

焊接残余应力对接头尘化腐蚀影响的有限元模拟

胡桂明, 周昌玉, 张国栋, 陈成*

(南京工业大学 机械与动力工程学院, 南京 210009)

摘 要: 金属尘化腐蚀是发生在含碳气氛中的一种高温腐蚀现象, 碳在金属基体中的扩散是其过程的第一步。文中开发了碳扩散的耦合计算程序, 进行了加热炉炉管焊态和工况温度状态下焊接残余应力对碳扩散影响的数值模拟, 并与无应力状态下的碳扩散情况进行了比较。结果表明, 在热影响区附近焊接残余应力梯度最大, 对碳扩散的影响也最大, 并且形成一个碳浓度峰值, 在峰值两侧则会形成相应的碳浓度低谷, 这是碳向高应力梯度区扩散所致。经过升温至工况温度后, 残余应力得到松弛, 对碳扩散的影响有所降低, 可以延缓炉管的损坏时间。但由于残余应力的影响仍然存在, 因此在炉管检修期间要注意焊接接头附近的尘化腐蚀情况。

关键词: 金属尘化; 高温腐蚀; 耦合; 焊接残余应力; 有限元模拟

中图分类号: TG457 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2009)01-0042-05



胡桂明

0 序 言

金属尘化(metal-dusting)是一种灾难性的高温碳化腐蚀现象^[1], 出现在煤化工、石油化工等具有饱和碳气氛的过程工业装备中。金属尘化将导致Fe基和Ni基合金的分解, 形成由金属颗粒和碳组成的灰尘或粉末^[2,3], 也叫做金属灰化^[4]或金属粉化^[5]。金属尘化一般发生在400~900℃, 碳活度 $a_C > 1.0$ 的环境中, 不仅导致相变, 还会导致金属材料的损失(蚀坑或减薄)。在国内最先由王福会^[6]介绍了此方面的问题, 文献[7, 8]先后对在实际工况中金属尘化引起的设备失效问题做了相关的研究。金属尘化与结焦和内部渗碳是有区别的, 三者发生的温度不同, 其腐蚀机理也不同。这三种腐蚀是金属在含碳气氛中的主要失效形式, 对结焦和内部渗碳的研究众多, 而对金属尘化的研究相对较少。目前, 金属尘化的研究主要是通过试验考察温度、流速、碳源气体组成、材料种类及表面状态等各种因素对尘化腐蚀状况的影响。另一方面, 试验研究表明应力作用也是影响金属尘化腐蚀的一个重要因素^[9], 文献[10]对此进行了初步的数值模拟, 因此焊接残余应力对尘化腐蚀势必存在着一定的影响, 而相关的数值模拟尚无相关报道。

文中利用有限元软件ABAQUS^[11], 模拟含碳气氛的加热炉炉管高温下分解出的游离态碳在焊接接头处的扩散, 得到了焊态下碳扩散的分布规律; 对工况温度降低残余应力效应进行了数值模拟, 得到了焊后升温至工况温度时焊接接头碳扩散的分布规律。并与无应力状态下结构中的碳扩散进行了对比, 得到了焊接残余应力对碳扩散的影响规律, 为进一步深入研究应力作用对尘化腐蚀的影响打下基础。

1 应力作用下碳扩散的基本理论

根据传质理论, 在非均匀介质中, 由浓度梯度、温度梯度和应力梯度引起的碳扩散的本构方程^[11]为

$$J = -SD \cdot \left\{ \frac{\partial \phi}{\partial x} + k_s \frac{\partial}{\partial x} [\ln(\theta - \theta^0)] + k_\sigma \frac{\partial \sigma}{\partial x} \right\} \quad (1)$$

当不存在温度梯度时, 式(1)变为式(2)

$$J = -SD \cdot \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} + k_\sigma \frac{\partial \sigma}{\partial x} \right) \quad (2)$$

其中应力梯度系数的计算公式为

$$k_\sigma = \frac{C}{S} \cdot \frac{V_C}{R(\theta - \theta^0)} \quad (3)$$

式中: D 表示碳的扩散系数; C 表示浓度; S 表示溶解度; k_s 是温度梯度下的“Soret效应”系数; T 是温度; θ^0 是绝对零度; k_σ 是等效应力梯度系数; $\partial \sigma / \partial x$ 表示应力梯度; R 为气体常数, 一般取 $8.3 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$; V_C 表示碳在钢中的偏摩尔体积, 根据文献[12]取 $V_C = 2.1 \text{ cm}^3/\text{mol}$ 。

2 有限元模型

2.1 几何模型

以 $\phi 142$ mm、壁厚为 8 mm 的 Cr5Mo 钢加热炉炉管为例, 其操作压力为 1.5 MPa, 工作温度为 560 °C. 焊接接头采用“Y 形”坡口, 分三道焊成形, 以焊缝为中心, 选取长宽为 160 mm \times 8 mm 的剖面作为研究对象(图 1). 由于研究对象的中心对称性, 在建模时仅选取 1/2 的剖面, 建立二维轴对称有限元模型.

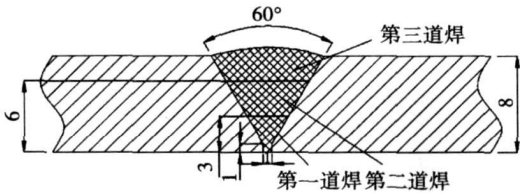


图 1 焊接接头示意图
Fig. 1 Sketch of welded joint

2.2 有限元分析思路

利用有限元分析软件 ABAQUS, 开发了考虑焊接残余应力下碳扩散的耦合计算程序. 首先计算焊接温度场, 然后进行焊接残余应力的耦合计算, 再将残余应力场作为碳扩散的预定义场进行应力作用下碳扩散的耦合计算. 为研究工况温度的影响, 同时对焊后升温过程(类似 PWHT 过程)进行数值模拟, 再进行焊后升温到工况温度时残余应力作用下碳扩散的计算, 最后把这些在应力场作用下碳扩散的计算结果与无应力场时碳扩散的结果进行比较.

2.3 有限元网格划分

在焊缝及热影响区, 残余应力比较大, 对碳的扩散较为显著, 所以网格划分较为密集, 而在远离焊缝的区域, 网格较为稀疏. 图 2 给出了网格划分模式, 共有 4 323 个节点, 4 160 个单元, 单元类型为轴对称单元, 温度场计算采用 DCAX4 单元, 焊接残余应力场采用 CAX4 单元, 碳扩散采用 DCAX4 单元. 温度场、应力场以及碳扩散的计算均采用相同的节点和单元.

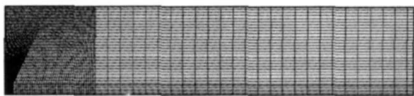


图 2 网格划分
Fig. 2 Meshing of model

2.4 材料参数

假设焊材和母材的材料相同, 其热力学性能与

温度相关, 并且假定在 400~900 °C 物理性能保持不变^[13]. 计算焊接温度场和残余应力场所需的物理性能和力学性能参数见文献[14]. 在计算应力梯度下的碳扩散时, 扩散系数由试验^[9]拟合得到, 其值为 $3.64 \times 10^{-9} \text{ mm}^2/\text{s}$. 碳在材料中的溶解度取值为 0.005 7%. 应力梯度系数根据式(3)计算, 其值为 $0.16 \text{ N/mm}^{-1/2}$.

2.5 焊接工艺

表 1 给出了用于焊接残余应力数值模拟计算的焊接工艺参数, TIG 焊接热效率常数取 0.8, 焊条电弧焊的热效率常数取 0.75, 基体预热温度为 200 °C.

表 1 焊接工艺参数
Table 1 Welding parameter

| 焊道 | 焊接方法 | 电压 U/V | 电流 I/A | 速度 $v/(\text{m}\cdot\text{h}^{-1})$ |
|----|-------|-----------------|-----------------|-------------------------------------|
| 1 | TIG | 10~12 | 90~95 | 2.28 |
| 2 | TIG | 10~12 | 90~95 | 2.28 |
| 3 | 焊条电弧焊 | 20~24 | 70~80 | 4.08 |

2.6 边界条件和初始条件

在焊接温度场中, 模型外表面为对流和辐射边界条件, 对流系数取 $10 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$, 辐射发射率取为 0.85, 初始温度取 25 °C. 在力分析场中, 焊缝中心为轴对称边界条件. 在碳扩散分析中, 表征边界条件的参数是碳活度 ϕ 为

$$\phi = C/S,$$

式中: C 为质量浓度; S 溶解度. 模型的上表面与含碳气氛接触, 其质量浓度为 3%, 并假定保持恒定, 碳活度为 526.32, 初始碳质量浓度为 0.12%, 碳活度为 21.05. 另外, 文中主要目的是研究焊接残余应力对碳扩散的影响. 因此, 在计算过程中忽略焊接接头不同组织对碳扩散的影响.

3 焊接残余应力计算结果与分析

图 3 给出了 Cr5Mo 炉管焊接后三个主应力和 Mises 应力的分布情况(限于篇幅升温后的应力云图中并未给出). 其中径向残余应力(沿厚度方向的残余应力)记为 σ_{s11} , 沿轴向的残余应力记为 σ_{s22} , 环向残余应力记为 σ_{s33} . 在图 3 中分别标出了焊缝区(WM), 热影响区(HAZ)以及母材区(PM)的位置. 为更好地观察焊接残余应力以及碳扩散的浓度分布, 在焊接接头中, 分别取三条路径来观察(图 3d). 路径 1 距离碳气氛接触面 2.4 mm, 方向均为从左向右; 路径 2 和路径 3 分别是焊缝中心和距焊缝中心 7.3 和 11.4 mm 处, 从内壁指向外壁. 图 4 给出了路径 1~3 在升温前后三个主应力以及等效应力 Mises 的变化.

从图 3a 可以看出, 炉管焊接后, 沿厚度方向的残余应力 σ_{s11} 较小, 这是由于炉管的壁厚较薄, 焊接后沿厚度方向的收缩量较小, 故引起的焊接残余应力也较小. 最大拉应力为 38.5 MPa, 最大压应力为 -45.1 MPa, 升温后的最大拉压应力分别为 24.5 和 -26.9 MPa, 出现在热影响区部位. 从图 3b 可以看出轴向残余应力在内壁处表现为拉应力, 最大值为 334.4 MPa, 升温后降为 200.3 MPa. 而在外壁处表现为压应力, 最大值为 -326.0 MPa, 升温后降为 -204.1 MPa. 轴向最大拉应力和压应力均在焊缝处, 并且随着距焊缝中心距离的增大而逐渐减小. 由图 3c 可知, 内壁焊缝处的环向拉应力最大, 为 422.5 MPa, 升温后降为 260.8 MPa. 随着距焊缝中心距离的增大, 拉应力逐渐减小, 最后在靠近 HAZ 区的母材处产生了一 166.5 MPa 的压应力, 升温后降为 -113.6 MPa. 环向应力由内向外应力值逐渐减小, 外壁处的应力值水平较低. 图 3d 为等效 Mises 应力, 由该图可知, 焊缝和热影响区的等效应力最高, 最大值为 346.3 MPa, 升温后降为 213.7 MPa, 远离热影响区的部位应力逐渐减小.

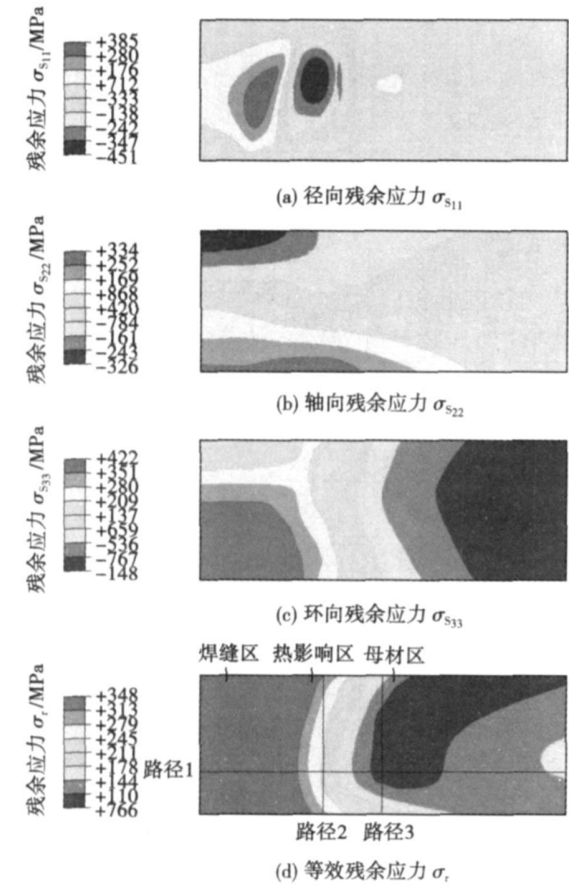


图 3 Cr5Mo 钢焊接接头的残余应力分布

Fig. 3 Contour plots of welding residual stress for Cr5Mo welded joint

从图 4 三条路径主应力和 Mises 应力在升温前后的变化可以看出, 热处理后, 应力值大为降低, 应力松弛效果明显. 由图还可以看出, 应力最高值都集中在焊缝和热影响区处, 随着距焊缝和热影响区距

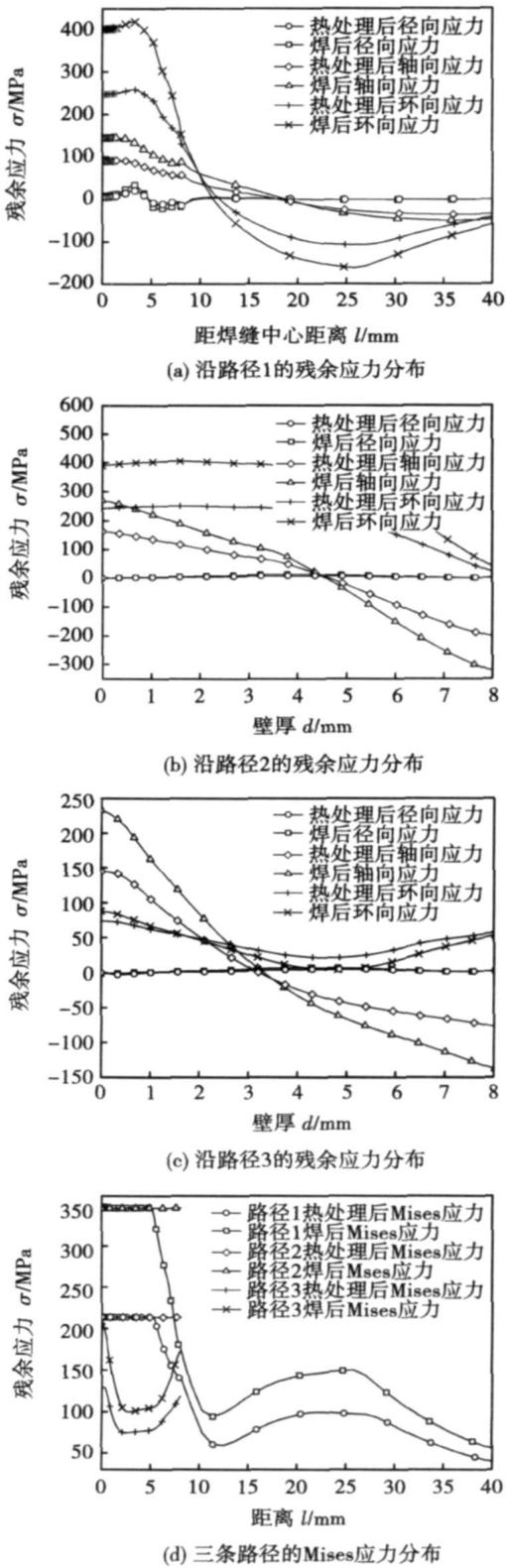


图 4 焊接残余应力分别沿三条路径的分布图

Fig. 4 Distribution of welding residual stress along three paths

离的增大, 焊接残余应力逐渐的减小, 在距离焊缝中心 40 mm 附近, 焊接残余应力降至最低. 径向残余应力明显低于轴向和环向应力并且内壁环向应力最大.

4 焊接残余应力下碳扩散的计算

依据文献[8] 中服役 4 年后更换下来的加热炉炉管的实际情况来确定碳扩散模拟的时间. 图 5 给出了升温前后焊接残余应力作用以及无应力作用下碳扩散的分布. 图 6 分别给出了三条路径升温前后以及无应力状态下扩散碳质量浓度分布.

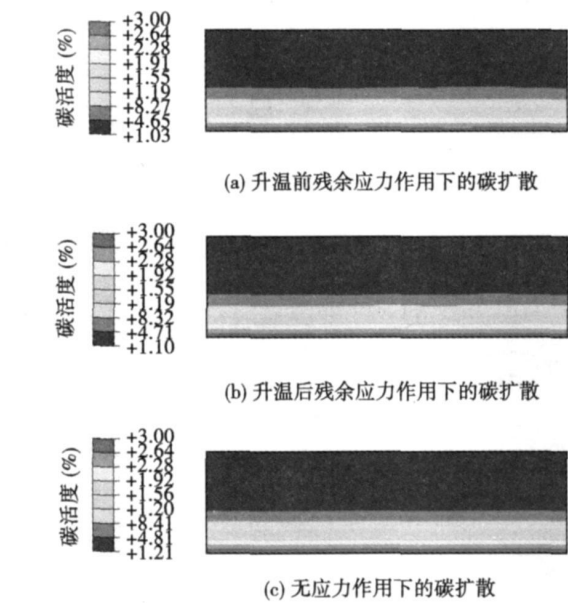


图 5 焊接残余应力下扩散碳的分布
Fig. 5 Diffusion carbon contour under welding residual stress

由图 5 可以看出, 碳质量浓度从内表面到外表面逐渐降低, 在距内表面 4 mm 处达到炉管材料本身的碳浓度值, 这一结果与文献[7] 中的结果一致. 由图 5a, b 可以看出, 在热影响区由于应力梯度的影响, 碳浓度会发生变化, 而在焊缝和母材处, 由于应力梯度不明显, 其碳质量浓度变化不大; 由图 5c 中, 由于没有应力作用, 轴向的碳质量浓度值呈均匀态. 由图 6a 可以知道, 在热影响区处, 焊接残余应力梯度最大, 扩散碳质量浓度较高, 最大值达 0.207%, 在这一区域的两侧则形成了明显的碳浓度低谷区, 而左侧的低谷区明显大于右侧的低谷区, 其原因是由于焊缝处的残余应力梯度相对较小. 这一现象说明在应力梯度影响下, 碳浓度由应力梯度相对较小的地方向应力梯度相对较大的地方聚集.

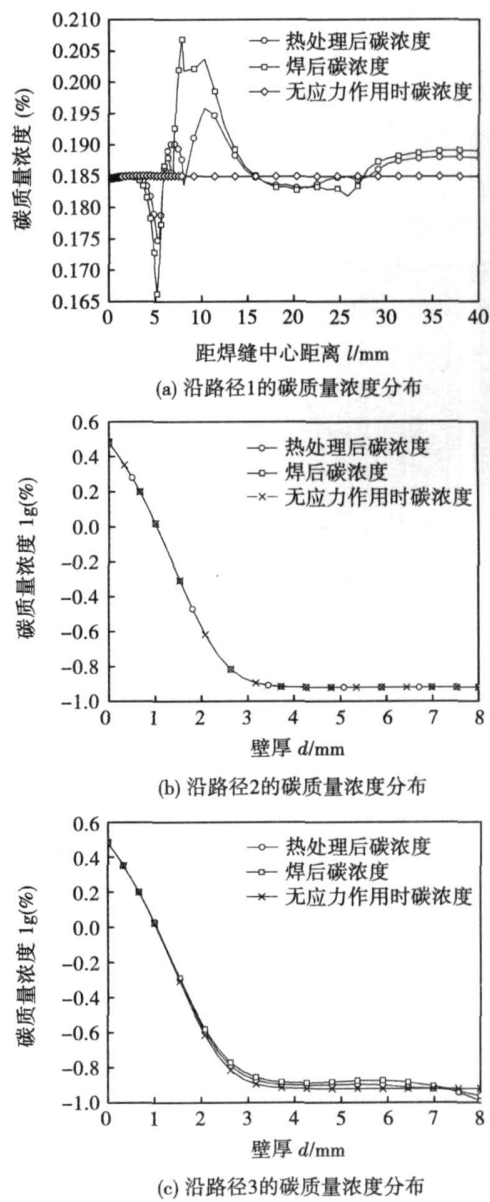


图 6 焊接残余应力下三条路径碳的扩散分布
Fig. 6 Carbon concentration of three paths in welding residual stress field

从图 6a 还可以看出, 升温后应力发生松弛, 应力水平大为下降, 对碳扩散的影响也随之降低, 最高浓度降为 0.196%, 但由于应力梯度仍然存在, 升温后的状态只是降低了碳质量聚集的程度, 其聚集的现象还在, 发生的部位和升温前的一样. 从图 6b, c 可以看出, 路径 2, 3 的碳质量浓度与无应力作用下的碳质量浓度相比变化不大, 其原因主要是因为该炉管的壁厚小, 沿壁厚方向的应力梯度不大, 因此该方向的碳质量浓度值变化也就不大.

从以上分析可以看出, 由于焊接残余应力的存在, 将促使碳向热影响区富集, 从而使得炉管材料在焊接热影响区处碳化更加严重. 另外, 实际的焊接接头中的气孔、夹杂等缺陷会形成较大的局部应力梯

度,势必会造成局部的碳化严重区.因此对于含碳气氛的加热炉炉管,由于气氛中含有 CO 或 CH₄ 在高温下分解出的碳,可在残余焊接应力的作用下向钢材内部扩散而造成破坏.在实际应用中,含碳气氛的加热炉炉管经常会发生金属尘化腐蚀,造成炉管材料的组织变化,力学性能劣化,局部腐蚀严重,形成腐蚀坑或沟槽等,给正常生产和安全带来了潜在的危险.由于加热炉炉管在制造过程中,一般不经过热处理,虽然加热炉的工况温度会降低一定的焊接残余应力,但焊接接头附近的尘化情况依然比母材严重,所以对于含碳气氛的加热炉在检修期间一定要对焊接部位进行仔细的检测,腐蚀严重的炉管必须及时更换,以免使用过程中发生事故.

5 结 论

(1) 利用有限元软件 ABAQUS,开发了焊接残余应力下碳扩散的耦合计算程序,对焊态、工况以及无应力三种状态下的碳扩散结果进行了比较,结果表明焊接残余应力梯度会导致碳在焊接接头附近的聚集.

(2) 在焊接残余应力梯度下,碳向高应力梯度区富集.在热影响区附近,有一个碳浓度峰值,两侧会形成碳浓度的低谷值,应力梯度的大小是决定了峰值和低谷值的大小.由于炉管壁厚不大,因此残余应力梯度对沿壁厚方向的碳浓度分布影响不大,其影响主要体现在沿轴向方向.

(3) 在焊接接头附近,由于焊接残余应力的存在,将促进碳的扩散和聚集,使材料腐蚀程度加剧,导致材料的性能下降.工况温度能在一定程度上降低焊接残余应力的影响,但不能消除其影响.因此在检修中对含碳气氛的加热炉炉管焊接接头处要格外注意.

参考文献:

[1] Prange F A. Corrosion in a hydrocarbon conversion system[J]. Corrosion, 1959, 15(12): 13—15.
[2] Pippel E, Woltersdorf J, Schneider R. Micromechanisms of metal dusting on Fe-base and Ni-base alloys[J]. Materials and Corrosion, 1998, 49: 309—316.
[3] Grabke H J, Müller-Lorenz E M, Kloewer J, et al. Metal dusting of nickel-based alloys[J]. Materials Performance, 1998, 37(7): 58—

63.
[4] 韩光伟, 冯 涤, 邓 波, 等. 镍基高温合金的灰化破坏[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2004, 24(2): 79—82.
Han Guangwei, Feng Di, Deng Bo, et al. Metal dusting of Ni-base superalloys[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2004, 24(2): 79—82.
[5] 李处森, 杨院生. 金属材料在高温碳气氛中的结焦与渗碳行为[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2004, 24(3): 188—192.
Li Chusen, Yang Yuansheng. Coking and carburizing behaviors of metal materials in high temperature carbon-containing atmosphere [J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2004, 24(3): 188—192.
[6] 王福会. 金属材料在高温含碳气氛中的腐蚀[J]. 腐蚀科学与防护技术, 1996, 8(4): 296—300.
Wang Fuhui. Corrosion of materials in carbonaceous atmospheres at high temperatures[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 1996, 8(4): 296—300.
[7] 居国忠, 吴宝娟, 於孝春, 等. 烷基苯 F301 加热炉炉管失效分析[J]. 南京化工大学学报, 1996, 18(4): 80—85.
Ju Guozhang, Wu Baojuan, Yu Xiaochun, et al. Preliminary analysis on failure of F301 furnace tubes in a linear alkylbenzene plant[J]. Journal of Nanjing University of Chemical Technology, 1996, 18(4): 80—85.
[8] 王福会, Yong D J. 微晶化对高温合金 K38G 在 CO 气氛中腐蚀的影响[J]. 金属学报, 1997, 33(10): 1035—1039.
Wang Fuhui, Yong D J. Resistance of K38G superalloy in CO-atmosphere[J]. Acta Metallurgica Sinica, 1997, 33(10): 1035—1039.
[9] Xu T, Tu S T, Song H J, et al. Pure bending testing of Cr—Mo alloy in metal dusting condition[C] // APCFS' 06, Hainan, 2006: 10—26.
[10] Hu G M, Zhou C Y, Xu T, et al. Simulation of carburizing concentration field of metal dusting corrosion with applied loading[C] // ES-IA9, Beijing, 2007: 19—30.
[11] Hibbit, Karlsson. ABAQUS user manual[M]. USA: Providence RI, 2003.
[12] 南京化工大学化工机械研究所. 金陵石化公司南京烷基苯厂 F301 炉管高温腐蚀失效分析[R]. 南京, 南京化工大学机械工程系, 1995.
[13] TsoLiang Teng, ChihCheng Lin. Effect of welding conditions on residual stresses due to butt welds[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 1998, 75(12): 857.
[14] 张国栋, 周昌玉. 焊接残余应力对焊接接头蠕变性能的影响[J]. 焊接学报, 2007, 28(8): 99—102.
Zhang Guodong, Zhou Changyu. Effects of welding residual stress on the creep of welded joint[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2007, 28(8): 99—102.

作者简介: 胡桂明, 男, 1981 年出生, 博士研究生. 主要从事高温材料可靠性、寿命预测的研究. 发表论文 8 篇.

Email: huberthgm@163.com

edge image. The weld seam center is picked up accurately by scanning the weld seam's left and right feature points after edge detection. In order to reduce tracking error, the coordinates offset of each small segment in weld track is divided into fifty parts, at the same time, an effective robot tracking control program is presented. The tracking experiment of sidelong S-shape weld seam line showed that it can satisfy tracking demand under normal conditions.

Key words: vision sensing; underwater welding; image processing; weld seam tracking

Microstructure observation and analysis of resistance spot welded joints of electrolytic cobalt starting sheet and lifting ear

ZHOU Xiaoling¹, LIU Chen², CAO Baoguo², GU Yonggang² (1. Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Yunnan 650093, China; 2. Jinchuan Group LTD, Jinchang 737100 Gansu, China). p37—41

Abstract In this study, commercially pure cobalt starting sheet and lifting ear with the same material were welded by resistance spot welding at different welding parameters. The microstructural measurements of welded joints had been investigated metallographically. The influence of several welding steps on the phenomena of parallel slipping bands, cross slipping bands and recrystallization in columnar grains had been analyzed and discussed. The result showed that, when the base metal is pure metal, proper low supercooling on the front of solid/liquid interface and low nucleation make the columnar grain easier to form; the applied electrode pressure during cooling process was mainly responsible for the formation of slip bands in the columnar grains. The larger the electrode pressure, the denser the slip bands; there are uncompleted dynamic recrystallization in the deformed columnar grains, parallel and crossing slip lines take the role of the growth steps of new crystal nucleation and growth.

Key words: electrolytic cobalt; resistance spot welding; microstructure; slip band; recrystallization

Finite element simulation on the effect of welding residual stress on the metal dusting corrosion of welded joint

HU Guiming, ZHOU Changyu, ZHANG Guodong, CHEN Cheng, LEI Na (School of Mechanical and Power Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China). p42—46

Abstract: Metal dusting is a phenomenon of high temperature corrosion, which occurs in carburizing environment. The first step of this corrosion is the diffusion of carbon towards metal matrix. A coupling calculating method on carbon diffusion has been developed based on the finite element program. By this method, the effect of welding residual stress on the carbon diffusion was numerically simulated for the as-welded condition and operation condition of the tube in heating furnace. The diffusion without the effect of stress was also taken into account and compared with those under residual stress. The results show that the highest welding residual stress gradient is near the heat-affected zone (HAZ), and the peak value of carbon

concentration exists near this zone. Also the low carbon concentration valley exists at the both sides of the peak value, which is caused by the diffusion of carbon to the high stress zone. In operation conditions, stress relaxation will happen and the effect of residual stress is decreased, which can delay the metal dusting corrosion of the tube. But the influence of the residual stress still exists, the zone near the weld of the tube should be inspected carefully during the inspection period.

Key words: metal dusting; high temperature corrosion; coupling; welding residual stress; finite element simulation

Welding arc emissive spectrum dynamic diagnosis and its application

HU Kunping, SONG Yonglun, XIA Yuan, CHEN Zhixiang (School of Mechatronics, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China). p47—50

Abstract Emissive spectrum diagnosis is important to study welding arc phenomenon. Limited by experimental condition in the past, the knowledge of spectrum dynamic diagnosis is not enough and most of the diagnosis results come from stable TIG arc. In this paper, based on modern ICCD spectrum instrument, a new type of arc spectrum dynamic diagnosis system is established and a new diagnosis method based on time-control and statistic-average is developed to observe AC dynamic welding arc continuously. The half-height width and wavelength shifting of AC TIG arc spectrum line can be observed, furthermore electron density and Ar atom excitation temperature can be obtained. This dynamic observation is quite significant to study the time-characteristic of arc (especially alternative current arc).

Key words: AC dynamic arc; emissive spectrum; dynamic diagnosis; time-control and statistic-average method

Comparative analysis on predictions of the geometric form of laser cladding

ZHAO Hongyun, YANG Xianqun, Shu Fengyuan, XU Chunhua, WU Jianqian (School of materials science and engineering, Harbin Institute of Technology at Weihai, Weihai 264209, Shandong China). p51—54, 59

Abstract A comparison between the analytical methods of multiple linear regression analysis (MLRA) and genetic algorithm optimizing neural networks was made for predicting the geometric form of laser cladding. The corresponding relationship between main processing parameters (laser power, scanning velocity and powder mass flow rate) and the geometric form of clad (cladding width, height and depth of the penetration into the substrate) was affirmed. The result proved the feasibility of using MLRA to predict the geometric form of laser cladding and the average relative error of five test values was 2.49%. In comparison, the former is convenient in application by which functional relationship between parameters such as width, height and depth of the penetration and so on. While the latter produces a better precision and a visible function relationship with a more complex operation process. Often the MLRA method is usual-