

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2015.01.017

扁平钢箱梁 U 肋焊接残余应力数值模拟分析

王若林¹, 李根森²

(1. 武汉大学 土木建筑工程学院, 武汉 430072; 2. 云南省电力设计院, 昆明 650224)

摘要:已建成的扁平钢箱梁桥在运营过程中发现一些与结构、构造和制造相关的病害,并且随着服役时间的增长越来越突出。其原因是扁平钢箱梁结构采用薄板组焊而成,因此,扁平钢箱梁在未受力之前,便已存在着由于焊接所产生的应力场和变形场,导致扁平钢箱梁普遍出现裂纹等病害。运用热-结构耦合法对扁平钢箱梁 U 肋与桥面板交接处焊接的温度场和应力场进行数值模拟计算分析,并得到焊接残余应力的分布规律,为进一步分析结构病害与加固设计提供依据。

关键词:扁平钢箱梁;焊接;残余应力;裂纹;数值模拟

中图分类号:TU391 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2015)01-0104-08

Numerical simulation for the residual stress of U-rib welding onto the flat steel box girder

Wang Ruolin¹, Li Gensen²

(1. School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, P. R. China;
2. Yunnan Electric Power Design Institute, Kunming 650224, P. R. China)

Abstract: The flat steel box girder is commonly used for long-span cable-stayed bridges. The structural complexity, construction details and manufactures cause damage to the bridge and the damages seriously grow overtime. The main reason for these damages is that welding technology of flat steel box girder with thin plates and rib elements produces residual stress and strain fields during the welding process, and further more welding cracks commonly appear. In this study, thermal-structural couple methods was adopted to numerically simulate the welding high temperature fields and the stress fields at the joint of U rib and decks of a flat steel box. The welding residual stress distribution was studied as well for further analyzing on the structural damage and strengthening design strategies.

Key words: flat steel box girder; welding; residual stress; crack; numerical simulation

扁平钢箱梁因其具有良好的气动性能而得到了广泛的运用。中国近年来所建成的大跨度悬索桥和

斜拉桥的主梁多采用该种结构形式。但是,扁平钢箱梁构造复杂,加劲肋(U肋)、纵横隔板布置密集,

收稿日期:2014-05-18

基金项目:国家自然科学基金(51278387)

作者简介:王若林(1969-),女,博士,副教授,主要从事结构工程、结构健康监测、防灾减灾、结构新材料新工艺研究,(E-mail)rl.wang@whu.edu.cn。

Received:2014-05-18

Foundation item:National Natural Science Foundation of China(No. 51278387)

Author brief:Wang Ruolin(1969-), PhD, associate professor, main research interests: structural engineering, structural health monitoring, disaster prevention and mitigation, structural new materials and construction arts, (E-mail)rl.wang@whu.edu.cn.

加之大跨度桥梁体量巨大^[1],并且在扁平钢箱梁内部,腹板与顶(底)板、加劲肋与顶(底)板都采用焊接连接,导致了箱梁内部焊缝很多,而焊缝及其热影响区由于焊接的不均匀热过程,导致构件中存在较大的焊接残余应力、应变,几何不连续性、力学性能不连续性和各种焊接缺陷等。当车辆从桥梁上经过时,因桥面铺装缺损或者伸缩缝的不平整,造成了车辆振动而对桥梁作用交变荷载,在焊缝等薄弱环节,极易产生疲劳损伤,形成疲劳裂纹等,导致梁体刚度下降,加剧桥面板上铺装的损伤。

学者们对钢结构焊接残余应力进行了大量的研究。在计算机技术推广以前,因焊接工艺工程复杂多变,采用试验手段作为基本研究方法,其模式为“理论-试验-生产”^[2]。到了近代,计算机技术得到推广,也使数值模拟遍及了焊接的各个领域^[2~20],焊接研究的模式由“理论-试验-生产”转变为了“理论-数值模拟-生产”。2000年,Masahito等针对以往计算焊接残余应力的固有应变分析和热弹塑性分析只能计算焊件表面应力的不足,提出了一种新的数值计算方法,对圆管对接焊厚度方向的焊接残余应力进行了数值计算,并与中子衍射测得结果进行对比,实测结果与计算结果一致^[5]。同年,Dong等针对焊接残余应力对压力管道疲劳强度的影响做了研究,并进行了有限元分析^[6];近几年对焊接残余应力的研究除了传统的试验研究以外,运用有限元对其进行数值计算更是研究热点并取得到长足的进步^[7-10]。中国对焊接残余应力的研究,尤其是运用数值方法对其进行的研究起步较晚。最初是由西安交通大学的楼志文等人在上世纪70年代研究焊接温度场和热弹塑性应力场的分析中,引入了数值分析方法。上世纪80年代后,上海交通大学焊接教研室对焊接的热传导做了大量的数值分析研究,提出了变步长外推法方程用以求解非线性热传导。近年来,很多高校和研究机构也对焊接展开了数值模拟的探讨^[2,5,7-10]。

笔者针对一实际桥梁扁平钢箱梁 U 肋焊缝附近反复出现裂缝,对该焊接过程进行数值模拟,进而阐明焊接残余应力的产生原因及其对钢箱梁等钢结构所产生的影响。

1 焊接过程分析建模

1.1 有限元基本方程

焊接过程是一个局部被急速加热,后又急速冷却的过程,呈现的是一个典型的非线性瞬态热传导问题。该热传导过程的控制方程为式(1)和(2)。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_{xx} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_{yy} \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_{zz} \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q = \rho c \frac{dT}{dt} \quad (1)$$

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\partial V}{\partial t} + V_x \frac{\partial T}{\partial x} + V_y \frac{\partial T}{\partial y} + V_z \frac{\partial T}{\partial z} \quad (2)$$

式中: c 为材料比热容; ρ 为比材料密度; V_x 、 V_y 、 V_z 为媒介传导速率。

在对焊接温度场进行计算时,通常采用以下几种边界条件。

第一类边界条件,边界上的温度值已知

$$\lambda_{xx} \frac{\partial T}{\partial x} n_x + \lambda_{yy} \frac{\partial T}{\partial y} n_y + \lambda_{zz} \frac{\partial T}{\partial z} n_z = T_s(x, y, z, t) \quad (3)$$

第二类边界条件,边界上热流密度分布已知

$$\lambda_{xx} \frac{\partial T}{\partial x} n_x + \lambda_{yy} \frac{\partial T}{\partial y} n_y + \lambda_{zz} \frac{\partial T}{\partial z} n_z = q_s(x, y, z, t) \quad (4)$$

第三类边界条件,边界与周围物体的热交换已知

$$\lambda_{xx} \frac{\partial T}{\partial x} n_x + \lambda_{yy} \frac{\partial T}{\partial y} n_y + \lambda_{zz} \frac{\partial T}{\partial z} n_z = \beta(T_a - T_s) \quad (5)$$

式中: q_s 为单位面积上的外部热源输入; β 为表面换热系数; T_a 为边界已知温度; T_s 为周围介质温度。

1.2 焊接过程应力场

焊接过程中,随着温度的变化,材料的弹性模量、屈服极限强度、线膨胀系数等都随着温度而不断变化,呈现出明显的非线性行为,其应力场的分析是以温度为体荷载的复杂的非线性弹塑性分析。包括如下相关性分析。

1) 路径相关性。

2) 率相关性。在对焊接的计算中,按率无关性考虑。

3) 塑性分析相关准则。本文分析中,将材料视为均匀的,因此采用的屈服准则为 Von Mises 准则,对分析中所采用的强化准则,选取双线性随动强化准则。

1.3 焊接过程模型简化

焊接是一个涉及到电弧物理、传热、冶金和力学的复杂过程^[2]。其应力应变场存在着材料非线性和几何非线性等非线性问题,为简化焊接的计算模型,将焊接热应力场看作材料非线性瞬态问题,采用弹塑性力学模型。

在焊接计算中只考虑单向耦合,即焊接温度场

对焊接应力场的影响。

分析中主要考虑对流和热传导,而热量的辐射则通过加大对流和热传导系数来近似代替。对焊接热源的模拟,采用在焊缝相应单元节点处施加生热率来进行模拟。

2 扁平钢箱梁 U 肋焊接过程有限元模拟分析

在对焊接过程的模拟计算中,采用 ANSYS 热-结构耦合计算功能。

2.1 热-结构耦合

在分析中采用间接耦合法进行焊接残余应力的模拟。即先进行热分析,再将热分析的结果作为体荷载加到模型中进行应力场分析,从而得到焊接后产生的残余应力。在热分析和结构分析中采用相同的网格划分方式,使单元具有相同的节点号码,用 ANSYS 相关命令将热单元转换为结构单元,并将热分析结构文件中计算所得的节点温度直接施加到相应的结构分析中的节点上。

2.2 单元的生灭

在焊接过程中,焊接前焊缝金属是不存在的,随着焊缝的延伸,焊缝处被金属所填充,对此过程可采用 ANSYS 单元的生灭来进行焊接过程的模拟:焊接前,将焊缝单元全部杀死,冷凝过程按施焊顺序将“被杀死”的单元逐步激活。

2.3 单元类型

焊接残余应力的有限元模拟,单元类型的选择考虑了以下几点:具有间接耦合功能;具有单元的生灭功能;可以对焊缝处进行规则划分;还应具有热和结构单元的转换功能。综合以上几点,选定 Solid70 单元进行温度场分析,并选用与之对应的 Solid185 进行应力场分析。单元如图 1 所示。

2.4 模型尺寸

顶板厚 12 mm,U 肋厚 8 mm,上口 320 mm,下口 204 mm,高 260 mm,U 肋和焊缝如图 2 所示。因其对称性,只取其中心一半建立模型,取面板宽 320 mm,长 300 mm。对构件模型纵向划分 120 个单元,横向在焊缝及近缝区采用较密的网格划分,远离焊缝的位置则采用较粗的网格,划分网格后,模型包含 122 570 个单元,如图 3 所示。

2.5 材料参数

桥梁 U 肋及桥面板采用 16Mnq(Q345q)钢。高温下的钢材物理性能相关文献很少,在本文中的计算,需要考虑的钢材热物理性能,即材料弹性模

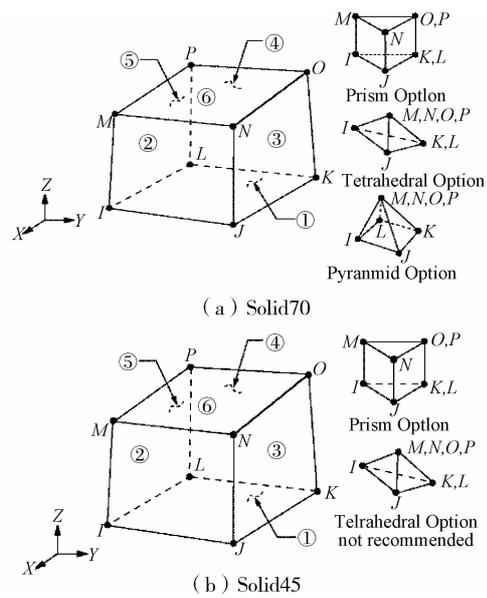


图 1 焊接分析单元

Fig. 1 Welding analysis elements

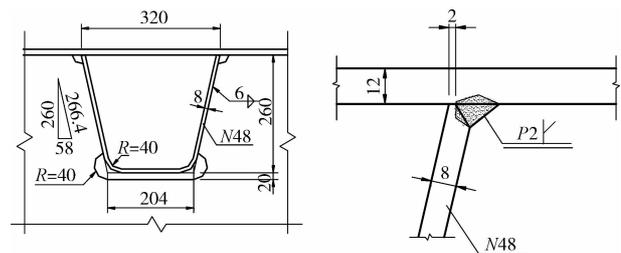


图 2 扁平钢箱梁 U 肋及焊缝(单位: mm)

Fig. 2 U-rib and welding seam of the flat box girder

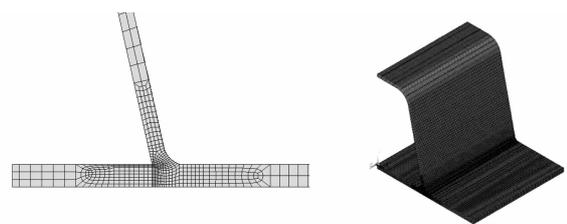


图 3 焊缝有限元模型

Fig. 3 Welding seam FE modeling

量,屈服应力,热传导系数,热膨胀系数,比热等参数与温度的变化关系,均参考欧洲规范 Eurocode3 [20] Part1-2 相关规定取用。

2.6 空气对流系数

经查阅相关资料,常温下空气的对流系数一般为 $5 \sim 25 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{T})$,在计算中统一选取为 $10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{T})$,即 $10^{-6} \text{ W}/(\text{mm}^2 \cdot \text{T})$ 。

2.7 焊接热源

焊接时室温取为 25°C ,焊接热效率取 0.80。相关参数如表 1。

表 1 焊接热源参数
Table 1 Heat resources parameters of welding

焊材	电流/A	电压/V	焊速/ ($\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$)	CO_2 气流 量/($\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$)
E501T-1	280 ± 20	28 ± 2	23 ± 2	15~20

2.8 焊接过程温度场分析

2.8.1 焊接加热过程温度场分析 使用生热率沿

焊缝进行加热,加热过程共分为 120 个荷载步,每个荷载步又分为两个子步,收敛精度为 0.001。运用单元的生死功能沿焊缝按热源移动方向顺序加热各段中间焊缝单元的节点,在对下一步施加生热率时删除上一步所施加的生热率。该过程用循环来实现。

焊接加热过程温度场的变化如图 4 所示。

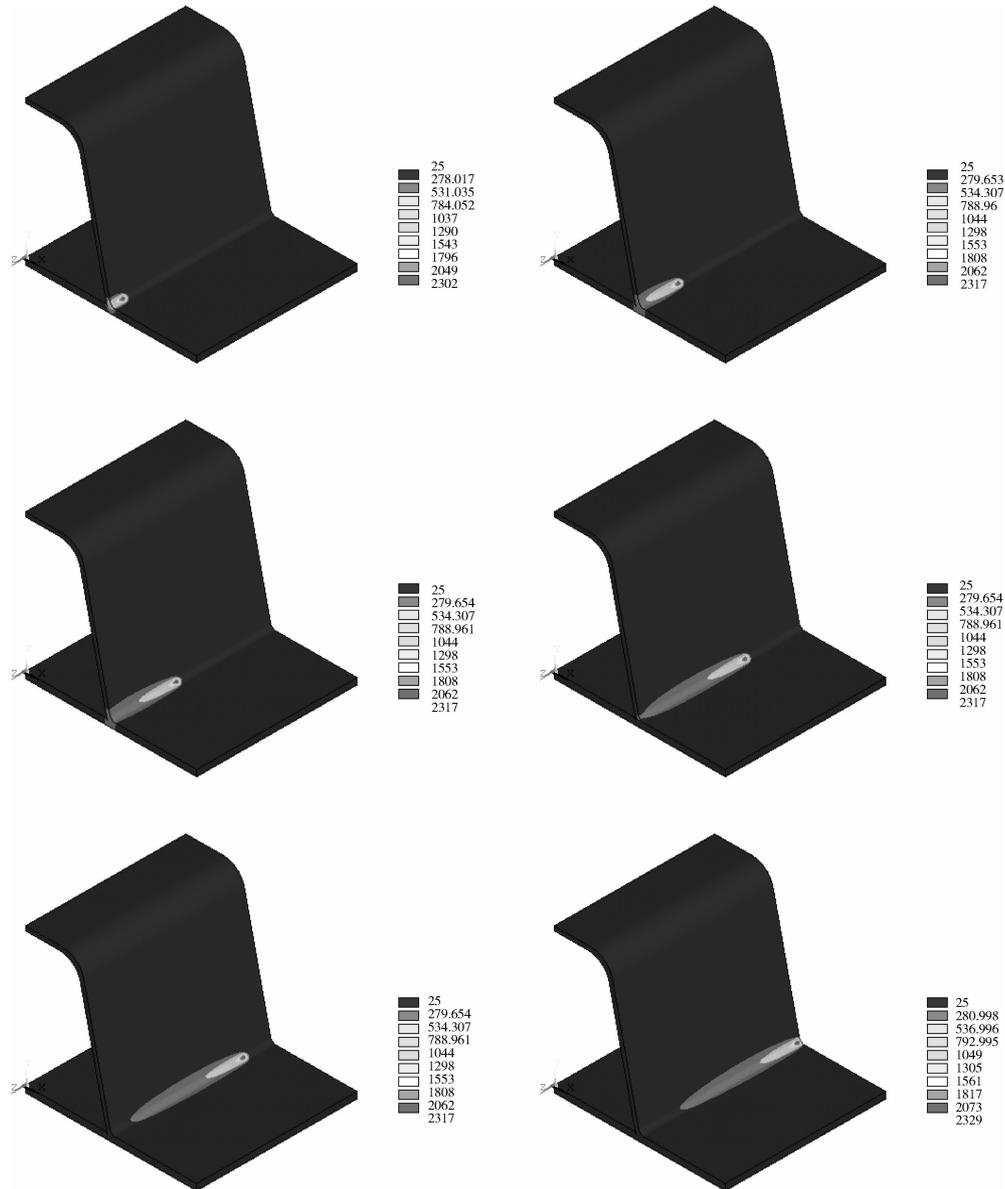


图 4 U 施焊加热过程温度场变化

Fig. 4 Temperature variation during welding heating process

由图 4 可看出,焊接过程在一开始时焊缝处温度变化较大,急剧升温,一段时间后稳定在一定温度,本文计算中焊缝稳定温度为 $2\ 317^{\circ}\text{C}$,并且温度带随着焊接热源的移动而移动,相对于热源位置,其温度分布并不改变。

2.8.2 焊接冷却过程温度场分析 焊缝冷却时的温度梯度较加热时小很多,因此在本文计算中对焊缝冷

却过程设定时间为 2 h,每个时间步为 60 s,每个步长再分为 10 个子步,其计算结果如图 5 所示,前 3 图分别为冷却开始 1、2、3 min 的温度场云图,后 3 图分别为冷却 1、1.5 和 2 h 时的温度分布云图。由图中可看出焊接结束后的几分钟之内构件温度急剧下降,以后温度变化越来越慢。冷却 2 h 后,最高温与最低温相差不超过 4°C ,此时可认为构件降温已完成。

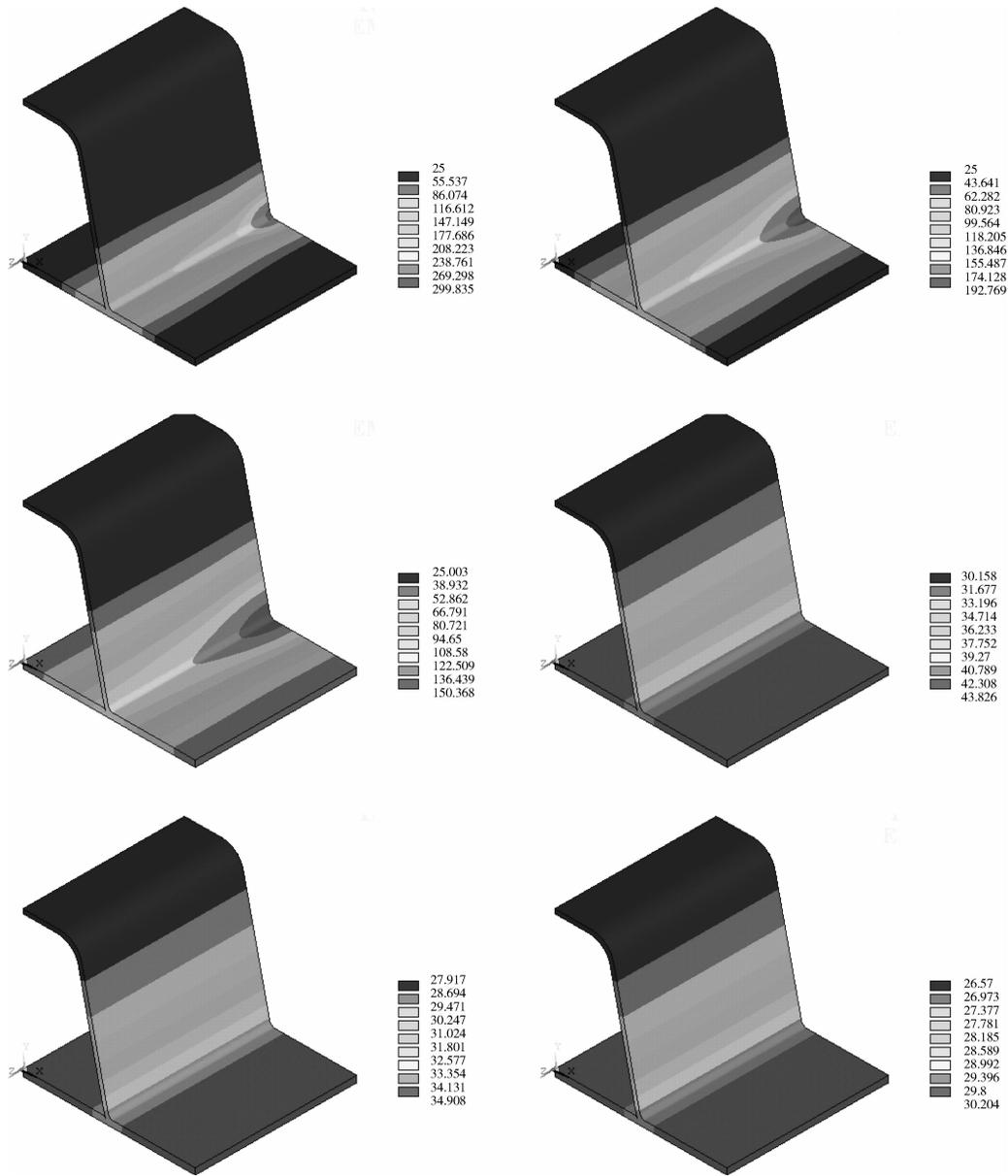


图 5 焊缝冷却过程温度场变化

Fig. 5 Temperature variation during welding cooling process

焊接从加热到冷却过程中,距离焊缝不同距离的金属其温度变化不同,如图 6 所示。

由图 4 和图 6 可看出,焊缝处温度一旦达到稳定后,其温度在构件横向几乎不再产生变化,只是沿着焊缝方向移动而已。并且随着距焊缝距离的增加,温度也急剧下降,温度梯度很大。

3 扁平钢箱梁 U 肋焊接残余应力有限元模拟分析

3.1 焊接热应力

在对构件进行温度场分析的基础之上,将计算所得温度作为体荷载加在构件上,使用 ETCHG 命令将热分析单元转换为相应的结构分析单元进行应

力场的分析。因焊接时焊缝及热影响区处于高温状态,导致了高度的材料非线性行为,导致计算量大、收敛困难等问题^[9-10]。为此,文中计算采用加大荷载步数等方法来加强其收敛。计算采用每个荷载步分为 40 个子步计算。根据文献[7]所述,当温度高于 1 000 °C 时,其对焊接残余应力的影响并不大,将温度高于 1 000 °C 的单元赋予其温度为 1 000 °C,以加强收敛,温度荷载如图 7 所示。计算开始时,由于焊缝处于高温状态,产生膨胀对周围区域造成压缩而使焊缝热影响区呈现较高的应力,如图 8 所示。由图 8 可看出,焊接所产生的热应力高应力区集中在热影响区,而焊缝处则表现为应力趋近于 0。依据上述简化原则,焊接结束时计算所得的热应力

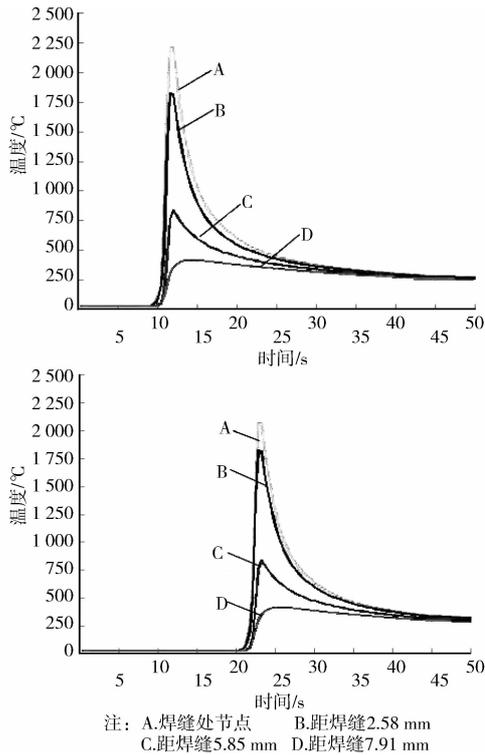


图 6 距焊缝不同距离节点温度变化(1/4、1/2 截面)

Fig. 6 Note temperature variation of different distances from welding seam (respectively, 1/4、1/2 cross-section as example)

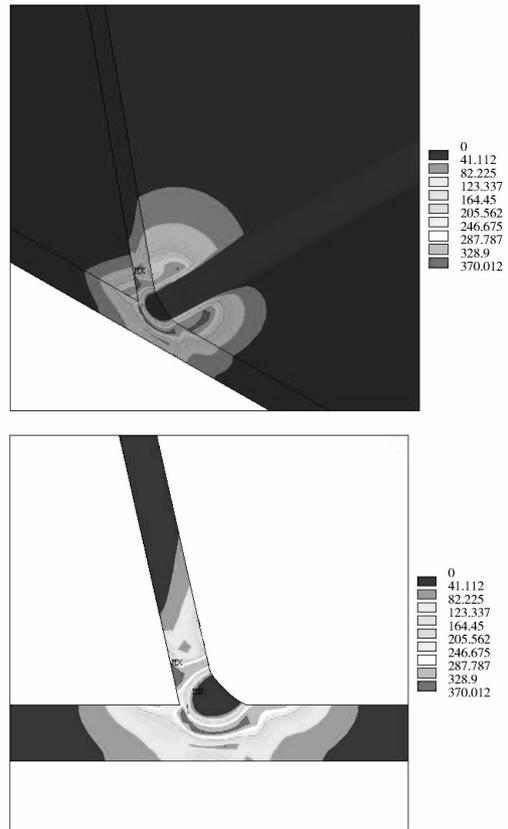


图 8 焊缝区热应力

Fig. 8 Heat stress of welding zone

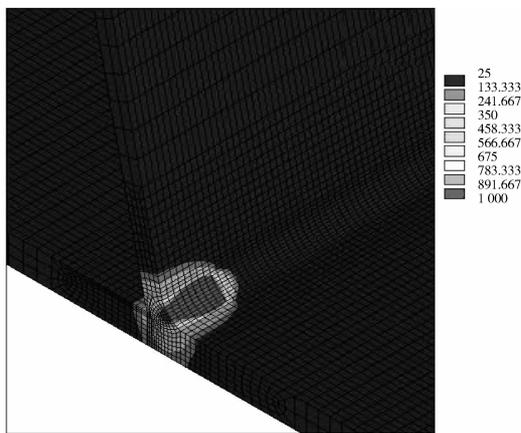


图 7 温度荷载

Fig. 7 Temperature loading

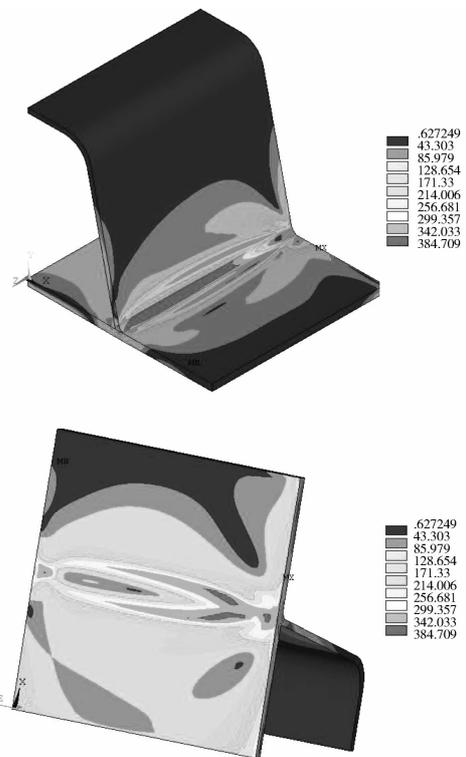


图 9 焊接结束(45 s)时 Mises 应力云图

Fig. 9 Mises stress cloud at the end of welding(45 s)

Mises 应力分布如图 9 所示。由图中可以看出,此时的最大应力达到了 384.709 MPa,已超出了钢材常温下的屈服极限。

规定沿焊缝长度方向为纵向,沿此方向的应力为纵向应力,以 σ_z 表示;沿桥面板宽度方向为横向,沿此方向的应力为横向应力,以 σ_x 表示。构件厚度方向上的应力变化很小,图 10 所示为焊接时沿焊接方向的纵向应力和横向应力,图中横坐标为距离(纵

向), 纵坐标为应力, 单位均为 MPa。由图 10, 在焊缝方向上, 熔池部分应力较小且趋于零, 熔池前端承受压应力, 而熔池尾部则承受拉应力, 随着热源的移动, 焊缝处各点的应力首先表示为压应力, 而后成为拉应力, 并且其最大应力均超过了钢材在该温度下的屈服极限, 因此必然会产生塑性应变, 为焊接残余应力的产生提供了必要的条件。

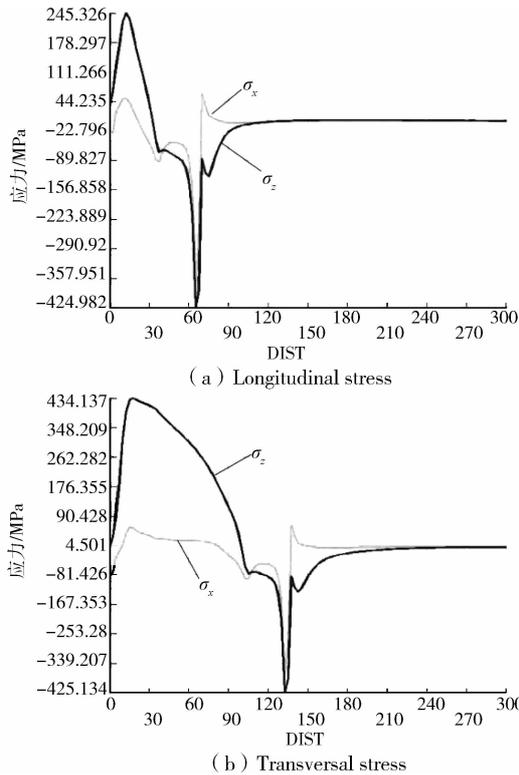


图 10 沿焊缝应力变化

Fig. 10 Stress variation along welding seam

3.2 焊接残余应力

从理论上分析, 焊接残余应力是由于焊接区以远高于周围区域的温度迅速加热, 使焊缝区的材料膨胀, 热膨胀受到周围较冷金属的约束, 因此产生了热应力, 然而受热区温度升高后屈服极限下降, 热应力便可超过该温度下钢材的屈服应力, 从而形成了塑性热压缩。当冷却时, 温度急剧下降, 造成焊接区比周围区域相对缩短、变窄、缩小, 因此, 该区域就呈现出拉应力, 而其周围区域则呈现压应力。图 11 为冷却 10 min 后的 Mises 残余应力分布云图, 由图中可看出, 该时刻在焊缝处存在着较大的残余应力, 其最大值 346.83 MPa。该时刻纵向残余应力分布云图如图 12 所示。由图中可看出, 虽然沿板厚方向残余应力值不相同, 但纵向残余应力均表现为中间拉应力, 两边压应力在焊缝区和近焊缝区残余应力最大, 并且距焊缝越近, 应力值越大。

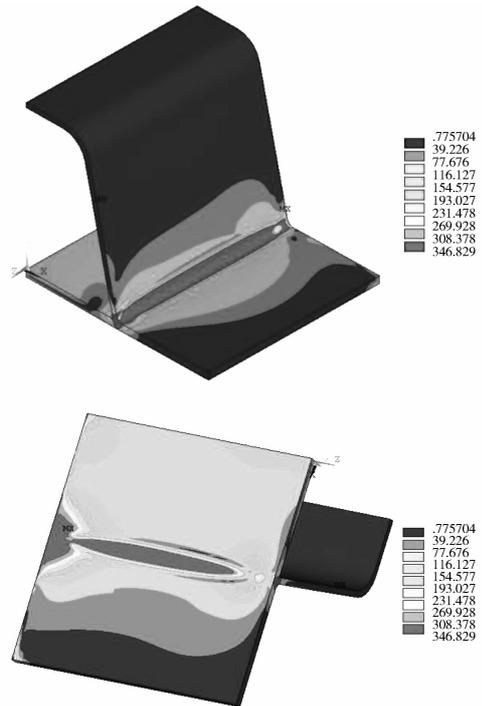


图 11 冷却 10 min 后 Mises 应力分布云图

Fig. 11 Mises stress cloud after 10 min cooling

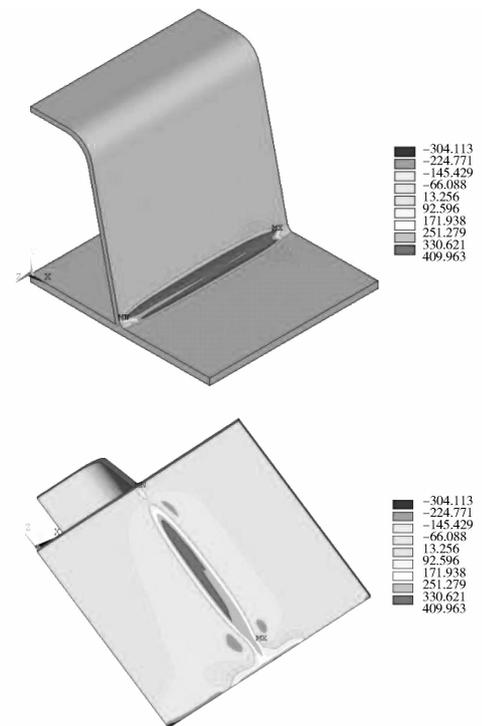


图 12 冷却后纵向残余应力分布云图

Fig. 12 Longitudinal stress cloud after cooling

冷却后横向残余应力分布云图如图 13 所示, 由图中也可明显看出冷却后在焊缝区存在着较大的残余拉应力, 其值一般都在 100 MPa 以上, 造成了该区域的应力集中, 也为该处的破坏埋下了隐患。

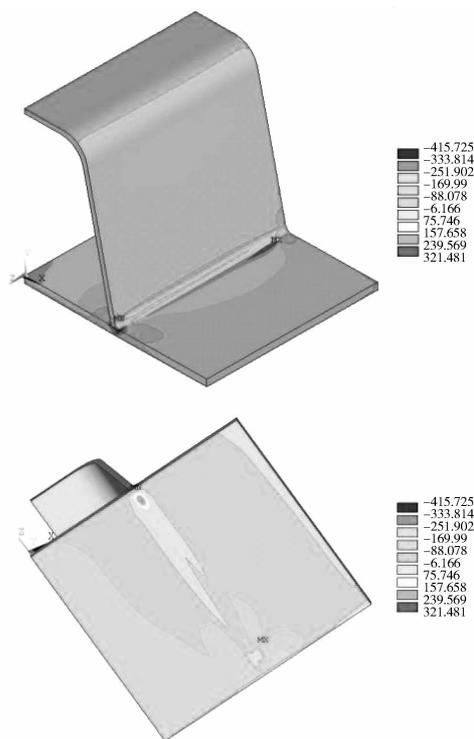


图 13 冷却后横向残余应力分布云图

Fig. 13 Transversal residual stress distribution after cooling

4 结论

1) 运用焊接温度场分析的基本理论,包括热分析中经典的传热方程和有限元基本方程,利用热-结构间接耦合方法,建立了具有位移边界条件、初始温度条件、散热条件的 U 肋加劲板焊接有限元模型,用 ANSYS 单元的生热模拟扁平钢箱梁 U 肋焊接过程焊缝金属的熔化和填充,可以得到焊接热应力和残余应力场。

2) 温度场的分析结果表明,在焊接过程中焊缝处形成了稳定的温度场,其变化过程也比较符合实际情况。随着热源的移动,焊缝处各点的应力首先表示为压应力,而后成为拉应力,并且其最大应力均超过了钢材在该温度下的屈服极限,必然产生塑性变形。

3) 焊接残余应力的计算结果表明:残余应力的低应力区集中在焊缝及其热影响区。

4) 对同一截面,无论在纵向和横向,其焊接残余应力沿板厚方向分布均有变化。

参考文献:

[1] 刘毅,李爱群,丁幼亮,等.润扬悬索桥扁平钢箱梁局部应力的测试与分析[J].东南大学学报,2007,37(2):275-279.
Liu Y, Li A Q, Ding Y L, et al. Computational and experimental studies on stress analysis of flat steel-box-girder of Runyang Suspension Bridge [J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2007, 37

(2):275-279.

- [2] 赵锐.焊接残余应力的数值模拟及控制消除研究[D].辽宁大连:大连理工大学,2006.
- [3] 上田幸雄,村川英一,麻宁绪(日).焊接变形和残余应力的数值计算方法与程序[M].成都:四川大学出版社,2008.
- [4] Mahin K W, Winters W, Holden T M. Prediction and measurement of residual elastic strain distributions in gas tungsten arc welds [J]. Welding Journal (USA), 1991, 70(9):245-260.
- [5] Masahito M, Makoto H, Toshio H. Numerical analysis of welding residual stress and its verification using neutron diffraction measurement [J]. Engineering Materials and Technology, 2000, 122:98-103.
- [6] Dong P, Brust F W. Welding residual stresses and effects on fracture in pressure vessel and piping components a millennium review and beyond [J]. Pressure Vessel Technology, 2000, 122:329-388.
- [7] 张陕锋.正交异性板扁平钢箱梁若干问题研究[D].南京:东南大学,2006.
- [8] 吕建民,陈怀宁,林泉洪.一种消除小直径管道焊接残余应力技术的数值分析[J].焊接学报,2003(4):83-86
Lyu J M, Chen H N, Lin Q H. Numerical analysis of a method for relieving welding stresses of girth-weld pipes with small diameters [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2003(4):83-86.
- [9] 周宏,罗宇,蒋志勇,等.基于 ANSYS 的船舶复杂结构焊接变形预测研究[J].中国船舶,2010,51(2):58-66.
Zhou H, Luo Y, Jiang Z Y, et al. Research of complicated ship structure welding distortion based on ANSYS [J]. Ship Building of China, 2010, 51(2):58-66.
- [10] 陈建波,罗宇,龙哲.大型复杂结构焊接变形热弹塑性有限元分析[J].焊接学报,2008,29(4):69-72.
Chen J B, Luo Y, Long Z. Analysis on welding distortion of large complicated structure by thermal elastic-plastic finite element method [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2008, 29(4):69-72.
- [11] Kim S H, Young R C. Effects of alloying elements on mechanical and fracture properties of base metals and simulated heat affected zones of SA508 steels [J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2001, 3(4):903-911.
- [12] Dong P, Hong J K. The master s-n curve approach to fatigue of piping and vessel welds [J]. Welding in the World, 2008, 48:28-36.
- [13] Lee C H, Chang K H. Finite element computation of fatigue growth rates for model I cracks subjected to welding residual stresses [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2011, 78:2505-2520.
- [14] 张国智,胡仁喜,陈继刚,等. ANSYS10.0 热力学有限元分析实例知道教程[M].北京:机械工业出版社,2007.