

冷弯薄壁不锈钢拼合箱形截面短柱轴压试验研究

靳春驰^{1,2}, 李海汀^{1,2*}, 段立平^{1,2}, 张佳慧³

(1. 上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240; 2. 上海交通大学 上海市公共建筑和基础设施数字化运维重点实验室, 上海 200240; 3. 上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093)

摘要: 为研究冷弯薄壁不锈钢拼合箱形截面短柱的受力性能, 对14根拼合箱形截面短柱、6根单肢U形或C形截面短柱及5根腹板开孔拼合截面短柱进行了轴压试验研究, 试件材料为S30408奥氏体不锈钢。通过试验得到了不锈钢材料的力学性能指标和轴压试件的极限承载力、荷载-位移曲线, 分析了试件的屈曲模式和破坏特征。试验结果表明: 试件拼合方式对其极限承载力有显著影响, 其中CC截面试件承载力最大, UU截面试件承载力最小; UU截面拼合箱形截面柱的极限承载力大于单肢组成构件的承载力之和; 当腹板开孔率小于0.5时, 试件极限承载力几乎无削弱。将美国规范ASCE/SEI 8-22现有计算方法与试验结果进行了对比, 试验值低于计算方法的计算值, ASCE/SEI 8-22规范方法不能直接用于计算冷弯薄壁不锈钢拼合箱形截面轴压短柱承载力。

关键词: 不锈钢; 冷弯薄壁型钢; 拼合截面柱; 试验研究; 直接强度法

中图分类号: TU391

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2025)04-0014-10

DOI: 10.13969/j.jzgjz.20231025001

Experiment of Cold-Formed Thin-Walled Stainless Steel Built-up Box Section Stub Columns Under Axial Compression

JIN Chunchi^{1,2}, LI Haiting^{1,2*}, DUAN Liping^{1,2}, ZHANG Jiahui³

(1. School of Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. Shanghai Key Laboratory for Digital Maintenance of Buildings and Infrastructure, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 3. School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

*Corresponding author: haiting.li@sjtu.edu.cn

Abstract: In order to study the behavior of cold-formed thin-walled stainless steel built-up box section stub columns, a total of 25 fixed-ended stub columns including 14 built-up section specimens without holes, 6 unstiffened channel or edge-stiffened channel section specimens and 5 built-up section specimens with circular web holes were tested under axial compression. The material of specimens was S30408 austenitic stainless steel. The experimental results involving failure modes, ultimate capacities and responses of load versus axial shortening were obtained and fully documented. The experimental results show that the type of built-up section has a significant effect on the ultimate bearing capacity of the built-up section column, in which the test specimens of CC-section and UU-section exhibit the largest and smallest bearing capacity respectively. The ultimate bearing capacity of built-up UU-section specimens is larger than the sum of the bearing capacity of the single channel section specimens. The holes on the web have almost no

收稿日期: 2023-10-25

基金项目: 国家自然科学基金(52378166, 52008243, 52178147)

作者简介:

靳春驰(1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事冷弯型钢结构方面的研究。E-mail: jincc03@sjtu.edu.cn。

通信作者:

李海汀(1988—), 男, 博士, 副教授, 主要从事冷弯型钢结构方面的研究。E-mail: haiting.li@sjtu.edu.cn。

weakening effect on the ultimate bearing capacity of the specimens when the hole diameter-to-web height ratio is less than 0.5. The test results were compared with predictions calculated by the design method as per the current American Specification ASCE/SEI 8-22. It is found that the test strengths were lower than the predicted values, indicating that the current codified provision in ASCE/SEI 8-22 is not applicable to be directly used for ultimate bearing capacity predictions of the cold-formed thin-walled stainless steel built-up box section stub columns.

Keywords: stainless steel; cold-formed steel; built-up section column; experimental investigation; direct strength method

不锈钢是高性能的绿色建筑材料,具有力学性能优、耐腐蚀性强、外观精美、可回收利用等优点,在工程建设领域具有独特的优势,受到众多建筑师和工程师的青睐^[1-4]。不锈钢材料属于典型的非线性材料,无明显的屈服点和屈服平台,具有很强的应变强化能力^[5-6],非常适合用于制作各类冷弯截面。冷弯型钢通常由钢带或钢板经过辊压或折弯等工艺冷加工成型,与混凝土等传统建筑材料相比,具有强度高、刚度大、自重轻、建造效率高且可循环使用等优点,在现代建筑中具有广阔的应用前景^[7-10]。

在实际工程中,冷弯薄壁型钢越来越多地被用于梁、柱等主要承重构件。为了提高构件的承载能力,常常将2个或多个冷弯薄壁型钢单肢截面通过连接件组装成拼合截面构件^[11]。这类拼合截面构件不仅承载力显著提高,而且拼装简易灵活,具有着良好的应用前景。我国现行《低层冷弯薄壁型钢房屋建筑技术规程》(JGJ 227—2011)^[12]和《冷弯薄壁型多层住宅技术标准》(JGJ/T 421—2018)^[13]将CU、CC抱合截面列为常用截面类型。

国内外相关研究人员对拼合截面轴压构件的受力性能进行了研究。STONE等^[14]对32根冷弯薄壁型钢双肢开口拼合柱进行了轴压试验,发现采用修正长细比法预测其承载力时过于保守。YOUNG等^[15]对17根 Σ 形截面组成的拼合箱形柱开展了轴压试验,并探讨了直接强度法对冷弯薄壁型钢拼合柱的适用性。ZHANG等^[16]对由两个C形截面组成的腹板加劲双肢开口拼合柱进行了轴压试验,观测到了畸变屈曲、局部-畸变和局部-畸变-整体相关屈曲的破坏现象,随后采用直接强度法对试件的承载力进行了计算。李元齐等^[17]对2个C形截面构件拼合前后的整体屈曲、局部屈曲和畸变屈曲性能进行了研究,分析了安装误差、螺钉间距对承载力的影响,提出了组合截面轴压构件的承载力设计方法。VY等^[18]对2个C形截面轴压拼合柱开展了试验和有限元研究,探讨了直接强度法的适用性并提出了修正公式。周天华等^[11]、SANG等^[19]对冷弯薄壁型钢双肢和多肢拼合截面轴压柱进行了研究,测试了不同拼合截面构件的轴压承载力,并在有效宽度法和直接强度法的基础上,提出了针对各类拼合轴压柱的承载力计算改进方法。杨竞杰等^[20]基于已有的试验研究成果^[21],建立了

四肢拼合柱的数值分析模型并进行了参数分析,研究了具有不同尺寸和构造的冷弯薄壁型钢四肢箱型拼合截面柱的承载能力。DOBRIĆ等^[22-23]对不锈钢C形截面拼合而成的双肢工字型截面长柱开展了试验和有限元研究,探究了螺钉间距对拼合构件承载力的影响,并分析评价了欧洲和美国规范的适用性。JIANG等^[24]对不锈钢U形截面拼合而成的双肢工字形和UU箱形截面柱开展了试验和有限元研究,并对现行欧洲和2002版美国规范的计算结果进行了分析评价,提出了相应的改进方法。

基于以上文献调研可以发现,国内外对碳钢拼合截面柱开展了大量研究,但对不锈钢拼合截面轴压构件的研究十分有限,相关试验数据较为匮乏。UU、CU、CC是最简单的拼合箱形截面形式,但目前尚无比较这3种箱形截面轴压柱受力性能的研究。鉴于此,本文对不同拼合方式的轴压短柱进行试验,研究UU、CU、CC三种不同拼合方式箱形截面构件的轴压性能,同时设计单肢截面试件和腹板开孔拼合试件,探究试件组合前后的拼合效应及腹板开孔对拼合截面试件极限承载力的影响。将试验结果与《美国冷成型不锈钢结构设计规范》(ASCE/SEI 8-22)^[25]中给出的极限承载力预测值进行对比,探究规范设计方法对冷弯薄壁不锈钢拼合箱形截面轴压短柱的适用性。

1 试验概况

1.1 试件设计

试验试件为不锈钢拼合箱形截面轴压短柱,拼合截面由2个单肢U形(槽钢)或C形(卷边槽钢)截面通过抽芯铆钉在翼缘处连接拼合而成,根据组成构件的不同,可分为UU、CU、CC截面(图1),以探究不同拼合方式对试件受力性能的影响。为研究拼合截面试件和单肢截面试件的承载力关系及腹板开孔对短柱承载力的影响,本试验设计了单肢U形或C形截面试件及腹板开孔拼合截面试件。所有试件均由厚度为1.5 mm、2.0 mm的奥氏体不锈钢板折弯而成,不锈钢牌号为S30408,材料满足《不锈钢冷轧钢板和钢带》(GB/T 3280—2015)^[26]中对于元素含量的要求。

拼合截面试件由2个腹板高度为100 mm、120 mm,

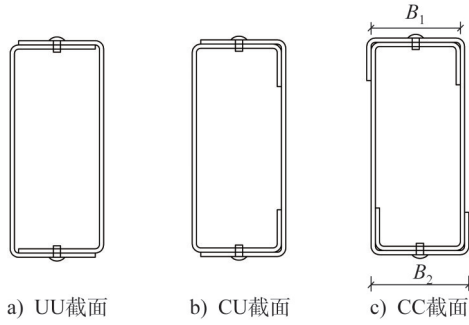


图1 拼合截面构造

Fig. 1 Configurations of built-up closed sections

厚度为 1.5 mm、2.0 mm 的单肢 U 形或 C 形截面拼合而成。不开孔拼合截面试件有 3 种拼合方式, 4 种截面类型, 包括 2 个重复性试验共 14 个试件。如图 1 所示, UU 截面由 2 个 U 形截面拼合而成, CU 截面由 U 形和 C1 截面拼合而成, CC 截面由 2 个 C2 截面拼合而成。为使 2 个 C 形截面在拼合时能够实现嵌套, 相比于 C1 截面, C2 截面的 2 个翼缘具有不同的尺寸, 单肢截面示意图如图 2 所示。为了对比不同拼合方式对试件承载力的影响, 3 种拼合后的截面具有相同的外径尺寸。试件腹板高厚比为 50、60、67、80, 分别记为 S1、S2、S3、S4 截面, 拼合截面试件编号规则如图 3 所示, 单肢试件截面类型记为 C 或 U, 开孔拼合试件的开孔率取为 0.33、0.50、0.67 和 0.83。

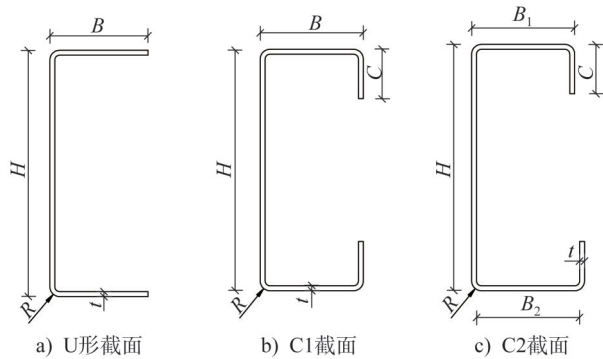


图2 单肢截面示意图及尺寸标识

Fig. 2 Profiles of channel sections and definition of symbols

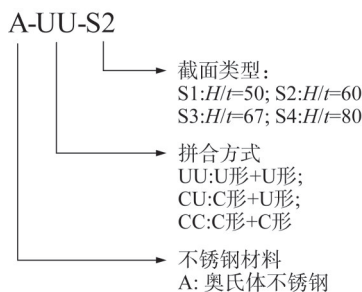


图3 试件编号规则

Fig. 3 Identification rule of specimens

单肢截面试件共有 6 个, 包括 2 个 U 形截面试件、2 个 C1 截面试件和 2 个 C2 截面试件, 试件厚度均为 2 mm, 腹板高度为 100 mm、120 mm, 翼缘宽度为 40 mm, 卷边宽度为 20 mm, 试件长度为 3 倍的腹板高度。5 个腹板开孔拼合试件以 UU 截面和 S2 截面为基础, 在试件柱中腹板位置开设不同直径的圆形孔洞, 开孔率即孔径与腹板高度的比值, 分别为 0.33、0.50、0.67 和 0.80, 以研究腹板开孔对试件承载力的影响。

拼合试件均由平圆头抽芯铆钉在翼缘处拼合而成, 铆钉直径为 4.8 mm, 长度为 10 mm。试件长度为 300 mm、360 mm, 均为 3 倍的腹板高度。抽芯铆钉沿试件长度方向间隔 100 mm 布置, 对于长度为 300 mm、360 mm 的试件, 分别在距其端部 50 mm、40 mm 处布置铆钉, 如图 4 所示。

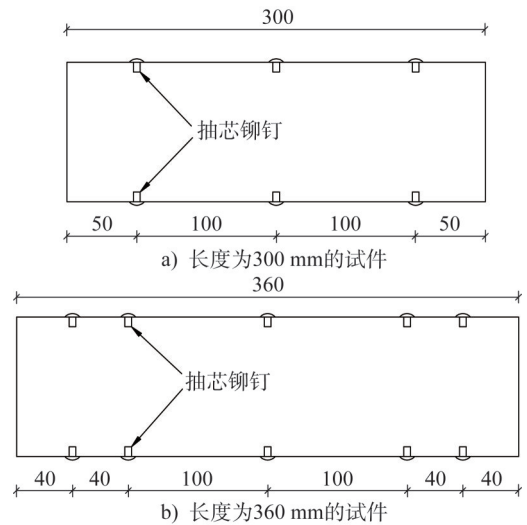


图4 抽芯铆钉布置(单位:mm)

Fig. 4 Arrangement of self-plugging rivets (unit: mm)

1.2 材性试验

为确定 S30408 奥氏体不锈钢的弹性模量、名义屈服强度和抗拉强度等材料力学性能指标, 对不同厚度的材性试件进行平板段标准拉伸试验。为探究冷弯效应对材料力学性能的影响, 本文开展了转角段的拉伸试验。拉伸试件均从 U 形截面试件中沿钢板轧制方向(试件轴向)取材。其中, 平板段材性试样标距段长 50 mm、宽 12.5 mm, 转角段材性试样标距段长 25 mm、宽 4.0 mm。

采用试验机进行拉伸试验(图 5), 按照《金属材料拉伸试验 第 1 部分: 室温试验方法》(GB/T 228.1—2021)^[27] 的要求及 HUANG 等^[28] 的建议方法进行加载, 测得的材料基本力学性能指标如表 1 所示, 其中 E 为弹性模量, $\sigma_{0.2}$ 为名义屈服强度, σ_u 为抗拉强度, ϵ_f 为断后伸长率, n 为应变强化系数。



图5 材性试验装置

Fig. 5 Setup of tensile coupon test

表1 材料力学性能

Table 1 Material properties obtained from tensile coupon tests

厚度/mm	平板段					厚度/mm	转角段				
	E/GPa	$\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	σ_u/MPa	$\epsilon_f/\%$	n		E/GPa	$\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	σ_u/MPa	$\epsilon_f/\%$	n
1.5	197.8	255.6	685.4	71.7	7.5	1.5	208.1	464.8	838.4	43.1	4.9
2.0	194.9	280.6	758.1	87.1	6.1	2.0	209.3	542.5	921.4	37.7	3.8

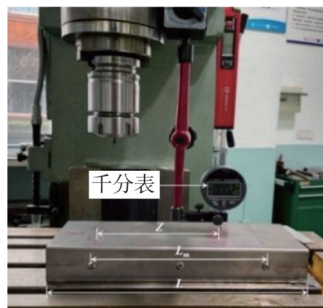


图6 初始缺陷测量装置

Fig. 6 Initial imperfection measurement setup

1.4 试验装置、测点布置及加载方式

短柱轴压试验采用四柱式液压试验机,试验机上部为球铰连接的上加载板,正式加载前通过4个螺栓约束上部球铰的转动,下部为油泵连接的水平固定加载板,两端加载板与试件压紧后即可实现两端固接的约束条件,如图8所示。试验采用DH5922D动态数据采集仪记录位移和应变数据,数据采集频率为10 Hz。为防止试件因应力集中而过早发生破坏,本试验设计了夹持装置对试件端部进行加固,避免其发生破坏。在试件四周对称布置4个位移计量测轴向压缩位移,同时在试件柱中截面四周布置4个应变片。

安装试件时,为使其轴心受压,首先在加载板上根据试件几何形心进行对中,然后进行预加载,以确保加载与数据采集系统的可靠性并消除试件与试验装置之间可能存在的间隙。同时,根据柱中4个应变片的读数调整试件,进一步进行试件物理对中^[29]。在试验过程中采用位

1.3 初始缺陷

冷弯型钢受压构件由于其薄壁特性,对初始几何缺陷较为敏感,构件受力性能受初始缺陷影响较大。在进行轴压试验前,对4个代表试件(A-CU-S1、A-CU-S2、A-UU-S3、A-UU-S4)进行局部几何初始缺陷测量。采用千分表和铣床沿试件轴向方向测量初始缺陷(图6),外凸变形取值为正,内凹变形取值为负,测量时沿试件轴向间隔5 mm读取千分表示数,最终结果如图7所示。

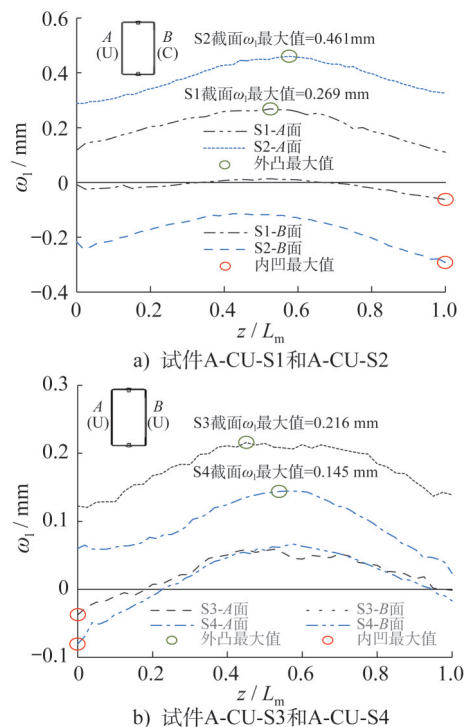


图7 沿试件长度方向局部初始缺陷分布

Fig. 7 Distributions of initial local imperfections along the length of specimen

移加载控制,加载速率为 $0.2 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$,直至试件承载力下降至极限承载力的85%。

2 试验结果

2.1 不开孔拼合截面试件

不开孔拼合截面试件均发生局部屈曲破坏,抽芯铆

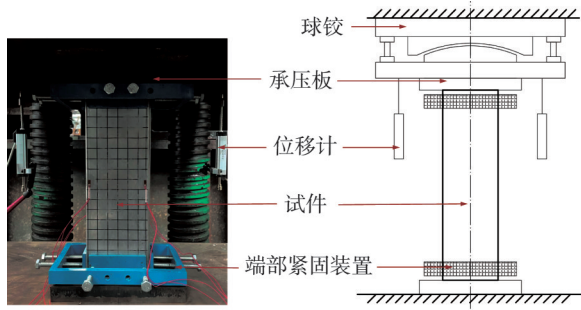


图8 试验装置示意图

Fig. 8 Schematic diagram of test setup

钉在试验过程中并未发生任何松动。在加载前期,材料处于弹性变形阶段,构件无明显变形。在试件达到极限承载力前,其中部的腹板和翼缘分别发生向外凸曲和向内凹曲,可观测到明显的局部屈曲半波。在试件达到极限承载力后,局部屈曲现象明显,直至停止加载。图9a)为不开孔拼合截面试件的典型破坏模式。

拼合方式相同时,S2截面试件与S1截面试件的承载力较为相近,S4截面试件与S3截面试件的承载力较为相近。其中,试件A-UU-S1、A-CU-S1、A-CC-S1极限承载力分别为134.2 kN、164.7 kN、205.7 kN,CU、CC截面试件相对于UU截面试件,极限承载力分别提高23%、53%。试件A-UU-S3、A-CU-S3、A-CC-S3极限承载力分别为75.1 kN、104.3 kN、128.3 kN。CU、CC截面试件相对于UU截面试件,承载力分别提高39%、71%,而净截面积分别提高10%、23%,承载力提高幅度远大于净截面积提高幅度。

图10为不开孔拼合截面试件的荷载-位移曲线,试件A-CC-S1在试验时采集器与电脑断联,未获得完整的荷载-位移曲线。可以看出,在加载初期构件承载力与轴向位移之间呈线性正相关,并且2 mm板厚的试件(S1、S2截面)比1.5 mm板厚的试件(S3、S4截面)具有更高的初始刚度。随着荷载继续增加,试件刚度逐渐减小,轴向位移与荷载呈非线性关系。

图11为试件 P_{Exp}/P_y 随宽厚比变化的趋势,其中 P_{Exp}

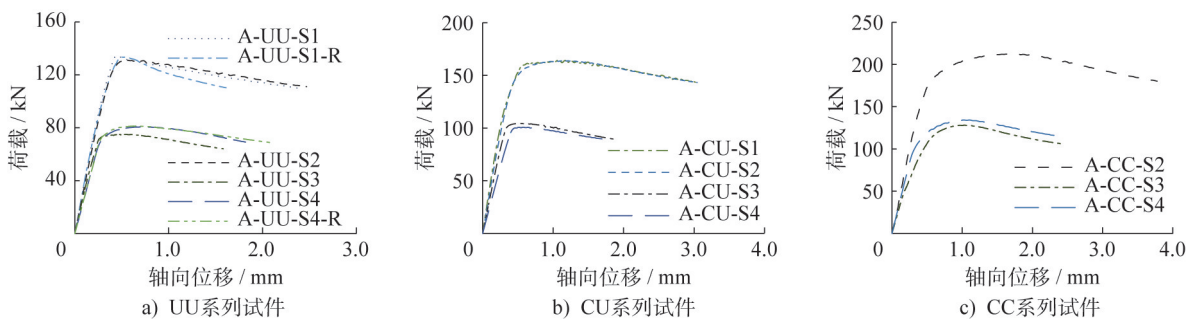


图10 不开孔拼合截面试件荷载-轴向位移曲线

Fig. 10 Load-axial displacement curves of built-up section specimens without holes

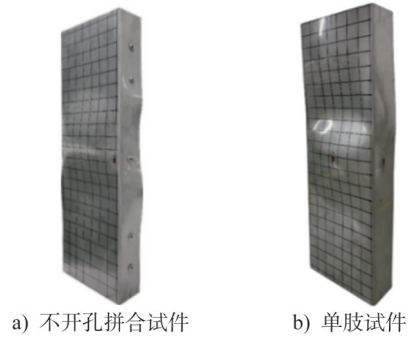


图9 典型破坏模式

Fig. 9 Typical failure modes

为极限承载力试验值, P_y 为截面面积和屈服强度的乘积。可以看出,一方面随着腹板宽厚比的增加, P_{Exp}/P_y 逐渐降低;另一方面,相同宽厚比下,CC截面试件 P_{Exp}/P_y 最大,UU截面试件 P_{Exp}/P_y 最小,前者比后者高20%~40%,说明CC截面试件破坏时更接近材料的屈服点,相较于UU截面试件具有更好的屈曲后性能。

2.2 单肢截面试件

单肢C形、U形截面试件均发生局部屈曲破坏,在试验加载初期,试件处于线弹性阶段,未观察到局部屈曲现象。随着荷载增加,试件腹板出现鼓曲,可观测到明显的局部屈曲半波,直至停止加载。单肢截面试件的最终破坏模式如图9b)所示。

图12为单肢截面试件的荷载-位移曲线,可以看出,试验加载前期轴向位移随荷载的增加呈线性增长,且C形截面试件具有比U形截面试件更高的初始刚度。当荷载接近试件极限承载力时,其刚度逐渐变小,轴向位移随荷载增加呈非线性增长。试件A-U-S1、A-C1-S1极限承载力分别为60.7 kN、101.4 kN,试件A-U-S2、A-C1-S2极限承载力分别为60.7 kN、101.8 kN,C形截面试件与U形截面试件相比,极限承载力提高约68%,可见翼缘卷边对试件承载力影响较大。

根据单肢截面试件和不开孔拼合截面试件的试验结果计算发现,试件A-UU-S1、A-UU-S2承载力相较于2

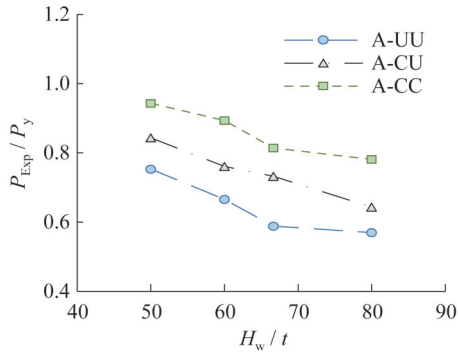


图 11 试件 P_{Exp}/P_y 变化趋势

Fig. 11 P_{Exp}/P_y changing trends of specimens

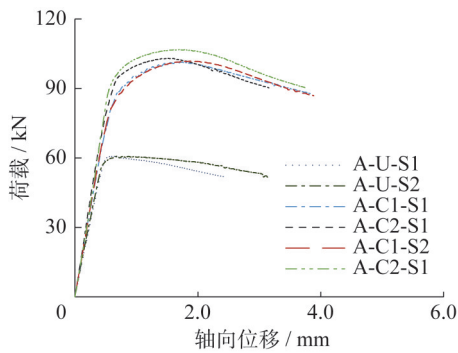


图 12 单肢截面试件荷载-轴向位移曲线

Fig. 12 Load-axial displacements of single limb section specimens

个单肢 U 形截面试件承载力之和分别提高 11%、8%，UU 拼合箱形截面柱的极限承载力大于单肢试件承载力之和，具有较明显的“1+1>2”的拼合效应。而 CU、CC 截面试件极限承载力相较于单肢试件承载力之和提升较小，无明显拼合效应。

2.3 开孔拼合截面试件

为方便建筑水、暖、电等设备管道在冷弯薄壁型钢构件中通过，常在冷弯薄壁型钢构件的腹板开设孔洞。腹板开孔对于冷弯薄壁型钢构件的屈曲模式及承载力等均具有一定影响^[30]。本试验中抽芯铆钉在试验过程中未发生任何松动。在加载前期，材料处于弹性变形阶段，未观测到明显变形。达到极限承载力前，试件 A-UU-S2-0.33 柱中出现鼓曲，可观测到明显的局部屈曲半波，圆孔附近未发现明显变形。试件 A-UU-S2-0.50、A-UU-S2-0.67、A-UU-S2-0.83 在圆孔附近发生破坏，变形随荷载增加逐渐增大，直至停止加载。图 13 为开孔拼合截面试件的典型破坏模式。

开孔拼合截面试件 A-UU-S2-0.33、A-UU-S2-0.50、A-UU-S2-0.67、A-UU-S2-0.83 的极限承载力分别为 130.6 kN、131.6 kN、120.3 kN 和 94.7 kN。相较于不开孔

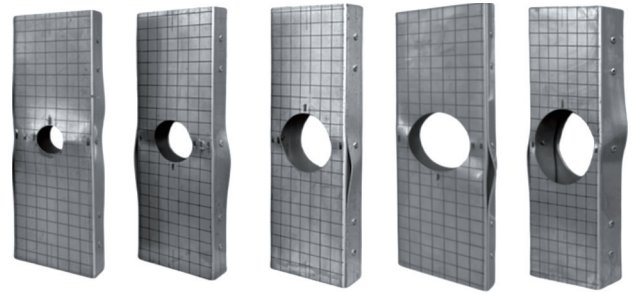


图 13 开孔拼合截面试件典型破坏模式

Fig. 13 Typical failure modes of built-up section specimens with holes

拼合截面试件 A-UU-S2，开孔率为 0.33、0.50 的试件极限承载力分别变化了 0.32%、0.45%，开孔率为 0.67、0.83 的试件极限承载力分别降低了 9.42%、27.71%。图 14 为不同开孔率试件的荷载-位移曲线，可以看出：当开孔率为 0.33 时，腹板开孔对试件刚度和极限承载力均无影响；当开孔率为 0.50 时，试件刚度变小但对极限承载力无影响；当开孔率大于 0.50 时，随着开孔率的增大，试件极限承载力和刚度均随之下降。

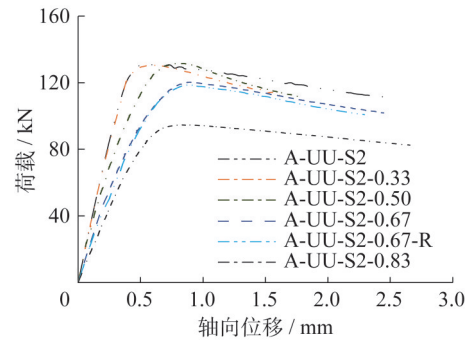


图 14 腹板开孔拼合截面试件荷载-轴向位移曲线

Fig. 14 Load-axial displacements of built-up section specimens with web holes

3 承载力计算

我国现行《冷弯薄壁型钢结构技术规范》(GB 50018—2002)^[31]和《不锈钢结构技术规程》(CECS 410:2015)^[32]中，对拼合截面试件轴压极限承载力尚无设计指导。本文采用《美国冷成型不锈钢结构设计规范》(ASCE/SEI 8-22)中的直接强度法计算拼合截面轴压构件的极限承载力。

3.1 《美国冷成型不锈钢结构设计规范》(ASCE/SEI 8-22)

目前，ASCE/SEI 8-22 已经在 SEI/ASCE 8-02 的基础上进行了广泛的修订，并于 2023 年正式颁布，全面代替 SEI/ASCE 8-02。本文所有拼合截面试件均未发生畸

变屈曲,根据ASCE/SEI 8-22规定,轴心受压构件的极限承载力由式(1)计算。

$$P_n = \min(P_{ne}, P_{nl}) \quad (1)$$

式中: P_{ne} 、 P_{nl} 分别为构件全截面有效时的承载力、局部屈曲承载力。

P_{ne} 的计算公式如式(2)~(3)所示。

$$P_{ne} = A_g F_n \quad (2)$$

$$F_n = \begin{cases} F_y + (1 - \lambda_c / \beta_0)(F_u - F_y) & \lambda_c \leq \beta_0 \\ 1.2\beta_1^{\lambda_c} F_y & \beta_0 < \lambda_c \leq 1.8 \\ \beta_2 F_{cre} & \lambda_c > 1.8 \end{cases} \quad (3)$$

式中: A_g 为毛截面面积; F_y 、 F_u 分别为屈服强度和极限强度; α 、 β_0 、 β_1 和 β_2 为奥氏体不锈钢的计算系数,根据规范规定,分别取1.13、0.24、0.41和0; $\lambda_c = \sqrt{F_y / F_{cre}}$,其中 F_{cre} 为整体屈曲临界应力,根据式(4)~(5)计算。

$$F_{cre} = \frac{\pi^2 E}{(KL/r)^2} \quad (4)$$

$$F_{cre} = \frac{\pi^2 E I_{avg}}{A_g (KL)^2} \quad (5)$$

式中: E 为弹性模量; K 为有效长度系数; L 为试件长度; r 为截面回转半径。对于开孔试件, I_{avg} 计算公式如式(6)所示。

$$I_{avg} = \frac{I_g L_g + I_{net} L_{net}}{L} \quad (6)$$

式中: I_g 为毛截面惯性矩; I_{net} 为净截面惯性矩; L_g 为无孔段试件长度; L_{net} 为开孔长度。

P_{nl} 的计算公式如式(7)~(8)所示。另外,针对开孔试件,根据式(8)规定,当式(7)计算所得的 P_{nl} 大于 $A_{net} F_y$ 时,则其极限承载力为 $A_{net} F_y$ 。

$$P_{nl} = \begin{cases} P_{ne} & \lambda_1 \leq 0.550 \\ \left[0.95 - 0.22 \left(\frac{P_{crl}}{P_{ne}} \right)^{0.5} \right] \left(\frac{P_{crl}}{P_{ne}} \right)^{0.5} P_{ne} & \lambda_1 > 0.550 \end{cases} \quad (7)$$

$$P_{nl} \leq A_{net} F_y \quad (8)$$

式中: $\lambda_1 = \sqrt{P_{ne} / P_{crl}}$,其中 P_{crl} 为局部屈曲弹性临界荷载; A_{net} 为净截面积。

对于冷弯薄壁不锈钢轴压构件,弹性屈曲临界荷载是利用直接强度法计算其极限承载力的关键。本文采用有线条分析软件CUFSM计算拼合截面的弹性屈曲临界荷载。有限条法将试件沿长度方向划分为统一长条,由于间隔布置紧固件或局部开孔,试件沿纵向具有不连续性,CUFSM软件无法准确模拟该情形。对于不开孔拼合截面试件,本文采用“实心块”模拟拼合试件中间隔布置的抽芯铆钉,在抽芯铆钉实际位置处布置实心块连接两个单肢试件,其中实心块宽度等于抽芯铆钉直径^[10]。

对于单肢截面试件,其截面沿长度方向连续,根据实测尺寸数据建立模型计算弹性屈曲临界荷载。

对于开孔拼合截面试件,本文借鉴MOEN等^[33]采用的方法来计算开孔截面弹性屈曲临界荷载,如式(9)所示。

$$P_{crl} = \min(P_{crl-nh}, P_{crl-h}) \quad (9)$$

式中: P_{crl-nh} 为不开孔截面(毛截面)的弹性屈曲临界荷载; P_{crl-h} 为开孔截面(净截面)的弹性屈曲临界荷载。

3.2 计算结果对比

根据《美国冷成型不锈钢结构设计规范》(ASCE/SEI 8-22)中关于轴压构件的极限承载力计算方法,本文计算了14个不开孔拼合截面试件、6个单肢截面试件和5个开孔拼合截面试件的极限承载力,并将试验数据 P_{Exp} 与极限承载力预测值 P_{ASCE} 进行对比,对比结果如表2~3所示,其中 P_{ASCE} 为ASCE/SEI 8-22的极限承载力预测值。

表2 不开孔拼合截面试件承载力试验结果与预测值对比

Table 2 Comparison between test results and predicted results of bearing capacities of built-up section specimens without holes

试件编号	破坏模式	$\delta_u /$ mm	$P_{Exp} /$ kN	$P_{Exp} /$ P_y	$P_{ASCE} /$ kN	$P_{Exp} /$ P_{ASCE}
A-UU-S1	局部屈曲	0.44	134.2	0.76	209.7	0.64
A-UU-S1R	局部屈曲	0.51	133.5	0.75	209.7	0.64
A-UU-S2	局部屈曲	0.57	131.0	0.67	192.5	0.68
A-UU-S3	局部屈曲	0.55	75.1	0.59	131.1	0.57
A-UU-S4	局部屈曲	0.73	80.8	0.57	119.9	0.67
A-UU-S4R	局部屈曲	0.67	81.4	0.57	119.9	0.68
A-CU-S1	局部屈曲	1.07	164.7	0.84	232.6	0.71
A-CU-S2	局部屈曲	1.13	163.8	0.76	212.3	0.77
A-CU-S3	局部屈曲	0.54	104.3	0.73	145.8	0.72
A-CU-S4	局部屈曲	0.57	100.8	0.64	132.6	0.76
A-CC-S1	局部屈曲	2.26	206.7	0.94	264.5	0.78
A-CC-S2	局部屈曲	1.79	213.5	0.89	238.8	0.89
A-CC-S3	局部屈曲	1.03	128.3	0.81	162.5	0.79
A-CC-S4	局部屈曲	1.01	134.3	0.78	148.1	0.91

注: δ_u 为极限荷载对应的轴向位移。

由分析结果可知,本试验中所有奥氏体不锈钢拼合截面短柱的极限承载力试验值 P_{Exp} 均小于规范预测值 P_{ASCE} 。整体而言,不开孔拼合截面试件 P_{Exp} / P_{ASCE} 的变化范围为0.57~0.91,平均值为0.73,ASCE/SEI 8-22极限承载力预测值比试验结果高约37%。不开孔拼合截面试

表3 开孔拼合截面试件承载力试验结果与预测值对比

Table 3 Comparison between test results and predicted results of bearing capacities of built-up section specimens with holes

试件编号	δ_u /mm	P_{Exp} /kN	P_{ASCE} /kN	P_{Exp}/P_{ASCE}
A-UU-S2-0.33	0.58	131.0	155.4	0.84
A-UU-S2-0.50	0.84	130.6	135.6	0.97
A-UU-S2-0.67	0.89	121.6	115.7	1.04
A-UU-S2-0.67R	0.88	120.3	115.7	1.03
A-UU-S2-0.83	0.83	118.7	95.8	0.99

注： δ_u 为极限荷载对应的轴向位移。

件 P_{Exp} 与 P_{ASCE} 的对比结果如表2所示。对于UU、CU、CC三组不同截面类型的试件,ASCE/SEI 8-22极限承载力预测值相较于试验值,分别平均高约54%、35%、19%。

图15为不开孔拼合截面试件试验结果与DSM(ASCE)曲线的对比,DSM(ASCE)曲线为ASCE/SEI 8-22中设计公式(式(7))得到的强度曲线。可以看出,UU、CU、CC三种拼合类型试件的试验数据均位于DSM曲线以下,其主要原因是DSM本质是半理论半经验公式,而式(7)中的经验计算系数拟合未涵盖拼合箱形截面的数据^[34]。其中,CC截面试件试验结果最接近DSM曲线,CU截面试件次之,UU截面试件试验结果与DSM曲线偏离最大。

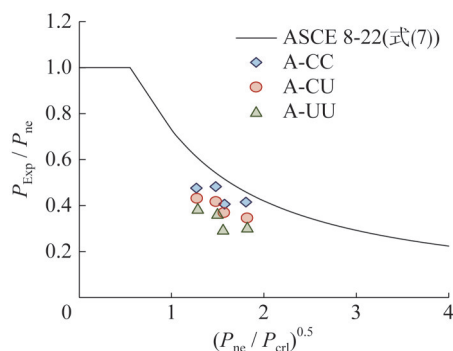


图15 不开孔拼合截面试件试验结果与DSM曲线对比

Fig. 15 Comparison between test results and DSM curve of built-up section specimens without holes

对于开孔试件,ASCE/SEI 8-22极限承载力预测值和试验数据的对比结果如表3所示, P_{Exp}/P_{ASCE} 的平均值为0.97,ASCE/SEI 8-22极限承载力预测值比试验值高约10%,预测结果偏不安全。

4 结论

本文对25个S30408不锈钢短柱进行了轴心受压试

验研究,短柱试验边界条件为两端固接,拼合试件变量考虑UU、CU、CC三种不同拼合方式和50、60、67、80四种板件宽厚比。将试验结果与《美国冷成型不锈钢结构设计规范》(ASCE/SEI 8-22)中直接强度法的承载力计算结果进行比较,得出以下主要结论:

(1) 不开孔拼合试件、单肢C形及U形试件、开孔拼合试件的破坏现象相近,在加载过程中均发生局部屈曲破坏。破坏发生在柱中附近,腹板向外凸曲,翼缘向内凹曲。随着变形增大,试件逐渐丧失承载力直至破坏。

(2) 拼合方式对拼合构件的极限承载力有显著影响。当板件宽厚比相同时,CC截面试件极限承载力最大,UU截面试件极限承载力最小,CU、CC截面两组试件的极限承载力分别比UU截面试件的极限承载力高约30%、60%。

(3) 拼合箱形截面柱的极限承载力大于相应单肢组成构件的承载力之和。其中,UU截面存在显著的“1+1>2”的拼合效应,相较于单肢截面试件承载力之和,UU截面试件承载力高约10%,CU、UU截面试件承载力提高幅度较小,无明显拼合效应。

(4) 腹板开小孔对试件极限承载力几乎无削弱,但随着开孔率的增大,试件极限承载力开始降低。相较于不开孔试件,开孔率为0.33、0.50时,试件极限承载力无变化;而开孔率提高至0.83时,试件极限承载力降低约28%。

(5) 《美国冷成型不锈钢结构设计规范》(ASCE/SEI 8-22)中的现有计算方法不能直接用于计算冷弯薄壁不锈钢拼合箱形截面轴压短柱的极限承载力。

参考文献:

- [1] 王元清,袁焕鑫,石永久,等. 不锈钢结构的应用和研究现状[J]. 钢结构, 2010, 25(2): 1-12, 18. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9963.2010.02.001.
WANG Yuanqing, YUAN Huanxin, SHI Yongjiu, et al. A review of current applications and research of stainless steel structure[J]. Steel Construction, 2010, 25(2): 1-12, 18. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9963.2010.02.001. (in Chinese)
- [2] RASMUSSEN K J R, HANCOCK G J. Design of cold-formed stainless steel tubular members. I: columns[J]. Journal of Structural Engineering, 1993, 119(8): 2349-2367. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1993)119:8(2349).
- [3] GARDNER L. Stability and design of stainless steel structures—review and outlook[J]. Thin-Walled Structures, 2019, 141: 208-216. DOI: 10.1016/j.tws.2019.04.019.
- [4] LI H T, YOUNG B. Cold-formed stainless steel RHS members undergoing combined bending and web crippling: testing, modelling and design [J]. Engineering Structures, 2022, 250: 113466. DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.113466.
- [5] 王元清,袁焕鑫,石永久,等. 不锈钢结构构件稳定性的研究进展[J]. 工业建筑, 2012, 42(5): 1-11. DOI: 10.13204/j.

- gyjz2012.05.011.
WANG Yuanqing, YUAN Huanxin, SHI Yongjiu, et al. Research advances in stability of stainless steel structural members[J]. Industrial Construction, 2012, 42(5): 1-11. DOI: 10.13204/j.gyjz2012.05.011. (in Chinese)
- [6] 舒赣平, 郑宝锋, 沈晓明. 冷成型不锈钢管轴心受压柱试验研究[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(5): 87-95. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2013.05.010.
SHU Ganping, ZHENG Baofeng, SHEN Xiaoming. Experimental study on cold-formed stainless steel tubular columns subjected to axial loading [J]. Journal of Building Structures, 2013, 34 (5) : 87-95. DOI: 10.14006/j. jzjgxb. 2013.05.010. (in Chinese)
- [7] ZHOU Xuhong. Research progress on cold-formed steel structural framing[J]. Steel Construction (Chinese & English), 2020, 35(1): 1-19. DOI: 10.13206/j.gjgse20010804.
- [8] 王春刚, 张耀春, 张壮南. 冷弯薄壁斜卷边槽钢受压构件的承载力试验研究[J]. 建筑结构学报, 2006, 27(3): 1-9. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2006.03.001.
WANG Chungang, ZHANG Yaochun, ZHANG Zhuangnan. Experimental investigation on channel columns with inclined simple edge stiffeners under compression loading [J]. Journal of Building Structures, 2006, 27 (3) : 1-9. DOI: 10.14006/j. jzjgxb. 2006.03.001. (in Chinese)
- [9] 李元齐, 李功文, 沈祖炎, 等. 冷弯厚壁型钢考虑冷弯效应的屈服强度计算方法研究[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(5): 1-7. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2015.05.001.
LI Yuanqi, LI Gongwen, SHEN Zuyan, et al. Modification method for yield strength of cold-formed thick-walled steel sections considering cold-forming effect [J]. Journal of Building Structures, 2015, 36 (5) : 1-7. DOI: 10.14006/j. jzjgxb. 2015.05.001. (in Chinese)
- [10] LI Q Y, YOUNG B. Experimental and numerical investigation on cold-formed steel built-up section pin-ended columns [J]. Thin-Walled Structures, 2022, 170: 108444. DOI: 10.1016/j.tws.2021.108444.
- [11] 周天华, 李艳春, 吴函恒, 等. 冷弯薄壁型钢拼合箱形截面短柱承载力叠加法[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2020, 47(11): 46-55. DOI: 10.16339/j.cnki.hdxzbkb.2020.11.006.
ZHOU Tianhua, LI Yanchun, WU Hanheng, et al. Superposition method for bearing capacity of cold-formed thin-walled steel built-up box section short columns [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2020, 47(11): 46-55. DOI: 10.16339/j.cnki. hdxzbkb. 2020.11.006. (in Chinese)
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 低层冷弯薄壁型钢房屋建筑技术规程: JGJ 227—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical Specification for Low-Rise Cold-Formed Thin-Walled Steel Buildings: JGJ 227—2011[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011. (in Chinese)
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 冷弯薄壁型钢多层住宅技术标准: JGJ/T 421—2018[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical Standard for Cold-Formed Thin-Walled Steel Multi-storey Residential Buildings: JGJ/T 421—2018[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018. (in Chinese)
- [14] STONE T A, LABOUBE R A. Behavior of cold-formed steel built-up I-sections [J]. Thin-Walled Structures, 2005, 43(12): 1805-1817. DOI: 10.1016/j.tws.2005.09.001.
- [15] YOUNG B, CHEN J. Design of cold-formed steel built-up closed sections with intermediate stiffeners [J]. Journal of Structural Engineering, 2008, 134 (5) : 727-737. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2008)134:5(727).
- [16] ZHANG J H, YOUNG B. Compression tests of cold-formed steel I-shaped open sections with edge and web stiffeners [J]. Thin-Walled Structures, 2012, 52: 1-11. DOI: 10.1016/j.tws.2011.11.006.
- [17] 李元齐, 李英磊, 王树坤, 等. 冷弯薄壁型钢四肢拼合构件轴压承载力研究[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(12): 104-113. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2014.12.014.
LI Yuanqi, LI Yinglei, WANG Shukun, et al. Investigation on ultimate capacity of built-up columns with double channel sections under axial compression [J]. Journal of Building Structures, 2014, 35 (12) : 104-113. DOI: 10.14006/j. jzjgxb. 2014.12.014. (in Chinese)
- [18] VY S T, MAHENDRAN M. Behaviour and design of slender built-up nested cold-formed steel compression members [J]. Engineering Structures, 2021, 241: 112446. DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.112446.
- [19] SANG L R, ZHOU T H, ZHANG L, et al. Experimental investigation on the axial compression behavior of cold-formed steel triple-limbs built-up columns with half open section [J]. Thin-Walled Structures, 2022, 172: 108913. DOI: 10.1016/j.tws.2022.108913.
- [20] 杨竞杰, 王卫永, 石宇. 冷弯薄壁型钢四肢箱形拼合截面柱受压承载能力设计方法[J]. 工程力学, 2024, 41(7): 186-201.
YANG Jingjie, WANG Weiyong, SHI Yu. Study on load-bearing capacity of columns with cold-formed thin-walled steel quadruple-limb built-up box-shaped section [J]. Engineering Mechanics, 2024, 41(7): 186-201. (in Chinese)
- [21] 聂少锋, 周天华, 周绪红, 等. 冷弯薄壁型钢四肢拼合箱形柱轴压性能试验[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2017, 37(3): 72-81. DOI: 10.19721/j.cnki.1671-8879.2017.03.010.
NIE Shaofeng, ZHOU Tianhua, ZHOU Xuhong, et al. Experiment on cold-formed steel quadruple-limb built-up box section columns under axial compression [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2017, 37(3): 72-81. DOI: 10.19721/j.cnki.1671-8879.2017.03.010.

- (in Chinese)
- [22] DOBRIĆ J, MARKOVIĆ Z, BUĐEVAC D, et al. Resistance of cold-formed built-up stainless steel columns—Part I: experiment [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2018, 145: 552-572. DOI: 10.1016/j.jcsr.2018.02.026.
- [23] DOBRIĆ J, PAVLOVIĆ M, MARKOVIĆ Z, et al. Resistance of cold-formed built-up stainless steel columns—Part II: numerical simulation [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2018, 140: 247-260. DOI: 10.1016/j.jcsr.2017.10.032.
- [24] JIANG K, ZHAO O. Stainless steel built-up section stub columns: testing, numerical modelling and design [J]. *Thin-Walled Structures*, 2023, 191: 111070. DOI: 10.1016/j.tws.2023.111070.
- [25] American Society of Civil Engineers. Specification for the Design of Cold-Formed Stainless Steel Structural Members: ASCE/SEI 8-22 [S]. Reston: American Society of Civil Engineers, 2022.
- [26] 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. 不锈钢冷轧钢板和钢带: GB/T 3280—2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of China. Cold Rolled Stainless Steel Plate, Sheet and Strip: GB/T 3280—2015[S]. Beijing: Standards Press of China, 2015. (in Chinese)
- [27] 国家市场监督管理总局, 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.
State Administration for Market Regulation, National Standardization Administration. Metallic Materials—Tensile Testing—Part 1: Method of Test at Room Temperature: GB/T 228.1—2021 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2021. (in Chinese)
- [28] HUANG Y E, YOUNG B. The art of coupon tests [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2014, 96: 159-175. DOI: 10.1016/j.jcsr.2014.01.010.
- [29] 柳子涵, 杨璐, 袁焕鑫, 等. 考虑局部稳定影响的不锈钢圆管短柱轴压承载力试验研究 [J]. *建筑结构学报*, 2023, 44(12): 225-232. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2022.0508.
- LIU Zihan, YANG Lu, YUAN Huanxin, et al. Experimental study on local stability of stainless steel tubular stub columns under axial compression [J]. *Journal of Building Structures*, 2023, 44(12): 225-232. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2022.0508. (in Chinese)
- [30] 姚行友, 尹佳文, 郭彦利. 腹板开孔冷弯薄壁卷边槽钢轴压柱试验及设计方法 [J]. *工业建筑*, 2021, 51(7): 113-122, 208. DOI: 10.13204/j.gyjzG2010908.
- YAO Xingyou, YIN Jiawen, GUO Yanli. Axial compression tests and the design method for cold-formed thin-walled lipped channel columns with web openings [J]. *Industrial Construction*, 2021, 51(7): 113-122, 208. DOI: 10.13204/j.gyjzG2010908. (in Chinese)
- [31] 中华人民共和国建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 冷弯薄壁型钢结构技术规范: GB 50018—2002 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2002.
Ministry of Construction of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Technical Code of Cold-Formed Thin-Wall Steel Structures: GB 50018—2002[S]. Beijing: China Planning Press, 2002. (in Chinese)
- [32] 中国工程建设标准化协会. 不锈钢结构技术规程: CECS 410:2015[S]. 北京: 中国计划出版社, 2015.
China Association for Engineering Construction Standardization. Technical Specification for Stainless Steel Structures: CECS 410:2015[S]. Beijing: China Planning Press, 2015 (in Chinese)
- [33] MOEN C D, SCHAFFER B W. Elastic buckling of cold-formed steel columns and beams with holes [J]. *Engineering Structures*, 2009, 31(12): 2812-2824. DOI: 10.1016/j.engstruct.2009.07.007.
- [34] LI H T, JIN C C, LI Q Y, et al. Tests on cold-formed stainless steel built-up box section stub columns [C]// *Proceedings of the 9th International Conference on Thin-Walled Structures*. Sydney: The University of Sydney, 2023.