

塞棒吹气时方坯结晶器中气泡运动的水模研究

柳绮年 周有预* 方治家

任敦长* 郑彩云 贾复

中国科学院力学研究所, 北京 100080

* 武钢钢铁研究所, 武汉 430080

摘要 实验考察了在方坯结晶器内, 由水口部位吹气形成的射流与气泡群混合的复杂流场中群水体的流态和气泡群运动特性, 测定了气泡群直径, 上升速度分布、气泡穿透深度以及气泡诱导水体运动的特性等; 对气泡运动与水体中夹杂物去除的关系进行了初步探讨; 实验确定的最佳吹气参数可供生产操作参考。

关键词 连续铸钢; 结晶器; 水口吹气; 气泡运动; 夹杂去除; 流动显示技术

中图分类号 TG26

0 引言

在连铸过程中中间包水口内沉积的夹杂物使钢流堵塞, 不仅影响拉坯正常进行, 而且导致次品。通过浸入式水口吹氩或氮气, 直接冲刷内壁的沉积物, 适当的气压和流量能控制气泡的穿透深度; 气泡群上升运动能部分带走钢液中悬浮的非金属氧化物。因此, 水口部位吹气技术在连铸生产中受到愈来愈多的关注, 并已成为优化工艺设计的一项重要内容。

然而, 钢水自中间包经水口流入结晶器直至形成凝壳和冷坯, 经历了十分复杂的流动和传热过程, 水口吹气形成的射流, 气液二相流, 湍流与射流的相互作用, 吹气压强和流量与射流的穿透深度的关系, 吹气对夹杂物去除的作用等, 流场的复杂性已远不可能用一个简单的模型描述。前人关于水口吹气的研究虽已取得一定成效^[1-4], 但至今水口和结晶器的设计仍借鉴生产经验, 特别是重视水模实验获得的第一手资料。

本项研究针对武钢四流方坯连铸机通过塞棒中心孔径水口向结晶器吹气的实际生产需要, 应用水模实验的观察和测试, 研究结晶器内气泡群的运动和流场特征, 提供对生产现场有参考意义的最佳供气参数, 探讨气泡运动促进水体中悬浮夹杂物去除的机制。

1 实验装置和测试技术

研究是在力学所与原型尺寸 1:1 几何相似的结晶器水模实验装置中进行的, 结晶器截面为 20cm × 20cm、高 78cm、工作液深 68cm, 水口内径 $d_w = 2.5\text{cm}$, 浸入式水口的体积流量 $Q_w = 50\text{l/min}$ 。实验装置由有机玻璃制成, 图 1 所示为实验系统。

水口吹气时对气泡群的运动和结晶器内的流场, 采用流动显示技术和实时录像系统记录全部过程, 由重放录像观察气泡群运动行为和水体表面状态, 测量气泡群在结晶器中的穿透

深度等。在结晶器纵向中心断面两侧用厚约5~8mm的片光源照射气泡、由普通135相机以 $[(1/8) - (1/30)]s$ 快门速度拍摄,在底片上获得了有明显轮廓的气泡群分布和气泡运动的轨迹;

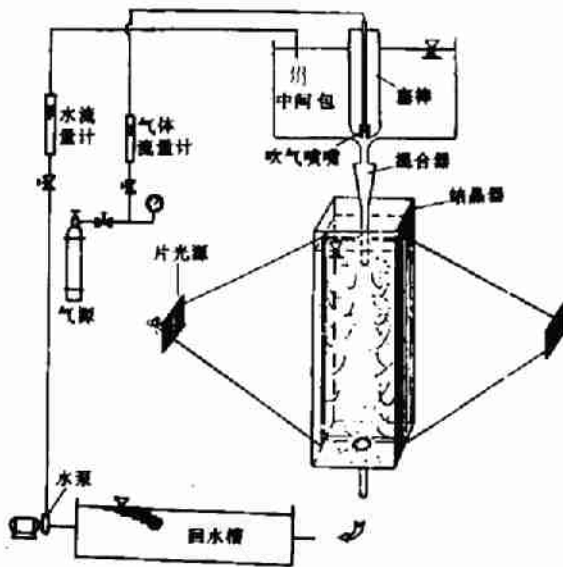


图1 实验系统简图

Fig. 1 The sketch of experimental system

将照片上气泡轮廓和运动轨迹通过数字化仪人工输入计算机,再经软件处理,可以得到气泡大小和上升速度的量值,由气泡运动诱导的水体运动特征参数也以同样方法获得。

2 主要结果与分析

2.1 结晶器内的流体行为

在水模实验系统中,水口处的流速高达1.7m/s,以水口直径计算的 Re 数为 4×10^4 ,明显地属湍流射流。由示踪粒子显示的结晶器内的流型示于图2,从图2中清晰可见射流与结晶内的水体的明显边界,水体向下游输运速度约2cm/s,进入射流中心的粒子很快被带走,由于高速射流的挟卷,射流与结晶器侧壁间沿水深方向形成了两排涡旋并向下游输运。

当喷嘴通入氮气(N_2)时,在浸入式水口上端的混合室中,气液混合形成的气泡群随着射流迅速冲向结晶器的水体,在浮力作用下气泡大部分很快返回上升,从液面逸出。图3给出了在吹气情况下结晶器内的典型流体形态,吹气时结晶器内射流挟带气泡群在某个水深处上浮形成反转上升流,上升的路径如文献[5]概述是摇摆螺旋前进的,这股流动在结晶器内非对称地周期性的交替上升。

气泡从结晶器液表面逸出,破坏了液面的平静。随着气泡量增加,液面由小波纹到波浪以至翻腾。在拉坯生产中结晶器液面被保护渣覆盖,液面翻腾意味着可见到红色钢液面使保护渣卷入,造成钢坯夹杂物增多。因此在吹气时必须注意控制气压和流量以防止上液面的翻腾。

2.2 吹气流量和喷嘴孔径对气泡浸入深度的影响

在拉坯生产中要求水口吹气时气泡群在结晶器中尽可能不浸入水体很深,不被射流带向很远的下游和二相穴;气泡上浮时不被结晶器的凝壳所捕捉;与此同时,气泡群逃逸时不使液面翻腾;要满足上述诸条件,控制吹气的参数将是十分困难的。

实验中发现,增加吹气压力 p_g 时,气泡浸入水体的深度无明显变化,但却见液面的波动随压力增加有显著变化,当吹气压力 $p_g > 0.14MPa$ 时,液面达到翻腾状态,因此在本文的研究

2.1 结晶器内的流体行为

在水模实验系统中,水口处的流速高达1.7m/s,以水口直径计算的 Re 数为 4×10^4 ,明显地属湍流射流。由示踪粒子显示的结晶器内的流型示于图2,从图2中清晰可见射流与结晶内的水体的明显边界,水体向下游输运速度约2cm/s,进入射流中心的粒子很快被带走,由于高速射流的挟卷,射流与结晶器侧壁间沿水深方向形成了两排涡旋并向下游输运。

当喷嘴通入氮气(N_2)时,在浸入式水口上



图2 示踪粒子显示的未吹气时方坯结晶器内的流型

Fig. 2 The flow pattern of water jet in mold

中均将吹气最大压力 p_g 控制在小于 0.14MPa。如上所述,控制气泡浸入水体的深度(亦即穿透深度)在拉坯生产中具有实际意义,研究中对三种气体流量 Q_g 和三种喷嘴孔径 d_n 进行了考察,当流量 Q_g 很小时,气泡几乎穿透结晶器的全部水深,甚至部分冲向底板被出流口所吞没,带向二相穴(图 3(a))。随气体流量 Q_g 增加气泡群在水体中央悬浮即反转上升,穿透深度明显变浅(图 3(b))。我们定义气泡穿透深度系数: $\gamma = h_b/H_0$, h_b 为自液面向下的气泡穿透水深, H_0 为结晶器内工作液深,实验表明,随气体流量 Q_g 增加 h_b 减小,穿透系数 γ 值亦减小;喷嘴孔径 d_n 减小时穿透深度也略有减小。气泡穿透系数 γ 随流量 Q_g 和孔径 d_n 的变化示于图 4,实验获得的结果显示,在满足液面不翻腾的吹气压力条件下,若选用孔径 $d_n = 0.5\text{mm}$ 喷嘴和气体流量 $Q_g = 1.33\text{l/min}$ 时,穿透系数 $\gamma = 0.6$,意味着气泡穿透结晶器工作液深约 60%,这样,流量、孔径和气泡穿透深度的参数有可能被推荐应用于实际工业生产中。

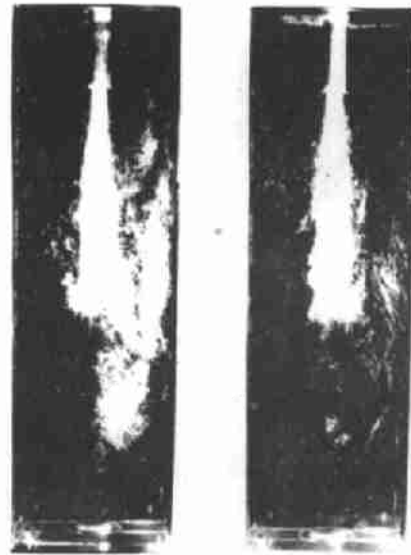


图 3 水口吹气时气泡运动的典型流态
Fig.3 A typical flow pattern with gas injection

沿用冶金过程采用的水模实验与热态原型相似的修正 Froude 数准则^[6]: $(F'_r)_R = (F'_r)_M$

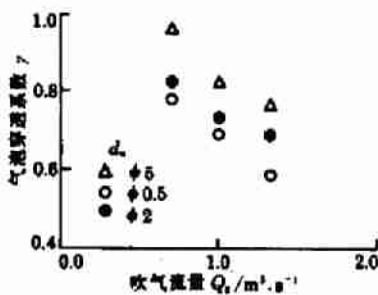


图 4 吹气量 Q_g 、孔径 d_n 和穿透系数 γ 的关系
Fig.4 The variations of penetration depth coefficient γ with Q_g and d_n

$$\text{即 } \left(\frac{\rho_g}{\rho_l - \rho_g} \cdot \frac{U_g^2}{g \cdot L} \right)_R = \left(\frac{\rho_g}{\rho_l - \rho_g} \cdot \frac{U_g^2}{g \cdot L} \right)_M \quad (1)$$

式中 U_g 是吹气速度, L 是结晶器特征长度, g 是重力加速度, ρ_l 和 ρ_g 分别为液体和气体密度,下标 R 和 M 分别代表实型和模型,以吹气流量 $Q_g = U_g / \frac{\pi}{4} d_n^2$ 代入(1)式并简化后有实型与模型的流量关系:

$$[Q_g]_R = [Q_g]_M \left[\frac{(\rho_l)_R}{(\rho_l)_M} \cdot \frac{(M)_M}{(M)_R} \cdot \frac{(T)_R}{(T)_M} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

式中引入了气体的温度 T 和莫尔分子量 M 。代入各变量值,在模型吹 N_2 实型吹 Ar 和模型与实型均吹 N_2 时,实型与模型的吹气量分别由以下关系估计: $(Q_g)_R = 5.5(Q_g)_M$ 和 $(Q_g)_R \approx 6.6(Q_g)_M$ 。

2.3 气泡运动、流场特征及其对夹杂物去除作用的探讨

如前所述,在结晶器内液、固、气(钢水、夹杂物、气泡)三相系统的运动、传热和相变过程特别复杂,关于水口吹气对流场、夹杂物去除作用的机制等,人们认识很少,即使进行一些水模实验研究,仍很不充分。为此我们将深入考察和测定气泡运动和流场特征并探讨其对夹杂物去除的影响。

气体从塞棒头的喷嘴经浸入式水口以高速进入结晶器水体中并形成气泡群,用片光源场显示技术拍摄气泡群在结晶器纵向中心剖面分布的典型照片如图5所示。在图5中气泡的轮廓、形状及大小清晰可辨,其中大部分气泡为球形、少量较大的泡呈椭球形。我们对中心断面上约230个气泡用图像处理技术进行统计,获得气泡直径 d_b 的有关数据是:

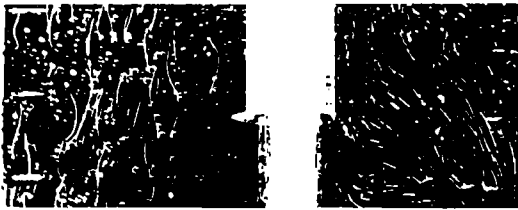


图5 结晶器的气泡形状和上升运动过程
Fig.5 A typical photo of bubbles and particles in the mold

轮廓、形状及大小清晰可辨,其中大部分气泡为球形、少量较大的泡呈椭球形。我们对中心断面上约230个气泡用图像处理技术进行统计,获得气泡直径 d_b 的有关数据是:

$$d_{b\text{mean}} = 1.8\text{mm}, d_{\text{max}} = 3.3\text{mm}, d_{\text{min}} = 0.8\text{mm}$$

(d_{mean} , d_{max} 和 d_{min} 分别指平均、最大和最小,以下速度下标同),这一结果与水中气泡运动特征的经典值相一致,即在气泡雷诺数 $Re_b(Ud_b/\gamma) < 700$ 时,气泡保持为球形,其运动阻力遵照常阻力系数规律($C_D = 0.6$)^[7]。图6给出沿铅直方向5个不同水深断面上气泡直径的分布,图6表明,在不同水深范围气泡尺寸变化不明显,而随距结晶器中心轴距离增加,气泡直径似有减小趋势。

由典型的运动分布情况可见,较大的气泡上升时在底片上留下两条平行的亮迹线(图5),很小的气泡近似固体颗粒的运动。底片上留下一条亮迹线(图5)。由图像分析方法同样可以容易地对气泡上升速度的空间分布进行统计分析,其结果有: $v_{b\text{mean}} = 16.1\text{cm/s}$, $v_{b\text{max}} = 30.4\text{cm/s}$, $v_{b\text{min}} = 8\text{cm/s}$, 上升速度空间分布示于图7。图中显示气泡上升速度值散布较大,沿水深和水平方向无显著变化,但测量结果与经典研究结果速度 $U = 2\sqrt{gd_b/0.9}$ 计算值的范围接近^[7]。上升速度测量值散布较大是由于气泡大小的随机性,其运动路径不是直线且可能未完全落在所考察的中心截面内,但我们认为,由如此多气泡运动速度的统计值基本是真实可靠的。

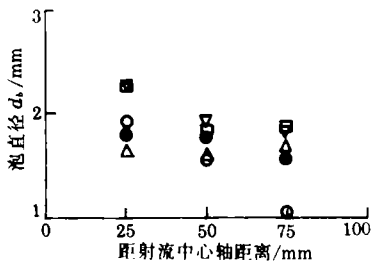


图6 气泡直径在结晶器中的分布
Fig.6 The spacial distribution of bubbles size

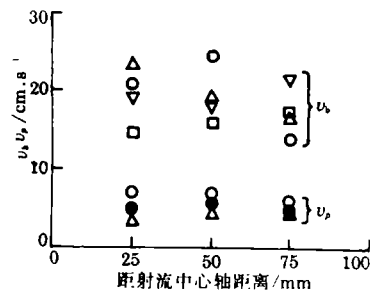


图7 气泡与夹杂物运动速度分布
Fig.7 The spacial velocity distributions of rising bubbles and particles

气泡在运动的流体中上升,而气泡的上升反过来又诱发流体的附加运动,确认这一点很重要,因为气泡上升诱发的流场变化,可能是增加夹杂物上浮的因素之一,而目前某些水口吹气模式中常略去气泡运动对流场的作用。示踪粒子的轨迹显示了流体的运动(图5),由图像处理技术统计同样获得了流体上升运动速度: $v_{p\text{mean}} = 4.0\text{cm/s}$, $v_{p\text{max}} = 10\text{cm/s}$, $v_{p\text{min}} = 2\text{cm/s}$ 。实际上这是气泡诱导的流体运动三维速度在所考察平面中的分量,其分布情况亦示于图7中。明显地,气泡上升速度远大于诱导流体运动速度,二者之比约为3~4:1。同时我们考察了未吹气时的流体运动情况,其速度又小于吹气时的流体速度,二者之比约为1:1.5。值得指出的是,吹气情况下由气泡诱导的流体是局部向上运动的,未吹气时流体随着涡旋运动方向是不一

致的。总之,气泡上升诱导的流场变化导致流体向上运动速度远大于流体向下游输运的平流速度,因此吹气对流场作用是显著的。

钢水中所含夹杂物在结晶器停留时间内,能否有机会上浮至液面保护渣层而被吸附主要受三种过程制约,即首先夹杂物因自身重度低于钢水而达到上浮;其次当夹杂物遇到气泡时,由于表面张力作用而粘附于气泡,随气泡一道上升,或由气泡的尾迹携带夹杂微粒一道上升;其三,气泡上升诱导的流场变化,使结晶器内各种尺度的环流运动加强,增加夹杂上浮接触上液面机会。在静止的水体中一般可用 Stokes 定律 $v_s = d_s^2 \Delta \rho g / 18 \eta$ 来估计粒子沉降速度,对于密度差 $(\rho_{\text{固}} < \rho_{\text{液}})$ 约为 0.7 g/cm^3 、直径 d_s 为 $100 \mu\text{m}$ 的粒子, $v_s \approx 0.4 \text{ cm/s}$ (上浮速度);未吹气时水体向下游输运的平均速度 $v_w = 2 \text{ cm/s}$, $v_w > v_s$,因而夹杂物被水体带向下游的几率很大。当水口吹气时,由实验测得 $v_b \gg v_w$ 和 $v_p > v_w$ 。这样,气泡上升及其诱导水体上升运动扣除水体向下输运速度均给粒子附加了向上运动速度,它必然大大有利于夹杂物的上浮和去除。综合上述分析,就是我们试图对水口部位吹气能有效地促进夹杂物去除机理赋予的解释。

3 结 论

(1) 水模实验表明,方坯结晶器中通过塞棒吹气时,气泡群在射流中心线的一侧作周期性的交替上升;气泡在结晶器水体中的穿透深度主要依赖吹气流量,液面的稳定状态则要受吹气压力的影响。

(2) 实验测得的气泡直径和上升速度值与经典研究结果相符;分析气泡运动及其诱导的流体运动,肯定了水口吹气对于增加夹杂去除率有明显作用,并且进一步探讨了其机理。

(3) 鉴于水口吹气情况下结晶器流场的复杂性,有必要深入开展这一问题的研究,特别是探索和确定气泡运动与夹杂物上浮的定量关系。

参 考 文 献

- 1 浅野贞等. 耐火物(日), 1990, 3, 142~160
- 2 Nagayasu, et al. Proc. of 6th International Iron and Steel Congress, 1990, v. 3, Steelmaking 1, 340~347
- 3 Krishna, et al. Ironmaking and Steelmaking, 1992, 19(5), 377~389
- 4 Nakajima H, et al. Steelmaking Cong. Proc. 1986, 69, Iss-AIME, 705~716
- 5 戴千策等. 化工流体力学. 化学工业出版社, 1988, 711~735
- 6 曲英. 冶金反应工程学导论. 北京钢铁学院出版社, 1984, 127~138
- 7 Levich V. Physicochemical Hydrodynamics; Prentice-Hall Inc. 1962, 432~448

AN AQUEOUS MODELING STUDY ON MOTIONS OF BUBBLES INJECTED INTO SQUARE CROSS-SECTION MOLD

Liu Yinian Fang Zhijia Jia Fu Zheng Caiyun

Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080

Zhou Yiuyu Ren Dunchang

Wuhan Steel Company, Wuhan 430080

Abstract Presented in this paper is an experimental study on a complex flow system occurring in a square cross-section mold, into which a water jet mixed with gas bubbles is injected. Flow

visualization technique is used to reveal both flow patterns and the motion features of injected bubbles. External controlling parameters, which are of great concern to engineering applications such as gas supply pressure, gas flow rate, orifice diameter, ... applicable for production operation were experimentally determined. Size, size distribution of bubbles, their rising velocities were measured and the effect of bubbles motion on inclusion removal was also explored.

Key words continuous casting of steelmaking; mold; gas injection through; nozzle; bubble motion; inclusion removal; flow visualization technique

(上接第 84 页)

THE NUMERICAL SIMULATION OF THE FLOW FIELD AROUND HIGH SPEED TRAINS

Wang kaichun Zhu Guolin Guo Yingjun

China Aerodynamics Research and Development center, Mianyang 621000

Abstract This paper presents the numerical method of the flow field around high speed trains using Navier-stokes equations. The mixed difference scheme of the implicit and explicit algorithm is adapted to improve the convergence characteristic. The program system Train3D that is based on this method is developed. The aerodynamics and flow structures for high speed trains are obtained using this program system.

Key words high speed trains; aerodynamics; numerical calculation

(上接第 59 页)

数据场可视化系统(DVS)和它的应用

刘慎权 唐卫清 李华

中科院计算所 CAD 开放实验室, 北京 100080

摘要 探讨三个方面的问题, 即数据场可视化的数据模型、体系结构以及应用。文章通过对应用领域的实际分析和综合, 总结出常用的 22 种数据场的类型, 依此提炼出了数据场可视化系统的数据模型和体系结构, 文章还对相关的可视化方法作了介绍。根据文中提供的模型在 Indigo2 工作站上实现的一个数据场可视化系统已被应用于许多专业领域, 文章最后给出了几个方面应用的结果。

关键词 科学计算; 数据场; 可视化; 数据模型; 体系结构; 系统

中图分类号 TN957.52