



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 113987892 A

(43) 申请公布日 2022. 01. 28

(21) 申请号 202111614333.X

(51) Int. Cl.

(22) 申请日 2021.12.28

G06F 30/23 (2020.01)

G16C 20/10 (2019.01)

(71) 申请人 北京钢研高纳科技股份有限公司

G16C 60/00 (2019.01)

地址 100089 北京市海淀区大柳树南村19号

G16C 10/00 (2019.01)

申请人 钢铁研究总院 北京科技大学  
抚顺特殊钢股份有限公司  
宝武特种冶金有限公司  
攀钢集团江油长城特殊钢有限公司

G22B 9/20 (2006.01)

G22C 1/02 (2006.01)

G06F 113/08 (2020.01)

G06F 119/08 (2020.01)

G06F 119/14 (2020.01)

(72) 发明人 曲敬龙 陈正阳 谷雨 杜金辉  
杨树峰 毕中南 杨玉军 田沛玉  
赵斌 安腾 孔豪豪 王迪  
段方震 史玉亭 孟令胜

(74) 专利代理机构 北京维正专利代理有限公司  
11508

代理人 张瑞雪

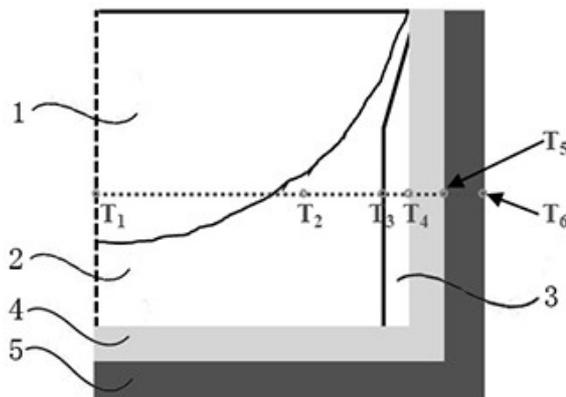
权利要求书4页 说明书23页 附图11页

(54) 发明名称

一种控制高温合金偏析的真空电弧重熔3D模型及控制方法

(57) 摘要

本申请涉及真空电弧重熔领域,公开了一种控制高温合金偏析的真空电弧重熔3D模型及控制方法,真空电弧重熔3D模型包括真空电弧重熔高温合金的凝固传热宏观模型、凝固铸锭微观模型和冶炼工艺参数模型;控制方法包括如下步骤:步骤A、建立真空电弧重熔3D模型;步骤B、模拟工艺参数;步骤C、模拟熔炼过程;步骤D、熔炼高温合金。本申请基于真空电弧重熔3D模型,可以将真空密闭的真空电弧重熔冶炼过程转化为可视化操作,并能直观表征出凝固铸锭的宏-微观组织,制定较为适宜的真空电弧重熔高温合金的冶炼工艺参数,从而降低合金偏析、提高冶金质量,对于冶炼工艺参数的调整匹配、凝固铸锭组织与冶炼质量的把控提供了理论依据与工程指导。



1. 一种控制高温合金偏析的真空电弧重熔3D模型,其特征在于:包括真空电弧重熔高温合金的凝固传热宏观模型、凝固铸锭微观模型和冶炼工艺参数模型;

所述凝固传热宏观模型包括熔炼合金液与凝固铸锭之间的对流传热模型、凝固铸锭内部的传导传热模型、凝固铸锭与结晶器内壁之间的传热模型、结晶器内壁与外壁之间的传导传热模型、结晶器外壁与冷却循环水之间的对流传热模型;

所述凝固铸锭微观模型包括传热模型、传质模型、晶面曲率模型、晶粒形核模型、二次枝晶间距模型、枝晶生长动力学模型。

2. 根据权利要求1所述的一种控制高温合金偏析的真空电弧重熔3D模型,其特征在于:所述凝固传热宏观模型如下式(1-1)所示:

$$\frac{\partial(\rho C_p T)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q \quad (1-1);$$

式(1-1)中,  $\rho$ 表示合金的密度,单位为 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  $C_p$ 表示合金的定压比热容,单位为 $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ;  $T$ 表示真空电弧重熔过程中传热环节的传热温度,单位为 $\text{K}$ ;  $t$ 表示时间,单位为 $\text{s}$ ;  $\lambda$ 表示热导率,单位为 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ;  $Q$ 表示热源项,单位为 $\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  $x$ 、 $y$ 、 $z$ 表示传热环节中传热方向的三维坐标。

3. 根据权利要求2所述的一种控制高温合金偏析的真空电弧重熔3D模型,其特征在于:热源项 $Q$ 表示在模拟铸锭凝固过程中表示凝固潜热放出的热量,假定单位体积、单位时间内

固相率为 $\frac{\partial f_s}{\partial t}$ ,则铸锭凝固过程中释放出的热量 $Q$ 为:

$$Q = H \frac{\partial(\rho f_s)}{\partial t} \quad (1-2);$$

式(1-2)中,  $H$ 表示凝固潜热,单位为 $\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  $f_s$ 表示固相率;

将上述式(1-2)代入式(1-1)可得式(1-3):

$$\left( \frac{\partial(C_p T)}{\partial t} - H \frac{\partial f_s}{\partial t} \right) \frac{\partial(\rho)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (1-3)。$$

4. 根据权利要求1所述的一种控制高温合金偏析的真空电弧重熔3D模型,其特征在于:所述熔炼合金液与凝固铸锭之间的对流传热模型如下式(1-4)所示:

$$q_1 = h_1(T_1 - T_2) \quad (1-4);$$

式(1-4)中,  $T_1 - T_2$ 表示合金液与凝固铸锭的温度梯度,单位为 $\text{K}$ ,其中 $T_1$ 表示,合金液的温度,单位为 $\text{K}$ , $T_2$ 表示凝固铸锭靠近合金液一侧的温度,单位为 $\text{K}$ ;  $h_1$ 表示熔炼合金液与凝固铸锭之间的对流换热系数,单位为 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ;

所述凝固铸锭内部的传导传热模型如下式(1-5)所示:

$$q_2 = \lambda_{\text{合金}} \left( \frac{T_2 - T_3}{\Delta d} \right) \quad (1-5);$$

式(1-5)中,  $\lambda_{\text{合金}}$ 表示凝固铸锭的导热系数,单位为 $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ;  $T_2 - T_3$ 表示凝固铸锭的温度梯度,单位为 $\text{K}$ ,其中 $T_2$ 表示凝固铸锭靠近金属液一侧的温度,单位为 $\text{K}$ , $T_3$ 表示凝固铸锭靠近结晶器一侧的温度,单位为 $\text{K}$ ;  $\Delta d$ 表示凝固铸锭的厚度,单位为 $\text{m}$ ;

所述凝固铸锭与结晶器内壁之间的传热模型如下式(1-6)所示:

$$q_3 = h_3(T_3 - T_4) = \left( \frac{\lambda_{\text{空}}}{d_{\text{空}}} + h_{\text{rad}} \right) \cdot (T_3 - T_4) \quad (1-6);$$

式(1-6)中,  $\lambda_{\text{空}}$ 表示氮气的导热系数,单位为 $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ;  $d_{\text{空}}$ 表示凝固铸锭与结晶器内壁的空隙间距,单位为 $\text{m}$ ;  $h_{\text{rad}}$ 表示气隙的辐射换热系数,单位为 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ;  $h_3$ 表示凝固铸锭与结晶器内壁之间的对流换热系数,单位为 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ;  $T_3 - T_4$ 表示凝固铸锭与结晶器内壁的温度梯度,单位为 $\text{K}$ ,其中 $T_3$ 表示凝固铸锭靠近结晶器一侧的温度,单位为 $\text{K}$ ,  $T_4$ 表示结晶器内壁的温度,单位为 $\text{K}$ ;

所述结晶器内壁与外壁之间的传导传热模型如下式(1-7)所示:

$$q_4 = \lambda_{\text{铜}} \left( \frac{T_4 - T_5}{d_{\text{铜}}} \right) \quad (1-7);$$

式(1-7)中,  $\lambda_{\text{铜}}$ 表示铜结晶器的导热系数,单位为 $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ;  $d_{\text{铜}}$ 表示铜结晶器的厚度,单位为 $\text{m}$ ;  $T_4 - T_5$ 表示结晶器的温度梯度,单位为 $\text{K}$ ,其中 $T_4$ 表示结晶器内壁的温度,单位为 $\text{K}$ ,  $T_5$ 表示结晶器外壁的温度,单位为 $\text{K}$ ;

所述结晶器外壁与冷却循环水之间的对流传热模型如下式(1-8)所示:

$$q_5 = h_5(T_5 - T_6) \quad (1-8);$$

式(1-8)中,  $T_5 - T_6$ 表示结晶器外壁与冷却循环水的温度梯度,单位为 $\text{K}$ ,其中 $T_5$ 表示结晶器外壁的温度,单位为 $\text{K}$ ,  $T_6$ 表示冷却循环水的温度,单位为 $\text{K}$ ;  $h_5$ 表示结晶器外壁与冷却循环水之间的对流换热系数,单位为 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ,  $h_5$ 表达如下式(1-9)所示:

$$h_5 = \frac{0.023\lambda_f}{d} \left( \frac{v \cdot d}{\mu} \right)^{0.8} \text{Pr}^{0.4} \quad (1-9);$$

式(1-9)中,  $\lambda_f$ 表示冷却循环水的导热系数,单位为 $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ;  $v$ 表示冷却循环水的流速,单位为 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $\mu$ 表示冷却循环水的粘度,单位为 $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $d$ 表示冷却循环水流的当量直径,单位为 $\text{m}$ ;  $\text{Pr}$ 表示普朗特系数。

5. 根据权利要求1所述的一种控制高温合金偏析的真空电弧重熔3D模型,其特征在于:所述冶炼工艺参数模型如下式(1-10)所示:

$$T = T_L + 400e^{-12\frac{D_i}{J}} \quad (1-10);$$

式(1-10)中,  $T$ 表示金属熔池表面温度,单位为 $\text{K}$ ;  $T_L$ 表示合金液相线温度,单位为 $\text{K}$ ;  $J$ 表示熔炼电流,单位为 $\text{KA}$ ;  $D_i$ 表示铸锭直径,单位为 $\text{m}$ 。

6. 根据权利要求1所述的一种控制高温合金偏析的真空电弧重熔3D模型,其特征在于:所述微观传热模型如下式(1-11)所示:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda \nabla^2 T + \rho L \frac{\partial f_s}{\partial \tau} \quad (1-11);$$

式(1-14)中,  $\rho$ 表示密度,单位为 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  $\lambda$ 表示热传导系数,单位为 $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ;  $C_p$ 表示定

压比热容,单位为 $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ;  $\nabla$ 表示拉普拉斯算子;  $T$ 表示计算区域的温度场,单位为 $\text{K}$ ;

$\left(\rho L \frac{\partial f_s}{\partial \tau}\right)$ 表示凝固潜热释放的热量,单位为 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ;  $f_s$ 表示固相分数;  $\tau$ 表示时间,单位为 $\text{s}$ ;

所述传质模型如下式(1-12)所示:

$$\frac{\partial C_i}{\partial \tau} = \nabla \cdot (D_i \nabla C_i) + (C_l - C_s) \frac{\partial f_s}{\partial \tau} \quad (1-12);$$

式(1-12)中,  $C_i$ 表示溶质浓度,单位为%;  $\nabla$ 表示拉普拉斯算子;  $D_i$ 表示溶质扩散系数; 下标  $i$  为  $s$  或  $l$ ,  $s$  代表固相,  $l$  代表液相;  $(C_l - C_s) \frac{\partial f_s}{\partial \tau}$  表示铸锭从固相变成液相所排出的溶质,  $f_s$  表示固相分数;  $\tau$  表示时间, 单位为  $\text{s}$ 。

7. 根据权利要求1所述的一种控制高温合金偏析的真空电弧重熔3D模型, 其特征在于: 所述晶面曲率模型由固-液界面处宏观过冷度  $\Delta T_0$  和固-液界面处微观过冷度  $\Delta T$  体现, 固-液界面处宏观过冷度  $\Delta T_0$  如下式(1-13)所示:

$$\Delta T_0 = \Delta T_c + \Delta T_r + \Delta T_t + \Delta T_k \quad (1-13);$$

式(1-13)中,  $\Delta T_c$  表示成分过冷度;  $\Delta T_r$  表示曲率过冷度;  $\Delta T_t$  表示温度过冷度;  $\Delta T_k$  表示动力学过冷度;

固-液界面处微观过冷度  $\Delta T$  如下式(1-14)所示:

$$\Delta T = T_L - T + (C_1^* - C_0) \cdot m - \Gamma K f(\varphi, \theta) \quad (1-14);$$

式(1-17)中,  $T_L$  表示液相线温度, 单位为 $\text{K}$ ;  $T$  表示固-液界面处温度, 单位为 $\text{K}$ ;  $C_0$  表示初始浓度, 单位为%;  $m$  表示液相线斜率;  $\Gamma$  表示Gibbs-Thomson系数;  $K$  表示固-液界面处的平均曲率;  $f(\varphi, \theta)$  表示界面各向异性函数;  $\varphi$  表示固-液界面的法向与水平方向的夹角;  $\theta$  表示枝晶的择优生长方向; 其中固-液界面处的平均曲率  $K$  可根据界面胞邻胞固相分数计算, 计算式如下式(1-15)所示:

$$K = \frac{1}{\Delta x} \left( 1 - \frac{2}{N_n + 1} \left( f_s + \sum_{i=1}^N f_s(i) \right) \right) \quad (1-15);$$

式(1-15)中,  $N_n$  表示邻胞数目;  $\Delta x$  表示元胞尺寸, 参与计数的元胞可选择包括最近邻、次近邻与第三近邻在内的邻居元胞;  $f_s(i)$  表示固相分数。

8. 根据权利要求1所述的一种控制高温合金偏析的真空电弧重熔3D模型, 其特征在于: 所述晶粒形核模型中, 假设晶核数与过冷度保持连续的依赖关系, 用连续而非离散的分布函数  $dn/d(\Delta T)$  来描述晶粒密度的变化, 具体如下式(1-16)所示:

$$\frac{dn}{d(\Delta T)} = \frac{n_{\max}}{\sqrt{2\pi}\Delta T_\sigma} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{\Delta T - \Delta T_{\max}}{\Delta T_\sigma} \right)^2 \right] \quad (1-16);$$

式(1-16)中,  $dn/d(\Delta T)$  表示过冷度增加  $d(\Delta T)$  所引起的晶粒密度增加  $dn$ ;  $n_{\max}$  表示最大形核质点密度, 单位为  $\text{m}^{-3}$ ;  $\Delta T_\sigma$  一标准方差过冷度, 单位为 $\text{K}$ ;  $\Delta T_{\max}$  表示最大形核过冷度, 单位为 $\text{K}$ 。

9. 根据权利要求1所述的一种控制高温合金偏析的真空电弧重熔3D模型, 其特征在于:

所述二次枝晶间距模型如下式(1-17)所示:

$$SDAS(t) = [M(t)t_L]^{1/3} \quad (1-17);$$

式(1-17)中, $M(t)$ 表示合金性质的常数; $t_L$ 表示某空间位置的凝固时间,单位为s;其中, $M(t)$ 通过下式(1-18)表示:

$$M(t) = [C_l(t) - C_{l,0}]^{-1} \left[ \frac{\sigma_{sl} D_l T_M}{L(1-k)m} \ln C_l(t) - \ln C_{l,0} \right] \quad (1-18);$$

式(1-18)中, $\sigma_{sl}$ 表示固-液界面能,单位为J; $D_l$ 表示溶质在合金液中的扩散系数; $T_M$ 表示纯物质的熔点,单位为K; $L$ 表示熔化潜热,单位为 $\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  $k$ 表示平衡分配系数; $m$ 表示合金元素的液相线斜率; $C_l(t)$ 表示t时刻液相溶质的浓度,单位为%; $C_{l,0}$ 表示为液相溶质的标称浓度,单位为%;

所述枝晶生长动力学模型如下式(1-19)所示:

$$v = a_2 \Delta T^2 + a_3 \Delta T^3 \quad (1-19);$$

式(1-19)中, $\Delta T$ 表示固-液界面处微观过冷度, $a_2$ 、 $a_3$ 分别为生长系数,具体如下:

$$\begin{cases} a_2 = \left[ \frac{-\rho}{2\Gamma k(mc_0)(1-k)^2} + \frac{mc_0}{D(mc_0)^2(1-k)} \right] \frac{D^2}{\pi^2 \Gamma} \\ a_3 = \frac{D^2}{\pi \Gamma D(mc_0)^2(1-k)} \end{cases} \quad (1-20);$$

式(1-20)中, $c_0$ 表示合金中各元素的质量分数,单位为%; $\rho$ 表示高温合金的密度,单位为 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  $m$ 表示液相线斜率; $k$ 表示溶质平衡分配系数; $D$ 表示溶质自扩散系数; $\Gamma$ 表示Gibbs-Thomson系数。

10. 一种降低高温合金偏析的真空电弧重熔控制方法,其特征在于:包括如下步骤:

步骤A、建立模型:采用计算机数值模拟方法建立权利要求1-9任一项所述的真空电弧重熔3D模型;

步骤B、模拟工艺参数:根据高温合金性能设定多组熔化速率值,并根据多组熔化速率值结合至真空电弧重熔控制模型中,迭代得到多组熔炼工艺条件模拟值;

步骤C、模拟熔炼过程:根据多组熔炼工艺条件模拟值,分析对应熔化速率下金属熔池形貌与平均深度、铸锭枝晶间距与凝固组织信息,制定适宜的真空电弧重熔高温合金的熔炼条件参数;

步骤D、熔炼高温合金:根据模型模拟得到的熔炼条件参数,熔炼高温合金。

## 一种控制高温合金偏析的真空电弧重熔3D模型及控制方法

### 技术领域

[0001] 本申请涉及真空电弧重熔领域,更具体地说,它涉及一种控制高温合金偏析的真空电弧重熔3D模型及控制方法。

### 背景技术

[0002] 目前,高温合金在国防建设和国民经济发展中发挥着举足轻重的作用,是先进地面燃机、航空航天发动机及其它高端制造产业不可或缺的关键材料。高温合金逐渐向大尺寸、高合金化等方向发展,且需要加入Al、Ti、Nb、Co、Mo、Cr、W、Re等十余种强化元素,确保合金具有合适的高温强度、优异的抗高温氧化或腐蚀性能及良好的组织稳定性,但采用的强化元素亦容易导致合金因均质化程度低而形成偏析,致使合金的均匀性与热加工塑性降低,进而严重影响合金的使用寿命和工作性能。

[0003] 对于控制合金的均质化程度,目前通常采用源头预防的方式,主要是控制冶炼设备、技术及工艺等方法以减少偏析的产生。然而,在高温合金的三联冶炼体系中,真空电弧重熔作为高温合金最终的冶炼工艺,其对于铸锭均质化与冶金质量稳定性控制具有重要影响。

[0004] 对于真空电弧重熔工艺的控制,目前国外有相关技术采用计算机仿真技术对真空电弧重熔高温合金的冶炼工艺与铸锭质量进行预测与判断,进而通过调整优化工艺参数,控制合金的内部偏析与冶金质量。对此,国外研究人员早已开始搭建真空电弧重熔3D模型,但是真空电弧重熔模拟过程中涉及多维、多相、多尺度及多物理场,求解过程较为复杂,因此目前仅是对真空电弧重熔的某一部分(电极、电弧、凝固铸锭等)进行研究,但未能实现多维、多相、多尺度及多物理场的模拟过程。

[0005] 对于实现多维、多相、多尺度及多物理场的真空电弧重熔模拟过程,国外研究人员有将此前研发的相关单方面模型通过数据共享方式偶合在一起,形成2D模型的BAR(Basic Axisymmetric Remelting)、2D模型的MeltFlow-VAR以及3D模型的SOLAR(SOLIDification during Arc Remelting),并通过上述软件实现真空电弧重熔工艺的多维、多尺度及多物理场模拟。如,Patel等人使用BAR软件对真空电弧重熔过程中糊状区内不同位置处温度及流场的变化情况进行实时预测,但是此软件采用粘度系数与常数乘积的方法替代相应的流动模型,导致其不能准确表征真空电弧重熔过程的紊流流动。而MeltFlow-VAR软件采用CFD(Computational Fluid Dynamics)流动模型,弥补了BAR软件的不足,并结合相应的对流传热、凝固、元素分布等模块,有效预测并分析金属熔池的演变与传热、铸锭与结晶器之间的传热损失与电流传导、铸锭中合金元素的浓度分布、局部凝固时间等,但是MeltFlow-VAR软件与BAR软件均为2D模型,在材料物性参数设置方面,仅考虑线性阶段变化,不够全面具体,同时不能表征出合金铸锭的微观组织形貌(晶粒尺寸与取向分布),致使其无法准确预测与把控合金铸锭的偏析与冶金质量。而SOLAR软件与Meltflow-VAR软件具有相似的CFD流动模型,并结合了凝固微观模型、PHYSICA软件及欧拉-欧拉模型等模块,借助“遗传算法”与“迭代算法”的控制思想,对具有连续2次或3次VAR工艺的电极进行不间断的预测,同时实现了

铸锭微观组织的3D模拟,如Beaman等人基于SOLAR软件模拟了多次真空电弧重熔对凝固铸锭中氧元素偏析的影响,模拟结果表明多次熔炼可有效改善铸锭顶端氧元素偏析情况等,虽然软件已经立足于3D模型,但其主要用于多次VAR冶炼过程的仿真,且由于真空电弧重熔工艺的模拟过程存在国内外的技术壁垒问题,难以进口至我国国内应用,国内难以了解到国外搭建真空电弧重熔3D模型的详细过程。

[0006] 对此,我国需对真空电弧重熔工艺的模拟过程进行自主研发。但相比较于国外,国内关于真空电弧重熔工艺中金属熔池的温度场、凝固场、传热条件等基础研究还处于探索阶段,致使国内缺少相关金属熔池模型的理论基础与条件,从而无法全面系统性地建立真空电弧重熔3D模型,导致所得研究结果难以指导实际生产,即很难控制合金的内部偏析与冶金质量等问题。

### 发明内容

[0007] 为了解决国内搭建的真空电弧重熔3D模型难以控制实际生产中的合金偏析问题,本申请提供一种控制高温合金偏析的真空电弧重熔3D模型及控制方法。

[0008] 第一方面,本申请提供一种控制高温合金偏析的真空电弧重熔3D模型,采用如下技术方案:

一种控制高温合金偏析的真空电弧重熔3D模型,包括真空电弧重熔高温合金的凝固传热宏观模型、凝固铸锭微观模型和冶炼工艺参数模型;

所述凝固传热宏观模型包括熔炼合金液与凝固铸锭之间的对流传热模型、凝固铸锭内部的传导传热模型、凝固铸锭与结晶器内壁之间的传热模型、结晶器内壁与外壁之间的传导传热模型、结晶器外壁与冷却循环水之间的对流传热模型;

所述凝固铸锭微观模型包括传热模型、传质模型、晶面曲率模型、晶粒形核模型、二次枝晶间距模型、枝晶生长动力学模型。

[0009] 对于建立系统性的真空电弧重熔3D模型,国内有少量研究人员以Procast或Ansys商业软件为基础对真空电弧重熔3D模型展开研究,利用有限元法建立模型的几何模型,然后通过设置金属熔池的表面温度、合金材料的热物性参数、结晶器的换热系数等简单的边界条件完成金属模型的搭建,缺少对金属熔池-氩气-结晶器的传热过程、金属熔池内合金液的运动状态、铸锭底部与侧壁具有不同的换热系数等重要边界条件的设置等,进而导致所得研究结果难以指导实际生产,难控制合金的内部偏析与冶金质量等问题。如某钢厂通过提高真空电弧重熔过程中铸锭的冷却强度,降低合金内部偏析时,单方面认为冷却循环水流量越大对铸锭的冷却性能越好,甚至将原有设备中的冷却循环水泵更换为更大功率的水泵,但钢厂忽略了冷却循环水流速越快,其与结晶器壁的接触时间越短的关键性问题,导致进出水口温差降低,经过理论计算及实际冶炼数据整理分析后发现,仅追求较大的冷却循环水流量不利于铸锭冷却强度的提高,反而会起到抑制的作用,且不同的冶炼条件均存在最佳的冷却循环水流量。

[0010] 对此,本申请基于实际工业真空电弧重熔工艺的冶炼特性、控制流程及计算机仿真技术,理论计算冶炼电压电流、熔化速率、冷却循环水流量、氩气压力等多项工艺参数与电弧温度、金属熔池的热量导入、冷却循环水带走的热量等控制条件的对应关系,借助Solidworks、Thermal-Calc、Visual Studio、Procast等仿真软件,同时结合传热模型、形核

模型、CAFE等模型及独立自主开发的外接控制方程,建立多维、多尺度、多相场耦合的真空电弧重熔3D模型。其中,Solidworks、Thermal-Calc、Visual Studio、Procast等仿真软件均为现有公知软件。

[0011] 该真空电弧重熔3D模型包括真空电弧重熔高温合金的凝固传热宏观模型、凝固铸锭微观模型和冶炼工艺参数模型组成的多维度模型,通过高温合金的凝固传热宏观模型、凝固铸锭微观模型和冶炼工艺参数模型等多个模型,可以将真空密闭的电弧重熔高温合金工艺变为可视化,表征其实验观测难以发现的现象并解决传统试错法带来的费时费力等问题,还可以基于金属熔池形貌与深度、凝固铸锭的枝晶间距与组织形貌等信息,综合设计优化出较为适宜的真空电弧重熔高温合金的冶炼工艺参数,进而控制并降低高温合金的元素偏析问题。

[0012] 其中,由于不同高温合金具有不同的理论工艺参数,通过调控工艺参数,输入至独立自主开发的外接控制方程,迭代计算出3D模型所需的计算因子,再将计算因子结合至真空电弧重熔高温合金3D模型中,模拟得到的多组熔炼条件参数,并分析每组熔炼条件参数对应所制得的凝固铸锭的合金金属熔池形貌与平均深度、铸锭枝晶间距与凝固组织等信息,确定较为适宜的熔炼条件参数。通过模型及模拟的凝固铸锭信息,使得真空电弧重熔工艺可视化,以模型及模拟结果分析出适宜的熔炼条件参数,避免对多组熔炼条件参数进行实际生产验证这种试错法导致的耗时耗材料耗人力等问题,实用性高。

[0013] 真空电弧重熔工艺包含冶炼电极的重熔、金属的充型及铸锭的凝固,是一个复杂的物理化学冶金过程。为了便于计算并模拟真空电弧重熔工艺,本申请在建立真空电弧重熔3D模型前,对其进行了适当的简化与假设,其内容如下:

(1) 假设所选合金牌号与结晶器所用材质钢种的物性参数均为随温度变化的函数。

[0014] (2) 假设熔化速率、冷却循环水流量、氩气压力、电压电流、冷却循环水的温度等冶炼工艺参数均为恒定的常数。

[0015] (3) 在真空电弧重熔工艺中,假设金属熔池内的合金液以热传导的方式进行传热,并忽略金属熔池内的化学反应。

[0016] (4) 在凝固铸锭的冷却过程中,假设凝固铸锭的凝固坯壳与结晶器侧壁及其底面之间以导热方式为主。

[0017] (5) 结晶器位于冷却循环水套内,忽略结晶器外壁与外界环境之间的导热和辐射传热,仅考虑冷却循环水与结晶器之间的对流换热作用。

[0018] (6) 当全部合金液的模拟温度低于其固相线温度时,认为钢锭全部凝固,凝固组织形态不再变化。

[0019] 然后根据真空电弧重熔高温合金过程中结晶器的实际尺寸(如508mm、660mm、460mm等),利用SolidWorks和Procast软件建立真空电弧重熔高温合金过程中铸锭的有限元模型,通过有限元模型直观地体现金属熔池内铸锭的变化过程。

[0020] 由于真空电弧重熔工艺中,凝固铸锭的凝固传热较为复杂且属于非稳态传热方式,因此,在建立真空电弧重熔高温合金的凝固传热宏观模型中,利用傅立叶导热微分方程表征凝固铸锭的整体传热过程,其傅立叶导热微分方程的数学表达式如式(1-1)所示:

$$\frac{\partial(\rho C_p T)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q \quad (1-1);$$

式(1-1)中,  $\rho$ 表示合金的密度,单位为 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  $C_p$ 表示合金的定压热容,单位为 $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ;  $T$ 表示真空电弧重熔过程中传热环节的传热温度,单位为 $\text{K}$ ;  $t$ 表示时间,单位为 $\text{s}$ ;  $\lambda$ 表示热导率,单位为 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ;  $Q$ 表示热源项,单位为 $\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  $x$ 、 $y$ 、 $z$ 表示传热环节中传热方向的三维坐标。由于铸锭为三维结构,因而铸锭的导热方向亦为三维,设置 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 表示铸锭的三维传热方向,并通过使用边界节点的温度结合式(1-1)对内部节点温度进行求解。

[0021] 对于热源项 $Q$ 表示在模拟铸锭凝固过程中表示凝固潜热放出的热量,假定单位体积、单位时间内固相率为 $\frac{\partial f_s}{\partial t}$ ,则铸锭凝固过程中释放出的热量 $Q$ 为:

$$Q = H \frac{\partial(f_s)}{\partial t} \quad (1-2);$$

式(1-2)中,  $H$ 表示凝固潜热,单位为 $\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  $f_s$ 表示固相率;

将上述式(1-2)代入式(1-1)可得式(1-3):

$$\left( \frac{\partial(C_p T)}{\partial t} - H \frac{\partial f_s}{\partial t} \right) \frac{\partial(\rho)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (1-3)。$$

[0022] 通过上式(1-3),能从三维方向模拟铸锭凝固过程的传热过程,实现多维模拟。

[0023] 其中,真空电弧重熔过程的铸锭凝固传热环节主要由五部分构成,包括熔炼合金液与凝固铸锭之间的对流传热、凝固铸锭内部的传导传热、凝固铸锭与结晶器内壁之间的传热、结晶器内壁与外壁之间的传导传热、结晶器外壁与冷却循环水之间的对流传热,其传热示意图如附图1所示,其中标号1代表金属熔池,标号2代表凝固铸锭,标号3代表凝固铸锭与结晶器内壁之间的缝隙,该缝隙由于铸锭凝固收缩所形成,标号4代表结晶器,标号5代表冷却循环水,附图1中的 $T_1$ 表示金属熔池中熔炼的合金液温度, $T_2$ 表示凝固铸锭靠近合金液一侧的温度, $T_3$ 表示凝固铸锭靠近结晶器内壁一侧的温度, $T_4$ 表示结晶器内壁的温度, $T_5$ 表示结晶器外壁的温度, $T_6$ 表示冷却循环水的温度, $T_1$ 与 $T_2$ 之间存在对流传热,通过熔炼合金液与凝固铸锭之间的对流传热模型表征, $T_2$ 与 $T_3$ 之间存在传导传热,通过凝固铸锭内部的传导传热模型表征, $T_3$ 与 $T_4$ 之间存在传导传热,通过凝固铸锭与结晶器内壁之间的传热模型表征, $T_4$ 与 $T_5$ 之间存在传导传热,通过结晶器内壁与外壁之间的传导传热模型表征, $T_5$ 与 $T_6$ 之间存在对流传热,通过结晶器外壁与冷却循环水之间的对流传热模型表征,通过上述模型将铸锭凝固传热过程更为细化、准确地进行模拟,以全面、精准地控制真空电弧重熔过程,进而精准调控高温合金偏析情况。

[0024] 优选的,所述熔炼合金液与凝固铸锭之间的对流传热模型如下式(1-4)所示:

$$q_1 = h_1(T_1 - T_2) \quad (1-4);$$

式(1-4)中,  $T_1 - T_2$ 表示合金液与凝固铸锭的温度梯度,单位为 $\text{K}$ ,其中 $T_1$ 表示,合金液的温度,单位为 $\text{K}$ , $T_2$ 表示凝固铸锭靠近合金液一侧的温度,单位为 $\text{K}$ ;  $h_1$ 表示熔炼合金液与凝固铸锭之间的对流换热系数,单位为 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ 。

[0025] 本申请采用温度梯度和对流换热系数作为熔炼合金液与凝固铸锭之间的对流传

热边界,能较为精准地计算出熔炼合金液与凝固铸锭之间的对流传热情况,与其他传热情况相结合,以便于精准确定较为适宜的真空电弧重熔工艺条件参数。

[0026] 优选的,所述凝固铸锭内部的传导传热模型如下式(1-5)所示:

$$q_2 = \lambda_{\text{合金}} \left( \frac{T_2 - T_3}{\Delta d} \right) \quad (1-5);$$

式(1-5)中, $\lambda_{\text{合金}}$ 表示凝固铸锭的导热系数,单位为 $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ;  $T_2 - T_3$ 表示凝固铸锭的温度梯度,单位为K,其中 $T_2$ 表示凝固铸锭靠近金属液一侧的温度,单位为K, $T_3$ 表示凝固铸锭靠近结晶器一侧的温度,单位为K;  $\Delta d$ 表示凝固铸锭的厚度,单位为m。

[0027] 本申请采用凝固铸锭的温度梯度、导热系数及厚度作为凝固铸锭内部的传导传热模型的定解条件,能较为精准地计算出凝固铸锭内部的传导传热情况,与其他传热情况相结合,以便于精准确定较为适宜的真空电弧重熔工艺条件参数。

[0028] 优选的,所述凝固铸锭与结晶器内壁之间的传热模型如下式(1-6)所示:

$$q_3 = h_3(T_3 - T_4) = \left( \frac{\lambda_{\text{氩}}}{d_{\text{空}}} + h_{\text{rad}} \right) \cdot (T_3 - T_4) \quad (1-6);$$

式(1-6)中, $\lambda_{\text{氩}}$ 表示氩气的导热系数,单位为 $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ;  $d_{\text{空}}$ 表示凝固铸锭与结晶器内壁的空隙间距,单位为m,由于金属凝固会收缩,这将导致铸锭不再紧贴结晶器内壁,所以凝固铸锭与结晶器内壁之间存在间隙距离。 $h_{\text{rad}}$ 表示气隙的辐射换热系数,单位为 $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ;  $h_3$ 表示凝固铸锭与结晶器内壁之间的对流换热系数,单位为 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ;  $T_3 - T_4$ 表示凝固铸锭与结晶器内壁的温度梯度,单位为K,其中 $T_3$ 表示凝固铸锭靠近结晶器一侧的温度,单位为K, $T_4$ 表示结晶器内壁的温度,单位为K。

[0029] 本申请采用氩气的传导与辐射传热作为凝固铸锭与结晶器内壁之间的传热边界条件,其传热的边界条件和定解条件为空隙间距、氩气的导热系数及空隙内辐射换热系数,能较为精准地计算出凝固铸锭与结晶器内壁之间的传热情况。

[0030] 优选的,所述结晶器内壁与外壁之间的传导传热模型如下式(1-7)所示:

$$q_4 = \lambda_{\text{铜}} \left( \frac{T_4 - T_5}{d_{\text{铜}}} \right) \quad (1-7);$$

式(1-7)中, $\lambda_{\text{铜}}$ 表示铜结晶器的导热系数,单位为 $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ;  $d_{\text{铜}}$ 表示铜结晶器的厚度,单位为m;  $T_4 - T_5$ 表示结晶器的温度梯度,单位为K,其中 $T_4$ 表示结晶器内壁的温度,单位为K, $T_5$ 表示结晶器外壁的温度,单位为K。

[0031] 优选的,所述结晶器外壁与冷却循环水之间的对流传热模型如下式(1-8)所示:

$$q_5 = h_5(T_5 - T_6) \quad (1-8);$$

式(1-8)中,  $T_5 - T_6$ 表示结晶器外壁与冷却循环水的温度梯度,单位为K,其中 $T_5$ 表示结晶器外壁的温度,单位为K, $T_6$ 表示冷却循环水的温度,单位为K;  $h_5$ 表示结晶器外壁与冷却循环水之间的对流换热系数,单位为 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ,  $h_5$ 表达如下式(1-9)所示:

$$h_5 = \frac{0.023 \lambda_f}{d} \left( \frac{v \cdot d}{\mu} \right)^{0.8} \text{Pr}^{0.4} \quad (1-9);$$

式(1-9)中, $\lambda_f$ 表示冷却循环水的导热系数,单位为 $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ;  $v$ 表示冷却循环水的流速,单位为 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $\mu$ 表示冷却循环水的粘度,单位为 $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $d$ 表示冷却循环水流的当量直

径,单位为m;Pr表示普朗特系数。

[0032] 本申请采用冷却循环水的温度、结晶器外壁的温度及冷却循环水与结晶器外壁的对流换热系数作为对流传热的边界和定解条件,能较为精准地计算出结晶器外壁与冷却循环水之间的传热情况。

[0033] 现有技术的真空电弧重熔模拟中,更多是单独剖析熔炼合金液与凝固铸锭之间的传热、凝固铸锭与结晶器之间的传热、结晶器与冷却循环水之间的传热,而忽略了凝固铸锭内部的传导传热、结晶器内壁与外壁之间的传导传热,使得整体宏观模型不全面,模拟得到的结果不尽善。而本申请从熔炼合金液与凝固铸锭之间的对流传热、凝固铸锭内部的传导传热、凝固铸锭与结晶器内壁之间的传热、结晶器内壁与外壁之间的传导传热、结晶器外壁与冷却循环水之间的对流传热这五个方面,去剖析真空电弧重熔过程中熔炼合金液、凝固铸锭、结晶器、冷却水几者中的传热过程,使得模拟过程及结果更全面、系统。具体地,通过式(1-4)至(1-8)计算边界节点的温度值 $q_1$ 、 $q_2$ 、 $q_3$ 、 $q_4$ 、 $q_5$ ,然后将其值作为求解内部节点温度的初始条件,而上述 $q_1$ 、 $q_2$ 、 $q_3$ 、 $q_4$ 、 $q_5$ 为热源项Q中的部分传热热源,热源项Q不仅限于上述温度值。

[0034] 优选的,所述冶炼工艺参数模型如下式(1-10)所示:

$$T = T_L + 400e^{-12\frac{D_i}{J}} \quad (1-10);$$

式(1-10)中, $T$ 表示金属熔池表面温度,单位为K; $T_L$ 表示合金液相线温度,单位为K; $J$ 表示熔炼电流,单位为KA; $D_i$ 表示铸锭直径,单位为m。

[0035] 在真空电弧重熔过程中,冶炼电弧、合金的固液相线温度、铸锭直径等冶炼工艺参数均对金属熔池表面的温度产生影响,因此,采用上述冶炼工艺参数模型可对金属熔池表面温度进行理论计算,以助于计算获得金属熔池表面的温度情况。

[0036] 优选的,所述微观传热模型如下式(1-11)所示:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda \nabla^2 T + \rho L \frac{\partial f_s}{\partial \tau} \quad (1-11);$$

式(1-14)中, $\rho$ 表示密度,单位为 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ; $\lambda$ 表示热传导系数,单位为 $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ; $C_p$ 表示定压比热容,单位为 $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ; $\nabla$ 表示拉普拉斯算子; $T$ 表示计算区域的温度场,单位为K;

$\left( \rho L \frac{\partial f_s}{\partial \tau} \right)$ 表示凝固潜热释放的热量,单位为 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ; $f_s$ 表示固相分数; $\tau$ 表示时间,单位为s,

具体表示模拟软件的计算模拟时间,跟模拟的时间步长与模拟步数、每步的收敛精度相关,为渐变的过程;

所述传质模型如下式(1-12)所示:

$$\frac{\partial C_i}{\partial \tau} = \nabla \cdot (D_i \nabla C_i) + (C_l - C_s) \frac{\partial f_s}{\partial \tau} \quad (1-12);$$

式(1-12)中, $C_i$ 表示溶质浓度,单位为%; $\nabla$ 表示拉普拉斯算子; $D_i$ 表示溶质扩散系数;下标 $i$ 为s或l,s代表固相,l代表液相; $(C_l - C_s) \frac{\partial f_s}{\partial \tau}$ 表示铸锭从固相变成液相所排出的溶质,

$f_s$ 表示固相分数; $\tau$ 表示时间,单位为s,具体表示模拟软件的计算模拟时间,跟模拟的时

间步长与模拟步数、每步的收敛精度相关,为渐变的过程。

[0037] 在上式(1-11)和(1-12)基础上,为驱动枝晶生长,计算域的温度场 $T$ 及溶质场 $C(x, y, \tau)$ 必须满足初始条件和固-液界面边界条件, $x$ 和 $y$ 是元胞在直角坐标系中的位置, $\tau$ 为时间。上述微观计算是建立在前期计算完温度场后,在利用温度场数据进行二次计算。

[0038] 而采用上述的传热模型和传质模型,能呈现铸锭枝晶间距与凝固组织等信息,实现真空电弧重熔高温合金工艺可视化,使得可通过凝固铸锭的微观组织确定适宜的真空电弧重熔工艺条件参数。

[0039] 优选的,所述晶面曲率模型由固-液界面处宏观过冷度 $\Delta T_0$ 和固-液界面处微观过冷度 $\Delta T$ 体现,固-液界面处宏观过冷度 $\Delta T_0$ 如下式(1-13)所示:

$$\Delta T_0 = \Delta T_c + \Delta T_r + \Delta T_t + \Delta T_k \quad (1-13);$$

式(1-13)中, $\Delta T_c$ 表示成分过冷度; $\Delta T_r$ 表示曲率过冷度; $\Delta T_t$ 表示温度过冷度; $\Delta T_k$ 表示动力学过冷度;其中, $\Delta T_k$ 动力学过冷度仅在快速凝固时才较为明显,常规凝固可将其忽略;

固-液界面处微观过冷度 $\Delta T$ 如下式(1-14)所示:

$$\Delta T = T_L - T + (C_1^* - C_0) \cdot m - \Gamma K f(\varphi, \theta) \quad (1-14);$$

式(1-17)中, $T_L$ 表示液相线温度,单位为K; $T$ 表示固-液界面处温度,单位为K; $C_0$ 表示初始浓度,单位为%; $m$ 表示液相线斜率; $\Gamma$ 表示Gibbs-Thomson系数; $K$ 表示固-液界面处的平均曲率; $f(\varphi, \theta)$ 表示界面各向异性函数; $\varphi$ 表示固-液界面的法向与水平方向的夹角; $\theta$ 表示枝晶的择优生长方向;其中固-液界面处的平均曲率 $K$ 可根据界面胞邻胞固相分数计算,计算式如下式(1-15)所示:

$$K = \frac{1}{\Delta x} \left( 1 - \frac{2}{N_n + 1} \left( f_s + \sum_{i=1}^N f_s(i) \right) \right) \quad (1-15);$$

式(1-15)中, $N_n$ 表示邻胞数目; $\Delta x$ 表示元胞尺寸,参与计数的元胞可选择包括最近邻、次近邻与第三近邻在内的邻居元胞; $f_s(i)$ 表示固相分数。

[0040] 本申请通过上述晶面曲率模型计算表征合金铸锭的枝晶间距、晶核数目、组织形貌等微观组织,为微观组织中的基础模型与辅助模型;以便于通过微观组织反馈对应工艺条件下的铸锭微观形貌,进而调控较为适宜的工艺条件参数。

[0041] 优选的,所述晶粒形核模型中,假设晶核数与过冷度保持连续的依赖关系,用连续而非离散的概率分布函数 $dn/d(\Delta T)$ 来描述晶粒密度的变化,具体如下式(1-16)所示:

$$\frac{dn}{d(\Delta T)} = \frac{n_{\max}}{\sqrt{2\pi\Delta T_\sigma}} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{\Delta T - \Delta T_{\max}}{\Delta T_\sigma} \right)^2 \right] \quad (1-16);$$

式(1-16)中, $dn/d(\Delta T)$ 表示过冷度增加 $d(\Delta T)$ 所引起的晶粒密度增加 $dn$ ; $n_{\max}$ 表示最大形核质点密度,单位为 $m^{-3}$ ; $\Delta T_\sigma$ —标准方差过冷度,单位为K; $\Delta T_{\max}$ 表示最大形核过冷度,单位为K。

[0042] 采用上述晶粒形核模型,能以连续方式的表征凝固铸锭的形核过程,在给定的过冷 $\Delta T$ 条件下,形核的晶粒总密度 $n(\Delta T)$ 可由该分布的积分给出,有助于呈现金属熔池形貌与平均深度、铸锭枝晶间距与凝固组织等信息,实现真空电弧重熔高温合金工艺可视化,使

得可通过凝固铸锭的微观组织确定适宜的真空电弧重熔工艺条件参数。

[0043] 优选的,所述二次枝晶间距模型如下式(1-17)所示:

$$SDAS(t) = [M(t)t_L]^{1/3} \quad (1-17);$$

式(1-17)中, $M(t)$ 表示合金性质的常数; $t_L$ 表示某空间位置的凝固时间,单位为s;其中, $M(t)$ 通过下式(1-18)表示:

$$M(t) = [C_l(t) - C_{l,p}]^{-1} \left[ \frac{\sigma_{sl} D_l T_M}{L(1-k)m} \ln C_l(t) - \ln C_{l,p} \right] \quad (1-18);$$

式(1-18)中, $\sigma_{sl}$ 表示固-液界面能,单位为J; $D_l$ 表示溶质在合金液中的扩散系数; $T_M$ 表示纯物质的熔点,单位为K; $L$ 表示熔化潜热,单位为 $W \cdot m^{-3}$ ;  $k$ 表示平衡分配系数; $m$ 表示合金元素的液相线斜率; $C_l(t)$ 表示t时刻液相溶质的浓度,单位为%; $C_{l,0}$ 表示为液相溶质的标称浓度,单位为%。

[0044] 在真空电弧重熔3D模型中,通过上式(1-17)和式(1-18)可计算并描述凝固铸锭中二次枝晶间距的分布情况,有助于呈现铸锭枝晶间距与凝固组织等信息,实现真空电弧重熔高温合金工艺可视化。

[0045] 优选的,所述枝晶生长动力学模型如下式(1-19)所示:

$$v = a_2 \Delta T^2 + a_3 \Delta T^3 \quad (1-19);$$

式(1-19)中, $\Delta T$ 表示固-液界面处微观过冷度, $a_2$ 、 $a_3$ 分别为生长系数,具体如下:

$$\begin{cases} a_2 = \left[ \frac{-\rho}{2\Gamma k(m c_0)(1-k)^2} + \frac{m c_0}{D(m c_0)^2(1-k)} \right] \frac{D^2}{\pi^2 \Gamma} \\ a_3 = \frac{D^2}{\pi \Gamma D(m c_0)^2(1-k)} \end{cases} \quad (1-20);$$

式(1-20)中, $c_0$ 表示合金中各元素的质量分数,可根据合金内各元素含量推导出来; $\rho$ 表示高温合金的密度,单位为 $kg \cdot m^{-3}$ ;  $m$ 表示液相线斜率; $k$ 表示溶质平衡分配系数; $D$ 表示溶质自扩散系数; $\Gamma$ 表示Gibbs-Thomson系数。

[0046] 在模拟铸锭的微观组织过程中,通过采用上述枝晶生长动力学(KGT)模型来描述铸锭的柱状晶和等轴晶的生长速度,有助于呈现金属熔池形貌与平均深度、铸锭枝晶间距与凝固组织等信息,实现真空电弧重熔高温合金工艺可视化。

[0047] 基于上述真空电弧重熔高温合金的凝固传热宏观模型、凝固铸锭微观模型和冶炼工艺参数模型的构建,先设定真空电弧重熔高温合金的物性参数、边界条件,再将所得到的物性参数、边界条件结果耦合到真空电弧重熔3D模型中,进行数值仿真迭代求解,进而获得多组熔炼工艺条件模拟值。

[0048] 其中,对于物性参数的设定,基于高温合金的化学成分,利用Thermal-Calc软件中多组相合金的热力学数据库、Scheil-Gulliver方程及Procast软件的合金材料数据库,计算高温合金在不同温度条件下的传导率、密度、热焓等物性参数,并将所得结果耦合到真空电弧重熔3D模型中。

[0049] 对于边界条件的设定,由于在真空电弧重熔3D模型中,高温合金与结晶器所用纯铜为两种不同的合金材料,考虑到两种不同材质的合金在同一界面上,且存在温度降,为确

保数值仿真结果的准确性与区别界面两端的温度,将铜结晶器与高温合金的界面节点进行双重化处理。

[0050] 通过Visual Studio软件编写并添加外接控制方程的方式,控制金属熔池的添加质量、温度及上升速率等铸锭的冷却边界条件,同时包含并调用重熔时长与金属熔池液面上升速率、重熔时长与铸锭高度、结晶器侧壁传热系数与铸锭接触面积、氦气压力与铸锭高度、结晶器底部传热系数与铸锭高度等方面的数学表达式,共同耦合到真空电弧重熔3D模型,使真空电弧重熔3D模型具备连续性、移动性、渐变性等特性。

[0051] 最后,通过Procast、Visual Studio等仿真对真空电弧重熔3D模型进行数值仿真迭代求解。在数值仿真计算运行过程中,时间步长设定为1s;计算停止条件为真空电弧重熔3D模型的固相率达到100%或者达到最大的计算步数;模拟计算的收敛精度设置为 $1 \times 10^{-5}$ ;模拟结果的输出频率设置为1;数值模型的最大填充率设置为1。

[0052] 第二方面,本申请提供的一种降低高温合金偏析的真空电弧重熔控制方法,采用如下的技术方案:

一种降低高温合金偏析的真空电弧重熔控制方法,包括如下步骤:

步骤A、建立模型:采用计算机数值模拟方法建立真空电弧重熔高温合金的凝固传热宏观模型、凝固铸锭微观模型和冶炼工艺参数模型;

步骤B、模拟工艺参数:根据高温合金性能设定多组熔化速率值,并根据多组熔化速率值结合至凝固传热宏观模型、凝固铸锭微观模型、冶炼工艺参数模型中,迭代得到多组熔炼工艺条件模拟值;

步骤C、模拟熔炼过程:根据多组熔炼工艺条件模拟值,分析对应熔化速率下金属熔池形貌与平均深度、铸锭枝晶间距与凝固组织信息,制定适宜的真空电弧重熔高温合金的熔炼条件参数;

步骤D、熔炼高温合金:根据模型模拟得到的熔炼条件参数,熔炼高温合金。

[0053] 通过真空电弧重熔3D模型模拟多组熔炼条件参数,并基于多组熔炼工艺条件模拟值,分析每组仿真结果中金属熔池形貌与平均深度、铸锭枝晶间距与凝固组织等信息,制定较为适宜的真空电弧重熔高温合金的冶炼工艺参数,然后对高温合金进行熔炼,实现多维、多相、多尺度及多物理场的模拟过程,便于控制合金的内部偏析问题。

[0054] 优选的,熔炼高温合金的具体步骤包括如下:

将高温合金浇铸成型制备高温合金自耗电极,然后将高温合金自耗电极与过渡电极焊接,再装入结晶器内,封炉,抽真空至炉内真空度小于3Pa,送电冶炼;

根据模型模拟得到的熔炼条件参数,建立金属熔池,控制电压电流,以调控熔化速率,对高温合金进行熔炼;

当凝固铸锭的重量在250-350kg时,向真空电弧重熔炉内充入氦气,维持炉内氦气压力在200-350Pa,在恒定熔化速率下熔炼;

当高温合金自耗电极的剩余重量为75-175kg时,停止氦气充入,降低熔化速率,直至熔炼结束;

凝固铸锭在真空电弧重熔炉内冷却60-120min后,对凝固铸锭破空处理后取出,得到高温合金凝固铸锭。

[0055] 通过上述步骤对高温合金进行熔炼,结合真空电弧重熔3D模型模拟得到的冶炼工

艺参数,可对仿真结果中金属熔池形貌与平均深度、铸锭枝晶间距与凝固组织等信息进行分析,明确较为适宜的金属熔池形貌与铸锭宏-微观组织,进一步获得较为适宜的真空电弧重熔高温合金的冶炼工艺参数,以达到降低合金偏析、提高冶金质量的目的。

[0056] 其中,真空电弧重熔工艺中,高温合金自耗电电极重量是指没有经过真空电弧重熔的电极重量,凝固铸锭的重量是指通过真空电弧重熔所形成的铸锭重量。在真空电弧重熔过程中,在形成了一定重量的凝固铸锭后,再充入氦气;而最后凝固铸锭冷却过程中,凝固铸锭在真空电弧重熔炉内真空自然冷却,整个冶炼过程均在真空下完成,熔炼结束后仅作断电处理,冷却过程无任何干扰因素,后续再破真空度,将凝固铸锭取出。

[0057] 综上所述,本申请具有以下有益效果:

1、本申请采用熔炼合金液与凝固铸锭之间的对流传热模型、凝固铸锭内部的传导传热模型、凝固铸锭与结晶器内壁之间的传热模型、结晶器内壁与外壁之间的传导传热模型、结晶器外壁与冷却循环水之间的对流传热模型相结合,构成真空电弧重熔高温合金的凝固传热宏观模型,能较为全面地表征真空电弧重熔过程的传热环节,有助于构建具备连续性、移动性、渐变性等特征的真空电弧重熔3D模型。

[0058] 2、本申请采用传热模型、传质模型、晶面曲率模型、晶粒形核模型、二次枝晶间距模型、枝晶生长动力学模型相结合,构成凝固铸锭微观模型,以模拟真空电弧重熔工艺中的凝固铸锭微观组织,使得真空密闭的电弧重熔高温合金工艺可视化,以便于反馈金属熔池形貌与平均深度、铸锭枝晶间距与凝固组织等信息,与真空电弧重熔高温合金的凝固传热宏观模型相结合,有助建立多维、多尺度、多相场耦合的真空电弧重熔3D模型。

[0059] 3、本申请基于实际工业真空电弧重熔工艺的冶炼特性、控制流程及计算机仿真技术,构建多维、多尺度、多相场耦合的真空电弧重熔3D模型,包括真空电弧重熔高温合金的凝固传热宏观模型、凝固铸锭微观模型和冶炼工艺参数模型,可以将真空密闭的真空电弧重熔冶炼过程转化为可视化操作,并能直观表征出凝固铸锭的宏-微观组织,对于冶炼工艺参数的调整匹配、凝固铸锭组织与冶炼质量的把控提供了理论依据与工程指导;

4、通过设置多组真空电弧重熔高温合金的冶炼工艺参数,对比分析模型模拟过程的仿真结果中金属熔池形貌与平均深度、铸锭枝晶间距与凝固组织等信息,明确较为适宜的金属熔池形貌与铸锭宏-微观组织,进而制定较为适宜的真空电弧重熔高温合金的冶炼工艺参数,从而达到降低合金偏析、提高冶金质量的目的,不仅避免了传统试错法所消耗大量的财力、物力、研发时间等,还提升了铸锭的均质化程度与冶金质量。

## 附图说明

[0060] 图1是本申请真空电弧重熔过程的传热示意图;

图2是实施例1至实施例4的多组熔化速率下金属熔池形貌的变化组图;

图3是实施例1至实施例4的多组熔化速率下金属熔池平均深度的数据图;

图4是实施例1至实施例4的多组熔化速率下铸锭一次枝晶间距的分布情况示意图;

图5是实施例1至实施例4的多组熔化速率下铸锭一次枝晶间距的数据图;

图6是实施例1至实施例4的多组熔化速率下铸锭二次枝晶间距的分布情况示意图;

图7是实施例1至实施例4的多组熔化速率下铸锭二次枝晶间距的数据图；  
图8是实施例1至实施例4的多组熔化速率下铸锭凝固组织的分布情况示意图；  
图9是实施例5至实施例9的多组熔化速率下金属熔池形貌的变化组图；  
图10是实施例5至实施例9的多组熔化速率下金属熔池平均深度的数据图；  
图11是实施例5至实施例9的多组熔化速率下铸锭一次枝晶间距的分布情况示意

图；

图12是实施例5至实施例9的多组熔化速率下铸锭一次枝晶间距的数据图；  
图13是实施例5至实施例9的多组熔化速率下铸锭二次枝晶间距的分布情况示意

图；

图14是实施例5至实施例9的多组熔化速率下铸锭二次枝晶间距的数据图；  
图15是实施例5至实施例9的多组熔化速率下铸锭凝固组织的分布情况示意图；  
图16是实施例10至实施例12的多组冷却循环水流量下金属熔池形貌的变化组图；  
图17是实施例10至实施例12的多组冷却循环水流量下铸锭一次枝晶间距的分布情况示意图；

图18是实施例10至实施例12的多组冷却循环水流量下铸锭二次枝晶间距的分布情况示意图；

图19是实施例10至实施例12的多组冷却循环水流量下铸锭凝固组织的分布情况示意图；

附图说明：1、金属熔池；2、凝固铸锭；3、缝隙；4、结晶器；5、冷却循环水。

## 具体实施方式

[0061] 以下结合附图1-19和实施例对本申请作进一步详细说明。

## 实施例

### [0062] 实施例1

本实施例对于直径508mm的高温合金GH4169进行真空电弧重熔处理。

[0063] 目前,国内企业在真空电弧重熔直径508mm的高温合金GH4169时,其熔化速率选择在 $3.0 \pm 0.05$  kg/min范围内波动;冷却循环水流量在700-800 L/min范围内波动。因此,本实施例将冷却循环水流量和熔化速率均取中间值处理,即冷却循环水设定为750L/min,熔化速率设定为3.0kg/min,通过已知熔化速率,反推金属熔池液面的上升速率,并通过冷却水流量与氩气压力、结合内部经验公式或常数可以计算整体模型的界面换热系数,结合真空电弧重熔高温合金的凝固传热宏观模型、凝固铸锭微观模型和冶炼工艺参数模型进行仿真模拟,耦合外接控制方程,通过时间与位置变化实现边界条件的渐变性、连续性。

[0064] 在数值仿真计算运行过程中,时间步长设定为1s;计算停止条件为真空电弧重熔3D模型的固相率达到100%的计算步数;模拟计算的收敛精度设置为 $1 \times 10^{-5}$ ;模拟结果的输出频率设置为1;数值模型的最大填充率设置为1。

### [0065] 实施例2

本实施例与上述实施例1的区别在于:熔化速率设定为3.5kg/min。

### [0066] 实施例3

本实施例与上述实施例1的区别在于:熔化速率设定为4.0kg/min。

[0067] 实施例4

本实施例与上述实施例1的区别在于:熔化速率设定为4.5kg/min。

[0068] 上述实施例1-4的仿真参数设置如下表1所示:

表1 实施例1-4的真空电弧重熔直径508mm的高温合金GH4169的仿真参数设置

工艺参数	实施例			
	实施例 1	实施例 2	实施例 3	实施例 4
冷却循环水流量 (L/min)	750	750	750	750
熔化速率 (kg/min)	3.0	3.5	4.0	4.5
氩气压力 (Pa)	220	220	220	200
结晶器尺寸 (mm)	508	508	508	508
电弧温度 (K)	2090	2110	2130	2150
熔炼电压 (V)	22.9	22.8	22.7	22.6
熔炼电流 (KA)	5.5	5.7	5.9	6.1
填充比	0.84	0.84	0.84	0.84
冷却循环水初始温度 (K)	298	298	298	298
最大终止步数	$3 \times 10^6$	$3 \times 10^6$	$3 \times 10^6$	$3 \times 10^6$
最大时间步长 (s)	1.0	1.0	1.0	1.0
最大填充分数	1.0	1.0	1.0	1.0
收敛精度	$1 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-5}$
Gibbs-Thomson 系数 $\Gamma$ ( $10^{-7} \text{ m} \cdot \text{K}$ )	3.2	3.2	3.2	3.2
面形核最大晶粒形核密度 ( $10^7 \cdot \text{mm}^{-3}$ )	2.4	2.4	2.4	2.4
面形核平均过冷度 (K)	13	13	13	13
面形核过冷度标准差 (K)	4	4	4	4
体形核最大晶粒形核密度 ( $10^7 \cdot \text{mm}^{-3}$ )	2.2	2.2	2.2	2.2
体形核平均过冷度 (K)	9	9	9	9
体形核过冷度标准差 (K)	4	4	4	4
枝晶生长动力学参数 $a_2$ ( $10^{-8} \text{ ms}^{-1}\text{K}^{-3}$ )	4.2	4.2	4.2	4.2
枝晶生长动力学参数 $a_3$ ( $10^{-9} \text{ ms}^{-1}\text{K}^{-3}$ )	3.9	3.9	3.9	3.9

通过上述仿真结果,并结合附图2至附图8,对比分析当冷却循环水流量为750 L/min时,多组熔化速率条件下金属熔池形貌与平均深度的变化、铸锭枝晶间距与凝固组织的分布情况,筛选较为适宜的真空电弧重熔直径508mm的高温合金GH4169的冶炼工艺参数范围,从而达到降低合金偏析、提高冶金质量的目的。

[0069] 表2 实施例1-4的真空电弧重熔直径508mm的高温合金GH4169的仿真结果

效果呈现	实施例			
	实施例 1	实施例 2	实施例 3	实施例 4
熔化速率 (kg/min)	3.0	3.5	4.0	4.5
金属熔池的平均深度 (mm)	145.4± 0.4	160.1± 0.4	177.7± 0.4	191.1± 0.4
心部处一次枝晶间距 (μm)	12758	12391	12031	11734
心部处二次枝晶间距 (μm)	266.7	251.5	241.2	234.2

其中,图2呈现冷却循环水流量为750 L/min时,多组熔化速率下金属熔池形貌的变化情况,通过图2可知,多组熔化速率条件下金属熔池形貌的图片均由两部分组成,每组图片的左侧部分代表真空电弧重熔过程中熔炼稳定状态下金属熔池与凝固铸锭的温度场分布,右侧部分代表与左侧部分相同时刻下金属熔池与凝固铸锭的固相率。随熔化速率由3.0kg/min递增至4.5kg/min时,金属熔池形貌由“浅U型”逐渐向“U型”再向“深U型”过渡。

[0070] 图3为冷却循环水流量为750 L/min时,多组熔化速率下金属熔池平均深度的变化情况;通过图3并结合表2可知,当冷却循环水流量为750 L/min时,随熔化速率由3.0kg/min递增至4.5kg/min,金属熔池的平均深度也逐渐由145.4±0.4mm增加至191.1±0.4mm。

[0071] 通过图4至图5并结合表2可知,铸锭心部处的一次枝晶间距由12758μm降低至11734μm;通过图6至图7可知,铸锭心部处的二次枝晶间距由266.7μm降低至234.2μm;通过图8可知,凝固铸锭中枝晶间距的分布状态随熔化速率由3.0kg/min递增至4.0kg/min时,凝固铸锭的均匀程度明显提高,但随着熔化速率由4.0kg/min增加至4.5kg/min时,凝固铸锭的枝晶间距分布状态的均匀程度有所降低。此外,铸锭内部凝固组织中倒“V”型柱状晶所形成的偏转角度与凝固铸锭内晶粒的总数量均呈大幅度地增加。

[0072] 通过上述凝固铸锭的微观组织可知,真空电弧重熔直径508mm的高温合金GH4169时,铸锭内部凝固组织随熔化速率的递增而逐渐细化,这对于合金偏析与冶金质量的控制有利,但是随着熔化速率的递增,金属熔池形貌改变,其平均深度增加,导致铸锭内部因合金“密度反转”而形成“黑斑”缺陷的概率也随之增加。

[0073] 综上所述,在真空电弧重熔直径508mm的高温合金GH4169时,当冷却循环水流量为750L/min时,较为适宜的熔化速率应该在3.5-4.0kg/min,其合金的偏析情况将远小于现有熔化速率为3.0kg/min所形成的合金,即当冷却循环水流量为750L/min时,熔化速率为3.5-

4.0kg/min所形成铸锭的均质化程度高于熔化速率为3.0kg/min所形成的铸锭。

[0074] 实施例1至实施例4结合真空电弧重熔3D模型,可得到真空电弧重熔直径508mm的高温合金GH4169的仿真结果,从而获得较为适宜熔化速率下所对应的一系列真空电弧重熔工艺条件参数,能从多维、多尺度、多相场等方面指导真空电弧重熔高温合金的实际生产。

[0075] 实施例5

本实施例对于直径508mm的高温合金GH4720Li进行真空电弧重熔处理。

[0076] 目前,国内企业在真空电弧重熔直径508mm的高温合金GH4720Li时,其熔化速率选择在 $3.2 \pm 0.05$  kg/min范围内波动;冷却循环水流量在850-950 L/min范围内波动。因此,本实施例将冷却循环水流量和熔化速率均取中间值处理,即冷却循环水设定为900L/min,熔化速率设定为3.2 kg/min,通过已知熔化速率,反推金属熔池液面的上升速率,并通过冷却水流量与氩气压力、结合内部经验公式或常数可以计算整体模型的界面换热系数,结合真空电弧重熔高温合金的凝固传热宏观模型、凝固铸锭微观模型和冶炼工艺参数模型进行仿真模拟,耦合外接控制方程,通过时间与位置变化实现边界条件的渐变性和连续性。

[0077] 在数值仿真计算运行过程中,时间步长设定为1s;计算停止条件为真空电弧重熔3D模型的固相率达到100%的计算步数;模拟计算的收敛精度设置为 $1 \times 10^{-5}$ ;模拟结果的输出频率设置为1;数值模型的最大填充率设置为1。

[0078] 实施例6

本实施例与上述实施例5的区别在于:熔化速率设定为3.5kg/min。

[0079] 实施例7

本实施例与上述实施例5的区别在于:熔化速率设定为3.8kg/min。

[0080] 实施例8

本实施例与上述实施例5的区别在于:熔化速率设定为4.1kg/min。

[0081] 实施例9

本实施例与上述实施例5的区别在于:熔化速率设定为4.4kg/min。

[0082] 上述实施例5-9的具体仿真参数设置如下表3所示。

[0083] 表3 实施例5-9的真空电弧重熔直径508mm的高温合金GH4720Li的仿真参数设置

工艺参数	实施例				
	实施例 5	实施例 6	实施例 7	实施例 8	实施例 9
冷却循环水流量 (L/min)	900	900	900	900	900
熔化速率 (kg/min)	3.2	3.5	3.8	4.1	4.4
氦气压力 (Pa)	270	270	270	270	270
结晶器尺寸 (mm)	508	508	508	508	508
电弧温度 (K)	2100	2110	2120	2130	2140
熔炼电压 (V)	22.8	22.8	22.7	22.7	22.6
熔炼电流 (KA)	5.6	5.7	5.8	5.9	6.0
填充比	0.84	0.84	0.84	0.84	0.84
冷却循环水初始温度 (K)	298	298	298	298	298
最大终止步数	$3 \times 10^6$				
最大时间步长 (s)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
最大填充分数	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
收敛精度	$1 \times 10^{-5}$				
Gibbs-Thomson 系数 $\Gamma$ ( $10^{-7} \text{ m} \cdot \text{K}$ )	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4
面形核最大晶粒形核密度 ( $10^7 \cdot \text{mm}^{-3}$ )	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6
面形核平均过冷度 (K)	13	13	13	13	13
面形核过冷度标准差 (K)	4	4	4	4	4
体形核最大晶粒形核密度 ( $10^7 \cdot \text{mm}^{-3}$ )	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3
体形核平均过冷度 (K)	9	9	9	9	9
体形核过冷度标准差 (K)	4	4	4	4	4
枝晶生长动力学参数 $a_2$ ( $10^{-8} \text{ ms}^{-1}\text{K}^{-3}$ )	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
枝晶生长动力学参数 $a_3$ ( $10^{-9} \text{ ms}^{-1}\text{K}^{-3}$ )	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1

通过上述仿真结果,并结合附图9至附图15,对比分析当冷却循环水流量为900 L/

min时,多组熔化速率条件下金属熔池形貌与平均深度的变化、铸锭枝晶间距与凝固组织的分布情况,筛选较为适宜的真空电弧重熔直径508mm的高温合金GH4720Li的冶炼工艺参数范围,从而达到降低合金偏析,提高冶金质量的目的。

[0084] 表4 实施例5-9的真空电弧重熔直径508mm的高温合金GH4720Li的仿真结果

效果呈现	实施例				
	实施例 5	实施例 6	实施例 7	实施 例 8	实施例 9
熔化速率 (kg/min)	3.2	3.5	3.8	4.1	4.4
金属熔池的平均深度 (mm)	146.2 ±0.4	156.7± 0.4	168.1± 0.4	185.4± 0.4	199.7 ±0.4
心部处一次枝晶间距 (μm)	11808	11376	10988	10715	10472
心部处二次枝晶间距 (μm)	267.8	259.5	254.3	248.7	243.6

其中,图9呈现冷却循环水流量为900 L/min时,多组熔化速率下金属熔池形貌的变化情况,多组熔化速率条件下金属熔池形貌的图片均由两部分组成,每组图片的左侧部分代表真空电弧重熔过程中熔炼稳定状态下金属熔池与凝固铸锭的温度场分布,右侧部分代表与左侧部分相同时刻下金属熔池与凝固铸锭的固相率,通过图9可知,随熔化速率由3.2kg/min递增至4.4kg/min时,金属熔池形貌由“浅U型”逐渐向“U型”再向“深U型”过渡。

[0085] 图10为冷却循环水流量为900 L/min时,多组熔化速率下金属熔池平均深度的变化情况;通过图10并结合表4可知,当冷却循环水流量为900 L/min时,随熔化速率由3.2kg/min递增至4.4kg/min时,金属熔池的平均深度也逐渐由146.2±0.4mm增加至199.7±0.4mm。

[0086] 通过图11至图12并结合表4可知,铸锭心部处的一次枝晶间距由11808μm降低至10472μm;通过图13至图14可知,铸锭心部处的二次枝晶间距可知,由267.8μm降低至243.6μm;通过图15可知,凝固铸锭中枝晶间距的分布状态随熔化速率由3.2kg/min递增至3.8kg/min时,凝固铸锭的均匀程度明显提高,但随着熔化速率由3.8kg/min增加至4.4kg/min时,凝固铸锭的枝晶间距分布状态的均匀程度有所降低。此外,铸锭内部凝固组织中倒“V”型柱状晶所形成的偏转角度与凝固铸锭内晶粒的总数量均呈大幅度地增加。

[0087] 通过上述凝固铸锭的微观组织可知,真空电弧重熔直径508mm的高温合金GH4720Li时,铸锭内部凝固组织随熔化速率的递增而逐渐细化,这对于合金偏析与冶金质量的控制有利,但是随着熔化速率的递增,金属熔池形貌改变,其平均深度增加,导致铸锭内部因合金“密度反转”而形成“黑斑”缺陷的概率也随之增加。

[0088] 综上所述,在真空电弧重熔直径508mm的高温合金GH4720Li时,当冷却循环水流量为900L/min时,较为适宜的熔化速率应该在3.5-4.1kg/min,其合金的偏析情况将远小于现有熔化速率为3.2 kg/min所形成的合金,即当冷却循环水流量为900L/min时,熔化速率为3.5-4.1kg/min所形成铸锭的均质化程度高于熔化速率为3.2kg/min所形成的铸锭。

[0089] 实施例5至实施例9结合真空电弧重熔3D模型,可得到真空电弧重熔直径508mm的高温合金GH4720Li的仿真结果,从而获得较为对应熔化速率下所对应的一系列真空电弧重熔工艺条件参数,能从多维、多尺度、多相场等方面指导真空电弧重熔高温合金的实际生产。

[0090] 实施例10

本实施例对于直径406mm的高温合金GH4169进行真空电弧重熔处理。

[0091] 目前,国内企业在真空电弧重熔直径406mm的高温合金GH4169时,其熔化速率选择在 $3.0 \pm 0.05$  kg/min范围内波动;冷却循环水流量在950-1050 L/min范围内波动。因此,本实施例将冷却循环水流量和熔化速率均取中间值处理,即冷却循环水设定为1000L/min,熔化速率设定为3.0kg/min,通过已知熔化速率,反推金属熔池液面的上升速率,并通过冷却水流量与氩气压力、结合内部经验公式或常数可以计算整体模型的界面换热系数,结合真空电弧重熔高温合金的凝固传热宏观模型、凝固铸锭微观模型和冶炼工艺参数模型进行仿真模拟,耦合外接控制方程,通过时间与位置变化实现边界条件的渐变性、连续性。

[0092] 在数值仿真计算运行过程中,时间步长设定为1s;计算停止条件为真空电弧重熔3D模型的固相率达到100%的计算步数;模拟计算的收敛精度设置为 $1 \times 10^{-5}$ ;模拟结果的输出频率设置为1;数值模型的最大填充率设置为1。

[0093] 实施例11

本实施例与上述实施例10的区别在于:冷却循环水流量设定为900L/min。

[0094] 实施例12

本实施例与上述实施例10的区别在于:冷却循环水流量设定为800L/min。

[0095] 上述实施例10-12的具体仿真参数设置如下表5所示。

[0096] 表5 实施例10-12的真空电弧重熔直径406mm的高温合金GH4169的仿真参数设置

工艺参数	实施例		
	实施例 10	实施例 11	实施例 12
冷却循环水流量 (L/min)	1000	900	800
熔化速率 (kg/min)	3.0	3.0	3.0
氩气压力 (Pa)	260	260	260
结晶器尺寸 (mm)	406	406	406
电弧温度 (K)	2070	2070	2070
熔炼电压 (V)	22.3	22.3	22.3
熔炼电流 (KA)	5.2	5.2	5.2
填充比	0.82	0.82	0.82
冷却循环水初始温度 (K)	298	298	298
最大终止步数	$3 \times 10^6$	$3 \times 10^6$	$3 \times 10^6$
最大时间步长 (s)	1.0	1.0	1.0
最大填充分数	1.0	1.0	1.0
收敛精度	$1 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-5}$
Gibbs-Thomson 系数 $\Gamma$ ( $10^{-7} \text{ m} \cdot \text{K}$ )	3.2	3.2	3.2
面形核最大晶粒形核密度 ( $10^7 \cdot \text{mm}^{-3}$ )	2.4	2.4	2.4
面形核平均过冷度 (K)	13	13	13
面形核过冷度标准差 (K)	4	4	4
体形核最大晶粒形核密度 ( $10^7 \cdot \text{mm}^{-3}$ )	2.2	2.2	2.2
体形核平均过冷度 (K)	9	9	9
体形核过冷度标准差 (K)	4	4	4
枝晶生长动力学参数 $a_2$ ( $10^{-8} \text{ ms}^{-1}\text{K}^{-3}$ )	4.2	4.2	4.2
枝晶生长动力学参数 $a_3$ ( $10^{-9} \text{ ms}^{-1}\text{K}^{-3}$ )	3.9	3.9	3.9

基于上述仿真结果,对金属熔池的平均深度、铸锭的一次枝晶间距与二次枝晶间距进行数据整理,结果如表6所示。同时结合附图16至附图19,对比分析当熔化速率为3.0kg/min时,多组冷却循环水流量条件下金属熔池形貌与平均深度的变化、铸锭枝晶间距与凝固组织的分布情况,筛选较为适宜的真空电弧重熔直径406mm的高温合金GH4169的冶

炼工艺参数范围,从而达到降低合金偏析、提高冶金质量的目的。

[0097] 表6 实施例10-12的真空电弧重熔直径406mm的高温合金GH4169的仿真结果

效果呈现	实施例		
	实施例 10	实施例 11	实施例 12
冷却循环水流量 (L/min)	1000	900	800
金属熔池的平均深度 (mm)	160.4±0.4	160.1±0.4	159.7±0.4
心部处一次枝晶间距 (μm)	9777	9736	9711
心部处二次枝晶间距 (μm)	196.5	196.1	195.4

其中,图16呈现熔化速率为3.0kg/min时,多组冷却循环水流量条件下金属熔池形貌的变化情况,通过图16可知,多组冷却循环水流量条件下金属熔池形貌的图片均由两部分组成,每组图片的左侧部分代表真空电弧重熔过程中熔炼稳定状态下金属熔池与凝固铸锭的温度场分布,右侧部分代表与左侧部分相同时刻下金属熔池与凝固铸锭的固相率。同时结合表6可知,随冷却循环水流量由1000L/min递减至800L/min时,金属熔池的形貌基本相同,均呈现“U型”。虽然金属熔池的平均深度呈逐渐递减的趋势,但均在同一阶段内降低,且均在160±1mm范围内波动。

[0098] 通过图17、图18、表6可知,随冷却循环水流量由1000L/min递减至800L/min时,凝固铸锭的枝晶间距分布状态基本相同,铸锭心部处的一次枝晶间距与二次枝晶间距均呈递减的趋势,但两者均在同一阶段内降低,且分别在 $9741 \pm 40 \mu\text{m}$ 与 $196 \pm 1 \mu\text{m}$ 范围内波动。此外,通过图19可知,不同冷却循环水流量条件下铸锭内部凝固组织中倒“V”型柱状晶所形成的偏转角度与凝固铸锭内晶粒的总数量也基本相似。

[0099] 通过上述金属熔池形貌与其平均深度、凝固铸锭的微观组织分析可知,真空电弧重熔直径406mm的高温合金GH4169时,随冷却循环水流量的递减,金属熔池形貌与铸锭凝固组织分布状态基本相似,但金属熔池的平均深度、铸锭内部凝固组织均在一定范围波动且同一阶段内降低。这表明真空电弧重熔冶炼过程随冷却循环水流量的递减而影响较小,但对铸锭凝固组织呈逐渐细化的状态,这利于合金偏析与冶金质量的控制。

[0100] 综上所述,在真空电弧重熔直径406mm的高温合金GH4169时,当熔化速率为3.0kg/min时,较为适宜的冷却循环水流量应为800L/min,其合金的偏析情况将小于现有冷却循环水流量为1000L/min所形成的合金,即当熔化速率为3.0kg/min时,冷却循环水流量控制在800L/min范围波动所形成铸锭的均质化程度高于冷却循环水流量控制在1000L/min范围波动所形成的铸锭。

[0101] 实施例10至实施例12结合真空电弧重熔3D模型,可得到真空电弧重熔直径406mm的高温合金GH4169的仿真结果,从而获得较为适宜冷却循环水流量下所对应的一系列真空电弧重熔工艺条件参数,能从多维、多尺度、多相场等方面指导真空电弧重熔高温合金的实际生产。

[0102] 应用例

下列应用例1-9以及对比应用例1-3的熔炼条件参数(熔化速率、冷却循环水流量、

熔炼电压、熔炼电流、充入氮气的时刻、氮气压力、停止充入氮气的时刻、冷却时长等)均存在一定的浮动空间,在实际工艺操作中,并无法完全采用模拟得到的具体参数值,需要给操作人员预留调控的操作窗口,模拟得到的具体参数值则是理论上较为适宜的工艺条件,是为冶炼工艺参数的调整匹配、凝固铸锭组织与冶炼质量的把控提供了理论依据与工程指导。

#### [0103] 应用例1

基于上述实施例1至实施例4的仿真效果,优化现有工艺参数,采用实施例2的工艺条件参数对直径508mm的高温合金GH4169进行真空电弧重熔处理,其中,熔化速率为 $3.5 \pm 0.05\text{kg/min}$ ,冷却循环水流量为 $750 \pm 50\text{L/min}$ ;具体的真空电弧重熔过程如下:

将高温合金GH4169浇铸成型制备高温合金自耗电电极GH4169,然后将高温合金自耗电电极GH4169与过渡电极焊接,再装入结晶器内,封炉,抽真空至炉内真空度小于 $3\text{Pa}$ ,送电冶炼;

根据实施例2模型模拟得到的熔炼条件参数,建立金属熔池,控制熔炼电压为 $22.5 \pm 2.5\text{V}$ ,熔炼电流为 $5.5 \pm 1.0\text{KA}$ ,以调控熔化速率至 $3.5 \pm 0.05\text{kg/min}$ ,对高温合金进行熔炼;

当凝固铸锭的重量在 $300 \pm 50\text{kg}$ 时,向真空电弧重熔炉内充入氮气,维持炉内氮气压力在 $275 \pm 75\text{Pa}$ ,在恒定熔化速率下熔炼;

当高温合金自耗电电极的剩余重量为 $125 \pm 50\text{kg}$ 时,停止氮气充入,降低熔化速率,直至熔炼结束;

凝固铸锭在真空电弧重熔炉内冷却 $90 \pm 30\text{min}$ 后,对凝固铸锭破空处理后取出,得到高温合金凝固铸锭。

#### [0104] 应用例2

本应用例与上述应用例1的区别在于:熔化速率为 $3.7 \pm 0.05\text{kg/min}$ 。

#### [0105] 应用例3

本应用例与上述应用例1的区别在于:熔化速率为 $3.9 \pm 0.05\text{kg/min}$ 。

#### [0106] 应用例4

基于上述实施例5至实施例9的仿真效果,优化现有工艺参数,采用实施例6的工艺条件参数对直径508mm的高温合金GH4720Li进行真空电弧重熔处理,其中,熔化速率为 $3.5 \pm 0.05\text{kg/min}$ ,冷却循环水流量为 $900 \pm 50\text{L/min}$ ;具体的真空电弧重熔过程如下:

将高温合金GH4720Li浇铸成型制备高温合金自耗电电极GH4720Li,然后将高温合金自耗电电极GH4720Li与过渡电极焊接,再装入结晶器内,封炉,抽真空至炉内真空度小于 $3\text{Pa}$ ,送电冶炼;

根据实施例6模型模拟得到的熔炼条件参数,建立金属熔池,控制熔炼电压为 $22.5 \pm 2.5\text{V}$ ,熔炼电流为 $5.5 \pm 1.0\text{KA}$ ,以调控熔化速率至 $3.5\text{kg/min}$ ,对高温合金进行熔炼;

当凝固铸锭的重量在 $300 \pm 50\text{kg}$ 时,向真空电弧重熔炉内充入氮气,维持炉内氮气压力在 $275 \pm 75\text{Pa}$ ,在恒定熔化速率下熔炼;

当高温合金自耗电电极的剩余重量为 $125 \pm 50\text{kg}$ 时,停止氮气充入,降低熔化速率,直至熔炼结束;

凝固铸锭在真空电弧重熔炉内冷却 $90 \pm 30\text{min}$ 后,对凝固铸锭破空处理后取出,得

到高温合金凝固铸锭。

[0107] 应用例5

本应用例与上述应用例4的区别在于:熔化速率为 $3.7 \pm 0.05 \text{kg/min}$ 。

[0108] 应用例6

本应用例与上述应用例5的区别在于:熔化速率为 $3.9 \pm 0.05 \text{kg/min}$ 。

[0109] 应用例7

基于上述实施例10至实施例12的仿真效果,优化现有工艺参数,采用实施例12的工艺条件参数对直径406mm的高温合金GH4169进行真空电弧重熔处理,其中,熔化速率为 $3.0 \pm 0.05 \text{kg/min}$ ,冷却循环水流量为 $830 \pm 10 \text{L/min}$ ;具体的真空电弧重熔过程如下:

将高温合金GH4169浇铸成型制备高温合金自耗电极GH4169,然后将高温合金自耗电极GH4169与过渡电极焊接,再装入结晶器内,封炉,抽真空至炉内真空度小于 $3 \text{Pa}$ ,送电冶炼;

根据实施例12模型模拟得到的熔炼条件参数,建立金属熔池,控制熔炼电压为 $22.3 \pm 1.2 \text{V}$ ,熔炼电流为 $5.2 \pm 0.9 \text{KA}$ ,以调控熔化速率至 $3.0 \pm 0.05 \text{kg/min}$ ,对高温合金进行熔炼;

当凝固铸锭的重量在 $200 \pm 50 \text{kg}$ 时,向真空电弧重熔炉内充入氦气,维持炉内氦气压力在 $225 \pm 75 \text{Pa}$ ,在恒定熔化速率下熔炼;

当高温合金自耗电极的剩余重量为 $100 \pm 50 \text{kg}$ 时,停止氦气充入,降低熔化速率,直至熔炼结束;

凝固铸锭在真空电弧重熔炉内冷却 $90 \pm 30 \text{min}$ 后,对凝固铸锭破空处理后取出,得到高温合金凝固铸锭。

[0110] 应用例8

本应用例与上述应用例7的区别在于:冷却循环水流量为 $800 \pm 10 \text{L/min}$ 。

[0111] 应用例9

本应用例与上述应用例7的区别在于:冷却循环水流量为 $770 \pm 10 \text{L/min}$ 。

[0112] 对比应用例1

本对比应用例1与上述应用例1的区别在于:基于现有工艺条件参数,控制真空电弧重熔直径508mm的高温合金GH4169的熔化速率为 $3.0 \pm 0.05 \text{kg/min}$ 。

[0113] 对比应用例2

本对比应用例2与上述应用例4的区别在于:基于现有工艺条件参数,控制真空电弧重熔直径508mm的高温合金GH4720Li的熔化速率为 $3.2 \pm 0.05 \text{kg/min}$ 。

[0114] 对比应用例3

本对比应用例3与上述应用例7的区别在于:基于现有工艺条件参数,控制真空电弧重熔直径406mm的高温合金GH4169的冷却循环水流量为 $1000 \pm 10 \text{L/min}$ 。

[0115] 性能检测试验

对上述应用例1-3以及对比应用例1真空电弧重熔直径508mm的高温合金GH4169所制得的凝固GH4169铸锭,对各元素进行偏析系数实验分析。分析方法为:利用电子探针与能谱仪测量各元素在枝晶干和枝晶间区域内的含量分布情况,对数据进行整理分析,计算出各元素的偏析系数。试验结果如下表7:

表7 应用例1-3以及对比应用例1的凝固GH4169铸锭元素偏析系数

项目	熔化速率(kg/min)	Al	Ti	Nb	Cr	Co
应用例1	3.5±0.05	1.12	1.42	2.06	0.94	0.95
应用例2	3.7±0.05	1.09	1.39	2.03	0.96	0.96
应用例3	3.9±0.05	1.11	1.40	2.05	0.95	0.95
对比应用例1	3.0±0.05	1.43	2.07	2.84	0.81	0.83

结合表7的数据可知,真空电弧重熔直径508mm的高温合金GH4169时,优化后相比于原有的工艺参数所得铸锭内Al的偏析系数由1.43降低至1.10,下降了23%;Ti的偏析系数由2.07降低至1.40,下降了32%;Nb的偏析系数由2.84降低至2.05,下降了28%;Cr的偏析系数由0.81上升至0.95,下降了17%;Co的偏析系数由0.83上升至0.95,下降了14%。

[0116] 另外,对上述应用例4-6以及对比应用例2真空电弧重熔直径508mm的高温合金GH4720Li所制得的凝固GH4720Li铸锭,对各元素进行偏析系数实验分析,试验结果如下表8:

表8 应用例4-6以及对比应用例2的凝固GH4720Li铸锭元素偏析系数

项目	熔化速率(kg/min)	Al	Ti	Cr	Co
应用例4	3.5±0.05	1.11	2.12	0.95	0.94
应用例5	3.7±0.05	1.09	2.10	0.96	0.96
应用例6	3.9±0.05	1.08	2.07	0.97	0.96
对比应用例2	3.2±0.05	1.27	2.63	0.75	0.79

结合表8的数据可知,真空电弧重熔直径508mm的高温合金GH4720Li时,优化后相比于原有的工艺参数所得铸锭内Al的偏析系数由1.27降低至1.09,下降了14%;Ti的偏析系数由2.63降低至2.10,下降了20%;Cr的偏析系数由0.75上升至0.96,下降了28%;Co的偏析系数由0.79上升至0.95,下降了21%。

[0117] 此外,对上述应用例7-9以及对比应用例3真空电弧重熔直径406mm的高温合金GH4169所制得的凝固GH4169铸锭,对各元素进行偏析系数实验分析。分析方法为:利用电子探针与能谱仪测量各元素在枝晶干和枝晶间区域内的含量分布情况,对数据进行整理分析,计算出各元素的偏析系数。试验结果如下表9:

表9 应用例7-9以及对比应用例3的凝固GH4169铸锭元素偏析系数

项目	冷却循环水流量(L/min)	Al	Ti	Nb	Cr	Co
应用例7	830±10	1.05	1.32	1.87	0.97	0.98
应用例8	800±10	1.04	1.32	1.86	0.97	0.98
应用例9	770±10	1.04	1.31	1.85	0.97	0.98
对比应用例3	1000±10	1.09	1.37	1.93	0.94	0.94

结合表9的数据可知,真空电弧重熔直径406mm的高温合金GH4169时,优化后相比于原有的工艺参数所得铸锭内Al的偏析系数由1.09降低至1.04,下降了5%;Ti的偏析系数由1.37降低至1.32,下降了4%;Nb的偏析系数由1.93降低至1.86,下降了4%;Cr的偏析系数由0.94上升至0.97,下降了3%;Co的偏析系数由0.94上升至0.98,下降了4%。

[0118] 结合上述三种高温合金的偏析结果可知,本申请基于真空电弧重熔3D模型仿真工艺条件参数,并直观表征出凝固铸锭的宏-微观组织,通过微观组织明确较为合适的工艺条

件参数,进而优化冶炼工艺参数,能有效地降低合金偏析、提高冶金质量。

[0119] 本具体实施例仅仅是对本申请的解释,其并不是对本申请的限制,本领域技术人员在阅读完本说明书后可以根据需要对本实施例做出没有创造性贡献的修改,但只要在本申请的权利要求范围内都受到专利法的保护。

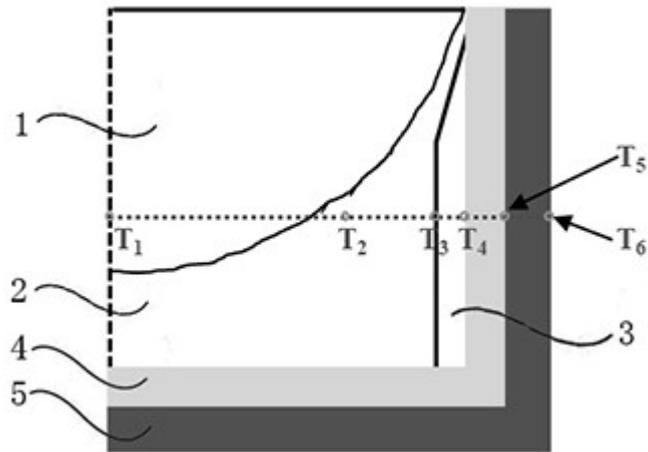


图1

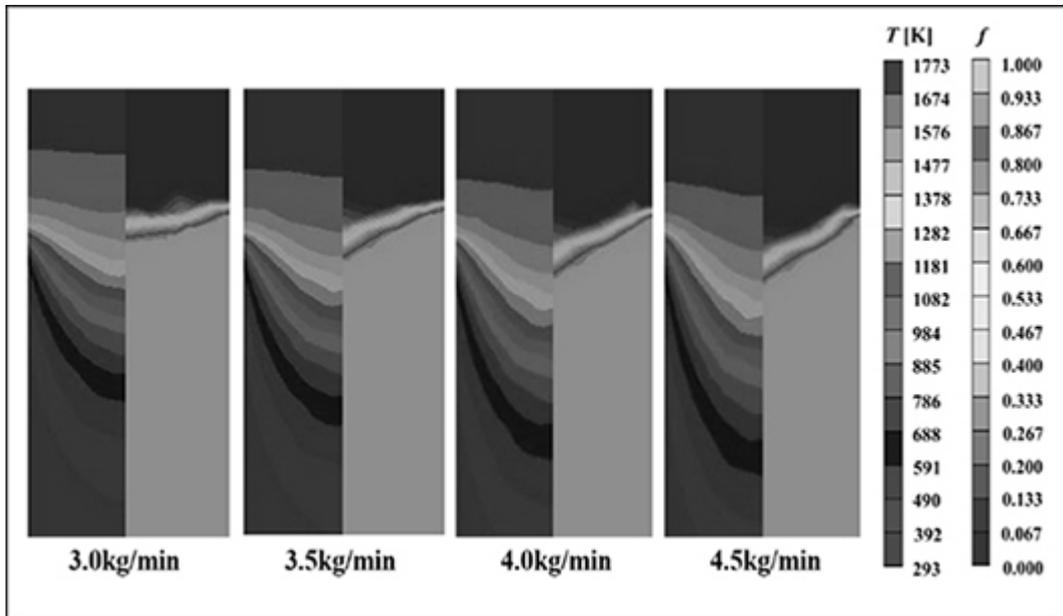


图2

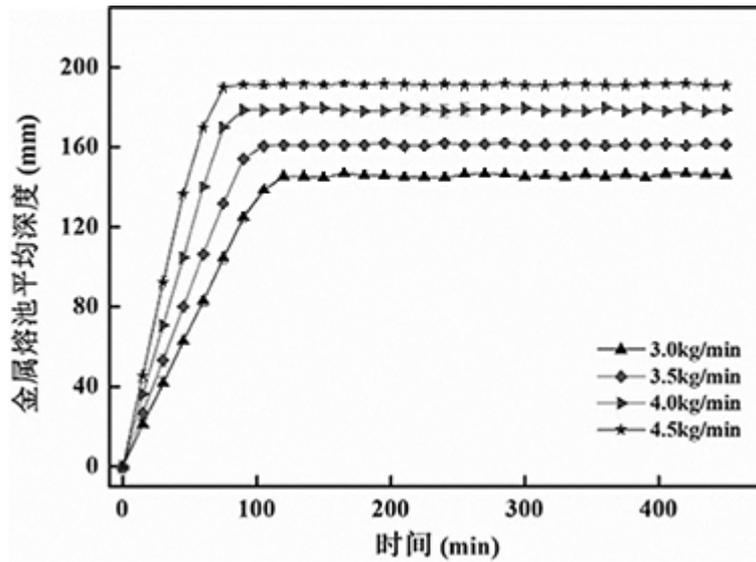


图3

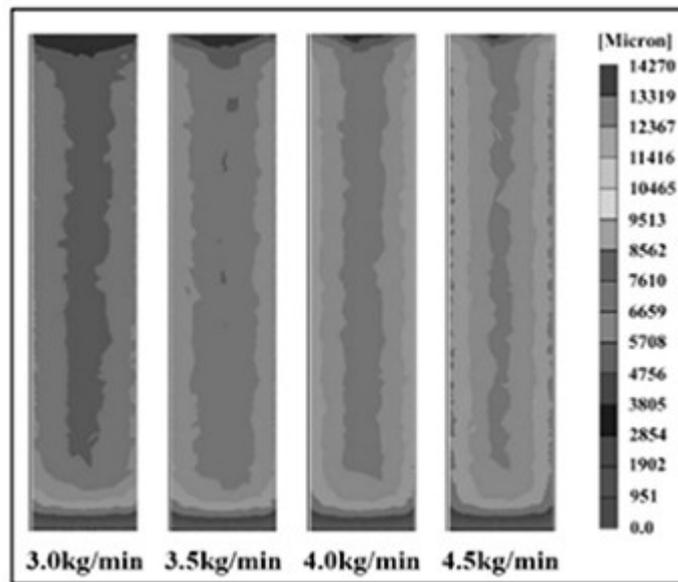


图4

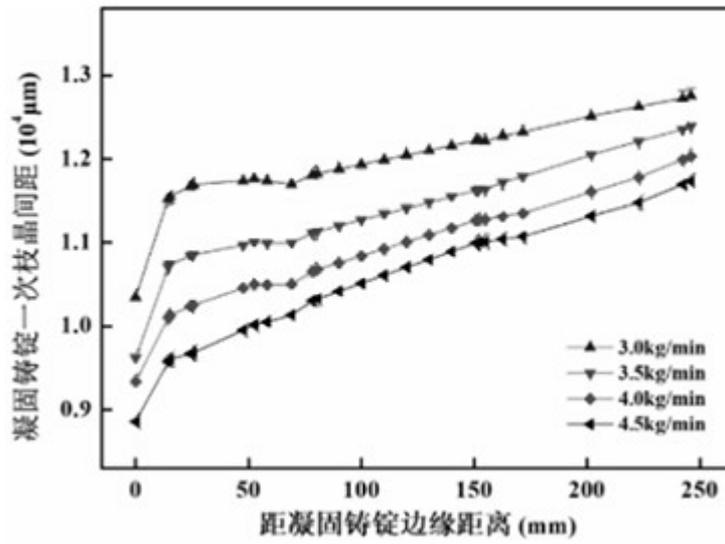


图5

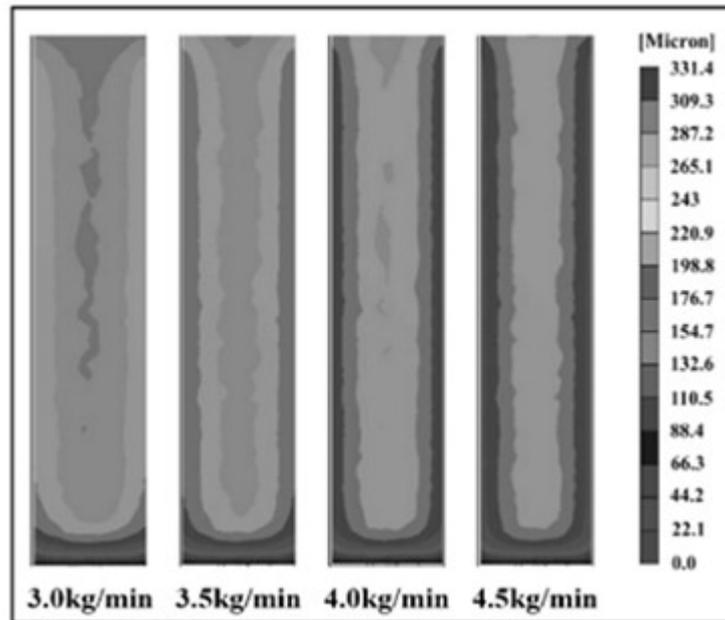


图6

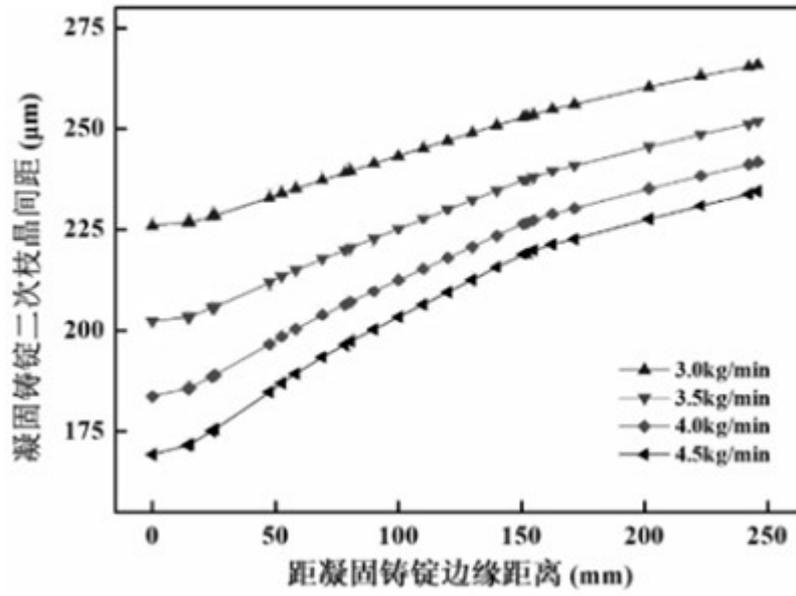


图7

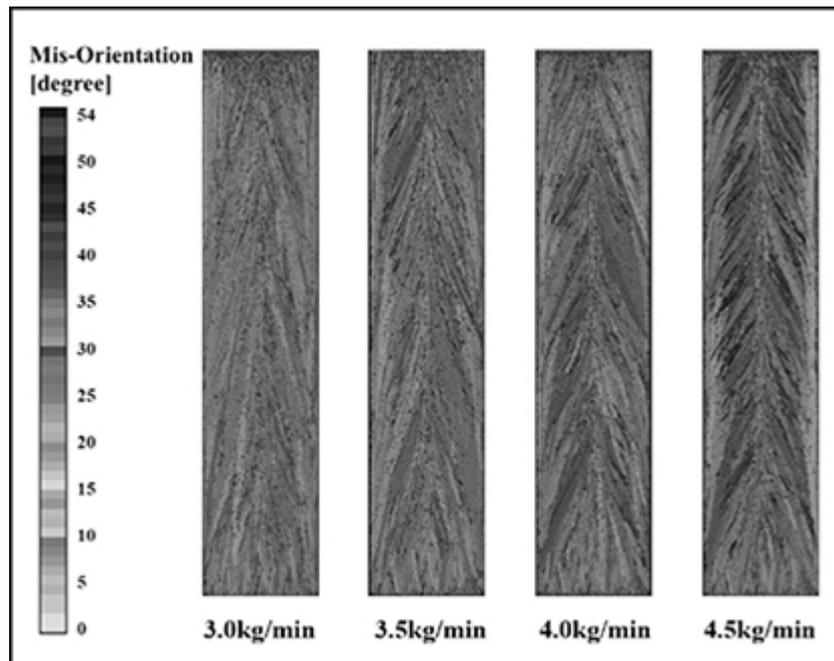


图8

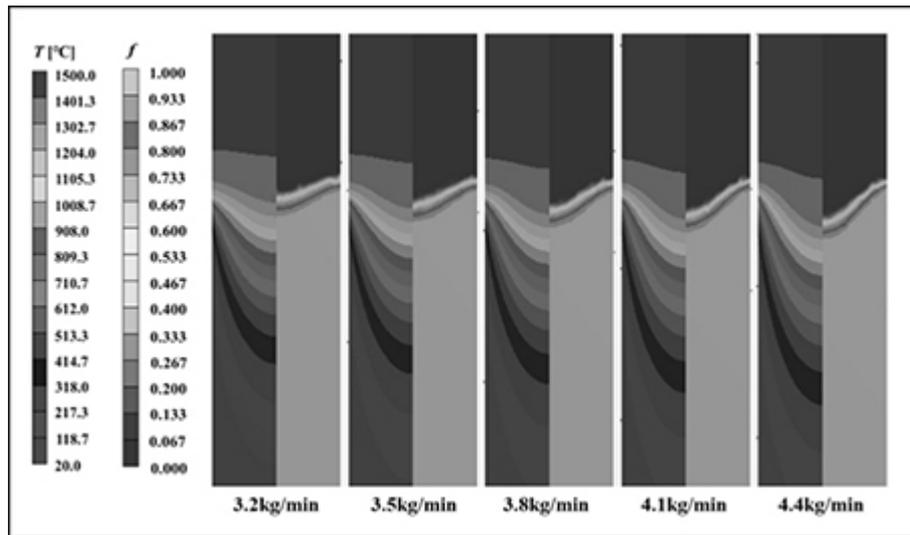


图9

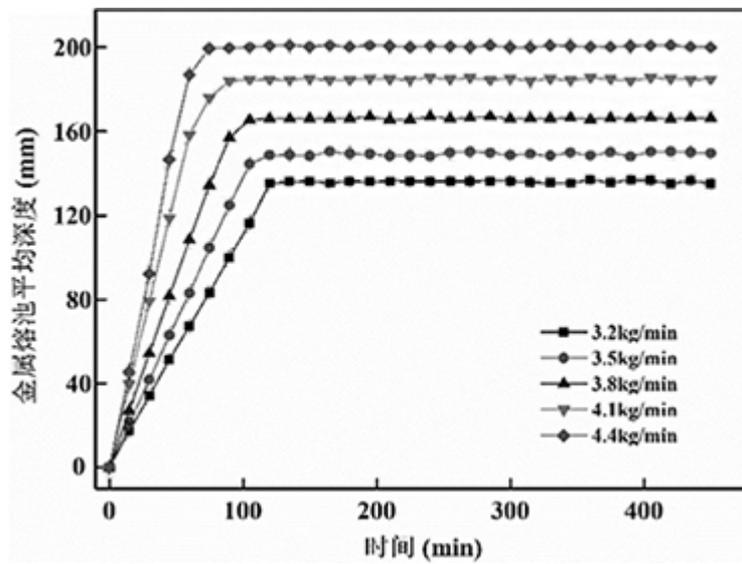


图10

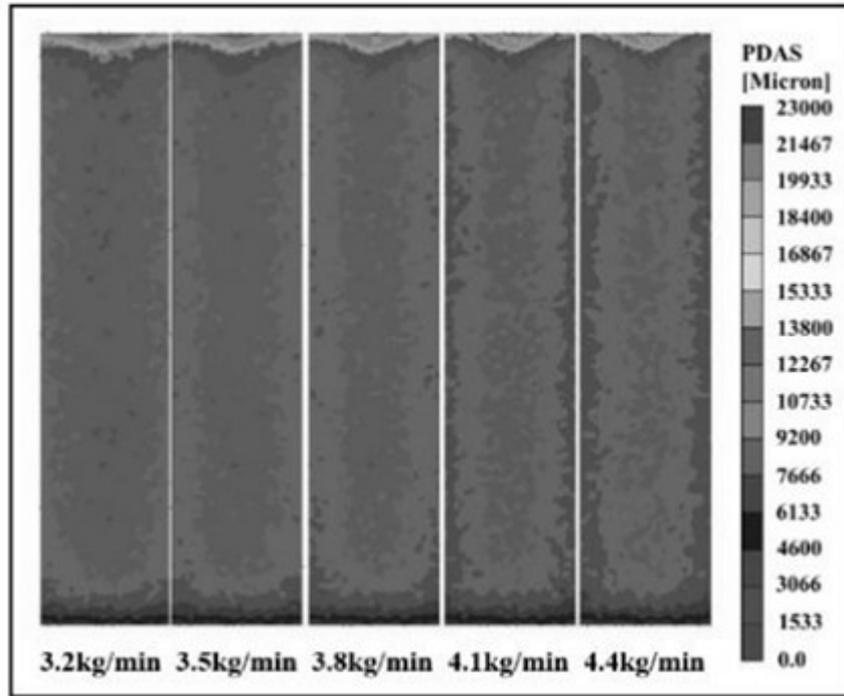


图11

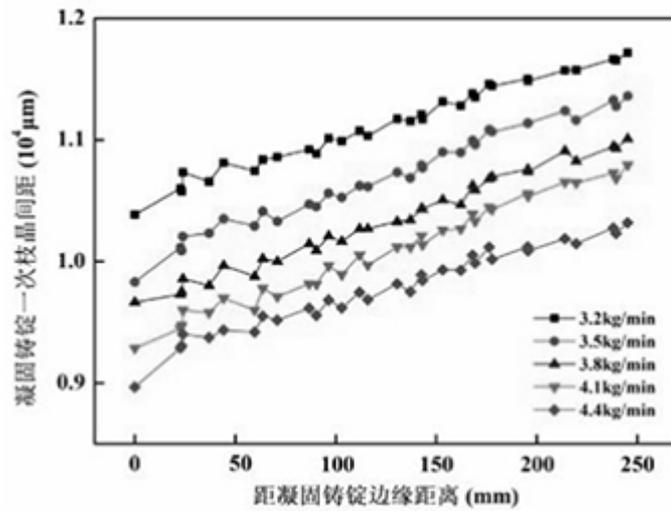


图12

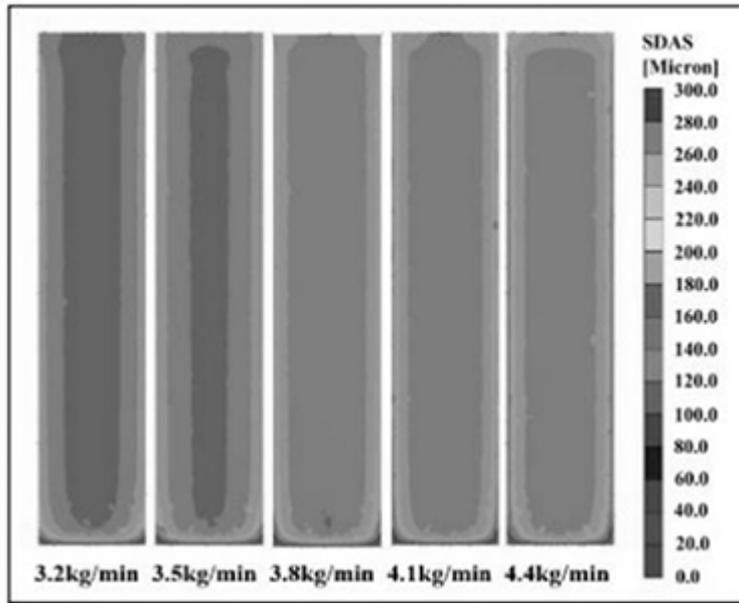


图13

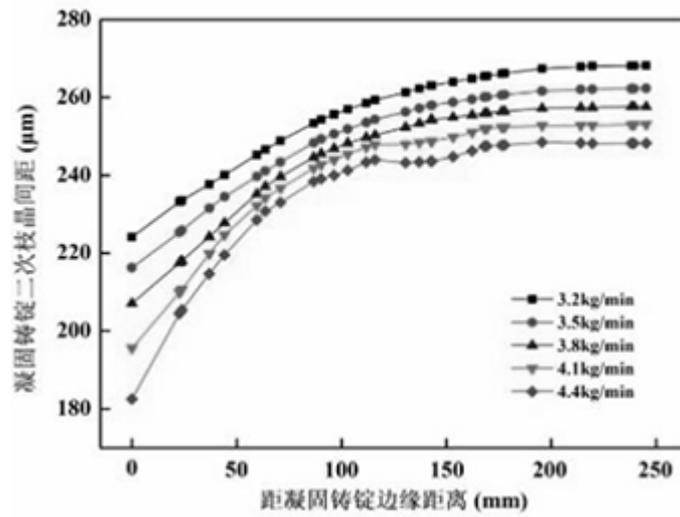


图14

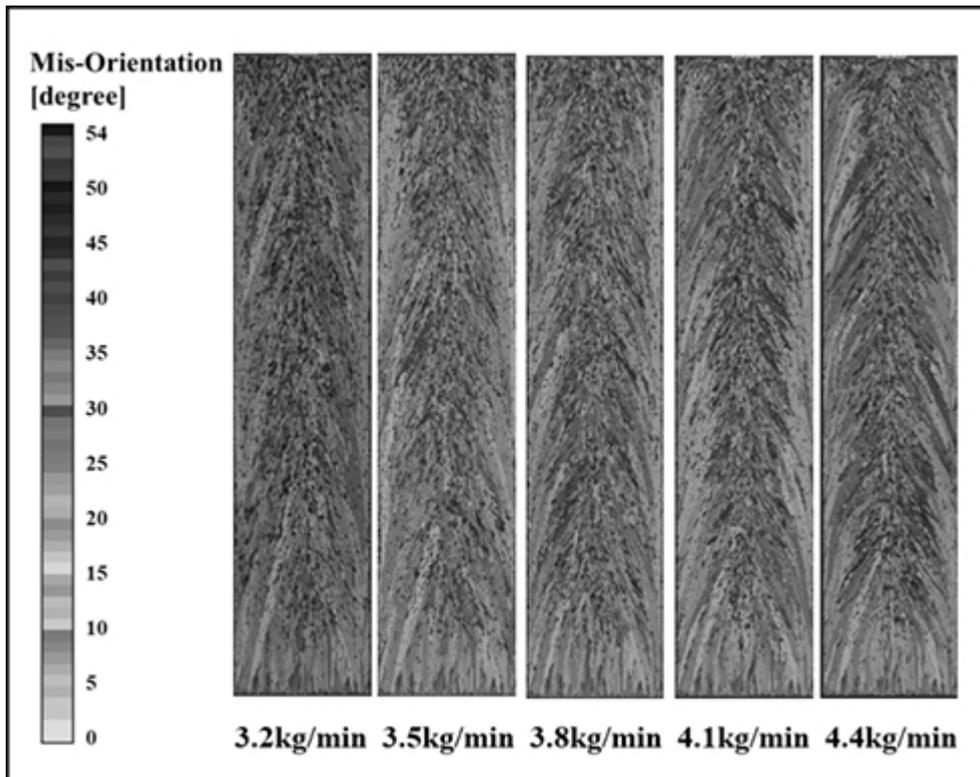


图15

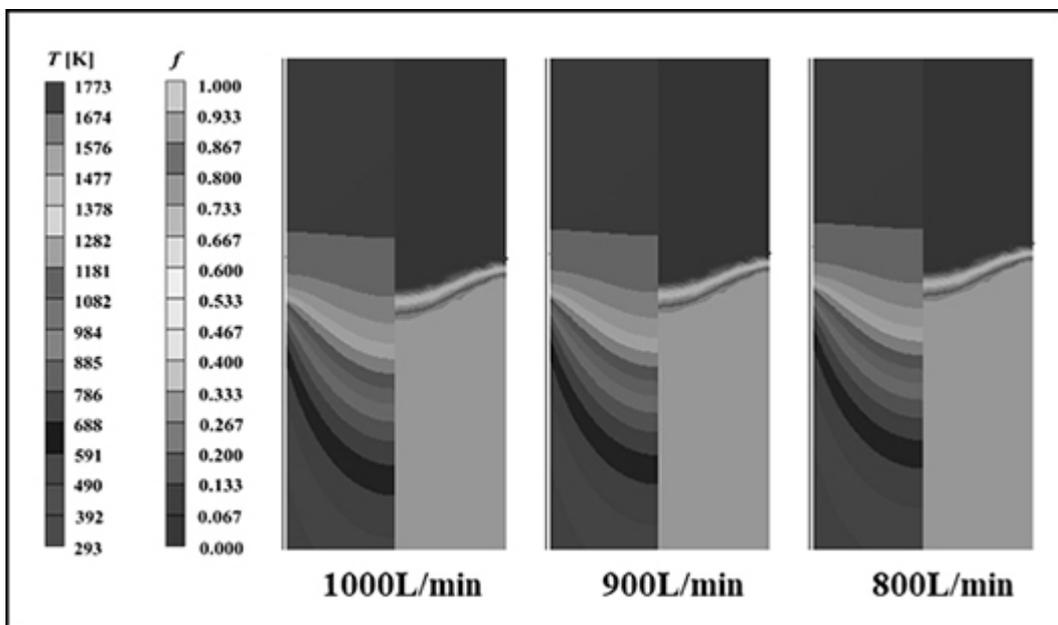


图16

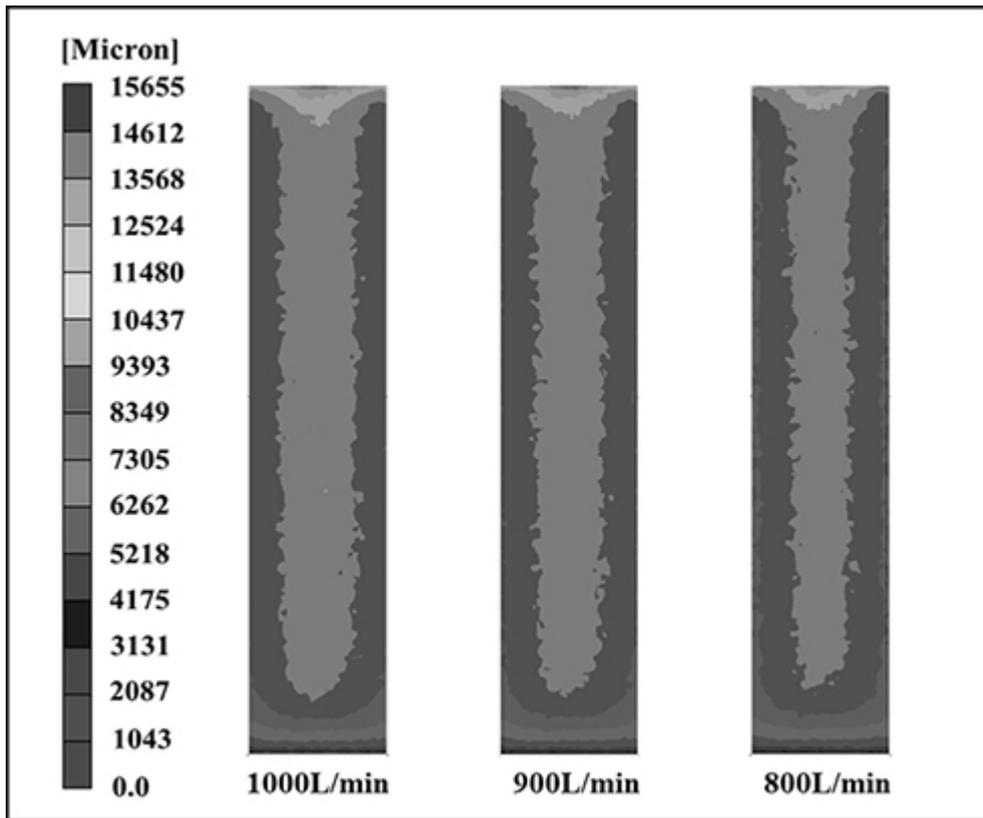


图17

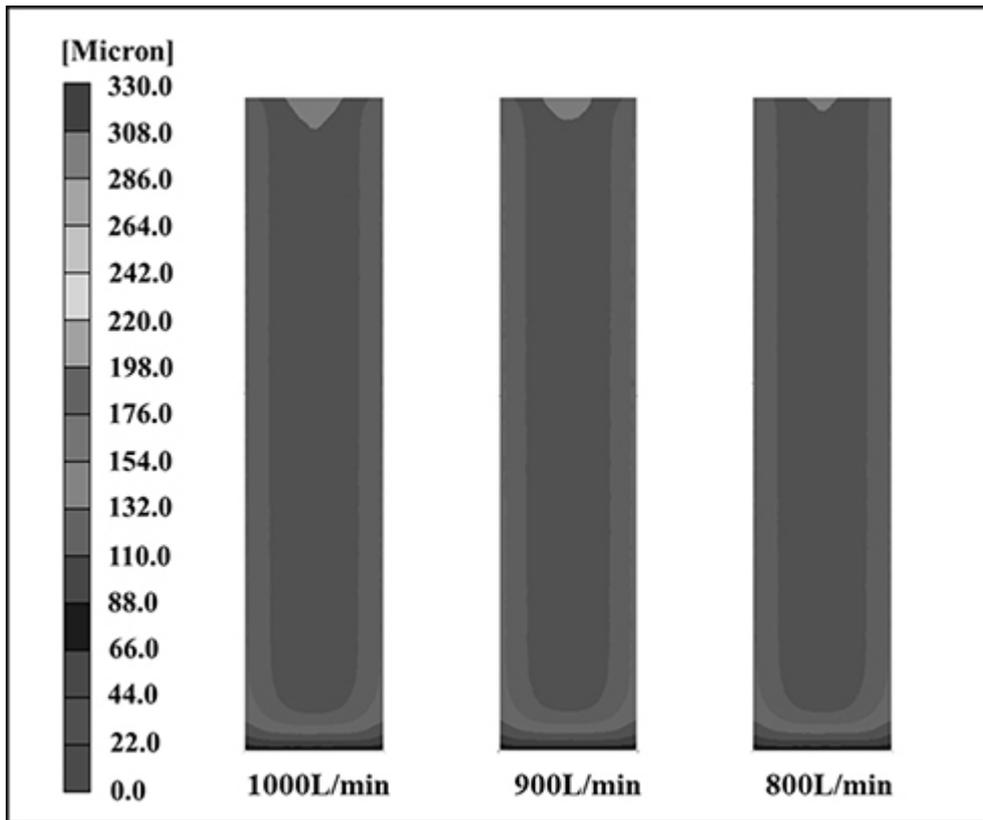


图18

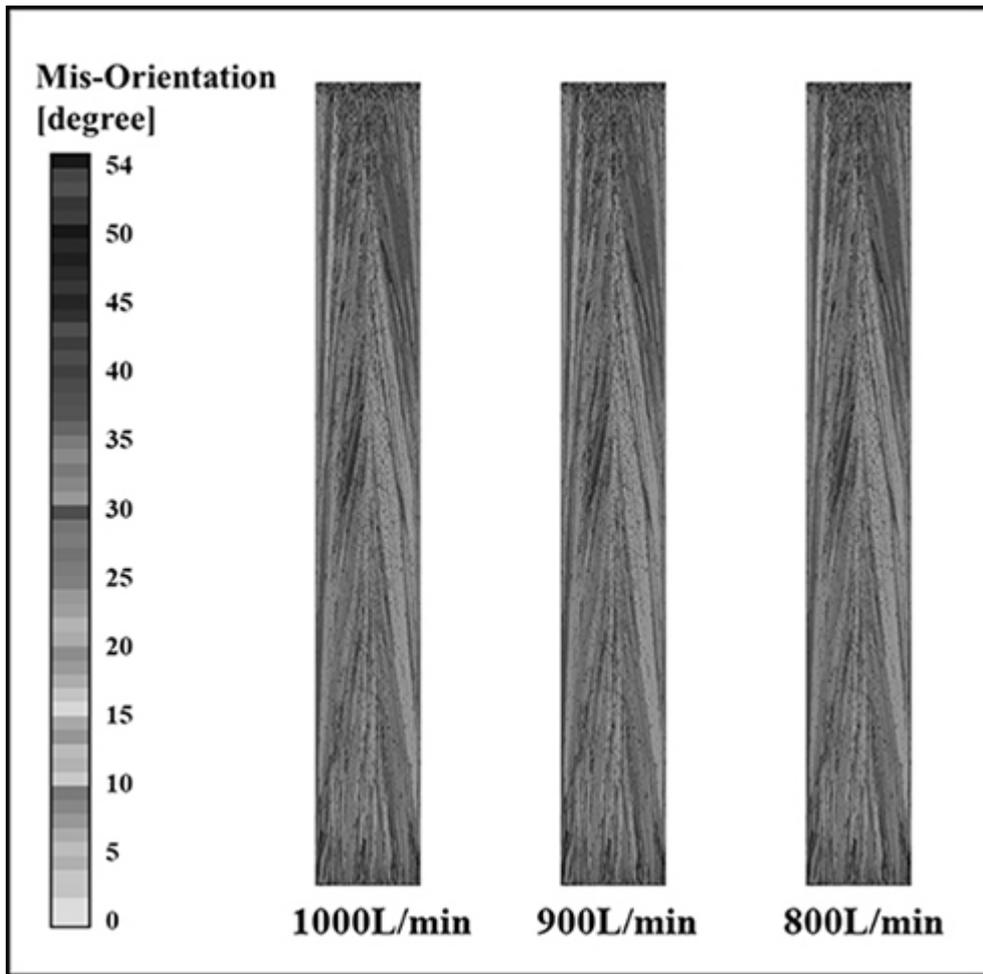


图19