文章编号：0253-374X(2025)12-1825-12

DOI：10.11908/j.issn.0253-374x.24267

轴压下冷弯薄壁不规则八边形高强钢管短柱的极限承载力

朱炯亦[1]，黄海超[1]，刘海鑫[2]，杨　钦[3]

（1. 上海大学 力学与工程科学学院，上海 200444；2. 长沙理工大学 土木与环境工程学院，湖南 长沙 410114；
3. 中国建筑第八工程局有限公司，上海 200120）

摘要：测试了8个空心钢管短柱轴压下的力学性能，并对八边形空心钢管各部位进行了材料拉伸试验。试验结果表明，不规则八边形冷弯薄壁空心钢管短柱的破坏形式为局部屈曲失稳，其承载能力无法达到其屈服强度。同时对钢管开展了有限元分析，通过试验验证有限元模型的准确性并进行了参数分析。利用试验数据和有限元模型数据对中国规范、欧洲规范、美国规范和已有文献中的极限承载力计算公式进行评估。评估结果表明，现有的极限承载力计算公式并不适用于不规则八边形冷弯薄壁高强空心钢管短柱的极限承载力计算。因此，提出了新的极限承载力计算公式，并且将试验数据和有限元模型数据分别与提出的极限承载力计算公式的计算结果进行对比，结果表明，提出的极限承载力计算公式能够较好地预测不规则八边形高强钢管的极限承载力。

关键词：薄壁高强钢；轴压试验研究；局部屈曲；参数研究；极限承载力计算

中图分类号：TU391　　**文献标志码**：A

Load-Bearing Capacity of Irregular Octagonal Cold-Formed Thin-Walled High-Strength Hollow Steel Tube Stub Columns

ZHU Jiongyi[1], *HUANG Haichao*[1], *LIU Haixin*[2], *YANG Qin*[3]

(1. School of Mechanics and Engineering Science, Shanghai University, Shanghai 200444, China; 2. School of Civil and Environmental Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China; 3. Eighth Engineering Division Co., Ltd., China Construction, Shanghai 200120, China)

Abstract: Eight axial compression tests on irregular octagonal hollow section columns were conducted, along with material tensile tests on the material extracted from different regions of tube. The experimental results indicate that the failure mode of irregular octagonal cold-formed thin-walled hollow steel stub columns is local buckling instability, and their load-bearing capacity cannot reach their yield strength. Finite element analysis was also performed on the steel tubes, validating the accuracy of the finite element model with experimental results, followed by parameter analysis to supplement the experimental data. The experimental data and finite element model results were used to evaluate the existing cross-section capacity formulas in Chinese, European, and American standards, as well as those reported in the existing literature. The evaluation results indicate that the existing formulas are not suitable for calculating the capacity of irregular octagonal thin-walled high-strength hollow steel tube stub columns. Therefore, a new formula was proposed. The test data and finite element model results were compared with the calculated results of the proposed formula, demonstrating that the proposed formula can accurately predict the capacity of the specimens.

Keywords: thin-walled high-strength steel; axial compression test study; local buckling; parametric study; ultimate bearing capacity calculation

随着工业技术的发展，高强钢材在大型建筑和高层建筑中得到了广泛的应用，相较于普通强度的钢材，高强钢材具有更高的强度质量比和更低的碳足迹，从而使得结构构件的质量变得更轻、尺寸变得更小[1]。高强钢管状结构有着诸多优点，如高结构效率，相较于开口型钢材有着更高的抗扭性，以及可在钢管内部浇筑混凝土形成钢管混凝土组合结构。

收稿日期：2024-08-17
基金项目：国家自然科学基金青年科学基金(52208317)
第一作者：朱炯亦，讲师，硕士生导师，工学博士，主要研究方向为基于新材料的结构加固。E-mail：shuzhujy@shu.edu.cn
通信作者：刘海鑫，讲师，工学博士，主要研究方向为高性能钢结构连接节点。E-mail：hai-xin.liu@connect.polyu.hk

论文拓展介绍

针对不同工艺制造形成的管状截面试件已有大量研究,其中主要是对焊接制成的空心钢管试件局部屈曲性能进行的试验研究[2-6]。随着钢管加工技术的进步,目前加工制造工艺中出现了冷弯成型技术,具有更简单的制造工艺和更低能耗。近年来,对于冷弯高强空心钢管试件的研究主要集中于矩形截面和圆形截面的空心钢管试件局部屈曲性能[7-12],但对于截面为不规则的八边形冷弯薄壁高强空心钢管短柱截面承载能力的研究甚少。

与圆形截面相比,不规则八边形截面能够为梁柱节点连接施工提供平坦的表面;与矩形截面相比,不规则八边形截面有着更好的局部抗屈曲性能[13-18];与正八边形截面相比,不规则八边形截面可以通过增加腹板长度来提升截面的抗弯刚度。可见,不规则八边形截面的应用提供了多样化的结构配置和节点连接选择。

本文开展了冷弯薄壁不规则八边形高强钢管短柱轴压力学性能研究,通过对8个空心钢管短柱试件的轴压试验,以及有限元模型验证和参数分析,明确了不规则八边形截面长细比对局部屈曲性能的影响。基于试验数据与有限元模型数据,对现有规范和文献中截面承载力计算公式的适用性进行了评估,进而提出适用于不规则八边形冷弯薄壁高强空心钢管截面承载力计算公式。

1 试验研究

1.1 试验概况

试验试件为8个不规则八边形冷弯薄壁高强空心钢管短柱,其中钢管的名义厚度分别为3 mm与6 mm,钢管强度等级分别为Q460与Q690。钢管冷弯加工工艺如图1所示。空心钢管试件的参数如表1所示,试件截面几何符号的详细定义如图2所示。其中H为试件截面的高度,B为试件截面的宽度,B_L为不规则八边形截面中长边的长度,B_s为不规则八边形截面中短边的长度,b_L为长边平坦部分的长度,即不包括拐角区域的净宽,b_s为短边平坦部分的长度,同样不包括拐角区域的净宽,t为钢管的厚度,f_y为钢材屈服强度。本文试件的命名规则为:IO表示空心钢管短柱试件截面类型为不规则的八边形,460与690表示钢管强度等级。以IO460-170-3-1.5为例,IO表示空心钢管短柱试件截面类型为不规则的八边形,170表示试件截面高度为170 mm(H=170 mm),3表示钢管的厚度为3 mm(t=3 mm),1.5表示截面长宽比为1.5(H/B=1.5)。为了有效防止试件因过长出现弯曲变形或因试件过短而出现端部效应,本文空心钢管试件的长度L均约为3H。

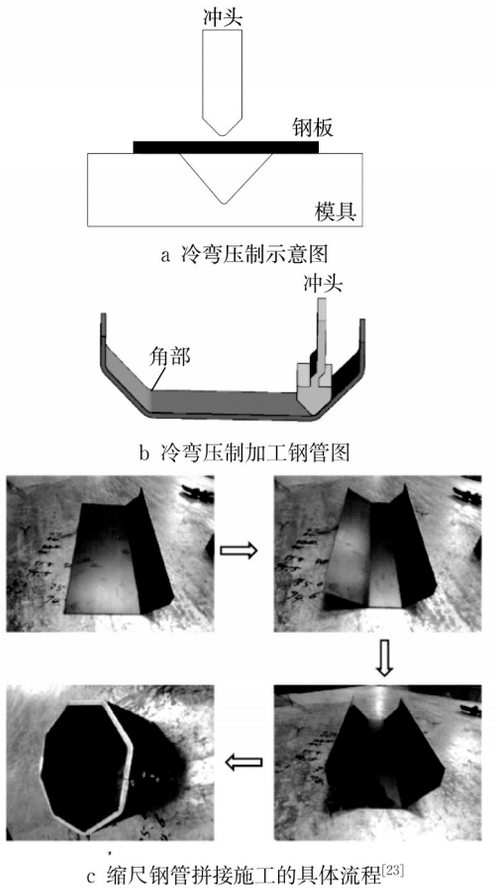


图1 钢管制造工艺图

Fig. 1 Flowchart of the manufacturing process of the steel tube

1.2 钢材材料特性

为了检测钢管在冷弯加工后的材料性能变化,本文开展了冷弯加工后钢管的材料性能试验。首先从已加工完成的钢管上的直边和弯角处切出钢材拉伸试件,图3给出了切出的位置和切出的狗骨头试件,根据EN ISO 6892-1:19 2019国际标准[19]的要求进行材料拉伸试验。在狗骨头拉伸试件的中部沿长度方向贴有应变片,测量钢材的弹性模量。同时还采用引伸计记录拉伸试件在整个试验过程中的应力-应变曲线。当试件达到屈服强度和极限强度附近时暂停加载120 s,以便应力达到松弛状态进而通过后续处理获得静态应力-应变曲线,并根据静态曲线来确定静态状态下的材料性能,例如屈服强度和极限强度。钢材狗骨头试件的拉伸试验过程可参考

表1　空心钢管试件参数

Tab. 1　Parameters of hollow steel tube specimens

试件	H/mm	B/mm	t/mm	B_L/mm	B_s/mm	b_s/t	b_L/t	f_y/MPa
IO460-150-3-1.5	152	96	3.15	91.5	41.4	10.98	28.13	606
IO690-150-3-1.5	152	96	3.04	91.3	41.1	11.38	29.05	767
IO460-170-3-1.5	168	106	3.06	100.6	45.6	12.82	32.20	606
IO690-170-3-1.5	165	108	3.01	100.6	45.5	12.96	31.37	767
IO460-180-6-1.5	180	120	6.18	109.6	49.7	6.71	15.41	626
IO690-180-6-1.5	181	116	6.04	109.5	49.3	6.85	16.30	780
IO460-220-3-2.0	225	105	3.00	155.5	44.9	13.24	52.01	606
IO690-220-3-2.0	225	105	3.00	155.9	44.7	13.21	52.08	767

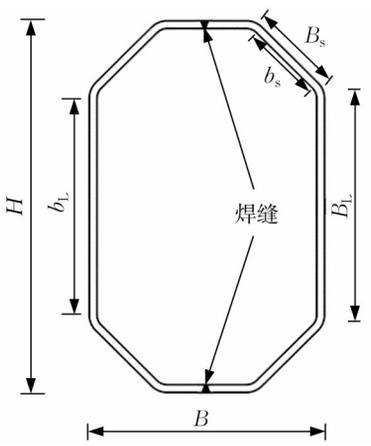


图2　不规则八边形薄壁钢管截面示意图

Fig. 2　Schematic of the cross-section of irregular octagonal thin-walled steel tube

Chen 等[20]的文章。本文钢材的静态应力-应变曲线如图4所示。可以观察到经过冷弯处理后，在弯角处的钢材屈服强度与极限强度得到了明显的提升，

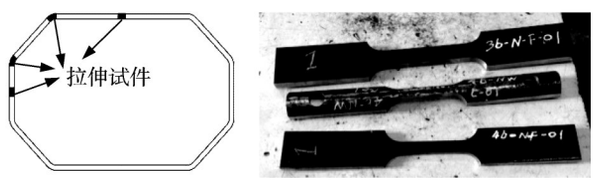


图3　钢管拉伸试件

Fig. 3　Tensile coupon of steel tube

但钢材伸长率有了明显的减少。原因是冷弯过程中钢材的塑性变形使晶界发生了大量的位错与堆叠，进而限制了进一步的变形，导致了钢材强度的提升与延性的下降[21-22]。试验中钢材的材料属性如表2所示，其中E是钢材的弹性模量，f_y是钢材的屈服强度，f_u是钢材的极限强度，ε_u是与钢材极限强度相对应的应变，ε_f是钢材断裂时伸长率，t是钢材的厚度。表1中钢管的f_y是通过将表2中角部区域钢材强度的f_y与平面区域钢材强度的f_y按两者面积进行权重计算后的强度，角部增强区域划分参考 Liu 等[23]的建议。

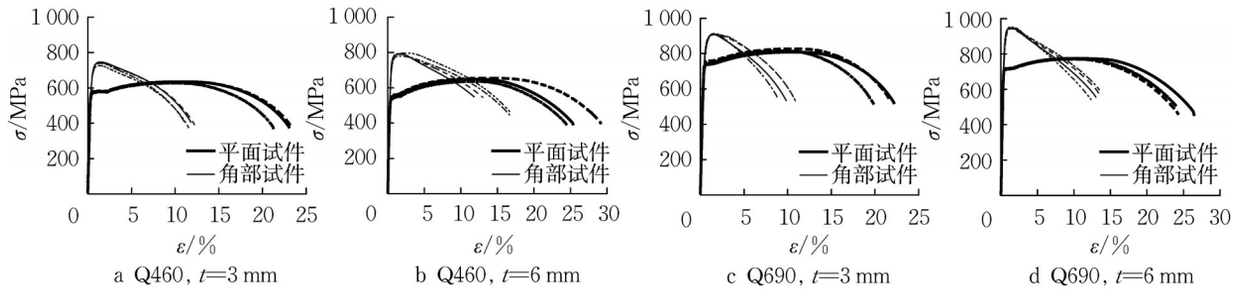
表2　钢材的材料属性

Tab. 2　Material properties of steel

钢材等级	区域	t/mm	E/GPa	f_y/MPa	f_u/MPa	ε_u/%	ε_f/%
Q460	平面	3	203.5	577	632	10.50	23.38
		6	199.2	552	647	12.30	25.35
	角部	3	199.4	678	738	1.43	12.20
		6	193.1	737	790	1.40	12.99
Q690	平面	3	207.6	740	817	9.18	19.80
		6	218.5	714	773	10.10	23.89
	角部	3	208.4	828	910	1.68	10.87
		6	216.1	880	947	1.37	12.99

2　空心钢管短柱轴压试验

对8个不规则八边形冷弯薄壁高强空心钢管短柱进行了轴压试验，以明确不规则八边形冷弯薄壁空心钢管短柱局部屈曲对轴压力学性能的影响。试验在上海大学土木工程系结构实验室进行，采用5 000 kN油压伺服压力试验机加载。加载方案为：试验开始时采用力控制进行试件预压加载，其中加载速率为50 kN·min^{-1}，当加载力达到5%名义承载力时，通过采集仪监测试件的纵向应变，对试件轴心进行调整，保证轴心对齐。在预压力作用下加载板、底板与加载装置为固接，无法发生转动。试验加载



a Q460, t=3 mm　b Q460, t=6 mm　c Q690, t=3 mm　d Q690, t=6 mm

图4　冷弯钢材应力–应变曲线

Fig. 4　Stress-strain curve of cold-formed steel

速率为0.3 mm·min^{-1},加载至荷载下降到峰值荷载的75%时,终止试验加载。加载仪器和测试装置如图5所示,试件加载端的侧边上下顶点附件区域各布置1个位移传感器,试件加载端共布置4个位移传感器,最大量程均为100 mm,用于测量加载过程中试件的纵向变形。试件固定端位置的侧边中点附近区域各布置了1个位移传感器,试件固定端总共布置了2个位移传感器,最大量程均为50 mm,用于测量加载过程中固定端板的变形。所有试件应变片均是布置于试件1/2高度处的截面中心位置(即为试件$L/2$处),具体布置如图5a所示。其中每一个不规则八边形冷弯薄壁高强空心钢管短柱试件总共布置8个应变片,主要用于测量试件的环向与轴向应变。

为了更好地评估空心钢管短柱的轴压力学性能,本文引入了截面长细比参数λ_c,定义如下:

$$\lambda_c=(b/t)\sqrt{f_y/E} \tag{1}$$

式中:b、t分别为不规则八边形钢管截面长边的净宽与壁厚;f_y与E分别为屈服强度与弹性模量。

使用名义承载力$A_s f_y$对试验承载力N_u进行归一化处理,其中A_s为截面面积。本文所有不规则八边形短柱试件的归一化荷载–位移曲线如图6所示。从图6中可以看出,由于薄壁钢管都存在局部屈曲的问题,轴压作用下无法达到钢材屈服强度。所有空心钢管短柱试验结果如表3所示。从表3中可以看出,随着截面长细比λ_c的增大,$N_u/A_s f_y$的值减小,表明了轴压作用下钢管屈服强度的折减与截面长细比有关。从表3与图6可以看出,增加钢管厚度,减小截面长细比,可以提高试件的承载力。同时随着截面长细比减小,试件的延续表现变好,曲线在下降段有着较长平台,且下降速率较为缓慢。全部不规则八边形钢管短柱试件的破坏模式如图7所示,在不规则八边形薄壁高强空心钢管短柱试件轴压试验中,所有短柱试件均发生局部屈曲破坏,即钢管横截面的壁面交替向外和向内发生局部屈曲现象,主要是钢管的长边向内凹发生屈曲破坏。

表3　不规则八边形薄壁空心钢管短柱试验结果

Tab. 3　Test results of irregular octagonal thin-walled hollow steel stub columns

编号	试件	λ_c	f_y/MPa	N_u/kN	$N_u/A_s f_y$
1	IO460–150–3–1.5	1.50	606	662.97	0.84
2	IO690–150–3–1.5	1.73	767	811.65	0.83
3	IO460–170–3–1.5	1.71	606	706.50	0.83
4	IO690–170–3–1.5	1.87	767	869.16	0.82
5	IO460–180–6–1.5	0.81	626	1 746.14	0.92
6	IO690–180–6–1.5	0.93	780	2 041.98	0.89
7	IO460–220–3–2.0	2.77	606	688.72	0.66
8	IO690–220–3–2.0	3.11	767	842.26	0.64

3　数值模拟分析

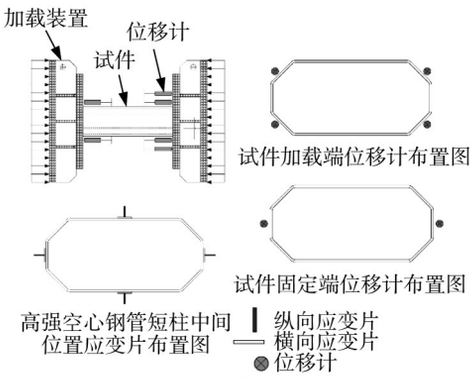
3.1　有限元模型

采用ABAQUS商业软件建立精细化有限元模型。根据式(2)、(3),将拉伸试验中测量到的应力–应变响应转换为真实应力和塑性应变,且钢材的有限元建模采用了各向同性硬化的塑性材料模型。

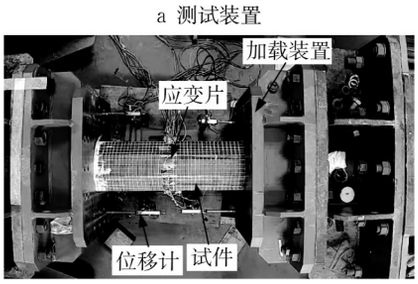
$$\sigma_t=\sigma_e(1+\varepsilon_e) \tag{2}$$

$$\varepsilon_t^{pl}=\ln(1+\varepsilon_e)-\left(\frac{\sigma_t}{E_s}\right) \tag{3}$$

式中:σ_t与ε_t^{pl}为真实应力与塑性应变;σ_e与ε_e为通过钢材狗骨头试件拉伸试验获得的工程应力和工程应



a 测试装置



b 加载装置

图5　试验测试与加载装置

Fig. 5　Instrumentation and test setup

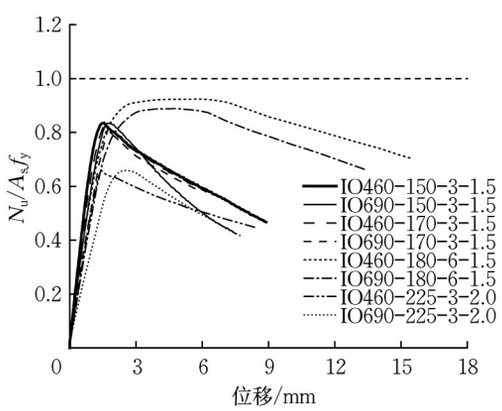


图6　空心钢管短柱的荷载比值（N_u/A_sf_y）–位移曲线

Fig. 6　Load ratio (N_u/A_sf_y) versus displacement curve of hollow steel stub columns

变；E_s为弹性杨氏模量。考虑到钢管冷弯成形过程中角部区域的强度增强[24]，为了更准确模拟高强空心钢管短柱轴压力学性能，故在有限元分析模型中将增强的强度分配到模型的角部区域。Chen 等[16]的研究发现，钢材强度的增强不仅限于角部，还可以延伸到角部一定距离之外。其中延伸的长度为1.5t（t为钢管厚度）的角部区域，如图8所示。本文有限元模型也采用了这种方法。

根据轴压试验的约束边界来设置有限元模型的边界条件，即对不规则八边形冷弯薄壁高强空心钢管短柱上下端部进行固接，在上下顶面中心位置分

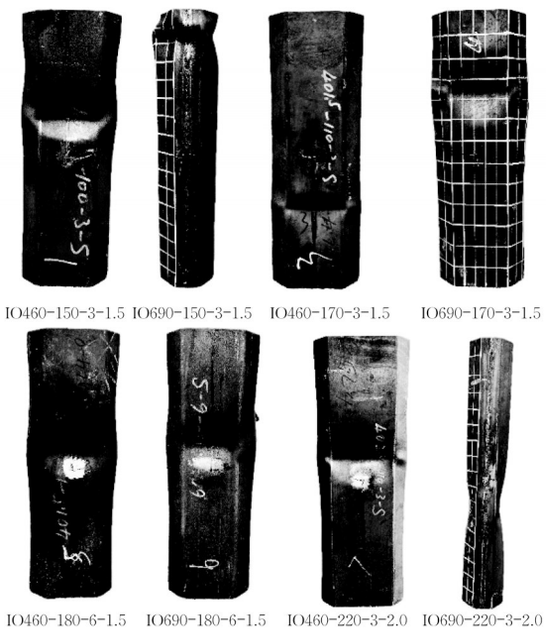


图7　高强不规则八边形钢管短柱试件破坏图

Fig. 7　Failure modes of high-strength irregular octagonal steel stub column specimens

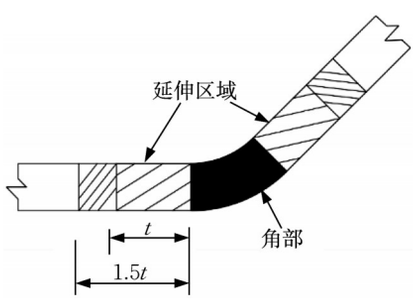


图8　高强空心钢管短柱有限元模型中角部延伸区域

Fig. 8　Corner extension region in finite element model of high-strength hollow steel stub column

别设置RP1、RP2参考点，并将距离钢管上下顶面所有节点分别与参考点RP1和RP2进行耦合，参考点RP2约束X、Y、Z方向的位移和转角自由度，参考点RP1约束X、Y的位移和X、Y、Z方向转角自由度，释放Z方向平动的约束，并施加位移。

本文采用了常用于模拟空心钢管截面结构响应的四节点缩减积分格式壳单元。基于网格收敛分析确定的网格尺寸为$b_L/20$，以平衡精度和计算成本。为了准确捕捉钢管的屈曲强度和失效模式，在ABAQUS中利用缺陷选项（*imperfection）模拟缺陷轮廓。利用多边形空心钢管的弹性屈曲分析得出的最低阶弹性屈曲模态作为缺陷轮廓（图9），并参考了Zhu 等[25]的研究，进行了缺陷敏感性分析，以确定

有限元模型中缺陷的大小对有限元极限承载力的影响,其中考虑的缺陷值ω有:$t/10$、$t/50$、ω_{Fang},ω_{Fang}可参考Fang等[13]提出的正八边形冷弯薄壁高强空心钢管短柱局部缺陷预测模型,模型计算公式如下:

$$\omega_{\mathrm{Fang}}=0.307\left(\frac{f_{\mathrm{y}}}{f_{\mathrm{cr}}}\right)^{0.5}t \tag{4}$$

式中:f_{y}与f_{cr}分别为钢材屈服强度与钢管的弹性屈曲强度;t为钢管的厚度。

由于冷弯成型和焊接过程中产生的残余应力对于空心钢管短柱在单轴轴压下的局部屈曲行为影响较小,因此在本次有限元模型中没有考虑这些残余应力的影响。

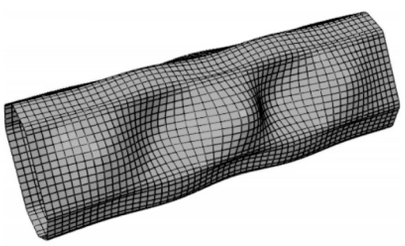
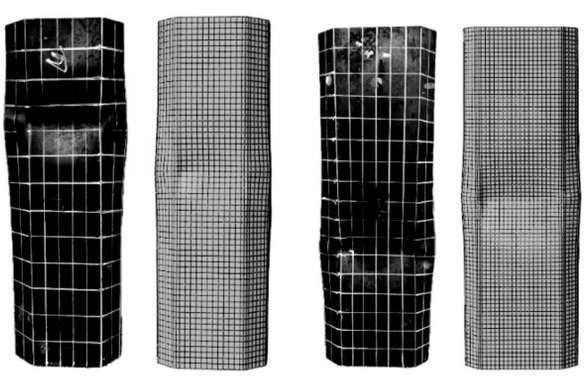


图9 弹性屈曲特征模态中的最低阶模态

Fig. 9 Lowest-order mode from elastic buckling analysis

3.2 有限元模型验证

通过有限元模型计算得到的荷载–位移曲线、极限承载力、破坏模式与试验数据进行了对比,验证了不规则八边形冷弯薄壁高强空心钢管短柱有限元模型的适用性和准确性。如图10所示,可以看出,有限元模型预测的破坏模式与高强空心钢管短柱试件的试验结果比较吻合。



a IO690-170-3-1.5 b H460-220-3-2.0

图10 典型高强空心钢管短柱试验与有限元破坏模式

Fig. 10 Failure mode of typical high-strength hollow steel stub columns from experimental and finite element results

不规则八边形冷弯薄壁高强空心钢管短柱有限元分析得到的荷载–位移曲线与试验测试得到的荷载–位移曲线进行了对比,如图11所示。从图11中可以看出,试验荷载–位移曲线与有限元分析得到的荷载–位移曲线之间呈现出良好的相关性,且有限元模型能够准确捕获极限承载力。通过对比不同缺陷值对有限元模型预测极限荷载的影响,对于本文所提出的3种缺陷值:$t/10$、$t/50$和ω_{Fang},其有限元模型预测的极限荷载与试验极限荷载的比值($N_{\mathrm{FE}}/N_{\mathrm{u}}$)平均值分别为:1.04、1.07和1.05,相应的变异系数(CoV)分别为0.032、0.026和0.033。综上所述,当缺陷值为$t/10$时,有限元模型预测值与试验数据有着最好的相关性,即证明该缺陷值条件下的有限元模拟分析方法可以准确地预测钢管在初始缺陷下的局部屈曲,并用于后期参数分析。

3.3 参数分析

为了考察不同截面长细比参数对空心钢管短柱局部屈曲的影响,并生成涵盖更广参数范围的数据,在有限元模型的准确性得到验证的前提下,对有限元模型计算得到的数据进行参数分析,并将试验所测得的数据和有限元模型分析得到的数据用于评估现有规范中空心钢管短柱承载力计算公式的适用性。相关的参数变量有:钢管强度等级分别为Q460与Q690;钢管厚度t分别为3 mm与6 mm;截面长宽比分别为1.0、1.5与2.0;不规则八边形截面的平坦区域长度b_{L}变化范围为22.38~303.67 mm;截面长细比λ_{c}的范围为0.21~6.15。且所有有限元模型试件的长度L均为3H。值得注意的是,参数分析中所有试件的钢材材料属性,均采用了本次试验所测得的应力–应变数据,且将角部区域与平坦面区域的材料属性应用于相应的位置,关于有限元模型中的初始缺陷幅值均采用$t/10$。

4 不规则八边形空心钢管短柱极限承载力设计公式

4.1 截面长细比的限值

在现有的钢结构设计规范中,通常采用截面分类、有效宽度和有效强度等方法进行空心钢管短柱截面设计。对于轴压空心钢管短柱来说,中国规范《冷弯型钢结构技术规范》(GB50018—2002)[26]将截面类型分为a~c类;欧洲规范EN1993-1-1(CEN

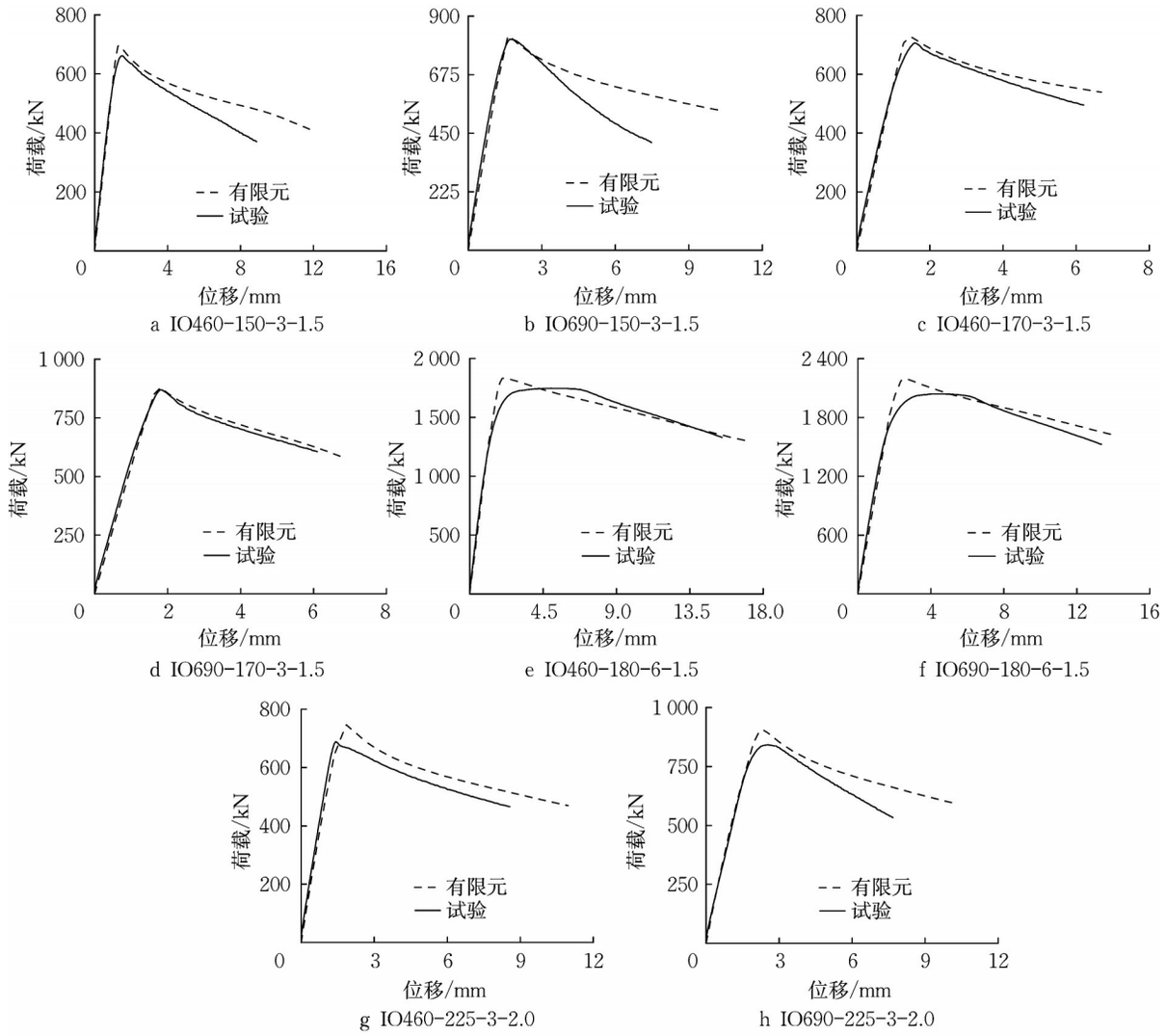


图 11　典型高强空心钢管短柱荷载–位移对比曲线

Fig. 11　Comparative load-displacement curves of a typical high-strength hollow steel stub column

2005)[27]将截面类型分为1～4类，其中1～3类截面的空心钢管短柱在轴压作用下能达到钢材的屈服强度，但4类截面的轴压空心钢管短柱因发生局部屈曲而无法达到钢材的屈服强度；美国规范 ASCE/SEI 48(ASCE/SEI 2011)[28]则是将截面类型分为细长截面与非细长截面，其中细长截面类型和非细长截面分别与欧洲规范中的4类截面和1～3类截面相类似。中国规范、欧洲规范和美国规范均对轴压空心钢管短柱是否发生局部屈曲的截面类型最大宽厚比 b/t 进行了限制。值得注意的是，目前只有美国规范考虑了八边形空心钢管截面承载力的设计。因此，Zhu 等[29]、Fang 等[13]和 Chen 等[16]研究发现了欧洲规范和美国规范这两个规范中空心钢管短柱截面的宽厚比限值并不适用于八边形空心钢管截面承载力的设计，并且提出了适用于八边形空心钢管截面的宽厚比限值。为了方便统一比较现有规范与现有文献之间的宽厚比限值，本文统一将宽厚比限值转换成截面长细比参数限值进行比较，其中转换关系如式(1)所示，各国规范与已有文献的截面长细比限值如表4所示。

为了更好地评估表4中截面长细比的限值是否适用于不规则八边形截面，将试验与有限元分析得到的极限承载力 N_u 与其名义荷载 $A_s f_y$ 的比值进行归一化处理，并绘制了归一化的 $N_u/A_s f_y$–λ_c 曲线，如图12所示。从图12中可以看出，现有钢结构设计规范和现有文献中截面长细比限值并不适用于不规则八边形冷弯薄壁高强空心钢管截面的承载能力设计。Fang 等[13]、Zhu 等[29]所提出的限值能较好地适用于不规则八边空心钢管截面的承载能力设计，但仍较为保守。因此，在线性回归分析的基础上提出了新

表4 各国规范与现有文献的截面长细比限值

Tab. 4 Sectional slenderness limits from various codes and existing studies

规范(或文献)	宽厚比限值	λ_c限值
欧洲规范：EN1993-1-1	$b/t\leqslant 42\sqrt{235/f_y}$，$E$=210 GPa	1.41
美国规范：ASCE/SEI 48	$b/t\leqslant 681.2/\sqrt{f_y}$，$E$=200 GPa	1.52
中国规范：GB50018—2002	$b/t\leqslant 35\sqrt{345/f_y}$，$E$=206 GPa	1.43
Fang等[13]	$b/t\leqslant 30\sqrt{235/f_y}$（S690钢管）	1.00
Zhu等[28]	$b/t\leqslant 29.8\sqrt{235/f_y}$（S355钢管）	1.00
Chen等[16]	$b/t\leqslant 34.1\sqrt{235/f_y}$（Q460钢管）	1.14

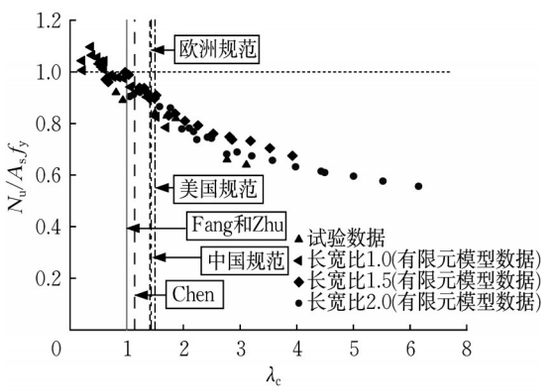


图12 不规则八边形高强空心钢管截面分类限值评估

Fig. 12 Evaluation of cross-section classification limits for irregular octagonal high-strength hollow steel tubes

的截面长细比限值λ_c=0.97。

4.2 现有极限承载力计算公式的评估

中国规范[26]、欧洲规范[27]和美国规范[28]均提供了空心钢管短柱极限承载力计算公式，其中中国规范与欧洲规范只提供了方形与圆形截面的空心钢管短柱极限承载力计算公式，而美国规范提供了正八边形空心钢管截面极限承载力计算公式。Fang等[13]也提出了适用于正八边形冷弯薄壁高强空心钢管短柱的极限承载力计算公式。本文将对上述承载力计算公式的适用性进行评估。

(1)中国规范(GB50018—2002)。目前我国规范GB50018—2002采用直接强度法来计算冷弯型构件的轴压极限承载力。轴心受压构件极限承载力N_{GB}计算公式如下：

$$N_{GB}=\begin{cases}N_s & \lambda_p\leqslant 0.847\\ \left[1-0.1\left(\dfrac{N_{cr}}{N_s}\right)^{0.36}\right]\left(\dfrac{N_{cr}}{N_s}\right)^{0.36}N_s & \lambda_p>0.847\end{cases} \tag{5}$$

式中：λ_p为构件长细比，$\lambda_p=\sqrt{N_s/N_{cr}}$；$N_s$与$N_{cr}$分别为构件整体稳定承载和局部屈曲临界荷载；$N_s=\varphi A_s f_y$，其中$f_y$为钢材的名义屈服强度，$\varphi$为轴心受压构件稳定系数，由于本文试件均为短柱，故$\varphi$=1；$N_{cr}=A_s f_{cr}$，其中$A_s$为空心钢管短柱全截面面积，$f_{cr}$为轴心受压构件弹性局部屈曲临界应力。

$$f_{cr}=k\frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)}\left(\frac{t}{b}\right)^2 \tag{6}$$

式中：E为钢材的弹性模量；ν为钢材的泊松比，通常取0.3；t为钢管厚度；k为钢板屈曲系数，取值为4；b为钢管宽度，在本文试件中即为钢管长边b_L平坦部分的长度，即不包括拐角区域的净宽。

有限元模型数据与试验数据的归一化极限承载力$N_u/A_s f_y$与长细比λ_p的关系如图13所示。从图13中可以看出，中国规范建议的极限承载力计算公式所预测的结果高估了试件实际极限承载力。有限元模型计算极限承载力N_{FE}和试验测得极限承载力N_u分别与中国规范建议公式计算的极限承载力N_G比值的平均值，以及相应的变异系数(COV)，如表5所示。N_u/N_{GB}和N_{FE}/N_{GB}平均值分别为0.88和0.94，相应变异系数分别为0.004和0.006。

(2)欧洲规范(EN1993-1-1(CEN 2005))。欧洲规范通常采用有效宽度法设计带有板件的型钢构件。对于轴压作用下未发生局部屈曲的试件，其极

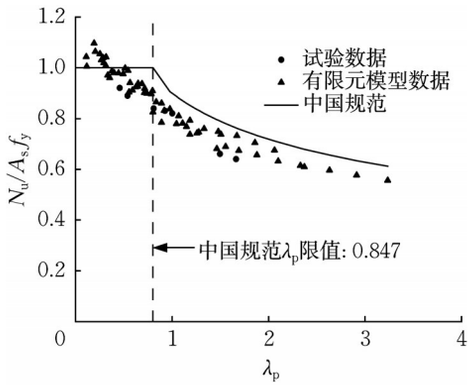


图13　不规则八边形高强空心钢管截面承载力设计评估(中国规范)

Fig. 13　Design capacity assessment of irregular octagonal with Chinese code

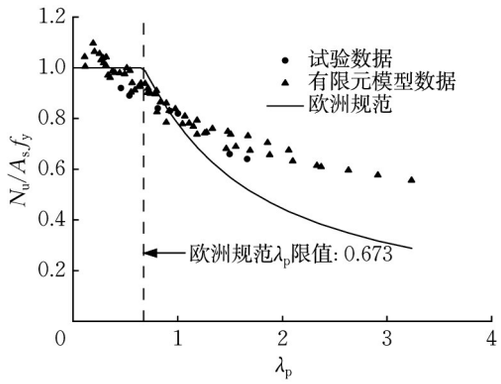


图14　不规则八边形高强空心钢管截面承载力设计评估(欧洲规范)

Fig. 14　Design capacity assessment of high strength irregular octagonal steel tubes with Eurocode

限承载力等于名义荷载A_sf_y。对于轴压作用下发生局部屈曲的试件，其极限承载力可通过公式(7)计算，其中A_{eff}为试件的有效面积，即每块板件有效面积的总和，其定义为试件的总面积乘以折减系数ρ_{EC}。

$$N_{EC}=A_{eff}f_y \tag{7}$$

$$\rho_{EC}=(1-0.22/\lambda_p)/\lambda_p \quad \lambda_p>0.673 \tag{8}$$

有限元模型数据与试验数据的归一化极限承载力N_u/A_sf_y与长细比λ_p的关系，如图14所示。从图14中可以看出，随着λ_p的增大，欧洲规范建议的极限承载力计算公式所预测的结果越来越低估试件实际的极限承载力。有限元模型计算的极限承载力N_{FE}和试验测得的极限承载力N_u分别与欧洲规范计算的极限承载力N_{EC}比值的平均值，以及相应的变异系数(COV)，如表5所示。N_u/N_{EC}和N_{FE}/N_{EC}平均值分别为1.03和1.13，相应变异系数分别为0.11和0.21。

(3)美国规范(ASCE/SEI 48)。美国规范通过计算压应力f_a来计算空心钢管试件的极限承载力，如公式(9)所示，其中A_s为空心钢管截面的总面积。

$$N_{ASCE}=f_aA_s \tag{9}$$

$$f_a=\begin{cases} f_y & \dfrac{b}{t}\leqslant\dfrac{681.2}{\sqrt{f_y}} \\ 1.42f_y\left(1-\dfrac{0.00114}{2.62}\sqrt{f_y}\dfrac{b}{t}\right) & \dfrac{681.2}{\sqrt{f_y}}<\dfrac{b}{t}\leqslant\dfrac{919.62}{\sqrt{f_y}} \\ f_{cr} & \dfrac{b}{t}>\dfrac{919.62}{\sqrt{f_y}} \end{cases} \tag{10}$$

有限元模型数据与试验数据的归一化极限承载力N_u/A_sf_y与长细比λ_p的关系，如图15所示。从图15中可以看出，美国规范建议的极限承载力计算公式在λ_p在0.521～1.320的范围内高估了试件实际极限承载力，λ_p值越大，预测的值越不准确。有限元模型计算的极限承载力N_{FE}和试验测得的极限承载力N_u分别与美国规范计算的极限承载力N_{ASCE}比值的平均值，以及相应的变异系数(COV)，如表5所示。N_u/N_{ASCE}和N_{FE}/N_{ASCE}平均值分别为1.08和1.44，相应变异系数分别为1.04和0.71。

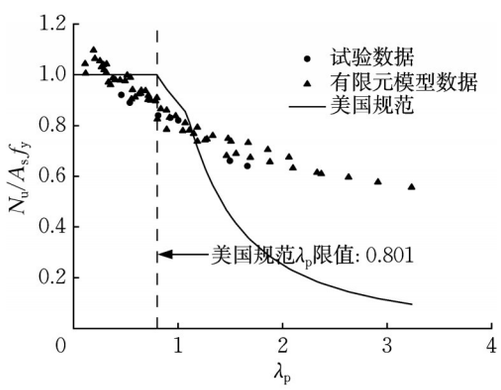


图15　不规则八边形高强空心钢管截面承载力设计评估(美国规范)

Fig. 15　Design capacity assessment of high strength irregular octagonal steel tubes with AISC code

(4)Fang建议公式。Fang等[13]通过对正八边形冷弯薄壁高强空心钢管短柱的试验研究与有限元参数分析，提出了适用于正八边形冷弯薄壁高强空心钢管短柱极限承载力计算公式，该公式通过计算正八边形薄壁高强空心钢管短柱极限承载力的折减系数ρ_{Fang}来进行设计，如式(11)所示。

$$\rho_{\text{Fang}}=\begin{cases}1 & \lambda_p\leqslant 0.521\\ \dfrac{0.9}{\lambda_p^{1.1}}-\dfrac{0.201}{\lambda_p^{2.2}} & \lambda_p>0.521\end{cases} \tag{11}$$

有限元模型数据与试验数据的归一化极限承载力N_u/A_sf_y与长细比λ_p的关系，如图16所示。从图16中可以看出，随着λ_p的增大，Fang等[13]建议的极限承载力计算结果低估了试件实际极限承载力。有限元模型计算的极限承载力N_{FE}和试验测得的极限承载力N_u分别与Fang等建议公式计算的极限承载力N_{Fang}比值的平均值，以及相应的变异系数(COV)，如表5所示。N_u/N_{Fang}和N_{FE}/N_{Fang}平均值分别为1.13和1.25，相应变异系数分别为0.15和0.28。

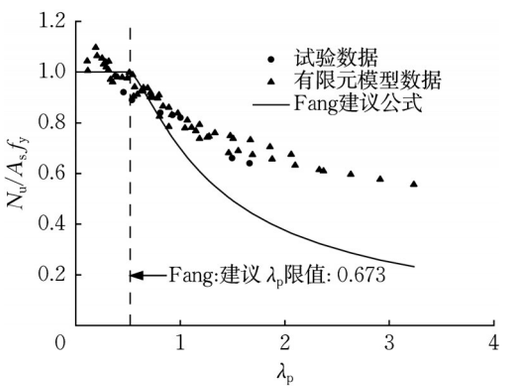


图16 不规则八边形高强空心钢管截面承载力设计评估(Fang建议公式)

Fig. 16 Design capacity assessment of high strength irregular octagonal steel tubes with Fang's proposed formula

总体而言，上述各国规范以及Fang等建议的极限承载力公式，均无法准确预测不规则八边形冷弯薄壁高强空心钢管短柱的极限承载力，为确保不规则八边形冷弯薄壁高强空心钢管短柱不发生局部屈曲，本研究将其截面长细比限值λ_c统一转化为量纲一长细比限值λ_p，并确定为0.445。且基于中国规范提出了适用于不规则八边形冷弯薄壁高强空心钢管短柱局部屈曲影响的极限承载力N_{pro}计算公式，即

$$N_{\text{pro}}=\begin{cases}N_s & \lambda_p\leqslant 0.445\\ \left(1-\dfrac{0.189}{\lambda_p^{0.384}}\right)\dfrac{1}{\lambda_p^{0.384}}N_s & \lambda_p>0.445\end{cases} \tag{12}$$

有限元模型数据与试验数据的归一化极限承载力N_u/A_sf_y与长细比λ_p的关系，如图17所示。从图17中可以看出，本文所提出的极限承载力计算公式与有限元模型计算结果以及试验结果吻合良好。其中有限元模型计算的极限承载力N_{FE}和试验测得的极限承载力N_u分别与本文建议公式计算的极限承载力N_{pro}比值的平均值，以及相应的变异系数(COV)，如表5所示。N_u/N_{pro}和N_{FE}/N_{pro}平均值分别为0.98和1.01，相应变异系数分别为0.04和0.03。

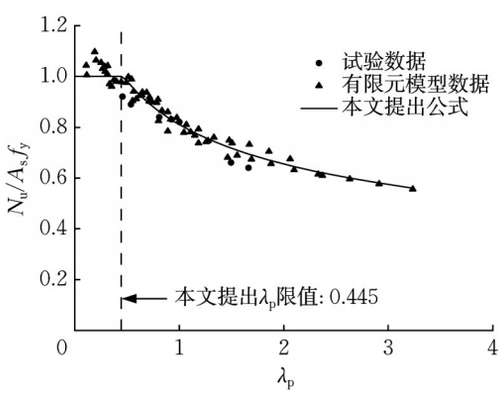


图17 不规则八边形高强空心钢管截面承载力设计评估(本文提出公式)

Fig. 17 Design capacity assessment of high strength irregular octagonal steel tubes with proposed formula

表5 试验和有限元极限承载力与计算公式的预测值比较

Tab. 5 Comparison of predicted capacity with test and numerical results

统计量	N_u/N_{GB}	N_{FE}/N_{GB}	N_u/N_{EC}	N_{FE}/N_{EC}	N_u/N_{ASCE}	N_{FE}/N_{ASCE}	N_u/N_{Fang}	N_{FE}/N_{Fang}	N_u/N_{pro}	N_{FE}/N_{pro}
平均值	0.88	0.94	1.03	1.13	1.08	1.44	1.13	1.25	0.98	1.01
变异系数	0.04	0.06	0.11	0.21	1.04	0.71	0.15	0.28	0.04	0.03

5 结论

本文结合轴压试验与有限元数值模拟，对不规则八边形冷弯薄壁高强空心钢管短柱进行了分析研究。评估和讨论了现有各国规范与现有文献建议的极限承载力计算公式对于不规则八边形冷弯薄壁高强空心钢管短柱极限承载力计算的适用性。提出了不规则八边形冷弯薄壁高强空心钢管短柱轴压极限承载力计算公式。主要结论如下：

(1)不规则八边形薄壁空心钢管短柱破坏模式主要是局部屈曲破坏；由于局部屈曲的问题，轴压作用下无法达到钢材的屈服强度，且空心钢管短柱受

压屈服强度的折减幅度随着截面长细比的增大而增加。

(2)将考虑薄壁钢管的初始缺陷与冷弯加工对钢管强度影响的有限元模拟分析方法应用于空心钢管短柱限元模型。该方法能较好地模拟不规则八边形冷弯薄壁高强空心钢管短柱试件的试验失效模式,以及较好地预测空心钢管短柱试件的试验荷载–位移曲线。有限元模型计算的极限承载力与轴压试验得到的极限承载力之比(N_{FE}/N_u)的平均值为1.04,相应的变异系数(COV)为0.032。

(3)中国规范、欧洲规范、美国规范和Fang等建议的空心钢管试件不发生局部屈曲长细比限值λ_p并不适用于不规则八边形冷弯薄壁高强空心钢管短柱的极限承载力的计算。其中中国规范的极限承载力计算公式预测值高估了试件的实际承载力。在λ_p较大时,欧洲规范、美国规范和Fang等的极限承载力计算公式预测值低估了试件实际的极限承载力。

(4)本文提出了适用于不规则八边形冷弯薄壁高强空心钢管短柱的极限承载力计算公式,计算结果与试验测得结果(N_{pro}/N_u)比值的平均值为0.98,变异系数(COV)为0.04;计算结果与有限元模拟结果比值(N_{pro}/N_{FE})的平均值为1.01,变异系数(COV)为0.03。证明了本文提出公式可以较为准确地预测不规则八边形冷弯薄壁高强空心钢管短柱的极限承载力。

作者贡献声明:

朱炯亦:研究选题,试验设计,论文框架指导。

黄海超:试验设计,理论分析,论文撰写与修改。

刘海鑫:试验与理论分析指导。

杨　钦:论文撰写指导。

参考文献:

[1] 李梦飞,何浩祥,钟国辉.Q690高强钢在单调荷载下的延性断裂判据研究[J].钢结构,2024,39(5):57.
LI Mengfei, HE Haoxiang, ZHONG Guohui. Research on the ductile fracture criterion of Q690 high-strength steel under monotonic load [J]. Steel Structure, 2024,39(5):57.

[2] 朱成松,朱少文,阮建刚,等.提高冷弯矩形钢管质量的措施[J].钢管,2019,48(5):40.
ZHU Chengsong, ZHU Shaowen, RUAN Jiangang, *et al*. Measures to improve the quality of cold-formed rectangular steel tubes [J]. Steel Pipe, 2019,48(5):40.

[3] 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.
SHI Gang, WANG Yuanqing, SHI Yongjiu. Mechanical performance of axially compressed members made of high-strength steel [J]. Journal of Building Structures, 2009, 30(2):92.

[4] 申红侠,刘翔.高强钢焊接方形截面偏压构件整体和局部相关屈曲承载力分析[J].建筑结构,2014,44(4):35.
SHEN Hongxia, LIU Xiang. Analysis of global and local interactive buckling capacity of welded square cross-section members made of high-strength steel under eccentric compression [J]. Building Structure, 2014,44(4):35.

[5] SHI G, ZHOU W J, BAI Y, *et al*. Local buckling of 460 MPa high strength steel welded section stub columns under axial compression [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2014, 100: 60.

[6] SCHILLO N, FELDMANN M. Interaction of local and global buckling of box sections made of high strength steel [J]. Thin-Walled Structures, 2018, 128: 126.

[7] MA J L, CHAN T M, YOUNG B. Experimental investigation on stub-column behavior of cold-formed high-strength steel tubular sections [J]. Journal of Structural Engineering, 2016, 142(5): 04015174.

[8] MA J L, CHAN T M, YOUNG B. Cold-formed high strength steel tubular beam-columns[J]. Engineering Structures, 2021, 230: 111618.

[9] FANG H, CHAN T M, YOUNG B. Structural performance of cold-formed high strength steel tubular columns [J]. Engineering Structures, 2018, 177: 473.

[10] FANG H, CHAN T M. Resistance of axially loaded hot-finished S460 and S690 steel square hollow stub columns at elevated temperatures [J]. Structures, 2019, 17: 66.

[11] WANG J, AFSHAN S, SCHILLO N, *et al*. Material properties and compressive local buckling response of high strength steel square and rectangular hollow sections [J]. Engineering Structures, 2017, 130: 297.

[12] GKANTOU M, THEOFANOUS M, WANG J, *et al*. Behaviour and design of high-strength steel cross-sections under combined loading [J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings, 2017, 170(11): 841.

[13] FANG H, CHAN T M, YOUNG B. Behavior of octagonal high-strength steel tubular stub columns [J]. Journal of Structural Engineering, 2019, 145(12): 04019150.

[14] FANG H, CHAN T M, YOUNG B. Experimental and numerical investigations of octagonal high-strength steel tubular stub columns under combined compression and bending [J]. Journal of Structural Engineering, 2021, 147(1): 04020282.

[15] FANG H, CHAN T M, YOUNG B. Structural performance of concrete-filled cold-formed high-strength steel octagonal tubular stub columns[J]. Engineering Structures, 2021, 239: 112360.

[16] CHEN J, ZHU J Y, CHAN T M. Experimental and numerical investigation on stub column behaviour of cold-formed octagonal hollow sections [J]. Engineering Structures, 2020, 214: 110669.

[17] LIU H X, FANG H, ZHU J Y, *et al*. Numerical investigation on the structural performance of octagonal hollow section columns [J]. Structures. 2021,34:3257.

[18] ZHU J Y, CHAN T M, YOUNG B. Cross-sectional capacity of octagonal tubular steel stub columns under uniaxial compression[J]. Engineering Structures, 2019, 184: 480.

[19] International Organization for Standardization. Metallic materials-tensile testing-part 1: method of test: ISO 6892-1: 2019 [S]. Geneva: International Organization for Standardization, 2019.

[20] CHEN J B, LIU H X, CHAN T M. Material properties and residual stresses of cold-formed octagonal hollow sections [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2020, 170: 106078.

[21] LIU H, CHEN J, CHAN T M . Predictive models for material properties of cold-formed conventional steels in the cornerregion [J]. Thin-Walled Structures, 2023,187:110740.

[22] LIU H, CHEN J, CHAN T M. Mechanical properties of corner material in cold-formed steel structure: from normal strength to high strength [J]. Structures, 2024,59:105651.

[23] LIU J, FANG H, CHAN T M. Experimental and numerical investigations on stub column behaviour of cold-formed high strength steel irregular octagonal hollow sections [J]. Thin-Walled Structures, 2022, 180: 109770.

[24] CHEN J, CHEN Z, LIU H, *et al*. Implementation of cold-formed steel stress - strain relationships using limited available material parameters [J]. Journal of Structural Engineering, 2024,150:04024142.

[25] ZHU J Y, CHEN J B, ZHANG L, *et al*. Numerical investigation and design recommendation for thin-walled octagonal concrete filled steel tubes [J]. Thin-Walled Structures, 2023, 188: 110801.

[26] 中华人民共和国建设部. 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. Technical standard of cold-formed thin-wall steel structures: GB 50018—2002 [S]. Beijing: China Planning Press, 2002.

[27] CEN. Eurocode 3: design of steel structures: part 1-1: EN 1993-1-1 [S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2015.

[28] American Society of Civil Engineers. Design of steel transmission pole structures: ASCE/SEI 48-11 [S]. Reston: American Society of Civil Engineers, 2011.

[29] ZHU J Y, CHAN T M, YOUNG B. Cross-sectional capacity of octagonal tubular steel stub columns under uniaxial compression[J].Engineering Structures, 2019, 184: 480.