

文章编号: 1000-4750(2012)08-0033-06

一种新型固有应变法的焊接变形仿真

赵利华, 张开林

(西南交通大学牵引动力国家重点实验室, 四川, 成都 610031)

摘 要: 以 T 形焊接接头为算例, 结合热弹塑性有限元法和映射应变分量法研究角焊缝角变形的产生机制, 认为固有剪切应变才是产生角变形的主要根源, 而不是传统思维认为的横向固有正应变。随后, 以此观点为基础, 对比分析了两种不同的加载方位对横向约束度、横向固有应变及残余角变形的影响。沿焊缝表面斜向加载更接近于实际测量值和热弹塑性模拟值, 表明了此种加载方位的合理性, 为更合理的利用固有应变法预测焊接残余变形提供了有益的参考。

关键词: 焊接残余变形; 固有应变; 约束度; 数值仿真; 角焊缝

中图分类号: TG404 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2010.11.0861

NUMERICAL SIMULATION OF THE WELDING DEFORMATION BASED ON A NEW INHERENT STRAIN METHOD

ZHAO Li-hua, ZHANG Kai-lin

(Traction Power State Key Laboratory, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract: Take a welded T-joint as example, the formation mechanism of angle distortion of fillet weld was studied by combining thermal elastic plastic analysis with mapping strain component method. The results show that the main source of angle distortion of fillet weld is the inherent shear strain instead of the transverse inherent normal strain. Then, based on the view, two different loading directions that influence transverse restraint degree, transverse inherent strain and residual angle distortion were analyzed. The result made by the diagonal load along the weld surface is closer to the measured values and the thermal-elastic-plastic simulated values, which indicate the rationality of the diagonal loading along weld surface. This paper provides beneficial reference for more rational utilization inherent strain predicting weld residual deformation.

Key words: welding residual deformation; inherent strain; restraint degree; numerical simulation; fillet weld

构架是转向架的重要承载部件, 在构架生产过程中面临的主要问题是控制焊接变形。只有准确地预测焊接变形, 才能有针对性地采取相应措施控制焊接变形, 实现精度制造。随着计算机技术的不断发展, 使得用数值方法预测焊接变形成为可能。目前, 数值模拟方法主要分两大类: 热弹塑性有限元法和固有应变法。热弹塑性有限元法从原理上可以解决复杂焊接结构的变形问题, 但计算量巨大, 效率低, 因而对于大型复杂的焊接结构即使可能也是很经济的。固有应变有限元法避开整个焊

接过程, 着眼于焊接以后在焊缝和近缝区存在的固有应变, 如果能找到固有应变大小和分布与焊接参数以及焊件尺寸等的关系, 那么将固有应变作为初始应变值进行一次弹性有限元计算, 就可以得到整个焊件的残余应力和变形, 是一种既能解决大型复杂结构, 又能比较经济的预测焊接变形的的方法。但固有应变有限元法毕竟是具有有一定理论基础的近似方法, 涉及到一系列的简化、假设^[1-2]。如果计算过程中, 简化、假设不合理, 则直接影响到固有应变值计算的准确性, 进而影响到焊接残余变形的

收稿日期: 2010-11-30; 修改日期: 2011-03-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(51075339)

通讯作者: 赵利华(1977-), 男, 河北藁城人, 博士生, 主要从事焊接残余应力与变形的研究(E-mail: zhaolihua1323@163.com).

作者简介: 张开林(1967-), 男, 江苏镇江人, 教授, 博士, 主要从事机车车辆结构设计与疲劳强度方向的研究(E-mail: zkailin@126.com).

分析结果,例如:传统思维认为横向固有正应变是角焊缝产生角变形的主要根源,因此在计算 T 形接头双面角焊缝的残余角变形时,在焊趾间加载了平行于底板且相向的固有应变,但基于一系列的数值试验可知^[3],固有剪切应变分量才是 T 形接头产生角变形的主要因素。因此,本文以 T 形接头双面角焊缝为例,研究不同的加载方位对横向固有应变和残余角变形的影响。

1 固有应变的计算模型

固有应变可以看成是内应力的产生源。若将物体处于既无外力也无内力的状态看作为基准状态,固有应变 ϵ^* 就是表征从应力状态脱离后处于自由状态时,与基准状态相比所发生的应变,它等于总的变形应变减去弹性应变^[4]。在焊接过程中,固有应变就是塑性应变、热应变和相变应变之和。焊接构件经过一次焊接热循环后,热应变为零,此时固有应变是塑性应变与相变应变残余量之和。焊接低碳钢构件时,由于相变应变对焊接应力和变形影响很小,所以可以忽略,则固有应变就是残余的塑性应变。

采用一维杆-弹簧模型(如图 1)进行热-弹塑性分析,得出固有应变的基本计算公式^[5-6]。

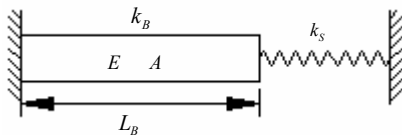


图 1 一维杆-弹簧模型

Fig.1 One dimensional bar-spring model

随着温度变化的不同,杆件所经历的应变变化过程不同,各种情况下塑性应力应变随温度的变化如图 2 所示。两个参考温度分别设为温度上升时产生压缩屈服的温度 T_1 和温度下降时产生拉伸屈服的温度 $2T_1$,固有应变的计算分成如下 3 个部分:

$$\epsilon^* = \begin{cases} 0, & T_{\max} \leq T_1, \quad \text{OAO 阶段, 弹性} \\ \frac{\epsilon_Y}{\beta} - \alpha T_{\max}, & T_1 < T_{\max} \leq 2T_1, \\ & \text{OBCD 阶段, 压塑性} \\ -\frac{\epsilon_Y}{\beta}, & 2T_1 < T_{\max}, \quad \text{OBGHF 阶段, 拉压塑性} \end{cases} \quad (1)$$

式中: α 为材料的热膨胀系数; ϵ_Y 为材料的屈服应变; T_{\max} 为焊接时杆的最高温度; β 为约束度。

由式(1)可知,固有应变由杆的最高温度和约束度决定。实际焊接中由于最高温度和约束度在材料

内部的各位置具有不同的值。故为了求出固有应变分布,先要确定最高温度和约束度的分布。焊接时,焊件的温度分布是不均匀的,内部各点的最高温度也会存在差异,各点在焊接过程中所达到的最高温度值是决定该点固有应变的重要因素,本文采用有限元分析来求解 3 维瞬态温度场,得到了整个焊接过程中各点的最高温度分布情况。至此可见,能否准确计算约束度 β 至关重要,它直接影响到固有应变值的计算,进而波及到焊接残余变形的分析结果。

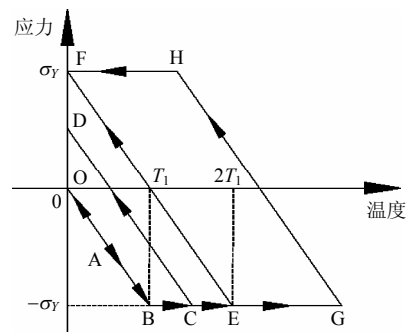


图 2 塑性应力随温度的变化过程

Fig.2 Change process of plastic stress with temperature

2 约束度的计算

如图 1 所示, k_B 、 k_S 分别表示固有应变区的刚度和抵抗变形的临近区域的刚度,则约束强度 β 为:

$$\beta = \frac{k_S}{k_S + k_B} \quad (2)$$

Jang C D 认为约束可分为内部约束和外部约束^[7]。内部约束是由于焊接构件内部的温度分布不均匀产生的;外部约束是由于邻近构件的支持条件、自重等产生的约束。

对于大型结构,由随时间变化的温度分布得出内部约束的准确值是很困难的。因此,为了反映内部约束的影响,根据圣维南原理,假定了两种常用的基本焊接构件,对接焊和角接焊(如图 3),利用大量的实验结果求出这两种基本焊接构件的约束度(仅与焊接热输入量和板材厚度有关),并把它作为实际焊接构件(如图 4)的内部约束度。然后分别对基本焊接构件和实际焊接构件进行弹性变形分析,估算出焊接点和邻近区域的刚度值,最后综合两项结果计算出实际焊接构件的约束度分布^[8-9]。

据此可见,准确、合理的计算焊接点和邻近区域的刚性是准确计算约束度 β 的前提必要条件,由此推及,焊接点和邻近区域的刚性计算将直接影响

到焊接残余变形的分析结果。

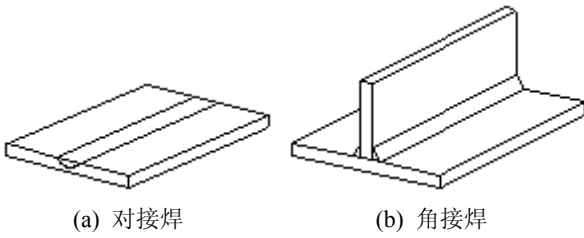


图3 基本焊接构件

Fig.3 Basic welded component

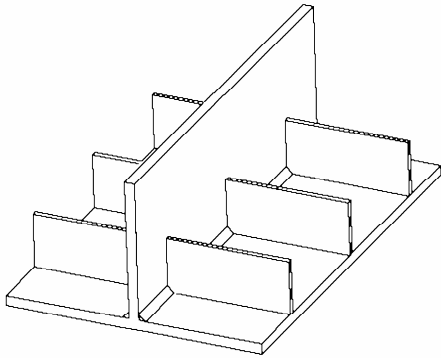


图4 实际焊接构件

Fig.4 Practical welded component

3 利用单位载荷法计算结构的刚性

在利用单位载荷法确定焊接点和邻近区域的刚性时，单位载荷的方向与作用点的位置分布于焊缝的表面^[10]。把单位载荷加于焊缝的表面是因为焊缝表面的温度最高，而且固有应变的大小及分布区域宽度也最大，因此把焊缝的刚性与约束度的值取为断面的代表值。

单位载荷的施加方向关系到刚性、约束度及固有应变计算的准确性。对于对接焊，单位载荷的施加方向无可争议，但对于角接焊有两种加载方向，如图5所示，哪一种加载方向更合理，需要认真研究分析。在本文中，图5(a)的加载方式称之为平行于底板加载，图5(b)的加载方式称之为沿焊缝表面斜向加载。

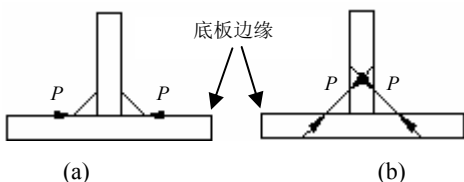


图5 角接焊单位载荷施加方向

Fig.5 Loading direction of unit load about fillet weld

4 角接焊角变形产生的机理

为了分析哪种加载方向更趋于合理，本文对角

焊缝角变形的产生机理进行了研究。焊接属于三维现象，根据固有应变的方向性，焊接区域内一点的固有应变状态由正应变 ϵ_x^* 、 ϵ_y^* 、 ϵ_z^* 和剪应变 γ_{xy}^* 、 γ_{yz}^* 、 γ_{xz}^* 六个分量决定。焊接结构不同，起主要作用的固有应变分量也不同，需要具体问题具体分析。

本文首先采用热弹塑性有限元法和映射应变分量法研究角焊缝角变形的产生机制，即固有应变分量与角焊缝角变形之间的关系^[11]，结果如图6所示。T形焊接接头的角变形可以用底板边缘的垂向位移 U^y 来表征，底板边缘节点平均垂向位移柱形图可以清晰地反映角变形与各个固有应变分量之间的关系。

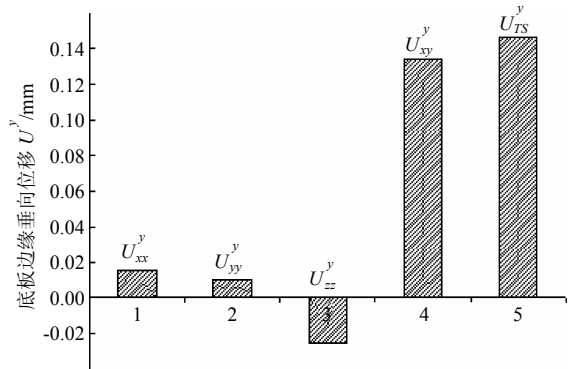


图6 平面应力状态时底板边缘垂向位移柱状图

Fig.6 Histogram about vertical displacement of bottom edge at plane stress state

图6中， U_{ij}^y 是映射固有应变分量 ϵ_{ij}^* 得到的面板端部垂向位移， U_{TS}^y 是热弹塑性分析得到的面板端部垂向位移，即标准变形。六次弹性分析结果表明，固有正应变分量 ϵ_{xx}^* 虽然能使直角变小，但角变形量不足标准变形量的15%。另外两个方向的固有正应变分量 ϵ_{yy}^* 、 ϵ_{zz}^* 导致的变形量相对于标准变形量也都很小。产生角变形效果最显著的是剪切固有应变分量 ϵ_{xy}^* ，它导致的角变形最接近标准角变形。

基于一系列T形焊接接头的热弹塑性分析结果，角焊缝横截面固有应变分量 ϵ_{xy}^* 等值线近似为一簇以直角平分线为对称轴的同轴抛物线，抛物线开口方向背离焊件，如图7所示。

在钢板试样上堆敷锡焊道进行实验，实验结果表明：母材的温升低于压缩塑性应变产生所需温差时，也测得了高值残余应力，从而证明焊缝收缩对焊接残余应力产生过程有重要的作用^[12]。通常在止焊处有弧坑出现，而弧坑中出现裂纹的可能性较

大，故焊缝的受约束体积收缩可能与焊接残余应力的产生有较为密切的关系。

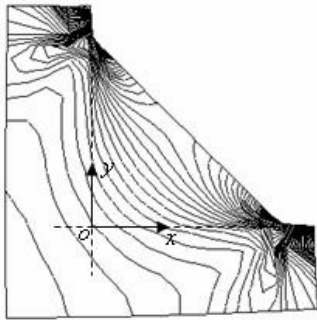


图 7 平面应力状态时固有应变分量 ε_{xy}^* 等值线分布
Fig.7 Contour distribution of inherent strain component ε_{xy}^* at plane stress state

由以上分析和实验可以得出，角接焊中固有剪切应力是产生角变形的主要因素，因此图 5(b)中的单位载荷施加方向比较合理，并且也适用于 T 型接头单面焊固有应变分析。

5 应用实例

5.1 实际焊接构件的约束度

机车构架中常用 16mm 厚的板材，材质为 16MnR，侧梁多为含有隔板的箱型梁。因此选取基本焊接构件如图 8 所示，通过单位载荷法求出焊缝及邻近区域的刚性，模型尺寸为：底板 400mm×600mm×16mm，立板 200mm×600mm×16mm。焊接参数为：焊接电流 $I = 300A$ ，焊接电压 $U = 30V$ ，焊接速度 $v = 3.2mm/s$ ，焊角尺寸 $h_f = 10mm$ 。

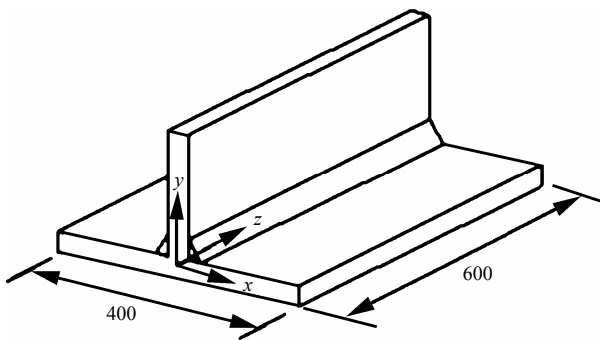


图 8 实验验证时所选基本焊接构件
Fig.8 Basic welded component at experimental verification

沿焊缝施加载荷如图 5(a)、图 5(b)所示，载荷值为 $P = 1000kN/m$ ，在底板边缘处，垂向位移 U^y 如图 9 所示，在焊缝的起端和终端有两端效应，离开两端的垂向位移趋于减小，在中部趋于稳定。

根据式(2)，并由文献[8]的图表及相关公式即可求得基本焊接构件邻近区域及焊缝处的刚性。

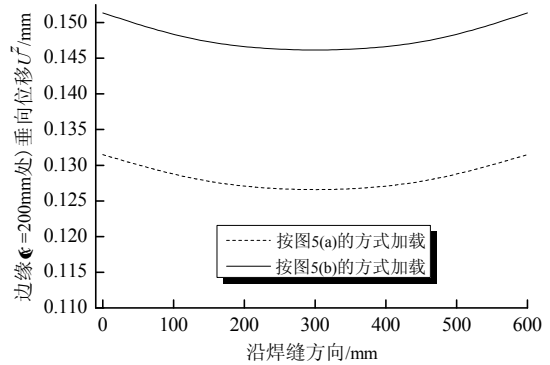


图 9 基本焊接构件的底板边缘处沿焊缝方向的垂向位移
Fig.9 Vertical displacement of basic welded component bottom edge along weld

实际焊接构件如图 10 所示，隔板结构是在已焊接了三个横隔板的情况下焊上立板而得到的，隔板尺寸为 400mm×100mm×8mm，隔板的位置为 $z = 100mm、300mm、500mm$ 。底板、立板尺寸及焊接参数与基本焊接构件中的相同。

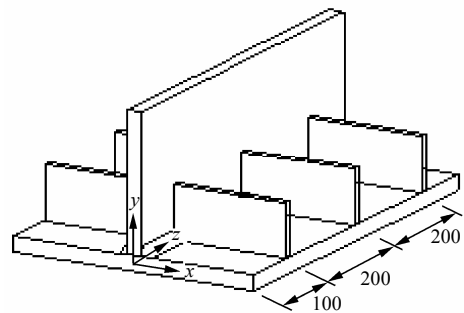


图 10 实验验证时的实际焊接构件
Fig.10 Practical welded component at experimental verification

沿焊缝方向施加单位载荷后，得到焊缝不同位置处的横向刚性之和。根据公式^[8]可得约束状态下隔板结构的约束度，如图 11 所示。沿焊缝方向观察约束度，可以发现在约束状态下，约束度沿焊缝方向变化，略去其两端效应的影响，其值在 0.32~0.55 的范围内波动，在隔板的位置具有最大值，而在两端具有最小值。

5.2 实际焊接构件的焊接残余变形

首先，对图 10 所示的隔板结构模型划分网格，依据焊接参数对有限元模型施加双椭球生热率载荷，并利用“生死”单元法模拟焊缝的填充，在隔板、立板及底板的上表面施加随壁面温度变化的对流散热系数，材料属性随温度变化，打开时间积分效应并进行一些必要的求解设置，进行瞬态温度场分析。得到随焊接过程变化的温度场。

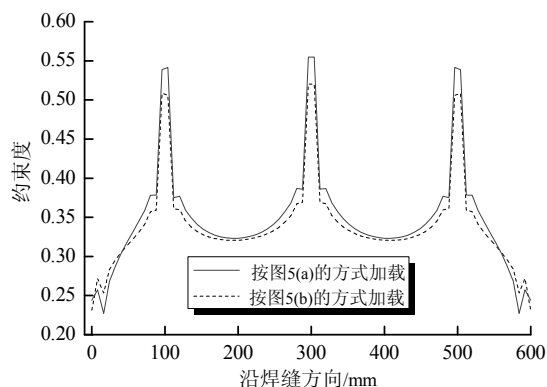


图 11 实际焊接构件沿焊缝方向横向约束度

Fig.11 Transverse restraint degree of practical welded component along weld

然后,利用已知的温度场,运用两种方法求解焊接残余变形:其一,热弹塑性耦合分析,约束立板顶面,按时间点逐步读入温度场分析结果,打开大应变效应并进行一些必要的求解设置,进行结构非线性分析,得到的隔板结构的焊接残余变形;其二,利用固有应变法,提取固有应变区各节点在焊接过程中的最高温度值,依据公式^[8]及图 11 所示的约束度计算出固有应变量,并转换成等效载荷^[13]施加于焊缝焊趾处,约束立板顶面,进行一次弹性分析(对于纵向约束度的确定、纵向等效载荷的计算、加载参见参考文献^[13])。

最后,进行实验,测得底板边缘($x=200\text{mm}$ 处)垂向(y 向)位移,并与数值分析结果进行对比,如图 12 所示。

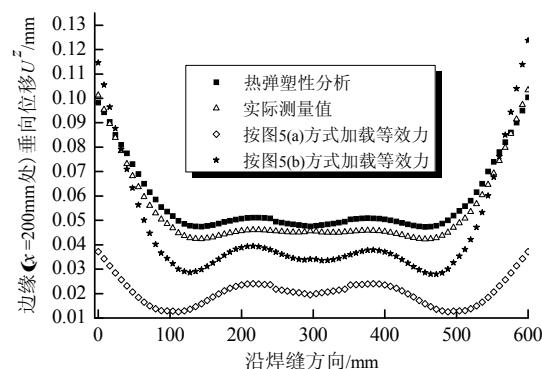


图 12 实际焊接构件的底板边缘处沿焊缝方向的垂向位移

Fig.12 Vertical displacement of practical welded component bottom edge along weld

由图 12 可知,热弹塑性分析十分接近实验实测值,在中部,平均误差在 5%之内;按图 5(b)的方式进行加载、计算,得到相应的刚度值、约束度、固有应变及等效载荷,由等效载荷最终求得残余变形,在中部,平均误差在 10%之内;而按图 5(a)的方式,在中部,平均误差在 20%之内。可见按图 5(b)

的方式进行加载求解是比较合理的。

6 结论

(1) 沿焊缝表面斜向加载比较合理,更接近于实际测量值和热弹塑性模拟值,表明了此种加载方位的合理性,为更合理的利用固有应变法预测焊接残余变形提供了保障。

(2) 采用固有应变法通过一次弹性有限元分析可以对复杂结构的焊接变形进行预测,但有一定的误差,然而该算法所产生的误差是在合理的范围内,对焊接本质继续进行深入研究,修正已有的思路与公式,减少误差将是后续研究的课题。

参考文献:

- [1] Ueda Y, Kim Y C, Yuan M G. A prediction method of welding residual stress using source of residual stress (Report I) — Characterstice of inherent strain (source of residual stress) [J]. Transactions of JWRI (Japanese Welding Research Institute), 1989, 18(1): 135—141.
- [2] 周宏, 罗宇, 蒋志勇, 等. 大型船舶结构焊接变形固有应变法预测研究[J]. 江苏科技大学学报(自然科学版), 2010, 24(2): 134—138.
Zhou Hong, Luo Yu, Jiang Zhiyong, et al. Prediction of welding deformation of large complicated structure based on inherent strain methods [J]. Journal of Jiangsu University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2010, 24(2): 134—138. (in Chinese)
- [3] Xu Lin, Yan Renjun. Inherent shear strain method for forecasting fillet weld's angular distortion [J]. Journal of Ship Mechanics, 2007, 11(6): 895—902.
- [4] 汪建华, 陆皓, 魏良武. 固有应变有限元法预测焊接变形理论及其应用[J]. 焊接学报, 2002, 23(6): 36—40.
Wang Jianhua, Lu Hao, Wei Liangwu. Prediction of welding distortions based on theory of inherent strain by fem and its application [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2002, 23(6): 36—40. (in Chinese)
- [5] 罗宇, 鲁华益, 朱枳锋. 固有应变的概念及其在船舶建造中的应用[J]. 造船技术, 2005, 264(2): 35—39.
Luo Yu, Lu Huayi, Zhu Zhifeng. The concept of inherent strain and its application to shipbuilding [J]. Shipbuilding Technology, 2005, 264(2): 35—39. (in Chinese)
- [6] Sutoh K, Terasaki T. Effect of welding conditions on welding deformations in welded structural materials [J]. Journal of the Japan Welding Society, 1976, 45(4): 302—314.
- [7] Jang C D, Lee C H, Ko D E. Prediction of welding deformations of stiffened panels [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 1998, 216(12): 361—374.
- [8] 李鸿. 基于固有应变的船体分段焊接变形预测[D]. 哈

- 尔滨: 哈尔滨工程大学, 2006.
- Li Hong. Prediction of welding deformations of ship structures based on inherent strain [J]. Harbin: Harbin Engineering University, 2006. (in Chinese)
- [9] Seung II Seo, Chang Doo Jang. A study on the prediction of deformation of welded ship structures [J]. Journal of Ship Production, 1999, 15(2): 73—81.
- [10] Lee C H. Prediction of welding deformation of ship hull panel blocks using equivalent loading method based on inherent strain [D]. Seoul: Seoul National University, 2002.
- [11] 徐琳, 严仁军, 龚静. 角焊缝角变形的产生机制与固有剪切应变分量的双抛物面分布模型[J]. 华中科技大学学报, 2007, 24(4): 88—91.
- Xu Lin, Yan Renjun, Gong Jing. Forming mechanism of fillet weld's angular distortion and double paraboloid distribution model of inherent shear strain component [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 2007, 24(4): 88—91. (in Chinese)
- [12] 游敏, 郑小玲, 余海洲. 关于焊接残余应力形成机制的探讨[J]. 焊接学报, 2003, 24(2): 51—54.
- You Min, Zheng Xiaoling, Yu Haizhou. Discussion and investigation on mechanism of welding residual stresses in mild steel [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2003, 24(2): 51—54. (in Chinese)
- [13] 李鸿, 任慧龙. 船体分段焊接变形仿真[J]. 船舶工程, 2006, 28(5): 19—22.
- Li Hong, Ren Huilong. Simulation of welding deformations of ship sections [J]. Ship Engineering, 2006, 28(5): 19—22. (in Chinese)

(上接第 27 页)

- [8] 叶志明, 陈彤, 姚文娟. 不同模量弹性问题理论及有限元法研究进展[J]. 力学与实践, 2004, 26(2): 9—14.
- Ye Zhiming, Chen Tong, Yao Wenjuan. Progress in elasticity theory with different moduli in tension and compression and related FEM [J]. Mechanics and Practice, 2004, 26(2): 9—14. (in Chinese)
- [9] He Xiaoting, Zheng Zhoulian, Sun Junyi. Convergence analysis of a finite element method based on different moduli in tension and compression [J]. International Journal of Solids and Structures, 2009, 46: 3734—3740.
- [10] Ding Hongli, Yang Bingen. New numerical method for tow-dimensional partially wrinkled membranes [J]. AIAA Journal, 2003, 41(1): 125—132.
- [11] Ding Hongli, Yang Bingen. The modeling and numerical analysis of wrinkled membranes [J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2003, 58: 1785—1801.
- [12] 钟万勰, 张洪武, 吴承伟. 参变量变分原理及其在工程中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 1997: 51—70.
- Zhong Wanxie, Zhang Hongwu, Wu Chengwei. Parametric variational principle and applications in engineering [M]. Beijing: Science Press, 1997: 51—70. (in Chinese)
- [13] 张洪武. 参变量变分原理与材料和结构力学分析[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 1—22.
- Zhang Hongwu. Parametric variational principle and analysis of material and structural mechanics [M]. Beijing: Science Press, 2009: 1—22. (in Chinese)
- [14] 王勖成. 有限单元法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003: 56—76.
- Wang Xucheng. Finite element method [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003: 56—76. (in Chinese)