

Study on the Loosening Behavior of a 6.8 Grade M20 Hot Dip Galvanized Bolt for Transmission Towers

Miao Qian, Rui Li, Yibo Gao, Heng Ma, Ke Qian

Zhejiang Huadian Equipment Testing Institute (National Quality Supervision & Inspection Center of Electrical Equipment Safety Performance), Hangzhou Zhejiang
Email: 153634553@qq.com, 13958020182@163.com

Received: Jun. 7th, 2017; accepted: Jun. 25th, 2017; published: Jun. 28th, 2017

Abstract

The loosening of fasteners commonly destroys the integrity and even lead to the collapse of the transmission tower. In this paper, the effects of four main factors, including pre-load, temperature, amplitude and vibration frequency, on the loosening behaviors of 6.8 grade M20 hot dip galvanized bolts were investigated as well as the mechanisms behind them. The results show that improving pre-load, reducing temperature and decrease vibration frequency can effectively restrict the loosening of the 6.8 grade M20 hot dip galvanized bolt. However, the conventional vibration frequency exhibits little effect on the loosening behavior of the hot dip galvanized bolts.

Keywords

Bolts, Anti-Loose Performance, Initial Pro-Load, Temperature, Amplitude, Frequency

输电铁塔用6.8级M20热镀锌螺栓松动行为研究

钱苗, 李瑞, 高义波, 马恒, 钱科

浙江华电器材检测研究所(国家电力器材产品安全性能质量监督检验中心), 浙江 杭州
Email: 153634553@qq.com, 13958020182@163.com

收稿日期: 2017年6月7日; 录用日期: 2017年6月25日; 发布日期: 2017年6月28日

摘要

紧固件的松动会破坏输电铁塔的完整性, 甚至导致输电铁塔的彻底倒塌。本文主要研究了预紧力、温度、

振幅及频率四个主要因素对输电铁塔紧固件松动行为的影响，并揭示了螺栓在上述四个主要因素影响下的松动机制。研究表明：提高预紧力、降低温度和减小振幅可以有效抑制螺栓的松动，常规频率对螺栓的松动行为影响较小。

关键词

螺栓，防松性能，初始预紧力，温度，振幅，频率

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

紧固件是一种用于连接和传动的机械结构要素，因其具有加工方便，连接力大，结构紧凑，便于装拆和连接可靠等优点，成为应用最广泛的连接方式。表面采用热浸镀锌工艺制造的一类紧固件，因其优异的户外耐腐蚀性能作为输电线路杆塔和变电站构架联接的首选零件[1]。

紧固件螺纹结构原理的实质是斜面机构，在预紧载荷作用下产生周向分力使连接具有松脱趋向，但在连接副和支承面的摩擦作用下实现自锁而不松脱。因此，通常情况下螺栓连接是比较可靠的，螺栓装配过程中施加的预紧力在螺栓的整个生命周期中能够起到抑制螺栓松动的作用。

然而，在恶劣天气和大风区域服役的输电塔，一些特殊因素会导致螺栓连接的预紧力分解，如连接副受到外界风载、温度变化等因素干扰时，原来的平衡可能被打破，出现轻微的滑动，在一次一次的扰动中，这种滑动越来越大，最终达到松脱的程度，导致螺栓连接失效[2]。预紧力、温度和振动是导致螺栓几何尺寸变化和负载变化的重要因素，它们也是影响螺栓可靠性和松动行为的关键因素。在环境因素作用下输电塔螺栓可能发生松动，一旦螺栓松脱则影响输电塔的稳定性和可靠性，重则引发倒塔事故，甚至严重威胁到电网安全运行[3]。

本文采用横向振动试验方法研究了预紧力、温度、振动频率和振幅对常规输电塔紧固螺栓松动行为的影响，从而揭示螺栓松动的机理。希望有助于缓解和避免在役输电铁塔用热镀锌螺栓的松动并指导防护技术的开发。

2. 实验材料与方方法

2.1. 实验材料

本文采用输电铁塔广泛应用的 M20-6.8 级螺栓作为研究对象，材质为 35#钢。螺栓的化学成分和主要技术参数分别列于表 1 和表 2。

2.2. 螺栓松动试验

横向振动试验方法是上世纪八十年代以来公认的效果较理想的试验方法[4]，我国已发布实施了国家标准(GB/T 10431-2008)，这种方法在国内是广泛接受的螺栓松动试验方法[5]。本文采用了横向振动法研究螺栓在不同外界因素影响下的松动行为。

螺栓松动试验是在 FPL-600 低温横向振动试验系统上完成的。该低温横向振动试验系统由横向振动试验机(机械系统)、传感器、放大器和记录仪四部分组成。系统配置高低温试验箱(-40℃~60℃)，可开展环境温度试验。FPL-600 低温横向振动试验系统如图 1 所示，其主要结构如图 2 所示。实验过程中，首先

将紧固件样品安装在试验机上，施加扭矩使之产生夹紧力，在施扭过程中可以读取扭矩和夹紧力值，达到预定扭矩或夹紧力后开始松动试验。

实验过程中，借助于试验机在被夹紧的上下两可相对运动的金属板之间产生的交变横向位移，使连接副受到干扰而松动。随着螺栓的松动，系统显示的夹紧力会逐渐减小，甚至完全丧失。在试验过程中连续记录夹紧力的瞬时值，根据记录数据的变化评价紧固件防松性能。在横向振动试验中，通过夹杂力值变化的快慢判定螺栓松动的程度。系统显示夹紧力减小得越慢，防松性能越好；反之，夹紧力减小得

Table 1. Chemical compositions of the 6.8 grade M20 hot dip galvanized bolt

表 1. 输电铁塔用 6.8 级 M20 热镀锌螺栓的化学成分

材质	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu
35#	0.353	0.203	0.477	0.014	0.013	0.015	0.006	0.017

Table 2. Physical performances of the 6.8 grade M20 hot dip galvanized bolt

表 2. 输电铁塔用 6.8 级 M20 热镀锌螺栓的物理性能

性能等级	螺纹公称应力截面积 A_s , 公称 ^a	公称抗拉强度 R_m	最小拉力载荷 $F_{m,min}$ (A_s , 公称 $\times R_{m,min}$)
6.8	245 mm ²	600 MPa	147,000 N



Figure 1. FPL-600 transverse vibration test system

图 1. FPL-600 横向振动试验系统

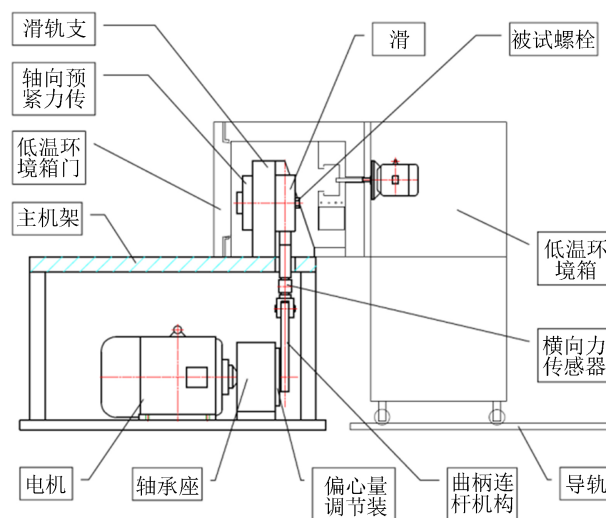


Figure 2. Schematic diagram of the FPL-600 transverse vibration test system

图 2. FPL-600 横向振动试验系统基本结构

越快，防松性能越差[3]。

在实验设计过程中，主要考虑预紧力、温度、振幅和频率四个因素对输电铁塔用热镀锌螺栓松动行为的影响，采用了四因素三水平正交试验法开展螺栓横向振动试验，振动次数设置为 5000 次，正交试验参数列于表 3。

试验完成后，利用试验数据求出每个样品的剩余紧固轴力和初始预紧力的百分比值，计算公式如下：

$$\text{螺栓松动百分比} = (\text{剩余紧固轴力} / \text{初始预紧力}) \times 100\%$$

在数据筛选和处理方面，采用格拉布斯(Grubbs)准则对试验结果中的异常数据进行判别和剔除[5]。剔除后的数据将采用直接对比曲线形状或对比分布特性进行分析和比较，分析初始预紧力、温度、振幅和频率对螺栓剩余紧固轴力的影响规律。

3. 结果与讨论

3.1. 初始预紧力对紧固件横向振动松脱的影响

本文开展了在不同初始预紧力(10% $F_{m,min}$, 20% $F_{m,min}$, 30% $F_{m,min}$, 40% $F_{m,min}$, 50% $F_{m,min}$)条件下紧固件横向振动试验，振动次数为 5000 次。在采用格拉布斯(Grubbs)准则剔除异常值后[6]，绘制直方图对不同预紧力条件下的紧固件剩余紧固轴力进行了比较(图 3)。

如图 3 所示，随着预紧力的提高，热镀锌螺栓的剩余紧固轴力总体上不断增加，预紧力为 40% F_m 时和 50% $F_{m,min}$ 的热镀锌螺栓剩余轴力最高，超过 80%。相反，当预紧力你于 20% F_m 时，剩余紧固轴力最小，而且离散性增大，大部分螺栓剩余紧固轴力降至 50% 左右。从试验数据离散性可以看出，50% $F_{m,min}$

Table 3. Orthogonal test table for transverse vibration test

表 3. 横向振动试验正交试验表

序号	试验常量	试验变量
1	$F = 40\%F_{m,min}, s = \pm 1 \text{ mm}, f = 12.5 \text{ Hz}$	温度/ $^{\circ}\text{C}$: -40、0、40
2	$F = 40\%F_{m,min}, T = 20 \pm 5^{\circ}\text{C}, f = 12.5 \text{ Hz}$	振幅/mm: ± 1 、 ± 1.5 、 ± 2
3	$F = 40\%F_{m,min}, s = \pm 1 \text{ mm}, T = 20 \pm 5^{\circ}\text{C}$	频率/Hz: 5、10、12.5
4	$S = \pm 1 \text{ mm}, f = 12.5 \text{ Hz}, T = 20 \pm 5^{\circ}\text{C}$	预紧力/ $F_{m,min}$: 10%、20%、30%、40%、50%

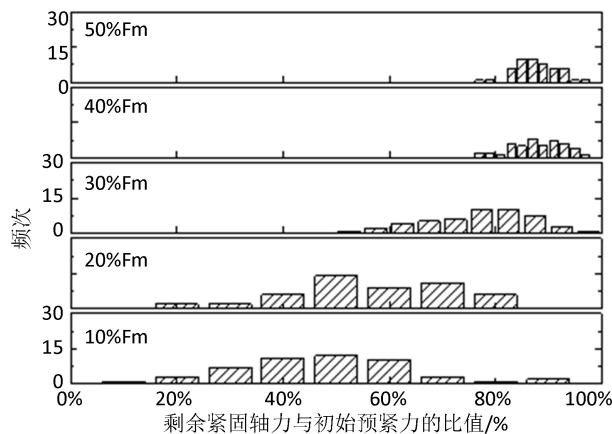


Figure 3. Loosening characteristics of bolt fasteners with different initial pre-load

图 3. 不同初始预紧力条件下的紧固件横向振动防松性能比较图

和 $40\%F_{m,min}$ 预紧力对应的试验数据离散性明显小于 $10\%F_{m,min}$ 和 $20\%F_{m,min}$, 预紧力是紧固力矩(T)在紧固件上产生的轴向拉力。松动扭矩(T_p)是指使紧固件从其安装位置开始运动的必要力矩[7]。

紧固件的紧固力矩, 可以由下式给出:

$$T = F_b \cdot D(K_1 + K_2 + K_3) \quad (1)$$

式中, F_b 为螺栓拉力; D 为螺栓公称直径; K_1 为螺母因子的螺距贡献; K_2 为螺母因子的螺纹摩擦贡献; K_3 为螺母因子的轴承摩擦贡献。

对于紧固件而言, 它的松动力矩 $T_p = F_i \cdot D(-K_1 + K_2 + K_3)$, F_i 为预紧力。当其它变量都不变的条件下, F_i 越大则松脱所需要的力矩越大, 也就是紧固件的松脱越困难。从本文测试数据结果上看, 很好地符合了这个规律, 在测试范围内预紧力越大, 输电塔用热镀锌螺栓剩余预紧力越大, 而且松动的概率越小, 数据离散性越小, 这对预防输电铁塔用热镀锌螺栓松动越有意义。

3.2. 温度对紧固件横向振动松脱的影响

温度会影响材料的物理性能, 最显著的影响是螺栓材料的热胀冷缩效应, 因而它会影响螺栓的松动行为。本文开展了三种环境温度下紧固件横向振动试验, 初始预紧力为 $40\%F_{m,min}$ 。在采用格拉布斯(Grubbs)准则剔除异常值后, 将剩余试验数据绘制在同一对数坐标轴内, 通过对比曲线形状和分布, 直接比较不同温度条件下的紧固件的横向振动防松性能。如图 4 所示, 在 -40°C 环境条件下, 紧固件的剩余紧固轴力与初始预紧力比值最高, 数据离散度小, 均处于 90% 以上; 在 0°C 和 40°C 环境条件下, 紧固件的剩余紧固轴力与初始预紧力比值分布较低, 且数据离散性较大, 其中 40°C 环境条件下的剩余紧固轴力最低。试验结果表明, 低温环境下的紧固件抗振防松性能明显好于高温环境下的紧固件抗振防松性能。日本广岛大学的 Sawa 和 Ishimura 等人研究表明, 被紧固件的热膨胀系数不同时, 会影响螺栓的张紧力, 其主要原因是被紧固件之间热膨胀系数不同导致热变形不一致, 这会迫使接触面之间产生相对运动, 这种相对运动会使螺栓的张紧力下降[8]。2015 年, 这也是在三种温度条件下测试螺栓的松动特性, 在较高的温度时螺栓预紧力下降的主要原因。

3.3. 振幅对紧固件横向振动松脱的影响

在受横向振动时, 振幅影响紧固件的变形。振幅越大, 对紧固件的变形影响越大。本文开展了不同振幅($\pm 1\text{ mm}$, $\pm 1.5\text{ mm}$, $\pm 2\text{ mm}$)下紧固件的横向振动试验, 振动次数均为 5000 次, 在采用格拉布斯(Grubbs)准则剔除异常值后, 采用绘制直方图对不同预紧力下的紧固件横向振动防松性能进行描述和比较, 结果如图 5 所示。

经直方图定性比较, 在振幅 $\pm 1\text{ mm}$ 试验条件下, 紧固件的剩余紧固轴力与初始预紧力比值最高, 呈现以 86.2% 为中心, 标准偏差 3.22% 的类似正态分布。在振幅 $\pm 2\text{ mm}$ 试验条件下, 紧固件的剩余紧固轴力与初始预紧力比值最低, 均值仅为振幅 $\pm 1\text{ mm}$ 试验条件下的 1/4, 即呈现以 23% 为中心, 标准偏差 6.67% 的类似正态分布。在振幅 $\pm 1.5\text{ mm}$ 试验条件下, 紧固件的剩余紧固轴力与初始预紧力比值较振幅 $\pm 1.5\text{ mm}$ 试验条件下略高, 即呈现以 29.6% 为中心, 标准偏差 5.92% 的类似正态分布。试验结果表明, 振幅越小, 紧固件的剩余紧固轴力越大, 越不容易松动。同时也说明提升振幅, 将致使紧固件的剩余紧固轴力显著下降。根据螺栓的松动原理, 较大的振幅, 尤其是较大的侧向幅值, 容易引起螺栓沿螺纹面上导致松动运动运动的力超过摩擦力, 螺栓将有更大概率发生松动。

3.4. 振幅对紧固件横向振动松脱的影响

振动频率也是影响螺栓松动行为的重要原因之一。本文开展不同频率(5 Hz, 10 Hz, 12.5 Hz)下紧固件的横向振动试验, 振动次数为 5000 次。本文采用绘制直方图对不同频率下的紧固件横向振动防松性能进行比较, 结果如图 6 所示。经过试验结果的对比可以看出, 三种频率试验条件下, 紧固件的剩余紧固轴

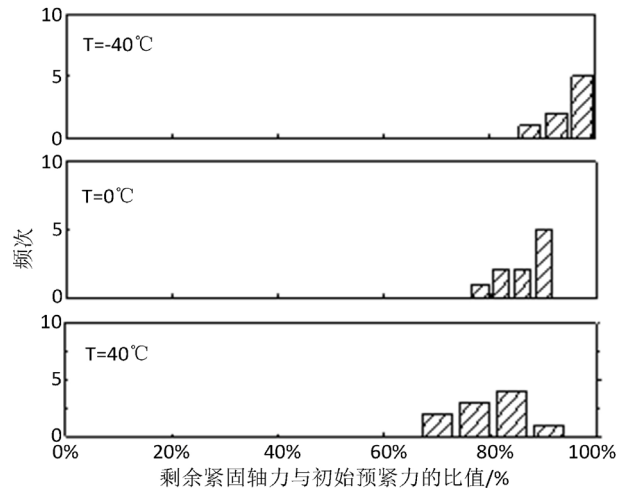


Figure 4. Transverse vibration analysis curve of bolt fasteners under the temperature of -40°C , 0°C and 40°C

图 4. 不同温度下(-40°C , 0°C 和 40°C)紧固件横向振动试验数据对比图

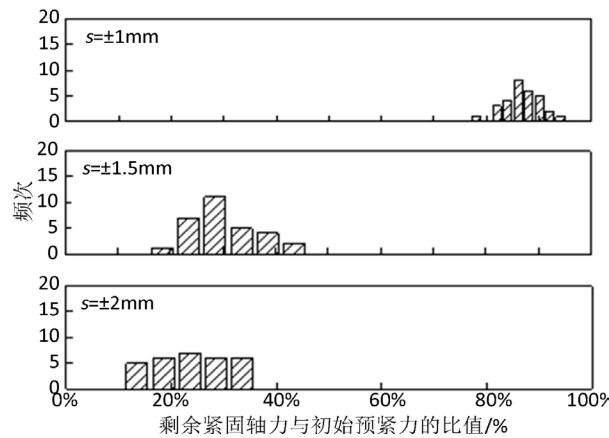


Figure 5. Results of the vibration tests with different amplitude

图 5. 不同振幅下紧固件横向振动试验数据对比图

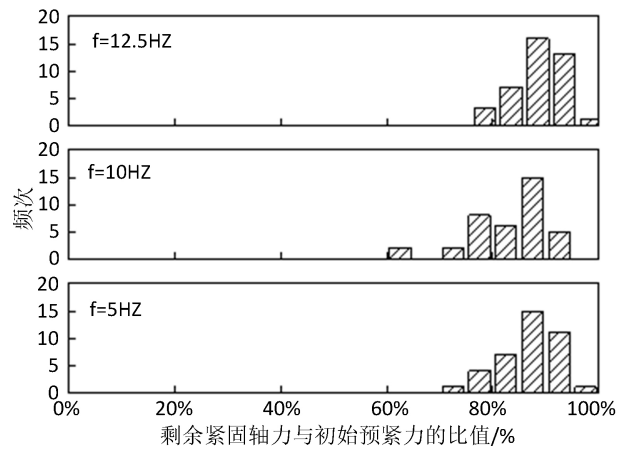


Figure 6. Results of the vibration tests with different vibration frequency

图 6. 不同频率下紧固件横向振动试验数据对比图

力与初始预紧力比值的均值较接近，分布也较相似，没有呈现明显的差别。这一试验结果表明，在试验设定频率变化范围内，紧固件预紧力的变化较小或者说并不明显，同时也说明在常规振动频率下，频率不是主要影响输电塔用热镀锌紧固件松动的主要因素。

4. 结论

本文主要研究了初始预紧力、温度、振幅和频率对输电铁塔用 35#/6.8 级热镀锌螺栓松动行为的影响规律和机制主要结论如下：

1) 初始预紧力越大，松动扭矩越大，初始预紧力达到 $40\%F_{m,min} \sim 50\%F_{m,min}$ 时，输电塔用 35#/6.8 级热镀锌螺栓剩余紧固轴力最大，数据离散性最小，抗松动性能最好。

2) 不同材料的热膨胀系数不同，温度升高迫使接触面产生相对运动，导致螺栓剩余紧固轴力下降，温度越高越容易引起螺栓的松动。

3) 随着振幅增加，引起的螺栓弹性变形和塑性变形增加，导致螺栓剩余紧固力下降，振幅越大，越容易引起螺栓的松动。

4) 频率变化对紧固件的松动的的影响不明显。

基金项目

国家电网公司科技项目“大风、大温差区域输电铁塔紧固件松动机理及防松技术研究”(编号：52110415000J)。

参考文献 (References)

- [1] 余虹云, 等. 电力线路器材应用与检测[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- [2] 常星亚. 风载作用下输电塔螺栓连接松动特性研究[D]: [硕士学位论文]. 保定: 华北电力大学, 2015.
- [3] 何先龙, 余天莉, 徐兵, 李杰, 陈刚, 曹国福. 基于塔筒振动特性识别风机塔螺栓松动的研究[J]. 振动与冲击, 2016, 35(14): 112-118.
- [4] 李维荣. 螺纹紧固件防松技术和试验方法研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2009, 5(5): 20-21.
- [5] GB-T 10431-2008 紧固件横向振动试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [6] 王文周, 等. 未知 σ, t 检验法剔除异常值最好[J]. 四川工业学院学报, 2000, 19(3): 84-86.
- [7] Femando, S. (2005) Mechanisms and Prevention of Vibration Loosening in Bolted Joints. *The Australian Journal of Mechanical Engineering*, **2**, 1-20.
- [8] 侯世远. 螺纹连接松动机理研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京理工大学, 2015.

期刊投稿者将享受如下服务：

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：tdet@hanspub.org