

冲天炉理论与应用

施廷藻 郭燕杰 蔡德金 何光新 著

东北工学院出版社

(辽)新登字第8号

内 容 简 介

本书系统地阐述了冲天炉熔炼过程中燃烧、热交换及冶金过程,并提出和总结了有关代焦技术的理论问题。尤其对冲天炉内空气运动、底焦燃烧、熔炼时元素变化、热风冲天炉、两排大间距冲天炉、中央送风冲天炉以及燃油、煤粉化铁炉内旋风燃烧等基本规律进行了详细分析,并提出了一些新观点、新看法。

本书是高等院校铸造专业研究生及本科生用教材,也可供高等院校的教师、科研单位的研究人员和工程技术人员使用。

冲天炉理论与应用

施廷藻 郭燕杰 蔡德金 何光新 著

东北工学院出版社出版	辽宁省新华书店发行
(沈阳市和平区文化路3号巷11号)	东北工学院印刷厂印刷
邮政编码: 110006	(辽新出许字89084号)

开本: 787×1092 1/16	印张: 26	字数: 650千字
1992年5月第1版	1992年5月第1次印刷	
印数: 1—3000册		

责任编辑: 李玉兴	责任校对: 张德喜
封面设计: 唐敏智	版式设计: 杨华宁

ISBN 7-81006-411-8/TG·16	定价: 16.50元(平)
	23.50元(精)

前 言

冲天炉在我国应用至为普及。据估计,我国铸铁件的90%以上,是用冲天炉熔炼的铁水浇注的。冲天炉是我国铸铁熔炼的主要设备,因此,对冲天炉的研究工作具有重大的经济意义。

建国以来,我国广大铸造工作者对冲天炉的结构及熔炼工艺进行了大量的研究工作,取得了丰富的生产经验和丰硕的研究成果。但是,由于测试手段的限制,研究冲天炉内部规律的理论著作,无论是国内还是国外,所见还是较少的。

著者于1970年开始研究冲天炉基本原理,并首先创造了用测定炉内速度场的办法,研究了炉内炉气运动、炉料运动等一系列基本规律,以此指导生产实践,取得了良好的经济效果。因此,著者将取得的研究成果撰写成《冲天炉理论与应用》一书,谨作为冲天炉研究百花园中的一朵小花,敬献给读者,以供广大铸造工作者检验运用,亦佐高等工科院校教师、研究生及学生启迪思路,作为教学用书及研究工作的参考。

本书第一章、第五章由东北工学院施廷藻教授执笔;第二章、第四章由沈阳铸造研究所蔡德金高级工程师执笔;第三章、第六章由东北工学院郭燕杰教授执笔;第七章(及第二章、第三章部分内容)由江苏工学院何光新副教授执笔,并做最后全书统稿。本书在撰写过程中,得到清华大学黄惠松教授、北京科技大学张联芳副教授、河北工学院孙克诚教授、天津大学分院庞凤荣副教授、天津机械设计院周家骅高级工程师、北京第一机床厂马敬仲高级工程师的热情帮助和指导,在此谨致衷心的感谢。

由于著者的水平有限,书中肤浅不妥之处在所难免,热望读者不吝批评指正。

著 者

目 录

第一章 冲天炉内炉气和炉料的运动

第一节 相似原理基础	(1)
一、现象相似的特点	(1)
二、相似三大定律	(5)
第二节 冲天炉内气体运动的模拟试验	(6)
一、冷态模拟冲天炉的设计和研究方法	(6)
二、空气在冲天炉内运动规律	(12)
第三节 风口区气体运动	(22)
一、空气穿透深度	(22)
二、风口前空洞	(27)
第四节 冲天炉内物料运动规律及气流对物料运动的影响	(30)
一、炉料自由下降运动	(30)
二、上升炉气对炉料运动的影响	(32)

第二章 冲天炉内燃料的燃烧

第一节 冲天炉用燃料——焦炭	(36)
一、冲天炉用焦的基本组成	(36)
二、焦炭发热量计算	(38)
三、冲天炉用焦基本性质	(39)
四、有关铸造用焦的技术指标	(41)
第二节 焦炭的燃烧计算	(47)
一、理论空气量和燃烧产物量计算	(47)
二、实际空气量和燃烧产物量计算	(49)
三、燃烧温度的计算	(51)
第三节 焦炭的燃烧	(54)
一、碳燃烧的热力学分析	(54)
二、碳燃烧的动力学分析	(56)
第四节 冲天炉底焦燃烧	(59)
一、焦炭的层状燃烧	(59)
二、冲天炉底焦燃烧	(60)
三、冲天炉内炉气成分和温度变化	(63)
第五节 碳与水蒸气反应	(64)
第六节 组织合理燃烧	(66)
一、焦炭的影响	(66)
二、风的影响	(71)

第三章 冲天炉内热交换

第一节 块状料层内热交换	(81)
一、逆流传热的能量方程	(82)
二、传热系数与导热系数	(84)
三、预热带金属料加热的模拟研究结果	(89)
四、预热带实际料块的加热	(94)
五、预热带石灰石的分解	(96)
第二节 熔化带内热交换	(98)
一、基本特征	(98)
二、熔化带高度及其控制	(99)
第三节 过热带内铁水过热的分析	(101)
一、按过热面积做定性分析	(102)
二、按过热带内热平衡估算	(104)
三、按过热带内铁水滞留时间估算	(105)
四、关于 α 点的讨论	(106)
第四节 冲天炉内热平衡	(107)
一、冲天炉内的物理热	(107)
二、冲天炉内的化学热	(111)
三、冲天炉内的热平衡计算	(115)
第五节 冲天炉热交换的强化	(122)
一、预热带热交换的强化	(122)
二、熔化带及过热带热交换的强化	(125)
三、炉缸区热交换的强化	(128)

第四章 冲天炉熔炼元素变化

第一节 元素的氧化和还原	(129)
一、反应自发进行的条件	(129)
二、氧化物的标准自由焓	(130)
三、标准自由焓变化值的计算	(135)
第二节 化学反应的等温方程式	(136)
一、气体间反应的平衡常数	(136)
二、有纯固体(液体)参加的多相反应平衡常数	(138)
三、化学反应的等温方程式	(139)
四、各因素对自发反应趋势的影响	(140)
第三节 溶液中氧化还原反应	(141)
一、溶液中反应标准自由焓变化值计算	(142)
二、金属溶液中元素的活度	(147)
三、熔渣中氧化物的活度	(154)
第四节 冲天炉内的硅锰元素变化	(156)
一、Si 的氧化与 SiO_2 还原	(156)
二、Mn 的氧化与 MnO 的还原	(162)

三、影响 Si、Mn 元素变化的因素	(168)
第五节 冲天炉内 C 元素变化	(169)
一、C 的溶解	(169)
二、C 的氧化	(170)
三、影响铸铁含 C 量的因素	(172)
第六节 冲天炉内 S、P 的变化	(172)
一、焦炭的增 S	(172)
二、影响铁水含 S 量的主要因素	(174)
三、炉内脱 S	(175)
四、炉外脱 S	(177)
五、P 的变化	(180)
第七节 冲天炉内合金元素变化	(181)

第五章 冲天炉强化

第一节 空冷无炉衬热风冲天炉	(183)
一、国内外热风型式	(184)
二、空冷无炉衬换热器设计	(189)
第二节 两排大间距冲天炉	(200)
一、热态模拟试验	(202)
二、两排大间距冲天炉最佳工艺参数的确定	(210)
第三节 低风速中央送风冲天炉	(220)
一、中央送风冲天炉内炉温分布	(220)
二、风速对 Si 和 Mn 烧损的影响	(225)
三、中央送风冲天炉的风口风速对熔炼的影响	(240)

第六章 代焦技术

第一节 重油及煤粉化铁炉的基本结构	(243)
一、炉 体	(244)
二、油和煤粉的供给系统	(244)
三、送风系统	(244)
第二节 重油及煤粉化铁炉对合理组织燃烧的基本要求	(247)
一、煤粉和油的燃烧特性	(247)
二、化铁炉对合理组织燃烧的基本要求	(254)
三、燃料燃烧的空气需要量	(255)
第三节 煤粉及重油化铁炉内“旋风”燃烧的基本规律	(257)
一、二次风的出口速度及其速度降落	(258)
二、风在燃烧室内沿横截面上的切向速度	(260)
三、切向速度的经验公式及最大切向速度	(260)
四、最大切向速度计算的诺谟图	(263)
五、燃料与空气的充分、均匀混合	(265)
第四节 涡流式机械喷嘴的雾化特性及应用 ^[104]	(268)

一、涡流运动的基本规律及雾化角	(269)
二、喷嘴的理论特性	(271)
三、喷嘴供油量的计算及流量系数的实验校核	(275)
四、喷嘴的设计	(277)
第五节 煤粉的供给	(278)
一、给煤机	(279)
二、循环风力输送	(279)
第六节 冶金及热交换特点	(286)
一、铸铁的熔化	(286)
二、铸铁熔炼过程的热交换特点	(287)
三、熔炼过程中合金元素的变化规律	(294)
第七节 炉型结构基本参数的确定	(296)
一、竖炉结构	(296)
二、环形火道及火口	(296)
三、过桥结构	(297)
四、前炉结构	(298)
第八节 燃烧的生产调试与熔炼工艺控制	(300)
一、调试步骤	(300)
二、炉况判断	(300)
三、熔化工艺	(302)
第九节 天然气化铁	(303)
一、天然气的组成及性质	(303)
二、燃烧器及其设计	(303)
三、燃料燃烧的空气需要量	(308)
四、天然气化铁炉的结构	(309)
五、熔炼工艺	(312)

第七章 冲天炉检测与控制原理

第一节 冲天炉加料的检测与控制原理	(314)
一、压差式料位监控装置	(314)
二、穿透式料位监控装置	(315)
三、导电式料位监控装置	(317)
第二节 送风的检测与控制原理	(317)
一、风压的检测	(317)
二、风量的检测原理	(318)
三、送风湿度控制	(337)
第三节 炉气分析原理	(339)
一、化学式气体分析器	(339)
二、热导式气体分析仪	(341)
三、红外线气体分析仪	(342)
四、气相色谱仪 ^{(58) (59)}	(344)
第四节 温度测量	(345)

一、热电偶测温装置	(345)
二、辐射温度计	(359)
三、铁水温度自动调节	(365)
第五节 炉渣检测与控制	(366)
一、概 述	(366)
二、炉渣的肉眼检测	(367)
三、炉渣化学分析	(367)
四、炉渣控制	(371)
第六节 铁水化学成分检测与控制	(373)
一、从铁水表面花纹估计铁水化学成分 ⁽⁴⁸⁾⁽⁴⁹⁾⁽⁵⁰⁾	(373)
二、从铁水溅花估计铁水化学成分	(378)
三、炉前三角试片检查铁水化学成分	(378)
四、用圆棒试样控制铁水的化学成分	(385)
五、热分析法检测铁水化学成分	(388)
六、光电直读光谱分析法	(392)
七、浓差电池炉前快速定氧	(397)
参考文献	(404)

第一章 冲天炉内炉气和炉料的运动

冲天炉内炉气是在炉料之间的空间里运动的。为了阐明能保证冲天炉熔化过程强化的条件，就要研究炉料层内气体流动的轨迹，并拟定消除这种流动不均匀的途径和获得沿冲天炉各个截面最有利的气体流动的条件。也要研究炉料层对气态燃烧产物的阻力，以便保证正确地选择和采用获得强化冲天炉熔化过程所必须的送风设备。还要研究向冲天炉内引入空气的合理方法。

冲天炉内炉料自上而下运动，而炉气则通过炉料空隙自下而上运动。炉气通过料层的运动速度一般是每秒几十米，而炉料的运动速度只是每小时几米，也就是说炉料的运动速度比炉气的运动速度要慢数万倍。

众所周知，风是冲天炉熔化过程中最积极和最活跃的因素，因而弄清冲天炉内空气运动规律，才能更加主动地控制冲天炉，得到高温优质的铁水。

第一节 相似原理基础

为了探讨冲天炉内气体的流动、物料运动以及热交换等规律和研究冲天炉结构型式是否合理，其最可靠的办法是通过试验。但是，用生产中的冲天炉进行试验，是有较大困难的。这是由于冲天炉炉内温度高、炉气运动规律极为复杂，难以测定气流速度和气流压力等有关参数。同时，用实际冲天炉进行试验费用也过大，在经济上是不合理的。

为了解决上述问题，可制作一个尺寸比实际冲天炉小得多的模拟冲天炉。只要模拟冲天炉与实际冲天炉之间保持一定关系，则在模拟冲天炉内所测得的试验结果，即可代表实际冲天炉内的各种规律。一般利用模拟冲天炉做试验非常方便，可利用冷空气来模拟冲天炉内的高温气流，既便于观察，又便于测量。

在模拟冲天炉试验中，要解决以下三个方面的问题。

1. 模拟冲天炉内所进行的过程怎样才算与实际冲天炉内所进行的过程现象相似呢？也就是说怎样设计模拟冲天炉的炉型结构？

2. 模拟冲天炉在试验过程中，应当测量哪些物理量呢？

3. 如何处理实验数据和结果呢？

上述三个问题有待于用相似原理来回答。

一、现象相似的特点

利用模拟冲天炉进行试验来探讨冲天炉内的各种规律，必须使模拟冲天炉与实际冲天炉相似。下面就几何与流动两种现象来说明相似的特点。

(一) 几何相似

两个物体几何形状上的相似，称为几何相似。当两个三角形相似时，对应边之比必相等，这就是一切几何相似的条件。对于实际冲天炉与模拟冲天炉来讲也是如此，如图 1-1 所示。

设实际冲天炉炉膛直径为 D' ，高度为 H' ；模拟冲天炉炉膛直径为 D'' ，其高度为 H'' 。由于两

者几何形状相似,其对应尺寸之比也必相等,则比值常数等于 C 。即

$$\frac{D'}{D''} = \frac{H'}{H''} = C$$

这里的常数 C 称为相似常数。相似常数 C 的意义是同类(同因次)物理量之比。例如,两个相似物体的对应边长度之比,即为长度的相似常数。还可以反过来推论,假若两个物体对应边之比相等,则几何形状必相似。

几何形状相似是两个现象相似的基本条件。模拟冲天炉与实际冲天炉首先应该在内部几何形状上完全相似,即两者对应尺寸之比应相等。

(二) 流动相似

两种流体的流动现象相似,称为流动相似。当模拟冲天炉内气体的流动与

实际冲天炉内气体的流动相似时,两者气体的流动规律必相同,因而在模拟冲天炉内研究气体的流动规律,就等于在实际冲天炉内研究气体的流动规律。

为了探讨流动相似特点,就要利用流体运动方程式来描述流体流动过程的基本规律;用它来说明惯性力、压力以及摩擦力之间的关系,它对于一般流体或者气体都适用。当流体沿一个方向流动时,其微分方程式为:

$$\rho \frac{\partial u}{\partial \tau} + \rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} \right) = \rho g - \frac{\partial P}{\partial x} + \mu \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (1-1)$$

式中 P —— 压力;

u —— 速度;

ρ —— 流体密度;

τ —— 时间;

g —— 重力加速度;

μ —— 粘度系数;

x —— 流动方向坐标。

现根据基本方程式 (1-1) 进一步探讨两种气体现象相似的特点。

设有两个相似的流动现象,例如模拟冲天炉内空气的流动与实际冲天炉内炉气的流动,对第一种现象而言,其微分方程式为:

$$\rho' \frac{\partial u'}{\partial \tau'} + \rho' \left(u' \frac{\partial u'}{\partial x'} \right) = \rho' g' - \frac{\partial P'}{\partial x'} + \mu' \frac{\partial^2 u'}{\partial x'^2} \quad (1-2)$$

对于第二种现象而言,其微分方程式为:

$$\rho'' \frac{\partial u''}{\partial \tau''} + \rho'' \left(u'' \frac{\partial u''}{\partial x''} \right) = \rho'' g'' - \frac{\partial P''}{\partial x''} + \mu'' \frac{\partial^2 u''}{\partial x''^2} \quad (1-3)$$

由于两个现象相似,其各相应物理量之比应等于常数(即相似常数):

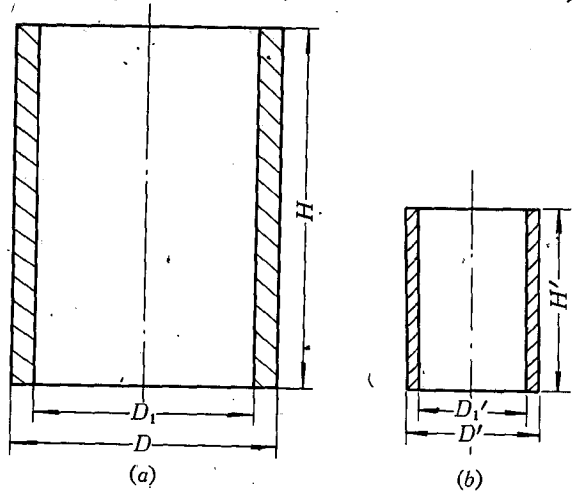


图 1-1 几何形状相似的冲天炉炉膛
(a) 实际冲天炉炉膛; (b) 模拟冲天炉炉膛。

$$\left. \begin{aligned} \frac{u''}{u'} &= C_u \\ \frac{x''}{x'} &= C_x \\ \frac{\rho''}{\rho'} &= C_\rho \\ \frac{\tau''}{\tau'} &= C_\tau \\ \frac{\mu''}{\mu'} &= C_\mu \\ \frac{P''}{P'} &= C_P \end{aligned} \right\} \quad (1-4)$$

因此，第二个现象的物理量，可以用第一个现象的物理量与相似常数的乘积来代替，即：

$$\begin{aligned} u'' &= C_u \cdot u' \\ x'' &= C_x \cdot x' \\ \rho'' &= C_\rho \cdot \rho' \\ \tau'' &= C_\tau \cdot \tau' \\ P'' &= C_P \cdot P' \end{aligned}$$

将上述关系式代入 (1-2) 式，并进行整理后，可得：

$$\begin{aligned} \frac{C_P C_u}{C_\tau} \cdot P' \frac{\partial u'}{\partial \tau'} + \frac{C_P \cdot C_u^2}{C_x} \rho' u' \frac{\partial u'}{\partial x'} \\ = C_\rho \cdot C_g \cdot \rho' \cdot g' - \frac{C_P}{C_x} \frac{\partial P'}{\partial x'} + \frac{C_u \cdot C_\mu}{C_x^2} \mu' \frac{\partial^2 u'}{\partial x'^2} \end{aligned} \quad (1-5)$$

比较公式 (1-2) 与公式 (1-5) 可知，由于两式变数相同，而公式 (1-2) 是成立的，故公式 (1-5) 中各相似常数所组成的比例系数必然相等。

由流动方程式可得：

$$\frac{C_P C_u}{C_\tau} = \frac{C_P C_u^2}{C_x} = C_\rho \cdot C_g = \frac{C_P}{C_x} = \frac{C_u \cdot C_\mu}{C_x^2} \quad (1-6)$$

(1) (2) (3) (4) (5)

为了说明各种作用力之间的关系，根据上述 (1-6) 式，可得到一个新的比例系数。

对于冲天炉来讲，送风是采用强制送风，也就是强制流动，因而空气在炉内主要是受到两种力，即是惯性力与摩擦力的作用。为了说明两者作用力之间的关系，由 (1-6) 式中的 (2) 与 (5) 可得：

$$\frac{C_P \cdot C_u^2}{C_x} = \frac{C_u \cdot C_\mu}{C_x^2}$$

或者

$$\frac{C_P \cdot C_u \cdot C_x}{C_\mu} = 1$$

以物理量相比代替相似常数，并通过整理后，可得：

$$\frac{\rho' \cdot u' \cdot l'}{\mu'} = \frac{\rho'' \cdot u'' \cdot l''}{\mu''} \quad (1-7)$$

从公式 (1-7) 可看出, 对于两种相似气流而言, 这两个比例数群必相等。如果再有第三、第四个...相似现象, 则必定有同样的关系。各物理量以普通符号代替, 则:

$$\frac{\rho' u' l'}{\mu'} = \frac{\rho'' u'' l''}{\mu''} = \frac{\rho''' u''' l'''}{\mu'''} = \dots = \frac{\rho u l}{\mu} = \text{常数}$$

所得到的比例数群, 称为雷诺 (Reynolds) 相似规范数, 以符号 (Re) 表示。从上述的推导过程不难看出, 对两个相似的流动现象而言 (即模拟冲天炉与实际冲天炉的炉内气体流动), 其雷诺规范数 (Re) 也就必然相等。

雷诺规范数对于流体而言, 是十分重要的规范数。雷诺规范数的分子部分主要是速度, 它代表着流体流动的惯性力, 而分母部分为粘度系数, 它代表着流体的摩擦力。因而, 对雷诺规范数 (Re) 可以理解为是惯性力与摩擦力之比, 即:

$$Re = \frac{ul}{\nu}$$

式中 ν ——运动粘度系数

从 (1-6) 式可同样地得出其它相似规范数。当流体是由于重力作用而流动时, 为了说明重力与惯性力之间的关系, 从 (1-6) 式中可得出

$$\frac{C_p \cdot C_s^2}{C_s} = C_p \cdot C_s$$

或者

$$\frac{C_p \cdot C_s}{C_s^2} = 1$$

以物理量代入后, 则得到:

$$\frac{g' l'}{u'^2} = \frac{g'' l''}{u''^2} = \frac{g''' l'''}{u'''^2} = \dots = \frac{gl}{u^2} = \text{常数}$$

所得到的上述比例数群 (或 gl/u^2) 称为富利德 (Froude) 规范数, 以符号 (Fr) 表示。从它的意义来说, 流体的自由流动是由于重力作用而引起的, 它也表示流体流动时的重力 (g) 与惯性力之比。即是:

$$Fr = \frac{gl}{u^2}$$

如果说两种气体流动现象相似, 则两者的富利德规范数 (Fr) 亦应相等。

若气体流动主要是在压力作用下而引起, 那么就要研究压力 (P) 与惯性力之间的关系。从 (1-6) 式中的 (2) = (4) 即可得出:

$$\frac{C_p C_s^2}{C_s} = \frac{C_p}{C_s}$$

或者

$$\frac{C_p}{C_p C_s^2} = 1$$

同样, 以物理量代入, 则得到:

$$\frac{P'}{\rho' u'^2} = \frac{P''}{\rho'' u''^2} = \frac{P'''}{\rho''' u'''^2} = \dots = \frac{P}{\rho u^2} = \text{常数}$$

上述的比例数群称为尤拉 (Euler) 规范数, 以 Eu 表示之。在实际应用尤拉规范数 (Eu) 时, 压力 (P) 常以流体两个断面间的压力损失 (Δp) 来代替, 故尤拉规范数 (Eu) 是代表压头损失

(Δp) 与惯性力之比的规范数,其通式为:

$$Eu = \frac{\Delta p}{\rho u^2}$$

因此,可以得出,两种气体流动现象相似时,有关规范数必定相等。

上述各种相似规范数(或称相似准数),在相似原理中,特别是在进行模拟冲天炉设计时,是一个非常重要的问题。

各个规范数是无因次(即没有单位)的。各规范数所代表的物理意义,取决于它们之间所包含的物理量。

各规范数的重要性不在于本身的意义,而在于它们所说明的问题。规范数是从某一方面来说明现象本质的一种指标,例如雷诺规范数是说明流体流动的性质——层流或紊流。

由于一个规范数不可能说明现象的全部本质,故一个现象中要包括几个规范数。下面举一个浅显的例子来说明规范数的作用。如对于矩形几何图形,长度(L)与宽度(B)之比(L/B)可认为是几何形状的规范数,该比值是说明矩形特征最好的指标。规范数的作用不仅如此,由于规范数中集合了几个物理量,因而使得现象中的许多物理量之间的数学关系得到简化。下面谈到的相似原理在气体流动、对流热交换中的实际应用时,就可充分体会到它的作用。

二、相似三大定理

相似三大定理是相似原理的中心。

上面提到的在模拟冲天炉试验中存在的三个问题,必须在相似三大定理的指导下才能得到解决。

下面概括相似三大定理。

第一定理:彼此相似的现象,必须有相等的相似规范数。

这个定理实质上在前面推导相似规范数过程中,已获得了证明。

第二定理:说明任一现象本质的物理量之间的关系式,可以用规范数的关系式来表达。

这个定理的实际意义是,可用规范数关系来代表物理量之间的关系,以说明现象的本质。由于一个规范数中集合了几个物理量,故使描述现象本质的关系式获得简化。

第三定理:凡是单值性条件相似,则由单值性条件所组成的规范数的那些现象,就必定相似。

所谓单值条件,即是描述现象特点的条件,单值条件一般包括以下几个方面:

1. 几何形状及尺寸。
2. 物理条件——指物理性质(如重度、热容量...)以及物理参数(如温度、速度...).
3. 边界条件——即物理边界上的特点(如物体表面温度、流体边界层温度...).
4. 时间条件。

单值条件相似,即两个现象中,相对应的物理量比值保持相等。

第三定理解决了第一个问题,即模拟冲天炉应符合第三定理的原则,才算与实际冲天炉相似。研究冲天炉炉内气体流动时,模拟冲天炉与实际冲天炉的几何尺寸、送风量都必须相似,其雷诺规范数必须相等。

第二定理同时也回答了第二个问题,试验时应测量规范数关系中所包括的物理量。

第二定理还能解决第三个问题,即模拟试验结果应整理成规范数方程式。

第三定理对试验结果的推广和应用提供了有利条件,试验结果可应用于所有相似现象中去。而该定理也规定了哪些现象才能算做相似。

第二节 冲天炉内气体运动的模拟试验

由于气体在冲天炉内经过炉料层的流动特性是相当复杂的,而且要直接观测炉内这一流动过程也是相当困难的。利用冷态相似模拟试验来研究冲天炉内气体流动的轨迹,却易得到良好的效果。国外曾有些人对此进行过研究^[1],采用的是模拟法,而且大部分只能定性的描述空气流股的运动规律。他们是利用在鼓入的空气中加入粉状有色物质——混有玫瑰红的氧化镁,再逐层取出冲天炉内所装的焦炭,并研究出各个焦炭块上的染色程度。用这种办法来画出粉末沉积强度图线。

著者于1980年首次研究成功利用测定冲天炉内速度场,来研究空气在冲天炉内的运动基本规律^[2]。利用速度场研究冲天炉内气体运动规律的新方法,能够定量地描述空气在冲天炉内各个横截面和高度方向的运动基本规律,能找出冲天炉内各个不同位置空气流动轨迹(即速度场),还能找出炉料层对气体运动的阻力,以及风口前形成空洞区的形状和大小,因而就能确定出往冲天炉内引入空气的合理方法。

一、冷态模拟冲天炉的设计和研究方法

冲天炉内空气的运动,可按不可压缩粘性流体稳定流动微分方程组来描述,即:

$$\left. \begin{aligned} x - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + v \Delta u_x &= \frac{du_x}{dt} \\ y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + v \Delta u_y &= \frac{du_y}{dt} \\ z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + v \Delta u_z &= \frac{du_z}{dt} \end{aligned} \right\} \quad (1-8)$$

式中 x, y, z ——分别表示气体单位质量的力在 x, y, z 三个坐标轴上的投影;

u_x, u_y, u_z ——分别表示气流速度(u) 在 x, y, z 三个坐标上的分量;

$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ ——表示拉普拉斯运算符;

P ——气流压力;

ρ ——气流密度;

v ——气体运动粘度系数。

为研究方便,先除去传热现象,因而可用常温(20℃)下的空气来进行冷态模拟实验。

按照相似第二定理,一个现象的各变量之间的关系方程,可以转换为由相似规范数组成的关系方程,据此在质量力中只有重力的情况下,方程组(1-8)可转换为:

$$f(Re, Fr, Eu) = 0 \quad (1-9)$$

式中 $Re = \frac{ul}{v}$ ——雷诺规范数;

$Fr = \frac{u^2}{gl}$ ——富利德规范数;

$$Eu = \frac{\Delta P}{\rho u^2} \quad \text{—— 尤拉规范数。}$$

按照相似第三定理，凡是表征现象特征的单值性条件相似，而且由单值性条件所构成的决定性的规范数之值相等，则现象就一定是相似的。

在方程式 (1-9) 中，由于冲天炉内空气是强制鼓风，其重力影响较小，因而雷诺规范数和尤拉规范数是决定性规范数，而富利德规范数则成为非决定性规范数，故对富利德规范数可忽略不计，于是对冲天炉来讲，方程式 (1-9) 就可简化为：

$$f(Re, Eu) = 0$$

或者

$$Eu = f(Re) \quad (1-10)$$

这样，只要模拟冲天炉的雷诺数 (Re) 与实际冲天炉的雷诺数 (Re') 相等，则现象必然相似。

在保证上述条件下，只能假定在模拟炉内与实际冲天炉内炉料的布局有相似的可能性。

为了简化研究方法，采用模拟冲天炉内的炉料处于静止状态来进行研究。因此，在冲天炉模拟化时，必须保证模拟炉的炉料间隙系数等于实际冲天炉的炉料间隙系数。

根据上述原理，下面来讨论模拟炉的设计方法和步骤。

(一) 模拟冲天炉的设计步骤

1. 实际冲天炉的基本参数

- (1) 炉径， $D_{\text{实}} = 900(\text{mm})$ ；
- (2) 送风强度， $W_{\text{实}} = 100(\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{min}))$ ；
- (3) 炉气的平均温度， $t = 1500(\text{C})$ ；
- (4) 料块间的空隙度， $\epsilon = 0.34$ ；
- (5) 风的出口速度， $u = 70(\text{m/s})$ ；
- (6) 焦块直径， $d = 60 \sim 100(\text{mm})$ 。

在实际冲天炉中气流温度一般平均为 1500C ，这时的送风强度 ($W_{\text{实}}$) 就变为 (炉内压力变化的影响可忽略不计)：

$$\begin{aligned} W_{\text{高}} &= W_{\text{实}} \left(1 + \frac{t}{273}\right) = 1.67 \left(1 + \frac{1500}{273}\right) \\ &= 10.825(\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{min})) \end{aligned}$$

实际冲天炉内高温气流的平均速度为：

$$u_{\text{实}} = \frac{W_{\text{高}}}{\epsilon} = \frac{10.825}{0.34} = 31.66 \quad (\text{m/s})$$

2. 确定平均流速

根据料块空隙度 (ϵ) 和送风强度 ($W_{\text{实}}$)，可确定模拟冲天炉炉内气流的平均流速 ($u_{\text{模}}$)，其值为：

$$u_{\text{模}} = \frac{W_{\text{实}}}{\epsilon} = \frac{1.67}{0.34} = 4.92(\text{m/s})$$

3. 确定模拟系数

设模拟冲天炉模拟料块间的间隙平均直径为 $d_{\text{模}}$ 。

则模拟炉内料块间的间隙雷诺数 ($Re_{\text{模}}$) 为：

$$Re_{\text{模}} = \frac{u_{\text{模}} \cdot d_{\text{模}}}{\nu_{\text{模}}} = \frac{4.92 d_{\text{模}}}{15.7 \times 10^{-6}} = 312400 \quad d_{\text{模}}$$

根据实际冲天炉内料块间的间隙雷诺数($Re_{\text{实}}$)等于模拟炉内料块间的间隙雷诺数($Re_{\text{模}}$),就可求得现象相似的几何模拟系数,也可称为模拟炉比实际冲天炉的尺寸缩小倍数。即:

$$Re_{\text{实}} = Re_{\text{模}}$$

设实际冲天炉内焦块间的通道平均直径为 $d_{\text{实}}$,则实际冲天炉内焦块间的通道雷诺数($Re_{\text{实}}$)为:

$$Re_{\text{实}} = \frac{u_{\text{实}} \cdot d_{\text{实}}}{\nu_{\text{实}}} = \frac{31.66 d_{\text{实}}}{310.35 \times 10^{-6}} = 102700 d_{\text{实}}$$

因此,

$$102700 d_{\text{实}} = 312400 d_{\text{模}}$$

则:

$$\frac{d_{\text{实}}}{d_{\text{模}}} = 3.04$$

故取模拟系数等于3。

4. 确定模拟冲天炉的各部位尺寸

根据实际冲天炉的基本参数及相似的几何模拟系数,便可确定出模拟冲天炉的基本尺寸和参数。

(1) 模拟冲天炉的直径($D_{\text{模}}$)

按实际冲天炉的生产率 $5t/h$ 来研究,其实际冲天炉的直径($D_{\text{实}}$)为900mm。则:

$$D_{\text{模}} = \frac{D_{\text{实}}}{3} = \frac{900}{3} = 300(\text{mm})$$

(2) 模拟料块尺寸($d_{\text{模}}$)

根据 $5t/h$ 冲天炉所使用的焦块尺寸($d_{\text{实}}$)为60~100mm,则:

$$d_{\text{模}} = \frac{d_{\text{实}}}{3} = \frac{60 \sim 100}{3} = 20 \sim 33.3(\text{mm})$$

(3) 模拟炉内送风量(Q)

$$Q = \frac{\pi}{4} D_{\text{模}}^2 W \quad (\text{m}^3/\text{min})$$

一般生产时(当焦耗在12.5%时),其送风强度(W)取 $100 (\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{min}))$,

则: $Q = 0.785 \times 0.3^2 \times 100 = 7.065 (\text{m}^3/\text{min})$

(4) 模拟炉风口尺寸

假设 N 表示风口的总个数;

M 表示风口的排数;

u 表示空气在风口处的出口速度;

d_0 表示风口直径;

Q 表示入炉的总风量;

$Q_1, Q_2, Q_3 \dots$ 等表示各排风口分别送入的风量;

$\psi_1 = \frac{Q_1}{Q}, \psi_2 = \frac{Q_2}{Q} \dots$ 等表示各排风口之间的风量分配系数;

那么,入炉总风量(Q)与空气的出口速度(u)以及风口直径(d)之间的关系式为:

$$Q = N \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot u \quad (1-11)$$

按(1-11)式可计算出各种送风方式的风口出口直径(d)。

a. 两排大间距

排数(M) 取为 2;

每排个数采用 4, 则 $N = 8$;

两排风口风量分配比, 取等分配比, 则 $\psi_1 = \psi_2 = 0.5$ 。

则直径 d 为:

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot M \cdot \psi_1 \cdot Q}{\pi \cdot N \cdot u}} = \sqrt{\frac{4 \times 2 \times 0.5 \times 0.1178}{3.14 \times 8 \times 70}} = 16.4(\text{mm})$$

取 $d = 17(\text{mm})$

b. 三排送风

排数(M) 取为 3;

每排风口个数取 4 个, 则 $N = 3 \times 4 = 12$ 个;

主排风口的分配系数 $\psi_1 = 0.6$;

辅排风口的分配系数 $\psi_2 = \psi_3 = 0.2$ 。

则主排风口的出口直径(d_1) 为:

$$d_1 = \sqrt{\frac{4 \cdot M \cdot \psi_1 \cdot Q}{\pi \cdot N \cdot u}} = \sqrt{\frac{4 \times 3 \times 0.6 \times 0.1178}{3.14 \times 12 \times 70}} = 18.1(\text{mm})$$

取 $d_1 = 18(\text{mm})$

同理, 可计算出 d_2 和 d_3 , 分别为:

$$d_2 = d_3 = 11(\text{mm})$$

c. 中央送风

排数取 $M = 4$ (其中侧三排, 顶一排);

表 1-1 各种模拟炉风口特征

参 数		排 数	风口直径 (mm)	风口数目 (个)	风口角度 (°)	距炉底距离 (mm)
两 排		1	17	4	5	200
		2	17	4	15	500
三 排		1	18	4	5	200
		2	11	4	10	350
		3	11	4	15	500
中 央	1	高风速	9.1	6	0	50
		低风速	13.8	6		
	2	高风速	9.1	6	0	83.3
		低风速	13.8	6		
	3	高风速	9.1	6	0	116.6
		低风速	13.8	6		
	炉 顶	高风速	9.1	7	0	156.6
		低风速	13.8	7		

每排风口个数, 取侧三排各为 6 个, 顶排为 7 个, 则 $N = 3 \times 6 + 7 = 25$ 个。