

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2025.09.009

引用格式:李井超,周绪红,何子奇,等.蜂窝梁残余应力试验[J].重庆大学学报,2025,48(9): 93-103.



蜂窝梁残余应力试验

李井超¹, 周绪红², 何子奇², 陈鹏³

(1. 湖南城市学院 土木工程学院,湖南 益阳 410082; 2. 重庆大学 土木工程学院,重庆 400045;
3. 中国建筑西南设计研究院有限公司,成都 610041)

摘要:蜂窝梁作为一种新型构件,通常由热轧工字形或H形截面构件的腹板按照特定折线进行切割,再将上下两部分错位焊接而成。相比于传统实腹梁,具有轻质高强、平面刚度大、造价更低等优点。由于截面增高并带有孔洞,蜂窝梁更容易出现失稳问题,截面残余应力分布对其整体稳定性能具有较大影响。文中采用切条法测得了2个实腹梁、4个矮高腹板、4个蜂窝梁试件截面的残余应力分布,研究了切割和焊接过程对蜂窝梁残余应力的影响。结果表明,蜂窝梁切割和焊接后,翼缘残余应力分布形状相比于实腹梁无明显变化,但翼缘和腹板连接处残余拉应力明显增大,焊接后可达到屈服强度;矮高腹板试件腹板切割处出现了较大残余拉应力;蜂窝梁梁桥截面处腹板残余应力分布相比于矮高腹板试件无明显变化,受焊接影响梁墩截面处拉应力变化较大,焊缝处可达到屈服强度。基于试验结果和已有模型,提出了简化的蜂窝梁纵向残余应力分布折线模型,可为蜂窝梁的稳定性研究和工程设计提供参考。

关键词:蜂窝梁;切割;焊接;残余应力;分布模型

中图分类号:TU391

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2025)09-093-11

Residual stress experiment on castellated beams

LI Jingchao¹, ZHOU Xuhong², HE Ziqi², CHEN Peng³

(1. School of Civil Engineering, Hunan City University, Yiyang, Hunan 410082, P. R. China; 2. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China; 3. China Southwest Architectural Design and Research Institute Co., Ltd., Chengdu 610041, P. R. China)

Abstract: Castellated beams are a new type of structural member fabricated by cutting the web of an I-section or H-section member along with the polygonal lines and then welding the upper and lower halves together. Compared to the traditional solid-web beams, castellated beams exhibit the advantages of a high strength-to-weight ratio, high in-plane stiffness, and economic efficiency. Due to the increased depth and the presence of openings, castellated beams are more susceptible to buckling. Studies have shown that the distribution of residual stresses across the section significantly influences their overall stability behavior. In this study, the residual stress distribution of two solid beams, four beams with low-height web plates, and four castellated beam specimens was

收稿日期:2024-12-05

基金项目:湖南省自然科学基金项目(2020JJ5020);湖南省教育厅科学项目(24C0443)。

Supported by the Natural Science Foundation Project of Hunan Province (2020JJ5020), and the Scientific Research Project of Hunan Provincial Department of Education(24C0443).

作者简介:李井超(1984—),男,博士,主要从事钢结构稳定性能的研究,(E-mail)jingchao1028@163.com。

measured using the sectioning method to investigate the influence of the cutting and welding processes on the residual stresses in the castellated beam sections. Test results indicate that the shape of the flange residual stress distribution remains largely unchanged after cutting and welding, but the tensile residual stress at the flange-web junction increases significantly, and it can achieve the yield strength after welding. The web cut region in the shallow and deep web specimens exhibit high levels of tensile residual stress. The residual stress distribution in the T-section of castellated beams is similar to that of the short and deep web specimens, while the web post section in castellated beams exhibits changes due to welding, with tensile residual stresses reaching yield strength at the welds. Based on the analysis of test results and existing models, a simplified model for longitudinal residual stress distribution was proposed for castellated beams, which could provide a reference for the stability analysis and design of castellated beams.

Keywords: castellated beams; cutting; welding; residual stress; distribution model

蜂窝梁是通过对热轧工字形或H形截面构件的腹板沿特定折线切割后错位焊接而成的空腹构件,具有材料利用率高、经济性好、施工便利性强等特点,在民用建筑、工业设施结构中得到广泛应用^[1-4]。周绪红等^[5-7]对已有成果归纳,认为蜂窝梁的稳定问题主要分为整体弯扭失稳、梁墩屈曲和畸变屈曲3种类型。整体弯扭失稳常见于长细比较大、受压翼缘约束不足的蜂窝梁构件中,其破坏机理与实腹梁类似,如图1(a)所示;蜂窝梁长细比较小时,作用于梁墩处的集中力会导致腹板发生类似压杆失稳破坏,即梁墩屈曲,如图1(b)所示;对于长细比适中的蜂窝梁,更易发生畸变屈曲,如图1(c)所示^[8]。

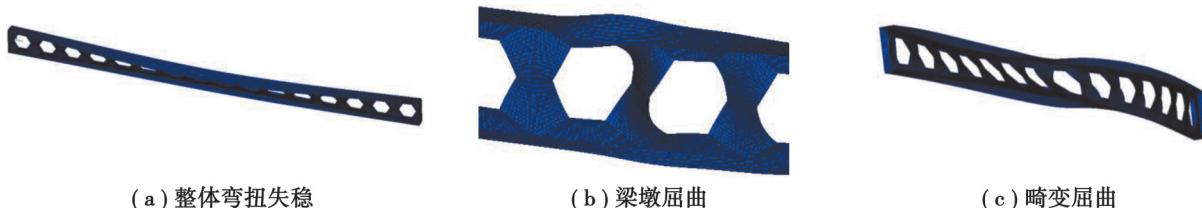


图1 梁的畸变屈曲

Fig. 1 Distortion buckling of beams

目前,国内外学者针对蜂窝梁整体失稳和局部屈曲性能进行了大量研究。Sonck等^[9-10]采用切条应力释放法测量了加工制作过程中蜂窝梁截面残余应力的数值和分布,提出蜂窝梁截面纵向残余应力分布的简化模型;通过试验和数值分析2种方法研究了残余应力对蜂窝梁整体稳定性能的影响程度。陈向荣等^[11]通过数值法研究了残余应力分布对蜂窝梁整体稳定承载力的影响,借鉴Sonck等^[9]提出的残余应力分布模型,进行针对性修正,发现蜂窝梁整体稳定承载力的大小主要受截面翼缘边缘残余应力峰值的影响。Ellobody^[12-13]对不同孔型蜂窝梁的畸变屈曲性能进行了研究,在考虑几何和材料非线性的基础上,利用数值模型对截面几何参数、构件长度和钢材强度等因素进行了分析,并与澳大利亚标准(AS4100)^[14]的计算结果进行了对比;需要指出,Ellobody的研究中对蜂窝梁残余应力的考虑不足,其中,对六边形孔蜂窝梁的分析未考虑残余应力,对圆形孔蜂窝梁的分析中直接使用了实腹梁的分布模型,而Sonck等^[9-10]的研究表明,蜂窝梁的加工制作过程改变了原型构件截面的残余应力分布,影响到蜂窝梁的整体稳定性。

贾连光等^[15]采用钻孔法,对7根蜂窝梁试件腹板开孔处截面的纵向残余应力进行实测,分析了各因素的影响规律,提出了不同工艺条件下蜂窝梁开孔截面(梁桥截面)的残余应力分布模型,但未考虑开孔对翼缘残余应力分布的影响,也未给出梁墩截面的残余应力分布。Zhou等^[16]对有限元模型进行验证,考虑翼缘厚

度、翼缘宽度和腹板厚度等因素的影响,分析了蜂窝梁加工过程中切割、焊接对截面残余应力分布的影响程度。

综上所述,由于残余应力的分布模式与构件的材料属性、约束条件、截面尺寸、截面类型、加工工艺等相关,蜂窝梁截面残余应力分布尚不明确。为进一步研究蜂窝梁残余应力分布,文中采用切条法针对2种不同截面尺寸的热轧H型钢制成的蜂窝梁进行了测试,研究了加工前、腹板切割后、焊接后3个阶段的残余应力分布,提出了残余应力的分布模型,为蜂窝梁稳定性能的研究和工程设计提供了参考。

1 试验概况

1.1 测试方法

残余应力的检测方式主要分为两类,即无损检测法和破坏性测试法。无损检测法一般用于原位测试及竣工验收监测,测定构件表层或浅层部位的残余应力,要求被测的构件保持完好,常用的有X射线检测法和超声波检测法。破坏性检测法的核心原理是通过人为施加外部荷载或破坏性手段来实现应力释放,即通过破坏材料原有的应力平衡,达到释放残余应力的目的,分析测定的应变或者位移得到测试部位的应力,常用方法有盲孔法、切条法和剥层法。由于盲孔法对操作空间要求较高,难以实现对蜂窝梁全截面残余应力的测定,试验中残余应力的量测采用切条法。切条法又称为截面法或者分割法,如图2所示,通过待测区电阻应变片在切割前后数值的变化来计算残余应力的大小。

1.2 试件设计及加工

为研究加工制作过程对蜂窝梁残余应力的影响,针对牌号Q235B的2种常用H型钢截面(A类截面HN198×99×4.5×7、B类截面HN248×124×5×8)进行研究。试验中的六边形孔蜂窝梁试件按照标准方式制作,如图3所示。首先,对实腹型钢梁的腹板按照预定折线进行切割,其中,H为蜂窝梁高度,再将2部分错位焊接得到蜂窝梁。

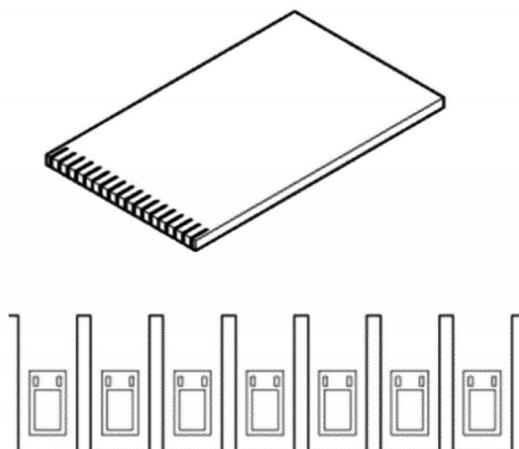
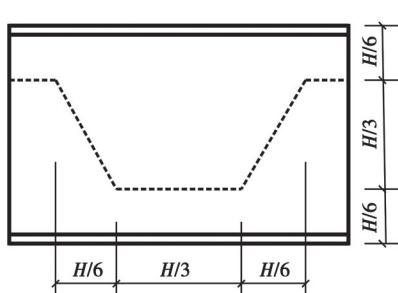
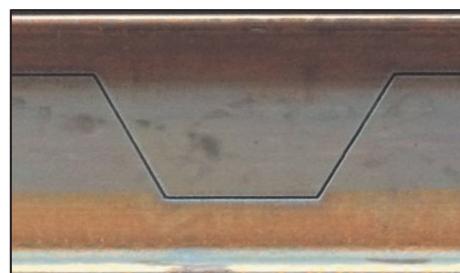


图2 切条法示意图

Fig. 2 Schematic diagram of sectioning method



(a) 试件加工尺寸



(b) 试件切割示意图

图3 型钢梁腹板切割

Fig. 3 Cutting of shape steel beam web

为研究加工制作过程对蜂窝梁截面残余应力的影响规律,分别对切割前(A1)、切割后(A2)、焊接后(A3)3个阶段的试件进行残余应力测定,试件示意图和成品图分别如图4和图5所示。图中A1为未经加工的A类截面型钢梁;A2为沿预定折线切割后的T形梁,其中,A2-1和A2-2分别为测试跨中残余应力的矮腹

板和高腹板试件;A3为由2片T形梁错位焊接而成的蜂窝梁,其中,A3-1和A3-2分别为测试蜂窝梁梁桥、梁墩跨中残余应力的试件。B类截面各试件的命名与此类似。各试件的详细尺寸如表1所示。

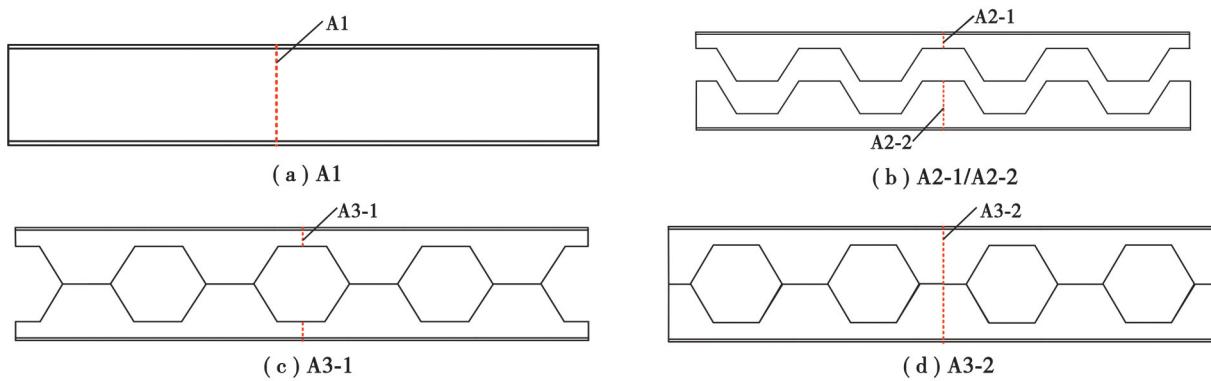


图4 残余应力测试试件示意图

Fig. 4 Schematic diagram of specimens for residual stress measurement



图5 残余应力测试试件示意图

Fig. 5 Specimens for residual stress measurement

表1 残余应力测试试件几何参数

Table 1 Geometric parameters of specimens for residual stress measurement mm

试件编号	蜂窝梁高度	原型梁高度	长度	翼缘宽度	翼缘厚度	腹板厚度
A1		198.0	1 000	99.0	7.0	4.5
A2-1		148.5	1 188	99.0	7.0	4.5
A2-2	297.0					
A3-1		297.0	1 188	99.0	7.0	4.5
A3-2						
B1		248.0	1 000	124.0	8.0	5.0
B2-1		186.0	1 488	124.0	8.0	5.0
B2-2	372.0					
B3-1		372.0	1 488	124.0	8.0	5.0
B3-2						

1.3 材料属性

试件采用Q235B级钢材,通过标准板件拉伸试验得到其弹性模量、屈服强度等物理参数实测值,如表2所示。材性试验中,试件的加工精度和测试方法依据《金属材料-室温拉伸试验方法》(GB/T228—2010)^[17]的规定进行,沿各类板材的长度方向截取3个标准试件。表2中,AF和AW分别代表A类截面型钢的翼缘和腹板,BF和BW分别代表B类截面型钢的翼缘和腹板。可以看出,各板材的弹性模量实测均值差距较小,在其后的残余应力计算中,将弹性模量统一取202 GPa。

表2 钢材材性指标
Table 2 Properties of steel materials

试件编号	板件厚度/mm	弹性模量/GPa	屈服强度/MPa	极限强度/MPa
AF	7.0	203.2	263.0	410.0
AW	4.5	201.7	277.0	403.0
BF	8.0	202.1	274.0	397.0
BW	5.0	201.4	261.0	404.0

1.4 测量方案

试验中,各试件的应变测试点位于跨中,通过应变片采集数据,结合材性试验弹性模量的实测值换算得到残余应力的数值。各试件的测点布置如图6所示。对于翼缘部分,基于试件截面的对称性,测点布置在单侧翼缘的外表面,7个测点沿试件横截面方向均匀分布,为保证切割时残余应力的充分释放,最外侧测点距离翼缘边缘为3 mm,如图7(a)所示。对于A1/B1实腹梁试件,在其跨中腹板均匀布置9个测点;A2-1/B2-1跨中为矮腹板梁试件,在跨中腹板布置3个测点;A2-2/B2-2高腹板试件,跨中腹板布置9个测点;跨中为梁桥的蜂窝梁试件A3-1/B3-1,腹板测点的布置与短腹板试件类似;对于跨中为梁墩的蜂窝梁试件A3-2/B3-2,由于腹板中部焊缝外凸导致表面不平整,且焊缝处材料与试件钢材性能存在差异,故在焊缝上下两侧距离焊缝5 mm处布置测点,其余测点的布置与长腹板试件类似,如图7(b)所示。

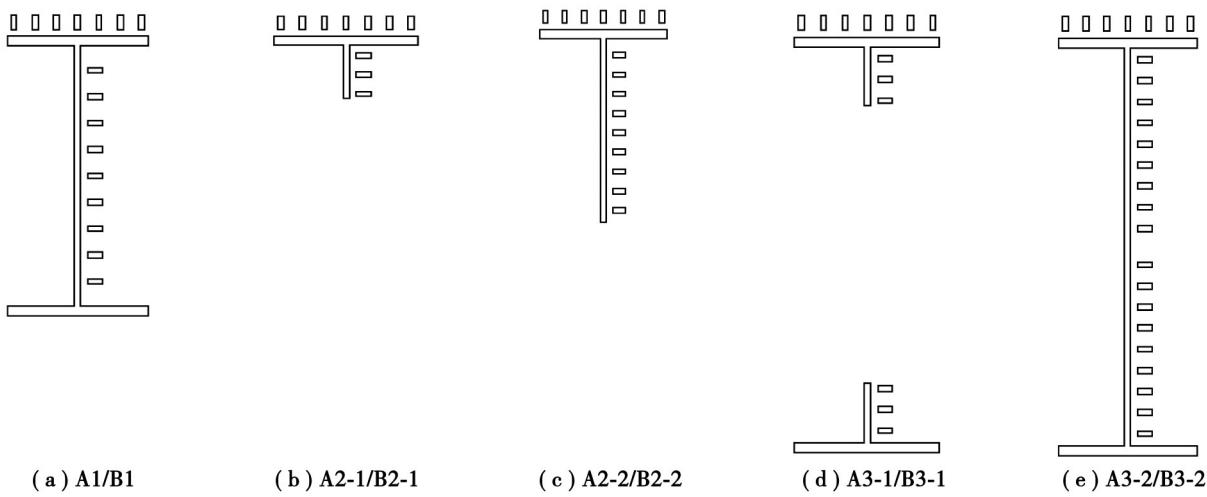


图6 测点布置示意图

Fig. 6 Schematic diagram of measuring points distribution

采用切条法测试试件的残余应力之前,先用硅胶阻燃剂对黏贴牢固的应变片进行保护,以避免切割过程中冷却液及飞溅的切割火花对应变片造成损害,影响测试结果。以蜂窝梁试件A3-2/A3-2为例,介绍整个残余应力测试过程。如图8所示,先将准备好的试件固定在车床工作台上,沿试件跨中的横截面方向移动电

极丝,将试件一分为二;再沿试件的轴向移动电极丝,依次将黏贴于梁墩腹板的应变片上下两侧材料分离,充分释放待测部位的纵向残余应力,同时记录切割前后应变仪中各应变片示数的变化,结合材性试验中钢材弹性模量的实测值,得到蜂窝梁试件梁墩腹板残余应力的大小和分布,试验过程如图 9 所示;最后,取试件中部分翼缘和腹板构成的 T 形部件,摆正位置,对试件翼缘的残余应力进行测试,过程与腹板残余应力的测试过程类似,如图 10 所示。



(a) 翼缘



(b) 局部腹板

图 7 蜂窝梁试件应变片布置

Fig. 7 Distribution of strain gauges in specimens of castellated beams

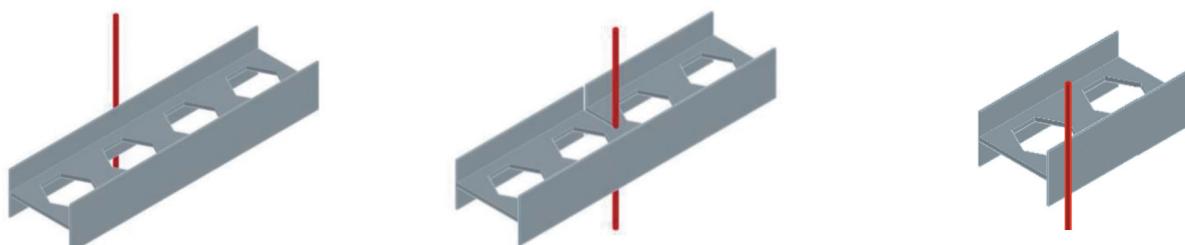


图 8 跨中截面切割

Fig. 8 Cutting of the mid-span section

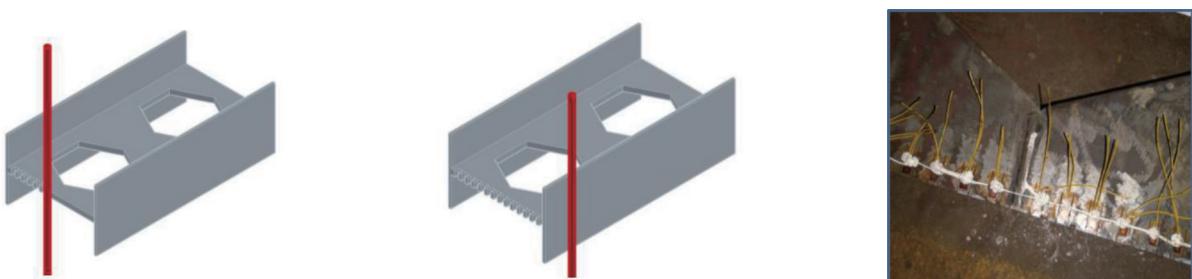


图 9 腹板残余应力测试

Fig. 9 Measurement of web residual stress

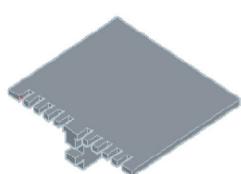


图 10 翼缘残余应力测试

Fig. 10 Measurement of flange residual stress

2 试验结果及分析

为验证文中残余应力测试方法的准确性,将试验中实腹梁试件A1和B1(切割前)的测试结果与王国周等^[18]和Sonck^[10]切条法测试热轧H型钢残余应力的分布模型进行对比;再通过对比实腹梁试件、切割试件和错位焊接后形成的蜂窝梁试件截面的残余应力分布,探究蜂窝梁制作过程中切割、焊接工艺对构件截面残余应力分布的影响;最后,结合试验中蜂窝梁试件的测试结果提出蜂窝梁构件截面残余应力分布模型。为便于与已有残余应力分布模型对比,图中残余应力坐标轴数据采用相对值表示,即 σ_r/f_y ,其中 σ_r 和 f_y 分别为残余应力和钢材屈服强度,位置坐标采用测点至对称轴或翼缘的相对距离表示,即 y/h_w 和 x/B ,其中, y 为腹板测点至腹板半高或者翼缘腹板交汇处的竖向距离; h_w 为实腹梁或蜂窝梁试件腹板的半高或楔形腹板T型梁腹板高度; x 为翼缘测点至翼缘腹板交汇处的水平距离; B 为试件翼缘半宽。

2.1 实腹梁残余应力

试件A1和B1的测试结果如图1所示,可以看出,试验选取的2种热轧H型钢试件其翼缘截面主要处于受拉状态,残余拉应力最大值为 $0.25f_y$,极值点位于翼缘与腹板交汇处;试件B1单侧翼缘边缘存在受压区,极值为 $-0.12f_y$;腹板两端受拉,中部受压,极值分别为 $0.15f_y$ 和 $-0.3f_y$ 。由图可知,试验结果与文献的模型数值较为接近,趋势类似,表明该试验测试方案可以得到残余应力分布。

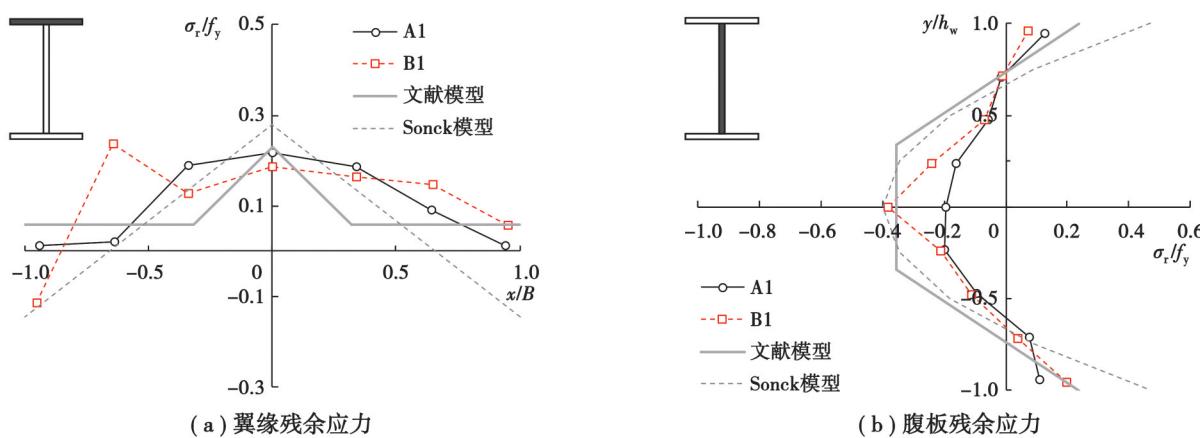


图11 实腹梁残余应力

Fig. 11 Residual stress of solid web beams

2.2 矮腹板、高腹板试件残余应力

切割后的矮腹板和高腹板试件残余应力测试结果如图12和图13所示。可以发现,相比于实腹梁翼缘,切割后矮腹板和高腹板试件的翼缘残余应力分布形状没有明显变化,但试件A2-1和试件B2-1残余拉应力极值从 $0.25f_y$ 增加至 $0.3f_y$,试件A2-2增至 $0.4f_y$,试件B2-2中部的测试结果不同,表现为残余压应力,出现此现象的原因是运输或存放过程中的碰撞改变了试件原有的应力场。切割过程导致试件腹板残余应力变化较大,白巨波^[19]对牌号为Q460GJ的焰切边焊接H型钢截面残余应力进行了测试,发现切割边缘处残余应力可达到 f_y ,相邻区域迅速下降并转为残余拉应力,试件A2-1、B2-1和B2-2的切割处残余应力与该规律吻合,试件A2-2切割处未产生较大残余拉应力(见图13(b)),是由于构件腹板较薄(4.5 mm)运输过程中碰撞变形所导致,但与试件A1腹板处残余压应力相比残余拉应力亦有所提高。如图12和图13所示,Sonck模型可以较好地预测腹板试件翼缘残余应力分布,但无法准确预测短腹板T型梁腹板残余应力分布。

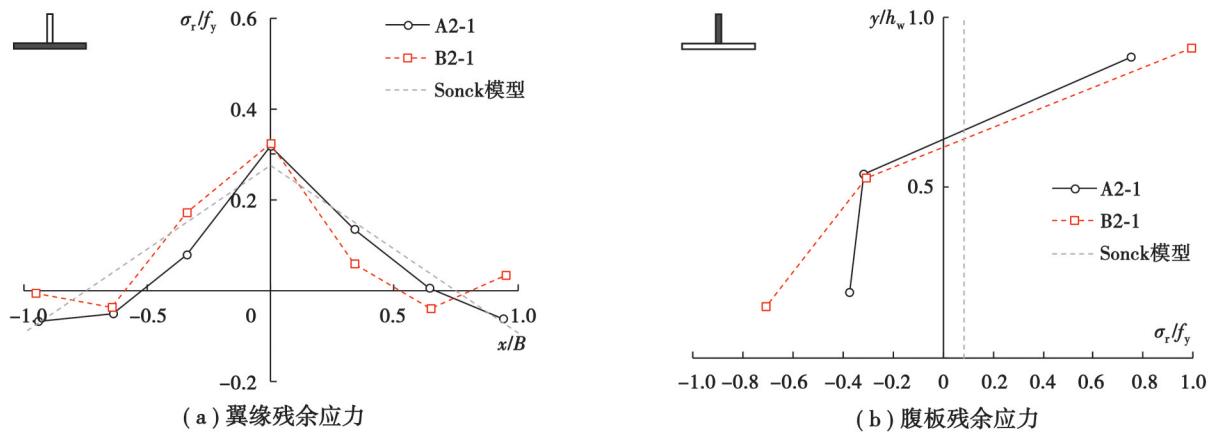


图 12 矮腹板试件梁残余应力
Fig. 12 Residual stress of specimens with short web

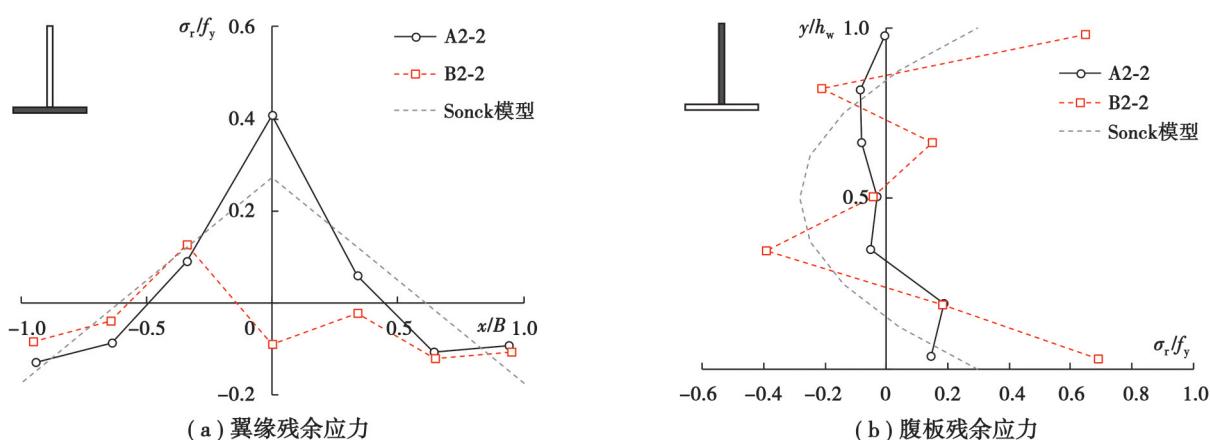


图 13 高腹板试件残余应力
Fig. 13 Residual stress of specimens with deep web

2.3 蜂窝梁残余应力

图 14 所示为蜂窝梁梁桥截面残余应力分布,可以看出其翼缘残余应力分布与原矮腹板试件翼缘残余应力分布(见图 12(a))相似,但极值明显增加并接近 f_y 。腹板残余应力分布与原矮腹板试件残余应力分布相比无明显变化,主要原因是该处截面未进行焊接,对腹板残余应力分布影响较小。Sonck 模型可较好地预测蜂窝梁梁桥截面翼缘残余应力分布趋势,但低估了翼缘和腹板连接处拉应力,此外,预测结果与腹板残余应力分布吻合较差。

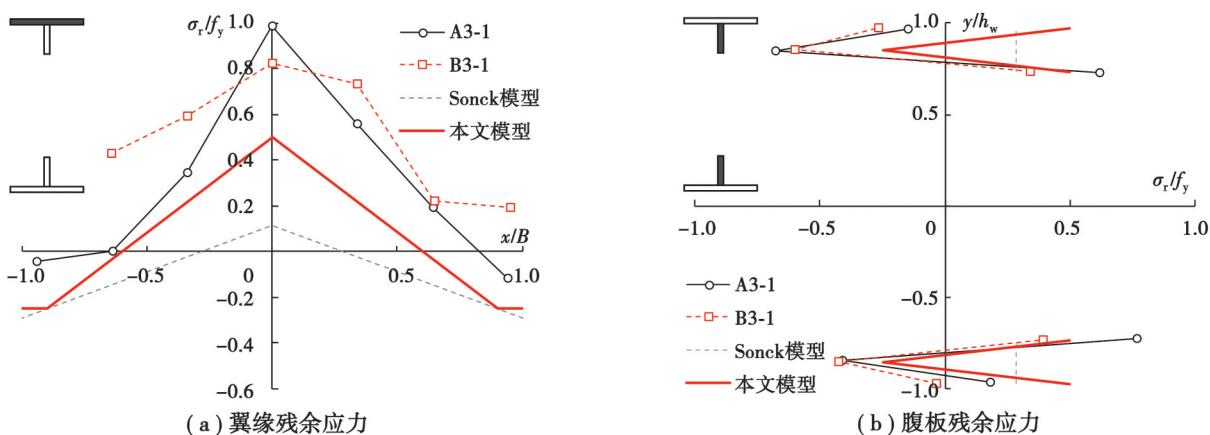


图 14 蜂窝梁梁桥截面残余应力
Fig. 14 Residual stress of T-section for castellated beams

蜂窝梁梁墩截面残余应力分布结果如图15所示。与蜂窝梁梁桥截面翼缘类似,其分布模式无明显改变,但翼缘和腹板连接处残余拉应力有增大的趋势。腹板由于焊接的影响残余拉应力较大,焊接处残余应力高达 f_y ,然后往两端迅速下降至-0.4 f_y 。Sonck模型可以较好地预测蜂窝梁梁墩截面残余应力分布模式,但低估了翼缘拉应力极值。

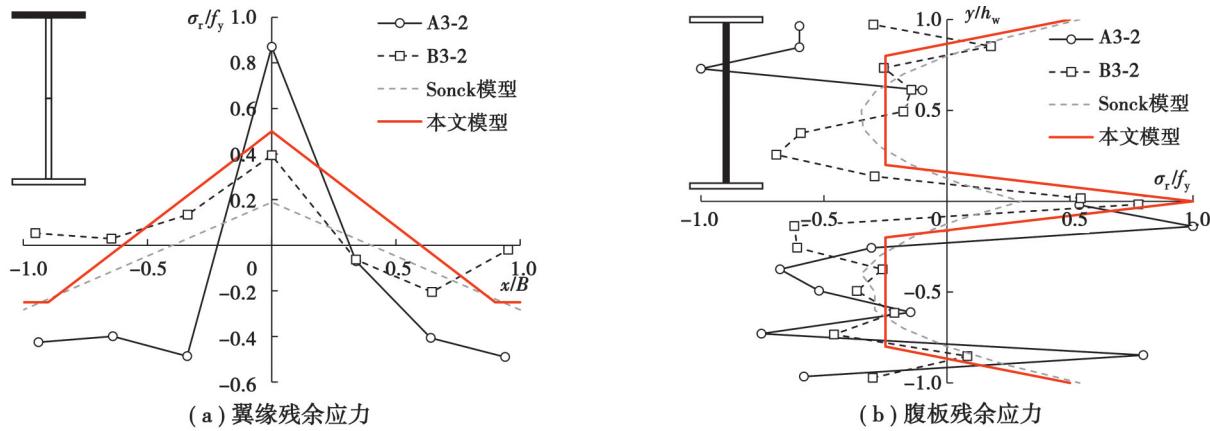


图15 蜂窝梁梁墩截面残余应力

Fig. 15 Residual stress of web post section for castellated beams

3 蜂窝梁残余应力分布模型

综上所述,Sonck模型可较好地预测蜂窝梁截面残余应力分布趋势,但无法准确预测梁桥截面腹板残余应力分布,且低估了残余拉应力极值,此外,Sonck模型为二次曲线,较为复杂。文中提出了一种简化的蜂窝梁残余应力分布折线模型,如图16所示。

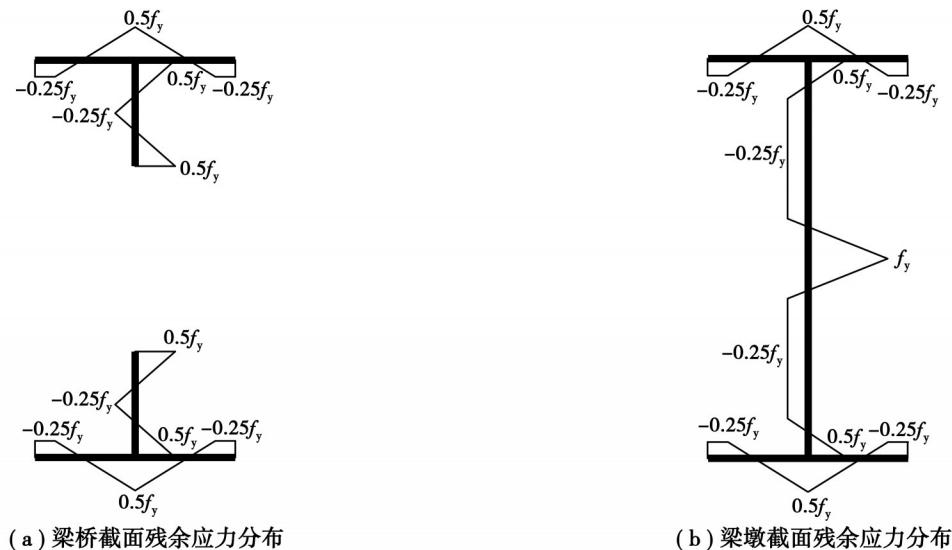


图16 残余应力分布模型

Fig. 16 Residual stress distribution model of castellated beams

蜂窝梁翼缘残余应力分布模型函数表达式为

$$\sigma_r(x) = \begin{cases} -0.25f_y, & a > 0.4, \\ (-1.875a + 0.5)f_y, & a \leq 0.4; \end{cases} \quad (1)$$

式中: a 为翼缘相对位置,即 $a=x/B_f \in [0, 0.5]$; x 为翼缘上计算截面到翼缘形心的水平距离; B_f 为翼缘宽度。

蜂窝梁梁桥截面处腹板残余应力分布模型函数表达式为

$$\sigma_r(y) = \begin{cases} (3b-1)f_y, & b > 0.25, \\ (-3b+0.5)f_y, & b \leq 0.25; \end{cases} \quad (2)$$

式中: b 为腹板相对位置, 即 $b=y/H_w \in [0, 0.5]$; y 为腹板上计算截面到腹板开孔边缘的垂直距离; H_w 为开孔后剩余腹板总高度。

蜂窝梁梁墩截面处腹板残余应力分布模型函数表达式为

$$\sigma_r(y') = \begin{cases} (7.5b'-3.25)f_y, & b' > 0.4, \\ -0.25f_y, & 0.1 < b' \leq 0.4, \\ (-7.5b'+1)f_y, & b' \leq 0.1; \end{cases} \quad (3)$$

式中: b' 为腹板相对位置, 即 $b'=y'/H'_w \in [0, 0.5]$; y' 为腹板上计算截面到腹板形心的垂直距离; H'_w 为腹板高度。

文中模型与试验结果对比如图 14 和图 15 所示, 可以看出, 文中提出的模型可以较好地预测蜂窝梁残余应力分布模式, 需要注意的是, 文中提出的模型中翼缘中部残余拉应力的数值低于试验的实测结果, 主要考虑残余拉应力极值的降低可通过加工制作工艺的改善来实现, 且残余拉应力对蜂窝梁整体稳定承载力有提升作用, 因此模型适当降低翼缘中部残余拉应力极值可提升构件设计的安全性。

4 结 论

文中对蜂窝梁残余应力进行了试验, 分析了切割和焊接等加工过程对蜂窝梁残余应力分布的影响, 并提出残余应力分布折线模型, 主要结论如下。

1) 热轧 H 型钢翼缘基本处于残余拉应力状态, 并在翼缘与腹板连接处达到极值, 约 $0.25f_y$; 腹板两端处于残余拉应力状态, 中部为残余压应力状态, 极值分别为 $0.15f_y$ 和 $-0.3f_y$ 。

2) 热轧 H 型钢残余应力分布模式与王国周模型和 Sonck 模型所预测的分布趋势类似, 表明所采用的试验方案可较好地预测蜂窝梁残余应力分布。

3) 蜂窝梁切割后矮、高腹板试件翼缘残余应力分布形状相比于实腹梁无明显变化, 但残余拉应力极值略有增加。矮、高腹板试件腹板由于切割残余应力有较大变化, 切割处出现较大残余拉应力。

4) 相比于原实腹梁, 焊接后蜂窝梁翼缘残余应力分布形状类似, 但翼缘和腹板连接处残余拉应力明显增大并趋近于 f_y 。梁桥截面处腹板由于未进行焊接其残余应力分布相比于原矮腹板试件腹板残余应力分布无明显变化, 但梁墩截面处腹板的残余应力因焊接影响有较大改变, 焊缝处残余应力高达 f_y 。

5) Sonck 模型可较好地预测蜂窝梁残余应力分布趋势, 但对梁桥截面腹板残余应力分布不准确, 且所预测的残余拉应力极值远低于试验值。文中所提出的简化残余应力分布折线模型与试验测得的蜂窝梁残余应力分布吻合良好。

参考文献

- [1] Zirakian T, Showkati H. Distortional buckling of castellated beams[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2006, 62(9): 863-871.
- [2] Wang P J, Wang X D, Ma N. Vertical shear buckling capacity of web-posts in castellated steel beams with fillet corner hexagonal web openings[J]. Engineering Structures, 2014, 75: 315-326.
- [3] Yuan W B, Kim B, Li L Y. Buckling of axially loaded castellated steel columns[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2014, 92: 40-45.
- [4] Wang P J, Guo K R, Liu M, et al. Shear buckling strengths of web-posts in a castellated steel beam with hexagonal web openings[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2016, 121: 173-184.
- [5] 周绪红, 李井超, 贺拥军, 等. 蜂窝梁的稳定性能研究进展[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(3): 21-32.
Zhou X H, Li J C, He Y J, et al. Advances on stability performance of castellated beams[J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(3): 21-32. (in Chinese)
- [6] 李井超. 残余应力对蜂窝梁稳定性能的影响研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2019.
Li J C. Research on the influence of residual stresses on the stability of castellated beams [D]. Changsha: Hunan University, 2019. (in Chinese)

- [7] 陈鹏. 考虑残余应力的蜂窝梁畸变屈曲性能及承载力计算公式研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2020.
- Chen P. Performance and design calculation formula of castellated beams experiencing distortional buckling behavior considering residual stress [D]. Chongqing: Chongqing University, 2020. (in Chinese)
- [8] Kalkan I, Buyukkaragöz A. A numerical and analytical study on distortional buckling of doubly-symmetric steel I-beams[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2012, 70: 289-297.
- [9] Sonck D, Van Impe R, Belis J. Experimental investigation of residual stresses in steel cellular and castellated members[J]. Construction and Building Materials, 2014, 54: 512-519.
- [10] Sonck D. Global buckling of castellated and cellular steel beams and columns [D]. Belgium: Ghent University, 2014.
- [11] 陈向荣, 吴刚, 冉红东. 焊接残余应力对蜂窝梁整体稳定性能的影响[J]. 建筑结构, 2015, 45(21): 35-40.
- Chen X R, Wu G, Ran H D. Effects of welding residual stresses on overall stability of castellated beams[J]. Building Structure, 2015, 45(21): 35-40. (in Chinese)
- [12] Ellobody E. Nonlinear analysis of cellular steel beams under combined buckling modes[J]. Thin-Walled Structures, 2012, 52: 66-79.
- [13] Ellobody E. Interaction of buckling modes in castellated steel beams[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2011, 67(5): 814-825.
- [14] AS4100: Australia Standards: Steel structures [S]. Sydney, 1998.
- [15] 贾连光, 杨建华, 秦晨光. 蜂窝构件开孔截面焊接残余应力分布研究[J]. 工程力学, 2015, 32(S1): 304-309.
- Jia L G, Yang J H, Qin C G. Experimental study on residual stress distribution along open hole sections of cellular steel components[J]. Engineering Mechanics, 2015, 32(S1): 304-309. (in Chinese)
- [16] Zhou X H, Li J C, He Y J, et al. Finite element analysis of thermal residual stresses in castellated beams[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2018, 148: 741-755.
- [17] 国家质量监督检验检疫总局, 中国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—2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Metallic materials-Tensile testing-Part 1: Method of test at room temperature: GB/T 228.1—2010[S]. Beijing: Standards Press of China, 2011. (in Chinese)
- [18] 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 G Z, Zhao W W. Determination of residual stress of welded and hot rolled I-beams[J]. Industrial Construction, 1986, 16(7): 32-37. (in Chinese)
- [19] 白巨波. Q460GJ钢焊接H形截面梁整体稳定性能研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2016.
- Bai J B. Research on the overall stability of Q460GJ welded H section beams[D]. Chongqing: Chongqing University, 2016. (in Chinese)

(编辑 陈移峰)