

舒兴平,彭妍,刘泽龙. 不锈钢芯板梁受弯性能有限元分析[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2019, 34(1): 36-41. doi: 10.13582/j.cnki.1672-9102.2019.01.006

Shu X P, Peng Y, Liu Z L. Finite Element Analysis of Flexural Performance of Stainless Steel Core Plate Beams [J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2019, 34(1): 36-41. doi: 10.13582/j.cnki.1672-9102.2019.01.006

不锈钢芯板梁受弯性能有限元分析

舒兴平*, 彭妍, 刘泽龙

(湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要: 不锈钢芯板梁是一种新型夹层结构,由面板和芯子组成,其芯子由薄壁圆管按照一定间距排列组成,面板和芯子应用铜钎焊接。采用非线性有限元的分析方法,对这种新型组合截面梁在不同截面参数下的屈曲模式、变形过程、荷载-竖向位移曲线等方面进行分析,全面研究新型受弯构件的力学性能。研究表明:截面宽厚比、高宽比对不锈钢芯板梁的抗弯承载力影响较大,跨高比对极限承载力影响较小;由于芯子对面板的约束,构件腹板局部变形小,材料能够得到充分的应用,抗弯承载力高;但超过一定限度,增大芯子刚度不会再提高构件的极限承载力;研究分析结果可以为工程设计提供参考依据。

关键词: 不锈钢芯板梁;截面参数;受弯性能;有限元分析

中图分类号: TU398⁺.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-9102(2019)01-0036-06

Finite Element Analysis of Flexural Performance of Stainless Steel Core Plate Beams

Shu Xingping, Peng Yan, Liu Zelong

(College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: The stainless steel core plate beams was a new sandwich structure consisting of a panel and a core. The core was composed of thin-walled round tubes arranged at a certain distance, and the panel and the core were clamped with copper brazing. Using nonlinear finite element analysis method, the buckling mode, deformation process, load-vertical displacement curve of the new composite section beams under different section parameters were analyzed, and the mechanical properties of the new bending member were comprehensively studied. The results show that the aspect ratio and flange width ratio have a great influence on the bending bearing capacity of the stainless steel core plate beams, and the height-to-height ratio has no significant effect on the ultimate bending moment. Due to the binding force of the core on the panel, the local deformation of the component is small, the material can be fully applied, the bending capacity is high. However, if the limit is exceeded, increasing cores stiffness no longer increases the ultimate bearing capacity of the component; Research and analysis results provide reference for engineering design.

Keywords: stainless steel core plate beams; section parameters; bending performance; finite element analysis

不锈钢芯板梁是一种新型夹层结构,其面板和芯子采用奥氏体型不锈钢 S30408,按照一定间距排列

的薄壁圆管作为芯子,芯子和腹板通过夹式铜钎焊接成一个整体,再将上下翼缘与腹板焊接一起得到整个构件,如图 1 所示,芯子、腹板和上下翼缘可根据实际工程需要采用不同的规格。

对于不锈钢受弯构件,国内外学者进行了大量的试验研究和理论分析,Rasmussen^[1]等对不锈钢箱形截面梁进行了试验研究,提出了考虑冷作硬化强度的箱形截面梁的设计方法,对不锈钢受弯构件的设计强度计算提出了建议;Bredenkamp^[2]等提出了热轧和组合箱形截面不锈钢构件的设计方法,采用改进的 Ramberg-Osgood 公式模拟应力-应变曲线,并提出可以使用切线模量计算不锈钢构件承受荷载时的刚度;Ben Young 和 Feng Zhou^[3-8]等通过对不锈钢冷成型矩形、方形和圆管梁进行试验研究,并将试验结果与 ASCE 规范、AS/NZS 标准、NAS 规范以及理论计算结果对比,发现他们相对于试验值均偏于保守;Theofanous^[9-10]等对 4 组双相不锈钢梁进行了 3 点弯曲试验,通过实验和有限元模拟分析了影响试件承载力的各种因素;Real 和 Mirambell^[11-12]等对多种不锈钢截面梁进行试验研究,分析了不锈钢的非线性应力应变关系对于不锈钢弯曲性能的影响;辛连春^[13-14]等针对冷成型薄壁方管、矩形管和焊接工字型截面,11 种不同截面规格,共 39 根受弯构件进行受弯构件试验研究,得到了不同截面受弯时的抗弯强度和破坏形式。

不锈钢芯板梁作为一种新型结构,其受弯性能还未有研究,因此本文采用非线性有限元的分析方法,对这种新型组合截面梁进行精细的有限元分析,全面研究其受弯承载力性能。

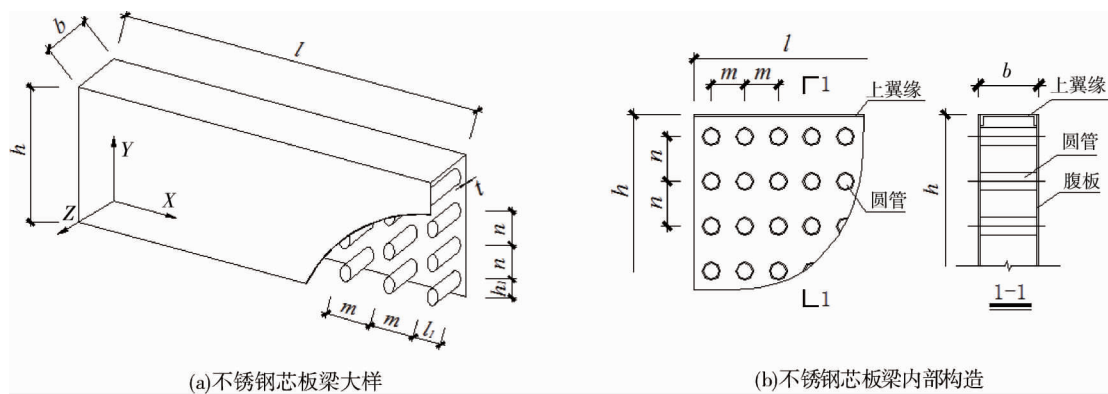


图 1 不锈钢芯板梁

1 建立有限元模型

本文利用 ABAQUS 软件进行有限元分析,采用 S4R 壳单元对面板和芯子进行模拟,S4R 单元可以有效地求解材料和几何非线性问题^[15].为简化分析,在有限元模型中不考虑不锈钢材料的各向异性,研究表明这种简化带来的误差在允许范围内^[16].不锈钢应力应变关系曲线采用 Gardner^[17]等提出的 2 阶段 Ramberg-Osgood 模型拟合,在有限元模型中,模型的坐标系如图 1a 所示,在梁长度 $l/4$ 位置处对称施加 Y 向集中荷载模拟梁的受弯,模型的具体边界条件:约束梁一端支座底边线上所有节点在 X, Y, Z 方向的平动,另一端支座底边线上所有节点在 Y, Z 方向的平动,放松其他自由度,即一端固定铰支座,一端滑动铰支座,梁的支座处应采取构造措施,防止梁端截面出现扭转,本文考虑梁端为夹支支座约束,通过约束梁端截面单元的侧向自由度来实现.几何缺陷存在于所有的结构构件中,在有限元分析中,可以保守的取特征值屈曲分析的第一阶屈曲模态作为几何初始缺陷的变形形态^[18-20],采用 *imperfection 命令更新模型中各相应节点的几何坐标,在有限元分析中考虑几何非线性,采用修正的弧长法进行求解。

2 构件受弯性能影响因素分析

2.1 变形模式

本文主要分析截面宽厚比 b/t ,高宽比 h/b ,跨高比 l/h 等因素对两端简支的不锈钢芯板梁受弯承载力

的影响,模型中翼缘和腹板厚度相同,圆管的直径为 32 mm,厚度为 0.3 mm,纵向间距 m 为 60 mm,竖向间距 n 为 160 mm.

通过非线性有限元分析可知,构件主要有 3 种变形模式:整体弯曲变形、上翼缘局部屈曲变形和整体弯曲变形的耦合、腹板局部屈曲变形和整体弯曲变形的耦合,图 2 为截面各参数变化时构件达到极限抗弯承载力时 3 种典型的变形模式.

当构件跨高比 $l/h > 25$ 或跨高比较大、宽厚比适中时,构件主要发生整体弯曲变形,如图 2a 所示.

当构件跨高比较小、宽厚比 $b/t > 25$ 时,在不锈钢芯板梁纯弯段受压上翼缘易出现半波变形,同时构件整体还会伴随出现整体弯曲变形,截面较高即两侧腹板的宽厚比较大时,腹板处容易发生局部屈曲,但因为芯子对两侧腹板良好的约束能力,此时腹板不会发生局部屈曲,如图 2b 所示,构件材料能够得到充分利用.同时为了防止受压侧腹板处出现局部变形,腹板受压区上部的圆管至上翼缘的距离应不超过 85 mm.

当构件高宽比较大、宽厚比 $b/t \leq 25$ 时,构件的受压翼缘在达到极限荷载之前的屈曲很小,而腹板变形较明显,在梁整体弯曲破坏前出现压屈破坏,此时控制梁破坏的条件是腹板压屈破坏,这说明此时芯子的刚度相对腹板刚度较小,不能阻止腹板和芯子之间连线位置的变形,芯子对腹板的约束能力已不满足要求,建议改进已有的芯管规格或者控制截面宽厚比不小于 25.

综合分析可知,新型不锈钢芯板梁的变形模式相对于同截面箱形梁而言有较大的差异,芯管的布置改变了腹板的屈曲模态,通过调整芯管的规格和布置可以有效地减小或避免局部变形.

2.2 荷载-位移曲线

图 3 为不同截面参数下不锈钢芯板梁荷载-竖向位移曲线,此处的荷载为 1/4 加载点的集中荷载,竖向位移为跨中截面下翼缘中心处的挠度,从荷载-竖向位移曲线可以看出截面宽厚比、高宽比、跨高比对构件初始刚度、最大荷载、跨中挠度等方面的影响均较为显著,由图 3a 荷载-竖向位移曲线可以看出,当截面高宽比固定不变时不锈钢芯板梁所受最大集中荷载随截面宽厚比的增大而减小;所有荷载-竖向位移曲线的斜率都随着截面宽厚比的增大而明显变小,表明截面宽厚比的增大削减了不锈钢芯板梁的刚度.

由图 3b 荷载-竖向位移曲线可以看出,当截面高宽比固定不变时,不锈钢芯板梁所受最大集中荷载随着截面高宽比的增大而增大,截面高宽比对不锈钢受弯构件所受最大集中荷载的影响幅度较截面宽厚比更显著;随着截面高宽比的增大,荷载-竖向位移曲线的斜率明显增大,表明截面高宽比的增大明显增强了不锈钢芯板梁的刚度,截面高宽比较小时,构件达到极限承载力之后都具有较好的延性.

图 3c 荷载-竖向位移可以看出,当截面高宽比、宽厚比不变时,不锈钢芯板梁所受最大集中荷载随构件跨高比的增大而减小;荷载-竖向位移曲线的斜率随构件跨高比的增大而显著减小,表明构件跨高比的增大明显削弱了不锈钢受弯构件的刚度.

2.3 极限弯矩

图 4a 为构件随截面宽厚比变化的极限抗弯承载力,结果表明,构件极限弯矩随截面宽厚比的增大而减小,宽厚比对构件承载力影响比较明显,宽厚比较大时,高宽比对极限承载力的影响相对较小,此时局部屈曲主要发生在受压上翼缘,而当受压翼缘局部屈曲时,抗弯刚度下降,抗弯承载能力减小.

图 4b 为构件随截面高宽比变化的极限抗弯承载力,随着截面高宽比增大,极限弯矩明显增大,宽厚比较小时局部屈曲主要发生在受弯腹板,由于芯子对腹板的有效约束,此时随着高厚比的增加,极限弯矩的增大最为显著.

图 4c 为构件随跨高比变化的极限抗弯承载力,综合来看,当截面的宽厚比、高宽比不变时,不锈钢芯板梁的极限抗弯承载力几乎不随构件跨高比的变化而变化,这表明构件跨高比的变化对不锈钢芯板梁的极限弯矩影响很小.这是因为本文有限元分析的不锈钢芯板梁在受弯过程中只有局部屈曲和整体弯曲破坏,构件不会发生平面外的弯扭失稳.

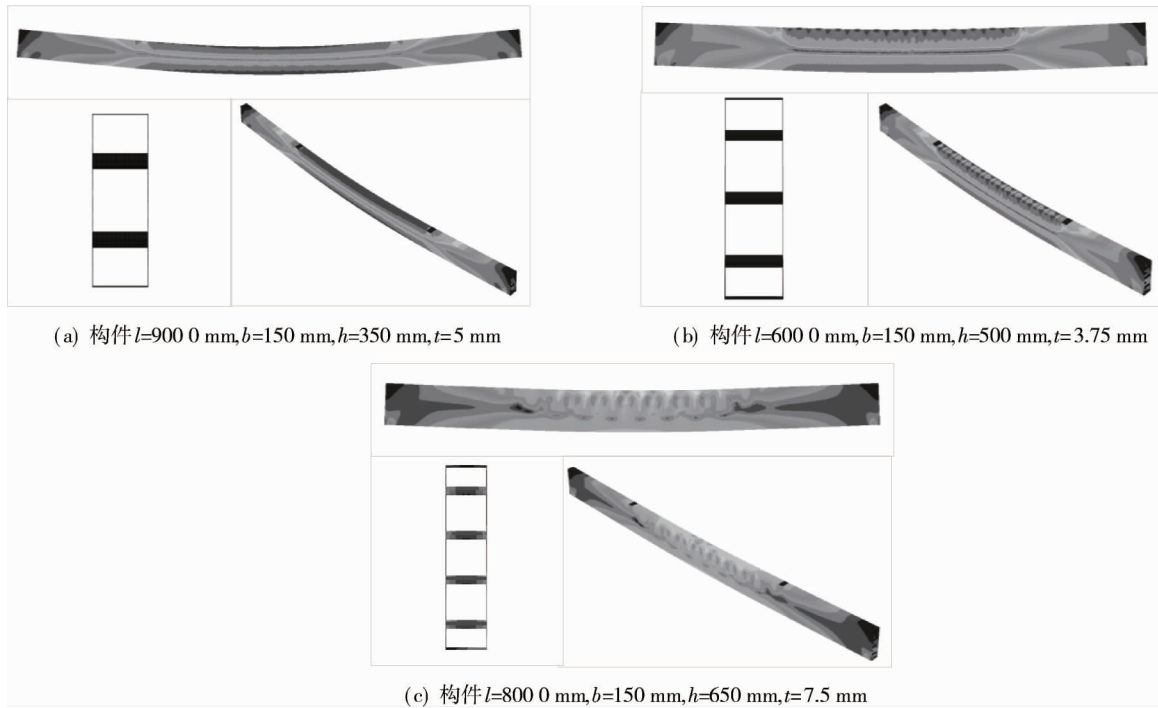


图 2 构件变形模式

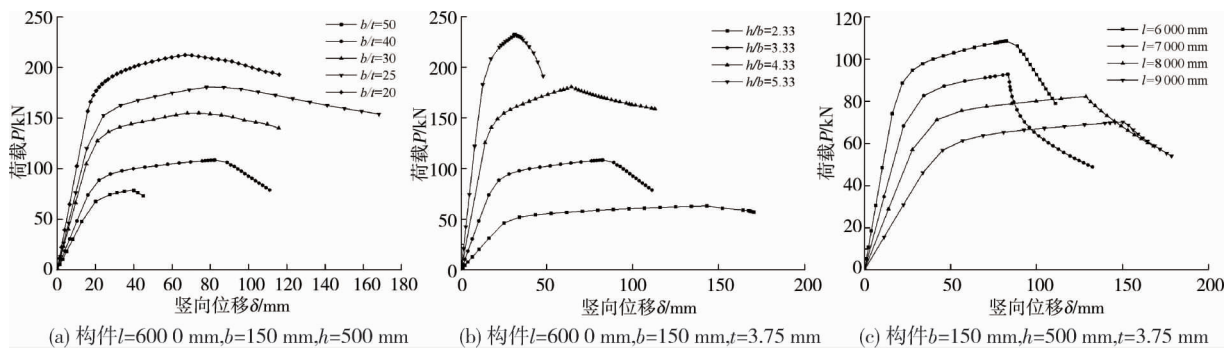


图 3 构件荷载-竖向位移曲线

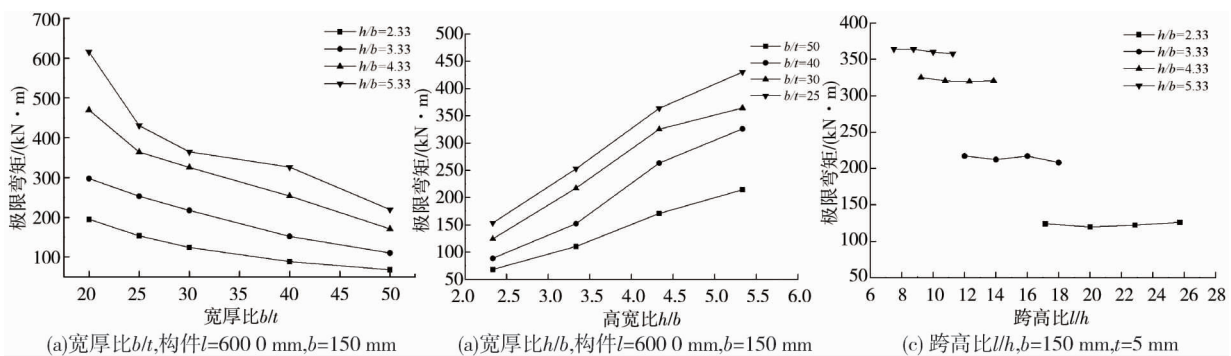


图 4 构件极限弯矩随参数曲线变化

2.4 芯子参数分析

根据上文分析可知,芯子的刚度是影响腹板屈曲破坏的重要参数,所以在保持截面参数不变的条件下来具体研究芯子对构件变形模式、极限承载力等力学性能的影响.图 5 为芯子厚度 t_c 由 0.1 mm 增至 0.6 mm 时不锈钢芯板梁达到极限承载力时的变形模式图,图 6 为不同芯子厚度的荷载-竖向位移曲线,此处的荷载为 $1/4$ 加载点的集中荷载,竖向位移为跨中截面的下翼缘中心处的挠度,此时梁长、宽、高、面板

厚度分别为 6 000, 150, 650, 5 mm.

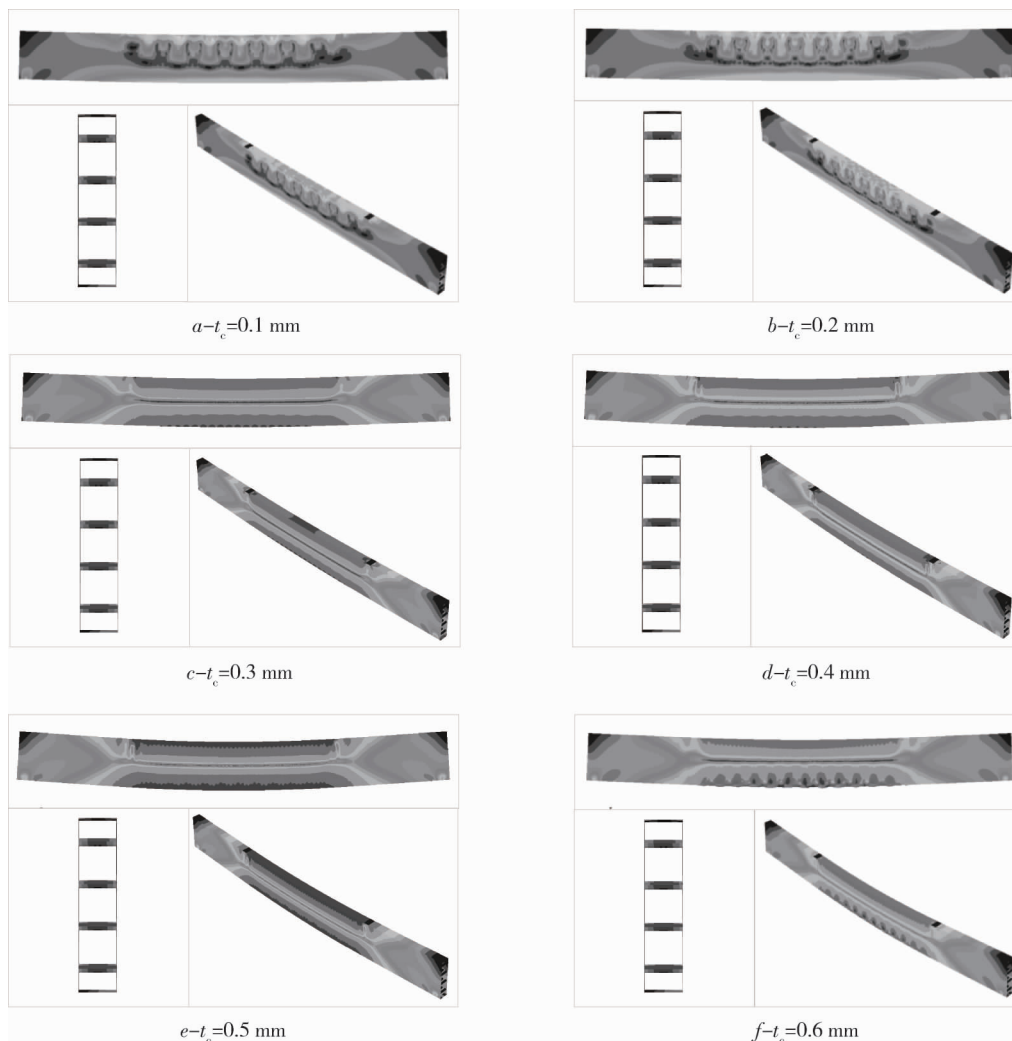


图5 不同芯子厚度变形模式

由图5和图6综合分析可知,芯子刚度对腹板的临界屈曲应力的影响非常大,当芯子厚度 $t_c < 0.3$ mm 时,构件在达到极限承载力时腹板屈曲较明显,此时,构件的极限承载力随芯子厚度的增加而明显增加;当芯子厚度 $t_c \geq 0.3$ mm 时,腹板不再有明显的局部屈曲,此时再增加芯子的厚度,对构件的极限承载力的影响也变得很小,构件在达到极限承载力时主要是整体弯曲变形。

由此我们可以得出:对于一定结构布置的芯子,增大芯子的厚度,即增大芯子的刚度对腹板临界屈曲应力影响较大,从而影响整个构件的极限承载力,合理的布置芯子能够提高腹板的临界屈曲应力,但不能无限地通过增加芯子的刚度来提高其承载能力,因为当芯管刚度达到一定程度时,其带来的效果是不经济的。

3 结论

1) 当构件跨高比 $l/h > 25$ 或跨高比较大、宽厚比适中时,构件主要发生整体弯曲变形;当构件跨高比较小、截面宽厚比 $b/t > 25$ 时,在不锈钢芯板梁纯弯段受压上翼缘易出现半波变形,构件主要发生受压上翼缘屈

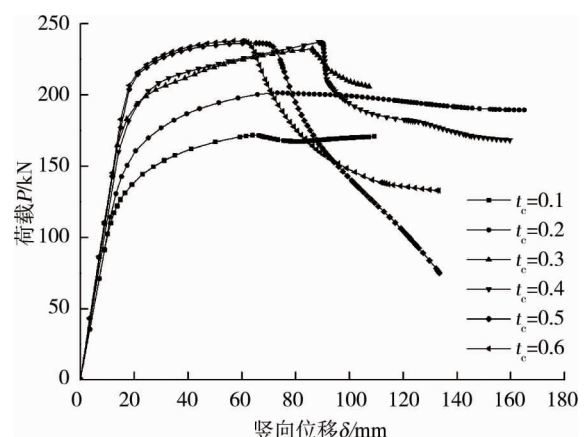


图6 构件荷载-竖向位移曲线

曲和整体弯曲变形,此时可以通过适当增大上翼缘板的刚度来提高构件的承载力;当构件高宽比较大、宽厚比 $b/t \leq 25$ 时,随着荷载的逐渐增大,构件的受压翼缘屈曲很小,而腹板变形较明显,构件主要发生腹板屈曲和整体弯曲变形,此时可通过增大芯子的刚度来提高芯子对腹板的约束作用从而提高构件的承载力。

2) 不锈钢芯板梁的受弯刚度和所受最大集中荷载随截面宽厚比、跨高比的增大而减小,随高宽比的增大而明显增大,在实际应用中,应根据需要选择合适的截面参数。

3) 不锈钢芯板梁的极限弯矩随截面宽厚比的增大而减小,随截面高宽比的增大而显著增大,但几乎不随构件跨高比的变化而变化。

4) 宽厚比、高宽比和跨高比一定时,适当增大芯子的刚度可以有效减小腹板的屈曲变形,从而提高构件的极限承载力,但不能无限制地通过增大芯子的刚度来提高构件的承载力,对一定截面参数的构件,可以通过优化芯子和面板的相对刚度,最大限度的提高构件的承载力。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Breckenkamp P J, Berg G J V D, Merwe P V D. The behaviour of hot-rolled and built-up stainless steel structural members [J]. Journal of Constructional Steel Research, 1998, 46(1/3):464.
- [3] Zhou F, Young B. Tests of cold-formed stainless steel tubular flexural members[J]. Thin-Walled Structures, 2005, 43(9):1325-1337.
- [4] Zhou F, Young B. Experimental and numerical investigations of cold-formed stainless steel tubular sections subjected to concentrated bearing load[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2007, 63(11):1452-1466.
- [5] Zhou F, Young B. Cold-formed high-strength stainless steel tubular sections subjected to web crippling[J]. Journal of Structural Engineering, 2007, 133(3):368-377.
- [6] Zhou F, Young B. Experimental investigation of cold-formed high-strength stainless steel tubular members subjected to combined bending and web crippling[J]. Journal of Structural Engineering, 2007, 133(7):1027-1034.
- [7] Zhou F, Young B. Cold-formed stainless steel sections subjected to web crippling[J]. Journal of Structural Engineering, 2006, 132(1):134-144.
- [8] Zheng B, Hua X, Shu G. Tests of cold-formed and welded stainless steel beam-columns[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2015, 111:1-10.
- [9] Theofanous M, Gardner L. Experimental and numerical studies of lean duplex stainless steel beams [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2010, 66(6):816-825.
- [10] 焦伟丰, 郭成喜. 双相不锈钢空心截面梁的极限抗弯承载力分析[J]. 钢结构, 2012, 27(9):20-22.
- [11] Mirambell E, Real E. On the calculation of deflections in structural stainless steel beams: an experimental and numerical investigation[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2000, 54(1):109-133.
- [12] Real E, Mirambell E. Flexural behaviour of stainless steel beams[J]. Engineering Structures, 2005, 27(10):1465-1475.
- [13] 辛连春, 沈晓明, 舒赣平, 等. 不锈钢受弯构件的试验研究[J]. 工业建筑, 2012, 42(5):33-40.
- [14] 沈晓明. 不锈钢受弯构件及构件中的受压板件(组)的理论分析和试验研究[D]. 南京:东南大学, 2010.
- [15] 庄茁. 基于 ABAQUS 的有限元分析和应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2009.
- [16] Rasmussen K J R, Burns T, Bezkorovainy P, et al. Numerical modelling of stainless steel plates in compression[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2003, 59(11):1345-1362.
- [17] Gardner L, Ashraf M. Structural design for non-linear metallic materials [J]. Engineering Structures, 2006, 28(6):926-934.
- [18] Ashraf M, Gardner L, Nethercot D A. Finite element modeling of structural stainless steel cross-sections[J]. Thin-Walled Structures, 2006, 44(10):1048-1062.
- [19] Gardner L, Nethercot D A. Numerical modeling of stainless steel structural components—A Consistent Approach[J]. Journal of Structural Engineering, 2004, 130(10):1586-1601.
- [20] Hancock G J, Yang D. Numerical simulation of high-strength steel box-shaped columns failing in local and overall buckling modes[J]. Journal of Structural Engineering, 2006, 132(4):541-549.