

镍基高温合金小截面方管焊接温度场的数值模拟

王俊恒, 张广军, 高洪明, 吴 林
(哈尔滨工业大学 现代焊接生产技术国家重点实验室, 哈尔滨 150001)

摘 要: 利用无接触简化模型进行小截面方管并行排列焊温度场的计算, 模拟结果与测量结果的对比表明, 此模型应用到小截面方管温度场的数值模拟中存在很大误差。从热和力的角度对小截面方管与胎具间的关系进行简单分析, 解释了误差产生的原因。并以此为基础, 建立了小截面方管并行排列焊的接触模型, 采用直接约束法处理焊接过程中小截面方管与胎具的接触传热与受力问题, 得到了焊接温度场的变化规律和分布情况。结果表明, 在焊缝附近形成了一个“T”字形温度场; 焊后冷却一段时间后, 出现两端温度低、中间温度高的现象。这种情况与实际的焊接状况较一致。

关键词: 小截面方管; 接触; 直接约束法; 温度场

中图分类号: TG404 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2007)07-089-05



王俊恒

0 序 言

某产品由镍基高温合金小截面方管并行排列焊接而成。该焊件具有壁薄、焊缝密集、受热易变形等特点, 给焊接生产带来很大困难。常常因为焊接变形, 导致工艺参数不好掌握, 出现焊穿、焊漏、未焊透等缺陷^[1]; 焊接时, 不仅由于方管向上挠曲, 导致钨极与工件短路形成夹钨, 还由于横向收缩累积导致间隙过大, 焊接工艺参数没有及时调整使焊接过程被迫中断。如何解决实际工程中的这些问题, 成为当前十分迫切的需要。

焊后接头区域的变形及残余应力分析, 是焊接生产比较关心的问题, 数值模拟作为一种手段, 对这些方面可提供有效的预测, 但这要建立在准确的温度场基础之上^[2-3]。因此, 为弄清小截面方管焊接过程中温度场、应力场及变形的规律, 给实际焊接生产提供理论性指导, 有必要对方管焊接问题进行数值模拟方面的研究。在数值模拟方面, 已有很多人对焊接过程的数值模拟进行研究和分析^[4-10], 但研究的多是平板、圆管对接之类的典型结构, 而非典型结构, 尤其小截面方管并行排列焊结构却鲜有报道。

作者在无接触模型与实际情况不相符合的情况下, 针对小截面方管并行密排焊的结构特点及其与胎具的相互关系, 建立了小截面方管与胎具的接触有限元简化模型, 采用非线性有限元方法, 对小电流 TIG 焊接条件下, 方管与胎具间的动态接触与分离

进行了模拟, 在变接触热传导的基础上, 对方管的温度场进行了模拟, 得到了焊接过程中的温度变化规律和分布情况。

1 焊接温度场的初步模拟及试验

1.1 小截面方管焊接温度场的初步模拟

小截面方管的有限元模型和焊接方向如图 1 所示, 模拟时取方管长度 $l=120\text{ mm}$, 引弧点和熄弧点与两端面分别相距 10 mm 。焊接工艺参数如表 1 所示。

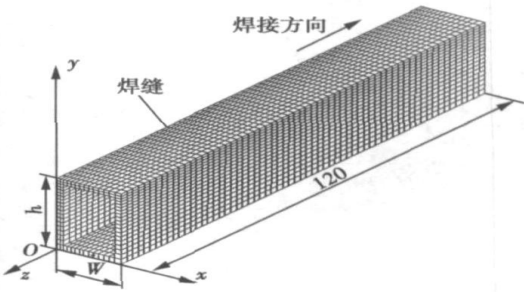


图 1 小截面方管的有限元模型(mm)

Fig 1 Finite element model of little section square tube

由于小电流 TIG 焊接对熔池的冲击力比较小, 所以对于这种焊接方法在初始计算时依据前人的经验采用 Gauss 热源模型。下面为 Gauss 热源模型表达式。

表 1 焊接工艺参数
Table 1 Welding parameters

焊接电流 I/A	电弧电压 U/V	焊接速度 $v/(mm \cdot s^{-1})$	气体流量 $q/(L \cdot s^{-1})$
18	9	2	12~14

$$q(r)=q_m\exp(-Kr^2), \tag{1}$$

式中： $q(r)$ 为热流密度； q_m 为加热斑点中心最大热流； K 为能量集中系数； r 为任一点到加热斑点中心的距离。

温度边界条件包括接触传导、对流和辐射三种类型，用以反映焊件与周围环境，以及焊件与工作台之间的热量传输关系。

对于对流和辐射边界条件，利用总换热系数来处理，关系式为

$$H=2.2(T_w-T_c)^{0.25}+4.6\times 10^{-8}(T_w^2+T_c^2)(T_w+T_c), \tag{2}$$

式中： H 为换热系数； T_w 为工件温度； T_c 为环境温度。

位移边界条件则定义了起弧端和收弧端 u_x , u_y , u_z 方向上的位移约束，使其能反映出焊件与工装夹具之间的装夹关系。

焊接是一个动态的局部热加载过程，如何选取材料的热物理性能参数，使其较为精确地反映出材料的物理及力学性能与温度之间的非线性变化关系^[1]，对模拟结果的准确性起决定性的作用。模型采用的参数部分引用了文献[12]的数据，如图2所示，并对低温参数曲线做适当的外推，得出高温参数。

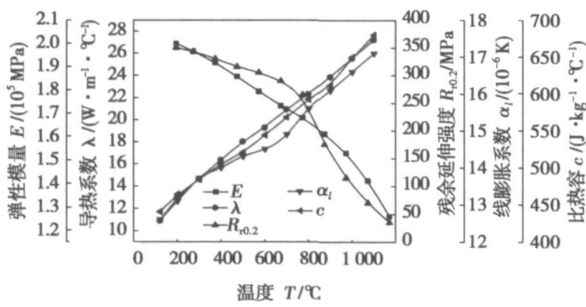


图 2 材料的热物理性能参数
Fig. 2 Thermal physical properties parameters

1.2 小截面方管焊接温度场的测量试验原理

温度场测量试验采用镍铬—镍硅 K 型热电偶，在焊件与焊道垂直的中截面和距起始端 90 mm 的截面上分别取 3 个点进行温度的测量。测量点排布如图 3 所示。其中 T_1 距离上表面 1.6 mm， T_2 距离方管右侧表面 3.8 mm， T_3 距离方管右侧表面 1.2 mm。

而 T_4 , T_5 , T_6 分别与 T_1 , T_2 , T_3 位置相对应。

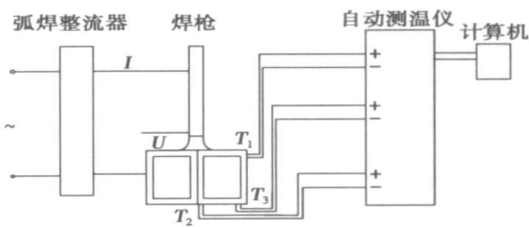


图 3 焊接热循环测定原理示意图(中截面)
Fig. 3 Schematic diagram of temperature measuring

1.3 小截面方管焊接温度场的测量试验结果

利用无接触模型得到的热循环试验结果与计算结果分别如图 4 和图 5 所示。通过两图比较可以看出，两截面节点的热循环趋势是相同的，焊接热源到达中截面之前，温度变化不大，之后温度快速升高，随着焊接热源远离中截面，温度较快地下降，但不及升温时迅速，焊接后随着冷却的进行，温度变化趋于平缓。但是试验测得的 T_1 最高温度约 630 °C，模拟结果却在 770 °C 以上，误差很大。且没有反映出

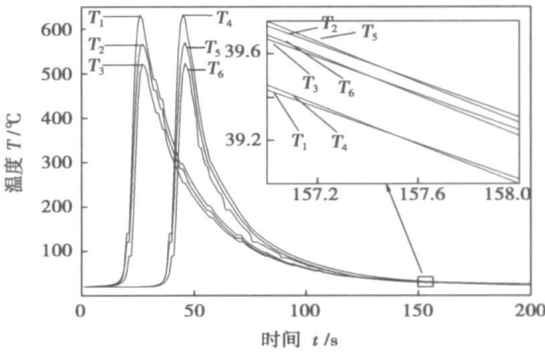


图 4 测量点试验测得的热循环曲线
Fig. 4 Measured heat cycle curve of test points

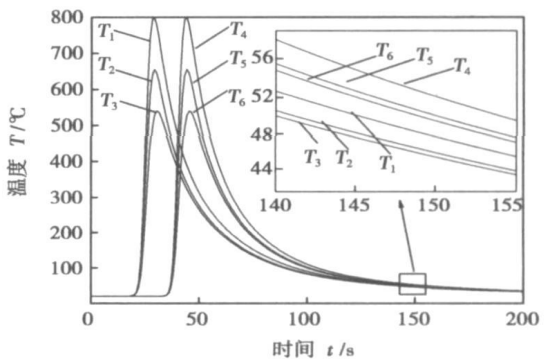


图 5 测量点计算得到的热循环曲线
Fig. 5 Computed heat cycle curve of test points

90 mm 截面温度下降快, 在冷却 120 s 左右的时间后与中截面温度曲线有交叉的情况。

图 6 是冷却 125 s 各种拘束条件未去除时所得到的变形图, 可以看出, 冷却过程中, 在夹紧装置未去除的情况下, 模拟结果出现了向下的挠曲, 这与实际的焊接情况严重不符, 因为胎具和夹紧装置相配合, 将阻止其向下挠曲。综合以上模拟结果和分析, 有必要对无接触模型进行修正。

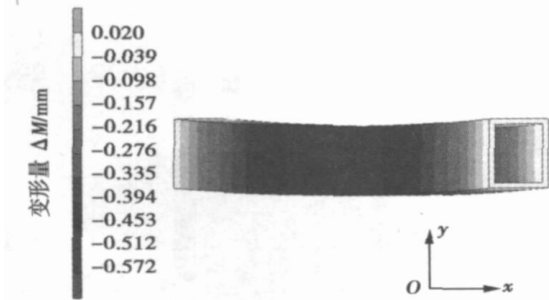


图 6 冷却过程中各种拘束条件未去除时的变形图
Fig. 6 Distortion of cooling process without removing constraints

2 误差分析

为了考察误差产生的原因, 文中从热和力的作用两方面对小截面方管焊接过程模拟的误差进行了分析。

就热作用而言, 焊接过程中, 方管不仅与周围场环境进行辐射和对流, 更与胎具接触进行热传导, 在接触面其传热能力是辐射对流的 1/100 ~ 1/10, 而模拟中却用总换热系数统一处理, 因此温度误差较大。

就力作用而言, 焊接过程中, 方管向下挠曲将受到胎具的阻碍作用, 而向上则可自由挠曲, 没有接触模型无法解决这种复杂的受力情况, 所以当夹紧装置的拘束还没有去除时, 方管已经表现出向下的挠曲了, 与实际情况出现较大的差异。因此, 有必要采用接触模型来进行数值模拟。

3 接触有限元模型的建立

小截面方管的有限元模型和焊接方向如图 7 所示, 模拟时所焊方管长度 $l=120\text{ mm}$, 引弧点和熄弧点与两端面分别相距 10 mm。

从力学分析角度看, 接触是边界条件高度非线性的复杂问题, 需要准确追踪接触物体之间的运动

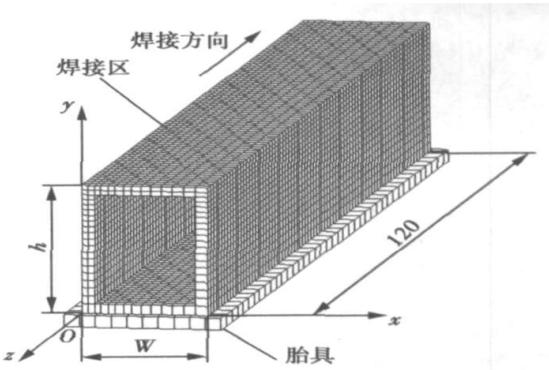


图 7 小截面方管的接触有限元模型
Fig. 7 Contact finite element model of little section square tube

以及相互作用, 包括正确模拟接触面之间的摩擦行为和可能存在的接触间隙传热。

由于材料具有热胀冷缩的属性, 焊接过程中, 两端受拘束的方管在能量集中的热源作用下, 上部焊缝附近金属温度急剧升高, 导致该部分金属急剧伸长, 而此时, 对应的下部金属温度却相对较低, 导致上下伸缩不一致, 使方管中部向上挠曲与胎具分离产生间隙, 但间隙的位置和高度却是动态变化的, 且无法预知, 因此, 采用直接约束法来解决方管与胎具的接触问题, 该方法能根据物体的运动约束和相互作用自动探测接触区域, 施加接触约束。这样就能够及时地反映接触与分离的动态变化情况, 并进行间隙传热分析。将方管设置为变形接触体, 胎具设置为有热传导的刚体, 采用以下表达式来对方管进行接触传导分析。

$$q=H_{cv}(T_2-T_1)+H_{nc}(T_2-T_1)^{B_{nc}}+\sigma\eta_e(T_2^4-T_1^4)+[H_{et}(1-d_q)+H_{bl}\cdot d_q](T_2-T_1), \tag{3}$$

式中: q 是接触传导时的热流密度; H_{cv} 是与附近场的对流系数; H_{nc} 是与附近场的自然对流系数; B_{nc} 是与自然对流相关的指数; σ 是斯忒藩-玻耳兹曼常数; η_e 是对附近场的辐射率; H_{et} 是接触体热传导系数; H_{bl} 是与间隔距离相关的热传导系数; $d_q=d/d_n$, d 是两物体之间的距离; d_n 是用户自定义的附近场的距离; T_1, T_2 是物体温度。

4 修正后计算结果比较与分析

4.1 计算结果比较

利用最后得到的有接触模型进行了与试验同样条件下温度场的数值模拟, 得到的热循环曲线计算结果如图 8 所示。

将此结果与图 4 相比较, 峰值温度差异如表 2

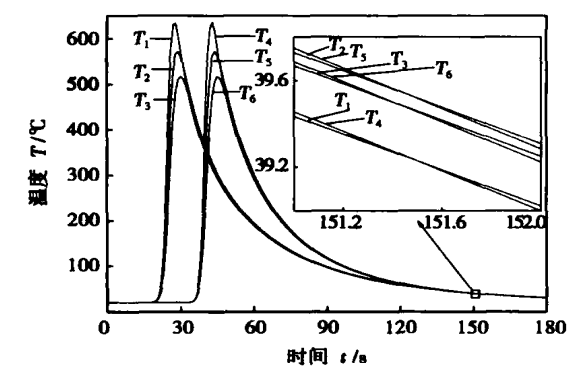


图 8 测量点模拟得到的热循环曲线
Fig 8 Simulated heat cycle curve of test points

所示,由最后误差分析可看出二者最大差异不超过 10℃,二者吻合得较好。且从曲线和峰值对比可以看出,试验和模拟结果吻合较好,且在冷却 120 s 左右的时间后两截面的温度曲线有交叉。

表 2 计算结果与试验结果峰值温度对比(℃)

Table 2 Peak temperature of simulation and experiment

采集点	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6
计算 θ_c	632	572	518	636	573	517
试验 θ_c	631	567	521	633	570	523
误差 e	1	5	-3	3	3	-6

从图 9 可以看出,焊后冷却过程中,在夹紧装置未去除的情况下,模拟结果不仅没有出现向下的挠曲,而且出现了工厂实践中呈现的间隙,因此结果比较合理。因此,可以用接触模型来进行温度和变形的规律分析。

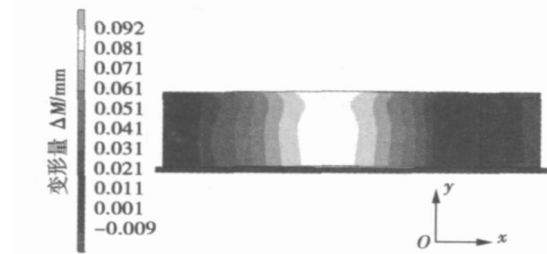


图 9 冷却过程中各种拘束条件未去除时所得到的变形图
Fig 9 Distortion during cooling process without removing constraints

4.2 温度场分析

在能准确计算温度场的基础上,为了更明确地得到小截面方管并行排列焊温度场的特点,有必要

对其温度场进行分析。
图 10 是焊接温度场及熔池模拟结果图,图 11 是焊接熔池试验结果图。可以看出,模拟得到的熔深和熔宽与试验基本一致,其等温线的空间包络形状与常规平板对接焊接的温度场不同,焊缝的右侧温度分布呈现“Γ”字形,对称之后的全貌将呈现出“T”字形温度场,不仅包括常规薄板对接焊接时呈现的双椭球中心水平片层,还包括双椭球中心竖直片层。

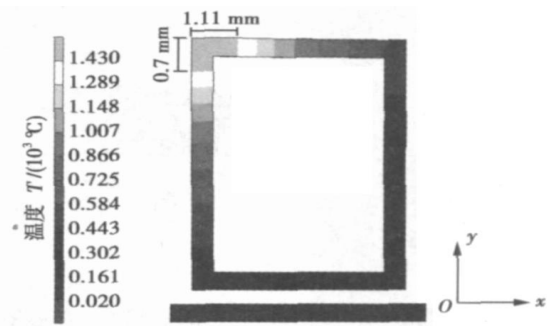


图 10 焊接温度场及熔池模拟结果
Fig. 10 Simulated temperature field and welding molten pool

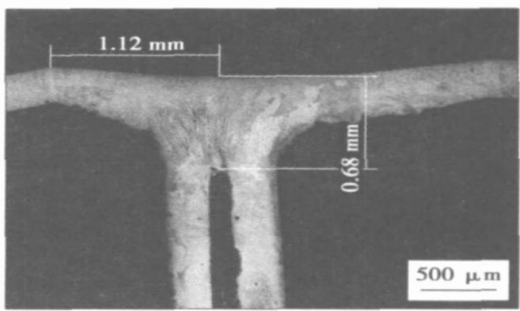


图 11 焊接熔池试验结果
Fig. 11 Measured welding molten pool

图 12 是冷却至 65 s 时温度场的模拟结果。可以看出,当焊缝冷却一段时间后,在沿焊缝的方向上,温度在方管的两端部(引弧端和熄弧端)比中部的要低。这是由于材料具有热胀冷缩的属性,焊接过程中在能量集中的热源作用下,方管上部热源附近金属温度急剧升高,导致该部分金属伸长严重,对应的下部金属温度相对较低,这样就导致了方管向上挠曲,使得中部与胎具产生了分离,传热方式发生改变,由接触热传导变为非接触的热传递方式,传热能力也急剧下降,降为接触传导的 1/100~1/10。同时,方管两端由于受到拘束,始终与胎具保持了良好的接触状态,能进行良好的接触热传导。这样就

导致了方管两端先冷却、中间后冷却的现象产生, 与实际的生产状况一致。

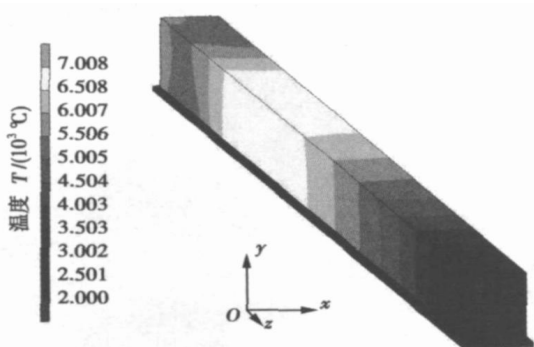


图 12 焊接完成后冷却 65 s 温度场分布的模拟结果

Fig. 12 Simulated temperature field when cooling 65 s

5 结 论

(1) 采用无接触模型模拟小截面方管并行密排 TIG 焊接温度场, 会产生很大偏差, 且变形与实际情况不一致, 必须进行修正。

(2) 在考虑小截面方管与胎具接触的基础上, 建立了小截面方管 TIG 焊接的接触模型, 采用直接约束法来解决方管与胎具的接触问题, 模拟结果与试验结果吻合良好。

(3) 得到了小截面方管并行排列焊温度场的变化规律和分布情况。结果表明, 焊接过程中, 在能量集中的热源作用下, 在焊缝附近形成了“T”字形温度场; 焊后冷却一段时间后, 将出现两端温度低、中间温度高的现象。这种情况与实际的焊接状况较一致。

参考文献:

- [1] 陈 念, 孙振国, 陈 强. 基于视觉图像传感的精密脉冲 TIG 焊焊缝跟踪[J]. 焊接学报, 2001, 22(4): 17—20.
- [2] 孟庆国, 方洪渊, 徐文立, 等. 双丝焊热源模型[J]. 机械工程学报, 2005, 41(4): 110—113.
- [3] 陈翠欣, 李午申, 王庆鹏, 等. 焊接温度场的三维动态有限元模拟[J]. 天津大学学报, 2005, 38(5): 466—470.
- [4] 汪建华, 戚新海. 三维瞬态焊接温度场的有限元模拟[J]. 上海交通大学学报, 1996, 30(3): 120—125.
- [5] 朱援祥, 张小飞, 杨 兵. 基于有限元的多次补焊焊接残余应力的数值模拟[J]. 焊接学报, 2002, 23(1): 65—68.
- [6] 李冬林, 于有生, 温家伶. 雌焊温度场的三维动态有限元模拟[J]. 武汉理工大学学报, 2002, 26(5): 671—673.
- [7] 李亚江, 沈孝芹, 孟繁军. 高强度钢焊接区拘束应力的有限元分析[J]. 焊接学报, 2002, 23(5): 57—64.
- [8] Tsai C L, Feng Z L. A computational analysis of thermal and mechanical conditions for weld metal solidification cracking[J]. Welding Research Abroad, 1996, 42(1): 34—141.
- [9] 鹿安理, 史清宇, 赵海燕. 厚板焊接过程温度场、应力场的三维有限元数值模拟[J]. 中国机械工程, 2001, 12(2): 183—185.
- [10] Ravichandran G, Raghupathy V P, Ganesan N. Analysis of temperature distribution during circumferential welding of cylindrical and spherical components using the finite element method[J]. Computers & Structures, 1996, 59(2): 225—255.
- [11] Luo X J. Study on hot cracking in heat-affected zone of nickel-base super alloy, Inconel718 by laser beam welding[D]. Philosophiae Doctor Dissertation, Hiroshima Japan; Hiroshima University, 1999.
- [12] 冶 军. 美国镍基高温合金[M]. 北京: 科学出版社, 1978.

作者简介: 王俊恒, 男, 1973 年出生, 博士研究生。主要从事焊接自动化、机器人技术、焊接结构及工艺等领域的研究工作。发表论文 2 篇。

Email: jhenrysc@hit.edu.cn

relationship between the energy density and the welding time was approximately linear. And the welding time as well as the axial shortening increased with the energy density. Furthermore increasing the energy density produced an increase in the temperature of the interface and also an increase in the flash generated during the welding process. The calculated data of the welding time and axial shortening during welding were in good agreement with the measured data.

Key words: inertia friction welding; GH4169 alloy; energy density; numerical simulation

Pulsed MIG welding equipment based on DSP control

YANG Wenjie, LIAO Ping (School of Materials Science and Engineering, Jiamusi University, Jiamusi 154007, Heilongjiang, China). p77—80

Abstract: The structure of pulsed MIG (metal inert-gas) welding equipment, which adopts inverter technology using IGBT, is designed based on DSP chip TMS320F2812 and mainly used on aluminum alloys. Welding control system comprises hardware and software, using C language welding program, and it reduces difficulty of control system exploitation. Scheduling control, sampling disposal of feedback signals and digital PI modulation are achieved through program control, and this controls veraciously welding process. Experimental results validated that this welding equipment is character with high control precision and stability, it can obtain better appearance of weld.

Key words: pulsed metal inert-gas; digital signal processing; inverter

Effect of carbon and nitrogen on microstructure and properties of austenite weld metal

ZHANG Tianhong, DU Yi, ZHANG Junxu (Luoyang Ship Material Research Institute, Luoyang 471039, Henan, China). p81—84, 88

Abstract: Effect of carbon and nitrogen on microstructure and properties of austenite weld metal were studied by scanning electron microscope, transmission electron microscope and other methods. With increasing C content, the quantity of $M_{23}C_6$ carbide particles at austenite grain boundaries increased and the size of $M_{23}C_6$ enlarged. The tensile strength of deposited metal increased, however, the toughness decreased markedly. When the content of C increases to a high level, the solution strengthening effect doesn't express anymore, but the quantity and size of carbide particles formed at austenite grain boundaries is still increasing. The toughness and intergranular corrosion resistance decreased continuously. With increasing N content, tensile strength increased, at the same time, the toughness kept at high level. Owing to small quantity of carbide particles formed at austenite grain boundaries, intergranular corrosion resistance displayed good performance.

Key words: austenitic electrode; tensile strength; toughness; carbide

$CO_3^{2-} - HCO_3^-$ stress corrosion test of welded joint for X80 pipeline steel

WANG Bingying, HUO Lixing, ZHANG Yufeng,

WANG Dongpo (School of Material Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China). p85—88

Abstract: The susceptibility to stress corrosion cracking (SCC) of the welded joint of X80 pipeline steel in solution of 0.5 mol/L Na_2CO_3 and 1mol/L $NaHCO_3$ was investigated by means of slow strain rate testing (SSRT) and scanning electron microscope. The results showed that all tensile test specimens cracked in welded joint and heat affected zone (HAZ). The general tendency in the studied potential range was that with positive increasing of potential, reduction in area, fracture time and elongation of specimens increased, and mean crack growth rate of SCC and the susceptibility to SCC decreased. At cathodic potentials, obvious quasi-cleavage fracture was observed in the fracture area of specimens. At open circuit potential and anodic potential, ductile fracture was the common fracture pattern. The mechanism of the stress corrosion could be explained with anodic solution theory and hydrogen induced cracking.

Key words: X80 pipeline steel; welded joint; slow strain rate testing; stress corrosion crack

Numerical simulation of welding temperature distribution for Ni-base superalloy little section square tube

WANG Junheng, ZHANG Guangjun, GAO Hongming, WU Lin (State Key Laboratory of Advanced Welding Production Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China). p89—93

Abstract: The welding temperature field of Ni-based superalloy little-section rectangular tube is calculated by using non-contact model. After comparing the simulating results with the measuring ones it indicates big errors when applying this model to the temperature field of little section rectangular in welding simulation. By analyzing the relationship between little-section rectangular tube and welding positioner in the view of mechanic and thermal perspectives, the reason for the errors of simulating results is found out. Based on this reason, the contact model is presented. The heat transfer and stress analysis between little-section rectangular tube and welding positioner are simulated by using direct constraints method, and then the laws of the temperature distribution are gotten. The experimental results show that a "T" shaped temperature-field distribution is formed in the vicinity of the weld. After cooling for a period of time, the temperature distribution of the weldments shows that a lower temperature region exists at both ends, and a higher temperature region exists in the middle of the tube. The computed results are in good agreement with the experimentally measured results.

Key words: little-section rectangular tube; contact; direct constraints method; temperature field

Microstructures and crack resistance of armoured steel welded by CO_2 shielded arc welding

ZHU Xiaoying, TAN Wei, ZHAO Yang (National Key Laboratory for Remanufacturing, Academy of Armored Forces Engineering, Beijing 100072, China). p94—96

Abstract: The armoured steel welded joints were prepared by CO_2 shielded arc welding with modified H10MnSi wire and H08Mn2Si wire respectively. The microstructures of the welded