

# 冷弯厚壁钢管截面不同部位材料特性分布模型

沈祖炎<sup>1,2</sup>, 温东辉<sup>1,3</sup>, 李元齐<sup>1,2</sup>, 马越峰<sup>4</sup>

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092;  
3. 太原学院 建筑工程系, 山西 太原 030032; 4. 上海宝钢型钢有限公司, 上海 200050)

**摘要:** 对取自 30 种不同截面、不同厚度、不同钢材型号、不同厂家生产的冷弯厚壁矩形和方形钢管的 568 个试件进行了材料性能试验研究。结果表明: 焊缝部位的屈服强度和极限强度相对于邻边均有提高; 角部屈服强度提高系数随型钢中心线长与弯角内径之比的增大而增大, 而各参数对极限强度的影响较小; 焊缝两邻边间的强度差异很小。基于研究结果, 提出了冷弯矩形和方形钢管屈服强度、极限强度、强屈比和伸长率沿截面的分布模型。当相应冷弯型钢截面的梁、柱强度和稳定分析中需要考虑冷弯效应的影响时, 可以应用此分布模型。

**关键词:** 冷弯厚壁钢管; 材性试验; 屈服强度; 冷弯效应; 材料特性

**中图分类号:** TU391; TU392.3

**文献标志码:** A

## Distribution Patterns of Material Properties for Cross-section of Cold-formed Thick-walled Steel Rectangular Tubes

SHEN Zuyan<sup>1,2</sup>, WEN Donghui<sup>1,3</sup>, LI Yuanqi<sup>1,2</sup>, MA Yuefeng<sup>4</sup>

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Department of Structural Engineering, Taiyuan University, Taiyuan 030032, China; 4. Shanghai Baosteel Steel Co., Ltd., Shanghai 200050, China)

**Abstract:** Five hundred and sixty eight test coupons taken from thirty cold-formed thick-walled steel square and rectangular tubes with different sizes of sections, thickness of plates, grades of steel and different manufacturers were tested to investigate the effects of cold-forming process on the material properties of different parts of sections. The test results indicate that the cold-forming effects have obvious influence on the strength and ductility of cold-formed thick-

walled sections. The difference of material properties between two adjacent plates connected to the plate containing weld can be ignored. The yield and tensile strength of weld portion and corner parts are enhanced compared with the adjacent plates. The yield strength enhancement factors of corner parts increase with the increase of the ratio of the length of centerline to the inside diameter of corners, but the enhancement factors for tensile strength are independent on the respective parameters. Based on the investigation, distribution patterns of yield strength, tensile strength, tensile to yield ratio and percentage elongation of cold-formed thick-walled steel rectangular hollow sections were proposed, which can be used for strength and stability analysis of corresponding beams and columns, while the cold-forming effects are to be taken into account.

**Key words:** cold-formed thick-walled tubular; material test; yield strength; cold-forming effect; material property

冷弯型钢在国际上是建筑钢结构的主要用材之一, 已被广泛应用于低多层工业厂房、住宅及商用建筑等<sup>[1-3]</sup>。与热轧型钢相比, 冷加工可以方便地得到各种截面形状, 进而获得令人满意的强度重力比<sup>[4]</sup>。但是, 冷加工使冷弯型钢的力学性能与冷弯前的钢板有了显著区别: 提高了屈服点和抗拉强度, 屈服强度与极限抗拉强度之比会增加; 降低了材料的塑性、冲击韧性和延伸率; 沿型钢截面各点产生了大小不等的冷弯残余应力。

国外对冷弯构件的研究较早, 主要集中于厚度在 6 mm 以下的冷弯型钢构件。Karren 等<sup>[5-6]</sup>通过试验研究发现, 弯角部位的屈服强度有较大提高, 并且认为角部屈服强度的增加取决于母材的强屈比和弯角内半径与平板厚度之比。Abdel-Rahman 等<sup>[7]</sup>总结了国外 1997 年以前关于冷弯构件材性的试验结果,

收稿日期: 2016-05-03

基金项目: 国家自然科学基金(51178330)

第一作者: 沈祖炎(1935—), 男, 教授, 中国工程院院士, 主要研究方向为钢结构。E-mail: zyshen@tongji.edu.cn

通讯作者: 温东辉(1982—), 女, 工学博士, 主要研究方向为冷弯型钢结构抗震性能。E-mail: wendh9@163.com

提出了针对国外钢材和当时冷加工工艺的冷弯材料分析模型,但主要适用于厚度在 6 mm 以下的槽型冷弯型钢和采用先圆后方加工工艺得到的方管. 金昌成<sup>[8]</sup>在计算冷弯型钢棱角部分屈服强度公式基础上得到全截面屈服强度及设计强度的计算公式,原则上对厚薄壁冷弯型钢均适用,但由于当时国内厚壁冷弯型钢的试验数据较少,对厚壁冷弯型钢的准确度尚需进一步验证.

冷弯硬化过程使钢材屈服强度显著提高,钢结构设计中合理地考虑屈服强度的提高,将会减少材料用量,实现更好的经济效益. 国内外规范<sup>[9-12]</sup>允许利用冷加工引起的强度提高,并给出了适用于 6 mm 以下薄壁型钢考虑冷弯效应时的全截面屈服强度计算公式. 对 6 mm 以上冷弯钢管的冷弯效应,不同学者<sup>[13-14]</sup>进行了一定的研究,但仍比较有限,尚需就不同厂家、钢材等级、截面形式、成型方式及厚度范围进行具有一定代表性的试验. 为此,本文对壁厚为 8~16 mm,边长为 86~500 mm,钢号为 Q235B 和 Q345B 以及不同厂家生产的“直接成方”冷弯厚壁钢管的平板部位、弯角部位和焊缝部位进行系统的材性试验研究. 基于试验结果,给出了材料特性沿钢管整个截面的分布模型,为这类钢管进一步的理论分析和工程应用提供了基础.

## 1 冷弯厚壁钢管材性试验

### 1.1 试件选取

材性试验的试件在冷弯钢管上的位置如图 1 所示. 其中,试件 F1~F3 取自平板,试件 W1 包含焊缝,试件 C1~C4 取自角部. 钢管考虑不同截面尺寸和强度等级,每种钢管重复取样 2 或 3 次,进行材性试验的钢管规格如表 1 所示. 共加工平板试件 288 个,弯角试件 280 个,合计 568 个. 方、矩形钢管为上海宝钢型钢有限公司和武钢集团汉口轧钢厂生产的

Q235B 和 Q345B 冷弯钢管. 本文试验中所选用的方、矩形钢管采用“直接成方”工艺,即由母材卷板经辊轧压弯成型后,用单缝高频对焊而成,高频焊缝均位于矩形钢管的短边. 在选择钢管时,综合考虑了钢材强度、钢管形状、截面尺寸及壁厚等因素.

表 1 材性试验的钢管规格

Tab.1 Sizes of steel tubes

序号	截面规格/ (mm×mm×mm)	钢号 等级	来源	试件数量	
				平板试件	弯角试件
1	86×86×8	Q345B	武钢	12	12
2	160×80×8	Q345B	武钢	12	12
3	200×80×7.75	Q345B	武钢	12	12
4	108×108×10	Q345B	武钢	12	12
5	118×118×10	Q345B	武钢	12	12
6	250×250×8	Q345B	武钢	12	12
7	140×100×7.5	Q345B	武钢	12	12
8	200×100×8	Q345B	武钢	12	12
9	120×50×4	Q345B	武钢	12	12
10	135×135×10	Q235B	武钢	12	12
11	135×135×12	Q235B	武钢	12	12
12	220×220×10	Q235B	武钢	12	12
13	250×250×8	Q345B	宝钢	8	8
14	300×200×8	Q345B	宝钢	8	8
15	108×108×10	Q345B	宝钢	8	8
16	120×120×10	Q345B	宝钢	12	8
17	135×135×10	Q345B	宝钢	8	8
18	220×220×10	Q345B	宝钢	8	8
19	400×200×10	Q345B	宝钢	8	8
20	350×250×11.5	Q345B	宝钢	4	4
21	350×350×12	Q345B	宝钢	8	8
22	350×250×12	Q345B	宝钢	8	8
23	350×350×16	Q345B	宝钢	8	8
24	500×500×16	Q345B	宝钢	8	8
25	300×300×8	Q345B	宝钢	8	4
26	220×220×16	Q235B	宝钢	8	8
27	108×108×10	Q235B	宝钢	8	8
28	220×220×10	Q235B	宝钢	8	8
29	350×350×14	Q235B	宝钢	8	8
30	250×250×16	Q235B	宝钢	8	8

所有试件均按《金属材料拉伸试验 第 1 部分:室温试验方法》(GB/T 228.1—2010)<sup>[15]</sup>规定制作.

方、矩形钢管的试件命名原则为:A/B/C-钢材等级-截面类型代号-钢管截面长边尺寸-厚度-试件编号. 其中,A、B、C 代表重复试件;钢材等级 Q1、Q2 分别表示试件取自 Q235B 和 Q345B 的钢管;截面类型代号 S、R 分别代表方钢管和矩形钢管;编号 W1、F1~F3、C1~C4 分别表示带焊缝试件、无焊缝平板试件和角部试件,典型试件命名原则见图 2a. 平板试件沿钢管长度方向选取,试件尺寸如图 2b 所示,图中过渡段圆弧半径根据现有加工器械取  $R=30\sim45$  mm, $t$  为管壁实际厚度,弯角部位的材性试验采用沿钢管长度方向选取的圆弧试件进行试验,见图 2c.

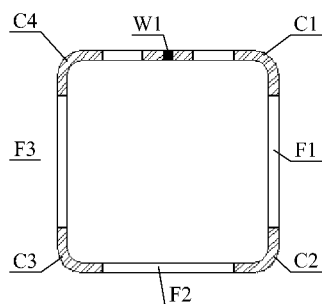


图 1 材性试件的位置

Fig.1 Location of coupons

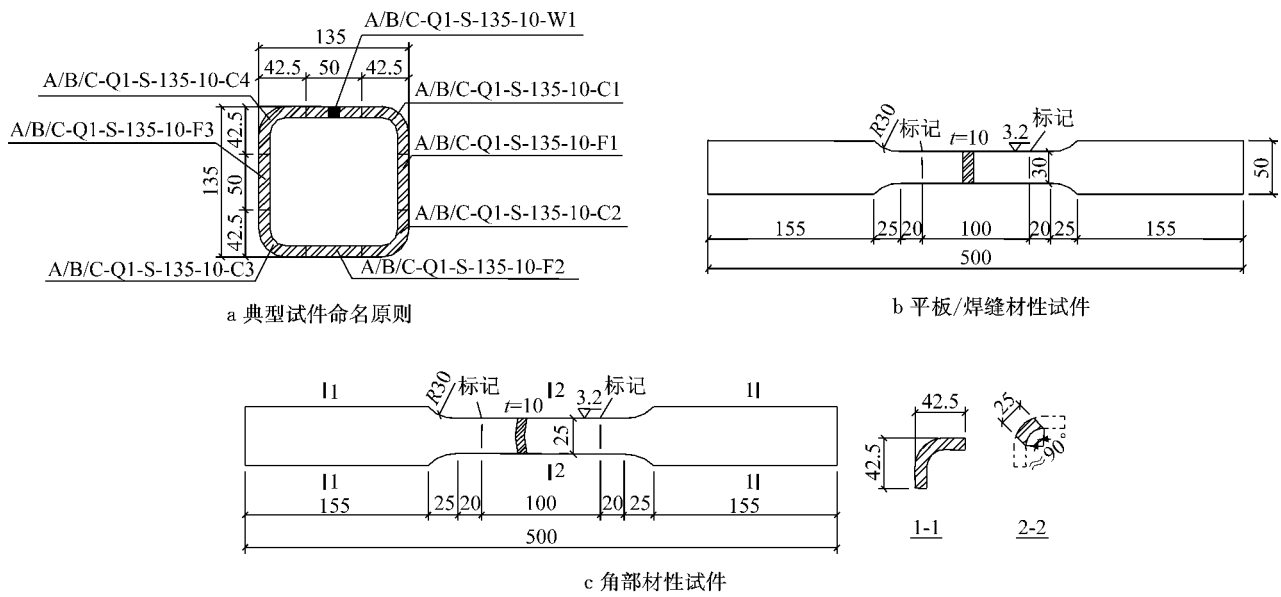


图 2 试件形状及编号(单位:mm)

Fig.2 Geometry and numbering of coupons (Unit: mm)

## 1.2 试验过程

平板试件的试验在上海金艺材料检测技术有限公司的 Zwick/Roell Z400E 材性试验机上进行,试验速率按《金属材料拉伸试验 第 1 部分:室温试验方法》(GB/T 228.1—2010)<sup>[15]</sup> 的相关规定采用. 试验采用平板夹具,并用电子引伸计全程记录标距段伸长量,以得到各试件从拉伸直至破坏全过程的荷载-应变关系,进而反映出材料的应力-应变关系. 试验过程及断口见图 3 和 4.

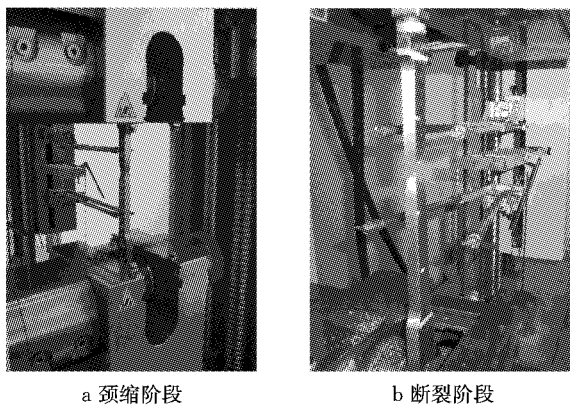


图 3 平板试件试验过程

Fig.3 Test procedure of flat coupons

弯角试件的试验在同济大学建筑工程系实验室的材性试验机上进行. 为了受力均匀及便于夹持,试验前将弯角试件的两端打磨平整. 采用在试件中点处内外表面各粘贴一个应变片来记录试件的应变值. 弯角试件的试验过程如图 5 所示. 试件的断口情况如图 6 所示.

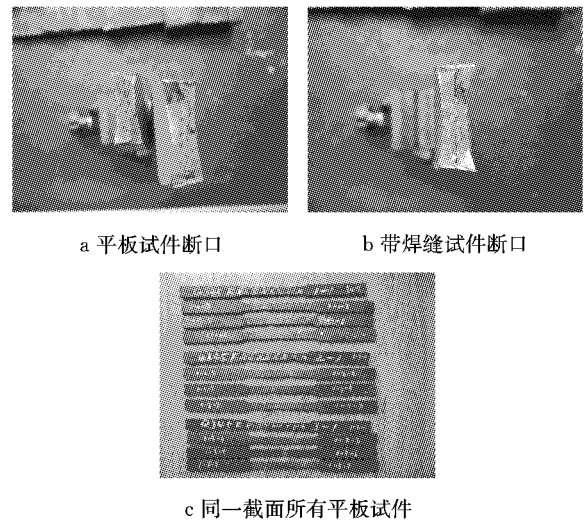


图 4 平板试件破坏图

Fig.4 Failure of flat coupons

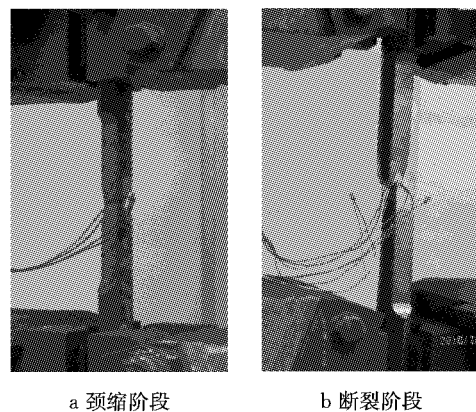


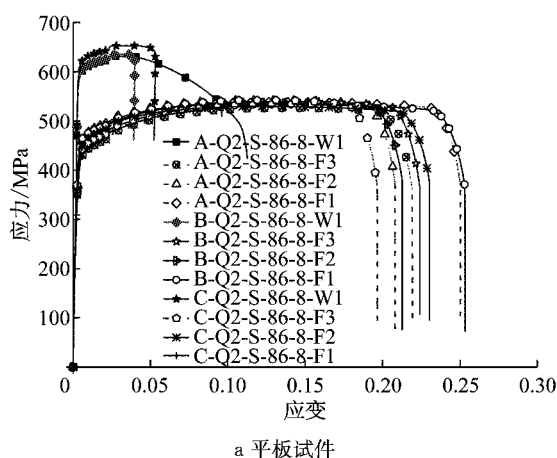
图 5 弯角试件试验过程

Fig.5 Test procedure of corner coupons

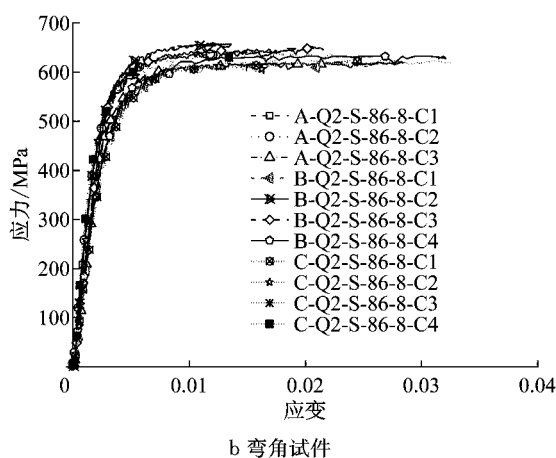


图 6 弯角圆弧试件断口

Fig. 6 Fracture surfaces of corner coupons



a 平板试件



b 弯角试件

图 7 截面 86 mm×86 mm×8 mm 的应力-应变曲线

Fig. 7 Stress-strain curves of section 86 mm×86 mm×8 mm

## 2 材性试验结果分析

### 2.1 焊缝邻边平板

在方、矩形冷弯钢管加工过程中,焊缝两邻边平板(F1和F3,下文简称“F1/F3边”)处于完全对称的位置,并且受到的冷加工程度大致相同.因此,F1/F3边的强度差异很小,试验结果详见表2.表2中, $\eta_y^{(1,3)}$ 、 $\eta_u^{(1,3)}$ 分别为F1/F3边的屈服强度和极限强度差异系数, $\bar{f}_y$ 、 $\bar{f}_u$ 分别为F1/F3边的平均屈服强度和平均极限强度, $\gamma_p$ 为强屈比.计算公式分别为

$$\eta_y^{(1,3)} = \frac{|f_y^{(F1)} - f_y^{(F3)}|}{f_y^{(\min)}}, \eta_u^{(1,3)} = \frac{|f_u^{(F1)} - f_u^{(F3)}|}{f_u^{(\min)}}$$

其中, $f_y^{(\min)} = \min\{f_y^{(F1)}, f_y^{(F3)}\}$ ,  $f_u^{(\min)} = \min\{f_u^{(F1)}, f_u^{(F3)}\}$ ;  $\bar{f}_y = (f_y^{(F1)} + f_y^{(F3)})/2$ ,  $\bar{f}_u = (f_u^{(F1)} + f_u^{(F3)})/2$ ;  $\gamma_p = \bar{f}_u / \bar{f}_y$ .

由表2可知,F1/F3边的屈服强度和极限强度

### 1.3 应力-应变曲线

典型钢管材性试件的应力-应变曲线见图7.从图7可见,带焊缝平板试件(下文简称“W边”)的强度明显高于不带焊缝平板,而伸长率明显降低;角部4个区域中,试件C2和C3的强度略高于试件C1和C4.各个试件的材性试验结果包括屈服强度 $f_y$ 、极限强度 $f_u$ 、伸长率 $\delta$ 和断面收缩率 $\Psi$ ,详见文献[16].编号为F1、F2、F3、W、C1、C2、C3、C4试件的屈服强度和极限强度分别用符号 $f_y^{(F1)}$ 、 $f_y^{(F2)}$ 、 $f_y^{(F3)}$ 、 $f_y^{(W)}$ 、 $f_y^{(C1)}$ 、 $f_y^{(C2)}$ 、 $f_y^{(C3)}$ 、 $f_y^{(C4)}$ 和 $f_u^{(F1)}$ 、 $f_u^{(F2)}$ 、 $f_u^{(F3)}$ 、 $f_u^{(W)}$ 、 $f_u^{(C1)}$ 、 $f_u^{(C2)}$ 、 $f_u^{(C3)}$ 、 $f_u^{(C4)}$ 表示.

差异都很小, $\eta_y^{(1,3)}$ 、 $\eta_u^{(1,3)}$ 变化范围分别为0.02%~7.74%和0.02%~5.54%.因此,可用F1/F3边的平均强度作为平板部位的强度代表值.

强屈比 $\gamma_p$ 是衡量钢材强度储备的一个系数,强屈比越大,钢材的安全储备愈大[17].从表2可见,F1/F3边均值的强屈比对Q235B和Q345B钢分别为1.383和1.389.图8给出F1/F3边强屈比随型钢中心线长度(取型钢截面积与其厚度的比值)与弯角内径之比 $L/R$ 、宽厚比 $b/t$ 以及弯角内径与厚度之比 $R/t$ 的关系.

由图8可得:①对Q235B和Q345B钢材,冷弯型钢平板部位强屈比达不到规范给定的1.58和1.48值;②冷弯型钢平板部位强屈比与截面宽度和周长有关,且随着宽度和周长的增大而增大.这是因为截面越宽表示钢管尺寸越大,此时进行冷加工比小截面的钢管更容易,从而对截面造成的影响更小.因此,屈服点提高的程度小一些.

表 2 焊缝两邻边强度差异系数及均值

Tab.2 Coefficients of variation and average strength of two adjacent sides

序号	截面规格/ (mm×mm×mm)	钢号等级	$\gamma_p^{(1,3)}$	$\gamma_u^{(1,3)}$	$\overline{F_y}/\text{MPa}$	$\overline{F_u}/\text{MPa}$	$\gamma_p$
1	86×86×8	Q345B	2.43%	0.37%	424.93	535.19	1.259
2	160×80×8	Q345B	0.21%	0.84%	416.43	560.85	1.347
3	200×80×7.75	Q345B	1.09%	0.69%	359.78	514.00	1.429
4	108×108×10	Q345B	1.06%	0.91%	425.39	518.29	1.218
5	118×118×10	Q345B	0.32%	0.48%	375.72	521.32	1.388
6	250×250×8	Q345B	0.28%	0.17%	388.30	543.52	1.400
7	140×100×7.5	Q345B	3.86%	1.70%	381.19	557.54	1.463
8	200×100×8	Q345B	3.15%	0.97%	404.54	549.39	1.358
9	120×50×4	Q345B	0.73%	0.37%	304.18	435.38	1.431
10	135×135×10	Q235B	0.86%	0.26%	298.60	404.94	1.356
11	135×135×12	Q235B	0.62%	2.13%	388.99	519.32	1.335
12	220×220×10	Q235B	3.75%	0.44%	335.03	445.72	1.330
13	250×250×8	Q345B	3.41%	2.43%	361.60	536.69	1.484
14	300×200×8	Q345B	0.71%	0.77%	332.80	509.71	1.532
15	108×108×10	Q345B	1.84%	3.19%	434.55	544.40	1.253
16	120×120×10	Q345B	6.44%	0.77%	412.68	553.92	1.342
17	135×135×10	Q345B	2.99%	0.96%	415.64	568.51	1.368
18	220×220×10	Q345B	1.21%	1.30%	381.00	514.27	1.350
19	400×200×10	Q345B	3.67%	0.89%	343.59	528.65	1.539
20	350×250×11.5	Q345B	2.20%	0.67%	402.79	526.91	1.308
21	350×350×12	Q345B	7.74%	5.54%	380.97	528.45	1.387
22	350×250×12	Q345B	1.35%	0.98%	319.92	500.51	1.564
23	350×350×16	Q345B	0.02%	0.64%	422.73	568.26	1.344
24	500×500×16	Q345B	0.27%	0.28%	337.34	522.23	1.548
25	300×300×8	Q345B	1.23%	0.07%	398.27	495.60	1.244
26	220×220×16	Q235B	5.69%	1.25%	284.70	425.16	1.493
27	108×108×10	Q235B	1.78%	0.97%	401.54	473.21	1.178
28	220×220×10	Q235B	5.73%	0.02%	281.95	439.33	1.558
29	350×350×14	Q235B	2.15%	1.25%	287.73	432.20	1.502
30	250×250×16	Q235B	0.43%	0.65%	368.02	481.84	1.309
均值	武钢试件(1~12 号试件)		1.53%	0.78%			
	宝钢试件(13~30 号试件)		2.71%	1.26%			
	武钢 & 宝钢(1~30 号试件)		2.24%	1.06%			
标准差	武钢试件(1~12 号试件)		0.014	0.006			
	宝钢试件(13~30 号试件)		0.023	0.013			
	武钢 & 宝钢(1~30 号试件)		0.020	0.011			
均值	Q235B				330.82	452.71	1.383
	Q345B				382.92	528.80	1.389
变异系数	Q235B				0.150	0.08	0.091
	Q345B				0.098	0.06	0.073

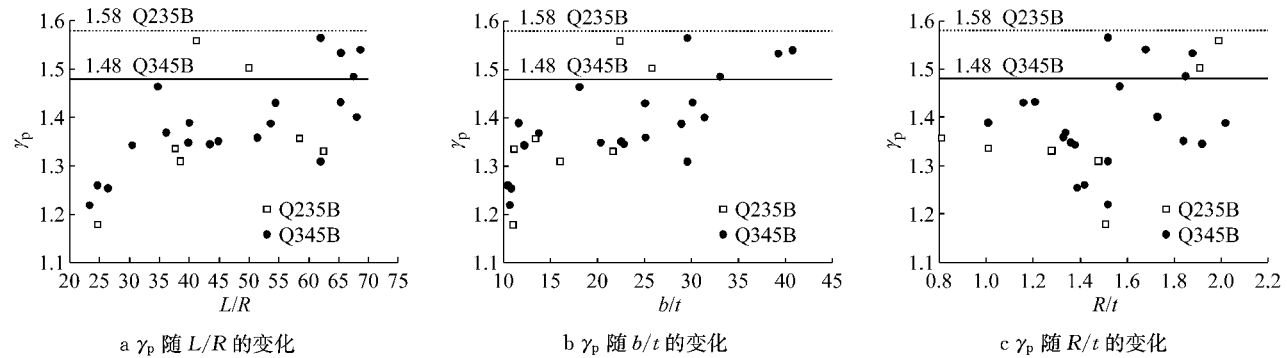


图 8 平板强屈比与各参数的关系

Fig.8 Relationship between yield strength ratio and various parameters

## 2.2 焊缝对边平板

一般而言,冷弯钢管截面不同位置处材料的力学性能不同,并且由于冷加工程度的不同,导致焊缝对边平板(下文简称“F2 边”)比 F1/F3 边的强度高<sup>[18]</sup>.表 3 中给出了相应的屈服强度提高系数  $\alpha_{f_y}^{(F2)}$  和极限强度提高系数  $\alpha_{f_u}^{(F2)}$ ,图 9 给出了相应强度提高系数随  $b/t$  的变化情况.其中,  $\alpha_{f_y}^{(F2)} = (f_y^{(F2)} - \bar{f}_y) / \bar{f}_y$ ,  $\alpha_{f_u}^{(F2)} = (f_u^{(F2)} - \bar{f}_u) / \bar{f}_u$ .

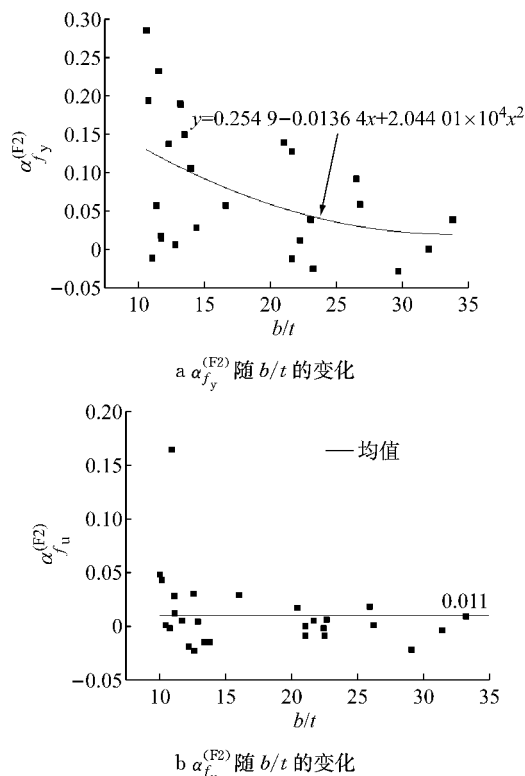


图 9 焊缝对边平板强度提高系数随  $b/t$  的变化

Fig. 9 Relation between strength enhancement factors of the sides opposite the weld and width to thickness ratio  $b/t$

从图 9 分析可得:①焊缝对边平板屈服强度提高系数随宽厚比的增大而减小;②焊缝对边平板极限强度除了 1 个异常点外,其他比邻边极限强度提高很少,最大值仅为 5.0%,均值为 1.1%.可以认为焊缝对边平板的极限强度与邻边的相同,并且与宽厚比无关.

## 2.3 带焊缝平板

带焊缝平板(以下简称“W 边”)相对于 F1/F3 边的强度提高系数见表 3.其中,  $\alpha_{f_y}^{(W)} = (f_y^{(W)} - \bar{f}_y) / \bar{f}_y$ ,  $\alpha_{f_u}^{(W)} = (f_u^{(W)} - \bar{f}_u) / \bar{f}_u$  分别为 W 边相对 F1/F3 边屈服强度和极限强度的提高系数.由表 3 可知,  $\alpha_{f_y}^{(W)}$ 、 $\alpha_{f_u}^{(W)}$  的变化范围分别为 17.44%~54.17% 和 8.40%~29.21%;两者的平均值分别为 38.63%

和 14.88%.

## 2.4 角部

冷弯型钢经过冷加工会产生冷弯效应,冷弯效应尤其集中在弯角部位.角部相对于 F1/F3 边的强度提高系数见表 3.其中,  $\alpha_{f_y}^{(C)} = (\bar{f}_y^{(C)} - \bar{f}_y) / \bar{f}_y$ ,  $\alpha_{f_u}^{(C)} = (\bar{f}_u^{(C)} - \bar{f}_u) / \bar{f}_u$  分别为角部的屈服强度平均值  $(\bar{f}_y^{(C)} = \sum_{i=1}^4 f_y^{(Ci)} / 4)$  和极限强度平均值  $(\bar{f}_u^{(C)} = \sum_{i=1}^4 f_u^{(Ci)} / 4)$  相对于 F1/F3 边的提高系数.图 10~12 给出了  $\alpha_{f_y}^{(C)}$ 、 $\alpha_{f_u}^{(C)}$  随各参数的变化情况.

从图 10~12 分析可得:①角部屈服强度提高系数随型钢中心线长与弯角内径之比  $L/R$  的增大而增大,与弯角径厚比  $R/t$  和型钢中心线长与厚度之比  $L/t$  的关系不明显;②角部极限强度的提高与弯角径厚比  $R/t$  和型钢中心线长与厚度之比  $L/t$  关系不明显.

## 2.5 分布模型

结合材性试验研究结果,可以提出截面上不同位置的强度及伸长率等力学性能的分布模型.

方、矩形钢管截面的屈服强度、极限强度、强屈比和伸长率沿截面的分布模型见图 13.图中,字母  $b$  和  $h$  分别表示钢管截面的宽和高,  $R$  是弯角的内径,其计算公式为  $R = 1.2t$ ,  $r$  是弯角的外径.由图可见,角部的屈服强度和极限强度比焊缝邻边平板处均有较大提高,提高率分别为 42% 和 15%;而伸长率明显降低,降低率为 44%.图中  $f_y$  和  $f_u$  是焊缝邻边的屈服强度和极限强度.焊缝邻边的屈服强度  $f_y$  和极限强度  $f_u$  在钢管成型过程中也会受冷弯效应的影响,较原材料的值有所提高,由于无法得到与试件一一对应的原材料,因此无法得到与每根试件焊缝邻边屈服强度  $f_y$  和极限强度  $f_u$  的提高值.但是考虑到材性试验的试件取自 30 根不同截面和 2 个大型主要生产钢管厂所生产的钢管的不同部位,合计 144 个试件,具有相当的数量和很好的代表性,因此  $f_y$  的提高系数可由试件的  $f_y$  平均值与原材料屈服强度  $f_{ym}$  平均值的比值得到.焊缝邻边屈服强度  $f_y$  的平均值可由表 2 得到, Q235B 的  $f_y = 330.82$  MPa, Q345B 的  $f_y = 382.92$  MPa.原材料屈服强度  $f_{ym}$  的平均值可由表 4<sup>[19]</sup> 得到, Q235B 的  $f_{ym} = 301.9$  MPa, Q345B 的  $f_{ym} = 388.7$  MPa.这样,焊缝邻边屈服强度  $f_y$  冷弯效应的提高系数 Q235B 为 1.095 8, Q345B 为 1.000 0.另外,由于角部屈服强度提高,导致角部强屈比减小为 1.12.各截面的伸长

表 3 带焊缝边、焊缝对边及角部强度相对于焊缝邻边的提高系数

Tab.3 Enhancement factors of weld sides, the sides opposite the weld and corner parts

序号	截面规格/ (mm×mm×mm)	$\alpha_{f_y}^{(F2)}$	$\alpha_{f_u}^{(F2)}$	$\alpha_{f_y}^{(C)}$	$\alpha_{f_u}^{(C)}$	$\alpha_{f_y}^{(W)}$	$\alpha_{f_u}^{(W)}$
1	86×86×8	—0.28%	0.17%	31.46%	17.83%	42.09%	19.61%
2	160×80×8	20.20%	4.40%	38.99%	15.25%	33.06%	11.57%
3	200×80×7.75	29.39%	4.89%	51.58%	16.15%	54.17%	21.52%
4	108×108×10	6.55%	—0.14%	35.46%	19.08%	31.45%	13.18%
5	118×118×10	14.57%	0.58%	45.58%	16.45%	35.31%	9.40%
6	250×250×8	0.87%	—0.34%	44.23%	14.24%	38.87%	15.72%
7	140×100×7.5	15.84%	0.47%	53.52%	14.66%	36.85%	10.10%
8	200×100×8	19.86%	3.11%	49.58%	20.48%	40.53%	16.42%
9	120×50×4	19.70%	—2.23%	59.90%	15.73%	45.92%	10.75%
10	135×135×10	11.44%	—1.37%	42.33%	12.09%	50.61%	29.21%
11	135×135×12	2.65%	2.86%	33.78%	12.48%	41.21%	14.85%
12	220×220×10	2.01%	0.64%	45.94%	20.88%	32.27%	16.33%
13	250×250×8	4.75%	1.04%	44.02%	12.18%	39.42%	10.09%
14	300×200×8	6.68%	0.21%	48.30%	11.77%	42.39%	11.19%
15	108×108×10	24.08%	16.50%	19.21%	12.07%	30.64%	18.50%
16	120×120×10	1.49%	—1.83%	29.30%	13.71%	37.56%	14.75%
17	135×135×10	3.73%	—1.43%	30.09%	12.68%	31.20%	10.34%
18	220×220×10	4.75%	—0.14%	41.61%	17.82%	36.62%	17.33%
19	400×200×10	14.83%	1.84%	54.02%	16.52%	52.54%	16.65%
20	350×250×11.5	—0.39%	—0.78%	29.81%	11.94%	28.39%	11.42%
21	350×350×12	—2.02%	—2.14%	40.30%	12.44%	39.93%	16.90%
22	350×250×12	13.61%	0.06%	54.00%	14.78%	48.93%	18.40%
23	350×350×16	—1.67%	0.68%	35.07%	15.06%	36.74%	13.24%
24	500×500×16	7.58%	1.30%	54.29%	9.11%	32.55%	12.74%
25	300×300×8	0.29%	1.74%	36.88%	20.74%	17.44%	8.40%
26	220×220×16	9.89%	—0.97%	47.91%	9.65%	49.12%	14.53%
27	108×108×10	2.23%	1.29%	23.33%	18.53%	26.47%	17.34%
28	220×220×10	4.72%	—0.80%	56.58%	14.82%	48.30%	12.68%
29	350×350×14	10.01%	1.90%	53.34%	16.25%	45.24%	16.46%
30	250×250×16	6.64%	2.98%	31.17%	18.56%	33.08%	16.75%
均值	武钢(同表 2)	11.90%	1.09%	44.36%	16.28%	40.20%	15.72%
	宝钢(同表 2)	6.18%	1.19%	40.51%	14.37%	37.59%	14.32%
	武钢 & 宝钢	8.47%	1.15%	42.05%	15.13%	38.63%	14.88%
标准差	武钢(同表 2)	0.096%	0.022%	0.085%	0.028%	0.072%	0.057%
	宝钢(同表 2)	0.066%	0.041%	0.117%	0.032%	0.092%	0.031%
	武钢 & 宝钢	0.083%	0.034%	0.106%	0.032%	0.084%	0.043%

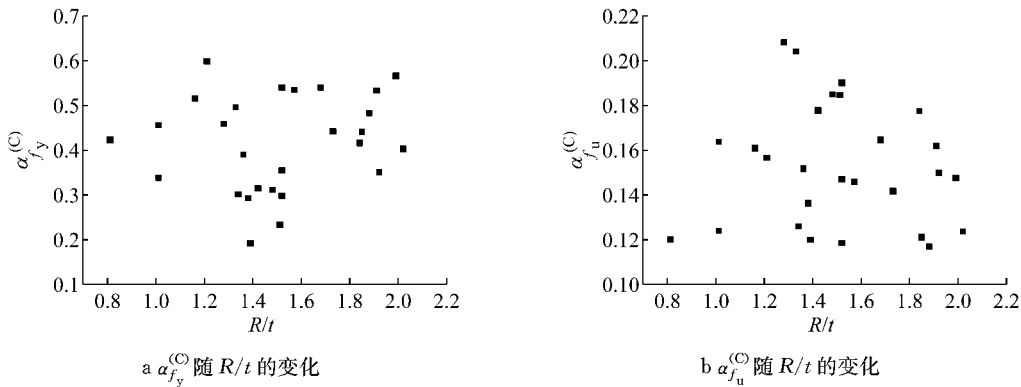


图 10 角部强度提高系数随  $R/t$  的变化

Fig.10 Relation between strength enhancement factors and parameters  $R/t$  at corner parts

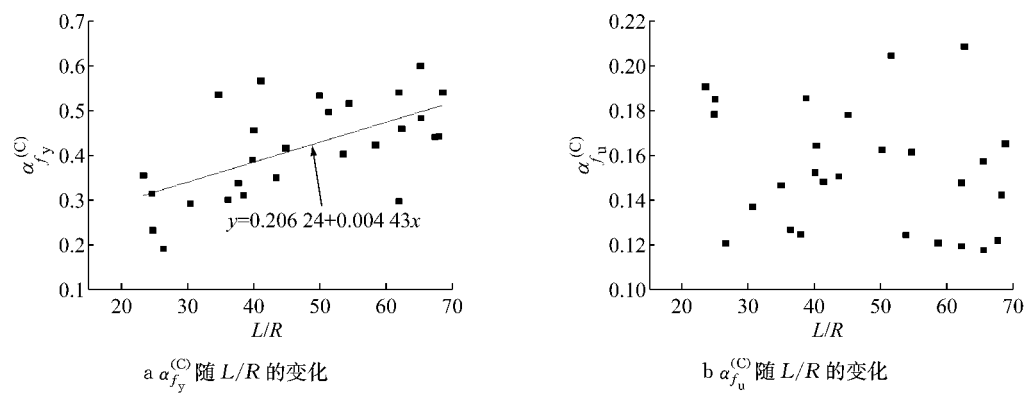


图 11 角部强度提高系数随  $L/R$  的变化

Fig.11 Relation between strength enhancement factors and parameters  $L/R$  at corner parts

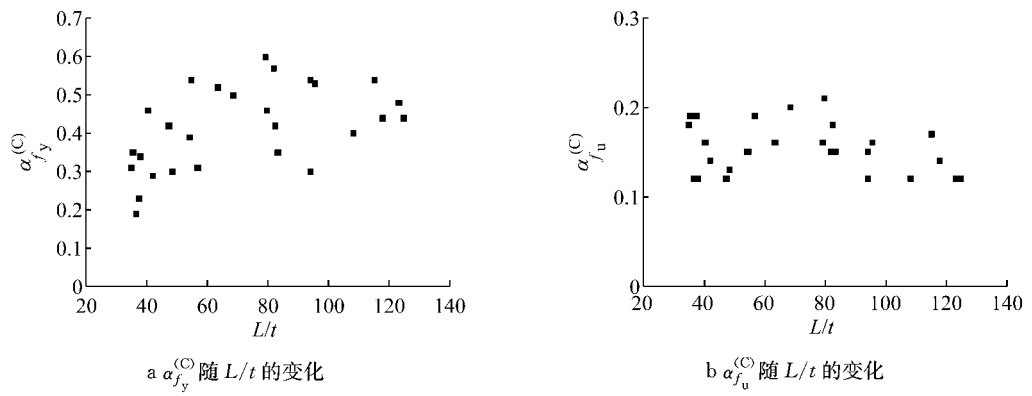


图 12 角部强度提高系数随  $L/t$  的变化

Fig.12 Relation between strength enhancement factors and parameters  $L/t$  at corner parts

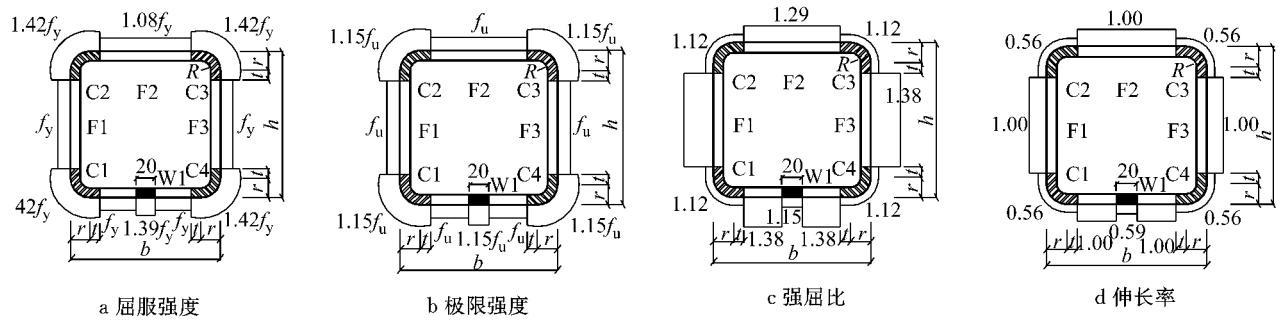


图 13 钢管截面强度及延性分布模型

Fig.13 Distribution model for strength and ductility

率具体值见表 5,其中  $\delta^{(F)}$ 、 $\delta^{(W)}$ 、 $\delta^{(C)}$  分别表示 F1/F3 边、W 边和角部的伸长率。

表 4 钢材屈服强度数据统计

Tab.4 Statistical values of yielding parts of steel

钢号 等级	$t/$ mm	数据 个数	屈服强度/MPa			
			最大值	最小值	平均值	标准差 变异系数
Q235B	$\leq 16$	99	395	245	301.9	28.6 0.095
Q345B	$\leq 16$	1 241	525	330	388.7	28.0 0.073

### 3 结论

(1)在方、矩形冷弯钢管加工过程中,两邻边处于完全对称的位置,受到的冷加工程度大致相同,可认为焊缝两邻边间的强度差异很小,可用两邻边的平均值作为平板部位的代表值。

(2)对 Q235B 和 Q345B 钢材,冷弯型钢平板部位强屈比达不到规范给定的 1.58 和 1.48 值。



表 5 伸长率汇总

Tab.5 Percentages of elongation of plates, plate with weld and corner parts

序号	截面规格/ (mm×mm×mm)	钢号等级	来源	$\delta^{(F)}$	$\delta^{(W)}$	$\delta^{(C)}$	备注
1	86×86×8	Q345B	武钢	0.31	0.16	0.15	
2	160×80×8	Q345B	武钢	0.28	—	0.17	
3	200×80×7.75	Q345B	武钢	0.33	—	0.17	
4	108×108×10	Q345B	武钢	0.27	0.17	0.13	
5	118×118×10	Q345B	武钢	0.31	0.20	0.16	
6	250×250×8	Q345B	武钢	0.31	0.23	0.15	
7	140×100×7.5	Q345B	武钢	0.29	0.19	0.15	
8	200×100×8	Q345B	武钢	0.26	0.17	0.13	
9	120×50×4	Q345B	武钢	0.40	—	—	
10	135×135×10	Q235B	武钢	0.35	0.21	0.18	
11	135×135×12	Q235B	武钢	0.30	0.19	0.15	
12	220×220×10	Q235B	武钢	0.32	0.21	0.14	
13	250×250×8	Q345B	宝钢	0.31	0.17	0.18	
14	300×200×8	Q345B	宝钢	0.32	0.22	0.20	
15	108×108×10	Q345B	宝钢	0.29	0.13	0.14	
16	120×120×10	Q345B	宝钢	0.30	0.15	0.17	
17	135×135×10	Q345B	宝钢	0.27	0.22	0.15	
18	220×220×10	Q345B	宝钢	0.34	0.22	0.16	
19	400×200×10	Q345B	宝钢	0.33	0.19	0.19	
20	350×250×11.5	Q345B	宝钢	0.29	0.22	0.16	
21	350×350×12	Q345B	宝钢	0.29	0.19	0.16	
22	350×250×12	Q345B	宝钢	0.33	0.20	0.19	
23	350×350×16	Q345B	宝钢	0.29	0.15	0.15	
24	500×500×16	Q345B	宝钢	0.32	0.13	0.25	
25	300×300×8	Q345B	宝钢	0.35	0.21	0.14	
26	220×220×16	Q235B	宝钢	0.36	0.24	0.25	
27	108×108×10	Q235B	宝钢	0.31	0.16	0.16	
28	220×220×10	Q235B	宝钢	0.39	0.24	0.23	
29	350×350×14	Q235B	宝钢	0.34	0.20	0.21	
30	250×250×16	Q235B	宝钢	0.26	0.19	0.16	
均值		0.31	0.19	0.17			未包含 120 mm× 50 mm×4 mm 规格试件
标准差		0.03	0.03	0.03			

(3)焊缝对面平板屈服强度提高系数随宽厚比的增大而减小;焊缝对面平板的极限强度与邻边的相同,并且与宽厚比无关。

(4)焊缝的屈服强度和极限强度提高系数的平均值分别为 38.63%和 14.88%。

(5)角部屈服强度提高系数随型钢中心线长与弯角内径之比  $L/R$  的增大而增大,与弯角半径比  $R/t$  和型钢中心线长与厚度之比  $L/t$  的关系不明显;角部极限强度的提高与这 3 个参数无关。

(6)基于试验结果,得到了方、矩形钢管截面的屈服强度、极限强度、强屈比和伸长率沿截面的分布模型。

参考文献:

[1] Mohebbi S, Mirghaderi R, Farahbod F, *et al.* Experimental

work on single and double-sided steel sheathed cold-formed steel shear walls for seismic actions [J]. *Thin-Walled Structures*, 2015, 91(6): 50.

[2] Acharya S R, Sivakumaran K S, Young B. Reinforcement schemes for cold-formed steel joists with a large web opening in shear zone: an experimental investigation [J]. *Thin-Walled Structures*, 2013,72(11): 28.

[3] 李元齐,李功文,沈祖炎,等. 冷弯厚壁型钢考虑冷弯效应的强度计算方法研究[J]. *建筑结构学报*,2015, 36(5):1. 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.

[4] 于炜文,董军,夏冰青. 冷成型钢结构设计 [M]. 3 版. 北京:中国水利水电出版社,2003.

YU Weiwen, DONG Jun, XIA Bingqing. Cold-formed steel design [M]. 3rd ed. Beijing: China WaterPower Press, 2003.

[5] Karren K W. Corner properties of cold-formed steel shapes [J]. *Journal of the Structural Division, ASCE*,1967, 93(1): 401.

- [6] Karren K W, Winter G. Effects of cold-forming on light-gage steel members[J]. Journal of the Structural Division, ASCE, 1967, 93(1): 433.
- [7] Abdel-Rahman N, Sivakumaran K S. Material properties model for analysis of cold-formed steel members [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1997, 123(9):1135.
- [8] 金昌成. 冷弯型钢的冷作强化及其利用[J]. 建筑结构学报, 1994, 15(2):43.  
JIN Changcheng. Strain hardening of cold formed steel and its utilization [J]. Journal of Building Structures, 1994, 15(2): 43.
- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50018—2002 冷弯薄壁型钢结构技术规范[S]. 北京:中国计划出版社,2002.  
The Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. GB 50018—2002 Technical code of cold-formed thin-wall steel structures [S]. Beijing: China Planning Press,2002.
- [10] American Iron and Steel Institute. AISI S100—2007 Specification for the design of cold-formed steel structural members [S]. Washington D C: American Iron and Steel Institute,2007.
- [11] The Joint Standards Australia/Standards New Zealand Committee. AS/NAS 4600 : 2005 Cold-formed steel structures [S]. Sydney: Standards Australia/ Standards New Zealand, 2005.
- [12] Britain Standard Institute. BS EN 1993-1-6 : 2006. Eurocode 3: design of steel structures [S]. London: Britain Standard Institute,2006.
- [13] Guo Y J, Zhu A Z, Pi Y L, *et al.* Experimental study on compressive strengths of thick-walled cold-formed sections [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2007, 65(5): 718.
- [14] Hu S D, Li L X, Wang X Y, *et al.* Experimental study and design calculation for compressive strengths of cold formed thick-wall sections[J]. Materials Research Innovations, 2011, 15(Suppl.1): S450.
- [15] 中国国家标准化管理委员会. GB/T 228.1—2010 金属材料拉伸试验 第1部分:室温试验方法[S]. 北京:中国标准出版社, 2010.  
Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 228.1—2010 Metallic materials-tensile testing Part 1: method of test at room temperature[S]. Beijing:China Standard Press, 2010.
- [16] 温东辉. 冷弯厚壁钢管压弯构件抗震性能研究[D]. 上海:同济大学,2014.  
WEN Donghui. Research on seismic performance of cold-formed thick-walled steel tubular beam-columns[D]. Shanghai: Tongji University, 2014.
- [17] 沈祖炎, 陈扬骥, 陈以一. 钢结构基本原理[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2005.  
SHEN Zuyan, CHEN Yangji, CHEN Yiyi. Fundamental principle of steel structures[M]. Beijing:China Architecture & Building Press, 2005.
- [18] 赵晓林, Wilkinson T, Hancock G. 冷弯钢管计算与设计[M]. 蒋首超, 赵晓林, 译. 北京:中国建筑工业出版社,2007.  
ZHAO Xiaolin, Wilkinson T, Hancock G. Cold-formed tubular members and connections: structural behaviour and design [M]. Translated by JIANG Shouchao, ZHAO Xiaolin. Beijing: China Architecture & Building Press, 2007.
- [19] 《钢结构设计规范》GB 50017—2003 钢材修编组. 国产建筑钢结构钢材性能试验、统计分析及设计指标的研究[R]. 北京:《钢结构设计规范》GB 50017—2003 钢材修编组,2012.  
Steel Revision Group of Code for Design of Steel Structures GB 50017—2003. Research on material property, its statistical analysis and design values of Chinese construction steel [R]. Beijing: Steel Revision Group of Code for Design of Steel Structures GB 50017—2003, 2012.