

文章编号: 1000-4750(2014)06-0060-10

国产 Q460 高强度钢材焊接工字形截面 残余应力试验及分布模型研究

班慧勇^{1,2}, 施 刚¹, 石永久¹, 王元清¹

(1. 土木工程安全与耐久教育部重点实验室, 清华大学土木工程系, 北京 100084;

2. School of Civil & Environmental Engineering, The University of New South Wales, Sydney, 2052, Australia)

摘 要: 焊接残余应力是影响钢结构受压构件整体稳定性能的一种重要初始缺陷。为研究国产 Q460 高强度钢材焊接工字形截面的残余应力分布, 该文采用分割法对 8 个不同截面尺寸和焊缝类型的截面试件进行了测量。基于近 2000 组测量数据, 得到了不同试件全截面的残余应力分布和拉、压应力大小, 并研究了腹板和翼缘的板件宽厚比、板件厚度、焊缝类型以及腹板和翼缘的相关性等因素对残余应力的影响。试验结果表明, 残余压应力的数值大小与截面尺寸直接相关而基本不受焊缝类型的影响, 残余拉应力的数值大小则与截面尺寸没有相关性; 由于翼缘和腹板内的残余应力能够分别满足自平衡条件, 二者没有相互间的影响作用。最后, 该文提出了能够准确描述试验结果和截面尺寸影响的国产 Q460 高强钢焊接工字形截面的残余应力分布模型和计算公式。

关键词: 钢结构; 高强度钢材; Q460; 焊接工字形; 残余应力; 试验; 分布模型

中图分类号: TU391 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2012.09.0680

EXPERIMENTAL INVESTIGATION AND MODELING OF RESIDUAL STRESS IN I SECTIONS WELDED BY Q460 HIGH STRENGTH STEEL

BAN Hui-yong^{1,2}, SHI Gang¹, SHI Yong-jiu¹, WANG Yuan-qing¹

(1. Key Laboratory of Civil Engineering Safety and Durability of China Education Ministry,

Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. School of Civil & Environmental Engineering, The University of New South Wales, Sydney, 2052, Australia)

Abstract: Residual stress is one of the most important initial imperfections for the overall buckling behavior of steel compression members. An experimental investigation was carried out to quantify the residual stress in I sections welded by Q460 high strength steel, using a sectioning method. 8 section specimens with various dimensions and weld types were measured, and the magnitude and distribution of both compressive and tensile residual stresses were obtained through nearly 2000 original data. Based on the experimental results, the effects from sectional dimensions (i.e. width-thickness ratio and plate thickness), the weld type and the interaction between flanges and web were clarified. It was found that the compressive residual stress was significantly related to sectional dimension, but no clear correlation was indicated with the weld size. The tensile residual stress hardly correlated to the sectional dimension. No residual stress interaction between flanges and web was found due to the stress equilibrium within each individual plate. Besides, a distribution model was proposed, which well described the experimental results and effects from sectional dimensions.

Key words: steel structure; high strength steel; Q460; welded I section; residual stress; experiment; diatribution modeling

收稿日期: 2012-09-18; 修改日期: 2013-12-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(51078205)

通讯作者: 施 刚(1977-), 男, 安徽铜陵人, 副教授, 博士, 主要从事结构工程研究(E-mail: shigang@tsinghua.edu.cn).

作者简介: 班慧勇(1985-), 男, 内蒙古呼和浩特人, Research Fellow, 博士, 主要从事结构工程研究(E-mail: huiyongban@gmail.com);

石永久(1962-), 男, 黑龙江鸡东人, 教授, 博士, 主要从事结构工程研究(E-mail: shiyj@tsinghua.edu.cn);

王元清(1963-), 男, 安徽霍山人, 教授, 博士, 主要从事结构工程研究(E-mail: wang-yq@tsinghua.edu.cn).

高强度钢材(屈服强度标准值 $\geq 460\text{MPa}$)已在欧洲、北美、澳大利亚、日本等地多个建筑结构和桥梁结构工程中得到应用并取得了很好的效果^[1-3];我国的一些高层和大跨建筑结构也开始采用国产 Q460 高强度钢材,如国家体育场^[4]、中央电视台新台址^[5]等,并且在下一版新的钢结构设计规范 GB50017 中也将增加此类钢材的相关设计条文;因此,有必要对高强度钢材钢结构的受力性能进行全面深入的研究。

焊接残余应力是影响受压钢柱稳定性能的重要初始缺陷之一,主要是由于焊接过程中的热输入以及焊后的不均匀冷却和变形而产生的。对于普通强度钢材构件的焊接残余应力,我国在 20 世纪 80 年代已做了相关研究^[6],并在制定设计规范柱子曲线时采用了简化分布模型^[7-9];国外如欧洲^[10-11]和美国^[12-13]的钢结构设计规范中也有针对普通强度钢材构件的残余应力分布模型。由于高强度结构钢材的生产工艺及材料力学性能等均发生了变化,上述基于普通强度钢材研究得到的分布模型将不再适用于前者,表现在焊缝附近的残余拉应力很有可能小于钢材屈服强度以及残余压应力与截面尺寸的定量关系等;现有分布模型往往假定最大残余拉应力等于钢材屈服强度,且很少有模型描述截面尺寸对残余压应力的影响。

国外已有少量针对高强度钢材焊接工字形截面残余应力的试验研究。Rasmussen 和 Hancock^[14-15]对 690MPa 高强度钢材的 4 种工字形截面进行了测量,其中 3 种截面为 6mm 剪切边板件焊接而成,另一种为 8mm 焰切边板材;Beg 和 Hladnik^[16]对 690MPa 的另外两种剪切边工字形截面(翼缘和腹板厚度分别为 12mm 和 10mm)的残余应力进行了测量。上述试验结果主要给出了焊接残余压应力的数值并用于后续的轴压构件整体稳定试验研究中,并没有给出完整的残余应力分布结果,

特别是残余拉应力的数值;此外第一组试验的板件厚度远小于实际工程中应用的板厚,试验结果代表性不强。作者基于上述试验结果分析了截面尺寸特别是板件宽厚比对残余压应力的影响,并给出了初步的建议计算公式^[17]。国内方面,文献[18]对 Q420 高强度等边角钢的残余应力进行了试验和分布模型研究,文献[19]仅对一种尺寸型号的 Q460 焊接工字形截面进行了残余应力测量,试验采用盲孔法。

我国目前 Q460 高强度结构钢材的生产已经比较成熟,相应的焊接工艺及焊接材料也已具备并在国家体育场等工程中得到了成功应用。因此,本文主要针对国产 Q460 高强度钢材焊接工字形截面的残余应力进行了试验研究,给出了完整的残余应力分布结果,全面研究了截面板件宽厚比、板件厚度、焊缝类型以及翼缘和腹板相关性对残余应力分布和数值的影响,并最终提出了能够准确描述试验结果和各因素影响分布模型和计算公式,为后续高强度钢材钢结构特别是受压钢柱整体稳定性能的研究提供了重要的基础条件。

1 试验方案

1.1 试件设计及加工

试验共对 8 种焊接工字形截面试件的残余应力进行了测量,其截面尺寸汇总如表 1 所示;图 1 为截面尺寸符号和试件截面形状的示意图。

表 1 试件截面尺寸
Table 1 Sectional dimensions

试件编号	H/mm	B/mm	t_f/mm	t_w/mm	b_f/t_f	h_0/t_w
RI1-460	110	130	10	10	6	9
RI2-460	150	150	10	10	7	13
RI3-460	210	210	14	14	7	13
RI4-460	150	290	10	10	14	13
RI5-460	276	348	12	12	14	21
RI6-460	300	220	12	10	8.75	27.6
RI7-460	360	280	12	10	11.25	33.6
RI8-460	150	150	10	10	7	13

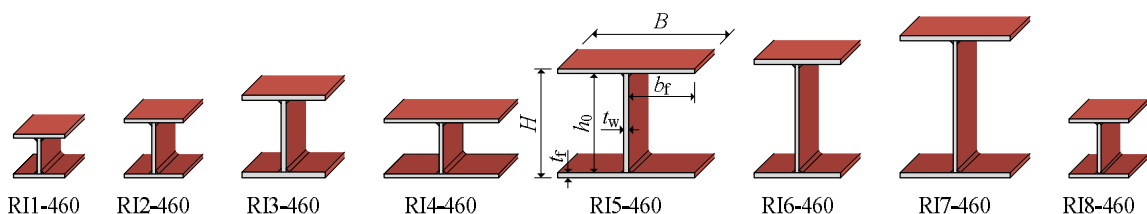


图 1 试件截面尺寸符号及形状示意图

Fig.1 Specimen sectional dimension symbols and sectional shape schematic diagram

为使试验结果更具有代表性并考虑实际工程应用情况,所有试件板材采用中厚板(即包括

10mm、12mm 和 14mm 共 3 种板材)且均为焰切边。试件 RI1-460~RI7-460 腹板和翼缘间采用角焊缝,

焊脚尺寸 t_e 为 6mm; 试件 RI8-460 则采用对接角接组合焊缝。试件尺寸基本涵盖了工程应用范围。

所有试件由国产 Q460C 高强度钢板(舞阳钢铁有限责任公司提供)焊接加工而成, 钢材的材料力学性能通过标准静力拉伸试验获得。三种厚度板材的弹性模量 E 、屈服强度 f_y 以及抗拉强度 f_u 分别取同组 3 个标准材性试件拉伸试验结果的平均值并汇总于表 2。材性试验结果表明, 所有标准试件的断后伸长率最小值为 23.8%, 且应力-应变曲线具有明显的屈服平台(平台末端对应的应变值超过 2.0%), 完全满足我国低合金高强度钢材标准^[20]的相关要求和建筑抗震设计规范^[21]中对结构钢材力学性能的要求。

表 2 材性试验结果

Table 2 Tension coupon test results

钢板厚度/mm	$E/(\times 10^5 \text{MPa})$	f_y/MPa	f_u/MPa
10	2.10	531.92	657.00
12	2.12	492.88	643.54
14	2.11	492.27	631.23

所有试件均由中国二十二冶金属结构工程公司采用 Ar80%+CO₂20% 气体保护焊加工而成; 采用的焊丝型号为 JM-60(直径 1.2mm), 其力学性能及材质成分满足美国结构焊接规范 AWS A5.28-2007 ER80S-G 的相关要求, 后者与我国《建筑钢结构焊接技术规程》JGJ81-2002^[22]针对 Q460 钢材建议的焊丝型号 ER55-D2 的标准要求^[23]一致; 焊丝的实测屈服强度 545MPa, 断后伸长率 26%, 满足强度

匹配的原则; 焊接电流为 230A~235A, 电压 25V~27V, 焊接速度约为 32cm/min, 焊接热输入为 10kJ/cm~12kJ/cm。焊接技术经由中冶建筑研究总院有限公司焊接研究所按照《建筑钢结构焊接技术规程》JGJ81-2002^[22]的相关条文对不同种类的焊缝类型和接头形式进行了焊接工艺评定, 完全满足规范的要求, 从而保证了试验结果的可靠性和代表性。

1.2 量测内容及方法

试验采用分割法测量截面的残余应力分布和数值大小; 已有的研究表明, 只要操作正确, 分割法仍是最为简便、可靠、准确的测量残余应力的方法^[24]; 且通过切条能够基本实现残余应力的完全释放, 测量结果更接近于真实值。本试验采用电火花数控线切割机床对截面板件进行分割和切条以保证切割精度和避免热输入影响实际的残余应力分布, 利用 Whittemore 手持应变仪(标距 10in.=254mm, 精度 1/10000in.)测量条带分割前后释放的变形。每个分割条带两侧的标孔采用电钻冷加工以尽量减少热输入。具体的测量设备及标孔尺寸要求见文献[18]。

为了保持原始的残余应力状态、消除构件端部对应力分布的影响, 试验参考已有研究^[6,24]给出的建议, 残余应力截面试件取自原材中部且长度不小于截面长边尺寸的 3 倍、距离原材端部不小于 1.5 倍~2.0 倍截面长边尺寸, 如图 2 所示(以试件 RI2-460 为例)。每个分割条带宽度为 10mm。

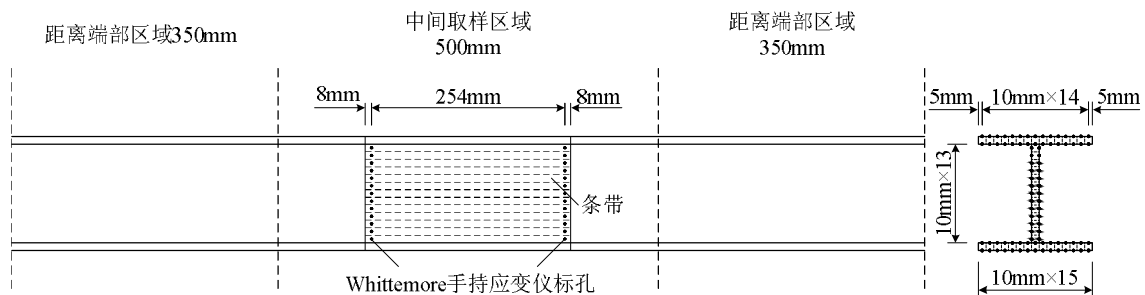


图 2 试件取样位置及分割条带示意图(RI2-460)

Fig.2 Arrangement of specimens resulted from a typical I section RI2-460

测量步骤主要分为 3 步(如图 3 所示): 第 1 步, 在原材中部取样位置标记分割条带的位置, 在每个条带两端钻一对间距为 254mm(即 Whittemore 手持应变仪的标距)的标孔, 记录手持应变仪测量每对标孔的间距读数并利用线切割横向切取中间一段试件; 第 2 步, 利用线切割将试件从焊缝处分割为三块独立的板件, 在翼缘和腹板相交内角处补钻标

孔, 并再次记录每对标孔的读数; 第 3 步, 利用线切割将 3 块板件按照设计位置分割为宽度 10mm 的条带, 并最终记录每对标孔的间距读数, 测量过程结束。值得注意的是, 板件两侧面的标孔间距读数均进行了记录, 每次测量前须用气喷法对标孔进行清洁以保证测量的精度; 每一组测量数据均要有对应的 Whittemore 手持应变仪温度校正棒相应的读

数, 后者用于最终计算结果的温度校正。

图 4 为试件完全分割成条带后的示意图。

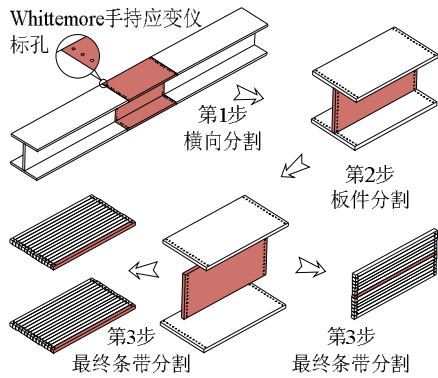


图 3 分割法测量步骤(工字形截面)示意图

Fig.3 Steps in sectioning method for I sections

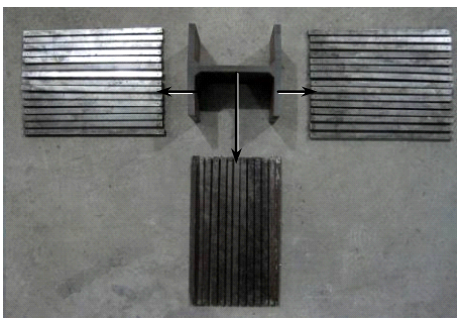


图 4 分割后的条带(RI2-460)

Fig.4 Strips from specimen RI2-460 after being sectioned

这样, 利用每个条带分割前后 Whittemore 手持应变仪读数的变化(即第 1 步的读数和第 3 步对应的读数), 就可以得到每个条带释放的残余应变, 再根据胡克定律就可以计算得到残余应力^[6,18,24], 其中材料的弹性模量根据材性试验结果(表 2)确定。对于翼缘和腹板相交处内角区域(即翼缘内侧中部和腹板两侧), 由于空间太小无法进行钻孔和测量, 该处的 2 组~3 组标孔是在第 2 步中补钻的, 最终的残余应变也是根据比较第 2 步和第 3 步的读数得到; 考虑到第 2 步中不可避免地会有少量残余应力释放, 因此该区域的测量结果会比实际值略小。此外, 残余应变的计算考虑了温度修正, 对于分割后明显弯曲的条带, 还进行了弯曲修正, 具体的公式见文献^[24]。

2 试验结果

基于试验记录的近 2000 组读数, 得到了所有 8 种截面试件焊接残余应力的数值和全截面分布状态, 如图 5 所示; 图中数据点在截面上的位置对应分割条带的位置, 并且给出了板件两侧面的残余应力数值及其均值。

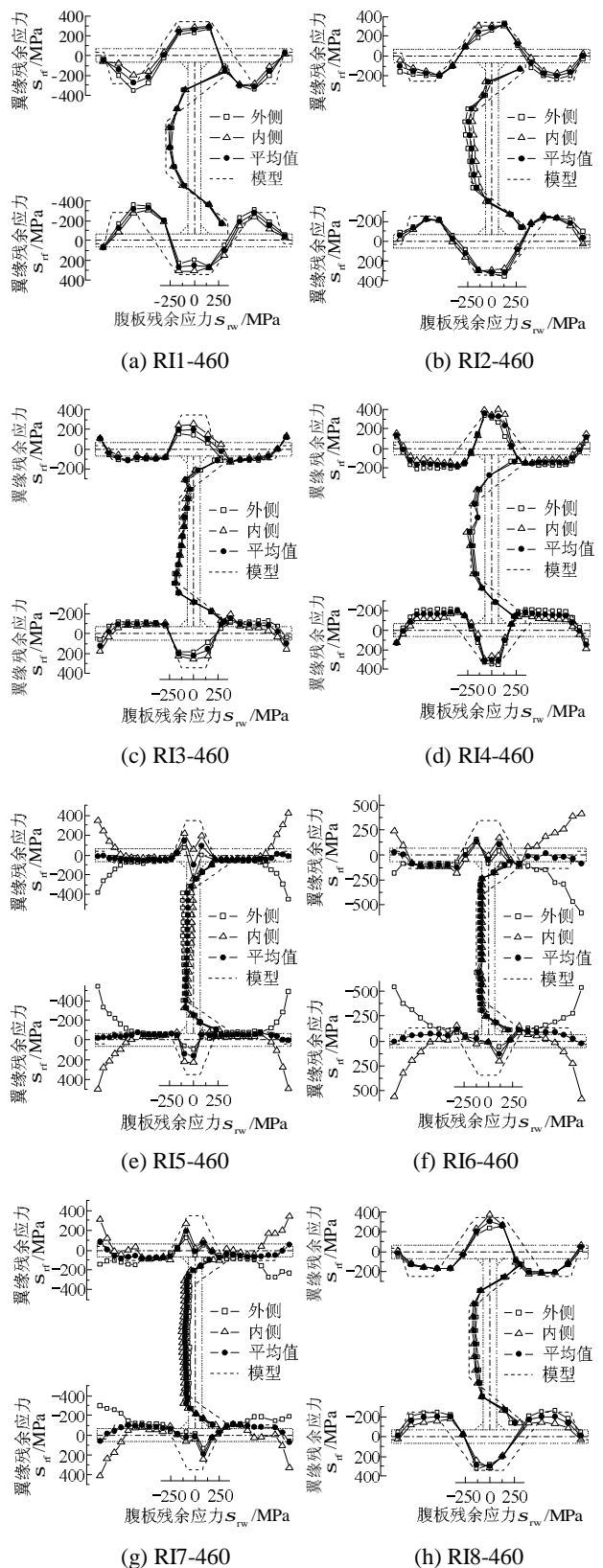


图 5 Q460 高强度钢焊接工字形截面残余应力试验结果
Fig.5 Experimental results of residual stress distribution in Q460 high strength steel welded I sections

由图 5 可以看出, Q460 高强度钢材焊接工字形截面的残余应力分布主要呈现如下特点:

1) 总体分布形状与普通强度钢材焊接工字形截面的分布基本一致,即在焊缝附近区域出现最大拉应力、翼缘的焰切边附近出现残余拉应力、在翼缘和腹板的一定范围内为大小基本恒定的残余压应力、其余部位为应力过渡段;这一分布形状主要是由板件下料的焰切过程以及翼缘和腹板相接处的焊接过程决定的,与材料强度无关。

2) 不同截面尺寸试件的残余应力数值和分布范围不尽相同,本文第3节将给出详细的对比分析;焊缝附近残余拉应力的数值要明显小于钢材屈服强度,而目前设计规范采用的针对普通强度钢材的残余应力分布模型中最大残余拉应力通常直接取为钢材屈服强度。

此外,截面试件 RI5-460~RI7-460 在翼缘焰切边附近区域,板件两侧出现符号相反的残余应力,这主要是因为该种钢板(所有试件中只有这3种截面的翼缘采用了12mm厚板材)在下料前其内部已经存在的残余应力状态导致分割后的条带出现明显弯曲造成的;另外翼缘中间位置的残余拉应力明显小于附近的应力数值,这可能与截面尺寸过大以及焊接工序有关,本文偏于安全地选取该区域残余拉应力的最大值来代表翼缘中部区域的应力状态。

为了便于讨论残余应力的变化规律,本文根据图5的试验结果,将Q460高强度钢材焊接工字形截面的残余应力分布归纳为如图6所示的形状。

图6中 $\sigma_{\text{frc}1}$ 、 $\sigma_{\text{frc}2}$ 、 $\sigma_{\text{frc}3}$ 和 $\sigma_{\text{frc}4}$ 分别表示翼缘4个外伸部分中间区域(残余压应力基本保持常数段)压应

力的平均值, $\sigma_{\text{frc}1}$ 和 $\sigma_{\text{frc}2}$ 分别表示上下翼缘中部的最大残余拉应力, $\sigma_{\text{frc}1}$ 、 $\sigma_{\text{frc}2}$ 、 $\sigma_{\text{frc}3}$ 和 $\sigma_{\text{frc}4}$ 分别表示翼缘4个焰切边区域的最大残余拉应力, σ_{wrc} 表示腹板中部区域(残余压应力基本保持常数段)压应力的平均值, $\sigma_{\text{wrt}1}$ 和 $\sigma_{\text{wrt}2}$ 分别表示腹板两端的残余拉应力的最大值; a 、 b 、 c 、 d 、 e 以及 u 、 v 、 w 分别表示对应残余应力数值的分布范围, x 和 y 表示沿翼缘宽度和腹板高度方向的分布位置坐标,这些分布范围和位置坐标将在第4节中具体介绍和应用。

根据试验结果表3汇总了各个试件对应于图6所示主要残余应力的具体数值,以便于后续的定量分析和讨论;表中所有残余应力数值均是基于板件两侧面测量结果的平均值得到的。

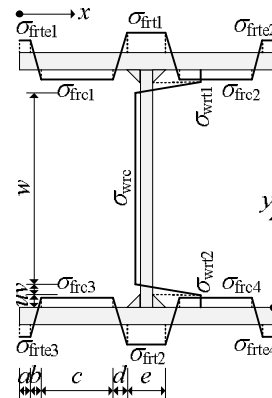


图6 工字形截面残余应力分布形状及主要数值示意图
Fig.6 Illustration of residual stress distribution and major characteristics over entire welded I section

表3 Q460高强度钢材焊接工字形截面残余应力数值

Table 3 Characterized residual stresses at typical locations for Q460 high strength steel welded I sections

试件编号	翼缘/MPa								腹板/MPa				
	$\sigma_{\text{frc}1}$	$\sigma_{\text{frc}2}$	$\sigma_{\text{frc}3}$	$\sigma_{\text{frc}4}$	$\sigma_{\text{frc}1}$	$\sigma_{\text{frc}2}$	$\sigma_{\text{frc}3}$	$\sigma_{\text{frc}4}$	σ_{wrc}	$\sigma_{\text{wrt}1}$	$\sigma_{\text{wrt}2}$		
RI1-460	-248.2	-307.4	-320.6	-230.3	284.6	270.3	-48.7	22.0	70.7	-41.5	-233.9	312.2	282.2
RI2-460	-184.1	-187.3	-216.6	-238.1	318.5	315.6	-104.3	-3.3	-54.7	-35.2	-208.4	286.7	306.0
RI3-460	-79.1	-102.6	-88.4	-102.1	251.3	258.4	107.7	129.8	181.9	156.3	-123.7	269.3	321.2
RI4-460	-171.0	-150.0	-172.8	-161.2	360.1	313.9	130.4	113.5	131.1	151.5	-213.8	232.1	229.0
RI5-460	-49.9	-47.7	-50.4	-55.4	144.3	162.9	-16.2	-15.0	-19.7	4.5	-65.2	191.0	230.3
RI6-460	-109.2	-44.4	-73.7	-94.3	140.2	131.4	27.1	-87.0	10.7	24.7	-74.9	170.4	201.9
RI7-460	-75.3	-60.1	-83.1	-93.6	190.9	188.7	81.7	53.1	60.5	71.6	-91.4	149.0	182.3
RI8-460	-165.7	-211.6	-196.5	-188.6	305.1	297.3	-15.5	41.8	-9.2	-5.0	-142.2	310.2	257.9

3 试验结果分析

本节将根据试验结果全面分析板件宽厚比、板件厚度、焊缝类型以及翼缘和板件相关性对Q460高强度钢材焊接工字形截面残余应力分布的影响。

3.1 板件宽厚比的影响

将所有截面试件翼缘和腹板的残余压应力(σ_{frc}

和 σ_{wrc})分别随板件宽厚比的变化情况汇总如图7(a)所示。可以发现,随着板件宽厚比的增大,相应的残余压应力数值会明显降低;当宽厚比大到一定程度时,残余压应力的数值很小但降低的趋势不再明显。这一结论与作者先前的研究成果^[17]一致,而目前针对普通强度钢材的残余应力分布模型并没有

考虑这一影响因素。

图 7(b)汇总了所有试件焊缝附近最大残余拉应力(翼缘中部 σ_{fit} 和腹板两侧的 σ_{wrt})以及翼缘焰切边的最大残余拉应力(σ_{fite})随板件宽厚比的变化规律,可以看出二者并没有直接的关系,这是由于残余拉应力主要由焊接或焰切过程中局部区域产生的大量热输入造成的,截面其他位置通常不会产生残余拉应力,因而与截面尺寸没有直接关系。

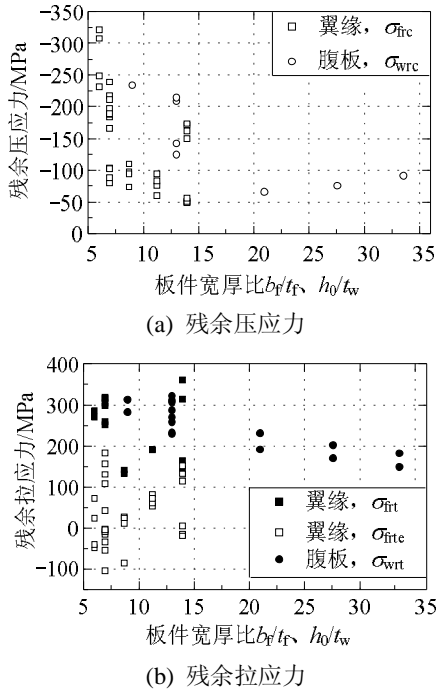


图 7 残余应力数值随板件宽厚比的变化规律

Fig.7 Correlation between residual stress and width-thickness ratios of steel plate

3.2 板件厚度的影响

为研究板件厚度的影响,试件 RI2-460 和 RI3-460 的截面尺寸设计为翼缘和腹板的板件宽厚比分别相同而板厚不同(分别为 10mm 和 14mm),如表 1 所示。图 8 对比了两种截面试件的残余应力测量结果。

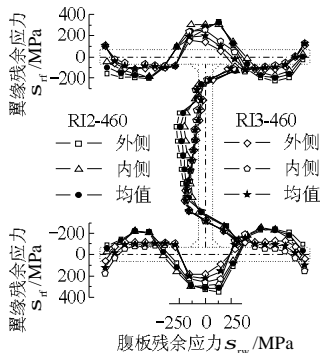


图 8 残余应力数值随板件厚度的变化规律

Fig.8 Correlation between residual stress and plate thickness

根据图 8 和表 3,可以发现两个试件的残余应力分布形状相似,但应力数值有明显差别。试件 RI3-460 翼缘和腹板的残余压应力平均值(σ_{frc} 和 σ_{wrc})分别比试件 RI2-460 的应力值小 54.9%和 40.6%;这主要是因为焊接热输入一定的情况下,焊缝附近的残余拉应力变化不大,但残余压应力的分布面积随着板厚的增大而增大,因而数值减小;此外,从焊接后温度场的角度看,热输入一定的情况下,焊缝附近高温区域影响不大,但低温区域(冷却后产生残余压应力)的区域却会随板厚的增加明显变大,残余压应力数值变小。对于残余拉应力,试件 RI3-460 翼缘中部的应力值(σ_{fit})比 RI2-460 小 18.9%,而腹板两端的应力值(σ_{wrt})却比后者高 5.0%。由此可以认为,在焊缝类型(即焊接热输入)和板件宽厚比一定的情况下,板厚对残余压应力的大小有显著的影响:板厚越大、压应力越小;但与残余拉应力的数值大小并没有直接的关系。

3.3 焊缝类型的影响

为研究焊缝类型的影响,试件 RI2-460 和 RI8-460 设计为截面尺寸(包括板件宽厚比和板厚)完全相同但焊缝类型不同(RI2-460 采用角焊缝、RI8-460 采用对接角接组合焊缝)的一组对比试件,如表 1 所示。图 9 对比了这两种截面试件的残余应力测量结果。

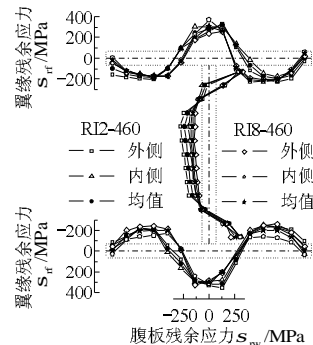


图 9 残余应力数值随焊缝类型不同的变化规律

Fig.9 Correlation between residual stress and weld type

根据图 9 和表 3,可以发现两个试件的残余应力分布形状非常接近;试件 RI8-460 翼缘和腹板的残余压应力均值(σ_{frc} 和 σ_{wrc})分别比试件 RI2-460 的应力值小 7.7%和 31.8%,前者翼缘和腹板的最大残余拉应力值(σ_{fit} 和 σ_{wrt})分别比后者小 4.2%和大 1.4%。除腹板残余压应力外,其余应力值相差均在 8%以内。此外,由于试件 RI8-460 采用对接和角接组合焊缝,热输入要明显大于试件 RI2-460,但其残余压应力特别是腹板中部的反而小于后者,由此

初步认为焊缝类型对本文所研究试件的残余压应力和拉应力的数值影响不大,但这一结论仍需更多的试验结果作进一步验证。

3.4 翼缘和腹板的相关性

为研究翼缘和腹板残余应力分布的相关性,本节计算了所有试件残余应力测量结果的不平衡应力 σ_{err} , 如下式所示。

$$s_{err} = \left[\sum_{i=1}^n s_{ri} \cdot A_i \right] / A \quad (1)$$

式中: n 为分割条带数量; s_{ri} 为每个条带对应的残余应力数值(拉应力取正值、压应力取负值); A_i 为对应条带的横截面面积; A 为试件截面面积。根据残余应力的自平衡准则理想情况下整个截面的不平衡应力应为 0, 但由于测量误差等因素的影响, 试验计算值不太可能等于 0, 且越接近于 0 表示越接近自平衡状态。

图 10 汇总了所有 8 个试件的不平衡应力计算结果, 包括针对单个板件(上、下翼缘、腹板)以及整个截面的应力值。结果表明, 所有试件的不平衡应力均为负值(即压应力), 这与本文 1.2 节最后关于焊缝内角附近残余拉应力测量结果偏低的讨论结果是一致的, 即试验结果残余拉应力值偏小, 不足以抵消全部残余压应力值从而导致不平衡应力为压应力; 此外, 所有试件的不平衡应力特别是每个板件的不平衡应力均非常小, 大多数小于 15MPa(即钢材屈服强度的 3%)。尽管翼缘和腹板的残余应力并非分别严格满足自平衡条件, 可能与翼缘和腹板的面积比值具有相关性, 但从工程应用的角度看, 可以认为焊接工字形截面的每块板件上的残余应力是独立自平衡的, 这与现有针对普通强度钢材焊接工字形截面残余应力分布模型的假定条件是一致的。

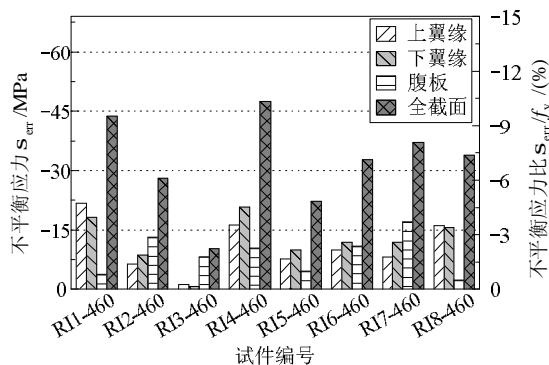


图 10 Q460 高强度钢焊接工字形截面残余应力不平衡应力
Fig.10 Residual stress self-balancing deviation results

为进一步验证上述结论, 试验设计了两组对比试件。试件 RI2-460 和 RI4-460 的腹板尺寸完全一样(10×130mm²)而翼缘尺寸完全不同, 通过对比二者腹板的残余应力分布来讨论翼缘尺寸的影响, 如图 11 所示。图中横坐标为残余应力数据点所在腹板位置距底端距离与腹板高度的比值, 纵坐标为残余应力。可以发现二者的分布形状基本一致, 残余压应力数值仅相差 2.6%, 但最大残余拉应力相差 24.2%; 可以认为翼缘尺寸对腹板的残余压应力大小没有影响。

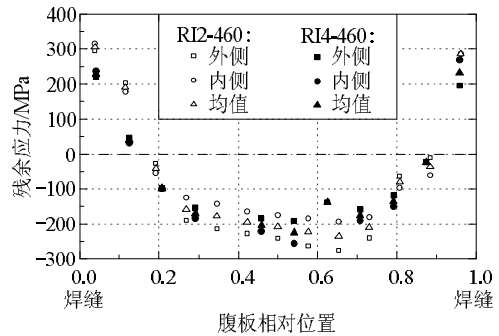


图 11 翼缘尺寸对腹板残余应力分布的影响
Fig.11 Effects from flange size on residual stress in web

另外一组对比试件是 RI4-460 和 RI5-460, 二者翼缘宽厚比相同但腹板宽厚比不同(见表 1); 通过对翼缘的残余应力分布研究腹板尺寸对翼缘的影响, 如图 12 所示。图中横坐标为残余应力数据点所在翼缘位置距翼缘端部距离与翼缘宽度的比值, 纵坐标为残余应力。结果表明试件 RI5-460 翼缘的残余压应力和残余拉应力分别比 RI4-460 的小 68.9%和 54.8%; 结合前面的讨论结果, Q460 高强度钢焊接工字形截面的各个板件可以认为单独自平衡, 所以造成两个试件翼缘残余应力数值差别大的主要原因可能在于二者板厚不同(分别为 10mm 和 12mm)而非腹板尺寸不同带来的影响。

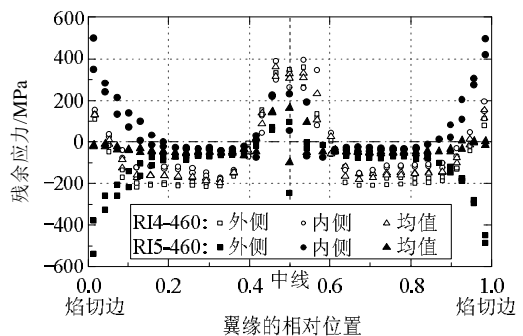


图 12 腹板尺寸对翼缘残余应力分布的影响
Fig.12 Effects from web size on residual stress in flange

4 分布模型

4.1 现有的焊接工字形截面残余应力分布模型

我国钢结构设计规范在制定柱子曲线时针对焊接工字形截面(焰切边)主要用到了两种残余应力分布模型^[9,25],如图13所示。这两个模型均只适用于普通强度钢材,且没有考虑截面尺寸(如板件宽厚比、板件厚度)等因素对残余应力数值的影响。因此有必要针对国产Q460高强度钢材焊接工字形截面的残余应力提出更加完整、准确、实用的分布模型。

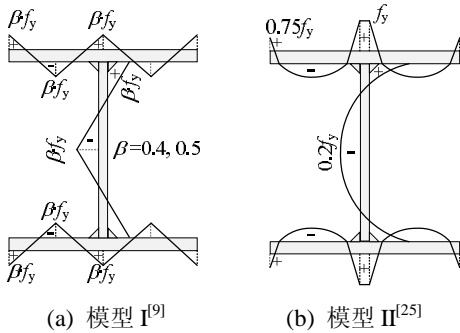


图13 现有的工字形截面残余应力分布模型

Fig.13 Existing residual stress models for normal strength steel welded I sections

4.2 分布模型形状

根据试验实测得到的残余应力分布形式(图5)以及第2节的相关讨论,本文提出的国产Q460高强度钢材焊接工字形截面(焰切边)的残余应力分布形式为多折线阶梯模型,如图6所示,即在翼缘和腹板的一定范围内残余拉应力或压应力保持常数(包括焊缝附近区域、翼缘焰切边附近、翼缘外伸段中部以及腹板中部),其他部位应力线性过渡。为了满足截面轴力和弯矩的自平衡,分布模型关于截面两主轴完全对称(即 $\sigma_{frc}=\sigma_{frc1-4}$, $\sigma_{fit}=\sigma_{fit1,2}$, $\sigma_{fite}=\sigma_{fite1-4}$ 以及 $\sigma_{wrt}=\sigma_{wrt1,2}$, 见图6)。

由于截面各板件的残余应力可以认为单独自平衡,所以翼缘和腹板的残余应力数值 $\sigma_{fr}(x)$ 和 $\sigma_{wr}(y)$ 分别满足下面两式:

$$\iint_{A_f} s_{fr} \cdot dA = 0 \quad (2)$$

$$\iint_{A_w} s_{wr} \cdot dA = 0 \quad (3)$$

式中, A_f 和 A_w 分别为翼缘和腹板的横截面面积。

根据图6所示的几何关系,翼缘和腹板上的残余应力分布范围分别满足下面两式:

$$2(a+b+c+d)+e=B \quad (4)$$

$$2(u+v)+w=h_0 \quad (5)$$

式中: B 表示截面宽度; h_0 表示腹板高度,见图1。

4.3 残余拉应力数值的确定

本文第3.1节的讨论结果表明,残余拉应力的数值与截面尺寸没有直接关系,因此本文偏于安全的将其取为不随截面尺寸变化的常数。

为研究翼缘残余拉应力的分布规律,图14将所有试件的结果汇总于1/2翼缘上,并将翼缘边缘至焊趾之间的部分等分为10份。根据图14的分布规律,本文将翼缘中部焊缝附近的最大残余拉应力取为345MPa(即Q460高强度钢材名义屈服强度的75%),该数值能够包络所有的试验测量结果;翼缘端部焰切边区域的残余拉应力则是偏于安全地根据所有试件测量结果的平均值确定,即35MPa(钢材名义屈服强度的7.6%),因为该处的残余拉应力对于工字形截面受压钢柱的整体稳定性特别是绕弱轴失稳的承载力是有利的。

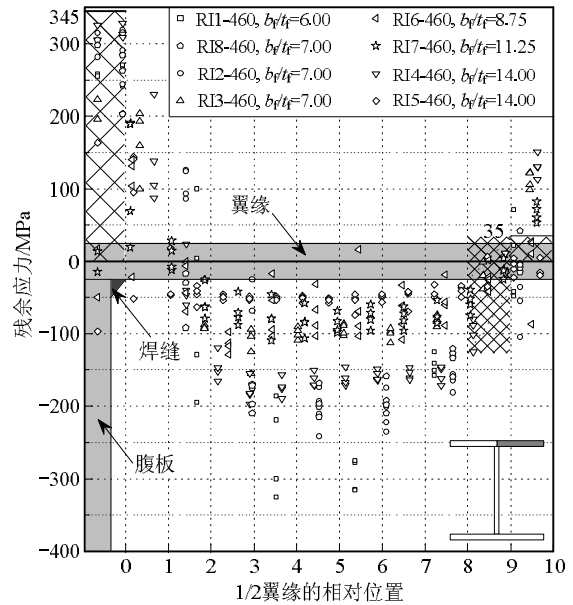


图14 翼缘残余应力分布汇总

Fig.14 Residual stress test results distribution in the flange

此外,根据图14所示的翼缘残余应力分布的范围,本文提出的分布模型将翼缘中部最大残余拉应力的分布范围(e ,如图6)定为腹板两侧焊缝外侧焊趾间距,焰切边附近的最大拉应力分布范围(a)和过渡范围(b)均取为从焊趾到翼缘端部间距的1/10,其余分布范围(c 、 d)由式(2)、式(4)联立求解得到。表4汇总了翼缘残余应力分布范围的取值。

表4 分布模型中翼缘残余应力分布范围取值

Table 4 Residual stress ranges of flanges in proposed model				
a	b	c	d	e
$(b_f-t_e)/10$	$(b_f-t_e)/10$	式(2), 式(4)	式(2), 式(4)	t_w+2t_e

为研究腹板残余拉应力的分布规律,图 15 将所有试件的结果汇总于 1/2 腹板上,并将腹板中线至焊趾之间的部分等分为 10 份。根据试验结果,本文提出的分布模型将腹板两端的最大焊接残余拉应力取为 345MPa(钢材名义屈服强度的 75%),其分布范围(u)取为焊脚尺寸;其余分布范围(v 、 w)根据式(3)和式(5)确定。表 5 总结了腹板残余应力分布范围的取值。

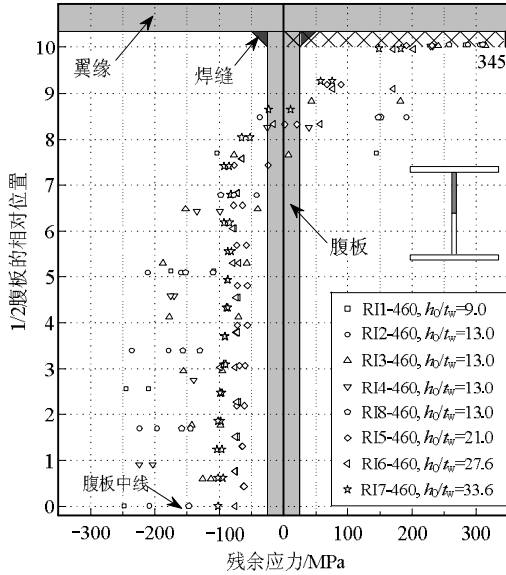


图 15 腹板残余应力分布汇总

Fig.15 Residual stress test results distribution in the web

表 5 分布模型中腹板残余应力分布范围取值

Table 5 Residual stress ranges of web in proposed model

u	v	w
t_e	式(3), 式(5)	式(3), 式(5)

4.4 残余压应力数值的确定

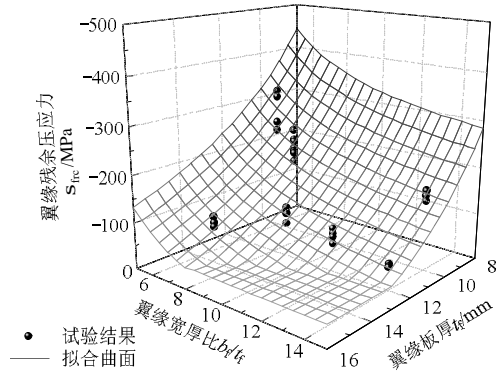
本文第 3 节的分析表明,焊接工字形翼缘和腹板的残余压应力与板件宽厚比(b_f/t_f 、 h_0/t_w)和板件厚度(t_f 、 t_w)有直接的关系,因此本文提出的分布模型根据试验结果的变化规律,采用简化后的经验公式式(6)来描述翼缘和腹板残余压应力数值大小(σ_{frc} 和 σ_{wrc})。

$$\begin{cases} \sigma_{frc} = \sigma_{f0} + A_f \cdot (b_f / t_f)^{-1} + B_f \cdot (t_f)^{-1} \\ \sigma_{wrc} = \sigma_{w0} + A_w \cdot (h_0 / t_w)^{-1} + B_w \cdot (t_w)^{-1} \end{cases} \quad (6)$$

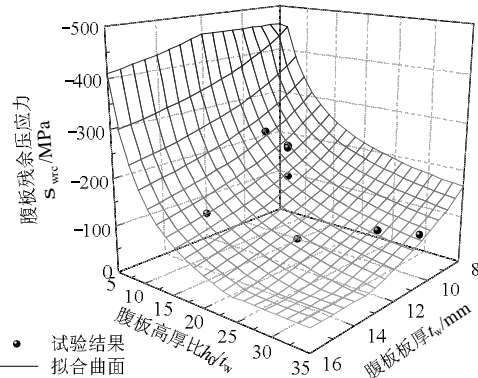
式中的待定参数(σ_{f0} 、 σ_{w0} 、 A_f 、 A_w 、 B_f 和 B_w)根据试验数据进行非线性拟合得到,同时要保证计算值能够包络所有试验值,拟合的结果如下式所示。

$$\begin{cases} \sigma_{frc} = 420 - \frac{1200}{b_f / t_f} - \frac{5000}{t_f} \geq -460 \text{ 且 } \leq -46 \\ \sigma_{wrc} = 200 - \frac{2300}{h_0 / t_w} - \frac{2400}{t_w} \geq -460 \text{ 且 } \leq -46 \end{cases} \quad (7)$$

值得注意的是,当截面尺寸过小时,采用式(7)计算得到的残余压应力数值将变得非常大、甚至超过钢材的屈服强度,这显然是不合理的。因此本文限定了计算结果的下限值(即取为钢材名义屈服强度-460MPa);同时偏于安全地给出了上限值-46MPa(即钢材名义屈服强度的 10%)。图 16 给出了拟合公式计算值(拟合曲面)和试验值的比较,可以看到前者能够很好的描述试验结果的变化规律和数值大小。



(a) 翼缘



(b) 腹板

图 16 拟合公式与试验结果对比

Fig.16 Comparison between fitting formulae and experimental results

至此,本文提出的国产 Q460 高强度钢材焊接工字形截面残余应力分布模型的所有参数都已经确定:焊缝和焰切边附近最大残余拉应力的数值和分布范围见图 14、图 15 和表 4、表 5,残余压应力的数值见式(7),其其余分布范围取值由控制方程式(2)~式(5)确定。图 5 给出了利用本文提出的分布模型计算得到的每个试件对应的残余应力分布与试验结果的对比,可以看出计算曲线与试验结果吻合良好,能够准确、可靠的描述此类钢材焊接工字形截面的残余应力分布。

5 结论

本文对 8 个国产 Q460 高强度钢材焊接工字形截面试件的残余应力进行了试验研究,得到了大量的测量数据,并全面分析了截面尺寸(包括板件宽厚比和板件厚度)、焊缝类型以及翼缘和腹板尺寸的相关性等对残余应力分布和数值大小的影响,并提出了分布模型及其计算公式。研究主要得到了以下结论:

(1) Q460 高强钢焊接工字形截面的残余应力分布形式与普通强度钢材的一致,且二者的残余应力数值没有明显差别,但由于强度的提高,前者残余拉、压应力数值与钢材强度的比值会有明显降低,如焊缝附近的残余拉应力数值要明显小于钢材屈服强度(小于屈服强度名义值的 75%),而后者一般直接取为材料屈服强度,这有利于高强钢受压钢柱整体稳定性能的提高;

(2) Q460 焊接工字钢翼缘和腹板的残余压应力数值与截面尺寸(包括板件宽厚比和板厚)有直接的关系,而现有的分布模型并没有考虑这一关系;

(3) 本文对比了两种焊缝类型试件的残余应力,发现焊缝类型对残余应力数值大小影响不大,但这一结论需要更多的试验进行验证;

(4) 本文最终提出了适用于国产 Q460 高强度钢材焊接工字形截面(焰切边)的残余应力分布模型和计算公式,模型准确考虑了截面尺寸的影响,并与试验结果吻合良好,具有足够的合理性和可靠性。

本文的研究成果对于国产高强度钢材钢结构特别是其稳定问题的研究具有重要的参考价值,便于在结构层面的数值分析模型中输入残余应力分布模型,也有利于我国钢结构设计规范的修订工作并促进高强钢结构的工程应用。

参考文献:

- [1] International Association for Bridge and Structural Engineering. Use and application of high-performance steels for steel structures [M]. Zurich: IABSE, 2005: 136-143.
- [2] Pocock G. High strength steel use in Australia, Japan and the US [J]. The Structural Engineer, 2006, 84(21): 27-30.
- [3] 施刚, 石永久, 王元清. 超高强度钢材钢结构的工程应用[J]. 建筑钢结构进展, 2008, 10(4): 32-38. Shi Gang, Shi Yongjiu, Wang Yuanqing. Engineering application of ultra-high strength steel structures [J]. Progress in Steel Building Structures, 2008, 10(4): 32-38. (in Chinese)
- [4] 范重, 刘先明, 范学伟, 等. 国家体育场大跨度钢结构设计与研究[J]. 建筑结构学报, 2007, 28(2): 1-16. Fan Zhong, Liu Xianming, Fan Xuewei, et al. Design and research of large-span steel structure of the National Stadium [J]. Journal of Building Structures, 2007, 28(2): 1-16. (in Chinese)
- [5] 陈振明, 张耀林, 彭明祥, 等. 国产高强钢及厚板在央视新台址主楼建筑中的应用[J]. 钢结构, 2009, 24(2): 34-38. Chen Zhenming, Zhang Yaolin, Peng Mingxiang, et al. Application of high-strength steel and thick steel plates to CCTV New Site Building [J]. Steel Construction, 2009, 24(2): 34-38. (in Chinese)
- [6] 王国周, 赵文蔚. 焊接与热轧工字钢残余应力的测定[J]. 工业建筑, 1986, 16(7): 32-37. Wang Guozhou, Zhao Wenwei. Residual stress measurement for welded and hot-rolled I section steels [J]. Industrial Construction, 1986, 16(7): 32-37. (in Chinese)
- [7] GB 50017-2003, 钢结构设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2003. GB 50017-2003, Code for design of steel structures [S]. Beijing: China Planning Press, 2003. (in Chinese)
- [8] 《钢结构设计规范》编制组. 《钢结构设计规范》应用讲解[M]. 北京: 中国计划出版社, 2003: 37-40. Code for design of steel structures committee. Application construal of code for design of steel structures in China [M]. Beijing: China Planning Press, 2003: 37-40. (in Chinese)
- [9] 陈骥. 综合考虑残余应力、初偏心和初弯曲时轴心压杆的稳定系数[R]// 钢结构研究论文报告选集(第一册). 北京: 全国钢结构标准技术委员会, 1982: 1-14. Chen Ji. The stability coefficient of axially loaded compression members for summarizing the effect of residual stress, eccentricity and initial out-of-straightness [R]// Selections from Research Papers and Reports on Steel Structures (Volume 1). Beijing: China Technical Committee for Standards of Steel Structures, 1982: 1-14. (in Chinese)
- [10] BS EN 1993-1-1, Eurocode 3: Design of steel structures: Part 1-1: General rules and rules for buildings [S]. London: BSI, 2005.
- [11] European Convention for Constructional Steelworks. Manual on stability of steel structures: Part 2.2 mechanical properties and residual stresses [M]. Second Edition, Bruxelles: ECCS Publ., 1976: 31-46.
- [12] ANSI/AISC 360-10, Specification for structural steel buildings [S]. Chicago: AISC, 2010.
- [13] Galambos T V. Guide to stability design criteria for metal structures [M]. 5th ed. New York: John Wiley & Sons Inc., 1998: 30-42.

(参考文献[14]-[25]转第 100 页)

- [12] Mazzoni S, McKenna F, Scott M H, et al. OpenSees command language manual [M]. Pacific Earthquake Engineering Research (PEER) Center, 2006.
- [13] Scott B D, Park R, Priestley M J N. Stress-strain behavior of concrete confined by overlapping hoops at low and high strain rates [C]// ACI Journal Proceedings. Farmington Hills, MI: ACI, 1982, 79(1): 13—27.
- [14] Barbato M, Gu Q, Conte J P. Probabilistic push-over analysis of structural and soil-structure systems [J]. Journal of Structural Engineering, 2010, 136(11): 1330—1341.
- [15] Liu P L, Der Kiureghian A. Multivariate distribution models with prescribed marginal and covariance [J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 1986, 1(2): 105—112.
- [16] Stone W C, Taylor A W. Seismic performance of circular bridge columns designed in accordance with AASHTO/CALTRANS standards [M]. Alexandria, VA: National Institute of Standards and Technology, 1993: 102—106.
- [17] Choi E, DesRoches R, Nielson B. Seismic fragility of typical bridges in moderate seismic zones [J]. Engineering Structures, 2004, 26(2): 187—199.
- [18] Yang C S, DesRoches R, Padgett J E. Fragility curves for a typical California box girder bridge [C]// Proc., TCLEE 2009 ASCE Technical Council on Lifeline Earthquake Engineering Conf.: Lifeline Earthquake Engineering in a Multihazard Environment. Reston, VA: ASCE, 2009: 1—12.

(上接第 69 页)

- [14] Rasmussen K J R, Hancock G J. Plate slenderness limits for high strength steel sections [J]. Journal of Constructional Steel Research, 1992, 23(1): 73—96.
- [15] Rasmussen K J R, Hancock G J. Tests of high strength steel columns [J]. Journal of Constructional Steel Research, 1995, 34(1): 27—52.
- [16] Beg D, Hladnik L. Slenderness limit of class 3 I cross-sections made of high strength steel [J]. Journal of Constructional Steel Research, 1996, 38(8): 201—207.
- [17] 班慧勇, 施刚, 石永久, 等. 超高强度钢材焊接截面残余应力分布研究[J]. 工程力学, 2008, 25(增刊 II): 57—61.
Ban Huiyong, Shi Gang, Shi Yongjiu, et al. Study on the residual stress distribution of ultra-high-strength-steel welded sections [J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(Suppl II): 57—61. (in Chinese)
- [18] 班慧勇, 施刚, 邢海军, 等. Q420 等边角钢轴压杆稳定性研究(I)——残余应力的试验研究[J]. 土木工程学报, 2010, 43(7): 14—21.
Ban Huiyong, Shi Gang, Xing Haijun, et al. Stability of Q420 high strength steel equal-leg angle members under axial compression (I): Experimental study on the residual stress [J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(7): 14—21. (in Chinese)
- [19] 童乐为, 赵俊, 周锋, 等. Q460 高强度焊接 H 型钢残余应力试验研究[J]. 工业建筑, 2012, 42(1): 51—55.
Tong Lewei, Zhao Jun, Zhou Feng, et al. Experimental investigation on longitudinal residual stress of Q460 high-strength steel welded h-section members [J]. Industrial Construction, 2012, 42(1): 51—55. (in Chinese)
- [20] GB/T 1591-2008, 低合金高强度结构钢[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
GB/T 1591-2008, High strength low alloy structural steels [S]. Beijing: Standards Press of China, 2009. (in Chinese)
- [21] GB 50011-2010, 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
GB 50011-2010, Code for seismic design of buildings [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese)
- [22] JGJ81-2002, 建筑钢结构焊接技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
JGJ81-2002, Technical specification for welding of steel structure of building [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2002. (in Chinese)
- [23] GB/T 8110-2008, 气体保护电弧焊用碳钢、低合金钢焊丝[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
GB/T8110-2008, Welding electrodes and rods for gas shielding arc welding of carbon and low alloy steel [S]. Beijing: Standards Press of China, 2008. (in Chinese)
- [24] Tebedge N, Alpsten G, Tall L. Residual-stress measurement by the sectioning method [J]. Experimental Mechanics, 1973, 13(2): 88—96.
- [25] 李开禧, 肖允徽, 饶晓峰, 等. 钢压杆的柱子曲线[J]. 重庆建筑工程学院学报, 1985(1): 24—33.
Li Kaixi, Xiao Yunhui, Rao Xiaofeng, et al. Column curves for steel compression member [J]. Journal of Chongqing Institute of Architecture and Engineering, 1985(1): 24—33. (in Chinese)