

# 装配式柱座节点中M20高强度螺栓弯剪状态下常幅疲劳性能试验研究

吉轩喆\*, 张家川, 雷宏刚#

太原理工大学土木工程学院, 山西 太原

收稿日期: 2022年3月5日; 录用日期: 2022年3月31日; 发布日期: 2022年4月7日

## 摘要

为研究高强度螺栓在弯剪状态下的常幅疲劳性能, 本文借助AMSLER伺服液压疲劳试验机, 以一种新型的方钢管柱-H型钢梁装配式柱座节点为载体, 对装配式钢结构建筑中常用的10.9级、M20高强度螺栓进行了9组常幅疲劳试验, 经拟合得到了其应力-寿命曲线并建立了疲劳设计方法。分析了高强度螺栓疲劳源区、扩展区和瞬断区的形貌特征, 揭示了其疲劳破坏机理。

## 关键词

M20高强度螺栓, 常幅疲劳, S-N曲线, 梁柱节点

# Constant Amplitude Fatigue Behavior Test of M20 High-Strength Bolt under Bending and Shear in Prefabricated Column-Based Joint

Xuanzhe Ji\*, Jiachuan Zhang, Honggang Lei#

College of Civil Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan Shanxi

Received: Mar. 5<sup>th</sup>, 2022; accepted: Mar. 31<sup>st</sup>, 2022; published: Apr. 7<sup>th</sup>, 2022

## Abstract

In order to study the constant amplitude fatigue performance of high-strength bolts under bending and shear, this paper used a new type of H-shaped beam to square tube column joint as the carrier,

\*第一作者。

#通讯作者。

carried out 9 groups of constant amplitude fatigue tests on 10.9 and M20 high-strength bolts which are commonly used in assembled steel structure buildings with the help of AMSLER fatigue testing machine. The stress-life curve was obtained by fitting the fatigue data and the fatigue design method was established. Finally, the morphological characteristics of fatigue source zone, extension zone and transient zone of high-strength bolt were analyzed, and the fatigue failure mechanism was revealed.

## Keywords

M20 High-Strength Bolts, Constant Amplitude Fatigue, S-N Curve, Beam-Column Joint

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

## 1. 引言

作为钢结构构件之间的主要连接方式,高强度螺栓由于其安装便捷、受力性能好等优点,在国内外装配式钢结构建筑中得到了广泛应用。这些钢结构建筑在外界荷载等其他因素的作用下,会萌生裂纹,进而会在疲劳荷载的作用下发生疲劳破坏[1]。由于疲劳破坏没有明显的宏观塑性变形,突然的破坏往往会导致灾难性事故和巨大的经济损失[2]。疲劳累积损伤是破坏的主要原因,多年来科研人员始终致力于高强度螺栓疲劳性能的研究。

黄文鹏等[3]完成了 14 个 10.9 级 M24 钢结构用高强度大六角头螺栓的常幅疲劳试验,通过数据分析得到了 S-N 曲线,建立了相应的疲劳设计方法。张健[4]完成了 25 个 10.9 级 M24 扭剪型高强度螺栓的常幅疲劳和 4 个变幅疲劳试验,得到了加载应力与循环次数的常幅疲劳曲线。刘丹[5]通过对端板连接用 8.8 级 M24 高强度螺栓进行常幅疲劳试验,发现应力比和应力幅相同时,预紧扭矩变化 100 N·m,其相应的  $2 \times 10^6$  次允许疲劳强度相差 11.35%。申或[6]使用 MTS 伺服液压疲劳试验机,对工程中常用的 ML20MnTiB、10.9 级、M20 扭剪型高强度螺栓进行了 3 组静力拉伸试验和 10 组无预拉力的常幅疲劳试验,绘制出常幅疲劳破坏的 S-N 曲线并建立了疲劳寿命计算方法。

研究表明,多轴交变应力作用是结构疲劳失效的主要原因[7],实际工程中螺栓连接往往处于复杂的受力状态。目前学者对高强度螺栓疲劳性能的研究均采用将多轴应力状态转化为单轴应力状态的方法,无法真实地反映多轴疲劳问题产生的损伤和破坏。《钢结构设计标准》(GB 50017-2017) [8]中也尚无对应的连接类别参数,标准中连接类别为 Z11 和 J2 (即螺栓受轴向拉伸作用与螺栓受纯剪切作用)的疲劳计算参数不能满足该连接形式下构件疲劳寿命评估的要求。

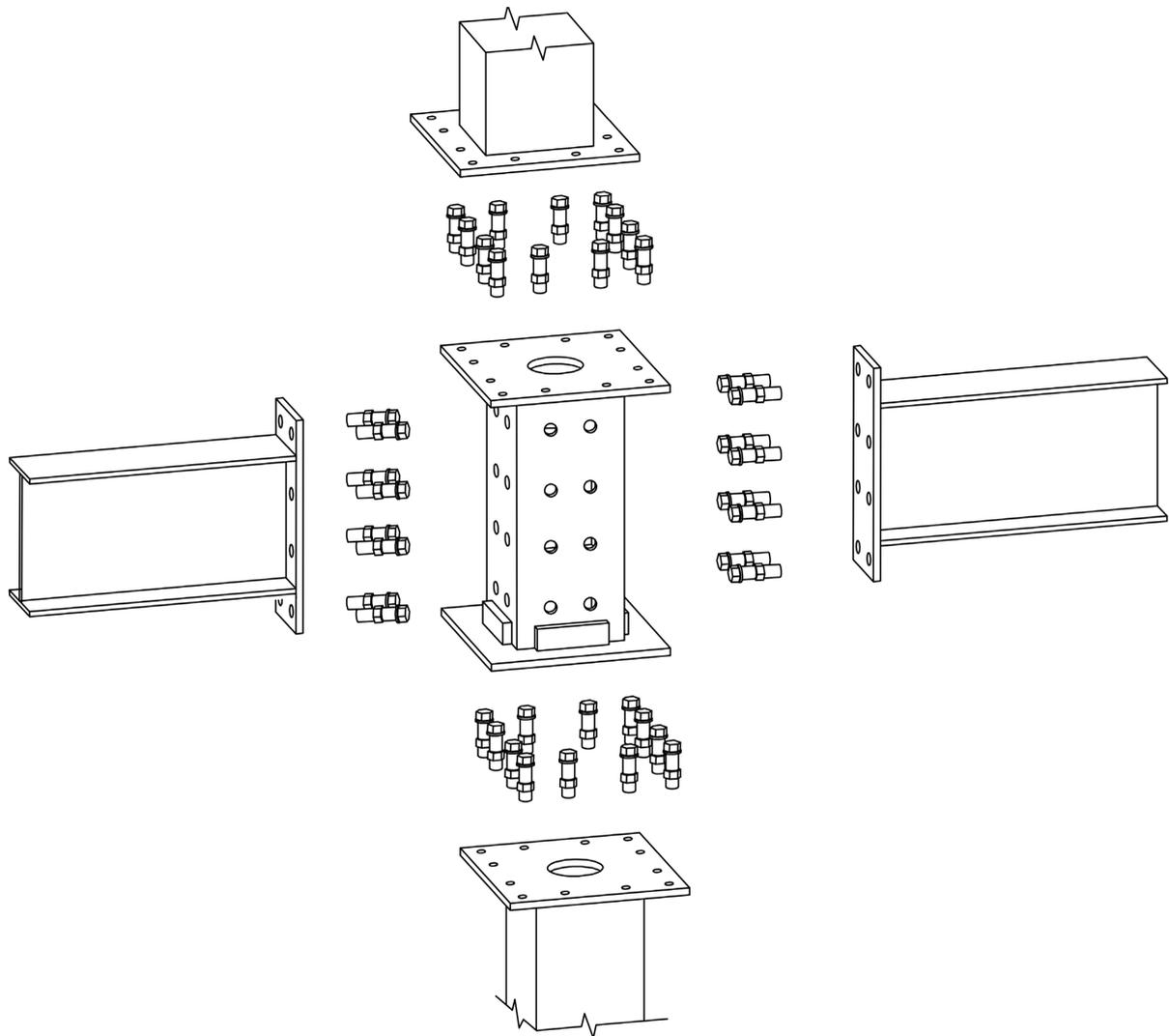
针对这种情况,本文以一种新型的方钢管柱-H 型钢梁装配式柱座节点为载体,模拟高强度螺栓在工程中承受弯矩和剪力共同作用的受力状态。设计制作了足尺的梁和柱座节点开展疲劳试验,建立疲劳设计方法,研究结果可为该类半刚性节点中螺栓在弯剪状态下的疲劳寿命评估提供参考,进而为补充规范中的连接类别提供依据。

## 2. 节点构造

新型装配式柱座节点构造如图 1 所示。框架柱采用冷弯成型的高频焊接方钢管,内部可填充混凝土形成钢管混凝土柱。根据连接钢梁的需求在柱身侧面预留螺栓孔,可实现两向、三向、四向连梁。柱与柱座节点之间通过等强焊接的法兰板采用高强度螺栓连接。框架梁采用窄翼缘高频焊接 H 型钢,

梁端在工厂焊接矩形端板与柱座节点通过高强度螺栓连接。最终实现方钢管柱与 H 型钢梁的全装配式连接。

在柱座节点内的关键部位设置等强焊接的加劲板，作为弯矩传递及提高节点刚度的构造措施；并在法兰板和加劲板上预留安装孔，很好地解决了方钢管柱作为闭口截面，螺栓安装困难的问题，也便于柱内灌注混凝土时振捣密实。



**Figure 1.** New type prefabricated column-based joint  
**图 1.** 新型装配式柱座节点示意图

### 3. 试件尺寸及加载装置

柱座节点和梁截面尺寸分别为  $350 \times 350 \times 12$ 、 $H500 \times 250 \times 8 \times 12$ 。柱座节点法兰板与梁端板尺寸分别为  $-550 \times 550 \times 20$ 、 $-300 \times 740 \times 20$ 。梁柱材料均为 Q355B。为避免加载梁端由于吊杆产生的集中力发生局部屈曲，在梁翼缘间设置一道厚度 20 mm 的横向加劲肋。试验采用 10.9 级、M20 扭剪型高强螺栓连接梁和柱座节点。

本试验借助 AMSLER 伺服液压疲劳试验机，加载装置如图 2 所示。采用力控的方式进行加载，加载

波形为等幅正弦波，试验机可施加的最大荷载为 1000 kN，最大频率 13 Hz。为保证试验过程稳步进行，加载频率取 5 Hz。



Figure 2. Loading device of fatigue test

图 2. 疲劳试验加载装置

## 4. 疲劳试验

### 4.1. 试验步骤

步骤 1: 拼装梁与柱座节点, 将 M20 扭剪型螺栓从预留的螺栓孔穿入, 按照对角的顺序先初拧后终拧。

步骤 2: 试件吊装就位后进行调平, 保证各部分处于同一水平面。对中千斤顶, 确保试件在试验过程中均匀受力且能持续稳定加载。

步骤 3: 基于期望的应力幅施加疲劳荷载。加载过程中及时监测荷载水平、观察试验现象并详细记录。

步骤 4: 螺栓一旦发生断裂试验加载仪器将自动停止。卸下螺栓, 记录螺栓的最终循环次数并拍摄疲劳破坏图, 分析试验信息。

步骤 5: 检查试件和试验设备的状况后, 更换一个新的扭剪型高强度螺栓, 重复步骤 3 和步骤 4 继续常幅疲劳试验。

### 4.2. 试验结果

经统计, 试验共得到 10 个在不同应力幅下发生疲劳破坏的 M20 高强度螺栓, 其中 9 个属于常幅疲劳破坏, 1 个属于变幅疲劳破坏。螺栓破坏都发生在柱座节点与梁连接处的螺栓群的最外排, 试验结果数据见表 1。

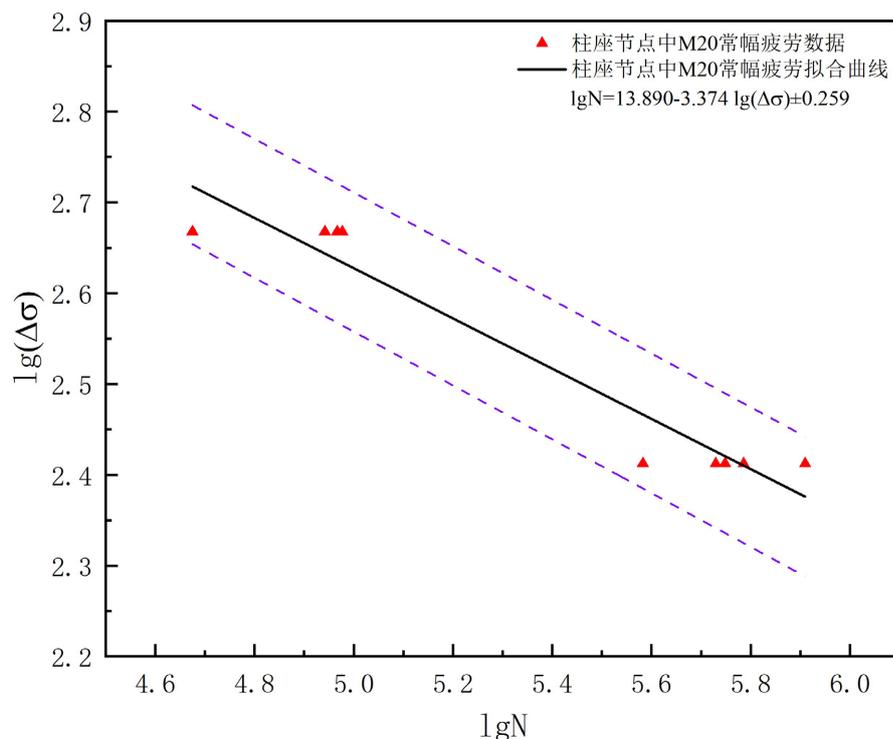
**Table 1.** Constant amplitude fatigue test results  
**表 1.** 常幅疲劳试验结果

螺栓编号	加载应力(Mpa)			加载应力幅(Mpa)		应力比	循环次数	
	$\sigma_{\max}$	$\sigma_{\min}$	$\bar{\sigma}$	$\Delta\sigma$	$\lg(\Delta\sigma)$		$N(\times 10^4)$	$\lg(N)$
12	517	52	284	465	2.667	0.10	8.750	4.942
16	517	52	284	465	2.667	0.10	9.480	4.977
18	517	52	284	465	2.667	0.10	4.730	4.675
17	517	52	284	465	2.667	0.10	9.260	4.967
19	517	52	284	465	2.667	0.10	4.100	4.613
	465	52	258	413	2.616	0.11		
33	310	52	181	258	2.412	0.17	56.010	5.748
25	310	52	181	258	2.412	0.17	61.070	5.786
29	310	52	181	258	2.412	0.17	81.260	5.910
38	310	52	181	258	2.412	0.17	38.270	5.583
39	310	52	181	258	2.412	0.17	53.670	5.730

表中的  $\sigma_{\max}$ 、 $\sigma_{\min}$  是螺栓的名义应力，为柱座节点最外排螺栓受到的拉力除以螺栓螺纹处的有效截面积所得(M20 扭剪型高强度螺栓  $A_{eff} = 245 \text{ mm}^2$  [9])。

### 4.3. 试验数据分析与处理

根据上述所得的 9 个柱座节点中 M20 高强度螺栓的常幅疲劳试验数据，绘制 S-N 曲线如图 3 所示。



**Figure 3.** S-N curve of constant amplitude fatigue for M20 high-strength bolt  
**图 3.** M20 高强度螺栓常幅疲劳 S-N 曲线

当采用保证率为 97.7% 时, 对应的 S-N 曲线表达式为:

$$\lg N = 13.890 - 3.374 \lg(\Delta\sigma) \pm 0.259 \quad (1)$$

相关系数  $r = -0.96613$ , 相关性良好。

由公式(1)得出, 在应力循环次数时, S-N 曲线对应的容许应力幅为  $[\Delta\sigma]_{2 \times 10^6} = 148.760 \text{ Mpa}$ 。根据 S-N 曲线可以看出, 装配式柱座节点中 M20 高强度螺栓的疲劳寿命与应力幅呈负相关, 即应力幅越大, 螺栓的疲劳寿命越低。

#### 4.4. 装配式柱座节点中 M20 螺栓常幅疲劳方法的建立

采用基于名义应力的容许应力幅法[10] [11]建立装配式柱座节点中 M20 高强度螺栓常幅疲劳设计方法, 将应力幅  $\Delta\sigma$  作为参量, 验算公式为:

$$\Delta\sigma \leq [\Delta\sigma] \quad (2)$$

$$[\Delta\sigma] = \left( \frac{C}{N} \right)^{1/\beta} \quad (3)$$

式中:  $\Delta\sigma$  为高强螺栓连接计算处的名义应力幅(Mpa);  $[\Delta\sigma]$  为容许应力幅(Mpa)。C、 $\beta$  为参数, 由公式(1)和公式(3)可得,  $C = 77.62 \times 10^{12}$ 、 $\beta = 3.374$ 。

#### 4.5. 数据对比分析

将本次试验数据、文献[6]和标准中连接类别为 Z11 即普通螺栓受轴向拉伸作用下的 S-N 曲线作对比, 如图 4 所示。

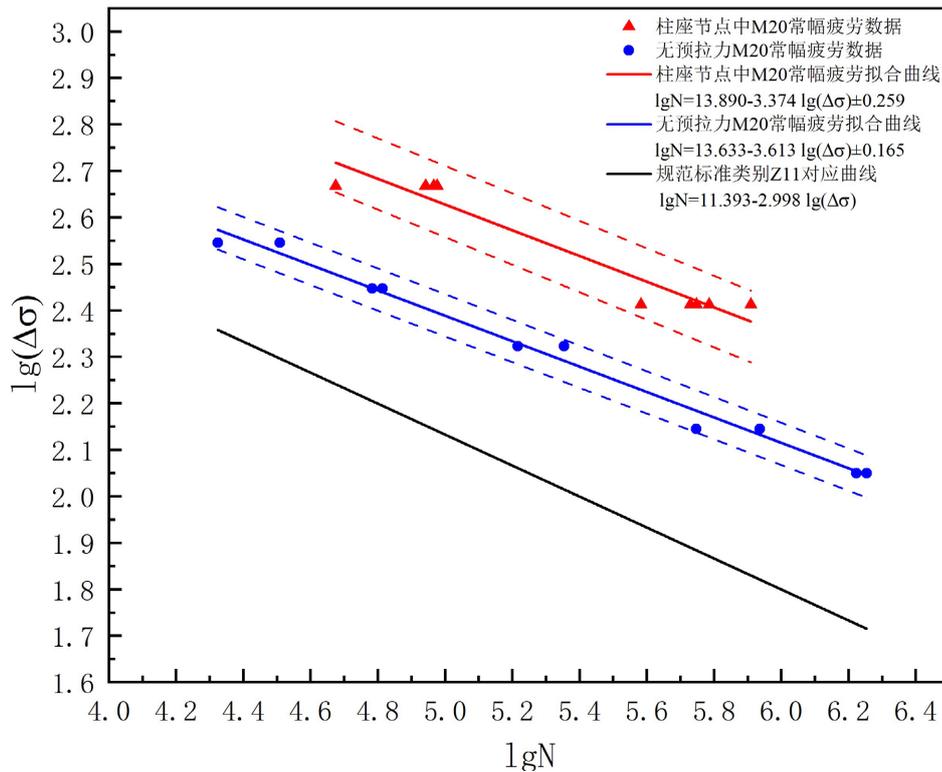


Figure 4. Comparison of S-N curves of M20 high-strength bolts  
图 4. M20 高强度螺栓 S-N 曲线对比

以  $N = 2 \times 10^6$  次为基准期，规范中连接类别为 Z11  $[\Delta\sigma]_{2 \times 10^6} = 50 \text{ Mpa}$ ，无预拉力的 M20 高强度螺栓  $[\Delta\sigma]_{2 \times 10^6} = 96 \text{ Mpa}$ ，本试验对应的容许应力幅为规范建议值的 3 倍，为无预拉力 M20 高强度螺栓的 1.5 倍。这表明，规范提供的设计方法过于保守，不适用于螺栓群节点的设计；且预拉力对提高高强螺栓的疲劳强度效果显著。

## 5. 宏观疲劳断口分析

本试验得到 10 组高强度螺栓的断口均呈现出明显的疲劳源区、扩展区和瞬断区，属于典型的疲劳破坏。高强度螺栓破坏后的实物图见图 5。所有破坏位置均位于螺栓杆的螺纹根部，裂纹起始于高应力区，说明此处有较大的应力集中。本文在高、低应力幅下选取典型试样进行宏观断口分析，分别为 M20-16 号和 M20-33 号。



Figure 5. Real picture of high-strength bolt after damage

图 5. 高强度螺栓破坏后的实物图

M20-16 号螺栓加载应力幅为 465 Mpa。如图 6(a)所示，M20-16 号疲劳源区位于断口的上侧，有明显的贝纹线；疲劳扩展区约断口总面积的 50%，稳定扩展区断面较为平整光滑，不稳定扩展区表面粗糙。稳定扩展区和不稳定扩展区的交界处有一条明显的“海滩条带”，分析其原因发现，16 号螺栓在加载过程中经历了频率由 200 次/min 到 300 次/min 的转变，虽然频率在 200~7000 周次/min 的范围内变化对疲

劳强度不产生任何影响[12],但裂纹以不同的速率扩展,在断面留下了与加载历史对应的痕迹,即“海滩条带”。瞬断区占断口总面积的30%,塑性断裂特征明显。

M20-38号螺栓加载应力幅为258 Mpa,从图6(b)可以看出,螺栓有两个疲劳源,随着裂纹的扩展,两个扩展区在交汇处形成了高差为一个丝扣的疲劳台阶。M20-38号经历了较长时间的裂纹扩展阶段,断口下方瞬断区面积较小,约占20%。

综上可得:1) 裂纹起始于高应力的局部,构件表面由于应力集中形成的高应力区是可能的裂纹源区。2) 加载制度的变化会在螺栓断面留下相应的痕迹。当螺栓中有多个疲劳源时,会在扩展区形成疲劳台阶,疲劳断口为分析螺栓的失效原因提供了佐证。3) 加载应力幅越大,裂纹扩展速度越快,瞬断区所占的比例越小,疲劳破坏断口也越不平整。



Figure 6. The fracture of M20 high-strength bolt  
图6. M20 高强度螺栓断口

## 6. 结论

本文通过试验研究了9个装配式柱座节点中M20高强度螺栓的常幅疲劳性能,得出以下结论:

1) 根据常幅疲劳试验数据拟合得到了S-N曲线,对应的表达式为 $\lg N = 13.890 - 3.374 \lg(\Delta\sigma) \pm 0.259$ ,数据相关性较好,相关系数 $r = -0.96613$ 。

2) 根据容许应力幅法建立了常幅疲劳设计方法,得到柱座节点中M20高强度螺栓 $[\Delta\sigma]_{2 \times 10^6} = 148.760 \text{ Mpa}$ ,  $C = 77.62 \times 10^{12}$ 、 $\beta = 3.374$ 。

3) 弯剪状态下满预拉力的M20高强度螺栓的疲劳强度高于轴向拉伸下无预拉力的螺栓,预拉力对提高高强螺栓的疲劳强度效果显著;规范中连接类别Z11的螺栓对应的 $2 \times 10^6$ 次容许应力幅为50 Mpa,本试验对应的容许应力幅为规范建议值的3倍,规范过于保守。

疲劳断口既有单疲劳源断口也有多疲劳源断口,螺栓表面的高应力区是可能的裂纹源区。加载应力幅越大,裂纹扩展速度越快,瞬断区所占的比例也越小。

## 参考文献

- [1] 房奇,陈涛,王伟. 高强螺栓疲劳性能研究现状[J]. 结构工程师, 2020, 36(4): 222-229.

- 
- [2] 雷宏刚, 付强, 刘晓娟. 中国钢结构疲劳研究领域的 30 年进展[J]. 建筑结构学报, 2010(S1): 84-91.
- [3] 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]: [硕士学位论文]. 太原: 太原理工大学, 2019.
- [4] 张健, 黄文鹏, 周子淳, 雷宏刚. 装配式钢结构建筑中 M24 高强度螺栓常幅疲劳设计方法的建立[J]. 太原理工大学学报, 2020, 51(5): 737-742.
- [5] 刘丹. 预紧力对端板连接 M24 高强度螺栓常幅疲劳性能影响分析[D]: [硕士学位论文]. 太原: 太原理工大学, 2021.
- [6] 申彥, 雷宏刚, 冯徐泽. 装配式钢结构用 M20 高强度螺栓欠预拉力的常幅疲劳性能试验研究[J]. 太原理工大学学报, 2022,53(2): 308-314.
- [7] Kanazawa, K., Miller, K.J. and Brown, M.W. (1977) Low-Cycle Fatigue under Out-of-Phase Loading Conditions. *Journal of Engineering Materials and Technology*, **99**, 222-228. <https://doi.org/10.1115/1.3443523>
- [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, 2017.
- [9] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 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.
- [10] 徐国彬, 崔杰. 网架结构疲劳及其疲劳寿命计算[J]. 建筑结构学报. 1994(2): 25-34.
- [11] 雷宏刚. 螺栓球节点网架常幅疲劳试验数据再分析[C]//中国钢协结构稳定与疲劳协会 2000 年学术交流会. 中国钢协结构稳定与疲劳协会 2000 年学术交流会论文集钢结构工程研究③. 长沙: 中国钢结构协会, 湖南大学, 2000: 202-205.
- [12] 赵少汴. 抗疲劳设计手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2015.