

剪切激励下润滑脂对螺栓连接结构 松动行为的影响研究

吴向阳¹, 张志毅¹, 田仁勇¹, 李亚南¹, 周俊波^{2,3}, 刘建华², 朱旻昊²

(1.中车青岛四方机车车辆股份有限公司, 山东 青岛 266111; 2.西南交通大学 材料科学与工程学院, 成都 610031; 3.成都理工大学 核技术与自动化工程学院, 成都 610059)

摘要: **目的** 为了提高螺栓连接结构的可靠性, 分析剪切激励下螺栓连接结构松动失效机理, 并研究润滑脂对螺栓连接松动行为的影响。**方法** 基于自主设计的试验装置, 开展了剪切激励下螺栓连接结构的松动试验, 分析了两种润滑脂 (MoS₂ 润滑脂和锂基润滑脂) 对螺栓连接结构松动行为的影响, 试验结束后使用扫描电子显微镜分析螺纹表面的损伤情况。**结果** 在相同预紧力条件下, 使用润滑脂的螺栓连接结构初始预紧力矩可降低 30%~40%。螺栓连接结构所承受的剪切载荷存在门槛值, 即当剪切载荷低于门槛值时, 连接结构不会完全松动。在螺栓前三圈接触螺纹表面添加润滑脂 (局部润滑), 门槛值降低; 在螺栓全部接触螺纹表面均添加润滑脂 (完全润滑), 门槛值进一步降低。当承受载荷幅值低于门槛值时, 局部润滑有利于防松, 螺栓连接结构的松动程度可降低 20% 以上。**结论** 螺纹接触界面的微观滑移和微动磨损是螺栓连接结构松动的主要原因, 在螺纹接触界面添加润滑脂可有效减缓螺纹表面的微动磨损。

关键词: 剪切激励; 螺栓连接结构; 松动行为; 润滑脂; 微动磨损

中图分类号: TH117 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2020)11-0198-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.11.022

Effects of Lubricating Greases on Self-loosening Behaviour of Bolted Joints Subject to Dynamic Shear Load

WU Xiang-yang¹, ZHANG Zhi-yi¹, TIAN Ren-yong¹, LI Ya-nan¹, ZHOU Jun-bo^{2,3},
LIU Jian-hua², ZHU Min-hao²

(1.CRRC Qingdao Sifang Co., Ltd, Qingdao 266111, China; 2.School of Materials Science and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 3.School of Nuclear Technology and Automation Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

ABSTRACT: The work aims to improve the reliability of bolted joints by analyzing the self-loosening mechanisms of bolted

收稿日期: 2019-09-24; 修订日期: 2020-04-19

Received: 2019-09-24; Revised: 2020-04-19

基金项目: 国家自然科学基金 (51705434); 四川省重点研发项目 (2019YFG0290)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51705434) and Sichuan Science and Technology Program (2019YFG0290)

作者简介: 吴向阳 (1983—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为转向架焊接自动化与工艺仿真。

Biography: WU Xiang-yang (1983—), Male, Master, Engineer, Research focus: automatic welding and process simulation in bogie.

通讯作者: 刘建华 (1987—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为螺栓连接服役行为及控制、材料服役行为及安全评价。邮箱: jianhua-liu@swjtu.edu.cn

Corresponding author: LIU Jian-hua (1987—), Male, Doctor, Associate professor, Research focus: performance and control of bolted joints, performance and safety assessment of materials. E-mail: jianhua-liu@swjtu.edu.cn

引文格式: 吴向阳, 张志毅, 田仁勇, 等. 剪切激励下润滑脂对螺栓连接结构松动行为的影响研究[J]. 表面技术, 2020, 49(11): 198-203.

WU Xiang-yang, ZHANG Zhi-yi, TIAN Ren-yong, et al. Effects of lubricating greases on self-loosening behaviour of bolted joints subject to dynamic shear load[J]. Surface technology, 2020, 49(11): 198-203.

joints subject to dynamic shear load and investigating the effect of lubricating grease on the self-loosening behaviour of bolted joints. Based on the self-designed experimental equipment, loosening tests were carried out to the bolted joints under the shear load to analyze the effect of two lubricating greases (molybdenum disulfide grease and lithium grease) on the self-loosening behavior of bolted joints. After tests, the damage of the first engaged thread was analyzed by scanning electron microscopy (SEM). The initial tightening torque of the bolted joints with lubricating grease was reduced by 30%~40% under the same preload. There was a critical value of shear load on bolted joints. When the amplitude of shear load was below a critical value, complete loosening would not occur. The critical value decreased when the first three engaged thread surfaces of bolts were lubricated (local lubrication), and then further decreased when all of the engaged thread surfaces of bolts were lubricated (complete lubrication). When the amplitude of shear load was smaller than the critical value, local lubrication was effective to improve the anti-loosening performance of bolted joints, and the loosening degree of the bolted joints was reduced by more than 20%. Microslip and fretting wear between the contact threads are the main loosening mechanisms of bolted joints. Adding lubricating grease at the thread interface can effectively reduce the fretting wear on the thread surface.

KEY WORDS: dynamic shear load; bolted joints; loosening behaviour; lubricating grease; fretting wear

螺栓连接结构因具有结构简单、拆卸方便和成本低等优点,广泛应用于各类工程结构中。然而在其服役过程中,松动是一种无法避免的失效形式,尤其是受剪切载荷作用的螺栓连接结构。松动会造成重大的安全事故和巨大的经济损失。为了减缓螺栓连接结构的松动行为,国内外对其影响因素进行了长期研究和探索^[1]。

涂层和润滑常用于降低螺纹紧固件的摩擦系数^[4-10]。然而,关于螺纹接触界面以及螺栓/螺母和被连接件接触界面的摩擦系数对松动行为影响的研究结果尚未统一。一方面,提高螺纹摩擦系数会增大接触螺纹的摩擦力矩,从而抑制螺纹旋转;同理,提高螺栓/螺母和被连接件之间的摩擦系数可减小其界面的相对滑移。另一方面,螺纹紧固件的初始预紧力矩-预紧力的关系与接触界面之间的摩擦系数密切相关^[11]。在螺栓预紧过程中,界面间摩擦系数增大将增加拧紧难度。为获得相同的初始预紧力,摩擦系数大意味着需要施加更大的拧紧力矩,这可能导致螺栓受到的剪切应力过大,从而引起螺栓发生较大的塑性变形,甚至发生断裂。

Housari 等^[12]利用数学模型和试验研究分析了剪切激励下摩擦系数对螺栓连接松动行为的影响,结果表明降低摩擦系数,接触界面容易发生相对滑动,从而导致连接结构的松动速率几乎呈线性增加。Zaki 等^[13]进一步指出:提高接触螺纹间的摩擦系数,松动速率呈线性减小,然而,提高螺栓头部的摩擦系数,松动速率呈非线性减小。此外,研究结果表明,同时提高螺纹接触界面、螺栓/螺母和支撑面接触界面的摩擦系数,连接结构的松动速率显著下降。Zhou 等^[14]研究发现,当螺栓/螺母经过 TiN 涂层处理后,由于界面间的摩擦系数较大,为获得合适的预紧力,需要施加较大的初始拧紧力矩,从而导致螺栓基体发生塑性变形或者断裂。而使用 PTFE 涂层和 MoS₂ 涂层对螺栓进行表面处理,可有效降低其表面摩擦系数,在相

同初始拧紧力矩下获得更高的预紧力,螺栓连接结构表现出优良的防松性能。Liu 等^[15-16]指出在轴向振动环境下,螺栓表面添加 MoS₂ 润滑剂或者采用 PTFE 涂层和 MoS₂ 涂层处理,均能减轻螺纹表面的微动损伤,从而提高螺栓连接结构的防松性能。张明远^[17-18]、薛海峰等^[19]通过对螺栓表面进行微粒子喷丸处理,提高螺纹表面的耐磨性能,从而提高螺栓连接结构的防松性能。

Nassar 等^[5]指出提高涂层厚度可以降低螺纹表面的粗糙度,从而减小螺栓连接接触界面的摩擦系数。Zaki 等^[13]通过试验和非线性数学模型预测涂层厚度对螺栓连接结构松动速率的影响,结果表明,涂层厚度过大,接触表面的摩擦系数过低,容易导致螺栓连接结构的松动速率更大。Sanclemente 等^[20]发现在低预紧力条件下,使用润滑脂后会降低界面的摩擦系数,致使接触螺纹间容易发生相对滑移,从而导致连接结构松动;然而在高预紧力条件下,使用润滑脂降低预紧过程中螺杆承受扭矩而产生的应变能,减轻服役过程中因应变能释放导致的螺栓连接松动。因此,在高预紧力条件下,使用润滑脂有助于防松。

综上所述,涂层厚度或者润滑脂使用量对接触界面摩擦系数具有一定的影响。因此,螺栓连接结构的松动行为与涂层厚度或者润滑脂使用量密切相关。本文基于自主设计的试验装置,开展剪切载荷作用下两种润滑脂(MoS₂ 润滑脂和锂基润滑脂)对螺栓连接松动行为的影响,引入微动摩擦学理论,研究螺栓连接结构的失效机理;在不同界面状态下,探索螺栓连接结构发生完全松动的门槛值;研究两种润滑方式(即局部润滑和完全润滑)对松动行为的影响。

1 试验方法

螺栓连接振动试验装置如图 1 所示,该装置主要由上下夹具构成,其材料为高强度合金调质钢(40Cr)。试验开始前,首先校核压力传感器,确保试验结果的

精确性；然后将下夹具固定在试验台上，螺栓依次穿过下夹具（通孔处厚度 20 mm）、垫圈（厚度 2.5 mm）、压力传感器（WTP 218-50，精度 1%，厚度 15 mm）、垫圈（厚度 2.5 mm）、上夹具（通孔处厚度 20 mm），并与螺母（厚度 10.5 mm）相连；最后对螺栓螺纹表面涂覆润滑脂，并使用数显扭矩扳手对螺栓进行预紧，通过压力传感器读取螺栓预紧力。试验过程中压力传感器与试验机采集系统相连，从而实时监测螺栓轴向力的变化。试验所需载荷大小、频率及振动幅值均通过试验机控制系统完成。本次试验选取三种剪切载荷幅值 F_c ，分别为 5、6、7 kN。一般规定拧紧后螺纹连接件预紧应力为其材料屈服强度的 50%~70%^[16]，所以试验采取的预紧力 $P_0=20$ kN，循环次数 $N=200\ 000$ ，频率 $f=10$ Hz。为确保试验数据的有效性，每组试验参数均重复 5 次试验。

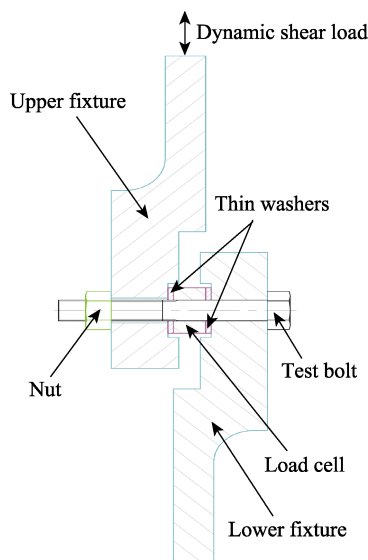


图 1 试验装置示意图
Fig.1 Diagram of experimental setup

试验采用订制螺栓，其长度为 80 cm，距离螺栓头部 40~80 cm 区间加工为 M12×1.75 的公制螺纹。螺栓材料选用 45#钢（正火状态），未对其进行表面处理，涂抹防锈油后分别进行包装。试验开始前，利用超声波清洗仪进行清洗。45#钢材料的化学成分和主要机械性能分别见表 1 和表 2。

表 1 45#钢材料的化学成分
Tab.1 Chemical composition of 45# steel

	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	V	P	S	Fe
wt%	0.45	0.27	0.65	0.25	0.25	0.45	—	≤0.04	≤0.04	Bal.

表 2 45#钢材料的主要机械性能
Tab.2 Main mechanical properties of 45# steel

Elastic modulus/GPa	Tensile strength/MPa	Yield strength/MPa	Elongation
206	658	352	0.01

为了便于描述，定义距离螺栓头部/下夹具接触面 60~61.75 mm 的螺纹为第一圈螺纹（与螺母接触的第一圈螺纹）；距离螺栓头部/下夹具接触面 60~65.25 mm 的螺纹为前三圈螺纹（与螺母接触的前三圈螺纹）；距离螺栓头部/下夹具接触面 60~70.5 mm 的螺纹为全部接触螺纹。本次试验使用的 MoS₂ 润滑脂和 85% 的锂基润滑脂，其理化性能如表 3 所示。试验采用两种润滑方式：局部润滑（螺栓前三圈接触螺纹表面涂覆润滑脂）和完全润滑（螺栓全部接触螺纹表面均涂覆润滑脂）。

表 3 两种润滑脂的理化性能

Tab.3 Physical and chemical properties of two lubricating greases

Lubricating grease	Drop point	Penetration (0.5 mm)	Copper strip corrosion (100 °C, 24 h)	Steel wire oil/wt%
MoS ₂	200	24.80	1a	3.25
Lithium grease	302	23.40	1a	1.87

试验结束后，首先采用电火花线切割方法，截取螺栓第一圈接触螺纹，接着将样品放入带有汽油的容器中，运用超声波清洗两次，然后放入带有酒精的容器中，运用超声波清洗两次，每次清洗 15 min，重复上述清洗步骤，最后取出样品，用电吹风吹干，使用扫描电子显微镜（SEM，JOELJEM-6610LV）对接触螺纹表面进行损伤形貌分析。

2 结果与讨论

2.1 拧紧特性

图 2 为不同润滑条件下螺栓连接结构获得相同预紧力（ $P_0=20$ kN）所需要的初始预紧力矩。从图 2 可以看出，使用润滑脂可以有效降低初始拧紧力矩。以 MoS₂ 润滑脂为例，局部润滑方式下，获得相同预紧力所需的初始拧紧力矩仅为 52.8 N·m，与未使用润滑脂的螺栓连接结构相比，拧紧力矩降低约 30%。这

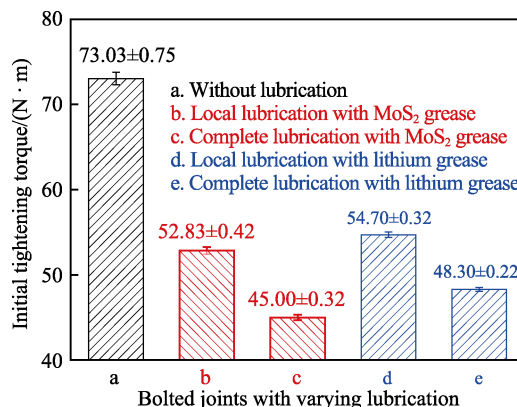


图 2 相同预紧力条件下螺栓连接结构的初始预紧力矩
Fig.2 Initial tightening torque of bolted joints under the same preload

主要是因为 MoS_2 润滑脂较低的摩擦系数在预紧过程中起到积极的作用, 使得拧紧过程比较容易, 只需要施加较小的初始拧紧力矩即可获得需要的预紧力。而在完全润滑方式下, 效果更佳, 获得相同预紧力所需的初始拧紧力矩降低到 $45.0 \text{ N}\cdot\text{m}$, 与未使用润滑脂的螺栓连接结构相比, 拧紧力矩降低约 40%, 与局部润滑相比, 拧紧力矩降低约 15%。在两种润滑脂局部润滑条件下, 螺栓连接结构获得相同预紧力所需要的初始拧紧力矩差异不大, 两者间相差不足 5%。此外, 使用润滑脂可以降低初始拧紧力矩的分散性。

2.2 松动行为

图 3 为剪切载荷作用下完全润滑 (MoS_2 润滑脂和锂基润滑脂) 对螺栓连接结构松动行为的影响。图 3a 为未经润滑处理的螺栓连接结构在三种剪切载荷幅值下的松动行为。无润滑条件下交变剪切载荷幅值小于 6 kN 时, 螺栓连接结构不发生完全松动, 螺栓连接结构的松动过程可分为三个阶段: 稳定阶段、急速下降阶段和缓慢下降阶段。当剪切载荷幅值增加到 7 kN 时, 螺栓连接结构发生完全松动。因此, 无润滑条件下螺栓连接结构发生完全松动时, 剪切载荷幅值的门槛值在 $6\sim 7 \text{ kN}$ 之间。如图 3b 所示, 在完全润

滑条件下, 由于接触界面的摩擦系数低, 螺纹接触界面的摩擦力矩小, 在振动环境下螺栓连接结构容易发生松动。当剪切载荷幅值为 5 kN 时, 螺栓连接结构的松动过程仅呈现两阶段特征, 螺栓连接结构在循环次数不足 300 次后完全松动。因此, 完全润滑条件下螺栓连接结构发生完全松动时, 剪切载荷幅值的门槛值小于 5 kN 。

图 4 为剪切激励下局部润滑对螺栓连接松动行为的影响。从图 4a 可以看出, 当剪切载荷幅值 $F_c=6 \text{ kN}$ 时, 螺栓连接结构的松动过程仅呈现两阶段特征, 松动试验结果显示螺栓连接结构在循环次数不足 400 次后完全松动; 当剪切载荷幅值 $F_c=5 \text{ kN}$ 时, 螺栓连接结构的松动过程呈现三阶段特征。因此, 局部润滑条件下螺栓连接结构发生完全松动时, 剪切载荷幅值的门槛值在 $5\sim 6 \text{ kN}$ 之间。对比图 3a, 局部润滑降低螺栓连接结构发生完全松动的门槛值。这是因为使用润滑脂后, 螺纹接触界面之间的摩擦系数降低, 导致界面的摩擦力矩减小, 螺栓连接结构容易发生松动。有限元分析结果表明, 相同载荷激励下采用润滑可以降低接触螺纹界面间的摩擦切应力^[16]。因此, 克服界面摩擦力矩并导致螺纹界面发生完全滑移所需载荷降低。

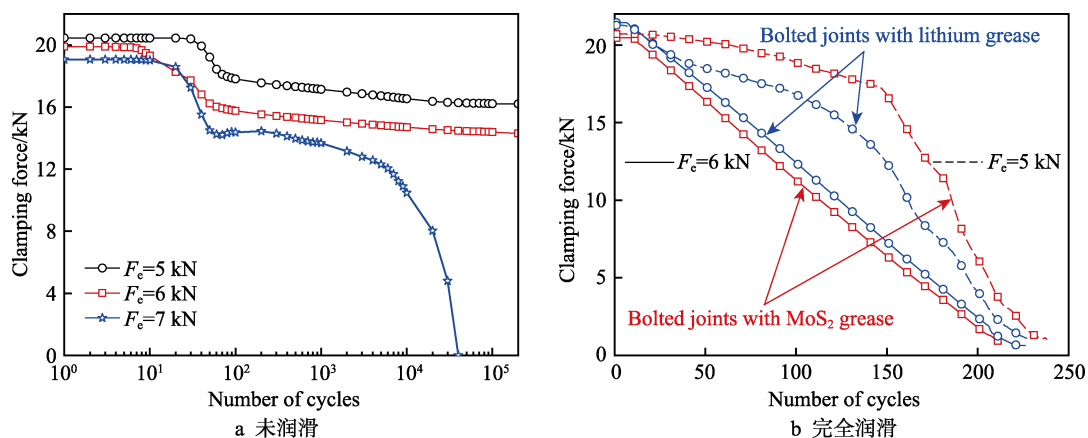


图 3 未润滑和完全润滑下螺栓连接结构的松动行为

Fig.3 Loosening behaviour of bolted joints without/with complete lubrication: (a) without lubrication, (b) complete lubrication

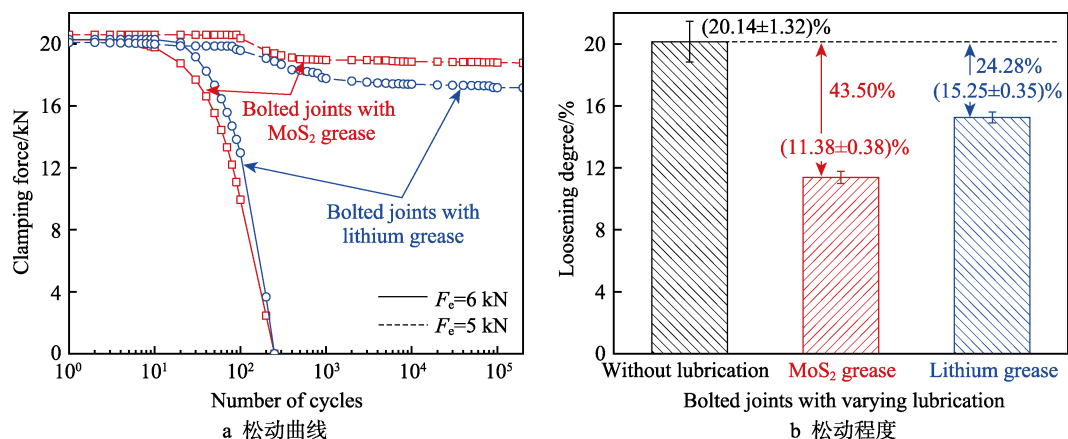


图 4 局部润滑条件下螺栓连接结构的松动行为

Fig.4 Loosening behaviour of bolted joints with local lubrication: (a) self-loosening curves, (b) self-loosening degree, $F_c=5 \text{ kN}$

为了便于描述,定义螺栓连接结构的松动程度 (Loosening degree) 为试验结束后螺栓轴向力的变化量与初始预紧力的百分比。从图 4b 可以看出,对比未润滑螺栓连接,局部润滑条件下螺栓连接结构的防松性能提高 ($F_c=5\text{ kN}$)。MoS₂ 润滑脂局部润滑条件下螺栓连接结构的松动程度约为 11%,与未润滑连接结构相比,松动程度降低约 43%。锂基润滑脂局部润滑条件下螺栓连接结构的松动程度约为 15%,与未润滑连接结构相比,松动程度降低约 24%。使用润滑脂可有效降低螺栓头部/被连接件和螺纹接触界面间的摩擦系数,减小接触界面的微动损伤,从而提高螺栓连接结构的防松性能。此外,与未经润滑处理的螺栓连接结构相比,局部润滑后螺栓连接结构的松动程度分散性降低约 70%。

综上所述,使用 MoS₂ 润滑脂和锂基润滑脂后,螺栓连接结构发生完全松动的门槛值降低。当剪切载荷幅值为 5 kN 时,完全润滑条件下螺栓连接结构发生完全松动;然而,局部润滑条件下螺栓连接结构未发生完全松动。因此,当剪切载荷幅值小于门槛值时,局部润滑有利于防松。

2.3 响应曲线

Pai 和 Hess^[21-22]认为只有当接触界面发生转动时

才会出现明显的松动,这意味螺栓连接接触界面之间 (即螺栓/螺母和支撑面、螺纹接触界面) 可能经历完全滑移,或者经历累积的局部滑移。此外,螺栓连接结构的松动行为与其响应曲线 (剪切载荷-位移曲线) 有一定联系。因此,为了进一步解释松动过程,载荷幅值选取 5 kN,研究局部润滑条件下螺栓连接结构在不同循环次数时的动力学响应。

如图 5 所示,在 100 次循环加载时,传感器与夹具接触界面之间发生完全滑移,响应曲线呈平行四边形;随着循环次数的增加,传感器与夹具接触表面的磨损加剧,引起界面之间的摩擦系数升高,导致发生相对滑移所需的剪切载荷增大,接触界面的相对滑移幅值减小;当循环次数为 1000 时,螺栓连接结构的响应曲线呈椭圆形,说明接触界面发生部分滑移。结合图 4a,当循环次数为 100~1000 时,响应曲线呈平行四边形,传感器与夹具之间发生完全滑移,螺栓连接结构的松动速率相对较高;当循环次数大于 1000 时,响应曲线呈椭圆形,传感器与夹具之间发生部分滑移,螺栓连接结构的松动速率相对较低。如图 6 所示,随着循环次数的增加,接触界面的摩擦系数增大,而相对滑移幅值减小,螺栓连接结构的摩擦耗散能呈减小趋势。

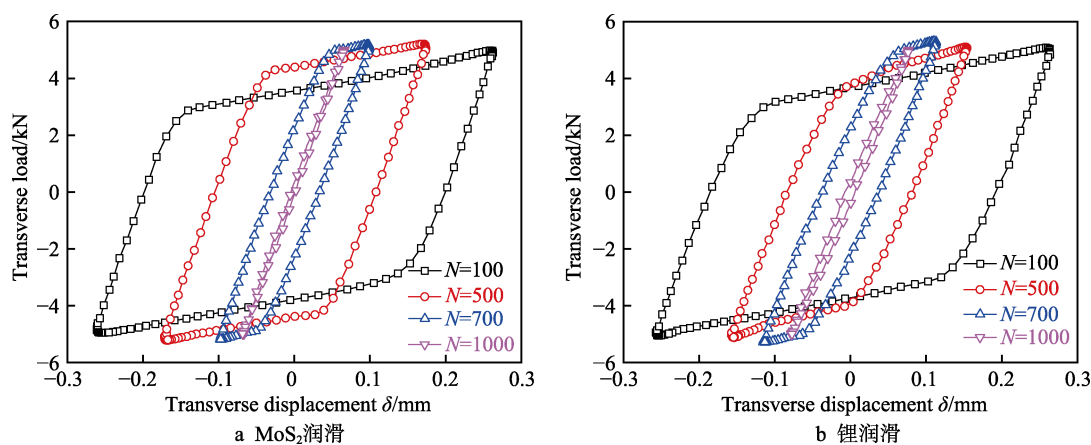


图 5 局部润滑条件下螺栓连接结构响应曲线

Fig.5 Response curves of bolted joints with local lubrication: (a) MoS₂ grease, (b) Lithium grease

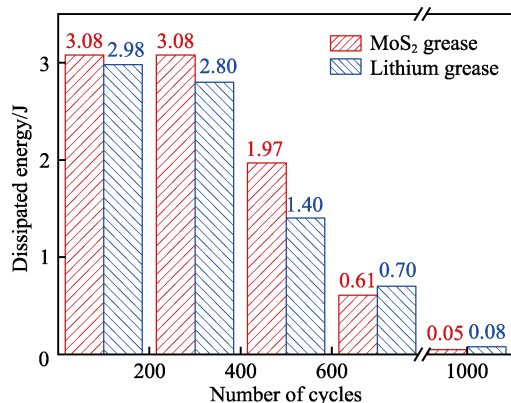


图 6 局部润滑条件下螺栓连接结构的摩擦耗散能

Fig.6 Dissipated energy of bolted joints with local lubrication

2.4 微观损伤分析

图 7 和图 8 分别为未经润滑和局部润滑条件下螺栓第一圈工作螺纹的 SEM 形貌 ($P_0=20\text{ kN}$, $F_c=5\text{ kN}$, $N=2\times 10^4$)。如图 7 所示,螺纹牙顶损伤较为严重。螺纹表面损伤区 I 主要表现为犁沟形貌,并伴随明显的塑性流动特征,说明该损伤区的主要磨损机制为粘着磨损;螺纹表面损伤区 II 主要表现为剥层形貌,说明螺纹表面的主要磨损机制为疲劳磨损。如图 8 所示,螺纹表面损伤较轻。此外,螺纹表面主要呈现剥层形貌,说明螺纹表面的主要磨损机制为疲劳磨损。综上所述,剪切载荷作用下螺栓表面的主要磨损机制为疲劳磨损,并伴随粘着磨损,这与前期研究结果一致^[15-16]。

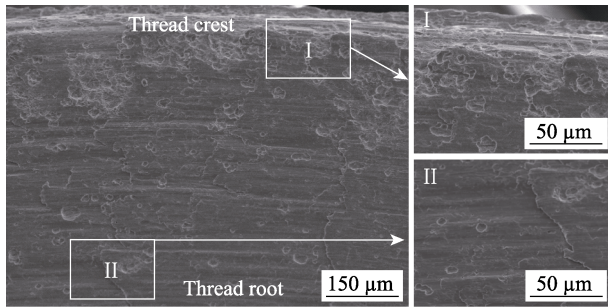
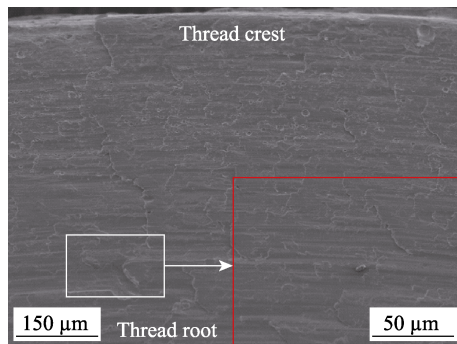
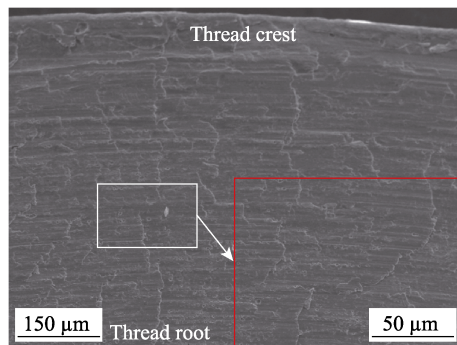


图 7 未润滑条件下螺纹表面损伤形貌

Fig.7 SEM images of the first thread of the bolts without lubrication

a MoS₂ 润滑

b 锂润滑

图 8 局部润滑条件下螺纹表面损伤形貌

Fig.8 SEM images of the first thread of the bolts with local lubrication: (a) MoS₂ grease, (b) Lithium grease

3 结论

1) 接触界面的微动磨损是螺栓连接结构松动的主要原因之一。螺纹表面的磨损机制主要为疲劳磨损。

2) 使用 MoS₂ 润滑脂和锂基润滑脂可有效降低螺栓连接结构的扭矩系数, 同时在相同预紧力矩下可降低预紧力的分散性, 从而提高螺栓连接的可靠性。

3) 动态剪切荷载下, 螺栓连接结构承受的剪切载荷幅值存在门槛值, 即当剪切载荷幅值低于门槛值时, 连接结构不会发生完全松动。润滑条件下螺栓连接结构承受剪切载荷的门槛值降低。当交变剪切载荷幅值低于门槛值时, 局部润滑条件下 MoS₂ 润滑脂和锂基润滑脂可降低接触界面的微动磨损; 同时, 使用润滑脂可降低螺栓在预紧过程中因承受扭矩产生的应变能, 从而减轻因螺栓应变能释放导致的松动。

参考文献:

- [1] IBRAHIM R A, PETTIT C L. Uncertainties and dynamic problems of bolted joints and other fasteners[J]. Journal of sound and vibration, 2005, 279(3-5): 857-936.
- [2] SAWA T, ISHIMURA M, YAMANAKA H. Experimental evaluation of screw thread loosening in bolted joint with some parts for preventing the loosening under transverse repeated loadings[J]. Pressure vessels and piping, 2006, 2: 211-220.
- [3] 侯世远, 廖日东. 螺纹联接松动过程的研究现状与发展趋势[J]. 强度与环境, 2014(2): 39-52.
HOU Shi-yuan, LIAO Ri-dong. Research progress on self-loosening of threaded fasteners[J]. Structure & environment engineering, 2014(2): 39-52.
- [4] SUN T S. Effect of lubrication on friction and torque-tension relationship in threaded fasteners[J]. Tribology transactions, 2007, 50(1): 127-136.
- [5] NASSAR S A, ZAKI A M. Effect of coating thickness on the friction coefficients and torque-tension relationship in threaded fasteners[J]. Journal of tribology, 2009, 131(2): 253-261.
- [6] NASSAR S A, SUN T, ZOU Q. The effect of coating and tightening speed on the torque-tension relationship in threaded fasteners[J]. Tribology, 2006, 83(8): 1304.
- [7] CROCCOLO D, AGOSTINIS M A, FINI S. Tribological properties of bolts depending on different screw coatings and lubrications: An experimental study[J]. Tribology international, 2017, 107: 199-205.
- [8] CHUNG P P, WANG J, DURANDET Y. Deposition process and properties of coatings on steel fasteners: A review[J]. Friction, 2019, 7(5): 389-416.
- [9] 田鹏晖, 郭峰, 王志君, 等. 固液界面对流体动压润滑膜厚的影响[J]. 表面技术, 2016, 45(10): 77-82.
TIAN Peng-hui, GUO Feng, WANG Zhi-jun, et al. Effects of the liquid/solid interface on thickness of hydrodynamic lubricating films[J]. Surface technology, 2016, 45(10): 77-82.
- [10] 古乐, 崔海旭, 马芳, 等. 低黏度燃料介质中部分膜点接触弹流润滑分析[J]. 表面技术, 2017, 46(6): 49-54.
GU Le, CUI Hai-xu, MA Fang, et al. Partial EHL analysis of point contact in low viscosity fuel[J]. Surface technology, 2017, 46(6): 49-54.
- [11] BICKFRED J H. Introduction to the design and behaviour of bolted joints[M]. Florida: The Chemical Rubber Company Press, 2007.
- [12] HOUSARI B A, NASSAR S A. Effect of thread and bearing friction coefficients on the vibration-induced loosening of threaded fasteners[J]. Journal of vibration & acoustics, 2007, 129(4): 484-494.

(下转第 211 页)