● 实用成型技术 Practical Shaping Technology ●
DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2021.05.020

# Mn18Cr18N 电渣重熔钢柱状晶生长的 CA 法模拟研究

朱 花,朱雪彤,陈慧琴
(太原科技大学 材料科学与工程学院,山西 太原 030024)

**摘 要**:通过分析研究电渣重熔大型钢锭柱状晶凝固组织的形成规律和微观形貌特征,提出了垂直于散热方向的等过冷度面形核规则和非周期性边界条件。根据柱状晶凝固组织生长方向和垂直于生长方向的过冷度比值,提出了柱状晶的平面元胞局域长大转变规则。基于 Matlab 软件平台,开发了 Mn18Cr18N 电渣重熔(ESR)钢锭柱状晶凝固组织的形核和长大模块,并应用于 Mn18Cr18N ESR 钢实心和空心钢锭宏微观尺度柱状晶凝固组织的形核与长大过程的模拟研究。实验验证表明,开发的 CA 法柱状晶生长模块的准确性和有效性。

**关键词**:电渣重熔;元胞自动机法(CA 法);柱状晶;凝固组织;转变规则
**中图分类号**:TF771 **文献标识码**:A **文章编号**:1000-8365(2021)05-0412-08

## Simulation of Columnar Crystal Growth of ESR Mn18Cr18N Steel by CA Method

ZHU Hua, ZHU Xuetong, CHEN Huiqin
(School of Materials Science and Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China)

**Abstract**: By analyzing and studying the solidification structure and microstructure characteristics of columnar grains in electroslag remelting (ESR) large ingot, the nucleation rules and non-periodic boundary conditions of the same supercooling surface perpendicular to the direction of heat dissipation are proposed. According to the ratio of the growth direction of solidification microstructure and the undercooling degree perpendicular to the growth direction of solidification microstructure, the local growth transition rule of planar cell for columnar crystal was proposed. Based on MATLAB software platform, the nucleation and growth module of columnar grain solidification structure of Mn18Cr18N ESR ingot was developed and applied to the simulation study of the nucleation and growth process of columnar grain solidification structure of solid and hollow Mn18Cr18N ESR ingot at macro and micro scales. The experimental verification shows that the developed CA method columnar crystal growth module is accurate and effective.

**Key words**: electroslag remelting (ESR); cellular automata method (CA method); columnar crystal; solidification structure; transformation rules

随着石油化工与核电技术的高速发展,不同尺寸与性能要求的筒形件需求量越来越大,从而使厚壁筒形件的制造技术越来越得到关注[1]。而相比于传统的采用实心钢锭和自由锻技术制造厚壁筒形件,采用空心钢锭直接成形厚壁筒形件的制造技术具有明显的优势,不仅节能节材,而且还可以省去镦粗和冲孔工序,简化加工流程,缩短了生产制造周期[2-3]。因此,空心钢锭制造技术能够推动厚壁筒形件向着短流程精确成形制造方向发展[4]。且随着电渣冶金技术的发展,采用电渣重熔或电渣液态浇注的技术可以制备纯净致密均质的空心钢锭,并已得到一定的应用[5-7]。采用试制方法研究大型钢锭浇注和凝固工艺及其组织特征[8],周期长,材料损耗大,费用高,致使空心钢锭的研发进度缓慢。随着计算机技术的迅猛发展,计算机模拟技术已经成为研究钢锭凝固成型、组织控制的重要手段[9]。模拟技术能够对不同的工艺参数和多种类型的模型同时进行计算和分析,为高质量钢锭的制造提供先进的技术手段。

元胞自动机法(Cellular Automaton,CA 法)是离散模型的一种统称,用于宏观与介观尺寸组织形貌等的数值模拟。Rappaz 等[10]最早提出模拟凝固微观

收稿日期:2021-05-06
基金项目:国家自然科学基金项目(51575372)
作者简介:朱 花(1977—),女,山西新州人,博士研究生.研究方向:热加工微观组织的模拟与控制.
电话:18703417081,E-mail: chenhuiqin@tyust.edu.cn
通讯作者:陈慧琴(1968—),山西新州人,教授,博士.研究方向:大型铸锻件制造理论与新技术,
电话:18703417081,E-mail: chenhuiqin@tyust.edu.cn

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

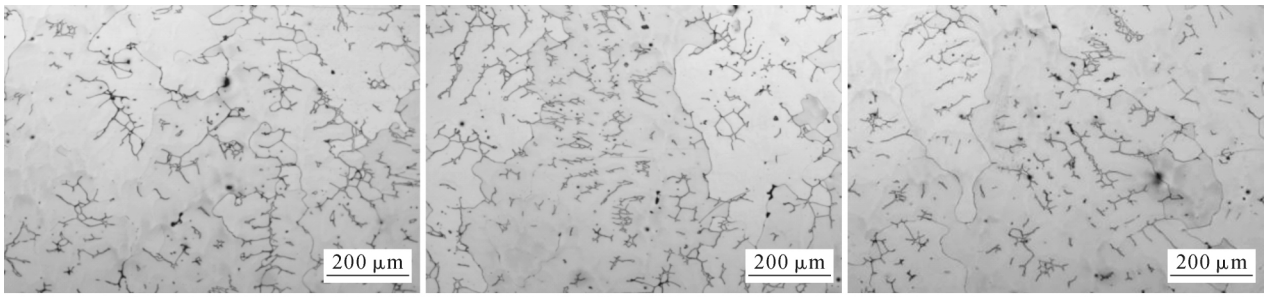
组织长大的 CA 方法。之后 Gandin 与 Rappaz[11]在生长物理机制与非自发形核的基础上，模拟了 Al-Si 合金在均匀温度场的凝固晶粒组织。CA 法的特征主要表现为[12]:设定的空间具有离散性;设立的时间具有离散性且等间隔;设定离散化的状态值;局域性演变规则;具有同时并进的演变步骤;由于引进离散化的变量,所以可有高维数的计算。在金属凝固组织的模拟领域,CA 法通过随机性原理确定晶核分布和结晶方向,依据形核的物理机理和晶体生长动力学规律,模拟金属的微观组织[13-14]。在国外,Liu 等[15] 提出了新的二维晶粒长大转换规则模型。之后 Raabe 等[16]提出了一种由驱动力决定的概率性元胞自动机模型。在国内,花福安等[17]基于曲率驱动机制,提出了一种新的二维 CA 模型,该模型在等温条件下能模拟晶粒正常生长的各种现象。张林等[18]利用 CA 模型对铁素体晶粒形核与生长的全过程进行了模拟研究,并得出其 CA 规则。关小军等[19]将近邻扩展到次近邻(Moore 型)。柯常波等[20]利用 Moore 型邻域定义 CA 模型。宋迎德等[21]采用凝固过程中由高斯分布模型控制形核,元胞的捕捉和状态转换规则由镁合金密排六方特性的角点生长算法控制。综上可知,元胞自动机法的应用几乎涉及金属材料凝固组织模拟的各个领域。

对于大型锻件而言,粗大非均匀凝固晶粒组织的细匀化是热加工的主要任务和目标,也是大型锻件力学性能提高的重要途径。为此,本文作者通过分析研究电渣重熔柱状晶凝固组织的形成规律和微观形貌特征，研究提出了垂直于散热方向的等过冷度面形核规则；并基于经典 CA 法周期性边界条件的长大规则，提出了垂直于散热方向的非周期性边界条件；进而依据柱状晶凝固组织生长方向和垂直于生长方向的过冷度比值，提出了柱状晶长大的平面元胞局域转变规则。在 MATLAB 软件平台下,实现了柱状晶组织形成与长大模拟程序的开发，模拟研究了 Mn18Cr18N 钢锭电渣重熔介观和宏观尺度下柱状晶的形成与生长。实验对比表明了所提出的电渣重熔凝固过程中柱状晶形核和长大 CA 法模拟规则的有效性和精确性，对于大型钢锭柱状晶凝固组织模拟和控制具有重要的理论意义和实用价值。

## 1　电渣重熔钢锭凝固组织的解剖实验研究

采用 CA 法模拟钢锭凝固组织形成过程，了解钢锭内部凝固组织的分布和形貌特征，其关键技术即是凝固过程中晶粒的形核与长大规则的建立。为了准确反映电渣重熔过程中凝固组织形核和长大规律，首先在实验室条件下解剖研究了 $\phi$30 cm 电渣重熔实心钢锭凝固组织的分布和形貌特征，实验结果如图 1 和图 2 所示。

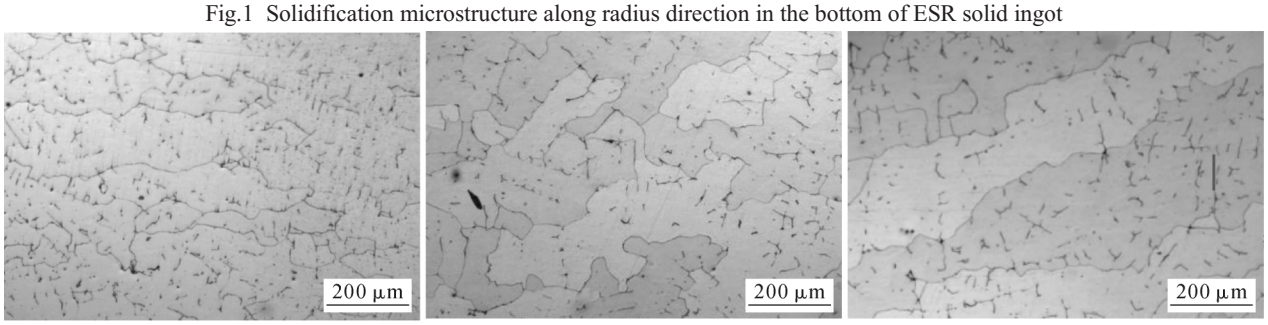
图 1 为实心电渣重熔钢锭底部从中心到外壁的凝固组织分布图。可以看出,钢锭底部除外壁处的凝




(a)中心　　(b)1/2半径处　　(c)外壁

**图 1　实心电渣重熔钢锭底部沿径向的凝固组织**

Fig.1　Solidification microstructure along radius direction in the bottom of ESR solid ingot




(a)外壁　　(b)1/2半径处　　(c)中心

**图 2　实心电渣重熔钢锭中部沿径向的凝固组织**

Fig.2　Solidification microstructure along radius direction in the middle of ESR solid ingot

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

固组织具有向中心倾向的一定角度外(图 1c),底部其他大部分区域柱状晶几乎均沿着垂直于底部的方向向上生长(图 1a,b)。图 2 为实心电渣重熔钢锭轴向中部从外壁到中心的凝固组织分布图。外壁柱状晶凝固组织几乎沿垂直于外壁结晶器的径向平行向中心生长(图 2a)。随着凝固过程的进行,外壁处结晶器的冷却能力减弱,柱状晶的取向向熔池方向倾斜,图 2b 中中径处的柱状晶生长方向与径向之间的夹角约在 10°~30°;越靠近钢锭心部,柱状晶向径向的倾斜角度越大,与径向的夹角大约在 30°~45°。图 1 和图 2 还表明,实心钢锭柱状晶凝固组织的宽度在 100~300 μm,大部分柱状晶的轴宽比大于 5。

## 2 微观组织 CA 法模拟原理

### 2.1 形核与长大模型

(1)形核模型 Mn18Cr18N ESR 钢锭在浇铸后的凝固过程中,采用连续形核模型,其可以用高斯分布式(1)来表示:

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

式中,$\Delta T_{max}$ 表述最大形核过冷度,K;$\Delta T_\sigma$ 表述形核过冷度标准方差,K;$n_{max}$ 表示最大形核密度。

该模型某一过冷度下的晶粒密度可以由下式表示:

$$n(\Delta T)=\int_0 \Delta T\frac{dn}{d(\Delta T)}d(\Delta T) \quad (2)$$

(2)枝晶生长动力学模型

柱状晶形核和生长的速度均受到冷却速度的影响[22]。式(3)为过冷度 $\Delta T$ 的表达式:

$$\Delta T=\Delta T_c+\Delta T_t+\Delta T_k+\Delta T_r \quad (3)$$

式中,$\Delta T_c$,$\Delta T_t$,$\Delta T_k$ 和 $\Delta T_r$ 分别表述凝固过程中的溶质过冷度、热过冷度、曲率过冷度以与动力学过冷度。合金凝固时,一般来说 $\Delta T_t$,$\Delta T_k$ 和 $\Delta T_r$ 与 $\Delta T_c$ 相比显得很小,可忽略不计。所以,柱状晶生长速度 $\nu$ 和过冷度 $\Delta T$ 的表达式可以进行拟合,这样可以节省模拟时间。式(4)为二者的关系式:

$$\nu=a_2\Delta T^2+a_3\Delta T^3 \quad (4)$$

式中,$\Delta T$ 表述枝晶尖端总过冷度,K;$a_2$、$a_3$ 表述生长动力学系数,m/(s·K$^3$)。

### 2.2 柱状晶生长元胞转变规则

借助枝晶尖端生长动力学模型计算凝固组织生长速度,基于生长速度及 Moore 类型最近邻元胞、次近邻元胞(本文提出)和中心元胞状态间关系,依据柱状晶凝固组织生长方向和垂直于生长方向的过冷度比值,提出了柱状晶的平面元胞局域长大转变规则。以生长方向与轴向成 60°角为例给出如下 12 邻居类型转变规则:

(1)根据 Moore 类型邻居,若在当前 CAS(时间步),枝晶尖端元胞 $B_j$ 的左上邻居元胞 $B_{j-4}$ 的状态为晶界,则下一 CAS(模拟增量步),$B_j$ 的状态转变为晶界,如图 3。

$$\xi_{B_j}^{t+\Delta t}\rightarrow f_1\left(\xi_{B_{j-4}}^{t}\right)$$

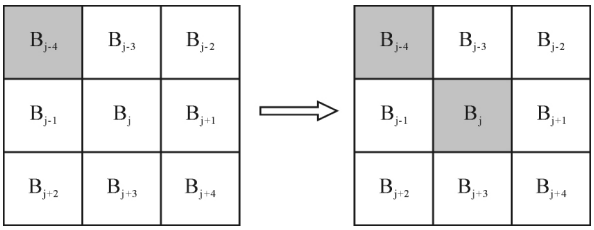



图 3 $\xi_{B_j}^{t}\rightarrow\xi_{B_j}^{t+\Delta t}$ 晶界的转变 1

Fig.3 $\xi_{B_j}^{t}\rightarrow\xi_{B_j}^{t+\Delta t}$ grain boundary transitions 1

(2)若在当前 CAS,尖端元胞 $B_j$ 的上邻居 $B_{j-3}$ 为晶界状态,此时不论左上邻居 $B_{j-4}$ 状态如何,则下一 CAS,$B_j$ 的状态转变为 $B_{j-4}$ 的状态,如图 4。

$$\xi_{B_j}^{t+\Delta t}\rightarrow f_2\left(\xi_{B_{j-3}}^{t},\xi_{B_{j-4}}^{t}\right) \quad (4)$$

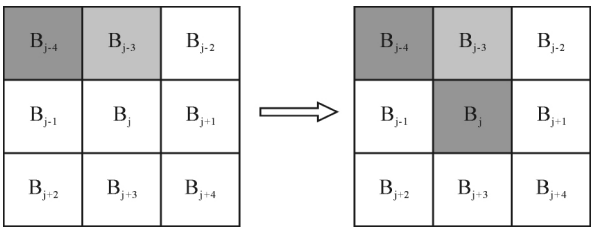



图 4 $\xi_{B_j}^{t}\rightarrow\xi_{B_j}^{t+\Delta t}$ 晶界的转变 2

Fig.4 $\xi_{B_j}^{t}\rightarrow\xi_{B_j}^{t+\Delta t}$ grain boundary transitions 2

(3)若在当前 CAS,尖端元胞 $B_j$ 的右上邻居 $B_{j-2}$ 为晶界状态,此时不论左上邻居 $B_{j-4}$ 状态如何,则下一 CAS,$B_j$ 的状态转变为 $B_{j-4}$ 的状态,如图 5 。

$$\xi_{B_j}^{t+\Delta t}\rightarrow f_3\left(\xi_{B_{j-2}}^{t},\xi_{B_{j-4}}^{t}\right) \quad (5)$$

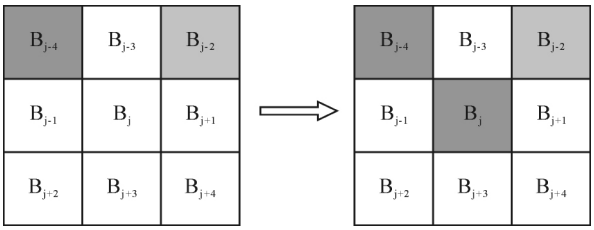



图 5 $\xi_{B_j}^{t}\rightarrow\xi_{B_j}^{t+\Delta t}$ 晶界的转变 3

Fig.5 $\xi_{B_j}^{t}\rightarrow\xi_{B_j}^{t+\Delta t}$ grain boundary transitions 3

(4)若在当前 CAS,枝晶尖端元胞 $B_j$ 的左邻居元胞 $B_{j-1}$ 的状态为晶界,则下一 CAS,$B_j$ 的状态转变为晶界,如图 6。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$$\xi_{B_j}^{t+\Delta t} \rightarrow f_4\left(\xi_{B_{j-1}}^{t}\right) \tag{6}$$

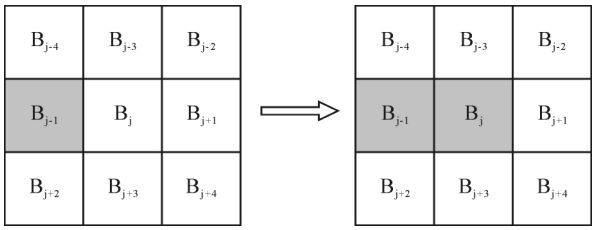



图 6 $\xi_{B_j}^{t} \rightarrow \xi_{B_j}^{t+\Delta t}$ 晶界的转变 4

Fig.6 $\xi_{B_j}^{t} \rightarrow \xi_{B_j}^{t+\Delta t}$ grain boundaries moving4

(5)若在当前 CAS，枝晶尖端元胞 $B_j$ 的右邻居元胞 $B_{j+1}$ 的状态为晶界，此时不论左邻居 $B_{j-1}$ 状态如何，则下一 CAS，$B_j$ 的状态转变为 $B_{j-1}$ 的状态，即 $\xi_{B_j}^{t+\Delta t} \rightarrow f_5\left(\xi_{B_{j+1}}^{t}, \xi_{B_{j-1}}^{t}\right)$。

(6)若当前 CAS，枝晶尖端元胞 $B_j$ 的左下邻居元胞 $B_{j+2}$ 的状态为晶界，则下一 CAS，$B_j$ 的状态转变为晶界，即 $\xi_{B_j}^{t+\Delta t} \rightarrow f_6\left(\xi_{B_{j+2}}^{t}\right)$。

(7)若在当前 CAS，枝晶尖端元胞 $B_j$ 的下邻居元胞 $B_{j+3}$ 的状态为晶界，则下一 CAS，$B_j$ 的状态转变为晶界，即 $\xi_{B_j}^{t+\Delta t} \rightarrow f_7\left(\xi_{B_{j+3}}^{t}\right)$。

(8)若在当前 CAS，枝晶尖端元胞 $B_j$ 的右下邻居元胞 $B_{j+4}$ 的状态为晶界，则下一 CAS，$B_j$ 的状态转变为晶界。即 $\xi_{B_j}^{t+\Delta t} \rightarrow f_8\left(\xi_{B_{j+4}}^{t}\right)$。

(9)本文定义如图 7 中 $B_{21}$、$B_{41}$、$B_{61}$、$B_{81}$ 4 个元胞为中心元胞 $B_j$ 的次近邻，若在当前 CAS，枝晶尖端元胞 $B_j$ 的上上邻居元胞 $B_{21}$ 的状态为晶界，此时不论下邻居 $B_{j+3}$ 的状态是如何的，在下一 CAS，$B_j$ 的状态都定义转变为 $B_{j+3}$ 对应的的状态。

$$\xi_{B_j}^{t+\Delta t} \rightarrow f_9\left(\xi_{B_{21}}^{t}, \xi_{B_{j+3}}^{t}\right)$$

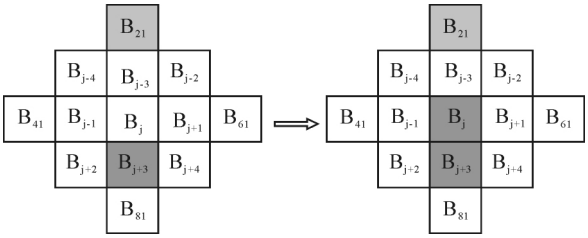



图 7 $\xi_{B_j}^{t} \rightarrow \xi_{B_j}^{t+\Delta t}$ 晶界的转变 9

Fig.7 $\xi_{B_j}^{t} \rightarrow \xi_{B_j}^{t+\Delta t}$ grain boundaries moving 9

(10)若在当前 CAS，枝晶尖端元胞 $B_j$ 的左邻居的左边元胞 $B_{41}$ 的状态为晶界，则下一 CAS，$B_j$ 的状态转变为晶界，如图 8。

$$\xi_{B_j}^{t+\Delta t} \rightarrow f_{10}\left(\xi_{B_{41}}^{t}\right)$$

(11)若在当前 CAS，枝晶尖端元胞 $B_j$ 的右邻居的右边元胞 $B_{61}$ 的状态为晶界，此时不论左邻居 $B_{j-1}$ 状态如何，则下一 CAS，$B_j$ 的状态转变 $B_{j-1}$ 的状态，如图 9。

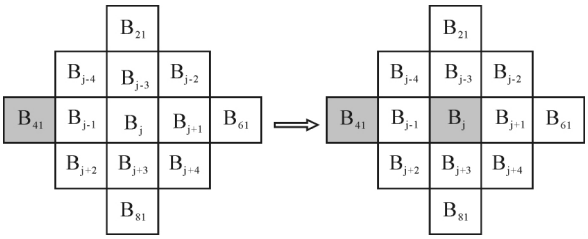



图 8 $\xi_{B_j}^{t} \rightarrow \xi_{B_j}^{t+\Delta t}$ 晶界的转变 10

Fig.8 $\xi_{B_j}^{t} \rightarrow \xi_{B_j}^{t+\Delta t}$ grain boundaries moving 10

$$\xi_{B_j}^{t+\Delta t} \rightarrow f_{11}\left(\xi_{B_{61}}^{t}, \xi_{B_{j-1}}^{t}\right)$$

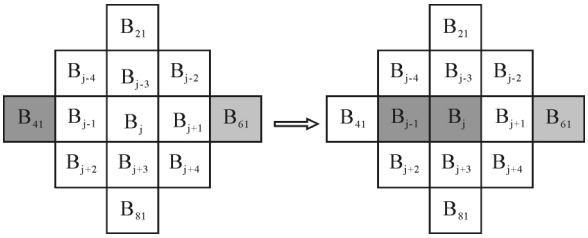



图 9 $\xi_{B_j}^{t} \rightarrow \xi_{B_j}^{t+\Delta t}$ 晶界的转变 11

Fig.9 $\xi_{B_j}^{t} \rightarrow \xi_{B_j}^{t+\Delta t}$ grain boundaries moving 11

(12)若在当前 CAS，枝晶尖端元胞 $B_j$ 的下下邻居元胞 $B_{81}$ 的状态为晶界，则下一 CAS，$B_j$ 的状态转变为晶界，如图 10。

$$\xi_{B_j}^{t+\Delta t} \rightarrow f_{12}\left(\xi_{B_{81}}^{t}\right)$$

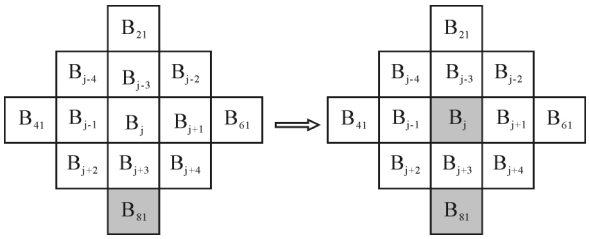



图 10 $\xi_{B_j}^{t} \rightarrow \xi_{B_j}^{t+\Delta t}$ 晶界的转变 12

Fig.10 $\xi_{B_j}^{t} \rightarrow \xi_{B_j}^{t+\Delta t}$ grain boundaries moving 12

上述提出了柱状晶长大 12 邻居局域转变规则，该规则充分考虑了元胞间状态关系；充分考虑了吞噬方向与吞噬速度形成的邻居关系；基于 8 近邻、4 次近邻及中心元胞间的位置关系，提出了柱状晶依与轴向成 60°方向生长的 CA 法局域性转变规则。与此类同，可以定义其他方向生长的柱状晶 CA 法局域性转变规则，并将此类 12 邻居转变规则统称为柱状晶长大局域转变规则。

柱状晶长大局域转变规则的主要思想是，将 12 邻居类型与有向吞噬关系引入 CA 法局域模型中，依过冷度形成的生长方向，通过制定 12 邻居元胞间

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

的状态转变规则，建立柱状晶长大模型。

## 3 柱状晶长大规则及模块开发

(1)基于等过冷度面的柱状晶梯度形核密度规则　柱状晶形核采用面形核密度为主，电渣重熔钢锭底部模拟空间采用从底层元胞面形核开始的轴向梯度形核密度，电渣重熔钢锭侧部模拟空间采用在元胞空间的外壁沿径向中心的面梯度形核密度。提出垂直于散热方向的等过冷度面形核规则，并将其定义为柱状晶等过冷度面形核规则。即电渣重熔铸件底部柱状晶元胞空间形核—底层元胞面形核，并沿轴向向上呈梯度变化的面形核密度；电渣重熔钢锭外壁柱状晶径向元胞面形核—并沿径向向中心呈梯度变化的面形核密度。

(2)柱状晶元胞空间边界条件　柱状晶模拟元胞空间边界条件，等轴晶长大元胞空间边界条件的拓扑结构有上与下，左与右的周期性表现，电渣重熔柱状晶长大边界条件拓扑结构应随着模拟位置的不同进行调整。在靠近凝固容器底部柱状晶竖直长大的元胞空间拓扑结构只有左右周期性，没有上下周期性。在铸造容器侧部柱状晶依与轴向成角度长大的元胞空间拓扑结构只有上下周期性，没有左右周期性。依此思想本文提出了柱状晶长大非周期性边界条件：电渣重熔铸件底部柱状晶长大元胞空间边界条件——左右周期性边界条件；电渣重熔铸件侧壁柱状晶长大元胞空间边界条件——上下周期性边界条件。

(3)柱状晶局域转变规则　柱状晶枝晶尖端局域转变规则，即在 CA 法局域模型中引入 12 邻居类型概念与有向吞噬关系，制定晶粒生长尖端元胞沿垂直于散热方向的等过冷度面逐层单向转变规则，建立了柱状晶长大局域转变规则模型。

(4)柱状晶长大模块开发　采用柱状晶长大非周期性边界条件，柱状晶等过冷度梯度面形核规则及柱状晶长大局域转变规则开发柱状晶长大模块。

## 4 实心钢锭典型位置凝固组织的模拟

应用开发模块模拟 $\phi$30cmMn18Cr18N 电渣重熔实心钢锭底部中心和中部径向典型位置的凝固组织，模拟计算采用的元胞空间均为 600 μm×600 μm，面形核率均为 $1.0\times10^7/cm^3$、温度均为 1 415 ℃。底部换热系数均为 500 $W\cdot m^2\cdot K^{-1}$，侧壁冷却边界条件均如图 11。枝晶生长动力学参数中生长系数均取 $a_2=0$，$a_3=7.13\times10^{-5}$。

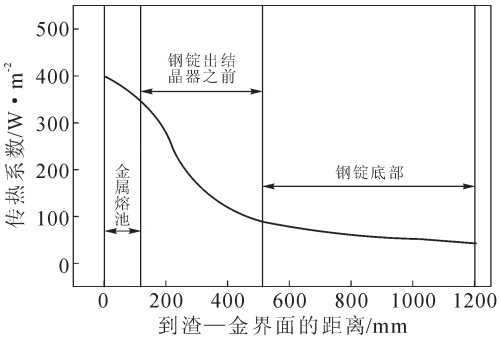
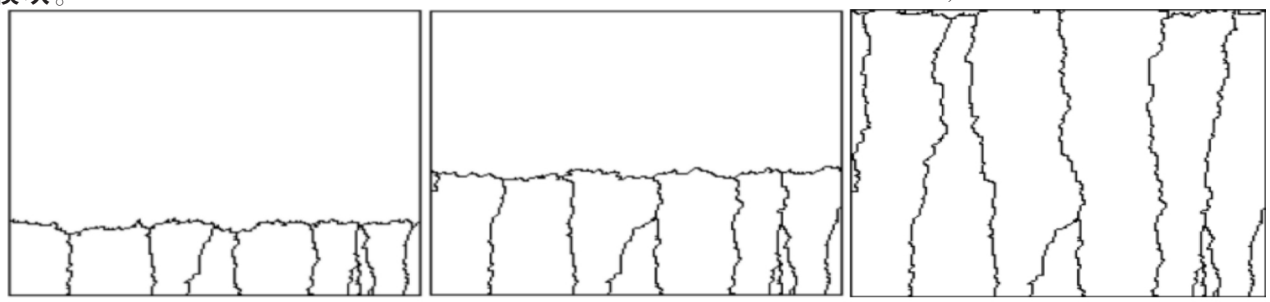



图 11 电渣重熔实心钢锭侧壁传热系数变化规律

Fig.11 Conduction coefficient variation of side wall surface of ESR solid ingot

图 12 是钢锭底部中心柱状晶生长的演化过程，即底部柱状晶尖端生长达到元胞空间 1/3 处（图 12a）、1/2 处（图 12b）和生长完成（图 12c）。可以看出，在柱状晶长大过程中尖端元胞沿垂直于底部结晶器的散热方向的等过冷度面逐层单向生长，且生长方向与散热方向相反，这与图 1a 中底部柱状晶生长特点相吻合。

图 13 模拟研究了钢锭中部结晶器侧壁柱状晶尖端生长达到元胞空间 2/5 处（图 13a）、2/3 处（图 13b）和生长完成（图 13c）的演化过程，同样能够看到在柱状晶长大过程中尖端元胞沿垂直于散热方向的等过冷度面逐层单向生长，且生长方向与轴向约成 60°角，这与侧壁柱状晶同时受到底部和侧壁两个方向过冷度的生长机理相吻合。模拟结果均能够显示，Mn18Cr18N 电渣重熔锭的微观组织结构粗大且几乎沿同一方向生长，侧壁柱状晶生长方向与轴

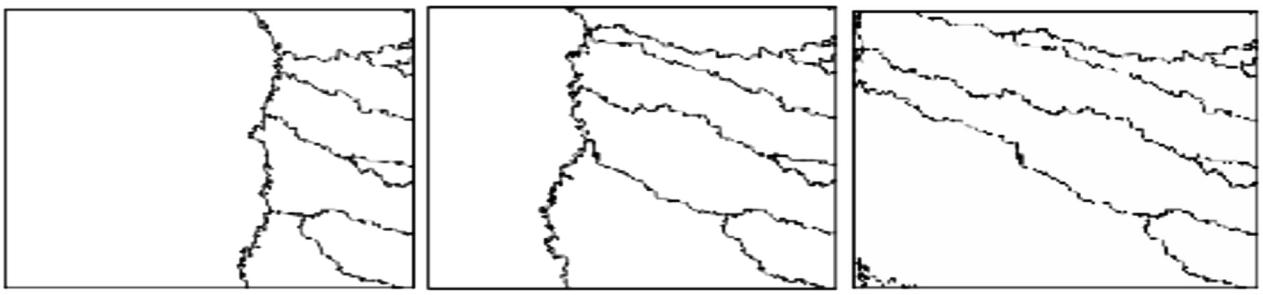


(a)1/3处　(b)1/2处　(c)完成

图 12 底部柱状晶生长演化

Fig.12 Growth and evolution of columnar crystal in the bottom of ESR solid ingot

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



(a)2/5处　　(b)2/3处　　(c)完成

图 13 侧壁柱状晶生长演化

Fig.13 Growth and evolution of side wall columnar crystals

向的夹角会由 90°逐步趋于 60°,这一凝固特征符合电渣重熔钢锭内部柱状晶的生长特点[23]。

## 5 空心钢锭壁厚截面及典型位置凝固组织的模拟

### 5.1 空心钢锭壁厚截面凝固组织的模拟

采用相同侧壁电渣重熔柱状晶模拟模块，模拟 Mn18Cr18N ESR 空心钢锭内外侧壁冷却条件下的柱状晶形核与长大过程。Mn18Cr18N 高氮奥氏体不锈钢空心钢锭尺寸为 $\phi$30 cm×$\phi$10 cm×$\phi$35 cm。模拟计算采用的元胞空间为 20 cm×20 cm，面形核率为 $1.0\times10^7/cm^3$、温度为 1 415 ℃。底部换热系数为 500 $W\cdot m^2\cdot K^{-1}$，枝晶生长动力学参数中生长系数取 $a_2=0$,$a_3=7.13\times10^{-5}$,内外壁冷却边界条件如图 14。

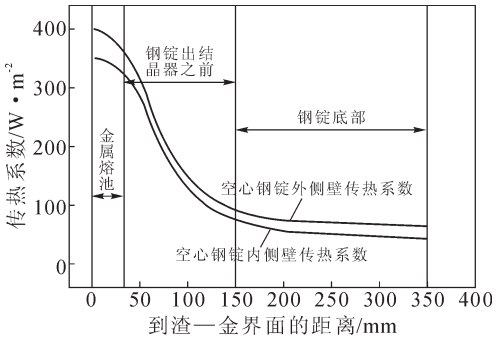
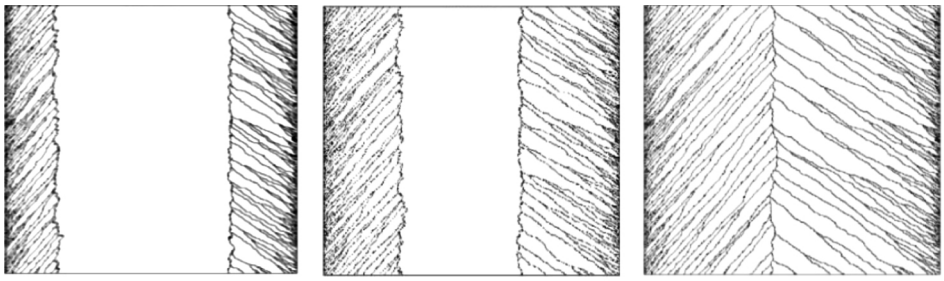



图 14 电渣重熔空心钢锭内外壁传热系数变化规律

Fig.14 Conduction coefficient variation of inner and outer wall surfaces of ESR hollow ingot

图 15 显示了 Matlab 编程实现的电渣重熔空心钢锭中段壁厚截面柱状晶组织生长的模拟结果。图中分别显示了空心钢锭中段内外侧壁柱状晶尖端生长达到模拟件 1/2 处(图 15a)、2/3 处(图 15b)和凝固完成(图 15c)的组织演化过程。可以看出,在柱状晶长大过程中，内壁与外壁尖端元胞均沿垂直于散热方向的等过冷度面逐层单向生长，且生长方向与轴向都约成 60°角，这与内外侧壁柱状晶同时受到底部和侧壁两个方向过冷度的生长机理相吻合。因为结晶器内的冷却水会对表层有激冷作用，所以图中还显示内外侧壁处受到冷却后的会生成一层细晶组织，而这些细晶晶粒组织会沿着热流方向的反方向生长，且由于钢锭会同时受到底面结晶器和侧面结晶冷却的影响，柱状晶优先生长方向会与轴线方向呈 60°左右角,形成一个倒 V 形的柱状晶区。

图 15 模拟研究了电渣重熔钢锭中段凝固组织形貌，钢锭侧壁的垂直方向成为传热速度最大的方向,此方向(优先生长方向)上晶粒会生长很快,故形成柱状晶。从图中可看到,晶粒横截面面积会呈现由表层到心部逐渐增大的情况。此现象是因柱状晶在生长过程中,成分过冷的影响所导致,使得一次枝晶上逐渐会生长出二次枝晶，二次枝晶上又逐渐会生长出三次枝晶，所以才在横截面上出现晶粒尺寸逐渐增大的现象。模拟实验和实践都表明应用电渣重熔技术，正常的熔速就可导致电渣锭中轴心部的等轴晶减少甚至没有，且枝晶主轴间的间距和二次枝晶臂间的间距都非常小，使电渣钢锭的柱状晶组织细密整齐,热加工性能优异。



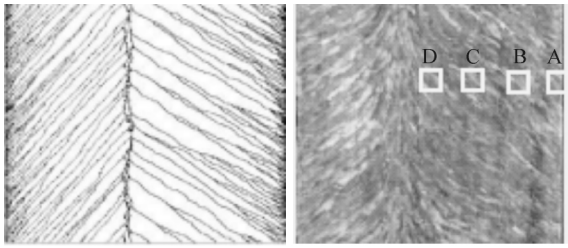
(a)1/2处　　(b)2/3处　　(c)完成

图 15 电渣重熔空心钢锭中段截面柱状晶生长模拟结果

Fig.15 Simulation morphology of columnar crystal in the middle section of ESR hollow ingot

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

如图 16(a)显示了 Matlab 编程实现的 CA 法空心钢锭中段柱状晶凝固组织模拟结果图，图 16(b)显示了空心钢锭中段实验凝固组织结果图。两者在壁厚径向的最终凝固吻合，柱状晶的形貌也基本一致。




(a)模拟结果图　　(b)实验结果图

图 16 电渣重熔空心钢锭中段柱状晶模拟结果与实验结果的比较[24]

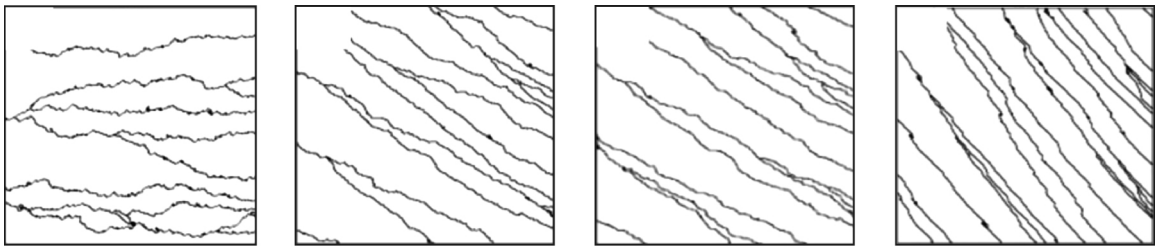
Fig.16 Comparison of simulation result and experimental result columnar crystal in the middle section of ESR hollow ingot

### 5.2 空心钢锭壁厚典型位置凝固组织的点跟踪模拟

图 16(b)实验结果中，从外径到心部等距离取 4 个 600 μm×600 μm 的元胞空间，使空间中心点位与图中四个黄色方框中心点位重合，由外到内依次称为 A、B、C、D 4 个跟踪点，4 个跟踪点分别对应四个元胞空间。采用开发的电渣重熔侧壁柱状晶生长模块模拟介观尺度 4 个跟踪点的凝固组织形貌，得到如图 17(A-D)的微观晶粒组织，其 4 点处微观组织的生长方向会与径向分别成 0°~60°的角不等，从模拟结果中可观察到 4 个点处的凝固组织形貌。采用点跟踪可建立钢锭宏观尺寸与局部点的关系，实现钢锭凝固组织宏观与介观凝固组织的耦合模拟。

## 6 结论

(1)通过分析研究电渣重熔柱状晶凝固组织的形成规律和微观形貌特征，提出了垂直于散热方向的等过冷度面形核梯度密度规则；提出了垂直于散热方向的非周期性边界条件；依据柱状晶凝固组织生长方向和垂直于生长方向的过冷度比值，提出了柱状晶长大的平面元胞局域转变规则。并采用柱状晶长大非周期性边界条件，柱状晶等过冷度面形核规则及柱状晶长大局域转变规则开发柱状晶生长模拟模块。



(a)$\alpha$=0°　(b)$\alpha$=30°　(c)$\alpha$=45°　(d)$\alpha$=60°

图 17 电渣重熔空心钢锭中段典型位置柱状晶生长模拟结果: a, b, c 和 d 相应于图 16 中 A, B, C, D 的位置

Fig.17 Simulation result of columnar crystal of typical locations in the middle section of ESR hollow ingot: a, b, c and d corresponding to the locations A, B, C and D in Fig. 16

(2)采用所开发的 CA 法模拟模块，模拟研究了电渣重熔 Mn18Cr18N 实心钢锭介观尺度的凝固组织形貌，并通过实验结果验证了提出的电渣重熔 CA 法形核和转变规则的有效性。

(3)采用所开发的 CA 法模拟模块，模拟研究了电渣重熔 Mn18Cr18N 空心钢锭宏观尺度的组织形貌。研究显示空心钢锭壁厚截面几乎全由柱状晶组成，形成了倒 V 形的柱状晶区。并对 4 个典型位置的凝固组织进行了点跟踪模拟。研究表明，点跟踪可建立钢锭宏观尺寸与局部点的关系，实现钢锭凝固组织宏观与介观凝固组织的耦合模拟。

### 参考文献：

[1] 吕奎明，李家驹，张文辉. 超大型筒形锻件制造技术的发展现状[J]. 大型铸锻件，2016(1):35-37.

[2] 郭显胜，田丰，杜璇，等. 空心钢锭制造技术发展现状[J]. 大型铸锻件，2015(2):12-16.

[3] 邢世勋，于广文. 空心钢锭生产技术的发展与应用 [J]. 金属世界，2013(1):26-29.

[4] GIRADIN G, JOBARD D. Hollow ingots: thirty years of use to control segregation and quality for nuclear and petrochemical large shells[C]. Forge masters Meeting, 2011,(20):32-35.

[5] DUB V S, LEVKOVL Ya. Experience of Production of Hollow Tubular Ingots by Electroslag Melting [J]. Russian Metallurgy (Metally), 2015(6):478-486.

[6] 姜周华，刘福斌，余强，等. 电渣重熔空心钢锭技术的开发[J]. 钢铁，2015，50(10):30-36.

[7] 郑立春，董艳武，姜周华，等. 电渣液态浇注空心钢锭的数值模拟[J]. 东北大学学报(自然科学版)，2012，33(8):1162-1165.

[8] 来庆红，田丰，谢全胜，等. 大型空心钢锭的生产实践[J]. 热加工工艺，2016，45(13):169-171.

[9] 胡红军，杨明波，罗静，等. Procast 软件在铸造凝固模拟中的应用[J]. 材料科学与工艺，2006，14(3):293-295.

[10] RAPPAZ M, GANDIN C A. Probabilistic Modeling Of Microstructure Formation In Solidification Progress [J]. Acta Metall. 1993, 41(2): 345-360.

[11] Gandin Ch-A, Rappaz M. A coupled finite element-cellular automaton model for the prediction of dendritic grain structures in

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

solidification processes [J]. Acta Metall Mater,1994,42 (7): 2233-2246.

[12] ILACHINSKI A. CELLULAR Automata: A Discrete Universe[M]. World Scientific, 2001. ISBN 9789812381835.

[13] Robert D. 计算材料学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.

[14] 单博炜，魏雷，林鑫，黄卫东. 采用元胞自动机法模拟凝固微观组织的研究进展[J]. 铸造. 2006(5):439-443.

[15] LIU Y，BAUDIN T，PENELLE R. Simulation Of Normal Grain Growth By Cellular Automata [J]. Scripta Materialia. 1996, 34(11): 1679-1683.

[16] RAABE D. Introduction Of A Scalable Three-dimensional Cellular Automaton With A Probabilistic Swiching Rule For The Discrete Mesoscale Simulation Of Recrystallization Phenomena [J]. Philosophical Magazine A. 1999, 79(10): 2339-2358.

[17] 花福安，杨院生，郭大勇，童文辉，胡壮麒. 基于曲率驱动机制的晶粒生长元胞自动机模型 [J]. 金属学报. 2004，40 (11): 1210-1214.

[18] 张林，张彩碚，王元明，王绍青. 连续冷却过程中低碳钢奥氏体 J 铁素体相变的元胞自动机模拟[J]. 金属学报. 2004，40(1): 8-13.

[19] 关小军，焦宪友，周家娟等. 单一晶粒长大过程的元胞自动机模拟[J]. 中国有色金属学报. 2007，17(5): 699-703.

[20] 柯常波，张新平. 第二相颗粒对多晶材料晶粒生长影响的元胞自动机 (CA) 模拟 [J]. 中国有色金属学报，2009，19 (12): 2173—2178.

[21] 宋迎德，郝海，张爱民等. 基于角点生长算法的镁合金晶粒组织模拟[J]. 铸造. 2012，61(6): 626-631.

[22] HUNT J D. Steady state columnar and equiaxed growth of dendrites and eutectic [J]. Materials Science and Engineering,1984, 65 (1): 75-83.

[23] 秦凤鸣. Mn18Cr18N 高氮奥氏体不锈钢热加工微观组织演变机理及其细匀化控制[D]. 太原:太原科技大学，2018.

[24] 陈旭. 电渣重熔空心钢锭过程的数学模拟和试验研究 [D]. 东北; 东北大学，2016.

招贤纳士

## 襄阳聚力新材料科技有限公司

**一、招聘销售工程师**

任职要求：

1. 本科及以上学历，铸造、耐火材料、冶金、有色金属专业，熟悉二维、三维绘图软件者优先考虑。
2. 2 年以上铸造行业耐火材料销售或铸造涂料销售经验者。
3. 2 年以上铸造行业用中频炉或压铸行业工业炉销售经验者。
4. 2 年以上铸造行业铁合金生产或销售经验者。
5. 2 年以上耐火材料技术研发或产品应用经验者。
6. 2 年以上铸造涂料技术研发或产品应用经验者。
7. 2 年以上有在铸造厂工作经验，对中频炉熔炼或造型工艺熟悉者。
8. 在压铸厂或铝厂工作 2 年以上，对有色金属铜铝熔炼工艺流程熟悉者。

**二、招聘销售经理**

任职要求：

1. 大专及以上学历，铸造、耐火材料、冶金、有色金属专业，熟练掌握办公软件，懂产品市场宣传，营销策划者优先考虑。
2. 5 年以上铸造行业耐火材料销售、铸造涂料或类似工业品销售经验者。
3. 5 年以上铸造行业用中频炉或压铸行业工业炉销售经验者。
4. 性格外向，诚信可靠，乐观向上，抗压力强。
5. 逻辑思维清晰，做事干净利落，工作效率高。
6. 善于多部门或多层次沟通协调。

**三、销售助理**

任职要求：

1. 男性，30 岁以下，本科学历，身体健康，适合经常出差。
2. 性格外向，诚信可靠，乐观向上，抗压力强。
3. 逻辑思维清晰，做事干净利落，工作效率高。
4. 善于多部门或多层次沟通协调。

有意向者请将简历发送至邮箱 wuhaiyan@xyjllc.com

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net