

聚乙烯管道电熔接头焊接过程温度场分析

郑津洋¹, 施建峰¹, 郭伟灿^{1,2}, 尹宝², 石平², 王卉^{1*}

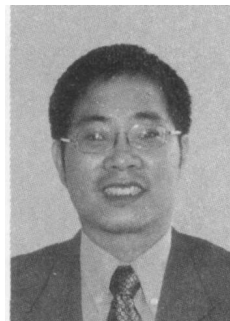
(1. 浙江大学 化工机械研究所, 杭州 310027;

2. 浙江省特种设备检验研究院, 杭州 310020)

摘 要: 电熔焊接是聚乙烯燃气管道常用的连接技术之一。电熔焊接过程的温度场分布对接头的强度和寿命有着重要的影响。文中建立了聚乙烯管道电熔焊接接头的一维非稳态整体传热模型, 综合考虑聚乙烯比热容、密度和热导率的温度非线性, 电阻丝与聚乙烯的热导率以及实时输入功率随温度变化对温度场的影响。结果表明, 利用文中的方法可以准确地预测电熔焊接过程的温度场, 跟踪焊接功率的实时变化情况。

关键词: 聚乙烯管道; 电熔接头; 温度场; 数值模拟

中图分类号: TQ320.67 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2009)03-0005-05



郑津洋

0 序 言

聚乙烯管道以其质轻价廉、比强度大、比刚度高以及耐磨损、耐腐蚀、绝缘等优势正逐渐代替金属管道, 成为埋地燃气管道发展的主流^[1]。电熔焊接接头在聚乙烯管道连接中大量使用, 其质量直接关系到整个管道系统运行的安全性。研究表明^[2-4], 电熔焊接过程接头内部的压力场形成主要依赖于焊接温度场。焊接温度场与压力场共同影响着焊接界面之间高分子的扩散与缠结。焊接后接头的强度、韧性以及断裂性能等都依赖于界面高分子之间的扩散以及缠结程度。因此焊接温度场的研究对焊接过程的模拟以及提高接头力学性能具有重要意义。

国内外许多学者研究了电熔焊接过程的温度场。师春生等人^[5]建立了一维轴对称传热模型, 用有限差分方法计算温度场, 然而模型中没有整体考虑管材与套筒间的相互影响, 且忽略了聚乙烯材料性质的温度非线性。Nakashiba, Nishimura^[6,7], Fujikake 等人^[8]用有限元方法建立了电熔接头的整体传热模型, 考虑了聚乙烯材料的热导率、比热容、密度等随温度变化对结果的影响, 但选取一个恒定输入功率计算热流密度, 且没有给出该计算输入功率的合理性以及与实际功率的比较。实际分析计算过程中焊接输入功率是对焊接温度场影响最大的因素

之一, 如果焊接模型无法准确预测电源实际输入功率的数值及其变化情况, 那么在此基础上得到的温度场结果是难以与实际相符的。

文中运用传热学理论, 综合考虑了聚乙烯比热容、密度和热导率, 电阻丝与聚乙烯间的接触热导以及焊机输入功率等因素随温度变化的影响, 建立了聚乙烯管道电熔接头一维非稳态整体传热模型。采用 Skeel 方法对微分方程进行数值求解。通过布置热电偶测量焊接接头中管材与套筒界面的温度, 并利用电熔焊机测量不同焊接电压下焊接过程的输入热量。温度场与热量测量试验结果与预测值十分吻合, 模型可用于接头温度场预测和焊接工艺参数优化。

1 焊接温度场建模

1.1 电熔焊接原理

聚乙烯管道电熔接头如图1所示。电熔焊接的基本原理是通过在加热电阻丝两端加一恒定电压, 利用电阻丝的焦耳效应发热将套筒与管材壁面附近的聚乙烯熔融并粘接在一起。电熔焊接存在诸多非线性影响因素。焊接开始后电阻丝温度迅速升高, 由于焊接电压有效值保持不变从而使得输入功率随之迅速下降。随着焊接过程进行, 电阻温度继续升高, 输入功率也随着继续下降。文中称这种现象为焊接功率的温度非线性。随着焊接界面温度的提高, 聚乙烯逐渐变软至完全熔融, 这个过程中聚乙烯

的热导率、密度都随温度逐渐变小,比热容在温度接近熔融温度附近迅速升高,待聚乙烯完全熔融后又恢复到接近原来的数值。内层的聚乙烯受热膨胀,使得熔融区压力随之上升,电阻丝与聚乙烯的接触热导随着接触界面的压力增加而增大。

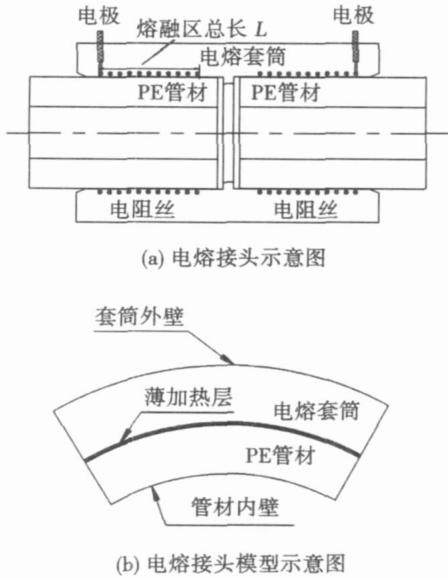


图 1 电熔接头示意图
Fig 1 Electrofusion joint

1.2 基本假设

文中对电熔焊接接头做如下假设。

- (1) 焊接模型为轴对称且热量仅沿径向传输,忽略两端热量损失。
- (2) 将电阻丝假设为等体积的薄加热层,加热层厚度为

$$\delta=\frac{n\pi r_s^2}{2l_c}$$

式中: r_s 为电阻丝半径; l_c 为单边布线区长度。

- (3) 加热层与聚乙烯界面的热导 h_c 与温度的函数关系^[9, 10] 为

$$h_c=\begin{cases} 2\,500e^{\frac{T}{T_m}-1}, & T<T_m \\ 4T+1\,920, & T\geq T_m \end{cases} \quad (1)$$

式中: T 为聚乙烯界面温度; T_m 为聚乙烯熔融温度。

- (4) 电阻丝发热量全部用于加热聚乙烯温度,则电阻丝—聚乙烯界面传热方程可表示为

$$q=h_c(T_j-T_c) \quad (2)$$

式中: T_j 为电阻丝温度; T_c 为与其接触的聚乙烯的温度; h_c 由(1)式确定; q 为电阻丝产生的总热流密度。

- (5) 电阻丝的电阻随温度线性增加^[11], 可表示为

$$R=[1+\alpha(T-T')]R' \quad (3)$$

式中: R 为 T 温度时电阻; R' 为标定温度 T' 时的电阻; α 为电阻随温度变化系数。

1.3 总体控制方程

根据传热学理论^[12], 柱坐标下的热传导控制方程为标准贝塞尔方程。对于温度与轴线及径向无关的一维模型而言, 电熔焊接过程的控制微分方程可简化为

$$\frac{\partial T}{\partial t}=\frac{k}{\rho C_p}\left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial T}{\partial r}\right), R_i<r<R_o \quad (4)$$

式中: k, ρ, C_p 分别为聚乙烯热导率、密度以及比热容, 其值都是温度的函数; R_i, R_o 分别为管材内半径和套筒外半径。

焊接接头的管材内壁与套筒外壁都与空气直接接触形成对流换热边界条件。对流边界条件控制方程为

$$k\frac{\partial T}{\partial r}-h_1(T-T_0)=0, \quad r=R_i \quad (5)$$

$$k\frac{\partial T}{\partial r}+h_2(T-T_0)=0, \quad r=R_o \quad (6)$$

式中: h_1 为管材内侧对流换热系数; h_2 为套筒外侧对流换热系数; T_0 为环境温度。

接头内部的电阻丝产生的总热流密度分别向内部的管材侧与外部的套筒侧扩散, 可表示为

$$q_1=k\frac{\partial T}{\partial r}, r=R_c-\frac{\delta}{2} \quad (7)$$

$$q_2=k\frac{\partial T}{\partial r}, r=R_c+\frac{\delta}{2} \quad (8)$$

$$q=q_1+q_2$$

式中: R_c 为电阻丝布线半径; q_1 为流入管材的热流密度; q_2 为流入套筒的热流密度。

电阻丝产生的总热流密度为

$$q=\frac{U^2}{4\pi R_c R l_c} \quad (9)$$

式中: U 为焊机输出的恒定电压; R 为随温度变化的电阻值, 由式(3)确定。

结合式(2), 式(3), 式(9), 输入热流密度与温度关系式为

$$q=\frac{U^2}{4\pi R_c l [1+\alpha(\frac{q}{h_c}+T_c-T')] R'} \quad (10)$$

上述式(3)~式(10), 即为焊接过程接头传热控制方程。

2 试验研究

2.1 分析模型实例

以 PE80SDR11DN90 系列电熔接头为例, 焊接过

程中控制参数及其结构尺寸见表 1。聚乙烯在熔融温度以下热导率 k 的经验公式^[3] 为

$$k=0.17+5(\rho+0.90)-0.001T$$

式中: ρ 为聚乙烯密度典型值 取 0.93 g/cm^3 ; T 为温度.

表 1 焊接工艺参数及结构尺寸
Table 1 Welding parameters and joint structure

焊接电压 U/V	标准焊接时间 t/s	20℃时电阻值 R_0/Ω	电阻温度系数 $\alpha/(10^{-3}K^{-1})$	电阻丝直径 d/mm	电阻丝布线半径 b/mm	套筒外半径 c/mm	管材内半径 a/mm	布线圈数	单边布线长度 L/mm	套筒外侧对流换热系数 $h_1/(W\cdot m^{-2})$	管材内侧对流换热系数 $h_2/(W\cdot m^{-2})$
39.5	110	0.83	3.93	0.58	46	55	36.8	41	40	25	15

当温度超过熔融温度时, 取热导率为 0.24. 热导率与密度对温度曲线如图 2 所示. 由图 2 中可以看出, 由于聚乙烯受热熔融使结晶相转变为相对均一的无定形相, 产生更多的自由体积, 在 125℃附近聚乙烯的密度迅速下降, 热导率也趋于平缓.

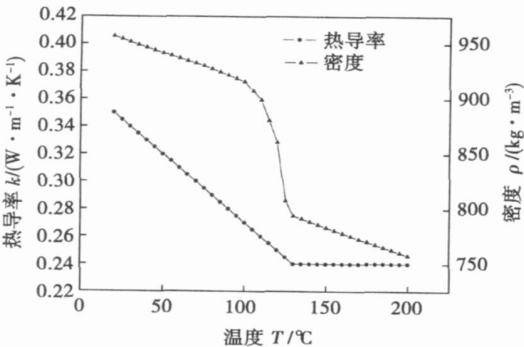


图 2 聚乙烯热导率以及密度随温度变化曲线
Fig. 2 Thermal conductivity and density of polyethylene (PE)

2.2 材料比热容测量

聚乙烯的比热容—温度曲线是模型分析中最关键的参数. 不同型号的聚乙烯, 比热容—温度性质不同, 焊接过程形态有非常大的差异. 差示扫描量热法(DSC)是在程序控制温度下, 测量输给试样和参比物的功率差与温度关系的一种技术, 分为功率补偿型(power compensation)和热流型(heat flux)两种. 文中使用的 perkin elmer 功率补偿型的 DSC 7, 测量时升温速度为 10℃/min, 采用直接法测量. 测量样品为菲纳的聚乙烯燃气管专用料 3802B. 测量结果如图 3 所示.

2.3 焊接界面温度

利用热电偶测量管材—套筒的界面温度. 焊接前先刮擦管材表面的氧化皮, 然后在将要埋设热电偶的位置用刮刀刮出一小槽, 小槽距离端部约 25 mm, 使探头能落在布线区内, 槽长×宽×深约为 15 mm×3 mm×1 mm. 将直径约 0.6 mm 的 K 型热

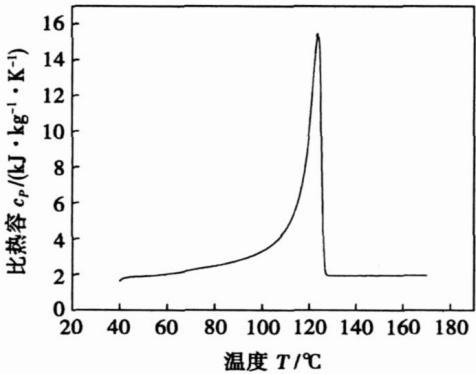


图 3 聚乙烯比热容随温度变化的 DSC 测量结果
Fig. 3 DSC results of specific heat capacity of PE

电偶探头压于小槽端部, 用胶布将其固定于管材表面. 最后将管材缓慢插入套筒中, 插入过程需防止探头被蹭出小槽. 热电偶引出端连接 Data Logger UCAM—60A 温度自动采集系统, 该系统能与电脑进行实时通信, 将采集到的温度数据同步传回电脑进行保存和显示. 温度每隔 1 s 记录一次. 试验装置如图 4 所示.

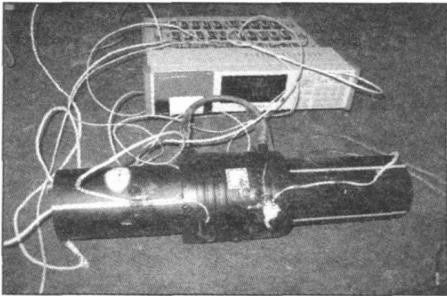


图 4 温度测量装置
Fig. 4 Automatic temperature measuring setup

2.4 焊接过程输入热量

焊机测量焊接过程的输入热量. 试验焊机为 THERMOPLAST 聚乙烯管道电熔接头专用焊机. 焊机通过斩波控制输出电压. 内部芯片可测量焊接过

程电流幅值以及电流与电压过零相差,从而求得焊接过程的输入热量值.焊机可以手动输入焊接电压与焊接时间.分别设置焊接电压为 21~45 V 的 8 个数值,测量不同焊接电压下焊接过程输入热量.焊机过程每隔 1 s 记录一次数据.

3 模型求解与结果对比

3.1 模型求解

电熔焊接过程的热传导控制方程十分复杂,其本质上是强非线性的边值问题.文中采用基于 Skeel 等提出的求解空间一维抛物线型的偏微分方程数值计算程序包.该程序包已被编入 NAG (numerical algorithms group) 库中专门用于求解空间一维偏微分方程. Skeel 方法是在有限单元法的基础上,为提高一维空间离散变量抛物线型偏微分方程的数值求解精度,采用分段的非线性 galerkin/ petrov-galerkin 方法得到的新算法^[14].当材料参数以及输入热量都为常数时,用该方法求解的温度场结果与解析解结果最大偏差不超过 0.5 ℃,可见具有足够精度.

3.2 试验验证

3.2.1 焊接温度场测量

测量焊接界面温度.焊接条件为 39.5 V 输入电压,持续 110 s,接头初始温度和环境温度都为 16 ℃.焊接界面温度的实测值与理论值对比如图 5 所示.测量值曲线与理论分析值曲线趋势基本一致,焊接到 80 s 时候,理论值开始略高于实测值.这主要是因为理论模型假设热量仅沿着径向传输,而实际上确有少量热量沿着轴线向两侧传输,随着时间的推移,这部分热量逐渐累积从而使径向测量温度略低于理论模型结果.焊接终点时理论分析温度为 205 ℃,而实测为 197 ℃,其最大误差不超过 5%.

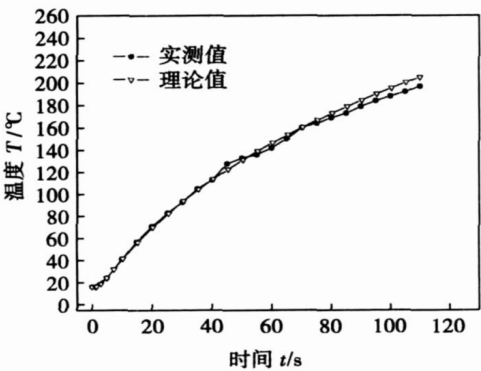


图 5 焊接界面温度测量值与理论分析值比较
Fig. 5 Comparison between measured temperature of welding interface and analytical results

3.2.2 焊接功率与焊接输入热量

每隔 1 s 记录一次焊机的输入热量数值得到 $Q(t)$, 对其求差分得到焊接过程的实时功率值,如图 6 所示.由于焊接电压是恒定的,因此实时功率的变化必然是由电阻变化引起的,通过测量实时功率可以得到实时的电阻值,进而可以估计电阻丝的温度值.试验结果说明焊接过程中电源输入功率并非一恒定值而是随时间逐渐减小.通过跟踪焊接过程电阻随温度变化可以很好地预测焊接功率的温度非线性.常温下测得电阻丝阻值为 0.83 Ω,根据电学基本原理,当输入电压为 30, 35, 39.5, 45 V 时,其功率标称值应分别为 1.08, 1.47, 1.88, 2.44 kW.而实测的初始焊接功率分别仅为 0.78, 1.06, 1.26, 1.48 kW, 分别为标称值计算的功率的 72%, 72%, 67%以及 61%.这是因为在焊接开始后,由于加热电阻丝温度迅速升高到 100 ℃以上,使得焊接功率迅速下降.理论分析结果显示仅 0.2 s 的时间里,电源功率便下降到标称值的 65%左右,然后随着时间推移缓慢下降.这一结论与实测十分吻合.

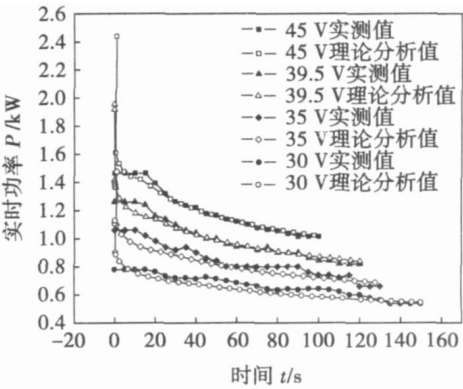


图 6 实时输入功率理论值与实测值
Fig. 6 Comparison between real-time power and calculated results

利用焊机测量焊接过程输入热量数值.图 7 为不同焊接电压下测量得到 30, 60, 110 s 时刻的总输入热量实测值及理论分析值对比图.由图中可以看出,理论分析与实测结果相当吻合.需要特别注意的是,相比不考虑焊接过程电阻发生变化的情况,一定时间下,输入总热量与电压成近似线性关系,即焊接平均功率与焊接电压成近似线性关系,而不是平方关系.这是因为随着电压增大,若电阻保持不变,则输入热流密度随电压二次增加,从而使得界面温度也随之迅速升高,由于电阻丝电阻随温度升高而线性增大,从而使热流密度与温度成一次反比例关系.综合两者效果,实际平均焊接功率与输入电压

有效值成近似线性关系。

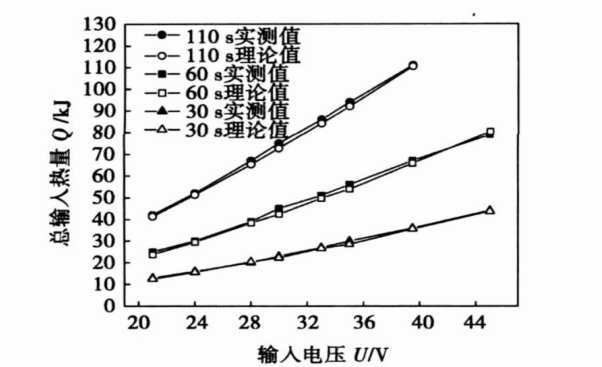


图 7 焊接输入热量随输入电压变化关系
Fig. 7 Input energy variation with input voltages

4 结 论

- (1) 通过试验对比验证表明, 该模型能较准确的预测焊接温度场以及实时焊接功率。
- (2) 实时焊接功率在焊接开始后迅速下降到标称值的 65% 左右, 然后随着焊接进行而缓慢下降。
- (3) 由于电阻温度效应的影响, 焊接平均功率与焊接电压成近似线性关系。

参考文献:

[1] 孙 逊. 聚烯烃管道[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.

[2] Wool R P, Yuan B L, McGarel O J. Welding of polymer interfaces [J]. Polymer Engineering and Science, 1989, 29 (19): 1340—1367.

[3] Wool R P, O' Connor K M. A theory of crack healing in polymers [J]. Journal of Applied Physics 1981, 52(10): 5953—5963.

[4] Bowman J. A review of the electrofusion joining process for polyethyl-

ene pipe systems[J]. Polymer Engineering and Science, 1997, 37 (4): 674—691.

[5] 师春生, 李家俊, 王玉林, 等. 聚乙烯管道电熔焊接的温度场模型[J]. 焊接学报, 2000, 21(3): 36—39.

Shi Chunsheng, Li Jiajun, Wang Yulin, *et al.* Modeling of temperature field in electrofusion joint for polyethylene pipes[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2000, 21(3): 36—39.

[6] Nakashiba Akio, Nishimura Hiroyuki, Inoue Fumio, *et al.* Fusion simulation of electrofusion polyethylene joints for gas distribution[J]. Polymer Engineering and Science, 1993, 33(11): 1146—1151.

[7] Hiroyuki Nishimura, Fumio Inoue, Akio Nakashiba. Design of electrofusion joints and evaluation of fusion strength using fusion simulation technology[J]. Polymer Engineering and Science, 1994, 34 (20): 1529—1534.

[8] Fujikake Masam, Fukumura Masahisa, Kitao Koichi. Analysis of the electrofusion joining process in polyethylene gas piping systems[J]. Computers & Structures, 1997, 64(5—6): 939—948.

[9] Zhao Jianfeng, Wang Anliang, Yang Chunxin. Prediction of thermal contact conductance based on the statistics of the roughness profile characteristics[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2005, 48: 974—985.

[10] Sridhar M R, Yovanovich M M. Elastoplastic contact conductance model for isotropic conforming rough surfaces and comparison with experiments[J]. Journal of Heat Transfer, 1996, 118(2): 3—9.

[11] 机械工程手册编辑委员会. 电机工程手册第 9 篇——导电金属及电磁线[M]. 北京: 机械工业出版社, 1996.

[12] Ozisik M N. 热传导[M]. 俞昌铭, 译. 北京: 高等教育出版社, 1983.

[13] Rauwendal C. 塑料挤出[M]. 陈文瑛, 韦 华, 赵红玉, 译. 北京: 中国轻工业出版社, 1996.

[14] Skeel R D, Berzins M. A method for the spatial discretization of parabolic equations in one space variable[J]. SIAM Journal on Scientific and Statistical Computing, 1990, 11(1): 1—32.

作者简介: 郑津洋, 男 1964 年出生, 博士, 教授, 博士生导师. 研究方向为承压设备数字化技术、氢能储运技术等. 已发表论文 200 余篇.

Email: jyzh@zju.edu.cn

MAIN TOPICS, ABSTRACTS & KEY WORDS

Resistance microwelding and its step-pulse output YANG Shitong¹, LI Yuanbo², LI Guangfan¹ (Guangzhou Micro Welding Equipment Co., Guangzhou 510385, China; 2. Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China). p1—4

Abstract: The article brings forward the concept of microwelding in the field of resistance weld and discusses the requirement of welding power source for microwelding. The square pulse, which the adjustable minimum-setting scales are voltage amplitude of 0.01 V and pulse duration of 1 ms, is designed to step-pulse. The six adjustable parameters of the step-pulse include the pulse slip angle θ_1 , the first and second step voltage amplitude and duration of the step-pulse (U_1 , t_1 , U_2 , t_2), and the pulse declining angle θ_2 . The function of the slip angle is to limit instant current impact, the first step-pulse is to strip or preheat, the second is to weld, and the declining angle is to postheat. Adapting to the requirement of stripping welding and microwelding for welding power, the step-pulse not only extends the life of welding tips for stripping weld, but also reduces spatter and improves welding quality.

Key words: microwelding; stripping weld; step-pulse; microwelding equipment

Analysis on temperature field in electrofusion joint for polyethylene pipes ZHENG Jinyang¹, SHI Jianfeng¹, GUO Weican^{1,2}, DING Shoubao², SHI Ping², WANG Hui¹ (1. Institute of Chemical Machinery and Process Equipment, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 2. Zhejiang Inspection Center of Special Equipment, Hangzhou 310020, China). p5—9

Abstract: The electrofusion (EF) technique for joining polyethylene (PE) pipe is widely used in the gas distribution pipes. The quality of the joint is heavily depended on the temperature field during welding. A model of transient heat transfer is established to analysis the temperature field in PE pipe joint during EF jointing process. The nonlinearities of material property, input power and thermal contact resistance are synthetically taken into consideration. The developed model is verified by experiments, and the results show good agreement. The model can help to determine the temperature distribution and optimize welding specifications.

Key words: polyethylene pipe; electrofusion joint; temperature field; numerical simulation

Technology of laser welding on Al-5Mg-0.3Sc SUN Fujuan, WEI Huakai (Qingdao Branch, Naval Aeronautical Engineering Academy, Qingdao 266041, China). p10—12

Abstract: Aiming at the deficiencies of the traditional weld

technology on aluminum alloys, laser welding was put forward. Through metallographic analysis on the weld of Al-5Mg-0.3Sc, tensile strength and micro-hardness test, technological parameters of laser were studied to improve the performance of the weld. The results show that because of rare Sc, weld without air holes and cracks can be obtained in the conditions of pretreatment, reasonable laser power, scanning velocity and the flow of shielded gas, which the sizes of center grains are 1/11 as large as that of substrate, micro-hardness achieves 95% and tensile strength achieves 88% of substrate's.

Key words: laserwelding; aluminum alloys; metallography; tensile strength

Simulation of microstructure during weld solidification based on cellular automaton WEI Yanhong^{1,2}, ZHAN Xiaohong¹, DONG Zhibo², MA Rui, WANG Yong² (1. College of Materials Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. The State Key Laboratory of Advanced Welding Production Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China). p13—16

Abstract: The cellular automaton (CA) method has been successfully applied to simulate the microstructure evolution of welding solidification process, which is a powerful tool for simulating microstructure transformation of weld joint and helps to understand microstructure development so as to optimize process parameters and improve the quality of weldment. Solute diffusion during grain growing process in weld solidification is analyzed. A dendritic grain growth model based on CA method is developed to simulate the growths of the equiaxed grain in the center of the melt pool and the columnar grain near to HAZ, the grain morphologies of them are presented as the results of primary simulation, and the simulation results reproduce the growth of the secondary arms and the tertiary arms as well as competitive growing. The results show that the CA method is one of the effective ways to study and simulate the weld microstructure.

Key words: weld solidification; dendritic grain growth; numerical simulation; cellular automaton

Optimum parameters of short circuit droplet transfer gas metal arc welding LU Zhenyang¹, LI Yan¹, HUANG Pengfei¹, WEI Jian², YIN Shuyan¹ (1. Beijing University of Technology, Beijing 100022, China; 2. Natong Shunda Container Corporation Limited, Natong 226003, China). p17—20

Abstract: Short circuit droplet transfer control system was developed on the basis of single chip computer controlled inverter