

焊接残余应力对焊接接头蠕变性能的影响

张国栋， 周昌玉

(南京工业大学 机械与动力工程学院, 南京 210009)



张国栋

摘 要: 应用大型有限元分析软件 ABAQUS 及其 RESTART 功能, 建立了焊接温度场模型、残余应力场模型和蠕变分析模型。使用焊接残余应力作用下蠕变的顺次耦合有限元计算方法, 对 Cr5Mo 加热炉管焊接接头残余应力和蠕变进行了数值模拟。计算方法为掌握复杂的焊接残余应力对高温炉管焊接接头的蠕变影响奠定了基础。比较了考虑焊接残余应力和仅承受内压两种工况下的炉管接头蠕变情况。结果表明, 虽然焊接残余应力在短时间内松弛, 但焊接残余应力决定了炉管的蠕变变形, 焊接残余应力是影响炉管蠕变的重要因素。

关键词: Cr5Mo 炉管; 焊接接头; 焊接残余应力; 应力松弛; 蠕变

中图分类号: TG404      文献标识码: A      文章编号: 0253-360X(2007)08-099-05

0 序 言

由于焊接过程工艺的复杂性, 准确地预测焊接接头力学性能一直是科技人员关注的难题。焊接残余应力是焊接产生的副作用, 会给焊接结构的力学性能带来负面影响。

在石化设备中, 焊缝处先行失效的可能性占有较大的比例, 表明焊接对结构完整性的不利影响。焊接接头在使用过程中容易产生由于线膨胀系数差形成的热应力、碳迁移、接头组织变化等, 另外, 焊缝/母材界面处对早期蠕变失效十分敏感<sup>[1]</sup>, 因此考虑焊接残余应力下的焊接接头蠕变行为具有实际意义。

炉管长期在恶劣的高温环境下运行, 其微观组织会逐步发生变化, 如碳化物的析出、合并、粗化以及发生蠕变, 使得材料变脆和高温力学性能下降。焊接是炉管制造成型和焊接修复的一种必要手段。国内学者<sup>[2-3]</sup>对炉管蠕变损伤模型和炉管焊缝处的研究大都集中在试验、损伤计算和微观组织的观察上; 国外学者<sup>[4-5]</sup>对焊接接头的研究主要集中在微观组织的观察、高温断裂强度以及焊接材料的蠕变性能上。另外 Hyde<sup>[6,7]</sup>对电站高温管线焊接接头各部分的寿命进行了有限元模拟。高温炉管焊接后的残余应力以及焊接残余应力对炉管蠕变影响方面的研究还有待深入开展。

作者从高温炉管的焊接入手, 运用大型有限元

分析软件 ABAQUS 先计算炉管的焊后残余应力, 然后运用 ABAQUS 的多次顺次耦合技术, 分析焊接残余应力对运行  $1.0 \times 10^5$  h 炉管蠕变性能的影响。

1 计算模型的建立

研究对象为  $\phi 89 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$  的 Cr5Mo 加热炉炉管, 炉管受内压为 1.5 MPa, 采用水平口全位置焊接方式, 分两道焊成形, 层间温度控制在  $250 \sim 300 \text{ }^\circ\text{C}$ , 焊后恒温 30 min 保温缓冷。炉管焊接接头如图 1 所示, 焊接工艺参数见表 1。

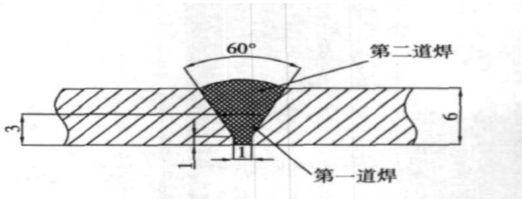


图 1 炉管焊接接头  
Fig 1 Furnace tube welded joint

表 1 焊接工艺参数  
Table 1 Welding parameters

焊道	焊接方法	焊接电流 I/A	电弧电压 U/V	焊接速度 $v/(m \cdot h^{-1})$
1	TIG	90~95	10~12	2.28
2	焊条电弧焊	70~80	20~24	4.08

1.1 热源模型

采用高斯热源模型, 高斯热源分布是比点状热源和线状热源更符合实际情况的热源分布函数, 对焊接的热能量模拟更加精确<sup>[8]</sup>。高斯模型的热流密度为

$$q^* = q_{\max} \exp(-\sigma^2), \tag{1}$$

式中:  $q^*$  为高斯热源半径处的热流密度;  $q_{\max}$  为最大热流密度;  $c$  为与焊接方法相关的热源集中系数;  $r$  为距热源中心的距离。

1.2 蠕变本构方程

文中蠕变计算采用 ABAQUS 自带的材料本构模型, 即

$$\epsilon^c = BR^n, \tag{2}$$

式中:  $\epsilon$  为蠕变应变率;  $R$  为单轴应力;  $B, n$  为材料参数, 可以通过单轴蠕变试验拟和得到。

2 焊接算例

为了验证焊接数值模拟的可信性, 将文中的焊接数值模拟方法结果与 Dong<sup>[9]</sup> 的厚壁管道多道焊轴向环向残余应力试验点进行对比。模拟的焊接残余应力曲线与文献中试验点的趋势相同, 试验点值分布在数值模拟图线的两侧。如图 2 所示, 说明文中焊接数值模拟方法正确。

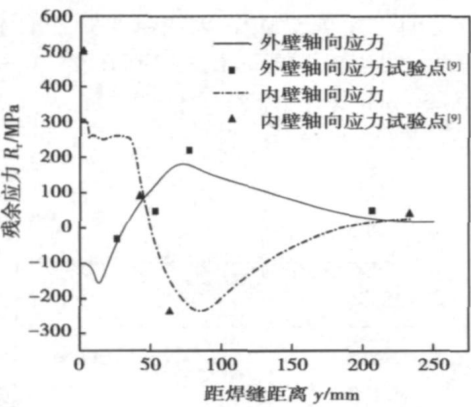


图 2 焊接数值模拟与试验点的对比

Fig. 2 Comparison between numerical simulation results and experimental

3 焊接接头有限元分析步骤

3.1 有限元模型

由于炉管是等径管对接焊, 故以焊接中心面为

对称面建立模型。该模型采用 8 节点三维实体单元, 利用 ABAQUS 软件的网格自适应处理的特点, 在靠近焊缝处热影响区部位对网格进行细化, 而在远离焊缝处则可以加大网格。有限元网格划分见图 3。

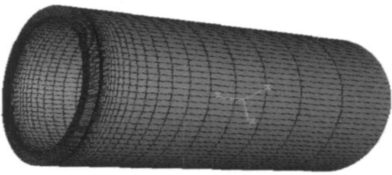


图 3 有限元模型网格划分

Fig. 3 Mesh of finite element model

3.2 材料模型

Cr5Mo 钢的低温 (0 ~ 500 °C) 下的焊接性能参数参照文献[10]。高温 (600 ~ 1 400 °C) 下的数据依据文献[11], 由插值的方法而得。1 900 °C 的数据为外推法获得。这样获得的数据不仅不会影响计算精度, 而且能够提高计算效率。Cr5Mo 的蠕变性能参数是通过 550 °C 下的单轴蠕变断裂试验测试而获得的。

3.3 焊接热源

焊接热源是通过热流的振幅曲线将热量逐个加上去。运用单元生死技术逐层将焊接热能量加上去。最大热流密度计算公式为

$$q_{\max} = \frac{\eta U}{\pi abh}, \tag{3}$$

式中:  $\eta$  为电弧热效率, TIG 焊接的  $\eta$ <sup>[12]</sup> 取 0.8, 焊条电弧焊的  $\eta$  取 0.75;  $I$  为焊接电流;  $U$  为电弧电压;  $a, b$  表示高斯热源中椭圆的长短轴;  $h$  为焊缝高度。将式(3)代入(1)式中即可得到焊接热源的体热流密度。

3.4 蠕变分析

炉管蠕变分析分两种情况, 一是考虑焊接残余应力承压炉管的蠕变分析, 另一种是不考虑焊接残余应力承压炉管受的蠕变分析。考虑焊接残余应力的蠕变分析采用 RESTART 的命令, 在计算焊接的基础上重新读入模型数据, 再将温度升到炉管的工作温度, 加上内压进行蠕变计算; 另一种情况就是直接加内压计算, 不读入原来的焊接模型数据计算蠕变。

3.5 边界条件

在热场分析中, 焊件的初始温度取室温 20 °C, 圆管的内外表面均考虑为对流和辐射的边界条件, 对流系数取 10 W/(m<sup>2</sup>·K), 辐射发射率为 0.85<sup>[13]</sup>。

在应力场和蠕变分析中, 焊缝中心面为对称面, 需要加对称约束, 为了确保焊件不发生刚性移动, 在

远离焊缝处取两点约束所有的自由度。

## 4 焊接接头数值模拟结果与分析

### 4.1 焊接接头残余应力分布

对炉管焊接残余应力和仅受内压情况的炉管应力分别做了分析和对比。

准确预测焊接残余应力场是焊接有限元分析中关键的一步。ABAQUS 提供的热—力耦合功能可以做到这一点。对于文中的模型,焊接残余应力主要集中在焊缝附近(即距焊缝中心 120 mm 左右)。当不考虑焊接残余应力时,仅受内压的炉管应力分布也易得到。做出内外壁最大环向、径向和轴向应力处沿轴向的应力分布如图 4 所示。

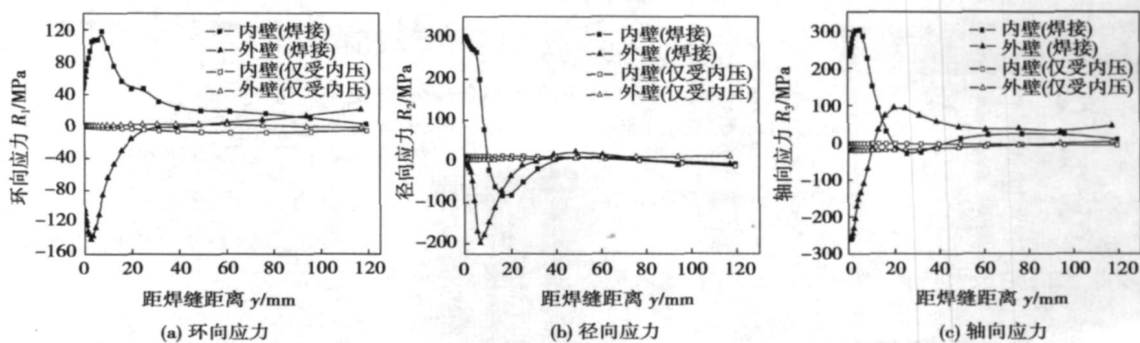


图 4 环向和径向及轴向焊接残余应力

Fig 4 Hoop radial and axial welding residual stress

由图 4 可以看出,这三个方向的应力最大应力值都出现在焊缝热影响区处。内壁环向应力的最大值为 118 MPa,出现在距焊缝 8 mm 处;而外壁环向最大应力为压应力 -141 MPa,出现在距焊缝 3 mm 处。随着距焊缝距离的增大,外壁环向压应力逐渐转变为拉应力。内壁径向应力最大值为 302 MPa,出现在焊缝处,随着距焊缝距离的增大逐渐转变为压应力,在 16 mm 处的压应力最大,为 -84 MPa;外壁最大径向压应力为 -197 MPa,出现在距焊缝 6 mm 处,随后压应力逐渐减小,在距焊缝 120 mm 处减小到零。内壁最大轴向应力值出现在距焊缝 5 mm 处,为 301 MPa,随后逐渐减小在 25 mm 处表现为压应力,为 -30 MPa;外壁最大轴向应力为压应力,出现在焊缝处,为 -261 MPa,随着距焊缝距离的增大逐渐转变为拉应力,在 20 mm 处拉应力最大,为 94 MPa,最后逐渐减小到零。

在仅受内压的情况下,内外壁的应力值都不大,拉压应力最大绝对值均在 20 MPa 左右。

由此可见,焊接残余应力比仅受内压时的应力要大得多,炉管要长期在高温环境下服役,不同的应力情况必然对炉管的蠕变产生较大的影响。由于焊接残余应力较大,因此考虑焊接残余应力对蠕变的影响是很必要的。

### 4.2 焊接接头蠕变应力松弛

应力松弛是材料在高温下的一种现象,就是随

着蠕变变形的增加,而弹性变形的相对减少所引起的应力随时间增长而降低的现象。

为了考察炉管在长期服役过程中的应力变化情况,给出炉管运行  $1.0 \times 10^5$  h 的环向、径向和轴向应力沿壁厚方向松弛变化趋势。分别取焊接残余应力最大的外壁环向应力、内壁径向应力和内壁轴向应力点处作应力曲线。由图 5 可以得出,由于焊缝处受焊接残余应力的影响,蠕变开始阶段外壁环向应力为 -141 MPa,随着时间的增加逐渐减小到 5 MPa;内壁处的径向应力蠕变开始阶段为 302 MPa,最后也降低到 5 MPa;内壁处的轴向应力在蠕变开始阶段为 301 MPa,最后降低到 1 MPa 左右。由图 5 可知,焊缝处应力松弛最快都集中在蠕变开始的前 3 h,而后应力松弛变化较为缓慢,最后应力都降低到 5 MPa 以内,这说明炉管在运行过程中应力最后都会释放到一个较低的应力水平。

### 4.3 焊接接头蠕变

在图 4 取点处的同一位置将其蠕变变形做图如下。图 6 分别是  $1.0 \times 10^5$  h 内外壁环向、径向和轴向蠕变应变处沿 y 轴方向的分布图,以及仅承受内压的炉管蠕变变形图。综合这三张图可以看出,考虑焊接残余应力的蠕变变形图与相应的图 4 应力分布趋势一致,在拉应力高的地方,蠕变正变形量大,相反,在压应力高的地方,蠕变负变形量也大。这说明炉管蠕变变形的情况和初始状态的应力情况密切

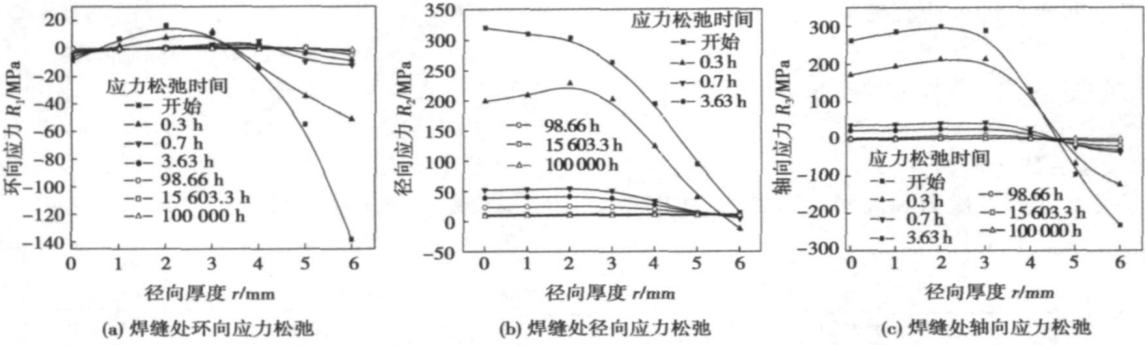


图 5 焊缝处环向和径向及轴向应力松弛

Fig 5 Hoop, radial and axial stress relaxation on weld

相关, 即炉管初始状态的应力决定了炉管服役一定时间后的蠕变变形。

需要指出的是虽然内外壁轴向和径向的残余应

力大于环向残余应力, 但内外壁环向的蠕变量却大于轴向和径向蠕变量, 这说明炉管蠕变变形是复杂应力状态问题。

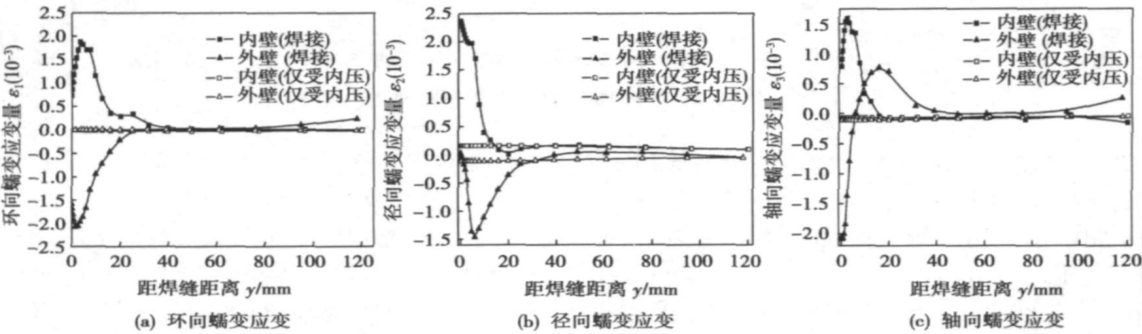


图 6 环向和径向及轴向蠕变应变

Fig 6 Hoop, radial and axial creep strain

5 结 论

- (1) Cr5Mo 炉管焊接残余应力主要集中在焊缝和热影响区处, 轴向和径向应力相对较大。
- (2) 炉管在运行过程中发生应力松弛现象, 在考虑焊接残余应力的情况下, 应力松弛在炉管运行的数小时内变化较快, 以后的松弛变化趋于平稳, 最后炉管的应力降低到 5 MPa 左右。
- (3) 在考虑焊接残余应力的情况下, 环向、径向和轴向的蠕变应变分布都受到相应的焊接残余应力分布的影响, 这说明残余应力是影响炉管蠕变的重要因素。

参考文献:

[ 1 ] 张建强, 吴 魁, 赵海燕, 等. 10Cr9Mo1VNbN/12Cr-1MoV 异

种钢焊接接头的蠕变损伤及界面失效[ J ]. 焊接学报, 2002, 23(2): 75—79.

[ 2 ] Zhou Changyu, Tu shandong. A stochastic computation model for the creep damage of furnace tube[ J ]. The International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2001, 78(9): 617—625.

[ 3 ] 巩建鸣, 涂善东, 凌 祥, 等. 基于蠕变损伤力学理论的 HK40 炉管焊接接头的蠕变损伤研究[ J ]. 压力容器, 2000, 17(4): 11—16.

[ 4 ] Segall A E. Manufacturing defects and the evidence of thermomechanical fatigue in a ceramic vacuum furnace tube[ J ]. Engineering Failure Analysis, 2006, 13(7): 1184—1190.

[ 5 ] Ibarra S, Konet R R. Life assessment of 1 1/4 Cr-1/2 Mo steel catalytic reformer furnace tubes using the MPC Omega method[ J ]. Journal of Pressure Vessel Technology, Transactions of the ASME, 1995, 117(1): 19—23.

[ 6 ] Hyde T H, Sun W, Williams J A. Life estimation of pressurised pipe bends using steady-state creep reference rupture stresses[ J ]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2002, 79(12): 799—805.

保护焊平焊只做了 6 个试件就顺利地能够免除焊后热处理。而 CO<sub>2</sub> 气体保护焊仰焊和立焊位置通过追加试件数量的方法也免除了相应的焊后热处理。

(2) 80 mm 板厚单丝埋弧焊免除焊后热处理的 CTOD 试验没有通过,但合理地将厚度降低到 70 mm,在该厚度下单丝埋弧焊免除焊后热处理的 CTOD 试验最后得以通过。

(3) 在平台施工建造过程中通过钢材和焊接材料国产化以及利用 CTOD 试验来免除焊后消应热处理方法可以大大降低建造成本,并且明显缩短生产周期,降低劳动强度,而产生巨大的经济和社会效益。

参考文献:

[ 1 ] 虞维明,周岳银,陈秀妹.海洋平台的建造与维修[ M ].北京:海  
[ 7 ] Hyde T H, Sun W, Becker A A. Creep crack growth in welds; a damage mechanics approach to predicting initiation and growth of circumferential cracks[ J ]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2001, 78(11—12): 765—771.  
[ 8 ] 董志波,魏艳红,刘仁培.不锈钢焊接温度场的三维数值模拟[ J ]. 焊接学报, 2004, 25(2): 9—14.  
[ 9 ] Dong P, Brust F W. Welding residual stress and effects on fracture in pressure vessel and piping components: a millennium review and beyond[ J ]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2000, 12(8): 329—338.  
[ 10 ] 方向威,吴氏达,吴关昌,等.机械工程材料性能数据手册

洋出版社, 1992.  
[ 2 ] 孔祥鼎,夏炳仁.海洋平台建造工艺[ M ].北京:人民交通出版社, 1993.  
[ 3 ] 霍立兴.焊接结构的断裂行为及评定[ M ].北京:机械工业出版社, 2000.  
[ 4 ] BS7448: Part 1; 1991, Fracture mechanics toughness tests. Method for determination of  $K_{IC}$  critical CTOD and critical J values of metallic materials[ S ].  
[ 5 ] BS7448: Part 2; 1991, Fracture mechanics toughness test. Method for determination of  $K_{IC}$  critical CTOD and critical J values of welds in metallic materials[ S ].  
[ 6 ] DNV—OS—C401 Fabrication and testing of offshore structures[ S ], 2001.

作者简介:王志坚,男,1968 年出生,工学学士,国际焊接工程师。主要从事焊接工艺、焊接性的研究工作。发表论文 5 篇。  
Email: zjwang@szcse.com

[ 上接第 102 页]

[ M ].北京:机械工业出版社, 1995.  
[ 11 ] 鹿安理,史清宇,赵海燕,等.焊接过程仿真领域的若干关键技术问题及其初步研究[ J ].中国机械工程, 2000, 11(1—2): 201—205.  
[ 12 ] 英若采.熔焊原理及金属材料焊接[ M ].北京:机械工业出版社, 2000.  
[ 13 ] 张国栋,周昌玉.管道对接间断焊与连续焊的有限元分析[ J ].焊接学报, 2006, 27(12): 85—88 92.

作者简介:张国栋,男,1982 年出生,博士研究生。主要从事过程装备的可靠性、寿命预测的研究工作。发表论文 5 篇。  
Email: zhangdln@163.com

### Diffusion bonding of TC4 to ZQSn10—10 with nickel and copper interlayers

YUAN Zheshi, WU Zhizhong, SONG Minxia, ZHAO Huanling (School of Materials Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China). p92—95

**Abstract:** The experimental investigation of the diffusion bonding of TC4 to ZQSn10—10 in vacuum was carried out by using pure nickel and copper as the transition metal. Experimental results show that the optimum bonding parameters were selected as follows: bonding temperature 850 °C, bonding time 20 min and bonding pressure 10 MPa. So the strength of the joint without obvious shape changing was up to 155.8 MPa, which the strength can reach to about 65% of the strength of base metal ZQSn10—10. Various reaction layers appeared in TC4 and Ni interface. When the rest condition was same, Ni<sub>3</sub>Ti phase was produced at the interface zone at 800 °C; and there appeared Ni<sub>3</sub>Ti and NiTi phases at 850 °C; and there produced NiTi<sub>2</sub>, Ni<sub>3</sub>Ti and NiTi phases at 880 °C. The strength of the joint lied on types and thickness of nickel and titanium inter-metallic compounds.

**Key words:** titanium alloy; tin-bronze; diffusion bonding; nickel and copper interlayers; intermetallic compound

### Prediction system of CTOD for high strength pipeline steel welded joint based on back propagation artificial neural network

TONG Lige<sup>1</sup>, BAI Shiwu<sup>2</sup>, LIU Fangning<sup>2</sup> (1. School of Mechanical Engineering, Beijing University of Science and Technology, Beijing 100083, China; 2. Pipeline Research Institute of China National Petroleum Corporation, Langfang 065000, Hebei, China). p96—98

**Abstract:** Aiming at limitation of selecting the main technical parameters for high strength pipeline steel welding in practical operation, a back propagation artificial neural network (ANN) was established with Visual C++ 6.0 for predicting the welding performance parameter crack tip opening displacement (CTOD) of high strength pipeline steel joint. Based on the experiment data, the average heat input, wall thick, preheat temperature and joint region were used as the input parameters of ANN, which includes one input layer with 4 nodes, one hidden layer with 14 nodes, and Sigmoid activation function. The average absolute error of prediction result is 15.4%. The number of the sample whose error is less than  $\pm 20\%$  is about 93.3% in total 15 experimental data. The result showed that ANN method is a kind of effective method to predict the welding performance parameter CTOD of high strength pipeline steel welded joint. The ANN system can be used as selecting and optimizing the key welding parameters.

**Key words:** artificial neural network; welded joint; crack tip opening displacement; prediction; performance parameter

### Effects of welding residual stress on creep of welded joint

ZHANG Guodong, ZHOU Changyu (College of Mechanical and Power Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China). p99—102, 107

**Abstract:** By the finite element analysis codes ABAQUS and

the function of RESTART, a sequential coupling calculating program for creep based on welding residual stress has been developed by establishing the model of temperature field, residual field and creep analysis. The welding residual stress and creep of welded joint for Cr5Mo furnace tubes was simulated by this program. This method established the basis for calculating the effects of welding residual stress on the creep of welded joint. A creep comparison between the welded joint tubes with welding residual stress and with internal pressure was made. The results showed that the tube creep was decided by the welding residual stress, although the welding residual stress was relaxed in a short time.

**Key words:** Cr5Mo furnace tubes; welded joint; welding residual stress; stress relaxation; creep; numerical simulation

### CTOD fracture toughness test for super thick welded joints of D36 offshore platform steel

WANG Zhijian<sup>1</sup>, JIANG Jun<sup>1</sup>, WANG Dongpo<sup>2</sup>, DENG Caiyan<sup>2</sup> (1. Chiwan Sembawang Engineering CO. LTD, Shenzhen 518068, Guangdong, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China). p103—107

**Abstract:** Based on BS7448 fracture toughness test experiment standard (ISO/TC164/SC4-N400) and DNV-OS-C401, crack tip opening displacement (CTOD) tests are carried out on 80 mm thick plates butt joints of offshore petroleum platform joined by the submerged-arc welding and CO<sub>2</sub> gas shielded welding. The CTOD values of weld metal and the heat-affected zone are tested at 0 °C. The possibility of avoiding post-weld heat treatment in thick welded joints is discussed using the submerged-arc welding and CO<sub>2</sub> gas shielded welding. These work provide the scientific basis on the offshore platform construction.

**Key words:** welded joints; crack tip opening displacement; fracture toughness

### Mechanism and influencing factors of spatter formation with self-shielded flux cored wire

PAN Chuan<sup>1</sup>, YU Ping<sup>1</sup>, XUE Zhenkui<sup>2</sup>, TIAN Zhiling<sup>1</sup> (1. China Iron&Steel Research Institute Group, Beijing 100081, China; 2. Pipeline Research Institute of CNPC, Langfang 065000, China). p108—112

**Abstract:** The spatter formation mechanism of self-shielded flux cored wire has a remarkable different with other welding materials because of its speciality in wire's construction and welding method. The mechanism and influencing factors of welding spatter are studied. High-speed photographs indicate that there are mainly three types of spatter in self-shielded flux cored arc welding, which are big spatter caused by arc force, bubble released spatter and gas explosion spatter. Five flux ingredients, which influence the welding spatter greatly, are investigated by means of spatter tests using mixing material regression method. Experimental result shows that the effect of fluorides and carbonates is greater than that of oxides, killing agents and alloys.

**Key words:** self-shielded flux cored wire; spatter; formation mechanism