

焊接熔池快速凝固过程的微观组织演化数值模拟

张 敏, 汪 强, 李继红, 李 琳*

(西安理工大学 材料科学与工程学院, 西安 710048)

摘 要: 基于晶粒形成原理和枝晶生长动力学特点,建立了焊接熔池凝固过程中的形核、枝晶生长、溶质再分配及扩散的二维数学物理模型,对焊接熔池快速凝固过程中柱状晶向等轴晶的转变以及不同的冷却速度对这一转变过程的影响进行了模拟。结果表明,焊接熔池在快速冷却凝固过程中,溶质再分配与扩散明显;柱状晶向等轴晶转变时,熔池中心等轴晶凝固排出的溶质使柱状晶尖端浓度急剧升高,抑制了柱状晶的生长;冷却速度越大,柱状晶越容易向等轴晶转变,且转变所需时间越短。

关键词: 焊接熔池; 元胞自动机; 转变; 快冷速率

中图分类号: TG401 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2013)07-0001-04



张 敏

0 序 言

凝固理论基础的不断发展和数值计算方法的不
断改进,使得凝固过程的可视化模拟逐渐成为可能。
近二十年来,国内外诸多学者对凝固过程的枝晶
(等轴晶、柱状晶)生长进行了模拟^[1],建立的模型
由简单到复杂,边界条件逐渐贴近实际凝固过程。
他们的成果有效地推动了数值模拟在材料学中的运
用,然而数值模拟在焊接熔池凝固中的运用相对滞
后。与铸造过程相似,焊接熔池凝固需经历温度的
扩散、晶核的形成及长大、溶质扩散等过程,不同
的是焊接熔池体积小、温度分布不均匀,另外熔池液
态金属处于过热状态、液态金属的存在时间短以及
熔池周围的散热条件好,且熔池处于不断运动状态,
主要以非均匀形核和联生生长为主等^[2]。这些特点
使得焊接熔池凝固数值模拟具有不可替代的特殊性。

元胞自动机^[3](cellular automaton, CA)是一种
时间、空间、状态都离散的动力学模型。元胞自动
机模拟方法在材料学中的运用较确定性法和相场法
晚^[4],但现阶段运用十分广泛。在焊接熔池凝固模
拟过程中,它基于焊接温度场变化、溶质扩散理论
及形核的物理机理和晶体生长动力学理论,用随机
性原理处理温度场、溶质场、晶核分布和结晶方向,
从而模拟熔池凝固过程的微观组织。该模拟方法能够

扩大计算尺度,跟踪到固液界面,显示凝固过程中温
度、溶质浓度的变化^[5],这些特点是确定性法和相
场法无法匹及的。

文中基于枝晶生长理论,采用元胞自动机法,对
焊接熔池快速凝固过程柱状晶向等轴晶的转变过程
及不同的冷却速度对这一转变过程的影响进行了模
拟分析。

1 数学物理模型

1.1 形核模型

金属的形核是在微观小区域形成稳定小质点的
过程。现有的形核理论中有两种形核机制:均匀形核
和非均匀形核。微观组织模拟时通常采用瞬时形核
和连续形核两种方法实现过冷熔体的形核。文中采
用Candin等人^[6]提出的基于高斯分布准连续形核
模型,利用统计学方法,在假设不均匀形核时,指出
形核发生在一系列不同的形核位置上,过冷度 ΔT
与形核密度 $n(\Delta T)$ 成对应关系,因此随着过冷度增
大 $d(\Delta T)$,形核密度的增加 dn 可用一个连续的形
核分布 $dn/d(\Delta T)$ 描述,即

$$\frac{dn}{d(\Delta T)} = \frac{n_{\max}}{\sqrt{2\pi}\Delta T_{\sigma}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{\Delta T - \Delta T_N}{\Delta T_{\sigma}}\right)^2\right) \quad (1)$$

式中: ΔT_{σ} 为标准速率过冷度; n_{\max} 为异质形核衬底
的数目; ΔT 为平均形核过冷度; ΔT_N 为正态分布中
曲线过冷度均值。

1.2 枝晶生长模型

枝晶生长的形貌及其演变在很大程度上影响着

收稿日期: 2012-07-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51274162); 国家 863 高技
术研究发展计划资助项目(2013AA031303); 陕西省自然
科学基金资助项目(2012JM6003)

* 参加此项研究工作的还有支金华、罗海龙

材料的使用性能,因而在近几十年里开展了大量关于枝晶生长的理论和试验研究.枝晶生长一方面涉及尖端的稳态生长行为,另一方面则包括了非稳态的分枝结构的不断产生和演化.

稳态生长时枝晶尖端生长采用 KGT^[7] 模型.过冷熔体在过冷度的作用下不断凝固.枝晶尖端过冷度包含曲率过冷 ΔT_r 、成分过冷 ΔT_c 、热过冷 ΔT_l 、动力学过冷 ΔT_k .

非稳态的分支主要与界面扰动有关,当无扰动或扰动非常小时,枝晶将以光滑界面生长,但当界面出现扰动时,在尖端附近会形成扰动波振幅指数增大的外形,从而使得分枝出现.

1.3 溶质再分配与扩散模型

对于二元合金或多元合金而言,溶质浓度是凝固过程不可忽视的一部分.焊接熔池中含有多种元素,属于多元合金体系,但模拟多元合金凝固溶质扩散理论复杂且很难在模拟中实现,因此文中采用二元合金溶质扩散模型.文中借鉴前人研究中出现的问题,在保证溶质守恒的前提下,采取东南大学陈晋^[8]对于溶质再分配的处理方法.

溶质再分配后,有部分多余的溶质被排到周围液相邻胞中,使界面液相溶质浓度升高,此时液相中产生浓度差,需对液相溶质扩散进行计算.以往的研究中,溶质扩散经常会涉及到固相、界面和液相胞

元三者间的扩散,为了简化计算,文中假定扩散只发生在液相与液相之间,扩散理论^[9]为

$$\frac{\partial C_L}{\partial t} = D_L \left(\frac{\partial^2 C_L}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C_L}{\partial y^2} \right) \quad (2)$$

式中: C_L 为液相溶质浓度; D_L 为溶质扩散系数.

2 初始条件计算方法

2.1 计算模型的基本假设

为了完整地描述枝晶生长行为,必须综合考虑热扩散、溶质扩散、流动、界面能以及高速生长时的动力学效应.但它们作用于不同尺度和不同条件下.因此需要对所研究的模型做出基本假设^[10]:

(1) 在过冷度不大的情况下,不考虑高速生长时的动力学效应,且忽略溶质在固相中的扩散;(2) 不考虑熔体的流动,且认为界面处始终处于平衡状态,界面两侧满足

$$C_S^* = k_0 C_L^* \quad (3)$$

式中: C_S^* 为界面处固相溶质浓度; C_L^* 为界面处液相溶质浓度; k_0 为平衡分配系数.

2.2 模拟的初始条件

为了研究方便,采用二维图形,胞元网格为 $\Delta x = 0.5 \mu\text{m}$,共 200×200 个胞元网格模拟.采用的模拟参数如表 1 所示.

表 1 焊接熔池凝固热物理性能参数
Table 1 Physical parameters of weld pool solidification

溶质浓度 C_0 (%)	扰动振幅 A	液相线斜率 $m_L / (K \cdot (\%)^{-1})$	液相扩散系数 $D_L / (10^{-2} \text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	各向异性强度 G_s	平衡分配系数 k_0	Gibbs-Tompson 系数 $\Gamma / (\mu\text{m} \cdot \text{K}^{-1})$	元胞尺寸 $\Delta x / \mu\text{m}$
0.04	0.2	-78.9	2.4	0.3	0.34	2.4	0.5

2.3 柱状晶向等轴晶的转变 (CET) 实现方法

熔池边缘可能存在大量的异质形核基底,能够产生大量晶核,并且熔池边缘液体冷却速度远远大于熔池内部,这两个原因使熔池边缘在很短时间内形成众多的晶核并迅速生长,但很快就被彼此碰撞而无法继续生长,因此形成一层很薄的细晶区.随着温度的继续降低,部分晶粒向熔池内部竞争生长,形成大量柱状晶.当过冷度达到一定程度后,熔池内部开始均匀形核并生长成等轴晶,这些等轴晶阻碍柱状晶沿长度方向的生长.这样焊接熔池凝固过程中柱状晶向等轴晶的转变得以实现.

3 模拟结果及分析

3.1 CET 转变形态模拟

焊接冷却速度在 $4 \sim 100 \text{ } ^\circ\text{C/s}$ 之间,为了使焊接熔

池凝固过程中柱状晶/等轴晶转变明显,选择 50 K/s 的冷却速度进行模拟.计算结果见图 1.图形下方为熔池边缘,顶端为熔池中心.凝固开始时,从边缘散热,随着时间增加,熔池边缘随机形核,整个熔池开始凝固.深蓝色为液相,其余颜色为固相晶粒.

凝固初始阶段,如图 1a 所示,在边缘处形成大量晶核,晶核很小,并在过冷度的作用下不断向四周生长,形成稳定的边界层,直至铺满整个熔池边缘.在继续降温凝固过程中,由于边界层表面不稳定,部分晶粒上突出很多小尖端,这些处于有利位置的小尖端快速伸入过冷熔体中进行生长,处于不利位置的则被吞并或抑制.小尖端不断向熔池中心生长,形成柱状晶,并形成明显的一次枝晶臂,其间距在 $2.5 \mu\text{m}$ 左右,当温度降到一定程度后,熔池内部开始形核.由于此时熔池内部温度梯度较小,且液相区域过冷度变化很小,所以形核数量较大,且位置分

散,各个方向的生长速度相近,见图1b.在后续的凝固过程中,已结晶的等轴晶阻碍柱状晶的生长,致使

柱状晶停止纵向生长,而径向生长加剧,并有二次枝晶臂形成.最终实现了柱状晶向等轴晶的转变,如

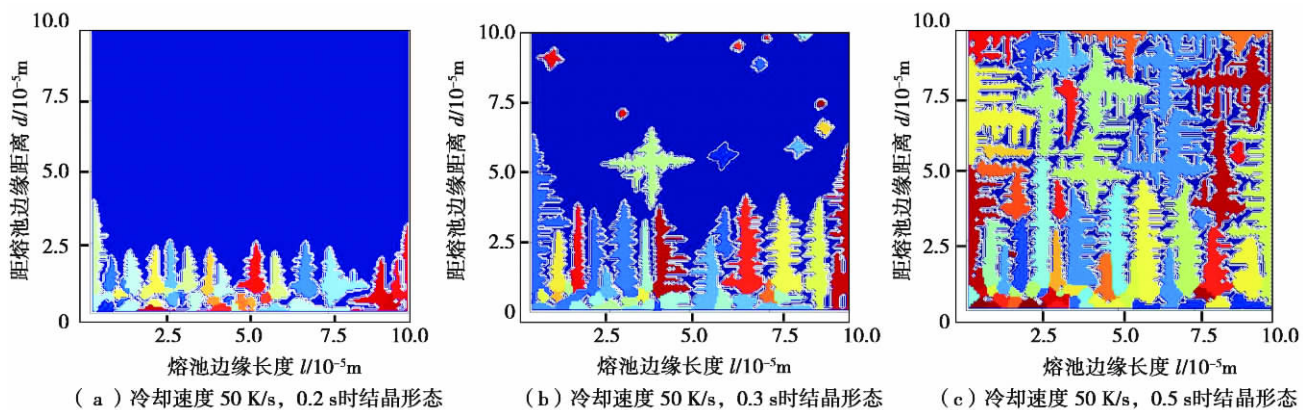


图1 CET转变形态

Fig. 1 Shape of columnar-to-equiaxed transition

图1c所示.

3.2 CET转变过程溶质场模拟

溶质浓度是形核和长大过程中液-固变化的纽带.不同的溶质场,晶粒生长方向和形貌会有很大差异.因此对凝固过程溶质浓度的分析至关重要.

如液态和固态中溶质浓度集合在一起,液固界面将会被掩盖,因此文中分别对液态溶质场和固态溶质场进行了模拟,如图2所示.

从图2a~c中可以看出,在柱状晶生长过程中,凝固释放的溶质使枝晶固液界面处出现不同程度的

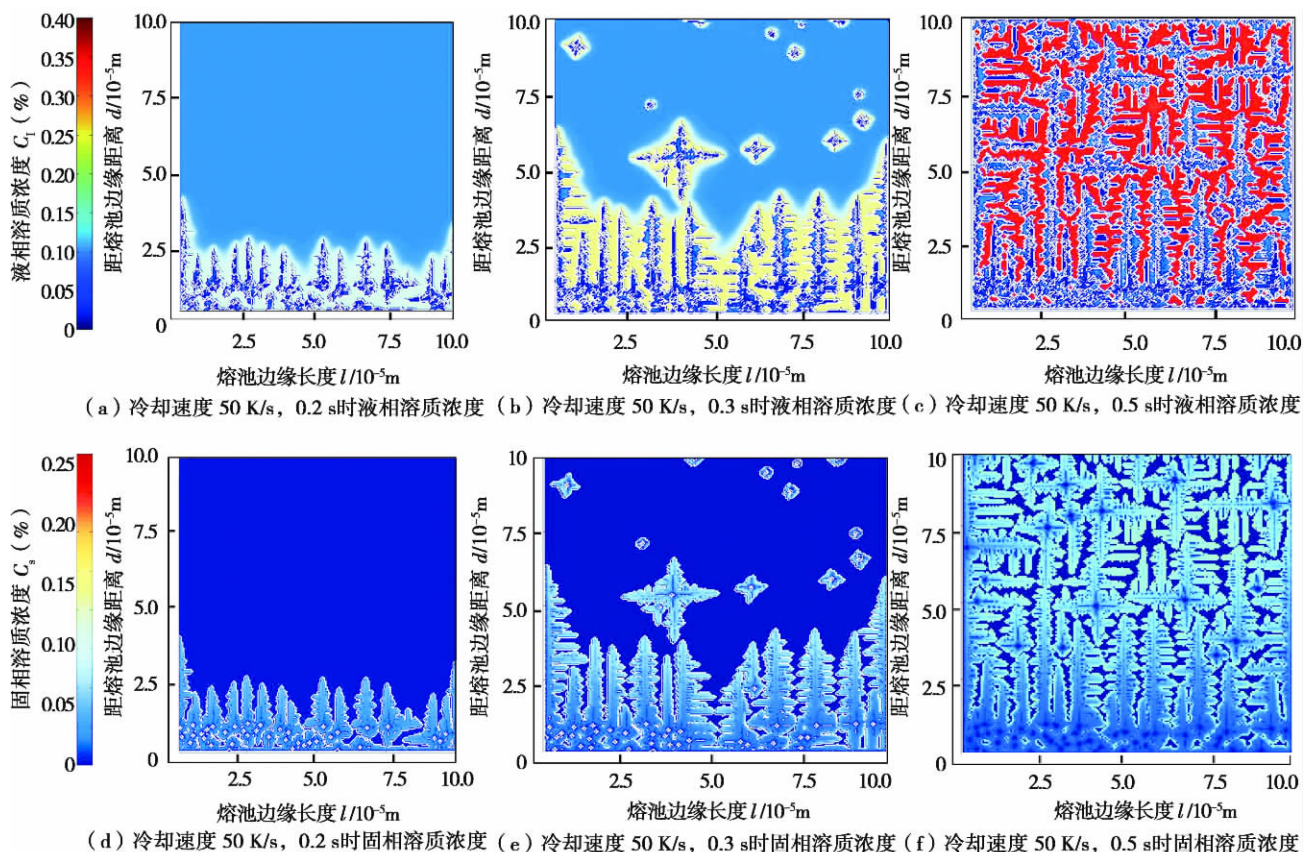


图2 CET转变过程溶质浓度

Fig. 2 Solute concentration field of columnar-to-equiaxed transition

溶质富集,且柱状晶间溶质浓度均高于枝晶尖端溶质浓度,柱状晶尖端生长速度较侧向生长快。

发生转变时,等轴晶凝固扩散形成的液相溶质场与柱状晶生长形成的液相溶质场叠加。柱状晶尖端液相溶质急速升高,这使柱状晶生长速度减缓。随着生长的进行,枝晶侧臂形成大量的一次、二次枝晶臂,一、二次枝晶臂不断粗化,使可供扩散的区域逐渐减少,局部溶质浓度不断升高。

图 2d~f 为柱状晶/等轴晶转变过程固相中的溶质场模拟结果,可以看出,枝晶的生长总是伴随着微观偏析,偏析随着晶粒半径的增加而加大。柱状晶生长初期,晶粒中心偏析最小,其尖端偏析较侧壁严重。一次、二次枝晶臂的偏析比同位置一次枝晶

壁的偏析程度大,且液相溶质梯度越大的位置,凝固后偏析越严重。

3.3 冷却速度对 CET 转变形态的影响

为了更好地分析冷却速度对焊接熔池凝固过程柱状晶/等轴晶转变形态的影响,文中分别模拟了冷却速率为 20 K/s, 50 K/s, 100 K/s, 0.5 s 时熔池的凝固形态,见图 3。从图 3a、b 中可以看出,冷却速率越小,柱状晶生长越缓慢,且发生转变所需时间越长,当冷却速率达到一临界值时,将不会有明显的柱状晶形成。柱状晶间的竞争生长随着冷却速率的增加而加剧。对比图 3b 和 3c 会发现,转变发生时,冷却速率越大,熔体中的等轴晶大小相似度越高,分布也越均匀,这与焊接熔池凝固实际情况相符。

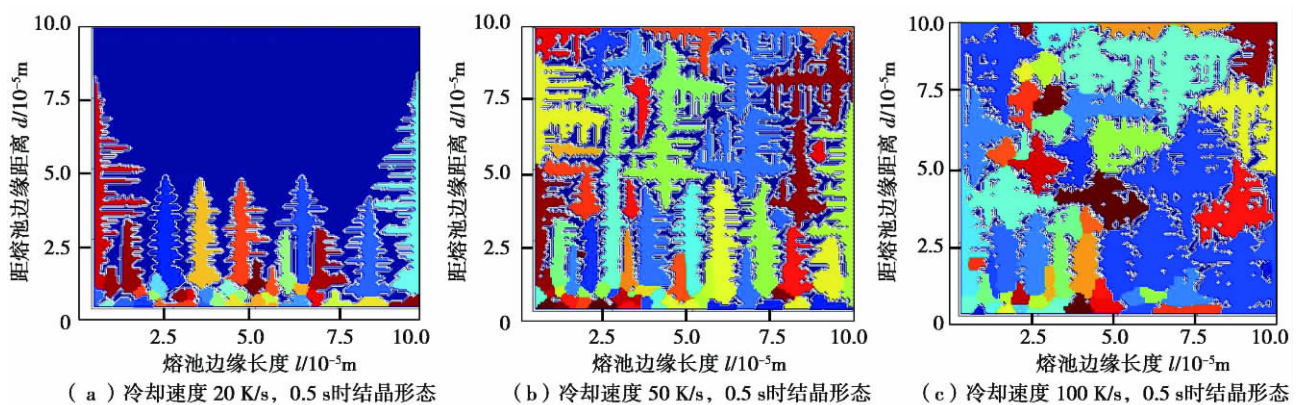


图 3 不同冷却速度下 CET 转变形态

Fig. 3 Shape of columnar-to-equiaxed transition under different cooling rates

4 结 论

(1) 基于焊接熔池枝晶生长模型,再现了焊接熔池快速凝固过程中柱状晶向等轴晶的转变过程。焊接熔池在快速冷却凝固过程中,溶质的再分配与扩散明显。柱状晶向等轴晶转变时,熔池内等轴晶凝固排出的溶质使柱状晶尖端浓度急剧升高,抑制了柱状晶的生长。

(2) 焊接熔池快速凝固过程中,存在枝晶偏析现象。晶粒外围微观偏析较晶粒内部严重,且二次、三次枝晶臂偏析程度比同位置一次枝晶臂的大。

(3) 冷却速度对焊接熔池凝固过程中柱状晶向等轴晶转变的影响很大。冷速越大,柱状晶越容易向等轴晶转变,且转变所需时间越短。

参考文献:

- [1] Glicksman M E, Lupulescu A O. Dendritic crystal growth in pure materials [J]. Journal of Crystal Growth, 2004, 264: 541-549.
- [2] 黄安国,余圣甫,李志远. 焊缝金属凝固组织元胞自动机模拟[J]. 焊接学报, 2008, 29(4): 45-48.
Huang Anguo, Yu Shengfu, Li Zhiyuan. Simulation on weld metal solidifying microstructure with cellular automaton [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2008, 29(4): 45-48.
- [3] 何宜柱,余亮,陈大宏. 元胞自动机仿真技术[J]. 华东冶金学院学报, 1998, 15(4): 308-313.
He Yizhu, Yu Liang, Cheng Dahong. Cellular automation simulation technique [J]. Journal of East China University of Metallurgy, 1998, 15(4): 308-313.
- [4] 郭洪民,刘旭波,杨湘杰. 元胞自动机方法模拟微观组织演变的建模框架[J]. 材料工程, 2003(8): 23-27.
Guo Hongmin, Liu Xubo, Yang Xiangjie. Model framework for microstructure evolution modeling with cellular automata [J]. Journal of Materials Engineering, 2003(8): 23-27.
- [5] Liu Xiaobo, Xu Qingyan, Jing Tao, et al. Simulation of microstructures in solidification of aluminum twin-roll casting based on CA [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2009, 19: 422-427.

参考文献:

- [1] Chang T C, Wang J Y, Chu C L, *et al.* Mechanical properties and microstructures of various Mg-Li alloys [J]. *Materials Letters*, 2006, 60(27): 3272–3276.
- [2] Song J M, Wen T X, Wang J Y. Vibration fracture properties of a light weight Mg-Li-Zn alloy [J]. *Scripta Materialia*, 2007, 56(6): 529–532.
- [3] 王志平, 孙宇博, 丁坤英, 等. 纯铝微弧氧化陶瓷膜组织及耐腐蚀性能[J]. *焊接学报*, 2008, 29(12): 74–76.
Wang Zhiping, Sun Yubo, Ding Kunying, *et al.* Structure and elec-trochemistry corrosion behaviors of microarc oxidation on aluminum[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2008, 29(12): 74–76.
- [4] 吕维玲, 马颖, 陈体军, 等. 加压时间间隔对 AZ91D 镁合金微弧氧化膜的影响[J]. *焊接学报*, 2009, 30(8): 81–84.
Lü Weiling, Ma Ying, Chen Tijun, *et al.* Effects of interval of enhance voltage on micro-arc oxidation coatings of magnesium alloy AZ91D [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2009, 30(8): 81–84.
- [5] 景晓燕, 袁艺, 于方, 等. 镁锂合金表面耐蚀微弧氧化膜的研究[J]. *稀有金属材料与工程*, 2009, 38(7): 1154–1157.
Jing Xiaoyan, Yuan Yi, Yu Fang, *et al.* Study on corrosion resistance coating formed on magnesium-lithium alloy by micro-arc oxidation[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2009, 38(7): 1154–1157.
- [6] Li J G, Lü Y, Wang H W, *et al.* Formation and infrared emissivity of microarc oxidation coatings on Mg-7Li alloy [J]. *Advanced Materials Research*, 2012, 557/559: 1975–1978.
- [7] 刘晓静, 李光, 段红平, 等. 等离子体电解氧化弧光放电的瞬态测定及温度场模拟[J]. *中国有色金属学报*, 2011, 21(7): 1681–1687.
Liu Xiaojing, Li Guang, Duan Hongping, *et al.* Instantaneous measurement and temperature field simulation of arc discharge in plasma electrolytic oxidation process [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2011, 21(7): 1681–1687.
- [8] Li J G, Lü Y, Li M Q, *et al.* Formation of the surface oxide film on as-cast Mg-7Li alloy [J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 239/242: 1082–1087.
- [9] Liu Y, Skeldon P, Thompson G E, *et al.* Anodic Film Growth on an Al-21 at. % Mg Alloy [J]. *Corrosion Science*, 2002, 44(5): 1133–1142.
- [10] Tzoganakou K, Skeldona P, Thompson G E, *et al.* Mobility of lithium ions in anodic alumina formed on an Al-Li alloy [J]. *Corrosion Science*, 2000, 42(6): 1083–1091.
-
- 作者简介:** 李俊刚, 男, 1971 年出生, 博士研究生. 主要从事镁合金表面处理. 发表论文 30 多篇. Email: 8921107ljg@163.com
- 通讯作者:** 魏尊杰, 男, 教授. Email: weizj@hit.edu.cn
-
- [上接第 4 页]
- [6] Gandin C A, Rappaz M A. Coupled finite element-cellular automaton model for the prediction of dendritic grain structures in solidification process [J]. *Acta Metallurgica et Materialia*, 1994, 42(7): 2233–2246.
- [7] Kurz W, Giovanola B, Trivedi R. Theory of microstructural development during rapid solidification [J]. *Acta Metall*, 1986, 34(5): 823–830.
- [8] 陈晋. 基于胞元自动机方法的凝固过程微观组织数值模拟[D]. 南京: 东南大学, 2005.
- [9] 魏艳红, 占小红, 董志波, 等. 基于 CA 模拟焊缝凝固过程枝晶生长的分析[J]. *焊接学报*, 2009, 30(3): 13–16.
Wei Yanhong, Zhan Xiaohong, Dong Zhibo, *et al.* Simulation of microstructure during weld solidification based on cellular automaton [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2009, 30(3): 13–16.
- [10] 陈晋, 朱鸣芳, 孙国雄. 用 CA 方法模拟过冷熔体中自由树枝晶的生长[J]. *金属学报*, 2005, 41(8): 799–803.
Chen Jin, Zhu Mingfang, Sun Guoxiong. Numerical simulation on free dendrite growth in undercooled melt using cellular automaton method [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2005, 41(8): 799–803.
-
- 作者简介:** 张敏, 男, 1967 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师. 主要从事焊接凝固过程的组织演变行为及其先进焊接材料的研究. 发表论文 100 余篇. Email: zhmmn@xaut.edu.cn.

MAIN TOPICS ,ABSTRACTS & KEY WORDS

Microstructure numerical simulation of weld pool in rapid solidification

ZHANG Min , WANG Qiang , LI Jihong , LI Lin , ZHI Jinhua , LUO Hailong(School of Materials Science and Engineering , Xi'an University of Technology , Xi'an 710048 , China) . pp 1 - 4 28

Abstract: Based on grain formation principle and kinetics characteristics of dendrite growth , two-dimensional mathematical and physical model of nucleation , dendrite growth , redistribution and diffusion of the solute were established to simulate the columnar-to-equiaxed transition in rapid solidification process of welding molten pool and the influence of different cooling rate on this transition process was also studied. The results show that , the solute redistribution and diffusion are evident in the process of rapid cooling. When the columnar grains transform into equiaxed grains , the discharged solute makes concentration sharply increased at the tip of columnar grain , which inhibits the growth of columnar crystals. Moreover , the change will be more likely to occur at higher cooling rate , and the required time will be also shorter.

Key words: weld pool; cellular automata; transition; rapid cooling rate

A real-time wavelet de-noising method of magnetism-control arc seam tracking signal

HONG Bo , YANG Xuedao , HE Rongtuo , XIANG Xiaoming(School of Mechanical Engineering , Xiangtan University , Xiangtan 411105 , China) . pp 5 - 8

Abstract: According to the frequency spectrum of magnetism-control transducing signal , it is found out that the frequency band of signal characterized the position of the seam is different from the interference signal. With regard to the real-time requirement of seam tracking system , a real-time wavelet denoising method was put forward based on sliding the fixed data window. In this way , a real-time data of arc transducing signal is taken dynamically. Through using decomposition method of orthogonal compactly supported wavelet and the 1st and 2nd layer's detail signal of the discarded arc transducing signal , the amount of calculation is reduced , therefore the real-time of this method is guaranteed. Then DSP is used in the experiment on the actual welding current signal to check the denoising effect. It is shown that this method used in de-noising satisfies the requirements of de-noising and real-time.

Key words: magnetism-control sensor; signal processing; wavelet de-noising; real-time

Formation mechanism and microstructure of C_f/Al and TiAl joint by SHS joining with Al-Ni-CuO interlayer

LI Zhuoran , FENG Guangjie , XU Kai , ZHANG Xianglong(State Key Laboratory of Advanced Welding and Joining , Harbin Institute of Technology , Harbin 150001 , China) . pp 9 - 12 37

Abstract: C_f/Al composites and TiAl alloys were joined by SHS joining with Al-Ni-CuO interlayer in the vacuum furnace.

High quality joint was obtained. DTA curve of Al-Ni-CuO interlayer was analyzed. Heat production mechanism of Al-Ni-CuO interlayer was analyzed and the interface formation of C_f/Al and TiAl joint was introduced. The result showed that Al atoms react with CuO when the temperature rises to 500 °C , and release a large quantity of heat. When the heating temperature reaches 600 °C , the real temperature on local part of interlayer has already achieved the melting point of Al. Al starts to melt. The liquid Al surrounds the solid Ni , and reacts with each other to form NiAl₃. In final joint , TiAl₃ layer forms on the interface of TiAl and Al-Ni-CuO interlayer. NiAl₃ appears on the interface of C_f/Al and Al-Ni-CuO interlayer. In the C_f/Al , Ni in Al-Ni-CuO layer diffuses toward to C_f/Al and forms NiAl₃.

Key words: composites; SHS joining; microstructure; formation mechanism

Interfacial microstructure and properties of TiAl joints brazed with composite filler reinforced by particles

SONG Xiaoguo^{1,2} , CAO Jian^{1,2} , CHEN Haiyan² , SI Guodong¹ , FENG Jicai^{1,2} (1. Shandong Provincial Key Laboratory of Special Welding Technology , Harbin Institute of Technology at Weihai , Weihai 264209 , China; 2. State Key Laboratory of Advanced Welding and Joining , Harbin Institute of Technology , Harbin 150001 , China) . pp 13 - 16

Abstract: TiAl alloy was brazed with AgCuTiC composite filler metal reinforced by nano-Si₃N₄ particles. The typical interfacial microstructures in TiAl/AgCuTiC/TiAl joint are TiAl/Al-Cu₂Ti/Ag_(s.s.) + TiN + Al₄Cu₉ + Ti₅Si₃ , which are analyzed by SEM , EDS and XRD. Investigation results indicate that the active element Ti dissolves from TiAl substrate and reacts with nano-Si₃N₄ to form fine compounds including TiN , Ti₅Si₃ and Al₄Cu₉ during brazing process. These compounds are uniformly distributed in Ag solid solution , which lead to the formation of Ag based composite in brazed seam. The desired microstructure can not only strengthen the brazed seam , but also reduce the residual stresses in joints by decreasing the mismatch of coefficient of thermal expansion between TiAl substrate and brazing seam , which greatly improves the joint properties. The maximum shear strength of 278 MPa can be obtained with AgCuTiC composite filler with 3% nano-Si₃N₄ addition at 880 °C for 5 min , which is 40% higher than that brazed joint using AgCuTi directly.

Key words: TiAl alloy; brazing; composite filler; interfacial microstructure

Effect of Si on microstructure and properties of Fe-Cr-C-B self-shielded open arc hardfacing alloys

GONG Jianxun , DING Fen , TANG Tianshun , XIAO Yifeng(School of Mechanical Engineering , Xiangtan University , Xiangtan 411105 , China) . pp 17 - 20

Abstract: Fe-Cr-C-B-Si wear-resistant alloy was deposited on Q235 base metal by flux-cored wire self-shielded open arc