

# 基于 FEA 的插管结构焊接变形规律分析

刘 露<sup>1,2</sup>, 王 莘<sup>1</sup>, 刘 永<sup>1</sup>, 方洪渊<sup>1</sup>

(1. 哈尔滨工业大学 先进焊接与连接国家重点实验室, 哈尔滨 150001; 2. 江苏科技大学 材料学院, 镇江 212003)

**摘要:**为了明确插管结构的焊接变形规律,利用有限元分析软件 MSC. Marc,考虑材料非线性和几何非线性,建立了热弹塑性有限元模型,应用生死单元法分别模拟了两个插管与壳板的焊接过程。结果表明,插管发生鼓胀变形,并伴有轴线的偏移,焊缝附近的壳板发生翘曲变形,壳板其余位置刚度较小处发生较大的下塌变形。在插管结构的有限元模拟之前,通过平板对接试验与相应模型的有限元模拟对比,从特征节点的热过程、特征节点的焊接残余应力和焊后角变形三个方面论证了有限元模型及相关输入参数的合理性。

**关键词:**插管结构; 焊接变形; 热弹塑性有限元法

中图分类号: TG 404 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2016)10-0113-04

## 0 序 言

插管结构广泛应用于工业锅炉、石油管道和轮船等大型结构中。插管与基体的连接大多采用焊接方法,具有管壁厚和焊缝填充量大的特点,因而在插管结构的焊接生产中,常常会出现较大的变形。焊接变形影响结构件的尺寸精度,甚至降低结构的承载能力和安全性能<sup>[1]</sup>。因而在实际生产中如何有效预测和控制变形成为一个非常重要的课题。影响焊接变形的因素众多,而在实际生产中预测焊接变形的规律是非常困难的<sup>[2]</sup>。

有限单元法和计算机技术的发展为焊接变形的预测提供了有效的工具。近30年来,随着有限元理论的不断完善,众多的焊接工作者在焊接有限元模拟方面做了很多工作。目前,用于计算焊接变形的有限元法主要有热弹塑性有限元法<sup>[2-4]</sup>和固有应变法<sup>[5,6]</sup>两大类。研究使用有限元软件 MSC. Marc,采用热弹塑性有限元法,建立有限元模型模拟实际焊接过程,分析插管结构焊接变形行为,总结变形规律,为此类结构件的焊接生产提供指导。

## 1 插管结构与材料参数

研究中,插管结构由壳板和三根插管构成,插管竖直贯穿壳板,壳板开K型坡口,坡口角度为60°,坡口在壳板厚度上的比例为3:2(图1),壳板材料为980钢,插管材料为QD685(下文简称685钢),填充材料为A557焊条。三者的密度取为7.8 g/cm<sup>3</sup>,泊

松比取为0.3,其余材料性能曲线见图2。

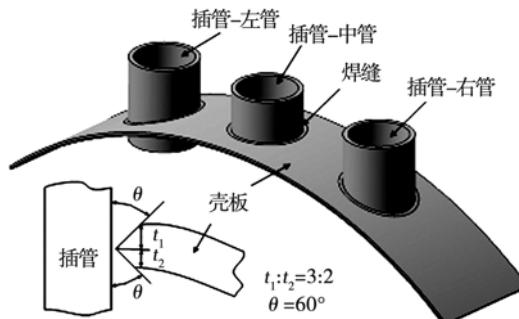
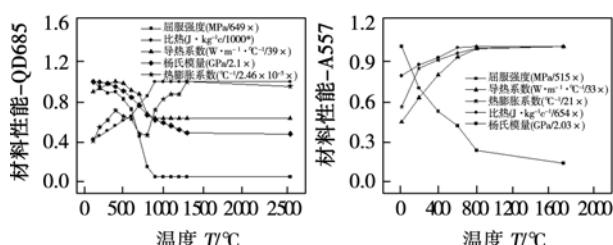
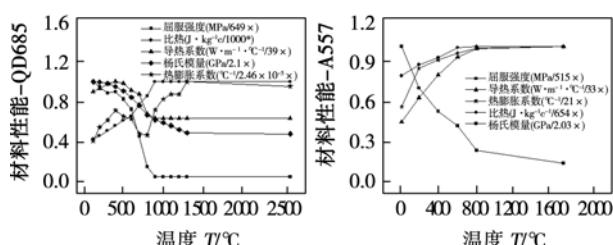


图1 整体结构和坡口形式

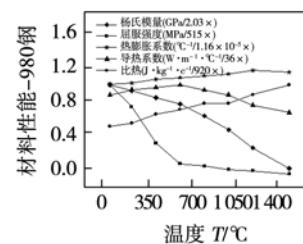
Fig. 1 Schematic diagram of structure and groove type



(a) 685钢材料性能



(b) A557材料性能



(c) 980钢材料性能

图2 随温度变化的材料性能曲线

Fig. 2 Nonlinear properties of materials vs temperature

## 2 有限元模型的验证

选用与插管结构同材料同厚度的平板对接试验,通过对比试验和模拟的打底焊道特征节点的热过程、焊后工件表面近缝区残余应力和焊后角变形三个指标,来验证有限元模型及相关参数的合理性。

### 2.1 验证模型

图3a为验证模型的尺寸,980钢一侧开K型坡口,上下坡口厚度比例为1:1,坡口角度为60°。焊接试验为多层多道焊,焊前预热100℃,打底焊和下坡口仰焊位置采用氩弧焊,上坡口平焊位置采用手工电弧焊,仰焊与平焊同时进行,焊接方向见图3a,焊接工艺参数见表1。根据焊接试板的尺寸和焊缝形貌,在MSC.Marc中建立热弹塑性有限元模型,剖分的焊缝局部网格如图3b,单元类型为八节点六面体单元,单元号为7,采用双椭球热源和单元生死法来模拟焊缝过程。

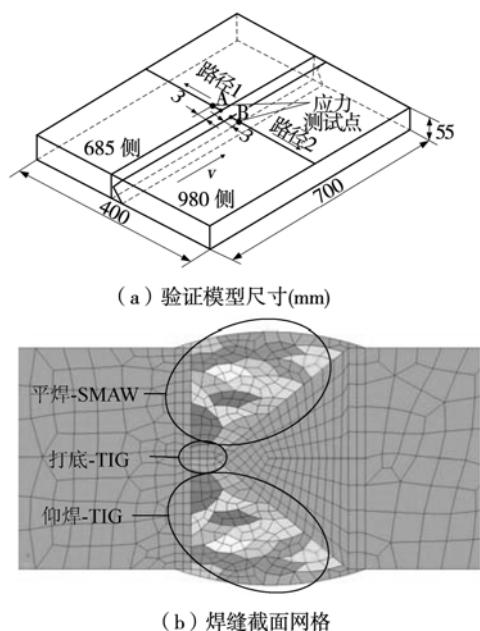


图3 验证模型尺寸和焊缝网格

Fig. 3 Model size and local mesh

表1 焊接工艺参数

Table 1 Welding process parameters

焊接位置	焊接方法	焊丝直径 $\phi/\text{mm}$	焊接电流 $I/\text{A}$	电弧电压 $U/\text{V}$	焊接速度 $v/(\text{cm}\cdot\text{min}^{-1})$
打底焊	TIG	3.2	240~280	12~16	3~8
仰焊	TIG	4.0	240~280	12~16	5~10
平焊	SMAW	4.0	100~140	24~26	-

### 2.2 验证结果

焊接试验和对应的有限元模拟完成后,首先进行温度场的验证,即取图4a所示打底焊接时的特征节点,用热电偶测温计采集热循环曲线,与有限元模拟对应节点的热循环曲线相比较,对比可知,试验与模拟对应特征节点的热循环曲线吻合良好(图4b)。其中,距离焊道5 mm的节点实测峰值温度约为630℃,模拟峰值温度约为650℃,距离焊道10 mm的节点实测峰值温度约为450℃,模拟峰值温度约为420℃,可以认为有限元模拟中的相应节点经历了与实际焊接相似的热过程。

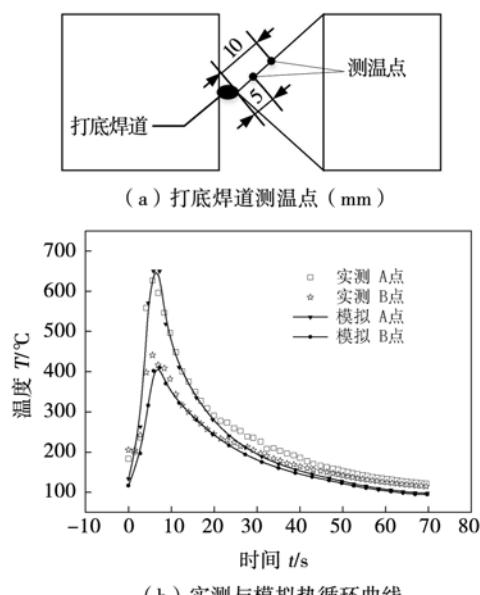


图4 试验和模拟热循环曲线对比

Fig. 4 Comparison of thermal cycles between testing and simulation

应用盲孔法测试试板中部焊缝两侧A点和B点(图3a)的焊接残余应力,并沿路径1和路径2所示路径(图3a)提取有限元模型中的横纵向残余应力。试验测得685侧A点的横向残余应力为258 MPa,纵向残余应力为282 MPa,对应的模拟值为253 MPa和290 MPa;试验测得980侧B点的横向残余应力为350 MPa,纵向残余应力为592 MPa,对应的模拟值为311 MPa和532 MPa。对比二者(图5)可以发现,焊后残余应力的试验值与模拟值较为一致。

焊后试板发生向下的倒V字角变形,实测值为8.3°,有限元模拟值为10°,可以认为该模型的有限元模拟结果能够在一定程度上反映试件的变形。

综上,通过特定位置的热循环、焊接残余应力和焊后角变形三个指标的比对,证明有限元模型及相关输入参数是合理的,可以用于插管结构变形规律的研究。

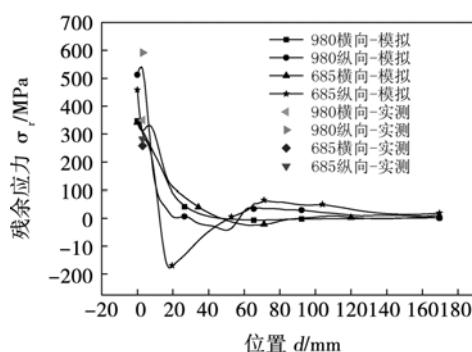


图 5 试验与模拟焊接残余应力对比

Fig. 5 Comparison of residual stresses between testing and simulation along line1 and line2

### 3 插管结构的有限元模拟

插管结构由壳板和三个插管构成, 考虑到左管和右管具有对称性, 研究中只模拟壳板与中管(case1)、壳板与左管(case2)两个焊缝的焊接过程(模拟壳板与中管的焊接时, 左管和右管是不存在的, 计算壳板与左管的焊接时, 中管和右管是不存在的), 以明确两种焊接位置对结构变形的影响, 以及插管结构焊接变形规律。

#### 3.1 有限元模型

考虑结构的对称性, 建立  $1/2$  有限元模型(图 6), 采用过渡网格划分策略, 即焊缝及焊缝附近网格较密, 距焊缝较远的位置网格较稀疏, 采用八节点六面体单元, 单元号为 7, 最终模型有 44 266 个单元, 53 675 个节点。在对称面施加对称约束条件, 即  $x$  方向位移为 0, 在壳板左右两端施加固定约束条件, 在三个插管下端面施加  $z$  向位移约束, 即  $Z$  方向位移为 0。在焊接模拟之前, 分别在坡口的起弧端、收弧端和中间位置设置定位焊点。材料参数、焊接工艺、填充顺序和热源模型与上文平板对接模型相同。

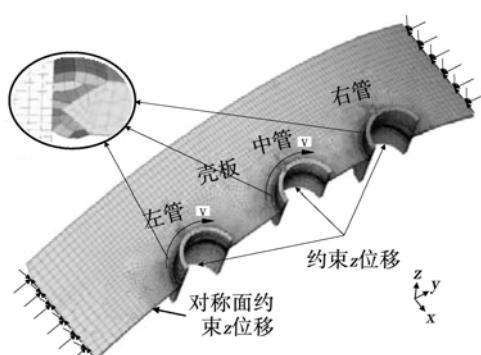


图 6 有限元网格和约束条件

Fig. 6 Finite element mesh and constraint conditions

#### 3.2 焊接热过程

完成 case1 和 case2 焊接过程模拟后, 以 case2 为例提取坡口上起弧端、收弧端和中间部位 6 个特征节点的热循环曲线(图 7)。可以看出, 随焊接过程的进行, 焊接电弧经过时,  $OPQ$  三点的温度即刻上升达到峰值, 峰值温度为  $1400^{\circ}\text{C}$  左右。其中, 收弧端  $Q$  点峰值温度最高,  $P$  点次之, 这是由于先焊位置对后焊位置起到了预热作用。 $RST$  三点距坡口与壳板上表面的交线 5 mm 处, 其峰值温度(约  $600^{\circ}\text{C}$ )也呈现出  $OPQ$  三点的特征。并且, 由于先焊焊道的预热作用,  $RST$  三点的温度在达到峰值之前有所升高。

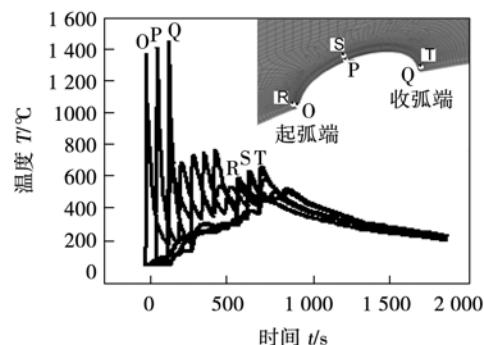


图 7 特征节点的热循环曲线

Fig. 7 Thermal cycles of certain locations

#### 3.3 焊接变形规律

##### 3.3.1 中管与壳板的焊接(case1)

中管与壳板焊接模拟完毕并冷却至室温后, 分别提取了中管及壳板的变形图(图 8), 为了观察方便, 中管变形量放大 50 倍, 壳板变形量放大 30 倍。通过与未变形结构的对比, 可以看出中管存在鼓胀变形, 并有较小程度的左移, 中管附近的壳板有较大向上的翘曲变形, 其它位置变形较小。

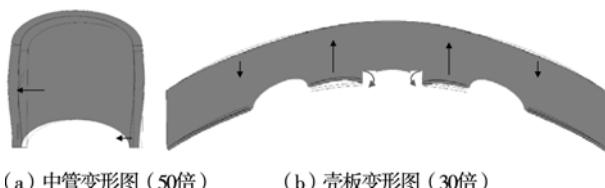


图 8 case1 焊接变形图

Fig. 8 Welding deformation with welding sequence of case1

壳板产生这种变形的主要原因为: 壳板是一个巨大的筒形结构, 表面具有一定弧度。当在壳板上开 K 形坡口(图 1)时, 上侧坡口比下侧坡口有更大

的切削量,因此焊接过程中上侧焊缝的熔敷量( $1\ 244\ 156\ mm^3$ )比下侧( $663\ 346\ mm^3$ )大。当焊接过程结束后,由于上下两侧熔敷金属收缩量不一致,上侧熔敷金属收缩量更大,因此在壳板上形成了附加弯矩,导致壳板上翘。同时由于壳板两端存在固定约束,在左右两个插管附近,壳板位移要发生协调,有一定程度的下塌。插管的鼓胀变形是焊缝金属收缩造成的,而整体左移是因为:左侧起弧端焊接时结构刚度较小,焊缝收缩容易引起结构左移,随着焊接过程的进行,结构刚度逐渐增大,焊至右侧收弧端时,焊缝收缩引起的变形不足以抵消插管的左移量。

### 3.3.2 左管与壳板的焊接(case2)

左管与壳板焊接模拟完毕并冷却至室温后,以同样的方式提取了左管及壳板的变形图,从图9可以看出左管临近焊缝位置存在鼓胀变形,并且整体向左偏移,左管焊缝附近的壳板存在向上的翘曲变形,右侧壳板存在较大的下塌。其中翘曲变形的原因与case1相同,是上侧坡口熔敷量( $1\ 325\ 917\ mm^3$ )比下侧熔敷量( $710\ 850\ mm^3$ )大造成的。而中管和右管附近的位移发生协调,右侧壳板发生下塌,整个壳板发生波浪状变形。左管整体左移同样是随焊接过程进行结构刚度的变化造成的。

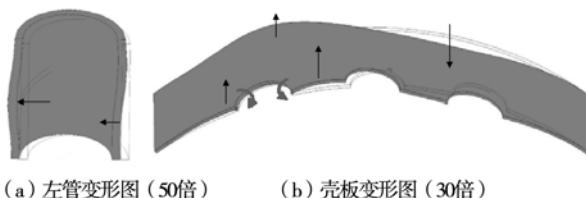


图9 case2 焊接变形图

Fig. 9 Welding deformation with welding sequence of case2

## 4 结 论

(1) 采用平板试验与有限元模拟对比的方式,从特征节点的热过程、焊后工件表面残余应力和焊

后角变形三个方面验证了有限元模型和相关参数是合理的,可以用于插管结构变形规律的研究。

(2) 利用有限元软件计算了插管(中管和左管)与壳板焊接的变形行为:插管发生鼓胀变形,并伴有轴线的偏移;焊缝附近的壳板发生翘曲变形,壳板其余位置刚度较小处发生较大的下塌变形。

## 参考文献:

- [1] 方洪渊. 焊接结构学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [2] 邓德安, 童彦刚, 周中玉. 薄壁低碳钢管焊接变形的数值模拟[J]. 焊接学报, 2011, 32(2): 82-84.  
Deng Dean, Tong Yangang, Zhou Zhongyu. Numerical modeling of welding distortion in thin-walled mild steel pipe[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2011, 32(2): 82-84.
- [3] Dean D, Hidekazu M. Prediction of welding distortion and residual stress in a thin plate butt-welded joint[J]. Computational Materials Science, 2008, 43: 353-365.
- [4] 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 Jianbo, Luo Yu, Long Zhe. 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.
- [5] 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.
- [6] 徐济进, 陈立功, 汪建华, 等. 基于固有应变法筒体对接多道焊焊接变形的预测[J]. 焊接学报, 2007, 28(1): 77-80.  
Xu Jijin, Chen Ligong, Wang Jianhua, et al. Prediction of distortion based on inherent strain method in multi-pass girth-butt welded pipes[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2007, 28(1): 77-80.

**作者简介:**刘露,女,1990年出生,硕士研究生。主要从事窄间隙焊接工艺研究。发表论文1篇。Email: 471460939@qq.com

**通讯作者:**王苹,女,1983年出生,博士,助理研究员。Email: nancywang@hit.edu.cn