

郭富强. 基于极限承载力模型的民居建筑钢结构框架抗震性能试验分析[J]. 华南地震, 2023, 43(2): 158-164. [GUO Fuqiang. Experimental Analysis of Seismic Performance of Steel Frame of Residential Buildings Based on Ultimate Bearing Capacity Model [J]. South China journal of seismology, 2023, 43(2): 158-164]

基于极限承载力模型的民居建筑钢结构 框架抗震性能试验分析

郭富强

(林州建筑职业技术学院 智能建造系, 河南 林州 456550)

摘要: 民居建筑钢结构框架受到腐蚀后的抗震性能问题引发了关注, 为了分析锈蚀对于程度民居建筑钢结构框架的影响, 在极限承载力模型的基础上对民居建筑钢结构框架抗震性能进行试验分析。制作民居建筑钢结构试件, 设定轴压比、钢材规格和钢材强度, 拟定腐蚀程度, 确定试件截面尺寸。人工进行试块加速腐蚀, 获取各种腐蚀程度的试块, 再对其进行极限承载力测试并得到相应模型, 最后按照模型计算震动模拟参数, 得到各种腐蚀程度下试块的抗震结果。结果表明: 未腐蚀试件滞回曲线呈现饱满弓形, 耗能较高, 抗震性能更强。与不同腐蚀程度试件相比, 屈服前的滞回曲线线性变化更明显, 抗侧刚度稳定, 弹性较强。发生屈服之后, 极限承载力保持在恒定状态, 屈服后的刚度值可取0, 延性系数增加, 延展性更好。轻度腐蚀和中度腐蚀试件的指标有所下降, 但是都标准允许范围之内。

关键词: 极限承载力模型; 民居建筑; 钢结构框架; 抗震性能

中图分类号: TU391

文献标识码: A

文章编号: 1001-8662(2023)02-0158-07

DOI: 10.13512/j.hndz.2023.02.18

Experimental Analysis of Seismic Performance of Steel Frame of Residential Buildings Based on Ultimate Bearing Capacity Model

GUO Fuqiang

(Intelligent Construction Department, Linzhou Architectural Vocational and Technical College,
Linzhou 456550, China)

Abstract: The seismic performance of the steel frame of residential buildings after corrosion has attracted attention. In order to analyze the influence of corrosion on the steel frame of residential buildings, the seismic performance of the steel frame of residential buildings was tested and analyzed on the basis of the ultimate bearing capacity model. To make the steel structure specimens of residential buildings, the paper set the axial compression ratio, steel specifications and steel strength, formulated the corrosion degree, and determined the cross-section size of the specimens. The accelerated corrosion of the test blocks was carried out manually, and the test blocks

收稿日期: 2022-10-12

作者简介: 郭富强(1982-), 男, 高级工程师, 主要研究方向: 土木工程结构设计。

E-mail: zeyuan8162555488@163.com

with various corrosion degrees were obtained. Then the ultimate bearing capacity of the test blocks was tested and the corresponding model was obtained. Finally, the vibration simulation parameters were calculated according to the model, and the seismic results of the test blocks with various corrosion degrees were obtained. The results show that the hysteretic curves of the uncorroded specimens shows a full bow shape, with higher energy consumption and stronger seismic performance. Compared with the specimens with different corrosion degrees, the linear change of hysteresis curve before yield is more obvious, the lateral stiffness is stable, and the elasticity is strong. After yielding, the ultimate bearing capacity remains at a constant state, the stiffness value after yielding can be taken as 0, the ductility coefficient increases, and the ductility is better. The indexes of mild corrosion and moderate corrosion specimens decrease, but both are within the allowable range of the standard.

Keywords: Ultimate bearing capacity model; Residential buildings; Steel frame; Seismic performance

0 引言

钢结构框架的民居建筑对于建筑场地的适应能力强,自重较轻,整体的刚度好,具有较强的变形能力,我国各地都已经建造了规模巨大的大跨度钢结构民用建筑,钢结构框架也成为了目前广泛应用的体系。但是,常年使用的钢结构框架在自然环境下,会受到酸性降雨、酸性大气的影响而发生腐蚀,降低了钢结构框架的稳定性能^[1-2]。从前些年发生的重大地震灾害后,人们更多的关注钢结构框架建筑的抗震性能,也将钢结构框架更多的应用在民居建筑中。钢结构框架体系适合工业化的装配,钢结构框架支撑体系在商业或功能性建筑中的应用比较多,但是在应用到民居建筑中时,钢结构体系是通过钢板、热轧型钢和薄壁钢通过连接制造组装形成的,梁柱通过节点完成连接,形成一个整体的钢结构框架^[3-4]。结构中的极限承载力是该民居建筑钢结构框架抗震性能的重要影响因素,因此在对民居建筑钢结构框架抗震性能进行分析的过程中,结合框架的极限承载力模型,是优化钢结构框架抗震性能的重要手段^[5-6]。民居建筑钢结构框架在常年的服役期间,难免会发生锈蚀,为了分析不同锈蚀钢框架试件对抗震性能的影响,本文提出一种基于极限承载力模型的民居建筑钢结构框架抗震性能实验,并对结果进行分析。

1 民居建筑钢结构框架抗震性能试验

1.1 制作钢结构试件

钢结构试件的屈服强度、极限承载力以及伸长

率等力学性能都会随着钢结构试件的锈蚀程度的变化而发生变化。在抗震性能测试中,选择不同的截面尺寸的钢结构框架柱试件^[7]。试件的参数如下表所示:

表1 试件相关参数
Table 1 Relevant parameters of specimen

试件编号	轴压比	设定锈蚀程度
1	0.2	未锈蚀
2	0.2	轻度锈蚀
3	0.2	中度锈蚀
4	0.2	重度锈蚀
5	0.3	轻度锈蚀
6	0.3	中度锈蚀
7	0.4	轻度锈蚀

本文试验中所选择的试件的钢材规格均为HW230*230*4*8,钢材强度均为Q235B。为了保证钢结构框架柱试件在实验中能够稳定受力,在底部设置了一个更大强度的底梁,截面尺寸如图1所示:

钢材在大气中暴露腐蚀受到地域和环境的限制,一般的腐蚀时间太长。因此采用人工腐蚀来获取不同腐蚀程度的试件。

1.2 设计钢结构试件人工加速腐蚀方案

采用ZHT/W2300气候模拟实验系统来模拟酸性大气盐雾环境,系统内部设有可升降淋雨喷头和盐雾喷头,内部环境全程可控^[8-9]。为了模拟酸性的大气环境,配置的盐雾溶液为5%的氯化钠溶液,在配置过程中,选择低导电率的蒸馏水或去离子水作为溶剂,在完成溶液配比之后调节溶液酸碱度^[10-12]。取10L配比好的氯化钠溶液,并向其中添

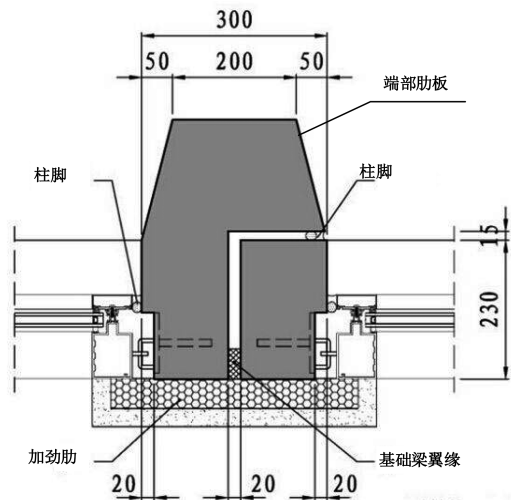


图1 试件截面示意图

Fig.1 Schematic diagram of cross-section of the specimen

加 12 mL 的密度为 1.42 g/cm³ 的 HNO₃ 溶液，向其中加入酸、碱溶液进行 pH 调节，直到最后所得到的溶液 pH 在 3.5 左右。在人工腐蚀的过程中采用人工喷雾，每天选择 7 小时进行人工腐蚀，在此期间每隔 20 min 进行一次喷雾，喷雾的时间为 15 min。在试验过程中定期进行取样检查。

1.3 极限承载力测试与模型搭建

对于制作好的时间来说，贴好应变片之后，在弹性范围内获取钢结构框架中试件的弹性模量以及屈服强度等参数。在获取到相关参数之后，利用荷载和横截面积来计算应力，获取到钢结构的极限承载力，并建立相关的模型^[13]。在极限承载

力的测试中，试验加载装置如图 2 所示。

为了全方位的显示出这两种破坏形式，使用极限承载力模型来表征钢结构试件的损伤指数：

$$D_0 = \frac{\delta_m}{\delta_u} + \frac{\beta}{Q_y \delta_u} \int dE \tag{1}$$

式(1)中， δ_u 表示试件在受到压力之后的极限位移， δ_m 表示最大位移， β 表示极限承载力测试过程中腐蚀影响系数， Q_y 表示屈服强度， E 表示承载力增量。极限承载力模型在试验基础上建立，因此在能够描述承载极限机理的同时，结构形式更加简便^[14-15]。针对本文钢结构框架试件的极限承载力来说，所建立的模型如式(2)所示：

$$D_0 = \left(\frac{x_m}{x_u} \right)^{\beta_1} + \left(\frac{E_h}{E_u} \right)^{\beta_1} \tag{2}$$

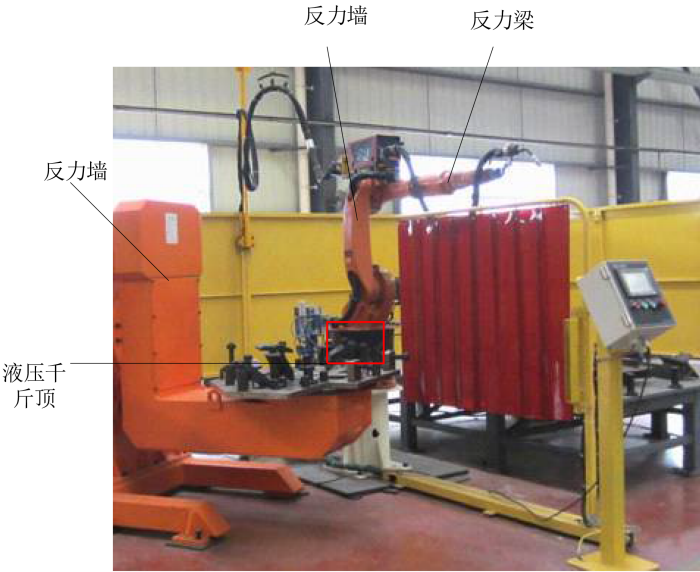


图2 极限承载力加载装置

Fig.2 Loading device for ultimate bearing capacity

式(2)中, x_m 、 x_u 分别表示地震情况下的最大位移和极限位移, E_h 表示地震作用下试件所受到的最大滞回能耗, E_u 表示极限滞回能耗。 β_l 表示结构中的组合系数, 根据具体结构对其值进行定义。

1.4 抗震性能试验设计

在以上的实验设备下, 基于水平位移的加载

模式, 根据目前规范中性能水准等级, 对试验结构构件进行承载力试验, 试验加载制度如图3所示。

图3中, 试件在发生屈服之前, 每级循环一次的位移加载增加3 mm。当试件的承载力超过极限而发生屈服之后, 每级循环三次的位移加载增加5~10 mm, 不断循环直到结构层间位移角达到1/50时停止。

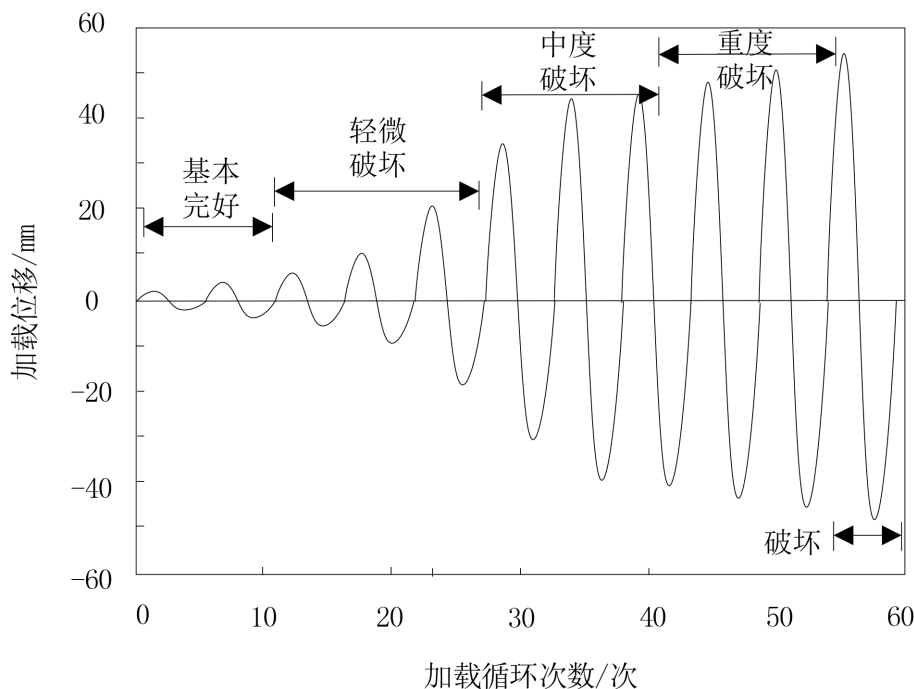


图3 试验加载制度

Fig.3 Test loading system

2 试验结果与分析

在加载试验结束之后, 观察民居建筑中钢结构框架和试件、节点的细微破坏情况, 如图4所示。

图中, 图4(a)为框架梁, 图4(b)斜向支撑, 图4(c)为框架柱节点。图4(a)中可以看出, 外部的油漆已经出现起皮脱落的情况, 图4(b)的斜向支撑出现了下翼缘屈服情况, 图4(c)中的框架节点出现断裂。在试验过程中, 钢结构框架的各个试件按照预设的顺序依次发生了屈服现象, 说明屈服机制合理, 根据以上的情况, 框架梁是主要屈服构件, 有效保护了主体框架。在以上的情况下, 分别得到民居建筑钢结构各项抗震指标。为

了保证试验结果的准确性, 在软件中建立民居钢结构框架试件的有限元模型, 并对模型进行相同的抗震性能试验, 对比真实试件和有限元模型的抗震性能分析结果。

2.1 滞回曲线分析

实验中得到的不同腐蚀程度试件的整体滞回曲线如图5所示。

从图5可以看出, 重度腐蚀试件和未腐蚀试件所得到的滞回曲线偏差较大, 在相同的水平位移下, 未腐蚀试件的水平荷载更高。未腐蚀试件的滞回曲线表现出了较高的耗能, 说明抗震性能更强。与腐蚀试件相比, 未腐蚀试件发生屈服之前, 抗侧刚度保持稳定, 说明试件的弹性较强。当施加的承载力变大时, 各部分零件依次进入屈服状

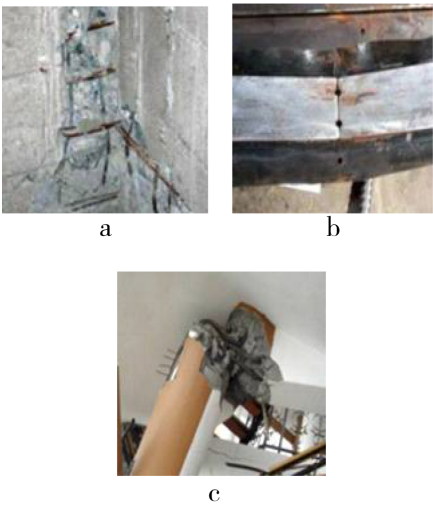


图4 加载试验后的试件细节
Fig.4 Details of specimen after loading test

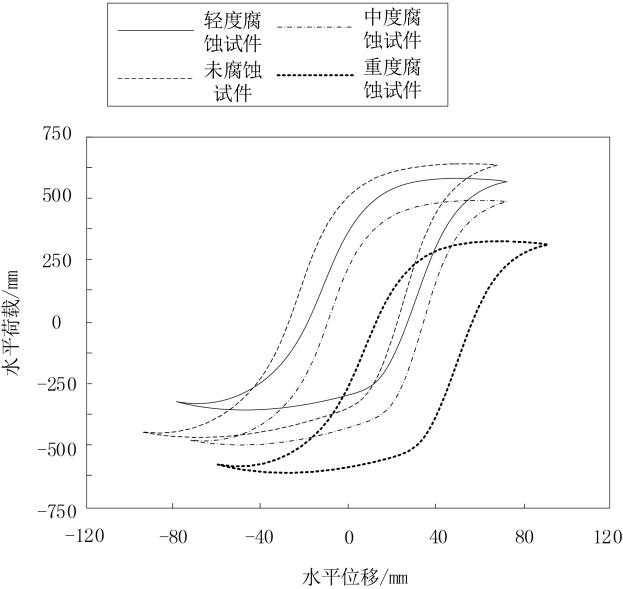


图5 不同腐蚀程度试件的滞回曲线
Fig.5 Hysteresis curve of specimens with different corrosion degree

态。试验结束之后，承载力和循环次数都有一定程度增加，但是其水平方向上的承载能力保持不变，说明延展性较强。在相同的量级下，未腐蚀的钢结构框架整体的刚度和强度都保持在恒定状态。根据滞回曲线，可以得出结论，按照当前民居建筑钢结构框架的规范设计出的框架满足抗震的要求。轻度腐蚀试件和中度腐蚀试件发生腐蚀的钢结构框架整体的刚度和强度有所降低，但是相差不大，但是相比之下，稳定性减弱，但是仍然符合建筑标准。

2.2 骨架曲线分析

根据上文中的滞回曲线，从中提取出骨架曲

线。骨架曲线是承载力加载过程中滞回曲线相同方向上加载的第一循环峰值点，也可以称为开始卸载点，在不同的循环下，将得到的开始卸载点进行连接，得到的图像如图6所示。

图6中的骨架曲线表现出了较强的双折线特点，试验过程中水平位移在20 mm时，水平荷载达到峰值，所对应的位移角在1/50的位置上。此时的重度腐蚀试件的水平荷载最高峰值比未腐蚀试件下降了223.5 N，根据上图得到的试件承载力的特征指标如表2所示。

从表2中的数据可以看出，屈服点主要是利用弯矩在通用的计算方法下进行确定的。在实际的实

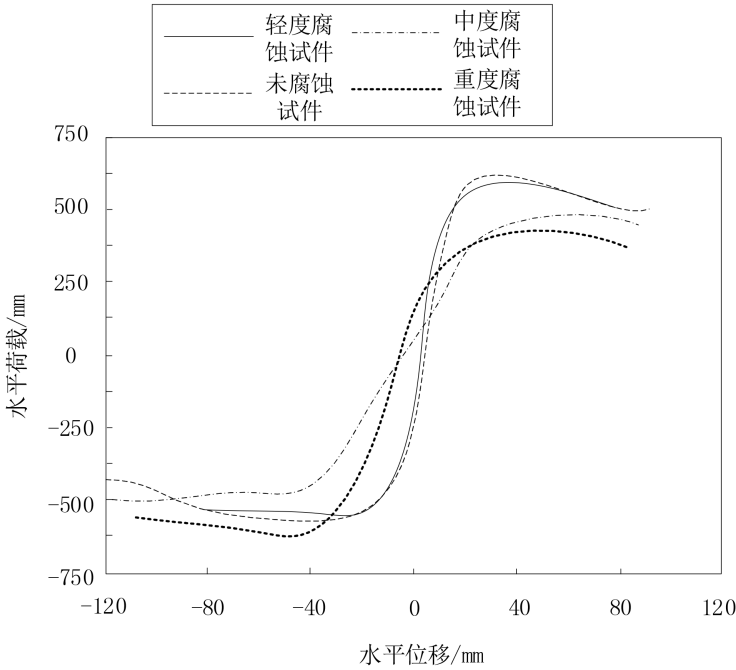


图6 试件以及有限元模型骨架曲线
Fig.6 Skeleton curve of specimen and its finite element model

表2 试件承载力特征指标
Table 2 Characteristic index of bearing capacity of specimen

特征指标	未腐蚀试件	轻度腐蚀试件	中度腐蚀试件	重度腐蚀试件
屈服荷载/kN	873.6	853.6	849.6	819.5
屈服位移/mm	12.6	12.4	12.0	11.0
峰值荷载/kN	862.5	854.2	856.5	823.2
峰值位移/mm	19.2	18.7	18.0	12.9
破坏荷载/kN	874.8	855.6	849.5	822.3
破坏位移/mm	103.3	103.3	103.3	103.3
位移延性系数最小值	6.58	6.32	6.31	6.29

验中，承载力加载完成之后，荷载值超过峰值的85%，在这样的条件下，未腐蚀的钢结构框架还保持在稳定状态，并能够继续承载，结构处于完整，因此将骨架曲线的末端作为钢结构的破坏临界点，得到破坏位移与屈服位移之比。所得到的系数是真实延性系数的下限。未腐蚀试件在发生屈服之后，极限承载力保持在恒定状态，屈服后的刚度值可取0，延性系数增加，延展性更好。轻度腐蚀和中度腐蚀试件的指标有所下降，但是都标准允许范围之内。

2.3 刚度退化分析

试件的侧向刚性的研究方法中，一般是采用各级的在加载过程时的或实际加载位置时滞回曲

线的割线刚度进行描述。二种钢结构框架的试件的强度退化结果，如图7所显示。

从图7中的曲线可以看出，在推力与拉力作用下，两种框架中试件的刚度退化曲线成轴对称图形，加载位移在比较小的情况下，侧向的刚度会缓慢下降。斜向支撑屈服后，侧向刚度迅速下降。随着加载位移的增大，刚度退化逐渐趋于平缓。但是明显可以看出，未腐蚀时间的侧向刚度明显更大，这也验证了未腐蚀钢结构框架的抗震性能更强。

3 结束语

本文从民居建筑钢结构框架的构件腐蚀状态

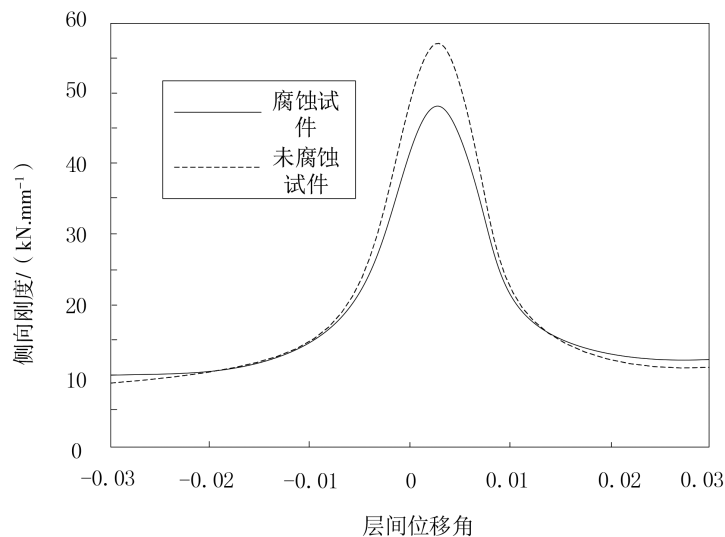


图7 刚度退化分析曲线

Fig.7 Analysis curve of stiffness degradation

入手,对腐蚀构件和未腐蚀构件在抗震性能方面进行系统的试验。从滞回曲线、骨架曲线以及刚度退化三个方面来说,未受到腐蚀的民居建筑钢结构框架与已经发生腐蚀的框架试件相比,抗震性能更高。在相同的水平位移下,未腐蚀试件的水平荷载更高;提取出的骨架曲线并从中获取试件承载力特征指标,表征了未腐蚀试件在发生屈服之后,极限承载力保持在恒定状态,屈服后的刚度值可取0,延性系数增加,延展性更好。抗震性能差的民居建筑钢结构在地震的作用下所产生的经济损失巨大,保证民居建筑钢结构在使用过程中尽量避免酸性腐蚀,能够有效提升整体结构的抗震性能。

参考文献

- [1] 陈曦, 閻东东, 苏宇坤, 等. 采用BRB伸臂桁架的某超高层钢结构抗震性能分析[J]. 建筑结构, 2021, 51(08): 37-42.
- [2] 苏明周, 王清霖, 戚宏宇. 十字板-端板式模块化钢结构连接节点抗震性能试验研究[J]. 施工技术, 2020, 49(05): 85-90.
- [3] 张艳霞, 武丙龙, 张爱林, 等. 箱形柱芯筒式双法兰连接平面框架抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2022, 43(02): 29-42.
- [4] 王静峰, 汪皖黔, 张荣, 等. 半刚性钢框架-冷弯薄壁型钢填充复合墙板结构的计算模型及时程分析[J]. 建筑钢结构进展, 2021, 23(07): 115-124.
- [5] 李补拴, 赵冲, 赵根田, 等. 半刚性节点框架PEC柱在重复地震作用下的抗震性能试验研究[J]. 建筑钢结构进展, 2022, 24(06): 20-28.
- [6] 门进杰, 杨运杰, 兰涛, 等. 箱板式钢结构住宅底部加强区组合加劲钢板墙抗震性能分析[J]. 建筑结构学报, 2021, 42(02): 82-91.
- [7] 张爱林, 牟俊霖, 刘学春, 等. 北京新机场航站楼大跨度钢结构主楼C1区静力和抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2020, 41(04): 1-10.
- [8] 徐敬明, 胡杰珍, 邓培昌, 等. 风电塔筒材料Q345D合金钢在模拟海洋大气环境下的腐蚀规律研究[J]. 材料保护, 2021, 54(3): 64-69+80.
- [9] 叶继红, 申会谦, 薛素铎. 点蚀孔腐蚀钢构件力学性能劣化简化分析方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016, 48(12): 70-75.
- [10] 刘坚, 张世豪, 曹占彬, 等. 基于“卅”字型钢部件连接节点的装配式SRC剪力墙抗震性能研究[J]. 混凝土, 2021(11): 130-134.
- [11] 黄靓, 秦明珠, 邓鹏, 等. 基于试验数据的再生混凝土梁极限承载力计算方法及可靠度研究[J]. 建筑结构, 2021, 51(11): 73-81.
- [12] 瞿浩川, 杨学林, 王震, 等. 基于钢筋套筒灌浆连接的装配式混凝土柱试验的数值拟合优化分析模型[J]. 建筑结构, 2021, 51(S1): 1166-1171.
- [13] 丁艳超, 向中富, 李亚勇, 等. 基于损伤塑性本构模型的上承式梁拱组合刚构梁拱交汇节点极限承载力研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2020, 39(11): 66-75.
- [14] 吴函恒, 隋璐, 聂少锋, 等. 填充石膏基轻质材料的冷弯型钢复合墙体受剪承载力分析[J]. 工程力学, 2022, 39(04): 177-186.
- [15] 黄宏, 戚本豪, 王慧智, 等. 大空心率圆中空夹层钢管超高性能混凝土短柱轴压力学性能研究[J]. 建筑钢结构进展, 2022, 24(04): 24-31+46.