

文章编号: 1000-4750(2013)Suppl-0294-04

基于 ANSYS 的单轴对称 焊接工字形截面残余应力分析

张壮南, 赵亚楠, 胡 磊

(沈阳建筑大学土木工程学院, 辽宁, 沈阳 110168)

摘 要: 采用 ANSYS 软件对单轴对称焊接工字形截面的纵向残余应力进行了三维数值模拟, 将生热率和“生死单元”技术相结合有效模拟了焊缝金属的熔化、填充和凝固过程。分析时取冷却至 70℃ 时得到的应力为焊接残余应力, 研究了翼缘宽厚比对纵向残余应力分布的影响。研究表明: 截面上残余拉应力峰值均达到 f_y ; 宽、窄翼缘上的残余压应力峰值分别约为 $0.4f_y$ 、 $0.3f_y$; 腹板残余应力分布曲线呈梯形, 靠近宽翼缘一侧和靠近窄翼缘一侧腹板上的残余压应力峰值分别约为 $0.4f_y$ 、 $0.3f_y$; 随着翼缘宽厚比逐渐减小, 宽、窄翼缘和腹板的残余应力峰值逐渐减小, 受拉区的分布宽度有增大的趋势。

关键词: 钢结构; 残余应力; 有限元分析; 单轴对称工字形; 翼缘宽厚比

中图分类号: TU391 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2012.05.S014

ANALYSIS OF RESIDUAL STRESSES IN WELDED MONOSYMMETRIC I-SECTION BASED ON ANSYS SOFTWARE

ZHANG Zhuang-nan, ZHAO Ya-nan, HU Lei

(School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, Liaoning 110168, China)

Abstract: The ANSYS software was used to carry out a three-dimensional simulation for the longitudinal residual stresses in a welded I-section, and the course of stuffing, melting, freezing of the metal in a welding seam were simulated successfully by the method of combining the birth-death element and the heat generation rate. The residual stresses were taken when the temperature cooled to 70℃, and the influence of the width to thickness ratio of flange on the distribution of welding residual stresses were investigated. The calculation results show that the peak value of the welding residual tensile stress in a section almost reach f_y , the welding residual compressive stress peaks in a wide flange and in a narrow flange is $0.4f_y$ and $0.3f_y$, respectively. The residual stress distribution curve in a web is trapezoidal, and the peak value of compressive stress closing to a wide flange and to a narrow flange reaches $0.4f_y$ and $0.3f_y$, respectively. With the decrease of width to thickness ratio of flange, the welding residual stress peaks of the section decrease gradually and the distribution width of tensile area has an increasing trend.

Key words: steel structure; residual stresses; finite element analysis; monosymmetric I-section; width to thickness ratio of flange

近年来, 钢梁在实际工程中被大量采用, 而单轴对称工字形截面的使用也越来越广泛。单轴对称截面常作为吊车梁应用于钢结构厂房中^[1], 与双轴对称工字形截面相比, 受压翼缘被加强的单轴对称

收稿日期: 2012-05-01; 修改日期: 2013-02-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(51108279); 辽宁省高等学校优秀人才支持计划项目(LJQ2012054)

通讯作者: 张壮南(1977—), 女, 黑龙江人, 副教授, 博士, 从事钢结构研究(E-mail: zhuangnanzh@163.com).

作者简介: 赵亚楠(1988—), 女(满族), 辽宁人, 硕士生, 从事钢结构研究(E-mail: zhaoyanan19880713@163.com);

胡 磊(1986—), 女, 辽宁人, 硕士, 从事钢结构研究(E-mail: 1721927425@qq.com).

截面有一定的优势。它可以比同样截面积的双轴对称截面提供更大的稳定承载力^[2]，且提高幅度相当可观。单轴对称工字形截面的上下翼缘的强度都得到充分的发挥，节省了钢材的用量。因此在钢材价格大幅上涨的情况下更加凸现它的应用价值^[3]。众所周知，钢材焊接时会产生焊接残余应力。残余应力对结构的疲劳寿命、刚度等都有一定的影响^[4]。如今，焊接、轧制双轴对称工字形截面的残余应力分布研究已经较为成熟，但对焊接单轴对称工字形截面的残余应力分布研究甚少^[5]。本文采用有限元软件 ANSYS，研究翼缘宽厚比对单轴对称焊接工字形截面残余应力分布的影响。

1 有限元模型的建立

1.1 有限元模型的建立和网格划分

在有限元计算中，网格划分的合适与否与计算结果的精度和计算效率息息相关，网格划分得越

密，计算精度越高，但所需的计算时间越长。通常对计算结果影响较大的部分需细化研究，而影响较小的部分作简化处理。焊接过程中，焊缝及周围温度变化以及生成的热应力均较大且变形明显，因此，本文在分析时将焊缝及其附近单元的网格加密，单元大小控制在 2mm 左右。在远离焊缝的区域适当放宽。在考虑计算时间和模拟效果的情况下，取焊缝方向的单元长度为 2mm，每次热源都加在单元长度焊缝的整个截面上。

1.2 材料属性

模拟时采用的钢材为 Q235B，表 1 为钢材随温度变化的热物理及力学属性。

在不影响计算精度的条件下，对材料的属性进行适当的调整，可以加快计算的收敛^[6]。因此，本文对材料的一些物理参数进行了改变，具体见文献[7]。

表 1 钢材随温度变化的热物理及力学属性

Table 1 Thermal physical quantity and mechanical properties changing with temperature

温度/ (°C)	导热系数/ (W/m·°C)	密度/ (kg/m ³)	比热容/ (J/kg·°C)	换热系数/ (W/m·°C)	泊松比	线性膨胀系数/ (×10 ⁻⁵ /°C)	弹性模量/ (×10 ¹¹ Pa)	屈服应力/ MPa
20	64	7820	560	10	0.28	1.23	2.05	220
250	64	7700	560	35	0.29	1.23	1.87	175
500	64	7610	560	52	0.31	1.23	1.5	130
750	64	7550	560	100	0.35	1.23	0.7	40
1000	64	7490	560	150	0.40	1.23	0.2	25
1500	64	7350	560	300	0.45	1.23	0.19	2
1700	64	7300	560	310	0.48	1.23	0.18	1
2500	64	7900	560	350	0.5	1.23	0.12	0.1

1.3 焊接热源

在进行焊接残余应力数值模拟时，热源的选取至关重要，一定程度上会影响计算的准确性^[8]。对于填角焊缝或者坡口焊缝时，常采用生热率的方式施加热源荷载。但是焊接材料在焊接开始时并不存在，而是随着焊接依次填充在焊缝中，“生死单元”技术可以很好的模拟这个过程。本文首次将生热率和“生死单元”技术相结合应用到焊接梁的角焊缝模拟中^[7]。

1.4 冷却最终温度的确定

热源施加后，对模型采取逐步扩大冷却步的方式进行冷却。通常模拟要冷却到室温，但有关研究发现，冷却到 70°C 左右时的应力即为残余应力^[9]。本文针对此问题进行了有限元分析验证。取双轴对称焊接工字形梁为例，模型尺寸大小详见文献[7]。

通过分析发现，冷却到 70°C 左右的计算步要远

远少于冷却到室温，而两者计算得到的残余应力分布和数值却相差不多。图 1、图 2 即为焊件冷却到室温和冷却到 70°C 左右的残余应力分布对比。因此为了减少计算量、节省计算时间，后续模拟计算时取冷却到 70°C 左右时得到的应力为焊接残余应力。

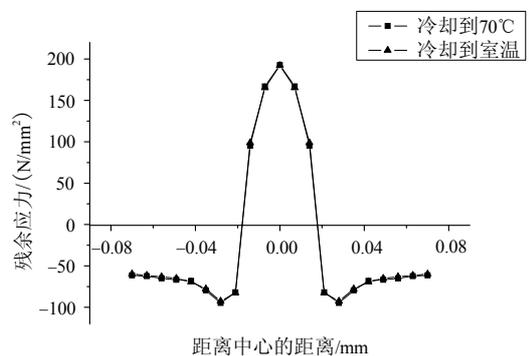


图 1 翼缘残余应力对比

Fig.1 Comparison of residual stresses in flange between cooled to room temperature and 70°C

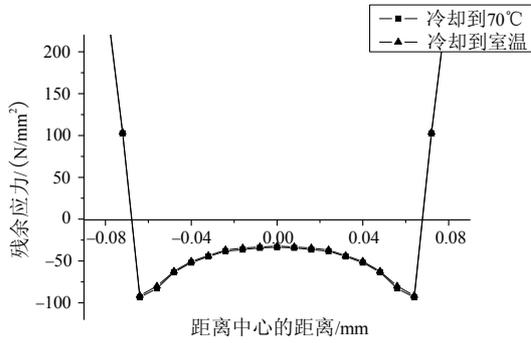


图2 腹板残余应力对比

Fig.2 Comparison of residual stresses in web between cooled to room temperature and 70°C

2 翼缘宽厚比对残余应力分布的影响

焊接热分析属于典型的热弹塑性问题，根据我国钢结构规范(GB50017-2003)中关于翼缘宽厚比的限制规定，并考虑其塑性发展，建立的梁截面参数(如表2所示)。分析时考虑焊接一次完成，采用气体保护金属电弧焊，电压 $U=24V$ ，电流 $I=250A$ ，焊接热效率为 $0.7^{[10]}$ ，焊接速度 $v=10mm/s$ 。图3为单轴对称梁截面参数示意图。

表2 梁的截面尺寸

Table 2 Section sizes of beams

梁号	B_1/mm	t_1/mm	B_2/mm	t_2/mm	h_0/mm	t_w/mm	B_1/t_1	B_2/t_2
梁1	500	18	300	18	900	16	13.4	7.9
梁2	500	20	300	20	900	16	12.1	7.1
梁3	500	22	300	22	900	16	11.0	6.5
梁4	500	24	300	24	900	16	10.1	5.9

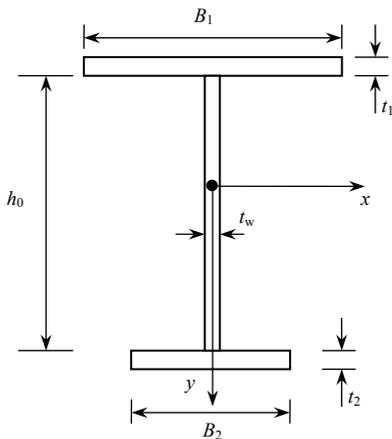


图3 单轴对称截面几何参数

Fig.3 Geometric parameters of monosymmetric I-section

进行有限元模拟时先对模型进行非线性瞬态热分析，得到焊接温度场分布，然后把温度场计算结果作为载荷施加到结构模型上再进行计算，从而得到模型的焊接残余应力。

2.1 宽翼缘、窄翼缘残余应力计算结果与分析

宽翼缘、窄翼缘残余应力比较、残余应力峰值、残余应力为零的位置，如图4、图5、表3、表4所示。由图4、图5和表3可以看出，单轴对称截面梁宽窄翼缘的残余应力分布趋势和双轴截面梁的残余应力经典分布类似，呈现抛物线分布，沿主轴方向基本成对称分布。随着翼缘的宽厚比的逐渐减小，宽翼缘、窄翼缘的残余应力峰值逐渐减小，残余拉应力所占翼缘分布宽度有增长趋势。宽翼缘、窄翼缘的残余拉应力峰值比较接近，基本达到钢材屈服强度 f_y ，但残余压应力峰值相差较大，宽翼缘的残余压应力接近 $0.4f_y$ ，窄翼缘的屈服强度接近 $0.3f_y$ 。

由表4、图4和图5，可以看出翼缘上残余应力为零的位置，宽翼缘在 $72mm$ 附近，窄翼缘在 $42mm$ 附近，残余拉应力分布宽度约为总翼缘宽度的 0.3 倍。

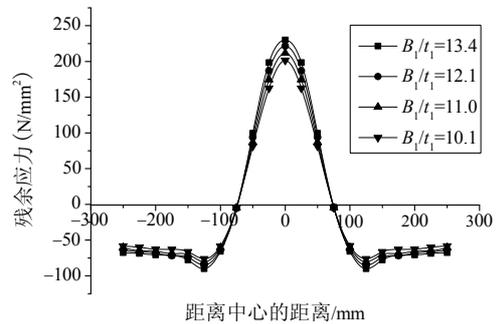


图4 宽翼缘残余应力比较

Fig.4 Comparison of residual stresses in wide flange

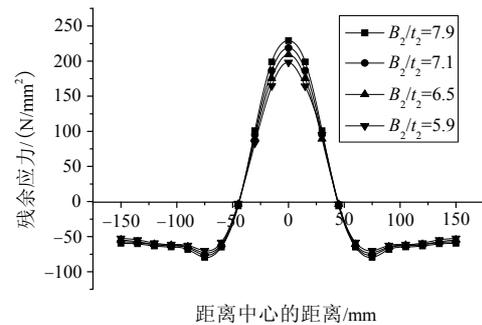


图5 窄翼缘残余应力比较

Fig.5 Comparison of residual stresses in narrow flange

表3 宽翼缘、窄翼缘残余应力的峰值 $f/(N/mm^2)$

Table 3 Peak values of residual stresses in wide and narrow flange

B_1/t_1	残余拉应力	残余压应力	B_2/t_2	残余拉应力	残余压应力
13.4	230.15	-90.09	7.9	229.20	79.56
12.1	221.60	-85.10	7.1	218.76	76.30
11.0	211.57	-80.24	6.5	209.45	73.00
10.1	201.56	-76.30	5.9	198.25	70.00

表 4 翼缘残余应力为零位置 /mm

Table 4 The location of zero residual stress in the wide and narrow flange

B_1/t_1	x 轴位置	B_2/t_2	x 轴位置
13.4	70.68	7.9	41.40
12.1	71.73	7.1	42.39
11.0	72.79	6.5	43.13
10.1	73.81	5.9	44.14

注：以梁中心为坐标原点，x 轴向右、y 轴向上为正，由于梁的对称性，只列出梁正方向的数据。

表 6 腹板残余应力为零的位置 /mm

Table 6 The location of zero residual stress in the web

梁号	残余拉应力(下)x 轴位置	残余压应力(上)x 轴位置
梁 1	-345.24	349.38
梁 2	-346.81	350.23
梁 3	-347.24	350.41
梁 4	-347.87	350.93

注：靠近宽翼缘一侧为上，靠近窄翼缘一侧为下。

2.2 腹板残余应力计算结果与分析

图 6 和表 5、表 6 为腹板残余应力比较、腹板残余应力峰值及残余应力为零的位置。由图 6 可以看出，单轴对称截面梁腹板上残余应力分布，与双轴对称截面梁腹板残余应力分布趋势不同，并不为对称分布，而是沿着腹板高呈梯形分布，这是由于翼缘的宽厚比不同、热胀冷缩时收缩程度不同而引起的，但还是以残余压应力为主。翼缘的宽厚比越小，靠近宽翼缘、窄翼缘一侧腹板的残余应力峰值越小。由表 5 可知，靠近宽翼缘一侧与靠近窄翼缘一侧腹板的残余拉应力峰值基本相同，相近钢材的屈服强度 f_y 。靠近宽翼缘一侧腹板上的残余压应力约为 $0.4f_y$ ，靠近窄翼缘一侧腹板的残余压应力约为 $0.3f_y$ ，腹板上下的残余压应力相差较大，呈梯形分布。由图 8 和表 6 可知，靠近宽翼缘一侧与靠近窄翼缘一侧腹板残余应力为零的位置都在 350mm 附近，残余拉应的分布宽度约为总腹板高的 0.3 倍，残余压应力的分布宽度为总腹板高的 0.7 倍。

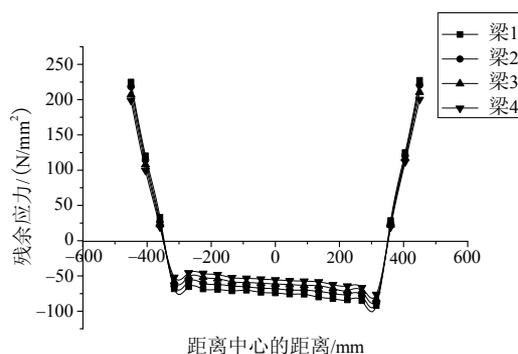


图 6 腹板残余应力比较

Fig.6 Comparison of residual stresses in web

表 5 腹板残余应力的峰值 / (N/mm^2)

Table 5 Peak values of residual stresses in web

梁号	拉应力(下)	压应力(下)	拉应力(上)	压应力(上)
梁 1	224.88	-68.46	227.41	-92.12
梁 2	218.36	-64.22	220.68	-88.12
梁 3	207.03	-58.02	210.61	-82.89
梁 4	198.72	-51.94	200.23	-76.20

注：靠近宽翼缘一侧为上，靠近窄翼缘一侧为下。

3 结论

本文通过改变单轴对称工字形梁翼缘宽厚比，计算了单轴对称工字形梁的残余应力分布情况，通过分析可得如下结论：

(1) 宽翼缘、窄翼缘残余应力分布曲线呈左右对称的抛物线分布。宽翼缘、窄翼缘残余拉应力峰值基本相同，约为钢材的屈服强度 f_y ；宽翼缘残余压应力峰值约为 $0.4f_y$ ，窄翼缘残余压应力峰值约为 $0.3f_y$ ，翼缘残余拉应力分布宽度为翼缘总宽度的 0.3 倍。

(2) 腹板残余应力分布曲线呈梯形分布。靠近宽翼缘一侧与靠近窄翼缘一侧腹板的残余拉应力峰值基本相同，约为钢材的屈服强度 f_y ；靠近宽翼缘一侧腹板残余压应力峰值约为 $0.4f_y$ ，靠近窄翼缘一侧腹板的残余压应力峰值约为 $0.3f_y$ ，腹板残余压应力分布宽度约为腹板总高的 0.7 倍。

(3) 截面上的残余应力峰值随着翼缘宽厚比减小而减小，残余拉应力分布宽度有增大趋势。

参考文献：

[1] 王鹏飞. 单轴对称混用工字钢梁受力性能研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2010.
Wang Pengfei. Study on mechanical behavior of hybrid girders with monosymmetric I-section [D]. Qingdao: Qingdao Technological University, 2010. (in Chinese)

[2] 陈绍蕃. 单轴对称工形截面无支撑筒支梁的稳定承载能力[J]. 钢结构, 2008, 23(8): 14-19.
Chen Shaofan. Buckling capacity of unbraced simply-supported beams with monosymmetric I-section [J]. Steel Construction, 2008, 23(8): 14-19. (in Chinese)

[3] 林贤根, 盛尔迈. 单轴对称焊接工字钢筒支梁截面的优化设计[J]. 工业建筑, 2005, 35(增刊 1): 349-365.
Lin Xian'gen, Sheng Ermai. Optimization design of section for a single symmetry welded simply supported I-steel beam [J]. Industrial Construction, 2005, 35(Suppl 1): 349-365. (in Chinese)

[4] Withers P J, Bhadeshia H K D H. Overview residual stress part 1-measurement techniques [J]. Materials Science and Technology, 2001, 17: 355-365.

(参考文献[5]-[10]转第 303 页)