

高强钢高强度螺栓摩擦型连接预紧力松弛试验研究

高飞, 卞卡, 陈俊波*

(华中科技大学土木与水利工程学院, 武汉 430074)

摘要: 预紧力大小是影响高强度螺栓摩擦型连接承载性能的关键因素之一, 而高强度螺栓的预紧力会随时间增加逐渐衰减。为研究钢材强度等级、螺栓等级、孔型与表面处理方式对高强钢高强度螺栓摩擦型连接预紧力松弛的影响以及探究高强度螺栓长时间下的松弛率, 文中进行了55组单栓预紧力松弛试验, 分别监测了高强度螺栓紧固后24 h内或100 h内的预紧力松弛演化过程。试验结果表明: 接触面采用涂层处理会增大高强钢高强度螺栓摩擦型连接的预紧力松弛率, 当涂层过厚时, 螺栓紧固后24 h内松弛率最大可达10%以上; 高强度螺栓等级与钢材强度对该螺栓摩擦型连接的预紧力松弛率没有显著影响; 在连接板上扩孔会略微增大其预紧力松弛率。随后, 基于现有模型, 结合24 h预紧力松弛监测数据对高强度螺栓50年后的预紧力松弛率开展了预测, 结果表明: 未涂层试件的松弛率最大不超过3.8%, 电弧热喷铝涂层试件的松弛率为8.30%, 无机富锌涂层试件的松弛率为9.40%, 电弧热喷锌铝合金涂层试件的松弛率为12.52%; 除电弧热喷锌铝合金涂层外, 其他表面处理方式下的高强度螺栓预紧力松弛率均在10%以下。

关键词: 高强钢; 高强度螺栓; 摩擦型连接; 预紧力松弛; 表面处理; 孔型; 松弛率

中图分类号: TU391

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2026)01-0056-12

DOI: 10.13969/j.jzgjz.20240820004

Experimental Study on Preload Loss of High-Strength Steel Slip-Resistant Bolted Connections

GAO Fei, BIAN Ka, CHEN Junbo*

(School of Civil and Hydraulic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

*Corresponding author: junbochen@hust.edu.cn

Abstract: Preload is one of the key factors influencing the resistance of slip-resistant high-strength bolted connections, as the preload tends to decrease over time. To investigate the influence of steel grade, high-strength bolt grade, hole type and surface treatment on the loss of preload loss rate in the high strength steel slip-resistant bolted connections and the preload loss rate of high-strength bolts over a long time, 55 single-bolt preload loss tests were conducted, and the preload loss of high-strength bolts within 24 h or 100 h after tightening was monitored. Test results indicate that the coatings lead to an increased loss rate of preload and the 24-hour preload loss rate could exceed 10% with excessively thick coatings. The steel grades and the grades of high-strength bolts, however, have a minor impact on the preload loss rate. The use of oversized hole and slotted hole in the connecting plates could slightly increase the preload loss rate. Subsequently, predictions of the loss of preload in high-strength bolts over 50 years were made on the basis of existing model and 24-hour measured data. Results show that the preload loss rate in uncoated specimens is no more than 3.8%, while the preload loss rate in the arc

收稿日期: 2024-08-20

基金项目: 国家重点研发计划(2023YFC3806603)

作者简介:

高飞(1978—), 男, 博士, 教授, 主要从事钢结构与钢-混凝土组合结构方面的研究。E-mail: hustgaofei@hust.edu.cn。

通信作者:

陈俊波(1991—), 男, 博士, 副教授, 主要从事高性能钢结构方面的研究。E-mail: junbochen@hust.edu.cn。

spray aluminium coated, inorganic Zn-rich coated and arc spray Zn-Al alloy coated specimens are 8.30%, 9.40% and 12.52%, respectively. Except for the arc spray Zn-Al alloy coated specimens, the preload loss rate in specimens with all the other surface treatments is less than 10%.

Keywords: high-strength steel; high-strength bolt; slip-resistant connection; preload loss; surface treatment; hole type; preload loss rate

高强度通常指屈服强度不小于460 MPa的结构钢^[1], 高强度的螺栓连接常采用高强度螺栓摩擦型连接。高强度螺栓摩擦型连接依靠接触面之间的摩擦力传递荷载, 接触面的抗滑移系数与螺栓预紧力是影响其承载力最重要的因素。

近年来, 一些学者对高强度高强度螺栓摩擦型连接的抗滑移系数进行了大量研究。CRUZ等^[2]对比了S690高强度钢与S275钢喷砂后的抗滑移系数, 认为钢材等级对抗滑移系数的影响并不显著。王彦博等^[3]、WANG等^[4-5]对Q550~Q890高强度钢在抛丸处理、抛丸后生赤锈及喷涂无机富锌漆三种表面处理方式下的表面抗滑移系数开展了试验研究, 认为随着钢材强度的增加, 其表面粗糙度与变形能力均降低, 进而导致该高强度钢的抗滑移系数降低。李友志等^[6]对比了Q460~Q690高强度钢与Q345钢在抛丸处理与喷硬质石英砂两种处理方式下的抗滑移系数, 发现高强度钢与Q345钢相比其抗滑移系数有所降低。陈学森等^[7]研究发现高强度钢喷砂后电弧热喷铝表面的抗滑移系数可达0.71。曹鑫^[8]基于试验数据, 采用有限元方法分析了芯板厚度与钢材强度对高强度高强度螺栓摩擦型连接抗剪承载力的影响, 认为钢材强度越大, 芯板厚度减小对其抗剪承载力的削弱作用越小。目前, 针对高强度高强度螺栓摩擦型连接的研究主要集中于抗滑移系数方面, 而对高强度高强度螺栓摩擦型连接预紧力松弛的研究还比较少。

各国学者对普通钢高强度螺栓摩擦型连接的预紧力松弛进行了一些研究。KULAK等^[9]对不同孔型的A36钢A325高强度螺栓摩擦型连接开展了试验研究, 研究发现: 采用大圆孔会导致抗滑移系数下降、预紧力松弛效应加剧, 进而使螺栓连接的承载力降低15%; 而采用长槽孔则会使承载力降低30%。HEISTERMANN等^[10]对不同孔型的S355钢开展了试验研究, 结果表明: 相比于标准孔, 开放式长槽孔的预紧力损失会增大1.5%左右。彭铁红等^[11]为探究螺栓孔型对预紧力损失的影响, 针对Q345B钢10.9级高强度螺栓的单栓试件开展了预紧力松弛试验, 发现终拧后24 h内的预紧力损失占总损失的80%以上, 且随着螺栓孔尺寸的增大, 高强度螺栓预紧力松弛率也随之增大。石永久等^[12]设计制作了Q345B钢10.9级高强度螺栓多栓试件, 针对高强度螺栓预紧力松弛特性开展了超45 h的监测, 研究表明: 95%保证率下该类高强度螺栓预紧力松弛率最终值为

7.1%。EBERT等^[13]通过扩展蠕变试验研究了高强度螺栓在受力状态下的预紧力损失, 发现采用热喷锌、铝涂层等表面处理方式会导致高强度螺栓预紧力损失约30%以上。AMPLEMAN等^[14]针对350AT钢开展了钢表面热喷锌涂层对高强度螺栓预紧力松弛影响的试验研究, 试验结果表明: 热喷锌涂层与接触面毛刺会加剧高强度螺栓的预紧力松弛效应, 且涂层厚度越大, 预紧力损失率越大; 此外, 在不提升螺栓等级的前提下, 通过施加更大预紧力可使预紧力损失率降低约5%, 而采用更高等级的高强度螺栓仅能使损失率减少约2%。NAH等^[15]针对SM490A钢开展了钢表面涂层类型及厚度对高强度螺栓预紧力损失影响规律的试验研究, 发现当涂层过厚或者采用红铅涂层时会显著增加高强度螺栓预紧力损失。一些学者也针对高强度螺栓的预紧力松弛规律建立了预紧力损失随时间变化的模型。施刚等^[16]认为高强度螺栓的松弛率随时间逐渐增加并趋于某一固定值, 提出了松弛率与时间的平方呈反比关系。AFZALI等^[17]则认为预紧力松弛率与时间呈对数关系; D'ANTIMO等^[18]在AFZALI等^[17]提出的预紧力松弛模型基础上, 进一步考虑了外部荷载对预紧力的影响。综上所述, 学者们已较为系统地探讨了高强度螺栓预紧力松弛的影响因素及预紧力松弛模型, 但尚未综合考虑高强度钢强度等级、表面处理方式、孔型等因素的影响。

因此, 本文开展了高强度高强度螺栓摩擦型连接预紧力松弛试验; 试验考虑了4种因素的影响, 包括两种钢材等级、两种螺栓等级、3种孔型及5种表面处理方式。通过对高强度螺栓紧固后24 h内与100 h内预紧力松弛演化过程的检测, 并基于试验数据预测其50年后的预紧力松弛率, 为高强度高强度螺栓摩擦型连接的工程设计和施工提供参考依据。

1 试验概况

1.1 试件设计

本试验共设计了55个高强度高强度螺栓预紧力松弛试件, 并考虑了钢材强度等级、螺栓等级、孔型、表面处理方式四个参数对其的影响。其中钢材强度等级包括Q690与Q960两种强度等级; 钢板采用激光切割下料, 下料后钢板边缘用打磨机去除毛刺, 但孔周的毛刺不做处理。高强度螺栓等级包括10.9级和12.9级, 其中Q690钢板试件采用10.9级高强度螺栓, Q960钢板试件采用10.9级与

12.9级组成的高强度螺栓。试件由3块尺寸为100 mm×100 mm的钢板(2块盖板与1块芯板)、1颗M22型螺栓、2片垫片和1个压力传感器组成。其中,芯板厚度为10 mm,采用三种孔型,包括标准孔、大圆孔、长槽孔,而盖板厚度为6 mm,均采用标准孔。孔径和孔型按照《钢结构高强度螺栓连接技术规程》(JGJ 82—2011)^[19]进行设计,具体连接形式如图1所示。本试验采用压力传感器控制并记录螺栓预紧力,压力传感器量程为300 kN,精度为0.3%,传感器总高度为43 mm。

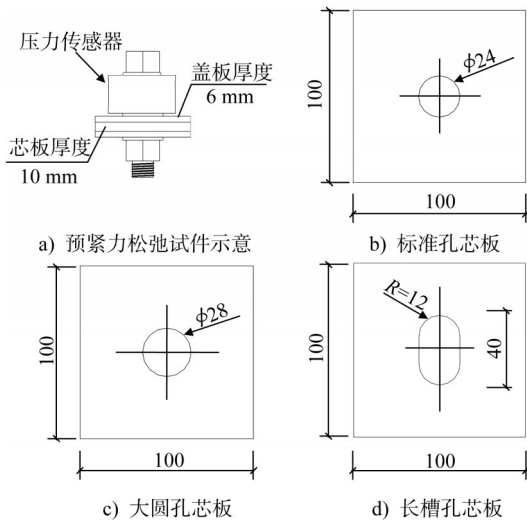


图1 预紧力松弛试件的尺寸(单位:mm)

Fig. 1 Dimensions of preload loss specimens (unit: mm)

钢板表面采用喷砂、抛丸、无机富锌涂层、电弧热喷铝、电弧热喷锌铝合金等五种方式处理,处理后的表面如图2所示。喷砂处理选用铜矿砂作为喷砂介质,该矿砂呈不规则棱角状;且采用人工喷砂工艺,除锈等级达到Sa 3级^[20],喷砂后试件表面呈银灰色。抛丸处理选用钢丸作为喷砂介质,钢丸呈球形或近球形,无棱角,粒径为1.5 mm;且采用机械抛丸工艺,除锈等级达到Sa 3级^[20]。抛丸、喷砂处理均符合《铁路钢桥保护涂装及涂料供货技术条件》(TB/T 1527—2011)^[21]中关于喷涂前钢材表面处理技术的要求。拟喷涂无机富锌底漆的试件喷涂前需经抛丸加工处理,所选用的无机富锌底漆型号为YHZinc2735(无锡市太湖防腐材料有限公司生产),其含锌量为80%;且采用人工喷涂工艺施工,喷涂厚度为 $100 \pm 20 \mu\text{m}$ 。喷涂无机富锌底漆后钢板表面呈现灰蓝色且无金属光泽,表面较为光滑。电弧热喷铝与电弧热喷锌铝合金为热喷涂处理,喷涂前试件需采用喷砂处理。电弧热喷铝后钢材表面颜色为银白色,略有金属光泽;电弧热喷锌铝合金后钢材表面颜色为淡蓝色,无金属光泽,涂层厚度为 $200 \pm 50 \mu\text{m}$ 。热喷涂处理遵循《热喷涂 金属和其他无机覆盖层 锌、铝及其合金》(GB/T 9793—2012)^[22]中的技术要求。涂层厚度采用数字

式磁性测厚仪进行测量;由于热喷涂采用人工操作,部分试件的涂层厚度超出预设的 $250 \mu\text{m}$ 控制范围(下文中用“#”标识)。

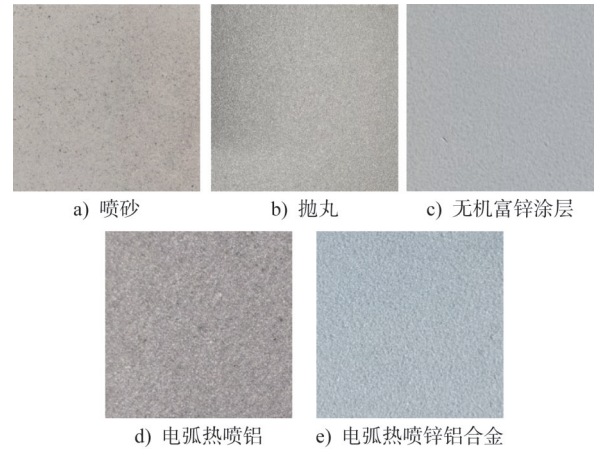


图2 钢板处理后的表面

Fig. 2 Surface of steel plate after treatment

在预紧力松弛试验中,表面处理方式为抛丸、无机富锌涂层、电弧热喷铝及电弧热喷锌铝合金的试件,均采用三种不同的孔型;以喷砂处理的试件采用标准孔作为对照组。其中,Q960钢对应的抛丸、无机富锌涂层试件分别采用10.9级与12.9级两种等级组成的高强度螺栓,其余表面处理类型对应的试件均采用12.9级高强度螺栓,试件参数设计如表1所示。

1.2 螺栓预紧力

试验中,10.9级M22高强度螺栓目标预紧力值为190 kN^[19],12.9级M22高强度螺栓预紧力由式(1)^[23]确定:

$$P = \frac{0.9 \times 0.9 \times 0.9}{1.2} f_u A_e \quad (1)$$

式中: P 为单个螺栓的预紧力取值(取5 kN的整倍数); f_u 为螺栓经过热处理后的最低抗拉强度值(MPa),12.9级螺栓取1 220 MPa^[24]; A_e 为螺纹处的有效面积(mm^2),M22型螺栓取 303 mm^2 ^[24]。由此可得单个12.9级M22螺栓的目标预紧力为225 kN。因此本试验10.9级与12.9级M22高强度螺栓目标预紧力分别取190 kN与225 kN。

1.3 试验装置及流程

将试件按照图1a)的形式拼装好后,先用扳手略微拧紧螺栓,防止初拧时板件之间发生错动。按照《钢结构工程施工质量验收标准》(GB 50205—2020)^[25]中的技术规范,采用电动扭矩扳手进行初拧,初拧值为目标预紧力值的50%左右;终拧阶段将螺栓实际预紧力值控制在目标预紧力值的0.95倍~1.05倍。紧固后,将试件静置于干燥、通风环境中进行监测,如图3b)所示,本次监测时长为24 h或100 h。

表1 试件参数设计
Table 1 Parameter design of specimens

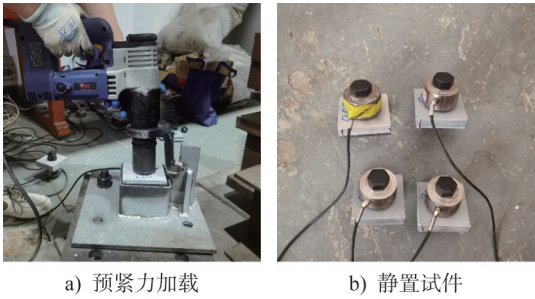
钢材等级	试件编号	螺栓等级	孔型	表面处理方式	试件个数/个	监测时长/h
Q690	690-10-SH-GB	10.9	标准孔	喷砂	2	24/100*
	690-10-SH-SB	10.9	标准孔	抛丸	2	24/100*
	690-10-OH-SB	10.9	大圆孔	抛丸	2	24
	690-10-SP-SB	10.9	长槽孔	抛丸	2	24/100*
	690-10-SH-IZ	10.9	标准孔	无机富锌漆	2	100
	690-10-OH-IZ	10.9	大圆孔	无机富锌漆	2	100
	690-10-SP-IZ	10.9	长槽孔	无机富锌漆	2	100
	690-10-SH-MA	10.9	标准孔	电弧热喷铝	2	24
	690-10-OH-MA	10.9	大圆孔	电弧热喷铝	2	24
	690-10-SP-MA	10.9	长槽孔	电弧热喷铝	2	24
	690-10-SH-MAZ	10.9	标准孔	电弧热喷锌铝合金	2	100
	690-10-OH-MAZ	10.9	大圆孔	电弧热喷锌铝合金	2	100
	690-10-SP-MAZ	10.9	长槽孔	电弧热喷锌铝合金	2	100
	Q960	960-10-SH-SB	10.9	标准孔	抛丸	1
960-10-OH-SB		10.9	大圆孔	抛丸	1	100
960-10-SP-SB		10.9	长槽孔	抛丸	1	100
960-10-SH-IZ		10.9	标准孔	无机富锌底漆	1	100
960-10-OH-IZ		10.9	大圆孔	无机富锌底漆	1	100
960-10-SP-IZ		10.9	长槽孔	无机富锌底漆	1	100
960-12-SH-GB		12.9	标准孔	喷砂	2	100
960-12-SH-SB		12.9	标准孔	抛丸	1	100
960-12-OH-SB		12.9	大圆孔	抛丸	1	100
960-12-SP-SB		12.9	长槽孔	抛丸	1	100
960-12-SH-IZ		12.9	标准孔	无机富锌漆	2	100
960-12-OH-IZ		12.9	大圆孔	无机富锌漆	2	100
960-12-SP-IZ		12.9	长槽孔	无机富锌漆	2	100
960-12-SH-MA		12.9	标准孔	电弧热喷铝	2	100
960-12-OH-MA		12.9	大圆孔	电弧热喷铝	2	100
960-12-SP-MA		12.9	长槽孔	电弧热喷铝	2	24/100*
960-12-SH-MAZ		12.9	标准孔	电弧热喷锌铝合金	2	24/100*
960-12-OH-MAZ		12.9	大圆孔	电弧热喷锌铝合金	2	24
960-12-SP-MAZ	12.9	长槽孔	电弧热喷锌铝合金	2	24	

注:试件编号中,10、12分别为10.9级、12.9级高强度螺栓;SH、OH、SP分别代表标准孔、大圆孔、长槽孔;GB、SB、IZ、MA、MAZ分别代表喷砂、抛丸、无机富锌涂层、电弧热喷铝、电弧热喷锌铝合金;*表示2个试件监测时长分别为24h和100h。

2 试验结果

试件紧固过程的预紧力随时间变化曲线如图4所示,从图中可以看出:高强度螺栓的预紧力松弛在施拧作业完成后即已开始。当板件未承受沿长度方向的外部荷

载时,高强度螺栓的预紧力松弛主要由螺纹部分塑性变形与蠕变效应、螺栓头及螺母下方钢板的塑性流动造成^[9]。本试验以终拧后的最大预紧力值 P_0 作为预紧力损失计算的基准起点,记录预紧力随时间的变化曲线。预



a) 预紧力加载 b) 静置试件

图3 预紧力松弛试验过程

Fig. 3 Process of preload loss tests

紧力剩余量百分比 p 和预紧力松弛率 r 计算公式如下:

$$p = \frac{P}{P_0} \quad (2)$$

$$r = 1 - \frac{P}{P_0} \quad (3)$$

式中: p 为某一时刻的预紧力剩余量百分比; P 为终拧后某一时刻的预紧力值; P_0 为终拧后的最大预紧力值; r 为某一时刻的预紧力松弛率。

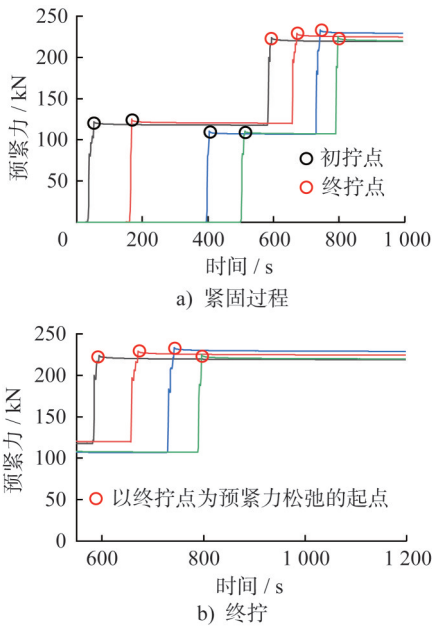


图4 试件紧固过程预紧力随时间变化曲线

Fig. 4 Time-dependent curves of preload during specimen tightening

由图5可知:Q690、Q960级高强度螺栓预紧力松弛试件的预紧力松弛速率随着时间的增长呈降低趋势;不同表面处理方式、钢材强度等级的试件均表现出相似的初期预紧力松弛规律,即终拧完成后1h内预紧力松弛速率较快,1h后松弛速率迅速降低。未涂层(喷砂、抛丸)试件在3h后其预紧力松弛速率逐渐趋于平稳,说明螺纹部分塑性变形与蠕变以及钢板的塑性流动在3h后

便趋于稳定;无机富锌涂层与电弧热喷锌铝合金涂层试件的预紧力松弛速率在24h内仍未趋于稳定,松弛率仍在增加;Q690钢电弧热喷铝涂层试件与未涂层试件的预紧力松弛规律是相似的,但Q960钢电弧热喷铝涂层试件与无机富锌涂层试件的预紧力松弛规律相近,这可能与加工过程中Q960钢电弧热喷铝涂层试件的涂层厚度均大于Q690钢电弧热喷铝涂层试件及螺栓孔周带毛刺试件的涂层厚度相关。表2列出了电弧热喷铝涂层与电弧热喷锌铝合金涂层试件的平均厚度,由于无机富锌底漆涂层厚度的离散程度较小,不再单独列出涂层厚度。AMPLEMAN等^[14]的研究结果表明:涂层厚度越大,高强度螺栓预紧力松弛量越大;对于热喷锌涂层试件,当涂层厚度差异达到150 μm 时,其预紧力松弛率差异可达10%左右;接触面毛刺会导致初期预紧力松弛率差异约5%,且会加快后期预紧力松弛速率。

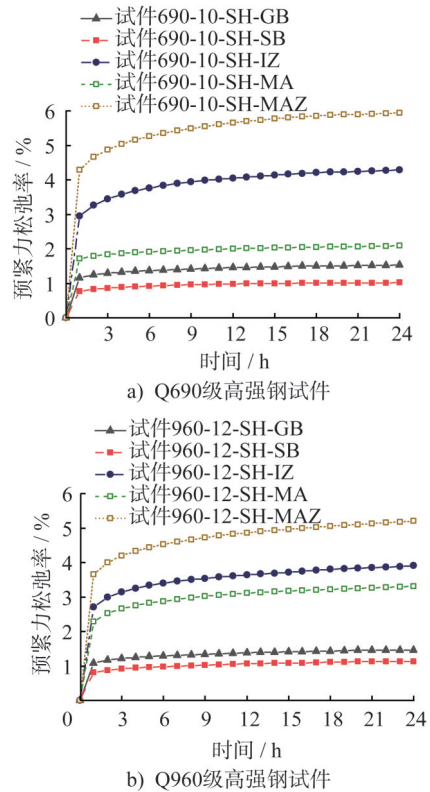


图5 高强度螺栓24h内的平均预紧力松弛率

Fig. 5 Average preload loss rate of high-strength bolts in 24 hours

测得的各组试件预紧力松弛率如表2所示。从表中可以得到:72h~100h这段时间中,各组试件的预紧力松弛率变化较小,各组试件24h的预紧力松弛量占100h预紧力松弛量的84.59%~98.70%,即高强度螺栓的预紧力松弛大部分发生在24h以内,这与彭铁红等^[11]的研究一致。

3 结果分析

3.1 表面处理方式对预紧力松弛的影响

接触面采用不同的表面处理方式会影响高强度螺栓的松弛,各种表面处理方式下 Q690、Q960 级高强度螺栓预紧力松弛试件的预紧力随时间变化曲线如图 5 所示。结合图 5 和表 2 可以得到:对于 Q690 级高强度标准孔试件 24 h 的平均预紧力松弛率:喷砂试件为 1.53%、抛丸试件为 1.02%,二者相差 0.51%;对于 Q960 级高强度标准孔试件 24 h 的预紧力损失:喷砂试件为 1.46%、抛

丸试件为 1.12%,二者相差 0.34%;由此说明未涂层试件的预紧力松弛率较低,喷砂和抛丸试件的损失率差异较小。相比于未涂层试件,涂层对试件预紧力松弛的影响较为显著。对于 Q690 级高强度标准孔试件,无机富锌涂层试件 24 h 的预紧力松弛率为 4.29%,电弧热喷铝涂层试件为 2.08%,电弧热喷锌铝合金涂层试件为 5.94%;对于 Q960 级高强度标准孔试件,无机富锌涂层试件 24 h 的预紧力松弛率为 3.90%,电弧热喷铝涂层试件为 3.30%,电弧热喷锌铝合金试件为 5.20%。

表 2 不同时间段试件的预紧力松弛率

Table 2 Preload loss rate in different time periods of specimens

试件编号	初始预紧力/ kN	预紧力松弛率/%						$r_{24h}/r_{100h}/\%$	涂层厚度/ μm
		r_{1h}	r_{3h}	r_{12h}	r_{24h}	r_{72h}	r_{100h}		
690-10-SH-GB-1	192.05	0.54	0.63	0.75	0.79	0.79	0.80	98.70	—
690-10-SH-GB-2	189.01	1.78	1.95	2.16	2.26	—	—	—	—
690-10-SH-SB-1	189.33	1.07	1.19	1.35	1.37	—	—	—	—
690-10-SH-SB-2	186.61	0.48	0.54	0.62	0.66	0.75	0.78	84.93	—
690-10-OH-SB-1	189.14	1.14	1.26	1.44	1.51	—	—	—	—
690-10-OH-SB-2	196.41	0.80	0.90	1.02	1.05	—	—	—	—
690-10-SP-SB-1	182.32	1.10	1.21	1.41	1.50	—	—	—	—
690-10-SP-SB-2	197.70	1.39	1.50	1.65	1.72	1.84	1.89	91.42	—
690-10-SH-IZ-1	192.61	2.53	3.08	3.73	4.08	4.68	4.82	84.59	—
690-10-SH-IZ-2	194.92	3.36	3.82	4.37	4.50	/	5.07	88.68	—
690-10-OH-IZ-1	196.05	4.08	4.47	4.91	5.13	5.48	5.61	91.45	—
690-10-OH-IZ-2	194.86	4.23	4.81	5.52	5.90	6.50	6.70	88.12	—
690-10-SP-IZ-1	192.02	5.02	5.49	6.05	6.29	6.70	6.82	92.21	—
690-10-SP-IZ-2	196.42	3.76	4.08	4.48	4.67	5.05	5.12	91.25	—
690-10-SH-MA-1	199.12	2.10	2.23	2.38	2.46	—	—	—	240
690-10-SH-MA-2	188.31	1.31	1.43	1.61	1.71	—	—	—	190
690-10-OH-MA-1	189.05	2.11	2.32	2.59	2.74	—	—	—	243
690-10-OH-MA-2	185.05	1.26	1.41	1.60	1.67	—	—	—	210
690-10-SP-MA-1	187.97	2.73	2.90	3.15	3.34	—	—	—	243
690-10-SP-MA-2	192.33	2.44	2.63	2.89	3.06	—	—	—	223
690-10-SH-MAZ-1	192.87	4.13	4.62	5.29	5.53	/	6.36	86.95	220
690-10-SH-MAZ-2	188.98	4.45	5.13	6.01	6.36	/	7.40	85.85	220
690-10-OH-MAZ-1	188.62	4.73	5.48	6.42	6.70	/	7.70	87.05	230
690-10-OH-MAZ-2#	193.13	7.31	8.48	9.89	10.58	11.62	11.95	88.52	267
690-10-SP-MAZ-1#	195.95	7.88	8.81	9.93	10.51	11.45	11.74	89.53	260
690-10-SP-MAZ-2	194.26	4.23	4.76	5.40	5.77	6.37	6.58	87.57	210
960-10-SH-SB-1	189.53	1.26	1.39	1.57	1.68	1.89	1.98	84.57	—
960-10-OH-SB-1	199.61	1.77	1.89	2.05	2.08	2.17	2.31	90.24	—
960-10-SP-SB-1	185.36	1.73	1.85	2.00	2.08	2.24	2.31	89.74	—
960-10-SH-IZ-1	192.23	3.74	4.22	4.77	5.00	5.46	5.61	89.24	—

续表

试件编号	初始预紧力/ kN	预紧力松弛率/%						$r_{24h}/r_{100h}/\%$	涂层厚度/ μm
		r_{1h}	r_{3h}	r_{12h}	r_{24h}	r_{72h}	r_{100h}		
960-10-OH-IZ-1	190.78	3.03	3.49	4.04	4.34	4.80	4.98	87.16	—
960-10-SP-IZ-1	191.03	4.15	4.75	5.44	5.72	6.18	6.25	91.62	—
960-12-SH-GB-1	231.58	1.02	1.15	1.31	1.39	1.43	1.51	91.98	—
960-12-SH-GB-2	225.17	1.15	1.29	1.46	1.54	1.60	1.65	93.53	—
960-12-SH-SB-1	225.90	0.81	0.92	1.06	1.12	1.16	1.20	94.07	—
960-12-OH-SB-1	224.15	1.15	1.26	1.40	1.46	1.50	1.57	93.18	—
960-12-SP-SB-1	225.05	1.48	1.66	1.89	2.05	2.23	2.27	90.59	—
960-12-SH-IZ-1	233.91	2.63	3.07	3.57	3.82	4.14	4.24	90.02	—
960-12-SH-IZ-2	222.44	2.79	3.21	3.71	3.99	4.34	4.44	89.87	—
960-12-OH-IZ-1	230.60	2.54	2.92	3.37	3.62	3.90	4.01	90.16	—
960-12-OH-IZ-2	223.97	3.04	3.45	3.92	4.18	4.48	4.57	91.41	—
960-12-SP-IZ-1	223.94	4.11	4.63	5.23	5.48	5.79	5.96	92.05	—
960-12-SP-IZ-2	229.78	4.11	4.60	5.18	5.43	5.87	5.89	92.10	—
960-12-SH-MA-1	222.65	2.11	2.36	2.66	2.81	3.22	3.31	84.92	233
960-12-SH-MA-2	225.89	2.47	2.96	3.55	3.80	4.25	4.27	88.91	247
960-12-OH-MA-1	224.51	1.72	1.97	2.32	2.47	2.82	2.85	86.72	217
960-12-OH-MA-2	225.89	2.00	2.26	2.60	2.76	3.10	3.13	87.99	240
960-12-SP-MA-1	221.16	2.20	2.45	2.81	2.98	3.34	3.35	88.93	243
960-12-SP-MA-2	228.45	2.04	2.27	2.55	2.70	—	—	—	227
960-12-SH-MAZ-1	232.42	3.91	4.50	5.23	5.60	6.32	6.50	86.16	237
960-12-SH-MAZ-2	225.93	3.39	3.88	4.49	4.80	—	—	—	217
960-12-OH-MAZ-1	235.17	3.09	3.58	4.18	4.49	—	—	—	220
960-12-OH-MAZ-2	227.29	4.24	4.88	5.66	6.05	—	—	—	233
960-12-SP-MAZ-1	220.91	3.50	4.00	4.64	4.87	—	—	—	213
960-12-SP-MAZ-2	224.05	5.23	5.90	6.74	7.08	—	—	—	243

注:试件编号含义同表1;-1/-2代表重复试件;带“#”为涂层超过250 μm 的试件;“/”表示数据丢失;各试件涂层厚度为3块板件涂层厚度的平均值。

当钢材表面采用涂层处理后,高强度高强度螺栓的预紧力松弛特征主要受两方面因素的影响:(1)垫片下涂层的变形和流动会增大高强度螺栓初期预紧力损失,预紧力损失程度与涂层的类型、厚度有关;不同的涂层类型,涂层的变形和流动程度也不同;从图6可以看出,电弧热喷锌铝合金涂层的变形程度最大,其露出涂层下钢材的表面面积最多,无机富锌涂层次之,电弧热喷铝最小;涂层的厚度越大,高强度螺栓初期预紧力损失越大;(2)钢板之间涂层的蠕变也会增大高强度螺栓初期预紧力损失,且会加快高强度螺栓后期预紧力损失速度,使试件的预紧力松弛在较长时间内无法达到稳定,最终导致高强度螺栓的预紧力损失率过大。

《钢结构高强度螺栓连接技术规程》(JGJ 82—2011)^[19]中规定,施工扭矩为终拧目标扭矩标准值的1.1

倍,即高强度螺栓的预紧力损失值不宜超过目标预紧力标准值的10%。根据表2可知:仅个别电弧热喷锌铝合金试件(试件690-10-OH-MAZ-2#、690-10-SP-MAZ-1#)24h的预紧力损失率超过了10%,这可能是由于热喷涂层时涂层过厚导致的,其它试件100h的预紧力损失率均在7%以下。

3.2 孔型对预紧力松弛的影响

扩孔会降低螺栓孔周围钢板的刚度,并产生较大的局部变形^[10],导致高强度螺栓可能产生更大的预紧力松弛,将孔型影响系数定义为其它孔型预紧力剩余量与标准孔预紧力剩余量的比值,则其计算公式如下:

$$k_2 = \frac{p_{mi}}{p_{m,SH}} \quad (4)$$

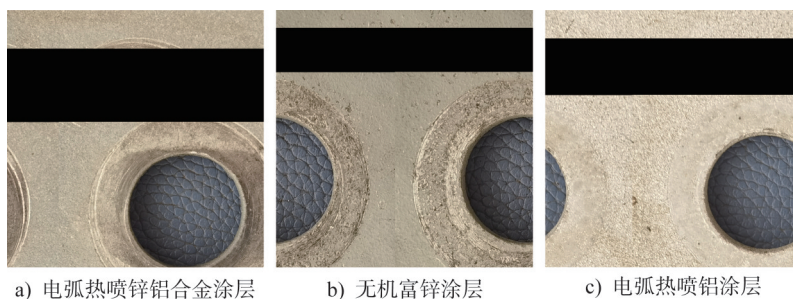


图6 试验后垫片下的涂层

Fig. 6 Coats under washer after tests

式中： k_2 为孔型影响系数； p_{mi} 为某一孔型某一时刻的预紧力剩余量； $p_{m,SH}$ 为标准孔对应时刻的预紧力剩余量。

表3中列出了各组试件的孔型影响系数，并比较了各类表面处理方式试件由24 h、100 h剩余预紧力平均

表3 试件孔型影响系数

Table 3 Influence coefficients of specimen hole type

试件编号	表面处理方式	$p_{m,24h}/\%$	$k_{2,24h}$	$p_{m,100h}/\%$	$k_{2,100h}$	误差/ $\%$
690-10-SH-SB		98.98	1.000	—	—	—
690-10-OH-SB	抛丸	98.72	0.997	—	—	—
690-10-SP-SB		98.39	0.994	—	—	—
960-10-SH-SB		98.32	1.000	98.02	1.000	—
960-10-OH-SB	抛丸	97.92	0.996	97.69	0.997	0.08
960-10-SP-SB		97.92	0.996	97.69	0.997	0.07
960-12-SH-SB		98.88	1.000	98.80	1.000	—
960-12-OH-SB	抛丸	98.54	0.997	98.43	0.996	-0.04
960-12-SP-SB		97.95	0.991	97.73	0.989	-0.15
690-10-SH-IZ		95.71	1.000	95.05	1.000	—
690-10-OH-IZ	无机富锌涂层	94.49	0.987	93.85	0.987	0.01
690-10-SP-IZ		94.52	0.988	94.03	0.989	0.17
960-10-SH-IZ		95.00	1.000	94.39	1.000	—
960-10-OH-IZ	无机富锌涂层	95.66	1.007	95.02	1.007	-0.03
960-10-SP-IZ		94.28	0.992	93.75	0.992	0.08
960-12-SH-IZ		96.10	1.000	95.66	1.000	—
960-12-OH-IZ	无机富锌涂层	96.10	1.000	95.71	1.001	0.05
960-12-SP-IZ		94.54	0.984	94.08	0.983	-0.04
690-10-SH-MA		97.92	1.000	—	—	—
690-10-OH-MA	电弧热喷铝	97.76	0.998	—	—	—
690-10-SP-MA		96.80	0.989	—	—	—
960-12-SH-MA		96.70	1.000	96.21	1.000	—
960-12-OH-MA	电弧热喷铝	97.38	1.007	97.01	1.008	0.12
960-12-SP-MA		97.16	1.005	96.65	1.005	-0.02
690-10-SH-MAZ		94.06	1.000	93.12	1.000	—
690-10-OH-MAZ	电弧热喷锌铝合金	93.30	0.992	92.30	0.991	-0.07
690-10-SP-MAZ		94.23	1.002	93.42	1.003	0.14
960-12-SH-MAZ		94.80	1.000	—	—	—
960-12-OH-MAZ	电弧热喷锌铝合金	94.73	0.999	—	—	—
960-12-SP-MAZ		94.03	0.992	—	—	—

值 $p_{m,24h}$ 、 $p_{m,100h}$ 计算得到的孔型影响系数 $k_{2,24h}$ 、 $k_{2,100h}$ ，二者相差不超过 0.4%，因此以 $k_{2,24h}$ 作为孔型系数的最终值是合理的。考虑到表面处理方式为电弧热喷锌铝合金的两个试件(分别为试件 690-10-OH-MAZ-2、690-10-SP-MAZ-1)存在涂层的情况,为消除该因素对孔型影响系数计算结果的干扰,上述两个试件不计入孔型影响系数的计算。

图 7 反映了 Q690、Q960 级高强钢试件各表面处理方式下的孔型影响系数。由图可知:部分有涂层试件中其大圆孔与长槽孔试件的孔型影响系数高于 1,分析原因如下:由抛丸处理表面试件的孔型影响系数分析结果可知,不同孔型对应的预紧力损失率差异较小,最大差值不超过 1%,因此孔型对高强度螺栓预紧力松弛的影响并不显著,这与 KULAK 等^[9]的研究结果一致。对于有涂层试件,不同涂层厚度的试件在预紧力松弛上存在差异,且同一板件的不同位置涂层厚度不同,因此这类预紧力松弛差异现象可能是由于试件涂层厚度不同、分布不均导致的。

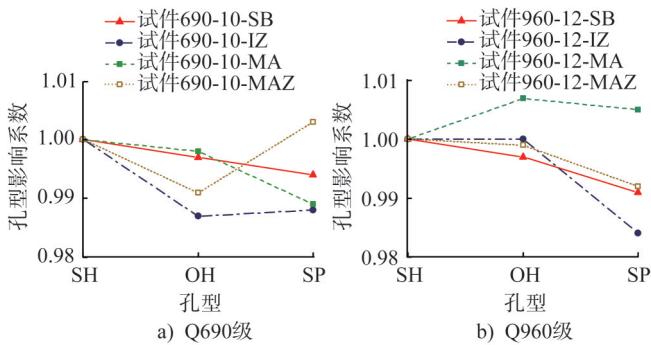


图 7 高强钢试件孔型影响系数折线
Fig. 7 High-strength steel specimen hole type influence coefficient curves

总而言之,孔型对高强钢试件预紧力松弛的影响范围在 2% 以内,长槽孔试件的孔型影响系数略低于大圆孔试件的孔型影响系数,无论采用何种孔型与表面处理方式,当连接板采用扩孔形式时,高强钢高强度螺栓摩擦型连接中高强度螺栓的预紧力松弛呈增加趋势。

3.3 钢材强度等级和螺栓等级对预紧力松弛的影响

从图 8 中可以看出:Q690 级高强钢试件的预紧力剩余量均略高于 Q960 级试件的预紧力剩余量,二者相差量为 0.7% 左右,因此钢材强度等级对高强度螺栓预紧力松弛没有显著影响。螺栓等级会影响目标预紧力水平,螺栓等级越高,目标预紧力越大。结合图 9 和表 4 可以看出:不论高强度螺栓表面是否有涂层且是何种孔型,采用更高等级的高强度螺栓有降低试件预紧力损失率的趋

势,但降低量较小,因此螺栓等级对高强度螺栓预紧力松弛的影响亦不显著,这与 AMPLEMAN 等^[14]的研究结论一致。

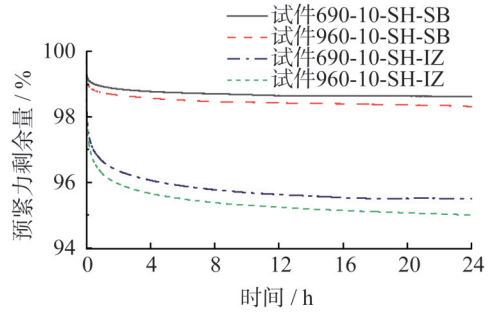


图 8 不同钢材等级的对比

Fig. 8 Comparison of different steel grades

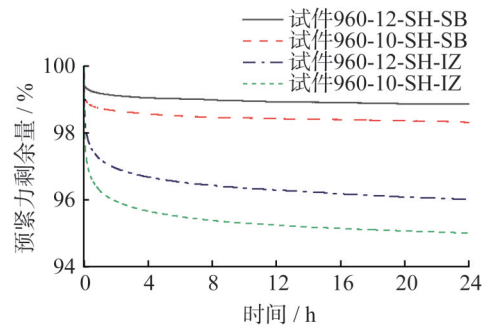


图 9 不同螺栓等级的对比

Fig. 9 Comparison of different bolt grades

表 4 不同螺栓等级下试件的预紧力松弛对比

Table 4 Comparison of preload loss rate of high-strength bolts in different grades

试件编号	表面处理方式	24 h 平均预紧力松弛率/%	相差量/%
960-10-SH-SB	抛丸	1.68	0.62
960-12-SH-SB		1.06	
960-10-OH-SB		2.08	
960-12-OH-SB		1.40	
960-10-SP-SB	无机富锌涂层	2.08	0.19
960-12-SP-SB		1.89	
960-10-SH-IZ		4.77	0.86
960-12-SH-IZ		3.90	
960-10-OH-IZ	无机富锌涂层	4.04	0.14
960-12-OH-IZ		3.90	
960-10-SP-IZ	无机富锌涂层	5.72	0.26
960-12-SP-IZ		5.46	

3.4 螺栓预紧力松弛的机理分析

本试验中螺栓预紧力松弛的原因主要有 3 个:(1) 螺

栓的塑性变形和蠕变;(2) 垫片下连接板的塑性变形和蠕变^[9]; (3) 涂层的塑性流动和蠕变。LIN等^[26]发现当螺栓的平均应力达到0.7倍屈服强度时,部分螺纹处应力会超过屈服强度,从而产生塑性变形和蠕变;在预紧力作用下,垫片下的涂层和连接板处于较高应力状态,也会出现塑性变形和蠕变,引起预紧力损失。

从图5可知,高强度螺栓的预紧力松弛可分为两个阶段。第一个阶段为初期预紧力松弛,该阶段预紧力松弛速率极快、松弛量大,但持续时间较短,其与各部件的塑性变形和瞬态蠕变相关。第二个阶段为长期预紧力松弛,该阶段预紧力松弛速率逐渐稳定、松弛量较小,但是持续时间长,其与各部件的稳态蠕变相关^[9,17]。抛丸和喷砂试件的试验结果表明,螺纹和连接板的塑性变形和瞬态蠕变对预紧力松弛的影响程度较大,而其长期的稳态蠕变对预紧力松弛影响程度较小。涂层试件的试验结果表明,涂层的塑性流动、瞬态蠕变和稳态蠕变对预紧力松弛均有较大的影响。

3.5 长期预紧力松弛的预测

高强度螺栓的预紧力松弛是一个长期过程,这个过程可能会在使用年限期间一直持续^[18],因此需要对高强度螺栓在设计使用年限内的预紧力松弛进行预测。

AFZALI等^[17]的研究表明,不锈钢螺栓组件的长期预紧力损失主要与不锈钢的稳态蠕变相关。不锈钢室温下的蠕变规律可以用对数曲线来描述,因此对数函数可以较好地拟合不锈钢螺栓组件长期的预紧力损失情况。D'ANTIMO等^[27]研究了由不锈钢和带有特殊涂层的摩擦垫组合而成的螺栓组件,对其螺栓预紧力进行了长达5个月的监测,并用对数函数拟合预测50年后的预紧力松弛。研究发现利用前12 h和利用前4个月的数据进行拟合得到的结果基本相同,利用短期试验数据拟合的结果有一定的可靠性。HEISTERMANN等^[28]的试验结果表

明,带有富锌涂层的低碳钢-高强螺栓组件的长期预紧力损失也可以用对数函数进行拟合。国内学者^[29]对高强度钢室温下的蠕变特性进行了研究,发现高强度钢的蠕变曲线符合对数规律,因此本文采用对数函数尝试描述高强度钢高强度螺栓连接的长期预紧力损失。考虑到初期几秒内预紧力松弛与时间的对数成非线性关系,且不是关注的重点,因此利用终拧后10 s~24 h的数据进行拟合,拟合形式见式(5):

$$r = a \times \log_{10}(t) + b \quad (5)$$

式中: a 、 b 为待确定的系数; t 为终拧后经历的时间,单位为s。

通过24 h测得的数据对不同表面试件未来50年的预紧力松弛率进行拟合预测,每类表面处理采用预紧力松弛率最大的标准孔试件,拟合曲线见图10,数据结果见表5。需要指出的是采用24 h内的预紧力松弛数据来预测50年后的松弛率,有一定的不确定性。另外,本文试验在干燥、通风、室温环境下进行,也未考虑温度、环境腐蚀对钢材性能的影响,需要通过更长时间的试验数据或改进的预测模型来进一步验证其合理性和可靠性。

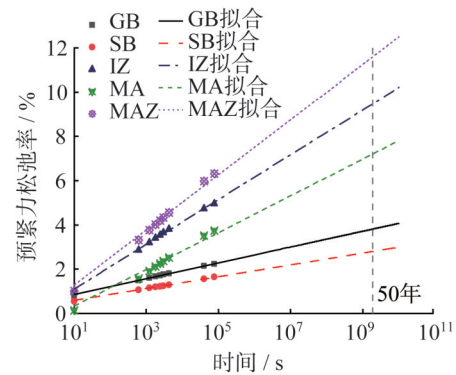


图10 高强度螺栓预紧力松弛的预测曲线

Fig. 10 Prediction curves of preload loss rate in high-strength bolts

表5 高强度螺栓预紧力松弛的预测结果及验证

Table. 5 Prediction and verification of preload loss for high-strength bolts

表面处理方式	高强度螺栓预紧力松弛拟合公式	R^2	预紧力松弛率/%			
			100 h 预测值	100 h 实测值	误差	50年 预测值
喷砂	$r=0.003\ 56 \cdot \log_{10}(t) + 0.005\ 1$	0.999	—	—	—	3.78
抛丸	$r=0.002\ 67 \cdot \log_{10}(t) + 0.003\ 25$	0.995	1.81	1.98	8.66	2.78(3.19)
无机富锌涂层	$r=0.010\ 12 \cdot \log_{10}(t) + 0.000\ 894$	0.997	5.71	5.61	-1.82	9.40(9.20)
电弧热喷铝涂层	$r=0.010\ 42 \cdot \log_{10}(t) - 0.012\ 8$	0.998	4.51	4.27	5.61	8.30(7.90)
电弧热喷铝锌合金涂层	$r=0.014\ 31 \cdot \log_{10}(t) - 0.006\ 43$	1.000	7.31	6.50	-12.43	12.52(12.42)

注: r 为高强度螺栓的预测预紧力松弛率; t 为时间,单位为s; R^2 为模型的决定系数;括号内为利用100 h监测数据拟合得到的50年预测值。

各表面处理方式下的高强度螺栓预紧力松弛拟合曲线的 R^2 最低为0.995,说明拟合情况良好。拟合结果与100 h监测数据进行对比,除喷砂试件外,其他表面处理的试件100 h预紧力松弛的预测值和实测值的误差在12.43%以内,实际相差量不超过1%,即2.25 kN以内。利用24 h监测数据拟合得到的50年预测值与利用100 h监测数据拟合得到的预测值相差量不超过0.40%,二者相差并不显著,因此利用24 h监测数据进行拟合是合理的。各表面处理下的高强度螺栓在50年的预紧力松弛率:喷砂为3.78%,抛丸为2.78%,无机富锌涂层为9.40%,电弧热喷铝涂层为8.30%,电弧热喷锌铝合金为12.52%。除电弧热喷锌铝合金涂层,其他表面处理方式下的高强度螺栓预紧力松弛均满足规范要求。

4 结论

本文进行了55组高强度螺栓预紧力松弛试验,得到了终拧后24 h~100 h的预紧力松弛率,研究了钢材强度等级、螺栓等级、孔型和表面处理方式对高强度螺栓预紧力松弛的影响。利用试验数据对预紧力松弛曲线进行了拟合和验证,并预测了50年后的高强度螺栓松弛率,主要结论总结如下:

(1) 抛丸和喷砂处理后高强度螺栓摩擦型连接的预紧力松弛差异不显著,100 h内的最大预紧力松弛率均不超过2%。各涂层标准孔试件100 h的最大预紧力松弛率分别为:无机富锌涂层5.61%、电弧热喷铝涂层4.27%、电弧热喷锌铝合金涂层6.5%;

(2) 涂层的类型和厚度的差异是影响预紧力松弛的主要因素,含锌涂层的预紧力松弛率较高,电弧热喷铝涂层的预紧力松弛率较低;涂层厚度越大,预紧力松弛率越高,当涂层过厚时高强度螺栓预紧力松弛率可达10%以上;

(3) 在连接板上扩孔会有增加高强度螺栓预紧力松弛的趋势,长槽孔对高强度螺栓预紧力松弛的影响略高于大圆孔,但相比于涂层,孔型对高强度螺栓预紧力松弛的影响较小;

(4) 螺栓等级和钢材强度等级对高强度螺栓预紧力松弛影响不显著;

(5) 利用24 h监测数据对50年后高强度螺栓预紧力进行预测,无涂层表面下高强度螺栓的预紧力松弛率不超过3.8%,涂层表面下高强度螺栓的预紧力松弛率分别达到了9.40%、8.30%和12.52%,除电弧热喷锌铝合金涂层,其他表面处理方式下的高强度螺栓预紧力松弛率均在10%以下。

参考文献:

[1] 施刚,班慧勇,石永久,等.高强度钢材钢结构研究进展综

述[C]//第21届全国结构工程学术会议论文集.北京:《工程力学》杂志社,2012:50-59.

SHI Gang, BAN Huiyong, SHI Yongjiu, et al. Overview of research progress for high strength steel structures [C]// Proceedings of the 21st National Conference on Structural Engineering. Beijing: Engineering Mechanics Magazine, 2012: 50-59. (in Chinese)

[2] CRUZ A, SIMÕES R, ALVES R. Slip factor in slip resistant joints with high strength steel [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2012, 70: 280-288. DOI: 10.1016/j.jcsr.2011.11.001.

[3] 王彦博,陈坤,李国强.超500 MPa级高强度钢抛丸及抛丸后生赤锈表面抗滑移系数试验研究[J].建筑结构学报,2018,39(7):162-168. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2018.07.019.

WANG Yanbo, CHEN Kun, LI Guoqiang. Experimental investigation of slip factors of grit-blasted surface and rusted surface after blasting for high strength steel over 500 MPa grade [J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(7): 162-168. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2018.07.019. (in Chinese)

[4] WANG Y B, WANG Y Z, CHEN K, et al. Slip factor between shot blasted mild steel and high strength steel surfaces [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2020, 168: 105969. DOI: 10.1016/j.jcsr.2020.105969.

[5] WANG Y B, WANG Y Z, CHEN K, et al. Slip factor of high strength steel with inorganic zinc-rich coating [J]. Thin-Walled Structures, 2020, 148: 106595. DOI: 10.1016/j.tws.2019.106595.

[6] 李友志,季小莲,吴耀华.高强度结构钢高强度螺栓摩擦型连接节点试验研究[J].建筑结构,2015,45(21):21-24. DOI: 10.19701/j.jzjg.2015.21.004.

LI Youzhi, JI Xiaolian, WU Yaohua. Experimental study on high strength bolts slip-critical connection for high strength steel [J]. Building Structure, 2015, 45(21): 21-24. DOI: 10.19701/j.jzjg.2015.21.004. (in Chinese)

[7] 陈学森,施刚,陈玉峰.高强度螺栓连接电弧热喷铝接触面抗滑移系数试验研究[J].建筑结构,2021,51(13):87-92. DOI: 10.19701/j.jzjg.2021.13.013.

CHEN Xuesen, SHI Gang, CHEN Yufeng. Experiment study on slip coefficient of high strength steel bolt connection arc thermal spraying aluminum contact surface [J]. Building Structure, 2021, 51(13): 87-92. DOI: 10.19701/j.jzjg.2021.13.013. (in Chinese)

[8] 曹鑫.高强度钢配套高强度螺栓摩擦型抗剪连接受力性能研究[D].重庆:重庆大学,2022.

CAO Xin. Study on the mechanical behavior of high strength steel slip critical and bolted connection [D]. Chongqing: Chongqing University, 2022. (in Chinese)

[9] KULAK G L, FISHER J W, STRUIK J H A. Guide to design criteria for bolted and riveted joints [M]. 2nd ed. Chicago: American Institute of Steel Construction, 2001.

[10] HEISTERMANN C, VELJKOVIC M, SIMÕES R, et al.

- Design of slip resistant lap joints with long open slotted holes[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2013, 82: 223-233. DOI:10.1016/j.jcsr.2012.11.012.
- [11] 彭铁红,侯兆欣,文双玲,等.螺栓孔径与孔型对高强度螺栓摩擦型连接承载能力影响的试验[J]. *钢结构*, 2007, 22(7): 30-34. DOI:10.3969/j.issn.1007-9963.2007.08.010.
PENG Tiehong, HOU Zhaoxin, WEN Shuangling, et al. Experiment of effects of hole diameter and hole type on bearing capacity of high strength bolt frictional joints[J]. *Steel Construction*, 2007, 22(7): 30-34. DOI:10.3969/j.issn.1007-9963.2007.08.010. (in Chinese)
- [12] 石永久,施刚,王元清,等.高强度螺栓应变松弛的长时间试验监测[J]. *施工技术*, 2004, 33(11): 11-13. DOI:10.3969/j.issn.1002-8498.2004.11.005.
SHI Yongjiu, SHI Gang, WANG Yuanqing, et al. Long-time monitoring on strain relaxation of high strength bolts in end-plate connections[J]. *Construction Technology*, 2004, 33(11): 11-13. DOI: 10.3969/j.issn.1002-8498.2004.11.005. (in Chinese)
- [13] EBERT A, GLIENKE R, DÖRRE M. Ultra-long-term slip-resistance and comments to the test procedure determining the slip factor[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2019, 161: 171-186. DOI:10.1016/j.jcsr.2019.06.013.
- [14] AMPLEMAN M, ANNAN C D, FAFARD M, et al. The effect of relaxation on the slip resistance of metallized faying surfaces in slip-critical connections [C]// *Proceedings of 5th International Structural Specialty Conference*, Canadian Society for Civil Engineering. London: The University of Hong Kong, 2016.
- [15] NAH H S, LEE H J, KIM K S, et al. Evaluating relaxation of high-strength bolts by parameters on slip faying surfaces of bolted connections [J]. *International Journal of Steel Structures*, 2010, 10(3): 295-303. DOI:10.1007/BF03215838.
- [16] 施刚,金建钢,傅爱华. 钢结构大六角头高强度螺栓应变松弛分析[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2010, 50(3): 342-345. DOI:10.16511/j.cnki.qhdxxb.2010.03.024.
SHI Gang, JIN Jianguang, FU Aihua. Strain relaxation analysis of steel-structure heavy-hex high strength bolts[J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2010, 50(3): 342-345. DOI: 10.16511/j.cnki.qhdxxb.2010.03.024. (in Chinese)
- [17] AFZALI N, PILHAGEN J, MANNINEN T, et al. Preload losses in stainless steel bolting assemblies[J]. *Steel Construction*, 2017, 10(4): 310-318. DOI:10.1002/stco.201710041.
- [18] D'ANTIMO M, LATOUR M, CAVALLARO G F, et al. Short-and long-term loss of preloading in slotted bolted connections [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2020, 167: 105956. DOI:10.1016/j.jcsr.2020.105956.
- [19] JGJ 82—2011 钢结构高强度螺栓连接技术规程[S].
JGJ 82—2011 Technical specification for high strength bolt connections of steel structures[S]. (in Chinese)
- [20] GB/T 8923.1—2011 涂覆涂料前钢材表面处理 表面清洁度的目视评定 第1部分:未涂覆过的钢材表面和全面清除原有涂层后的钢材表面的锈蚀等级和处理等级[S].
GB/T 8923.1—2011 Preparation of steel substrates before application of paints and related products—visual assessment of surface cleanliness: part 1: rust grades and preparation grades of uncoated steel substrates and of steel substrates after overall removal of previous coatings[S]. (in Chinese)
- [21] TB/T 1527—2011 铁路钢桥保护涂装及涂料供货技术条件[S].
TB/T 1527—2011 The protection coating anti-corrosion and specification for the supply of paints for railway steel bridge[S]. (in Chinese)
- [22] GB/T 9793—2012 热喷涂 金属和其他无机覆盖层 锌、铝及其合金[S].
GB/T 9793—2012 Thermal spraying - metallic and other inorganic coatings-zinc, aluminium and their alloys [S]. (in Chinese)
- [23] GB 50017—2017 钢结构设计标准[S].
GB 50017—2017 Standard for design of steel structures[S]. (in Chinese)
- [24] GB/T 3098.1—2010 紧固件机械性能 螺栓、螺钉和螺柱[S].
GB/T 3098.1—2010 Mechanical properties of fasteners—bolts, screws and studs[S]. (in Chinese)
- [25] GB 50205—2020 钢结构工程施工质量验收标准[S].
GB 50205—2020 Standard for acceptance of construction quality of steel structures[S]. (in Chinese)
- [26] LIN L, ZHAO S L, ZHENG T S, et al. Fatigue assessment for tower bolts of floating offshore wind turbine considering preload loss due to ambient temperature creep [J]. *Ocean Engineering*, 2024, 313: 119527. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2024.119527.
- [27] D'ANTIMO M, DEMONCEAU J F, LATOUR M, et al. 03.11: Experimental investigation of the creep effect on prestressed bolts used in innovative friction connections[J]. *Ce/papers*, 2017, 1(2-3): 580-589. DOI:10.1002/cepa.95.
- [28] HEISTERMANN C. Behaviour of pretensioned bolts in friction connections: towards the use of higher strength steels in wind towers[D]. Luleå: Luleå University of Technology, 2011.
- [29] 郭森,丁新民,宁艳亭,等.一种具有极高屈服比的高强钢的室温蠕变特性[J]. *金属热处理*, 2020, 45(3): 25-29. DOI:10.13251/j.issn.0254-6051.2020.03.006.
GUO Miao, DING Xinmin, NING Yanting, et al. Room temperature creep characteristics of a high strength steel with extremely high yield ratio [J]. *Heat Treatment of Metals*, 2020, 45(3): 25-29. DOI:10.13251/j.issn.0254-6051.2020.03.006. (in Chinese)