**文章编号:**1007-9629(2021)06-1291-09

# 开孔 Q460 高强钢在大应变循环拉伸下的 力学性能

# 罗文伟1, 李海锋1,2, 曹宝安1

(1.华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021;2.华侨大学 福建省智慧基础设施与监测重点实验室, 福建 厦门 361021)

摘要:对36个Q460高强钢试件进行单调拉伸与循环拉伸下的力学性能试验,探讨开孔数量、开孔位 置和加载制度对Q460高强钢试件破坏特征、极限抗拉强度、应力循环特征和耗能能力的影响规律. 结果表明:孔洞对Q460高强钢试件的力学性能具有显著影响;开孔试件在孔洞周围出现明显的应力 集中现象;未开孔试件的应力-应变曲线更为饱满,且未开孔试件的耗能能力和断后伸长率远大于 开孔试件;相较于沿试件长轴方向的孔洞,沿试件短轴方向的孔洞对试件力学性能的影响更为显著; 对于相同开孔数量和开孔位置的试件,其耗能能力随加载应变幅值增量的增大而减小.

关键词:Q460高强钢;开孔钢板;循环拉伸;耗能

**中图分类号:**TU391 文献标志码:A d

**doi**:10.3969/j.issn.1007-9629.2021.06.022

# Mechanical Properties of Q460 High-Strength Steel with Holes under High-Strain Cyclic Tensile Loading

 $LUO Wenwei^{1}$ ,  $LI Haifeng^{1,2}$ ,  $CAO Baoan^{1}$ 

(1. College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China; 2. Key Laboratory for Intelligent Infrastructure and Monitoring of Fujian Province, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** The mechanical properties of Q460 high-strength steel specimens were tested under both monotonic and repeated tensile loading. The quantity of holes, the position of holes and the loading patterns were set as the main factors to explore their influence on failure mode, ultimate tensile strength, stress cycling characteristic and energy dissipation capability of specimens. Experimental results show that the opening holes have a significant effect on mechanical properties of Q460 specimen. Specimens with holes present obvious stress concentration phenomenon around the holes. The energy dissipation capacity and elongation of unopened specimens are much greater than those of specimens with holes. Compared with the holes along the long axis of specimen, the holes along the short axis have a more significant effect on mechanical properties of Q460 steel. Furthermore, with the same quantity of openings and opening positions, the strain amplitude of loading pattern has a greater influence on mechanical properties of specimen, and the energy dissipating capacity decreases with the increase of the strain amplitude.

Key words:Q460 high-strength steel; opening steel plate; cyclic tensile loading; energy dissipation

收稿日期:2020-08-12;修订日期:2020-10-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51778248);福建省自然科学基金资助项目(2018J01075);福建省高校杰出青年科研人才培育计划;华侨大学研究生科研创新基金资助项目(18013086021).

第一作者:罗文伟(1995—),男,湖南邵阳人,华侨大学硕士生.E-mail:luo\_wenwei1995@163.com 通讯作者:李海锋(1983—),男,山东菏泽人,华侨大学教授,博士生导师,博士.E-mail:lihai\_feng@126.com

相比传统的混凝土建筑而言,钢结构建筑强度 更高,抗震性能更好,便于工厂化制作和现场安装, 是中国21世纪的"绿色建筑",也是未来建筑的发 展方向.高强度结构钢材(指强度标准值不低于 460 MPa的钢材)在国内外多个建筑和桥梁工程中 得到了广泛应用<sup>11</sup>,中国的国家体育场"鸟巢"使用 了约400t的Q460高强钢.国内外学者对Q460高强 钢的力学性能进行了大量的研究.孙飞飞等[2]以厚 11、21 mm的Q460C钢板为研究对象,结合钢材反 复加载的滞回曲线,提出了Q460高强钢的应力-应 变滞回模型.施刚等<sup>[3]</sup>对17个Q460D高强钢试件进 行了循环加载,并基于 Chaboche 钢材塑性本构模型 标定了该类型高强钢的循环加载本构模型参数,为 准确分析 Q460D 高强钢在地震作用下的受力性能 提供了基本前提.戴国欣等<sup>[4]</sup>对比分析了Q345与 Q460钢材在循环加载下的力学性能,结果表明 Q460钢的滞回耗能能力不弱于Q345钢.刘佳<sup>[5]</sup>对 Q460钢进行了超低周疲劳状态的本构模拟及断裂 预测分析,结果表明 VMX 钢材断裂预测模型对 Q460钢和焊缝金属的超低周疲劳延性断裂预测具 有良好的适用性.

在实际工程应用中,钢板的螺栓连接是极为常见的一种连接方式,因此钢板的开孔是不可避免的. 目前各国学者主要从孔径、开孔位置和开孔数量对 钢板屈曲以及极限强度的影响进行研究<sup>[6-8]</sup>.龚晨等<sup>[9]</sup> 对开孔钢板屈曲约束支撑进行了试验研究,分别探 讨了开孔截面面积比、开孔段长宽比、孔区间长度与 开孔宽度比对该类型支撑力学性能和稳定性的影响 规律.周超等<sup>[10-11]</sup>对Q235开孔钢板进行了拉伸试验 和有限元模拟,分析了孔洞对钢板抗拉承载力和抗 拉刚度的影响机理.谢彩霞等<sup>[12]</sup>对33个开孔Q235试 件进行了单调拉伸和循环拉伸加载,主要探讨了不同加载制度下Q235钢板的破坏机理、延性特征和滞回性能.杨勇等<sup>[13-15]</sup>对开孔钢板剪力连接件进行了试验分析,研究了开孔钢板剪力连接件在抗剪时的破坏形态以及各因素的作用机理,为开孔抗剪板在建筑领域的推广应用提供理论支持.

诸多研究表明,钢板开孔会削弱钢板自身性能, 而目前有关高强钢力学性能的研究主要集中于分析 高强钢板的滞回曲线和建立相应的本构模型,开孔 高强钢板在循环荷载作用下的力学性能还需进一步 研究.本文共设计了36个Q460高强钢试件,并对其 进行单调拉伸及循环拉伸下的力学性能试验,以开 孔数量、开孔位置和加载制度为主要影响因素,重点 探讨开孔Q460高强钢试件的破坏特征、抗拉强度、 应力循环特征和耗能能力,以期为此类型开孔钢板 的工程实际应用提供参考依据.

#### 1 试验设计

所用Q460高强钢由安钢公司提供,其力学性能如表1所示,满足GB/T1591—2018《低合金高强度结构钢》的要求.表1中f<sub>y</sub>、f<sub>a</sub>、A、E<sub>ci</sub>分别为屈服应力、极限抗拉强度、断后伸长率和冲击功;C为试件冷弯性能,采用d/a表示,其中d为弯心直径,a为试件厚度.试验共设计36根厚度为6mm的Q460高强钢试件,参照GB/T228.1—2010《金属材料拉伸试验第1部分:室温试验方法》,确定了试件的基本尺寸;按照开孔数量及开孔部位的不同(见图1),将试件划分

表 1 钢材的力学性能 Table 1 Mechanical properties of steel										
$f_{\rm y}/{ m MPa}$	$f_{\rm u}/{ m MPa}$	$A/ \sqrt[p]{0}$	C(180°)	$E_{\rm cj}/{ m J}$						
573	665 5	26.8	2	371						



Fig. 1 Dimension and opening diagram of specimens (size:mm)

为A~F共6组.按照加载制度的不同为各试件命名, 如A-1试件为A组试件中采用NM1加载制度进行加 载的试件.

采用华侨大学结构实验室的CMT5105电子万能试验机进行加载,采用拉压引伸计测量试件的应变,引伸计的标距 $L_0$ 为50 mm,引伸计的拉、压量程均为25%.加载方式采用位移控制,加载速度为0.6 mm/min.在钢材的材性试验中,通过试验数据可获得材性试件的应力-应变曲线,而当试件的应变  $\epsilon$ 达到最大应变  $\epsilon_{max}$ 的50%及以上时,统称此时试件的应变为大应变.为探究Q460高强钢在大应变下循环拉伸的力学性能,试验共制定6种加载制度(见图2),分别为NM1~NM6.其中NM1为单调拉伸加载.在各组试件的单调拉伸试验过程中发现,各组试件均在其55% $\epsilon_{max}$ 附近达到极限抗拉强

度值.因此选用各组单调拉伸试件(A1~F1)的最 大应变  $\epsilon_{max}$ 为基准值,取 55%  $\epsilon_{max}$ 为初始循环点. NM2为重复拉伸加载,每次加载到该组试件的 55%  $\epsilon_{max}$ 后再减小到零,加载循环次数(n)为12,随 后直接加载至试件断裂;NM3~NM6为分级重复 拉伸加载,NM3分级加载至该组试件的 50.0%  $\epsilon_{max}$ 、 52.5%  $\epsilon_{max}$ 、55.0%  $\epsilon_{max}$ 和 57.5%  $\epsilon_{max}$ 后再减小到零,各 级循环加载 2次后在 60.0%  $\epsilon_{max}$ 处循环加载 4次,随 后加载至试件断裂;NM4分级加载至该组试件的 47.0%  $\epsilon_{max}$ 、51.0%  $\epsilon_{max}$ 、55.0%  $\epsilon_{max}$ 和 59.0%  $\epsilon_{max}$ 后再减 小到零,各级循环加载 2次后在 63.0%  $\epsilon_{max}$ 处循环加 载 4次,随后加载至试件断裂;NM5 加载级数与 NM3保持一致,仅将 NM3各级的循环次数翻倍; NM6 加载级数与 NM4 保持一致,仅将 NM4 各级 的循环次数翻倍.



## 2 结果与分析

#### 2.1 试验现象

图 3 给出了 NM1 加载制度下试件典型破坏模 式.结合图 3 分析试件的试验现象:(1)随着试件内部 细微裂缝的扩展,未开孔的 Q460 高强钢试件在最不 利受力截面产生颈缩,在试件加载后期颈缩现象明 显且持续时间较长,随后试件的承载能力快速下降 直至试件破坏.试件拉断时伴有明显的断裂声,断裂 面形状不规则且凹凸不平,断口截面边缘变形明显, 颜色发白,断裂截面中部略有凹陷.未开孔Q460高 强钢试件产生颈缩的位置通常在试件中部附近,受 试件内部缺陷影响较大.(2)经历拉伸后,开孔Q460 高强钢试件的圆形孔洞逐渐沿试件长轴方向拉伸为 椭圆形,在试件开孔处产生明显的应力集中现象,应 力场分布与圆心轴线之间的角度大致为45°.与未开 孔试件相比,开孔试件的颈缩现象并不明显,其颈缩 持续时间较短,试件延性较差.在加载末期,伴随着 清晰的裂缝扩展声,试件沿孔径最大截面处开裂,抵 抗荷载的截面面积进一步减小,随后裂缝在骤增的 应力下贯通整个截面,导致试件破坏.开孔Q460高



(a) Unopened specimen(A-1)

强钢试件于开孔处产生颈缩,最终沿孔径较大处的 截面破坏,试件破坏模式受试件内部缺陷和孔径大 小等多方面因素的综合影响.



(b) Open-hole specimen(F-1)

图 3 NM1加载制度下试件典型破坏模式 Fig. 3 Typical failure modes of specimens under NM1 loading pattern

表2 试验结果

#### 2.2 试验结果汇总

试验结果见表2.表2中 $\epsilon_u$ 为试件极限抗拉强度 $f_u$ 对应的应变; $\delta$ 为试件屈强比( $\delta = f_y/f_u$ );E为试件应 变能,指以应变和应力的形式贮存在材料中的势能, 用于反映材料在拉伸作用下的耗能能力,可由荷载-变形曲线的包络总面积计算得到.

Table 2   Experimental results															
Specimen	fu∕ MPa	fy∕ MPa	$\boldsymbol{\varepsilon}_{\mathrm{u}}$	δ	n/ times	$E/\mathrm{J}$	$A/\frac{0}{0}$	Specimen	fu∕ MPa	fy∕ MPa	ε <sub>u</sub>	δ	n/ times	$E/\mathrm{J}$	$A/\frac{0}{0}$
A-1	665.5	572.9	0.114	0.861	0	616.62	0.268	D-1	563.2	482.0	0.018	0.856	0	81.16	0.060
A-2	676.4	572.0	0.114	0.846	12	634.01	0.300	D-2	535.8	472.0	0.018	0.881	12	74.83	0.056
A-3	652.2	555.0	0.111	0.851	12	547.28	0.240	D-3	545.7	470.0	0.018	0.861	12	81.18	0.050
A-4	677.0	578.4	0.113	0.854	12	602.83	0.240	D-4	547.6	461.0	0.017	0.842	12	72.66	0.050
A-5	640.0	542.0	0.121	0.847	24	584.58	0.250	D-5	544.4	467.0	0.018	0.858	24	75.08	0.040
A-6	674.4	571.2	0.120	0.847	24	612.63	0.242	D-6	544.5	464.0	0.021	0.852	24	74.27	0.054
B-1	619.0	525.0	0.050	0.848	0	195.62	0.108	E-1	612.2	534.0	0.063	0.872	0	258.14	0.110
B-2	566.7	480.0	0.050	0.847	12	179.14	0.090	E-2	592.6	504.0	0.074	0.850	12	245.51	0.120
B-3	600.8	521.0	0.054	0.867	12	192.57	0.080	E-3	603.4	515.0	0.060	0.853	12	240.50	0.120
B-4	609.3	520.0	0.047	0.853	12	186.76	0.096	E-4	603.6	516.0	0.063	0.855	12	253.92	0.116
B-5	605.9	521.0	0.051	0.860	24	197.34	0.096	E-5	556.2	480.0	0.079	0.863	24	242.68	0.120
B-6	608.2	524.0	0.049	0.862	24	186.06	0.102	E-6	625.2	531.0	0.063	0.849	24	258.28	0.120
C-1	610.8	528.0	0.061	0.864	0	235.51	0.112	F-1	559.9	479.0	0.031	0.855	0	120.06	0.070
C-2	611.5	527.0	0.064	0.862	12	222.49	0.104	F-2	548.5	467.0	0.030	0.851	12	107.07	0.068
C-3	619.0	534.0	0.054	0.863	12	232.63	0.098	F-3	549.5	466.0	0.026	0.848	12	125.02	0.076
C-4	622.0	532.0	0.059	0.855	12	223.53	0.100	F-4	542.9	471.0	0.024	0.868	12	112.80	0.070
C-5	599.3	512.0	0.065	0.854	24	231.48	0.104	F-5	552.7	472.0	0.025	0.854	24	117.09	0.076
C-6	617.6	525.0	0.059	0.850	24	241.96	0.104	F-6	554.0	474.0	0.026	0.856	24	112.71	0.078

## 2.3 应力-应变曲线分析

#### 2.3.1 孔洞对试件性能的影响

各组Q460高强钢试件的应力-应变(σ-ε)曲线 如图4所示.由图4可见:在弹性变形阶段,不同加载 制度下各组试件的应力-应变曲线基本重合,说明开 孔位置和开孔数量对试件的弹性模量影响较小;在 弹性阶段之后,随着应变的增大,A组未开孔试件出 现明显的屈服平台,而B~F组开孔试件在各加载制 度下均无明显屈服平台.

结合表2和图4可知,试件的开孔数量和开孔位置 对Q460高强钢试件的断后伸长率A、极限抗拉强度f。 和耗能能力具有显著影响.对比分析图4中相同加载 制度下A组未开孔试件和B~F组开孔试件的应力- 应变曲线可知,在相同的加载制度下,A组未开孔试件 的应力-应变曲线更为饱满,耗能能力更强.A组试件 由于受力截面未经削弱,全截面受拉,在相同加载制度 下其极限抗拉强度为B~F组的105%~125%不等, 且A组试件的断后伸长率均大于各组开孔试件.



Fig. 4 Stress-strain curves of Q460 high strength steel specimens

对比图4中相同加载制度下各组开孔试件的应 力-应变曲线可知:随着试件长轴方向上开孔数量的 增加,受应力集中作用的孔洞数量随之增加,孔洞附 近均产生相应的塑性变形,导致试件的断后伸长率 随加载次数的增大呈上升趋势;试件在加载过程中 抵抗塑性变形的受拉横截面为沿短轴方向的横截 面,其极限抗拉强度主要受该横截面面积的影响,而 B、C、E组试件均为单孔削弱的横截面,因此三者极 限抗拉强度基本相等,变化幅度均不超过9%;D组 试件沿短轴方向增加的孔洞使其受拉横截面面积减 小,从而导致D组试件的极限抗拉强度相较于B、C 组有所降低,最大降低了12%,其断后伸长率仅为B、 C组的38%~62%.

2.3.2 加载制度对试件性能的影响

对比图 4 中同组试件在 NM3、NM5 和 NM4、 NM6 加载制度下的应力-应变曲线可知,在保持 循环应变幅值增量不变,仅增加循环次数时,试件 的极限抗拉强度变化幅度均在 8% 以内,表明循 环次数对 Q460 高强钢试件的极限抗拉强度影响 较小.

保持循环次数不变,仅改变加载制度的循环应 变幅值增量时,相较于循环应变幅值增量为2.5% 的试件,循环应变幅值增量为4.0%的试件在循环 拉伸过程中极限抗拉强度呈上升趋势,最大提高了 12%.说明在一定范围内,随着循环应变幅值增量的 提高,Q460高强钢试件的极限抗拉承载力略微 上升.

#### 2.4 应力循环特征

为分析开孔和未开孔Q460高强钢试件的应力 循环特性,提取NM2加载制度下各组试件的应力-时间(σ-t)曲线,如图5所示.由图5可知:各组试件的 应力均随着 NM2 循环次数的增加而减小,呈明显的 应力软化特征;在循环拉伸初期(n<4时),随着循环 次数的增加,试件的应力下降较快,材料快速软化; 在循环拉伸后期(n>8时),试件的应力下降趋缓.这 表明无论是开孔还是未开孔 Q460高强钢试件,在循 环拉伸作用下均具有应力软化特征,初期呈快速软 化,后期软化速度趋缓.





#### 2.5 耗能能力

#### 2.5.1 孔洞对试件耗能能力的影响

分析表2中不同加载制度下各组Q460高强钢试件的应变能数据可知:在单调拉伸作用下(NM1),A 组试件的应变能约为B组试件的3.15倍、D组试件的 7.60倍,表明未开孔试件的耗能能力显著优于开孔试 件;随着试件沿短轴方向上开孔数量的增加,耗能能 力急剧下降;随着试件沿长轴方向上开孔数量的增 加,耗能能力呈上升趋势,这是由于在单调拉伸或循 环拉伸作用下,沿长轴方向上增加的孔洞使得试件 的塑性变形增大,断后伸长率提高,从而改善了试件 的耗能能力.

#### 2.5.2 加载制度对试件耗能能力的影响

由表2中的应变能数据可知:采用相同的应变幅 值增量时,反复拉伸的循环次数对试件耗能能力的 影响较小;与单调拉伸NM1相比,在NM2~NM6加 载制度下,各组试件的应变能均下降,表明反复拉伸 使得Q460高强钢试件的塑性损伤不断累积,耗能能 力因而下降.

NM3、NM5加载制度的应变幅值增量为2.5%, NM4、NM6加载制度的应变幅值增量为4.0%.在试 验过程中,A组未开孔试件在循环拉伸作用下塑性累 积损伤不明显,塑性变形性能较好,因此在较大应变 幅值增量的加载作用下,试件的变形能量更大.说明 相较于2.5%的应变幅值增量,在4.0%应变幅值增 量循环拉伸下未开孔试件的耗能能力更好.而由于 开孔的不利影响,B~F组试件的塑性损伤不断累积, 使得其在4.0%应变幅值增量循环拉伸下的耗能能 力相较于2.5%应变幅值增量循环拉伸下的耗能能 力相较于2.5%应变幅值增量循环拉伸下的耗能能 力相较于2.5%应变幅值增量循环拉伸下的耗能能 力相较于2.5%应变幅值增量而呈下降趋势.E组试 件在 NM3和 NM5加载制度下所选取的初始循环点 位于应力-应变曲线的应力下降段,循环加载后试件 的延性降低,导致 E 组试件提前破坏,因此其应变能 变化规律出现异常.

# 3 有限元模拟验证

在试件颈缩前,相较于材料的主应力应变,材料 在宽度和厚度方向上的应力应变较小,可以忽略不 计,此时试验所得的真实应力-应变曲线可较好地描 述变形行为.而在试件发生颈缩之后,试件在宽度和 厚度方向上的变形程度增大,应力-应变分布不均 匀,此时的真实应力-应变曲线不可近似等价于等效 应力-应变曲线<sup>[16]</sup>.

结合材料等效应力-应变幂指硬化规律函数和 改进的Bridgeman校正公式<sup>[17]</sup>,对试验得到的试件产 生颈缩后的真实应力-应变曲线进行校正:

$$\sigma_{\text{Tavg}} = \sigma_{\text{eq}} \times \left[1 + \frac{2}{1.1(\epsilon_{\text{eq}} - \epsilon_{\text{N}})}\right] \times \\ \ln\left[1 + \frac{1.1(\epsilon_{\text{eq}} - \epsilon_{\text{N}})}{2}\right]$$
(1)

式中: $\sigma_{eq}$ 为等效应力; $\sigma_{Tavg}$ 为真实应力; $\epsilon_N$ 为材料产生 颈缩时的应变; $\epsilon_{eq}$ 为等效应变,使用真实应变 $\epsilon_{Tavg}$ 近 似替代.

在设立有限元模型的本构关系时,以试件A-1为例,其通过式(1)计算所得的真实应力-应变曲线与 试验所得的等效应力-应变曲线对比如图6所示.

建立各组试件对应的真实应力-应变曲线后,将 相应的数据点输入到Ansys有限元分析软件的材料 属性中,以shell181单元为基础建立有限元模型.有



图 6 试验和公式计算所得应力-应变曲线 Fig. 6 Stress-strain curves obtained by experiment and calculation

限元模拟所得的应力-应变曲线和试验所得的应力-应变曲线对比如图7所示.试验和有限元模型中试件 变形的对比如图8所示.

图 7 表明有限元模拟数据和试验结果吻合良 好.结合图 7 中各试件的最终应变值及应变计算公 式  $\epsilon = \frac{\Delta L}{L} (\Delta L 为伸长量, L 为试件中间平行段长$ 度)可知,图 8 中有限元模拟试件的变形情况和试验试件的变形情况吻合良好.通过试验标定并结合理论计算公式校正的材料本构关系可用于进一步研究.











# 4 结论

(1)未开孔试件的颈缩现象明显且持续时间较长,断裂过程发展极快,有明显的断裂声.开孔试件的颈缩现象不明显,孔洞周围应力集中现象较明显, 在加载末期有清晰的裂缝扩展声,试件通常沿孔径 最大截面处开裂.

(2)与未开孔试件相比,开孔试件的极限抗拉强 度、断后伸长率和应变能均大幅降低.随着沿试件短 轴方向开孔数量的增加,试件的极限抗拉强度、断后 伸长率和应变能均下降.当试件沿长轴方向的开孔 数量增加时,试件的极限抗拉强度基本保持不变,断 后伸长率和应变能则呈上升趋势.

(3)开孔试件和未开孔试件在循环拉伸下均具 有循环软化特征,初期表现为快速软化,后期软化速 度趋缓.

(4)循环次数对试件的力学性能影响较小,而应 变幅值增量对试件极限抗拉强度和应变能的影响较 大,各组开孔试件的极限抗拉强度和应变能均随应 变幅值增量的增大而增加.

## 参考文献:

- [1] 施刚,王元清,石永久.高强度钢材轴心受压构件的受力性 能[J].建筑结构学报,2009,30(2):92-97.
  SHI Gang, WANG Yuanqing, SHI Yongjiu. Behavior of high strength steel columns under axial compression[J]. Journal of Building Structures, 2009, 30(2):92-97. (in Chinese)
- [2] 孙飞飞,谢黎明,崔嵬,等.Q460高强钢单调与反复加载性 能试验研究[J].建筑结构学报,2013,34(1):30-35.
   SUN Feifei, XIE Liming, CUI Wei, et al. Experimental study on material properties of Q460 high strength steel under monotonic and cyclic loading [J]. Journal of Building Struc-

tures, 2013, 34(1):30-35. (in Chinese)

- [3] 施刚,王飞,戴国欣,等.Q460D高强度结构钢材循环加载 试验研究[J].土木工程学报,2012,45(7):48-55.
  SHI Gang, WANG Fei, DAI Guoxin, et al. Experimental study of high strength structural steel Q460D under cyclic loading [J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(7):48-55. (in Chinese)
- [4] 戴国欣,王飞,施刚,等.Q345与Q460结构钢材单调和循环 加载性能比较[J].工业建筑,2012,42(1):13-17,55.
  DAI Guoxin, WANG Fei, SHI Gang, et al. Comparison of monotonic and cyclic performances of structural steel Q345 and Q460[J]. Industrial Construction, 2012,42(1):13-17, 55. (in Chinese)
- [5] 刘佳.Q460钢材及焊缝金属超低周疲劳延性断裂研究[D]. 北京:北京交通大学,2018.
   LIU Jia.Study on extremely low cycle fatigue ductility fracture of Q460 steel and weld zone[D]. Beijing:Beijing Jiaotong University, 2018. (in Chinese)
- [6] JEOM K P. Ultimate strength of perforated steel plates under combined biaxial compression and edge shear loads [J]. Thin-Walled Structures, 2008, 46(2):207-213.
- [7] EL-SAWY K M, NAZMY A S, MARTINI M I. Elasto-plastic buckling of perforated plates under uniaxial compression[J]. Thin-Walled Structures, 2004, 42(8):1083-1101.
- [8] AYDIN KOMUR M, SONMEZ M. Elastic buckling behavior of rectangular plates with holes subjected to partial edge loading[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2015, 112: 54-60.
- [9] 龚晨,周云,钟根全,等.开孔参数对装配式开孔钢板屈曲 约束支撑性能影响研究[J].建筑结构学报,2018,39(增刊 2):328-335.

GONG Chen, ZHOU Yun, ZHONG Genquan, et al. Performance of perforated steel-plate assembled buckling-restrained brace with different perforated parameters[J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(Suppl 2):328-335. (in Chinese)

[10] 周超,肖红飞.开孔钢板的平面弹性抗拉刚度研究[J].钢结构,2016,31(6):23-27.

ZHOU Chao, XIAO Hongfei. Study of the plane elastic tensile stiffness of perforated steel plates [J]. Steel Structure, 2016, 31(6):23-27. (in Chinese)

[11] 周超.开孔钢板拉伸试验研究[J].山西建筑,2018,44(12): 29-30.

ZHOU Chao. Study on tensile test of perforated steel plates [J]. Shanxi Architecture, 2018, 44(12):29-30. (in Chinese)

[12] 谢彩霞,李海锋,吕琨德,等.单调及循环拉伸下开孔Q235
 钢材力学性能试验研究[J].建筑结构,2020,50(2):
 107-112,137.
 XIE Caixia, LI Haifeng, LÜ Kunde. Experimental study on

Q235 steel with holes under monotonic and cyclic tensile loading[J]. Building Structure, 2020, 50(2):107-112, 137. (in Chinese)

[13] 杨勇,陈阳,蔡军伟.开孔钢板剪力连接件静力性能试验[J].中国公路学报,2017,30(3):255-263.

YANG Yong, CHEN Yang, CAI Junwei. Experiment on static behavior of perfobond shear connectors [J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(3):255-263. (in Chinese)

- [14] 季小莲,刘阳军,吴耀华.开孔板式抗剪件受力性能试验研究[J].工业建筑,2012,42(10):133-136,52.
  JI Xiaolian, LIU Yangjun, WU Yaohua. Experiment study on bearing capacity of perforated steel plate shear connectors[J]. Industrial Construction, 2012,42(10):133-136,52. (in Chinese)
- [15] 季小莲,刘阳军,吴耀华.平板开孔式抗剪件的受力性能研究[J].钢结构,2012,27(9):23-26,72.
  JI Xiaolian, LIU Yangjun, WU Yaohua. Finite element analysis of perfobond shear connectors[J]. Steel Structure, 2012, 27(9):23-26,72. (in Chinese)
- [16] KASHFUDDOJA M, RAMJI M. Whole-field strain analysis and damage assessment of adhesively bonded patch repair of CFRP laminates using 3D-DIC and FEA[J]. Composites Part B:Engineering, 2013, 53:46-61.
- [17] ZHANG Z L, HAUGE M, THAULOW C. Determining material true stress-strain curve from tensile specimens with rectangular cross-section [J]. International Journal of Solids and Structures, 1999, 36:3497-3516.