



·高功率微波技术专辑·

同轴脉冲形成线振动环境适应性优化设计*

范红艳¹, 潘亚峰¹, 王俊杰¹, 侯振园², 孙旭¹, 樊旭亮¹, 郭旭¹

(1. 西北核技术研究所 先进高功率微波技术重点实验室, 西安 710024; 2. 西安交通大学, 西安 710049)

摘要: 以带有悬臂结构的同轴脉冲形成线为研究对象, 开展提高振动环境适应性的优化设计。首先, 通过实际工况分析及仿真计算, 确定形成线内筒的盲孔螺钉可采用的防松措施有: 使用施必劳螺纹并涂抹防松胶; 优化螺钉数量。其次, 通过仿真分析和绝缘试验, 优化尾端绝缘子材料, 提高悬臂支撑的中内筒连接刚度。最后, 开展振动试验考核, 优化后的形成线等效件可以通过长时间的振动考核, 相比优化前的振动环境适应性有很大提高, 验证了优化设计的有效性。该研究结果对同类型脉冲功率源的振动环境适应性设计具有参考意义。

关键词: 同轴脉冲形成线; 振动环境适应性; 螺钉防松; 绝缘试验; 优化设计

中图分类号: TN782

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202436.230223

Optimization design for vibration environmental adaptability of coaxial pulse forming line

Fan Hongyan¹, Pan Yafeng¹, Wang Junjie¹, Hou Zhenyuan², Sun Xu¹, Fan Xuliang¹, Guo Xu¹

(1. Key Laboratory of Advanced Science and Technology on High Power Microwave, Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China;

2. Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Taking the coaxial pulse forming line (PFL) with cantilever structure as the research object, we carried out an optimization design for improving the vibration environmental adaptability. Firstly, through the analysis of the actual working condition and simulation calculation, the available anti-loosening measures for the blind hole screw in the inner conductor were determined as follows: using spirallock thread, applying anti-loosening glue and optimizing the number of the screws. Secondly, the insulator material was preferred to improve the connection stiffness of the inner conductor and the middle conductor according to the simulation analysis and the insulation test results. Finally, the vibration test was carried out to verify the effectiveness of the optimization design. The result show that the optimized equivalent parts of PFL could pass the long-term assessment, indicating that the vibration environment adaptability was greatly improved. The research results have reference significance for the vibration environment adaptability design of the same type of pulse power source.

Key words: coaxial PFL, the vibration environment adaptability, screw anti-loosening, insulation test, optimization design

Tesla 型脉冲功率源^[1-3]是脉冲功率技术在高功率微波领域应用的一个典型代表。基于同轴结构二倍宽线^[4]的某 Tesla 型脉冲功率源, 其形成线部分由形成线外筒、中筒、内筒组成, 中筒和内筒多采用有机玻璃板和尼龙等材料做绝缘支撑, 尾端绝缘子为悬臂支撑。对 Tesla 型脉冲功率源进行整体随机振动分析^[5], 结果表明尾端绝缘子和中内筒的连接部位是系统中的薄弱环节。对形成线等效组件进行振动试验, 虽然试验达到了满量级, 但考核时间不足^[6]。当经历较长时间考核时, 发现中内筒连接螺钉在振动过程中发生了松动和断裂。若内筒与中筒脱开, 则脉冲功率源将陷入瘫痪, 无法正常工作。由于局部连接系统存在薄弱环节, 若在实际振动工况下出现螺钉松动现象, 则会极大降低同轴脉冲形成线 (PFL) 的振动环境适应性。

关于螺栓松动机理, Junker^[7]于 1969 年最早提出, 对于螺纹联接来说, 动态的横向载荷比轴向载荷更能引起其松动, 并提出斜坡—滑块简化模型, 设计了 Junker 松动实验机, 指出螺纹连接受横向振动作用时, 其周向(拧松方

* 收稿日期: 2023-07-15; 修订日期: 2023-09-28

基金项目: 国家重点实验室开放课题 (Z091230803)

联系方式: 范红艳, fanhongyan@nint.ac.cn。

向)的摩擦系数会变小,从而失去自锁功能,发生滑移并松动。之后众多学者在横向载荷引起的松动方面进行了仿真分析和实验研究^[8-12]。由于动态横向载荷是引起螺栓连接结构松动的重要原因,因此设法降低振动过程中的横向载荷量值对于螺栓防松具有重要作用。

本文根据同轴脉冲形成线中内筒连接的实际工况,主要通过两种方式来改善中内筒连接螺栓松动问题,以提高同轴脉冲形成线的振动环境适应性。一方面,经过实际工况分析和仿真计算确定可采用的螺钉防松措施;另一方面,通过仿真分析和绝缘试验验证,优化尾端绝缘子材料,以提高悬臂支撑的中内筒连接刚度,减小中内筒在振动工况下的横向位移和横向载荷,达到防松效果。最后,通过开展形成线等效件振动试验进行考核,确保防松优化设计的有效性。

1 针对螺钉的防松设计

目前常用的螺栓防松措施有:使用防松垫圈^[13],采用自锁螺母防松,采用槽形螺母和开口销防松,使用串联钢丝防松,冲点、焊接等永久防松^[14]、涂抹防松胶^[15]等。本研究中的同轴脉冲形成线结构如图1所示,其中内筒连接部位属于强电场区,且使用的是螺纹盲孔,很多防松措施无法采用(图2中红框处为连接螺钉的位置)。例如不可采用保险丝串联的方式,因为强电场区,不允许出现尖细金属。由于是螺纹盲孔连接,无法采用防松螺母类方法。因此必须采用一些特殊的防松措施。

经过分析筛选,针对螺钉可采用多重防松设计,主要通过“施必劳螺纹+防松胶”和“优化螺钉数量”这两种方式防松。

1.1 施必劳螺纹+防松胶

同轴脉冲形成线中内筒连接处空间狭小,无法进行复杂的设计,且带有电场,很多防松措施无法采用。针对螺纹盲孔连接方式,可采用施必劳螺纹进行防松。施必劳螺纹的牙型是非对称性的,在内螺纹的牙底处有一个 30° 的楔形斜面^[14](普通螺纹是 60° V形螺纹),而相配合的螺栓螺纹仍是标准螺纹(如图3)。由于牙形角度改变,使施加在螺纹间接触所产生的法向力与螺栓轴成 60° 角,而不是像普通螺纹那样的 30° 角,拧紧时外螺纹的牙顶就紧紧地顶在施必牢螺纹的 30° 楔形斜面上,从而产生很大的锁紧力,防止出现相对于内螺纹的横向移动。由于施必牢螺纹法向压力远大于扣紧压力,因此产生的防松摩擦力必然也大大增加。在本研究中,中筒上为内螺纹盲孔,采用专用施必劳丝锥进行加工,获得施必劳内螺纹。

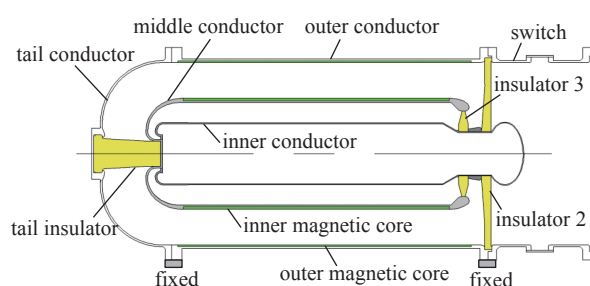


Fig. 1 Structure diagram of the duple-width coaxial PFL

图1 同轴结构二倍宽脉冲形成线结构示意图

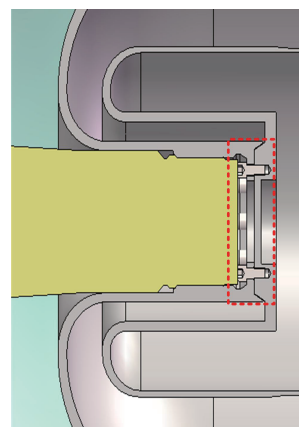


Fig. 2 Connection structure of middle conductor and inner conductor

图2 中内筒连接结构

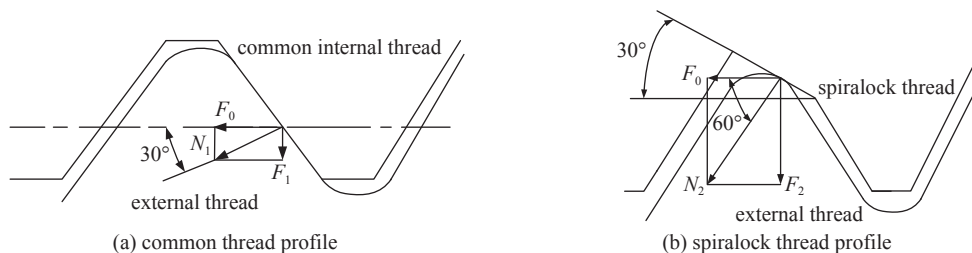


Fig. 3 Construct between common thread and spirallack thread

图3 普通牙形与施必劳结构对比

防松胶具有良好的浸润能力和粘附性能^[16],很容易将螺纹连接结构中的缝隙处填满,进而紧固附着在内外螺纹的接合处,固化后形成具有弹性的胶层,胶层增大了预紧螺纹的松动临界值,从而达到密封和防松的效果。本研

究中选用乐泰 243, 其为中强度耐油型防松胶, 查文献得知相同拧紧力矩下, 涂抹乐泰 243 防松胶比不涂胶相比, 螺栓的预紧力增大了 46% 以上^[10]。装配前在螺纹旋合表面涂抹适量乐泰防松胶, 再按照规定的力矩拧紧即可。经试用, 涂抹乐泰 243 防松胶的螺钉浸泡在绝缘油中, 目前未发现油中有相应的杂质污染。

采用施必劳螺纹与防松胶配合, 可在空间狭小的中内筒连接处不增加零件的前提下, 提高螺纹连接防松的可靠性。

1.2 优化螺钉数量

通过数值仿真的方法研究了螺钉个数对中内筒连接的影响, 提取螺钉上的轴向载荷和剪切载荷进行对比分析。中内筒螺纹连接的有限元模型如图 4 所示, 对同轴脉冲形成线开展正弦扫频谐响应分析, 模态阻尼比取 3%, 计算结果见表 1。从表中可看出, 8 个螺钉相比 6 个螺钉连接, 在振动扫频工况下, 螺钉的最大轴向力下降了 34%, 最大剪切力下降了 25%。可见增加螺钉个数有利于减小螺钉载荷, 从而降低螺钉松动或断裂的可能性, 提高同轴脉冲形成线的振动环境适应性。由于本文的中内筒连接为深孔螺钉连接, 因安装空间所限无法设计较多紧固螺钉, 因此, 本研究中将螺钉个数定为 8 个。

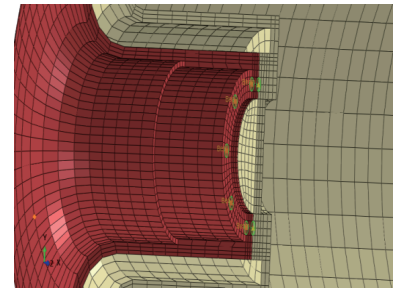


Fig. 4 Finite element model of middle conductor and inner conductor connected by screws
图 4 中内筒螺纹连接的有限元模型

表 1 中内筒连接螺钉谐响应计算结果

Table 1 Harmonic response calculation results of screws for connecting middle conductor with inner conductor (vertical vibration)

condition	maximum axial force/kN	maximum shear force/kN
6 screws	21.54	3.96
8 screws	14.18	2.96

2 优化连接刚度

螺钉松动主要由横向交变载荷引起, 因此可通过优化尾端绝缘子材料, 提升其力学性能参数, 以提高由其悬臂支撑的中内筒连接刚度, 减小中内筒在振动工况下的横向位移和横向载荷, 从而降低螺钉松动断裂的几率。

尾端绝缘子原使用材料为聚醚醚酮 (PEEK), 其弹性模量为 3.6 GPa、泊松比为 0.4、拉伸强度为 85 MPa, 该材料属于高模量高强度的工程塑料。拟选取弹性模量和强度更高的绝缘材料作为尾端绝缘子的备选材料。提高弹性模量, 同等载荷下变形量会更小; 提高材料抗拉强度, 可以提高材料的耐受阈值, 提高安全系数。尼龙 66 拉伸强度为 70~80 MPa, 改性后弹性模量和抗拉强度会大幅度提升。因此, 尾端绝缘子的备选材料有玻纤增强 PEEK、尼龙 66、玻纤增强尼龙 66。

尾端绝缘子在满足悬臂支撑强度的同时, 需要具有足够的绝缘能力。因此, 需要对备选材料进行绝缘性能测试。分别选用 PEEK、玻纤增强 PEEK、尼龙 66、玻纤增强尼龙 66 材料制作试片进行体击穿试验和沿面闪络试验, 测试其绝缘性能。体击穿试验的测试条件为: 样品直径 25 mm、厚度 1 mm、升压速度 2 kV/s; 沿面闪络试验的测试条件为: 样品直径 15 mm、厚度 3.5 mm、升压速度 2 kV/s。测试结果汇总数据见表 2。综合绝缘试验结果, 可看出相比纯 PEEK, 玻纤增强 PEEK 的绝缘性能略有下降, 尼龙 66 体击穿场强和沿面场强值均下降较多, 玻纤增强尼龙 66 绝缘性能更差。因此, 为保证尾端绝缘子的绝缘能力, 备选材料选用与原 PEEK 性能最接近的玻纤增强 PEEK。

PEEK 的弹性模量为 3.6 GPa, 玻纤增强 PEEK 的弹性模量为 8 GPa, 分别把这两种材料的弹性模量带入仿真模型中进行模态计算, 获得同轴脉冲形成线的固有频率, 以验证对连接刚度的影响。计算结果见表 3, 通过模态计算

表 2 绝缘测试结果汇总

Table 2 Summary of insulation test

material	electric field value of bulk breakdown/(kV·mm ⁻¹)	electric field value of surface flashover/(kV·mm ⁻¹)
PEEK	41.4	13.9
glass fiber reinforced PEEK	38.9	12.1
nylon 66	33.8	11.1
glass fiber reinforced nylon 66	19.3	7.1

表 3 不同弹性模量的模态计算结果

Table 3 Modal calculation results with different elastic modulus

number	modal shape	inherent frequency/Hz	
		elastic modulus of 3.6 GPa	elastic modulus of 8 GPa
1	lateral bending of inner conductor	32.86	45.78
2	vertical bending of inner conductor	32.63	42.9
3	twisting of inner conductor	42.88	46.03
4	bending of inner conductor along the axial direction	55.89	65.73

结果比较可以看出,增加尾端绝缘子的弹性模量,有助于提升形成线系统的固有频率,从而降低系统的动响应。综合考虑材料力学性能和绝缘性能,选取玻纤增强 PEEK 材质作为尾端绝缘子的优选材料。

3 振动环境力学试验考核

采用玻纤增强 PEEK 材质加工尾端绝缘子,中内筒连接采用施必劳螺纹配防松胶的设计方式,螺钉数量由 6 个增加到 8 个。对优化改进后的形成线等效件进行振动环境力学考核,以验证优化改进设计的有效性。

试验载荷激励谱如图 5 所示,其中,图 5(a)和图 5(b)的纵坐标为功率谱密度(PSD),单位为 g^2/Hz ,代表振动能量与频率的关系,图 5(c)的纵坐标为加速度载荷与重力加速度的比值,表征加速度的量级。振动试验照片如图 6 所示。

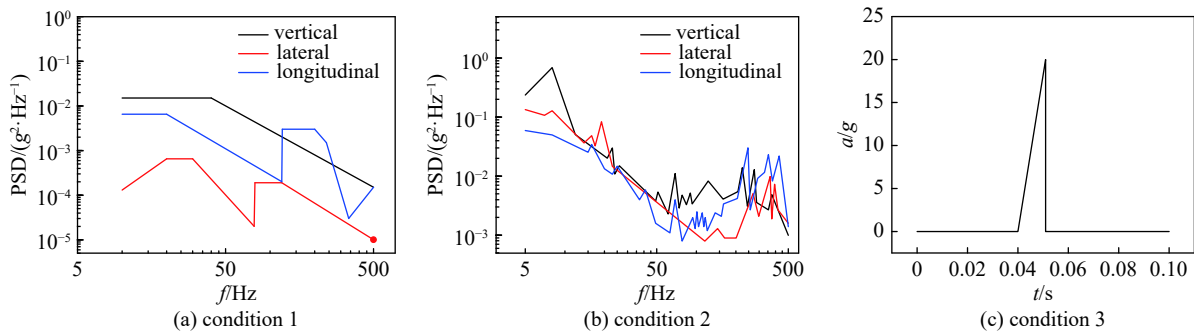


Fig. 5 Excitation spectrum of typical working conditions

图 5 典型工况试验激励谱

本次试验中,工况 1 各个方向的振动考核时间为 2 h,工况 2 各个方向的振动考核时间为 40 min。综合前文,优化措施包括两个方面:一是针对螺钉的防松设计,二是优化尾端绝缘子材料。对优化后的同轴脉冲形成线进行振动环境力学试验时,在螺钉防松措施的基础上,先安装原 PEEK 尾端绝缘子进行试验。

开展纵向的工况 1、工况 2、冲击试验,然后开展横向的工况 1、工况 2、冲击试验。纵向和横向的试验完成后,拆开尾端绝缘子检查,中内筒连接完好,螺钉无松脱,无断裂,说明只进行螺钉防松可以使形成线组件通过纵向和横向的长时间振动试验考核。

在开展垂向的试验考核时,工况 1 振动条件下,试验前后的扫频曲线基本重合。工况 2 振动条件下,试验后的扫频曲线共振峰相比试验前有所前移,拆开尾端绝缘子检查,发现中内筒连接处有一颗螺钉断裂、一颗松动。说明只进行螺钉防松不能完全通过垂向的长时间振动试验考核。

安装玻纤增强 PEEK 尾端绝缘子,进行工况 2 振动条件下的垂向试验,冲击试验,然后拆开尾端绝缘子检查,中内筒连接完好,螺钉无松脱,无断裂。由图 5 可看出,工况 2 的振动条件较工况 1 严苛,且工况 2 的垂向较纵向和横向更严苛,因此,认为螺钉防松设计与玻纤增强 PEEK 尾端绝缘子的组合可以使形成线组件通过工况 1 和工况 2 的所有振动考核,即优化改进设计后的形成线组件可以通过图 5 要求的所有工况的振动试验考核。

将优化后的形成线等效件振动试验结果与未优化设计前的结果进行对比,数据整理见表 4。



Fig. 6 Vibration test of PFL equivalent parts

图 6 形成线等效件振动试验照片

表 4 优化设计前后振动试验考核结果对比
Table 4 Comparison of vibration test results before and after optimization design

test condition	direction	before optimizing	after optimizing
condition 1	longitudinal	40 min with full order of magnitude	2 h with full order of magnitude
	lateral	30 min with full order of magnitude	2 h with full order of magnitude
	vertical	30 min with full order of magnitude	2 h with full order of magnitude
condition 2	longitudinal	10 min with full order of magnitude	40 min with full order of magnitude
	lateral	10 min with full order of magnitude	40 min with full order of magnitude
	vertical	10 min with full order of magnitude	40 min with full order of magnitude
condition 3	three direction	5g	20g

中内筒螺钉检查需要拆开尾端绝缘子。优化前的振动试验中,对形成线组件进行了两次拆装检查,分别是纵向试验完成后和所有试验完成后,两次拆开均发现螺钉大部分松脱,一次断了两颗螺钉、一次断了一颗螺钉。优化后的振动试验中,对形成线组件也进行了拆装检查,检查结果如前文所述,不考虑原 PEEK 尾端绝缘子的工况 2 垂向试验结果,优化后的形成线组件中内筒连接均完好,螺钉无松脱,无断裂。同时,优化后的形成线组件振动考核时间远长于优化前的考核时间,达到了振动考核要求。从振动试验对比结果可看出,优化后的形成线组件振动环境适应性得到明显提高。

使用原 PEEK 尾端绝缘子和玻纤增强 PEEK 尾端绝缘子进行了对比扫频试验,提取中筒尾端的加速度响应值,结合工况 2 的振动试验结果,对比数据见表 5。对比安装原 PEEK 和玻纤增强 PEEK 的形成线组件在相同工况下的振动结果,可以发现安装玻纤增强 PEEK 时系统的轴向频率小幅度增加,阻尼减小,轴向振动量级有所增加。横向和垂向刚度加强,频率得到一定提升,振动量级有所下降,其中垂向扫频振动量级下降 45% 左右。结合中内筒连接螺钉未松动断裂的试验结果,可以说明优化尾端绝缘子材料、提高中内筒连接刚度、降低中内筒振动响应,对于降低中内筒连接螺钉松动断裂的出现几率很有帮助。

表 5 安装不同材质尾端绝缘子时中筒尾端响应结果
Table 5 Response results of middle conductor with different insulator materials

test condition	response with PEEK	response with glass fiber reinforced PEEK
longitudinal frequency sweep	0.59g@38.1 Hz	1.38g@39.4 Hz
longitudinal wheel vehicle transportation (condition 2)	1.10g, RMS	1.90g, RMS
lateral frequency sweep	1.87g@24.6 Hz	1.31g@32.1 Hz
vertical frequency sweep	1.23g@23.6 Hz	0.52g@37.9 Hz
vertical wheel vehicle transportation (condition 2)	2.73g, RMS	2.60g, RMS

4 结 论

本文以带有悬臂结构的同轴脉冲形成线为研究对象,开展提高振动环境适应性的优化设计,结论为:通过实际工况分析及仿真计算,确定形成线内筒的盲孔螺钉可采用的防松措施有:使用施必劳螺纹,涂抹防松胶,增加螺钉数量;通过模态仿真和绝缘试验,玻纤增强 PEEK 材质可作为尾端绝缘子的优选材质,并通过振动试验验证,玻纤增强 PEEK 可提高悬臂支撑的中内筒连接刚度,降低中内筒的振动响应,从而降低中内筒连接螺钉发生松动断裂的几率;通过等效件振动试验考核,优化后的同轴脉冲形成线可以通过长时间的振动考核,相比优化前的振动环境适应性有很大提高,验证了优化设计的有效性。

参考文献:

- [1] 康强, 常安碧, 李名加, 等. 带脉冲形成线的 1.0 MV 100 Hz 紧凑型 Tesla 变压器的研制[J]. 强激光与粒子束, 2006, 18(3): 451-454. (Kang Qiang, Chang Anbi, Li Mingjia, et al. Development of a 1.0 MV 100 Hz compact Tesla transformer with PFL[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2006, 18(3): 451-454)
- [2] 石磊, 朱郁丰, 卢彦雷, 等. 紧凑 Tesla 变压器型纳秒脉冲源[J]. 强激光与粒子束, 2014, 26: 125001. (Shi Lei, Zhu Yufeng, Lu Yanlei, et al. Compact GW nanosecond pulse generator based on Tesla transformer[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014, 26: 125001)
- [3] 王刚, 张喜波, 王俊杰, 等. 基于 Tesla 变压器和 Blumlein 线的低抖动重频脉冲发生器[J]. 强激光与粒子束, 2016, 28: 045005. (Wang Gang, Zhang Xibo, Wang Junjie, et al. Low-jitter repetitive pulsed generator based on Tesla transformer and Blumlein pulse forming line[J]. High Power Laser and Particle Beams,

2016, 28: 045005)

- [4] 张喜波, 苏建仓, 潘亚峰, 等. 倍宽脉冲形成线[C]//第四届全国脉冲功率会议. 2015: A38. (Zhang Xibo, Su Jiancang, Pan Yafeng, et al. Multiple-width pulse forming lines[C]//4th Chinese Pulse Power Conference. 2015: A38)
- [5] 范红艳, 张喜波, 刘胜, 等. Tesla 型脉冲功率源随机振动响应分析[J]. 现代应用物理, 2018, 9: 031003. (Fan Hongyan, Zhang Xibo, Liu Sheng, et al. Random vibration analysis of Tesla-type pulse generator[J]. Modern Applied Physics, 2018, 9: 031003)
- [6] 范红艳, 王俊杰, 刘胜, 等. 同轴脉冲形成线的运输振动环境适应性研究[J]. 强激光与粒子束, 2021, 33: 055004. (Fan Hongyan, Wang Junjie, Liu Sheng, et al. Research on transportation vibration environmental adaptability of coaxial pulse forming line[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2021, 33: 055004)
- [7] Junker G H. New criteria for self-loosening of fasteners under vibration[J]. SAE Transaction, 1969, 78: 314-335.
- [8] Sakai T. Investigations of bolt loosening mechanisms: 1st report, on the bolts of transversely loaded joints[J]. Bulletin of JSME, 1978, 21(159): 1385-1390.
- [9] Pai N G, Hess D P. Three-dimensional finite element analysis of threaded fastener loosening due to dynamic shear load[J]. Engineering Failure Analysis, 2002, 9(4): 383-402.
- [10] Pai N G, Hess D P. Experimental study of loosening of threaded fasteners due to dynamic shear loads[J]. Journal of Sound and Vibration, 2002, 253(3): 585-602.
- [11] 方子帆, 吴行, 曹钢, 等. 动态组合载荷作用下螺栓连接结构松动机理研究[J]. 机械强度, 2017, 39(2): 386-391. (Fang Zifan, Wu Hang, Cao Gang, et al. Research on bolt connection loose mechanism under dynamic tension compression and shear load[J]. Journal of Mechanical Strength, 2017, 39(2): 386-391)
- [12] 王传华, 王文莉, 林清源, 等. 基于精确建模的横向振动工况下螺栓松动机理研究[J]. 宇航总体技术, 2018, 2(4): 43-51,64. (Wang Chuanhua, Wang Wenli, Lin Qingyuan, et al. Study on bolt loosening mechanism in vibration condition based on precise model[J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2018, 2(4): 43-51,64)
- [13] 方子帆, 吴祖双, 朱畅, 等. 输电塔横担螺栓铝合金防松垫片的防松性能研究与改进设计[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2022, 44(3): 74-78. (Fang Zifan, Wu Zushuang, Zhu Chang, et al. Design and research on aluminum alloy anti-loosening washer for cross arm bolt of transmission tower[J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2022, 44(3): 74-78)
- [14] 唐羽. 内六角圆柱头螺栓多重防松措施设计[J]. 机械工程与自动化, 2017(2): 200-201. (Tang Yu. Multiple locking design of inner-hexagon bolt[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2017(2): 200-201)
- [15] 董得义, 李志来, 杨利伟, 等. 防松胶对螺纹连接预紧力影响试验研究[J]. 振动与冲击, 2015, 34(22): 121-124,137. (Dong Deyi, Li Zhilai, Yang Liwei, et al. Experiment study on the influence of locking adhesive on the preload of screw thread connection[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(22): 121-124,137)
- [16] 关洋, 徐武彬, 王国安. 螺纹锁固胶的防松效果探讨[J]. 机械研究与应用, 2013, 26(2): 170-172. (Guan Yang, Xu Wubin, Wang Guo'an. Anti-loosening effect discussion of thread locking glue[J]. Mechanical Research Application, 2013, 26(2): 170-172)