SANCLEMENTE J A, HESS D P. Parametric Study of Threaded Fastener Loosening Due to Cyclic Transverse Loads[J]. Engineering Failure Analysis, 2007, 14(1): 239-249.
- [5] ZHANG M, JIANG Y Y, LEE C H. Finite Element Modeling of Self-loosening of Bolted Joints[J]. Journal of Mechanical Design, 2007, 129(2): 218-226.
- [6] NASSAR S A, YANG X J. A Mathematical Model for Vibration-induced Loosening of Preloaded Threaded Fasteners[J]. Journal of Vibration and Acoustics, 2009, 131(2): 1-13.
- [7] JUNKER G H. New Criteria for Self-loosening of Fasteners under Vibration[J]. Aircraft Engineering & Aerospace Technology, 1973, 44(10): 14-16.
- [8] PAI N G, HESS D P. Experimental Study of Loosening of Threaded Fasteners Due to Dynamic Shear Loads[J]. Journal of Sound & Vibration, 2002, 253(3): 585-602.
- [9] ECCLES W. Tribological Aspects of the Self-loosening of Threaded Fasteners[D]. Preston: University of Central Lancashire, 2010.
- [10] 于泽通, 刘建华, 张朝前, 等. 轴向交变载荷作用下螺栓联接结构的松动试验研究[J]. 摩擦学报, 2015, 35(6): 732-736.
- [11] YU Ze-tong, LIU Jian-hua, ZHANG Chao-qian, et al. An Experimental Study on Self-loosening of Bolted Joints under Axial Vibration[J]. Tribology, 2015, 35(6): 732-736.
- [12] 张继旺, 鲁连涛, 张卫华. 微粒子喷丸中碳钢疲劳性能分析[J]. 金属学报, 2009, 45(11): 1378-1383.
- [13] ZHANG Ji-wang, LU Lian-tao, ZHANG Wei-hua. Analysis on Fatigue Property of Microshot Peened Medium Carbon Steel[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2009, 45(11): 1378-1383.
- [14] KIKUCHI S, YAMEYAMA Y, KOMOTORI J. Effect of Fine Particle Peening on Oxidation Resistance of Austenitic Stainless Steel[J]. Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering, 2012, 6(6): 431-439.
- [15] CROCCOLO D, AGOSTINIS M D, VINCENZI N. Failure Analysis of Bolted Joints: Effect of Friction Coefficients in Torque-preloading Relationship[J]. Engineering Failure Analysis, 2011, 18(1): 364-373.
- [16] 陈维金. 德国与我国机车车辆用螺栓技术的对比分析[J]. 铁道技术监督, 2011, 39(4): 2-7.
- [17] CHEN Wei-jin. Contrastive Analysis of Bolting Technology of Locomotives between China and Germany[J]. Railway Technical Supervision, 2011, 39(4): 2-7.
- [18] BASIL H, NASSAR S A. Effect of Thread and Bearing Friction Coefficients on the Vibration Induced Loosening of Threaded Fasteners[J]. Journal of Vibration and Acoustics, 2007, 129(4): 484-494.