

卧式离心铸造过程数值模拟与水力学试验研究

宋男男¹⁾ 吴士平²⁾ 栾义坤¹⁾ 康秀红^{1)†} 李殿中¹⁾

1) 中国科学院金属研究所, 沈阳材料科学国家(联合)实验室, 沈阳 110016)

2) 哈尔滨工业大学材料科学与工程学院, 哈尔滨 150001)

(2009 年 3 月 13 日收到, 2009 年 4 月 30 日收到修改稿)

建立了卧式离心铸造情况下液体充型及凝固过程的数学模型. 基于该模型对卧式离心铸造轧辊离心阶段的温度场、流场进行了数值模拟. 采用水力学模拟试验与数值模拟进行对比, 结果表明数学模型准确可靠. 通过对卧式离心铸造充型过程中金属液运动规律的分析, 发现卧式离心情况下金属液按螺旋形轨迹充填型腔. 随着转速的增加, 金属液更易于均匀铺满型腔. 这对采用卧式离心铸造轧辊的实际生产具有一定的指导作用.

关键词: 卧式离心铸造, 数学模型, 数值模拟, 水力学试验

PACC: 6125M, 4710, 6120J

1. 引 言

轧辊质量是提高钢材表面形状、尺寸精度、轧钢作业率的重要因素. 轧钢技术的进步给轧辊制造提出了更高的要求. 在生产轧辊的多种方法中, 离心铸造法与传统静态冲洗法相比具有使轧辊工作层组织致密、均匀及使用寿命长的优点, 尤其在生产双金属复合轧辊上, 离心铸造法更是以其低成本、高效率的优点成为今后的发展方向^[1,2]. 但离心铸造过程中金属液受力十分复杂, 导致离心过程中金属液的充型规律难以预测, 这大大增加了离心铸造工艺设计的难度.

计算机模拟技术的应用为人们认识铸造充型和凝固过程提供了新的手段, 在微观组织模拟^[3-5]、铸造缺陷预报以及浇注系统优化设计方面发挥了重要作用^[6]. 但现有铸造过程模拟软件对卧式离心铸造工艺的模拟还不成熟, 国内外对该方面的报道并不多. 文献 7 曾对铝合金铸件离心情况下的组织进行研究, 文献 8 同样进行过离心铸造方面的研究工作. 文献 9, 10 对立式离心铸造过程进行过相关模拟研究, 文献 11 对立式离心铸造温度场及流场进行过数值模拟. 这些研究都没有针对卧式离心铸造过程数值模拟进行详细描述. 本文建立了描述流体在卧式离心力场下充填旋转型腔的数学模型, 编制了铸件三维充型及凝固过程数值模拟程序, 通过水

力学试验与数值模拟结果对比, 表明本文所建立的数学模型准确可靠. 数值模拟结果可为采用卧式离心铸造方法生产轧辊提供理论指导.

2. 数学物理模型

在离心铸造过程中, 液态金属在铸型旋转作用的带动下做圆周运动. 除受到重力作用外, 金属液还受到向心力、铸型对它的摩擦力以及旋转运动所特有的柯氏力的作用^[12]. 柯氏力属于一种惯性力, 随着垂直于旋转矢量的相对运动的消失而消失. 对于卧式离心情况, 金属液在充入型腔的瞬间受到柯氏力的作用, 随后金属液与铸型一起做圆周运动, 柯氏力随之消失. 液体的受力分析如图 1 所示^[13], 图中 F_n, F_g, F_f, F_C 分别为卧式离心过程中液体某质点所受到的向心力、重力、摩擦力和柯氏力, θ 为液体某质点与旋转中心连线和 y 轴的夹角.

根据图 1 得出的金属液体中某一质点受力情况, 在卧式离心情形下的加速度为

$$\begin{aligned} g_x &= 0, \\ g_y &= \omega^2 r (\mu \sin\theta - \cos\theta) + \mu g \sin^2\theta, \\ g_z &= -\omega^2 r (\mu \cos\theta + \sin\theta) \\ &\quad - g(1 + \mu \sin\theta \cos\theta), \end{aligned} \quad (1)$$

式中, g_x, g_y, g_z 分别为卧式离心过程中液体某质点在 x, y, z 三个方向上的加速度, ω 为铸型旋转角

† 通讯联系人. E-mail: xhkang@imr.ac.cn

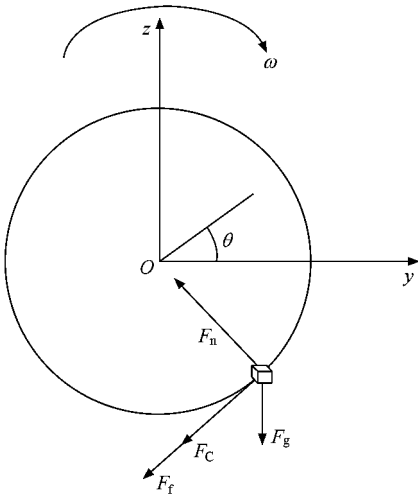


图1 卧式离心铸造过程中金属液体中某一质点受力分析

速度 r 为液体中某一质点到圆心的距离, μ 为铸型壁对液体的摩擦系数。

下面给出卧式离心铸造过程中描述熔体流动的动量守恒方程和质量守恒方程。

动量守恒方程又可称为 Navier-Stok(N-S)方程，

$$\begin{aligned} & \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) \\ &= - \frac{\partial p}{\partial x} + \eta \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + \rho g_x, \\ & \rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) \\ &= - \frac{\partial p}{\partial y} + \eta \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + \rho g_y, \\ & \rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) \\ &= - \frac{\partial p}{\partial z} + \eta \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + \rho g_z, \end{aligned} \quad (2)$$

式中 u, v, w 分别为流速在三个坐标轴方向上的速度分量, ρ 为金属液体的密度, η 为液体运动黏度, t 为金属液流动时间, p 为流场中某质点的压力。

质量守恒方程(连续性方程)如下：

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0. \quad (3)$$

将(1)式代入到动量守恒方程(2)中,结合连续性方程(3)联立求解可给出充型液体自由液面的空间位置及界面速度。

为了确定自由表面的形状,本文采用 SOLA-VOF 方法求解下列体积函数方程：

$$\frac{\partial F}{\partial t} + u \frac{\partial F}{\partial x} + v \frac{\partial F}{\partial y} + w \frac{\partial F}{\partial z} = 0, \quad (4)$$

式中 F 为体积函数。

液态金属充型及凝固过程涉及动量和热量传输,描述凝固传热的数学基础是傅里叶热传导偏微分方程,其能量方程为

$$\begin{aligned} & \frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \\ &= \frac{\lambda}{\rho c} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + S, \end{aligned} \quad (5)$$

式中 T 为流体温度, S 为源项, c 为比热容, λ 为导热系数。

卧式离心铸造过程中,金属液只有在接触到旋转铸型时才受到上述各种力的作用,在浇道中只受重力场作用,本文采用了第一股液流追踪技术来判断离心场与重力场区域。

3. 卧式离心铸造过程数值模拟与水力学试验结果分析

基于 Visual C++ 平台,采用 C++ 语言开发了卧式离心铸造数值模拟程序.运用该程序对卧式离心轧辊工作层的充填过程进行了数值模拟,同时进行了水力学试验验证.数值模拟与水力学模拟均为 $\phi 180 \text{ mm} \times 430 \text{ mm}$ 的筒状件.铸型转速分别设定为 305, 390, 495 和 600 r/min.

3.1. 数值模拟基本假设及计算条件

假设液体为不可压缩流体,采用 N-S 方程求解液体流动状态,按照 64 种速度分配条件对流体速度进行分配.金属液体与铸型之间边界换热采用等效换热系数法^[14].液体初始温度设定为 1450 °C,铸型初始温度为 160 °C.采用温度回升法对结晶潜热进行处理。

3.2. 数值模拟结果分析

3.2.1. 不同铸型转速对应的初始螺旋线形状

卧式离心铸造过程中,浇入铸型的金属液在重力压头和离心力的共同作用下其运动轨迹复杂,包括径向运动及轴向运动两种情况.径向运动主要是由于受重力的影响产生一定的偏心差,但这种偏心差随着转速的增大而逐渐减小;轴向上由于存在浇注压头,金属液以螺旋线的形式均匀分布在铸型内壁^[11]。

图2是卧式离心铸造过程中不同铸型转速下金属液体的运动轨迹.从图2可以看出,不同铸型转速

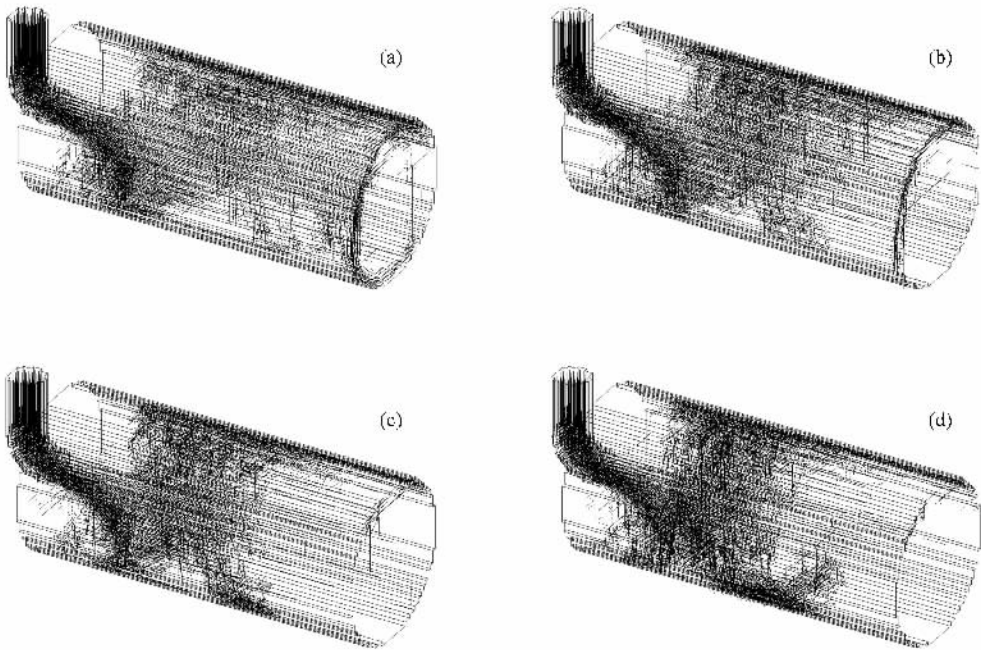


图2 卧式离心铸造过程中不同铸型转速下初始螺旋线轨迹数值模拟结果 (a)305 r/min ,(b)390 r/min ,(c)495 r/min ,(d)600 r/min

下螺旋线的形状存在一定的差异.在 305 r/min 的低转速状态时,金属液运动的流线轨迹螺距较大.随着转速逐渐增大,金属液的初始螺距逐渐减小.对于同一批次试验,铸型的摩擦系数相同,从而摩擦系数所带来的速度损失比可以视为常数.在这种情况下,螺距可以根据下式计算:

$$s = v_x \frac{2\pi R}{v_t}, \quad (6)$$

$$v_t = \beta R\omega,$$

式中, s 为液体螺距, v_x 为液体质点轴向速度, R 为铸型半径, v_t 为液体质点切向速度, ω 为铸型角速度, β 为速度损失比.由此可知,转速越高, s 越小,亦即流体运动轨迹的螺距越短,这样更易于金属液均匀铺满型腔,更有利于提高离心铸造方法生产铸件的质量.

3.2.2. 充型过程中流体速度场、温度场和压力场数值模拟结果分析

卧式离心铸造过程中,金属液充填型腔的模式与重力场铸造不同.深入了解金属液在离心情况下的运动规律、温度场和压力场的分布情况,对于改进铸造工艺参数、提高铸件质量有很大帮助.

图3是当铸型转速为 600 r/min 时卧式离心铸造过程中金属液在不同时刻的径向速度分布.从图3可以看出,卧式离心时径向上金属液在合力作用

下沿铸型壁呈圆周轨迹充填型腔.金属液在与型腔的摩擦力及金属液之间的拖曳力的作用下逐步在整个型腔的圆周方向铺展开,形成一定厚度的薄层,如图3(a)所示.若离心浇注过程中铸型预热温度较低,首先与型腔接触的这一薄层受到激冷,容易得到细小晶粒层.随着浇入金属液的增多,厚度逐渐增加.在这个过程中,可以通过调整铸型预热温度与金属液的过热度以及金属液在型腔中的铺展速度来获得希望的铸态组织^[7].

图4是当铸型转速为 600 r/min 时卧式离心铸造过程中金属液温度场径向和轴向分布模拟结果.从图4可以看出,离心情况下金属液充填型腔的速度很快,在充型过程中同一径向截面上温度场分布很均匀,而轴向截面上由于金属液先接触底部铸型导致底部温度低于中间部位.温度分布不均匀会在实际生产中容易造成轧辊工作层应力不均,可能导致轧辊产生开裂缺陷.

图5是卧式离心铸造过程中不同铸型转速下金属液压力场分布模拟结果.从图5可以看出,卧式离心铸造情况下金属液压力场基本呈同心圆分布,不同厚度部位的压力不同.在低转速情况下,由重力引起的铸型顶部与底部的压力差不能忽略,压力场呈不规则同心圆,相同半径处上部压力要小于下部压力,如图5(a)所示;在高转速下这种现象

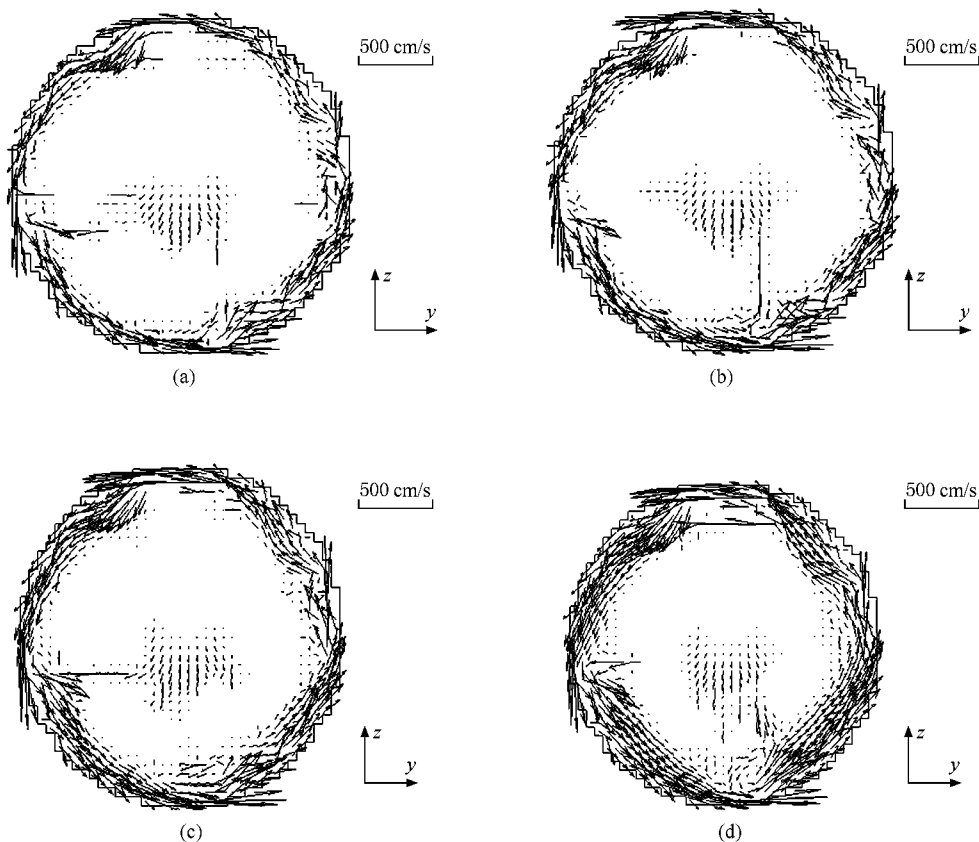


图3 当铸型转速为 600 r/min 时卧式离心铸造过程中金属液径向速度分布 (a) $t=2.3\text{ s}$, (b) $t=2.5\text{ s}$, (c) $t=3.0\text{ s}$, (d) $t=3.7\text{ s}$

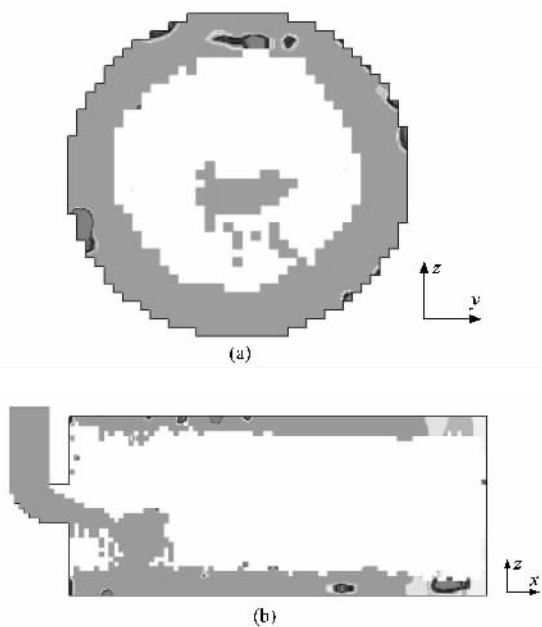


图4 铸型转速为 600 r/min 时卧式离心铸造过程中金属液温度场模拟结果 (a) 温度场径向截面图(最大值为 1328 °C, 最小值为 1205 °C) (b) 温度场轴向截面图(最大值为 1328 °C, 最小值为 1205 °C)

不明显,如图 5(b)所示.由于在离心铸造过程中金属液受到很大的压力作用,使得离心铸造情况下金属液补缩能力加强,相比重力铸造可获得更致密的组织^[15].

3.3. 水力学试验结果

卧式离心铸造过程中金属液体充型方式十分复杂,为了更好地研究卧式离心铸造过程中金属液的运动规律,采用水力学试验的方法对卧式离心铸造过程中液体流动方式进行实时观察.这对改进浇注工艺、提高铸件质量,减少缺陷具有重要参考价值.

水力学试验采用转速在 0—1500 r/min 的可变速电动机驱动,为了准确地观测液体在卧式离心情况下的流动轨迹,试验采用一种深色液体和透明有机玻璃模型.有机玻璃模型尺寸为 $\phi 180\text{ mm} \times 430\text{ mm}$.采用每秒钟拍摄 500 张照片的高速摄影仪对充型过程进行实时记录.图 6 显示了四种不同铸型转速下液体的初始螺旋线轨迹.

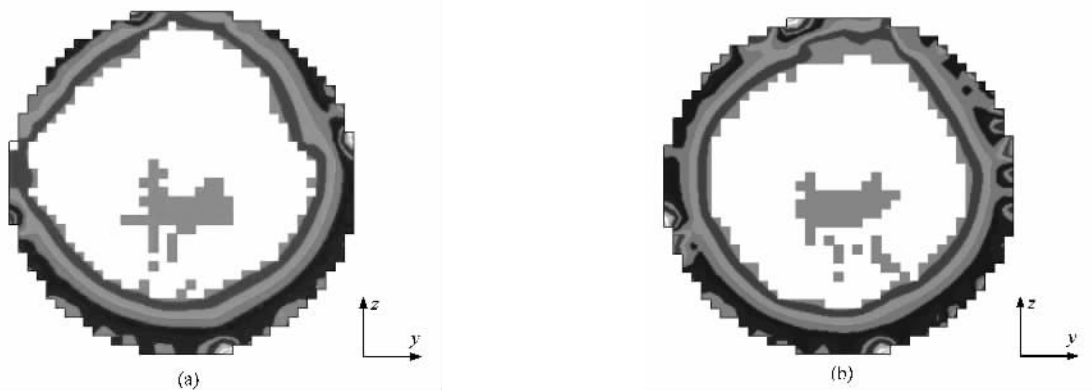


图 5 卧式离心铸造过程中不同铸型转速下金属液压力场分布模拟结果 (a)305 r/min 压力场径向截面图(最大值为 466741 Pa , 最小值为 -13651 Pa)(b)600 r/min 压力场径向截面图(最大值为 1681583 Pa ,最小值为 -24060 Pa)

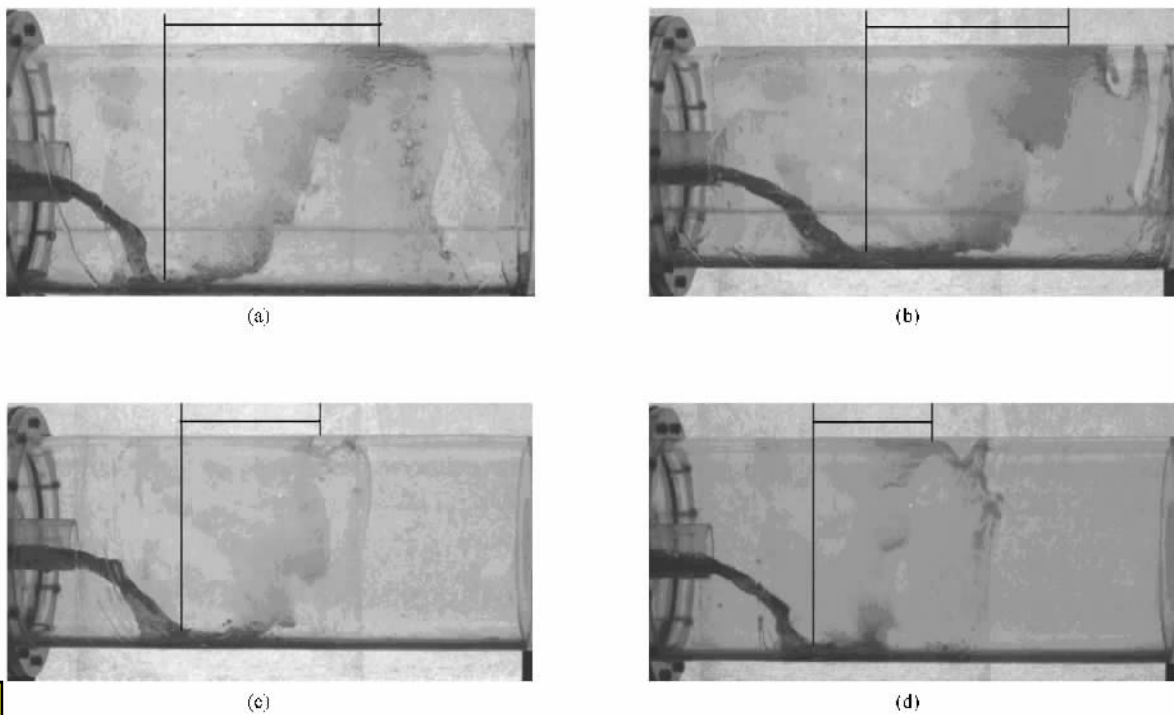


图 6 卧式离心铸造过程中不同铸型转速下初始螺旋型轨迹的水力学试验结果 (a)305 r/min ,(b)390 r/min ,(c)495 r/min , (d)600 r/min

从图 6 的水力学模拟试验结果可以清楚地看到液体在卧式离心情况下螺旋型充填型腔的轨迹,而且不同转速下螺距不同,随着铸型转速的提高,液体的螺距逐渐减小.水力学试验结果与数值模拟结果符合较好.

4. 结 论

根据卧式离心铸造过程中金属液的受力特点,建立了卧式离心铸造充型过程的数学模型,采用该模型对金属液在卧式离心铸造的充型及凝固过程进

行了数值模拟.通过与水力学试验结果对比,发现数值模拟与水力学试验结果相符,证明所建立的数学模型与计算程序准确可靠.

通过数值模拟和水力学试验研究发现,卧式离心铸造过程中液态金属充型行为受铸型转速影响较大.随着转速增加,第一股液流形成的螺距随之减小,转速越大液态金属液越易于均匀铺满型腔.

数值模拟结果表明,卧式离心铸造过程中金属液充填型腔所形成的压力场基本呈同心圆分布.低转速下,压力场呈不规则同心圆;高转速下,在相同半径位置处,液态金属压力几乎相等.

- [1] Zhang B M 2004 *Centrifugal Casting* (Beijing : Mechanical Industry Press) pp58-298 (in Chinese) [张伯明 2004 离心铸造(北京 : 机械工业出版社) 第 58-298 页]
- [2] Fu H G , Xing J D 2007 *Manufacturing Technology of High Speed Steel Roll* (Beijing : Mechanical Industry Press) p17 (in Chinese) [符寒光、邢建东 2007 高速钢轧辊制造技术(北京 : 机械工业出版社) 第 17 页]
- [3] Li Q , Li D Z , Qian B N 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 3477 (in Chinese) [李 强、李殿中、钱百年 2004 物理学报 **53** 3477]
- [4] Xiao N M , Tong M M , Lan Y J , Li D Z , Li Y Y 2006 *Acta Mater.* **54** 1265
- [5] Wang K F , Guo J J , Mi G F , Li B S , Fu H Z 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 3048 (in Chinese) [王 狂 飞、郭 景 杰、米 国 发、李 邦 盛、傅 恒 志 2008 物理学报 **57** 3048]
- [6] Li D Z , Kang X H , Xia L J , Li Y Y 2005 *Foundry* **54** 148 (in Chinese) [李 殿 中、康 秀 红、夏 立 军、李 依 依 2005 铸造 **54** 148]
- [7] Chang S R , Kim J M , Hong C P 2001 *ISIJ Int.* **41** 738
- [8] Drenchev L , Sobczak J , Malinov S , Wei S 2003 *Model. Simul. Mater. Sci. Eng.* **11** 651
- [9] Wu S P , Li C Y , Guo J J 2006 *Trans. Nonfer. Met. Soc. China* **16** 1035
- [10] Xu D M , An Y , Li X 2003 *Chin. J. Mech. Eng.* **39** 146 (in Chinese) [徐 达 鸣、安 蕴、李 鑫 2003 机械工程学报 **39** 146]
- [11] Zeng X W , Chen L L , Liu R X 2004 *Foundry* **53** 310 (in Chinese) [曾 兴 旺、陈 立 亮、刘 瑞 祥 2004 铸造 **53** 310]
- [12] Brenner T , Glatzel T , Zengerle R , Ducree J 2003 *7th International Conference on Miniaturized Chemical and Biochemical Analytical Systems* (Squaw Valley : Academic Publishers) p903
- [13] Cheng S Z , Jiang Z Y 2000 *General Physics* (Vol. 1) (Beijing : Higher Education Press) p18 (in Chinese) [程 守 洙、江 之 永 2000 普通物理(第一册)(北京 : 高等教育出版社) 第 18 页]
- [14] Cheng J , Liu B C 1991 *Foundry* **40** 22 (in Chinese) [程 军、柳 百 成 1991 铸造 **40** 22]
- [15] Wu S P , Liu D R , Guo J J , Li C Y , Su Y Q , Fu H Z 2006 *Mater. Sci. Eng. A* **479** 25

Numerical simulation and hydraulic experiment of horizontal centrifugal casting

Song Nan-Nan¹⁾ Wu Shi-Ping²⁾ Luan Yi-Kun¹⁾ Kang Xiu-Hong^{1)†} Li Dian-Zhong¹⁾

1) *Shenyang National Laboratory for Materials Science , Institute of Metal Research , Chinese Academy of Sciences , Shenyang 110016 , China*)

2) *School of Materials Science and Engineering , Harbin Institute of Technology , Harbin 150001 , China*)

(Received 13 March 2009 ; revised manuscript received 30 April 2009)

Abstract

A mathematic model of mold filling and solidification in horizontal centrifugal casting is built up. Based on this model , the temperature field and the flow field in horizontal centrifugal casting are numerically simulated. The hydraulic experimental results are compared with numerical simulations , indicating that the mathematic model is accurate. Experimental results show that liquid fills the mold in the manner of a spiral trajectory in the centrifugal casting process. The filling pattern tends to be more uniform with the increase of rotational speed. The present study has a guiding significance to the production of horizontal centrifugal casting roll.

Keywords : horizontal centrifugal casting , mathematic model , numerical simulation , hydraulic experiment

PACC : 6125M , 4710 , 6120J