

引用格式:段雨童,张健,雷宏刚.满预拉力下M24高强度螺栓常幅疲劳性能试验研究[J].工业建筑,2025,55(4):30-35. DUAN Yutong, ZHANG Jian, LEI Honggang. Experimental Research on Fatigue Performance of M24 High-Strength Bolts Under Full Pretension[J]. Industrial Construction, 2025, 55(4): 30-35 (in Chinese). DOI: 10. 3724/j. gyjzG22031704

满预拉力下 M24 高强度螺栓常幅疲劳性能试验研究^{*}

段雨童 张 健 雷宏刚

(太原理工大学土木工程学院, 太原 030024)

摘 要 装配式建筑中高强度螺栓因其施工便捷、力学性能优异等特点成为主要连接方式。为研究预拉力对钢结构用高强度螺栓疲劳性能及破坏机理的影响,借助 MTS Landmark370. 50 伺服液压疲劳试验机进行疲劳试验,得到了 25 个 M24 高强度螺栓轴拉常幅疲劳试验数据,并对疲劳断口进行电镜扫描分析。结果表明:满预拉力作用下螺栓基本断裂于螺杆与螺母咬合处的螺纹牙底,与无预拉力高强度螺栓疲劳断口相比,预拉力作用下螺栓疲劳断口瞬断区面积占比相对偏大,疲劳源相对单一,瞬断区韧窝密集但相对偏小。揭示了预拉力作用下螺栓疲劳破坏机理,并建立了 M24 高强度螺栓疲劳设计方法。

关键词 装配式建筑;高强度螺栓;轴拉疲劳;断口分析;满预拉力

Experimental Research on Fatigue Performance of M24 High-Strength Bolts Under Full Pretension

DUAN Yutong ZHANG Jian LEI Honggang

(School of Civil Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: High-strength bolts in prefabricated buildings have become the main connection method due to their convenient construction and excellent mechanical properties. In order to study the influence of pre-tension on the fatigue performance and fatigue failure mechanism of high strength bolts for steel structure, the fatigue test was carried out by MTS Landmark370. 50 servo hydraulic fatigue testing machine. The constant amplitude fatigue test data of 25 M24 high strength bolts were obtained, and the fatigue fracture was analyzed by scanning electron microscopy. The results showed that the bolt basically breaks at the bottom of the thread at the bite of the screw and nut under full pre-tension. Compared with the fatigue fracture of high strength bolt without pre-tension, the proportion of the instantaneous fracture area of the fatigue fracture under pre-tension was relatively large, the fatigue source was relatively single, and the dimples in the instantaneous fracture area were dense but relatively small. The fatigue failure mechanism of bolt under pre-tension was revealed, and the fatigue design method of M24 high strength bolt was established.

Keywords: prefabricated building; high strength bolt; axial tension fatigue; fracture analysis; full pre-tension

^{*} 国家自然科学基金项目(51578357)。

第一作者:段雨童,博士研究生,主要从事钢结构疲劳与鉴定加固领域的研究,dytong163@163.com。

通信作者:雷宏刚,博士,教授,博士生导师,主要从事钢结构与空间结构领域的研究,lhgang168@126.com。

收稿日期:2022-03-17

0 引言

高强度螺栓作为装配式钢结构中主要连接形式,具有安装便利、受力可靠、整体性好且不易松动等优点^[1]。针对高强度螺栓疲劳性能的研究,Yang等^[2]对 18 个 M20 高强度螺栓进行常幅疲劳试验及有限元分析,提出了网格结构用高强度螺栓疲劳设计方法;闫亚杰等^[3]进行了 M20、M30 两种规格共计 32 个高强度螺栓的常幅疲劳试验,得出 $S-N$ 曲线以及疲劳计算方法。雷宏刚^[4]通过理论和试验研究系统总结了网格结构常用高强度螺栓通用 $S-N$ 曲线,首次提出高强度螺栓应力集中及疲劳缺口系数计算式。欧阳卿^[5]以虚功原理推导出高强度螺栓预拉力模拟方法,认为 GB 50017—2003《钢结构设计规范》^[6]中高强度螺栓设计值安全储备较高,并利用断裂力学估算不同长度初始裂纹下的高强度螺栓疲劳寿命。焦晋峰等^[7]以端板连接形式的高强度螺栓为对象,对比分析临界应力比下 8.8 级 M24 高强螺栓常幅疲劳试验结果与 GB 50017—2017《钢结构设计标准》^[8]计算结果,研究表明, 2×10^6 循环次数下试件疲劳强度为规范值的 1.35 倍。Noda 等^[9]研究了 3 种螺距差对不同应力幅下 M16 螺栓疲劳性能的影响,结果表明螺纹与螺母接触长度为 8.8 mm 时既能提高螺栓疲劳寿命又能满足螺栓紧固要求。Qiu 等^[10]针对材质为 40Cr 的 M30 高强度螺栓进行常幅疲劳试验,通过有限元分析探讨拉伸状态下 M30 螺栓应力状态和疲劳破坏位置,并基于损伤理论揭示了高周疲劳损伤发展过程。Mario 等^[11]基于欧洲常用的不同破坏模式下的梁柱连接用高强度螺栓进行常幅和变幅疲劳试验,结果表明:螺栓连接设计应考虑螺栓类型以达到设计目标。现有高强度螺栓疲劳性能的研究中大多集中在网架结构用高强

度螺栓,而 GB 50017—2017 中对非网格结构用高强度螺栓的规定要求与网架结构用高强度螺栓不尽相同,且网架结构用高强度螺栓中不存在预拉力作用。研究表明^[12-15],高强度螺栓抗拉承载力取决于预拉力的大小,且螺栓假拧也会大幅降低螺栓疲劳寿命。雷宏刚等^[16]从螺栓材料、加工制作及工作应力等方面系统分析了高强度螺栓疲劳因素和影响程度,认为过大或过小的预应力均会降低疲劳寿命。阳荣昌^[17]对不同预拉力下高强螺栓疲劳损伤进行计算,得出预拉力较小时疲劳损伤对预拉力变化敏感性极大。Yang 等^[18]对螺栓松动与疲劳组合作用下失效模式进行试验研究,结果表明:预拉力不足会导致螺栓松动而降低疲劳寿命,预拉力过大引起锚杆塑性变形而降低疲劳强度,随着预拉力增大,疲劳寿命呈先增大后减小的趋势。本文将对满预拉力作用下钢结构用 M24 扭剪型高强度螺栓常幅疲劳性能展开试验研究,揭示疲劳破坏机理,建立 $S-N$ 曲线及疲劳设计方法,为装配式钢结构中高强度螺栓疲劳设计方法提供参考。

1 试验概况

1.1 试件设计

1) 高强度螺栓。试验采用材质为 ML20MnTiB 的 10.9 级 M24 扭剪型高强度螺栓,材料性能满足 GB/T 228.1—2021《金属材料 拉伸试验 第 1 部分:室温试验方法》^[19]要求,并在试验前对各组试件螺纹进行外观普查,确保螺纹无破损现象。依据 GB/T 228.1—2021,在试验材料中随机选取 3 个试验用高强度螺栓进行静力拉伸试验,结果见表 1,其力学性能满足 GB/T 3632—2008《钢结构用扭剪型高强度螺栓连接副》^[20]的要求。

表 1 M24 高强度螺栓材料性能
Table 1 Test material properties of M24 high-strength bolts

试件编号	强度/MPa				弹性模量/GPa		伸长率 δ /%	收缩率 $\bar{\psi}$ /%
	$\sigma_{0.2}$	$\bar{\sigma}_{0.2}$	σ_b	$\bar{\sigma}_b$	E	$\bar{E}$		
M24-1	1008.4		1084.4		208.9			
M24-2	1040	1029	1117.8	1106.5	209.1	207.9	13.4	42.3
M24-3	1038.6		1117.2		205.6			

$\sigma_{0.2}$ 、 σ_b 分别为屈服强度和极限抗拉强度实测值; $\bar{\sigma}_{0.2}$ 、 $\bar{\sigma}_b$ 分别为屈服强度和极限抗拉强度平均值; δ 、 $\bar{\psi}$ 分别为实测伸长率、收缩率平均值。

2) 试验夹具及应变片。本试验自行设计了用于高强度螺栓受拉连接的试验夹具:由相互垂直的两块钢板焊接而成,同时在竖向钢板两侧各增设两块与夹具均垂直的加劲板,构造尺寸如图 1 所示。

夹具材质选用 Q355B,板件连接均为坡口焊,为保证连接件有足够的静力与疲劳强度,夹具板厚均为 30 mm。采用电动扳手施加预拉力至预期值,同时在螺杆两侧与夹具两翼缘板贴合处对称粘贴应变

片,用来采集试验中螺杆处应变(图2)。

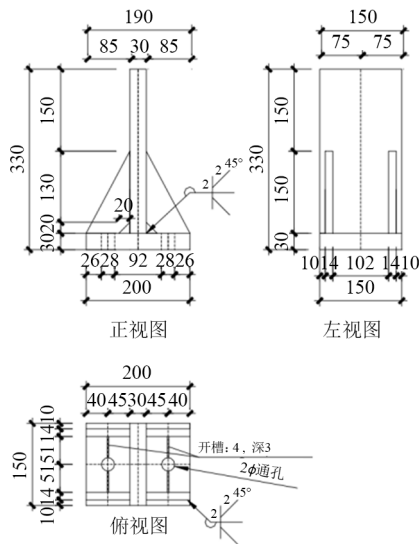


图1 试验夹具 mm
Fig. 1 Test fixture

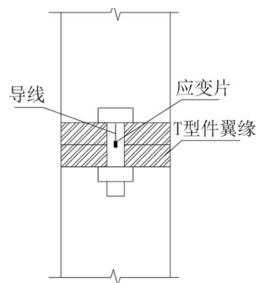


图2 应变片位置示意
Fig. 2 Schematic diagram of the location of strain gauges

1.2 试验方案

本试验在太原理工大学结构实验室完成,加载

装置为 MTS Landmark370. 50 伺服液压疲劳试验机 (简称 MTS), 试验频率 2~7 Hz, 应力比为 0. 6, 由 GB 50017—2017 中表 11. 4. 2-2 可知, 本试验所用高强度螺栓的预拉力设计值为 225 kN (图 3)。试验采用力控制加载, 加载波形为等幅正弦波, 试验加载等级详见表 2。采用自行设计的试验夹具每次试验得到 2 个高强度螺栓疲劳试验数据, 当螺栓断裂时, 加载停止并自动卸载, 检查试样及设备状况并记录循环次数。

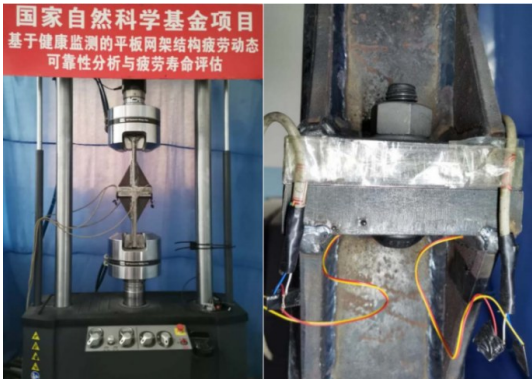


图3 试验加载装置
Fig. 3 Test loading device

2 试验结果分析

本次试验共得到 25 个常幅疲劳试验数据, 试验结果中有 2 个试件循环次数超过 5×10^6 , 且仍未破坏; 3 个试件发生预应力松弛, 循环次数明显降低。去掉上述 5 个数据对剩余 20 个有效试验数据进行回归分析得出以应力幅为参量的 M24 高强度螺栓

表2 M24高强度螺栓轴拉疲劳试验加载等级及有效试验结果
Table 2 Loading grades and effective test results of high-strength bolts in axial tension fatigue test

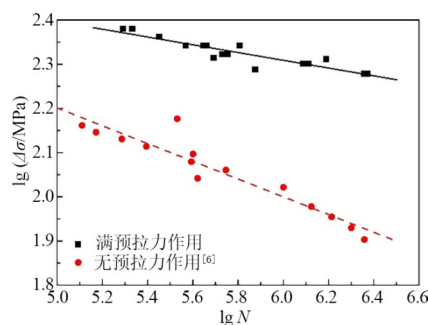
序号	加载应力/MPa		应力幅 $\Delta\sigma$ /MPa	循环次数 $N/10^4$ 次	序号	加载应力/MPa		应力幅 $\Delta\sigma$ /MPa	循环次数 $N/10^4$ 次
	σ_{max}	σ_{min}				σ_{max}	σ_{min}		
M24-1	400	240	160	510.001	M24-14	550	330	220	20.568
M24-2	400	240	160	510.001	M24-15	550	330	220	19.633
M24-3	475	285	190	227.348	M24-16	550	330	220	37.024
M24-4	475	285	190	235.228	M24-17	550	330	220	45.727
M24-5	485	291	194	75.138	M24-18	550	330	220	45.727
M24-6	500	300	200	122.139	M24-19	550	330	220	64.228
M24-7	500	300	200	129.840	M24-20	550	330	220	64.228
M24-8	512.5	307.5	205	154.663	M24-21	550	330	220	44.144
M24-9	515	309	206	49.219	M24-22	575	345	230	28.242
M24-10	515	309	206	49.219	M24-23	575	345	230	28.242
M24-11	525	315	210	53.594	M24-24	600	360	240	19.519
M24-12	525	315	210	56.735	M24-25	600	360	240	21.478
M24-13	550	330	220	15.356					

常幅 $S-N$ 曲线方程及乘幂回归曲线, 如式(1)、图 4 所示。

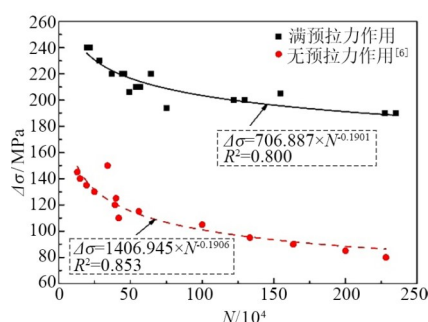
$$\lg N = 27.070 - 9.145 \lg(\Delta\sigma) \pm 0.275 \quad (1)$$

$$R^2 = 0.896$$

式中: $\Delta\sigma$ 为加载应力幅; N 为应力循环次数。



(a) 双对数 $S-N$ 曲线



(b) 乘幂 $S-N$ 曲线

图 4 试验拟合结果

Fig. 4 Fitting result of the test

3 断口分析

试验中所有试件破坏均发生在高强度螺栓螺杆处, 试验夹具的疲劳强度满足试验需求。本次试验疲劳破坏模式可分为 3 种: 1) 螺栓断裂, 断口起源于螺杆与螺母咬合处螺纹牙底, 此类破坏试件共有 21 个; 2) 螺栓断裂, 断口起源于螺母外的螺纹牙底处, 此类破坏试件仅有 1 个; 3) 螺栓未断, 但出现肉眼可见的疲劳裂缝, 此类破坏试件有 3 个, 详见图 5。

对试验所得常幅疲劳断口进行分析可知: 在相同应力幅下, 试件 M24-13~15 的疲劳寿命明显低于试件 M16~M21, 原因在于试验经历了加载—停机—再加载的过程, 但二次加载前未对螺栓进行拧紧, 可能发生预应力松弛从而导致疲劳寿命偏低, 且 M24-13 破坏模式为第 2 种, 其余试件破坏模式为第 1 种。如图 6 所示, 在相同应力幅作用下, 发生预应力松弛的断口相邻疲劳条带间距大于其他试件, 加快其裂纹扩展速率亦降低疲劳

寿命。

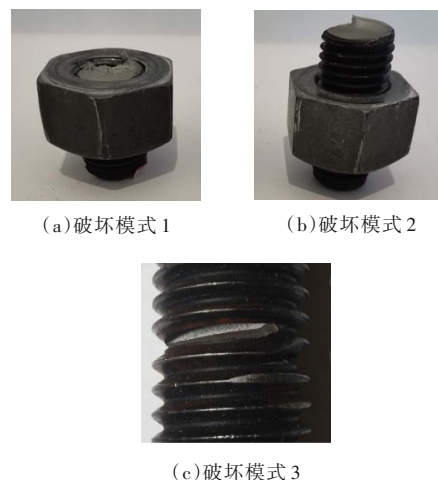
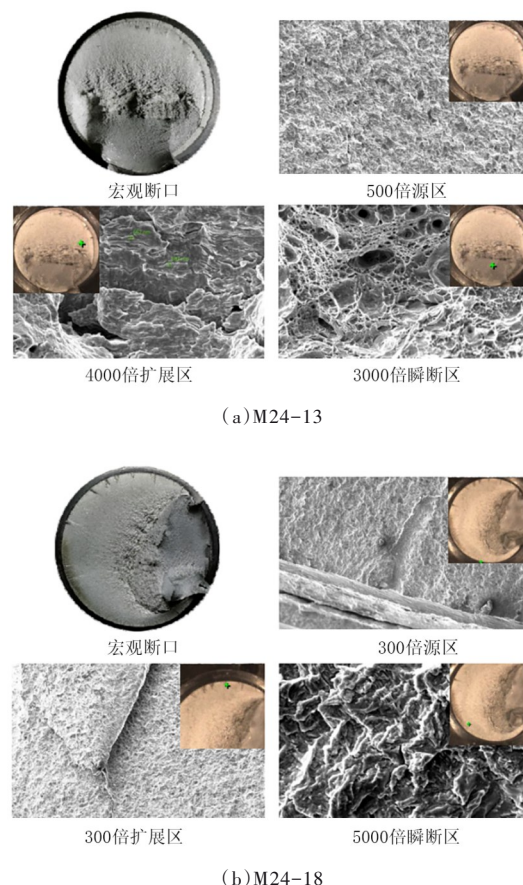


图 5 本试验高强度螺栓破坏模式

Fig. 5 Failure mode of high-strength bolts in this test

对最大和最小应力幅下 M24-4($\Delta\sigma = 190$ MPa)、M24-24($\Delta\sigma = 240$ MPa)试件断口对比(图 7)观察



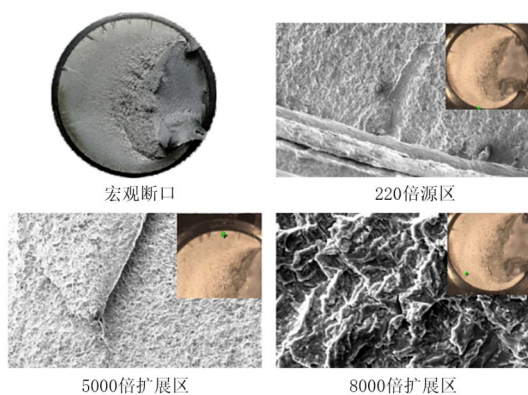
(b) M24-18

图 6 $\Delta\sigma = 220$ MPa 时不同破坏模式下试件宏观和微观断口

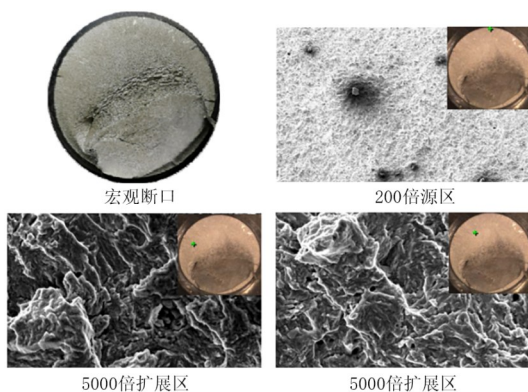
Fig. 6 Macro and micro fractures in different failure modes ($\Delta\sigma = 220$ MPa)

可知:宏观上随着应力幅减小,断口扩展区面积增大,相反其瞬断区面积增大;微观上相邻疲劳辉纹间距有随应力幅增大而增大的趋势。

满预拉力高强度螺栓疲劳断口与无预拉力的相比,宏观上看,在单一疲劳源情况下,疲劳源区和瞬断区在断口径向相反部位,瞬断区面积与加载应力大小成正比;存在多个疲劳源时,断口上会形成疲劳台阶,依据疲劳源到疲劳台阶的距离可判定其萌生顺序。微观上看,疲劳源多萌生于有初始缺陷部位,瞬断区存在大量具有塑性断裂特征的韧窝。两者不同之处在于:宏观上预拉力作用下断口瞬断区面积占比相对偏大,疲劳源相对单一;微观上瞬断区韧窝密集但相对偏小。



(a) M24-4 ($\Delta\sigma = 190 \text{ MPa}$, $N = 235.228 \times 10^4$ 次)



(b) M24-24 ($\Delta\sigma = 240 \text{ MPa}$, $N = 19.519 \times 10^4$ 次)

图7 最大、最小应力幅下试件宏观和微观断口

Fig. 7 Macro and micro fractures under maximum and minimum stress amplitude

4 常幅疲劳设计方法的建立

采用容许应力法建立 M24 高强度螺栓的常幅疲劳设计方法。以名义应力幅为参量的疲劳计算公式为:

$$\Delta\sigma < [\Delta\sigma] = \left(\frac{C}{N}\right)^{1/\beta} \quad (2)$$

依据式(1)计算可得以 2×10^6 为基准期的 $[\Delta\sigma]_{2 \times 10^6} = 174.18 \text{ MPa}$, 取为 170 MPa ; C, β 为相关参数, 依据式(1)分别取为 $1.718 \times 10^{24}, 7.936$ 。文献[21]中装配式钢结构用 M24 常幅疲劳设计方法得出 $[\Delta\sigma] = 105.07 \text{ MPa}$, 低于预拉力作用下疲劳强度。

5 结论

通过对 25 个带预拉力高强度螺栓常幅疲劳试验, 得出以下结论:

1) 同现有研究成果相比, 预拉力作用可提高 M24 高强度螺栓疲劳强度。按照允许应力幅法建立了满预拉力下 M24 高强度螺栓常幅疲劳设计方法, 以 $N = 2 \times 10^6$ 为基准期的 $[\Delta\sigma] = 174 \text{ MPa}$, $C = 1.718 \times 10^{24}, \beta = 7.936$ 。

2) 装配式钢结构用 M24 高强度螺栓轴拉疲劳破坏模式主要有 3 类, 一类是螺栓断裂于螺杆与螺母咬合处的螺纹牙底, 一类是螺栓断裂于螺母外螺纹牙底, 一类是螺栓仅出现明显疲劳裂缝而未断裂。第一类破坏模式占试验总量的 85%。所有试件断口都呈现出明显的疲劳破坏特征, 且疲劳源大多萌生在有初始缺陷部位, 瞬断区存在大量塑性断裂韧窝。

装配式钢结构是今后发展的主流, M24 作为最常用的高强度螺栓型号之一, 建立其预拉力作用下的疲劳设计方法将对国家相关规范的修订及推广应用提供重要的参考依据。

参考文献

- [1] 周燕, 雷宏刚, 李铁英. 摩擦型高强度螺栓抗剪连接研究进展及评述[J]. 建筑结构, 2019, 49(14): 62-68.
- [2] YANG X, LEI H G, CHEN Y F. Constant amplitude fatigue test research on M20 high-strength bolts in grid structure with bolt-sphere joints[J]. Advances in Structural Engineering, 2017, 20(10): 1466-1475.
- [3] 闫亚杰, 雷宏刚, 焦晋峰, 等. 螺栓球节点网架结构中高强度螺栓常幅疲劳计算方法的建立[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(增刊1): 92-97.
- [4] 雷宏刚. 螺栓球节点网架结构高强螺栓连接疲劳性能的理论及试验研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2008.
- [5] 欧阳卿. 高强螺栓受力及疲劳性能研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2013.
- [6] 中华人民共和国建设部. 钢结构设计规范: GB 50017—2003[S]. 北京: 中国计划出版社, 2003.

- [7] 焦晋峰, 贾朋朋, 刘勇, 等. 临界应力比下 M24 高强螺栓的常幅疲劳性能试验研究[J]. 太原理工大学学报, 2019, 50(6): 749-755.
- [8] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢结构设计标准: GB 50017—2017[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
- [9] NODA N, CHEN X, SANO Y, et al. Effect of pitch difference between the bolt - nut connections upon the anti-loosening performance and fatigue life[J]. Materials & Amp: Design, 2016, 96: 476-489.
- [10] QIU B, YANG X, ZHOU Z C, et al. Experimental study on fatigue performance of M30 high-strength bolts in bolted spherical joints of grid structures[J]. Engineering Structures, 2020, 205, 110123.
- [11] MARIO D, CASSIANO D, LANDOLFO R. Monotonic and cyclic inelastic tensile response of European preloadable GR10.9 bolt assemblies[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2016, 124: 77-90.
- [12] 杨光. 预拉力对高强度螺栓静力性能及轴拉疲劳性能的影响分析[D]. 太原: 太原理工大学, 2019.
- [13] 殷洪建, 王会利, 刘康. 摩擦型高强螺栓在偏心轴力作用下的疲劳性能有限元分析[J]. 沈阳大学学报(自然科学版), 2012, 24(4): 82-86.
- [14] 邱斌, 林健, 杨旭, 等. M30 高强螺栓假拧疲劳性能的试验研究[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(7): 20-25.
- [15] 徐亚洲, 孙震, 张玉清. 摩擦型高强螺栓节点微动疲劳性能试验及有限元分析[J]. 工业建筑, 2017, 47(3): 175-181.
- [16] 雷宏刚, 刘丽君, 闫亚杰, 等. 螺栓球节点网架中高强螺栓的疲劳影响因素分析[C]//中国钢结构协会结构稳定与疲劳分会 2002 年学术交流会暨钢结构教学研讨会. 南昌: 2002.
- [17] 阳荣昌. 单管通信塔法兰螺栓预拉力对疲劳损伤的影响[J]. 建筑结构, 2018, 48(13): 26-30.
- [18] YANG L, YANG B, YANG G, et al. Research on factors affecting competitive failure between loosening and fatigue of bolt under combined excitation[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2022, 189, 107110.
- [19] 中国国家标准化管理委员会. 金属材料 拉伸试验 第 1 部分: 室温试验方法: GB/T 228.1—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- [20] 中国国家标准化管理委员会. 钢结构用扭剪型高强度螺栓连接副: GB/T 3632—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [21] 黄文鹏. 装配式钢结构中 M24 高强度螺栓单轴受拉常幅疲劳性能的试验及理论研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2019.