



网 公 司
出版项目



循环流化床 锅炉灰渣废热回收 理论与技术

刘柏谦 谭培来 著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

电网公司
著作出版项目



循环流化床 锅炉灰渣废热回收 理论与技术

刘柏谦 谭培来 著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书以循环流化床锅炉灰渣废热回收利用的滚筒冷渣机为技术背景,介绍了高温粉体废热回收的理论与技术实现过程。特别阐述了滚筒冷渣机的研究和发展过程,滚筒冷渣机中可能发生的物理现象。本书分为五章:第一章介绍颗粒学基础知识和循环流化床锅炉灰渣;第二章介绍滚筒中的混合现象;第三章介绍滚筒中的灰渣传热过程;第四章介绍滚筒冷渣机研究和主要研究成果,包括如何提高传热系数,如何延长传入时间等关键技术;第五章讨论滚筒冷渣机的技术放大,主要介绍局部相似法在近年来的使用情况。

本书可供回转机械(回转窑、造粒机、干燥机、涂层机等)研究、设计、制造和使用的工程技术人员参考,也可作为高等院校相关专业高年级学生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

循环流化床锅炉灰渣废热回收理论与技术/刘柏谦,谭培来著. —北京:中国电力出版社,2017.12
ISBN 978-7-5198-1558-5

I. ①循… II. ①刘…②谭… III. ①循环流化床锅炉—炉渣—废热回收 IV. ①TK229.6

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第313606号

出版发行:中国电力出版社

地 址:北京市东城区北京站西街19号(邮政编码100005)

网 址:<http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑:周娟华(010-63412601)

责任校对:马 宁

装帧设计:左 铭

责任印制:杨晓东

印 刷:三河市航远印刷有限公司

版 次:2017年12月第1版

印 次:2017年12月北京第一次印刷

开 本:787mm×1092mm 16开本

印 张:12.75

字 数:270千字

定 价:58.00元



版 权 专 有 侵 权 必 究

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

前 言

循环流化床发电技术是唯一大规模产业化的洁净煤技术，尽管水煤浆、IGCC 等很多洁净煤技术都在发展。一般认为循环流化床锅炉的排渣热损失占锅炉燃料带入热量的 2% 左右，一些燃用高灰分燃料的机组，灰渣物理热损失能达到 10% 以上。这意味着 300MW 机组每年因此平均损失 1000 万~2000 万元燃料费，高时达到近亿元。回收这部分热量已成为几十年来循环流化床锅炉领域的重要研究方向。

滚筒冷渣机出现前，循环流化床锅炉普遍采用流化床冷渣器。由于煤种变化频繁，几年时间里几乎全部改成滚筒冷渣机。但滚筒冷渣机天生传热系数低，有文献认为不高于 $60\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{k})$ ，其原因可归咎于接触热阻的阻值太大。

本书介绍的滚筒冷渣机在工程传热学领域实现了以下进步。第一，将主导热阻从粉体接触热阻改变为粉体对流冲刷热阻，使总传热系数提高一个数量级。第二，给出了真实的传热动力，即滚筒冷渣机的传热动力是与金属表面接触的灰层温度与冷却水之间的温差。数值计算得到的床层平均温度并不是直接的传热动力，而是保持灰层与金属之间温差的一个概念。事实上，由于灰渣自身就是巨大的热阻，因此床层平均温度已经失去了指导滚筒设计的物理基础。第三，发现了灰渣床中存在巨大的温度梯度，这与一维传热模型假设颗粒床温度均匀是矛盾的。第四，指出了基本传热学公式（如 $Q=KF\Delta t$ ）不能直接用于滚筒冷渣机，因为很多基本传热学公式都是针对静止设备（如换热器）而不是针对旋转设备（如滚筒冷渣机）的。第五，换热器设计时采用的“对数平均温差”是一个积分过程得到计算公式。普通换热器，高温流体和低温流体的温度都是连续变化的，可以进行积分计算。但在滚筒冷渣机中，灰渣降温是阶段性出现的，积分计算无法进行（过程不连续）。本书也给出了作者采用的处理方法。

根据权威第三方机构进行的 17 次测试，平均传热系数为 $95\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ，表明所采用的基本理论和技术实现方法对于改善滚筒冷渣机的技术性能是有效的。

当然，这些进步还仅是初步的，更加有效的方法在理论进步后会连续出现。本书将作者团队在滚筒冷渣机领域从事的研究成果总结出来，抛砖引玉，以期在工程粉体传热学领域出现更大的进步。由于作者水平有限，难免敝帚自珍，挂一漏万，请读者不吝赐教。

著 者
2017 年 12 月

目 录

前言

1 颗粒、颗粒形貌和 CFB 锅炉灰渣颗粒	1
1.1 颗粒和颗粒状态	1
1.2 颗粒几何形貌及其描述方法	9
1.3 颗粒形貌特征与颗粒群粒径	12
1.4 颗粒粒径的描述	17
1.5 燃煤流化床中的大颗粒特性研究	18
1.6 密相粉体的摩擦	25
参考文献	29
2 滚筒中颗粒物混合的物理过程	30
2.1 滚筒中混合现象	30
2.2 滚筒中的颗粒混合与扩散	48
2.3 滚筒中颗粒轴向扩散	54
2.4 颗粒温度	61
2.5 滚筒中物料混合过程的其他研究	61
参考文献	97
3 滚筒冷渣机内的传热过程	100
3.1 滚筒内的传热过程	100
3.2 滚筒装置传热研究的主要结论	103
3.3 滚筒的物料处理量	111
3.4 灰渣表观传热系数	111
参考文献	125
4 滚筒冷渣机的研究方法和主要成果	128
4.1 循环流化床锅炉排渣的物理特性	131
4.2 圆柱形滚筒的研究	138
4.3 物料在圆柱形滚筒内的停留时间	140
4.4 物料的混合与轴向运动	155
4.5 NACT 滚筒冷渣机的研究和设计	162
参考文献	171

5 滚筒冷渣机的技术放大 177

5.1 滚筒冷渣机技术放大的理论背景 177

5.2 滚筒冷渣机传热过程描述和放大准则选取 187

5.3 滚筒冷渣机技术放大的局部相似方法 188

参考文献 191

后记 194

1 颗粒、颗粒形貌和 CFB 锅炉灰渣颗粒

1.1 颗粒和颗粒状态

滚筒冷渣机中的灰渣来自于循环流化床使用的宽筛分燃料，是经过循环流化床炉膛流化气体淘洗过的宽筛分灰渣颗粒。这种大颗粒占优的灰渣系统，不仅颗粒尺寸范围宽、形貌复杂，而且其在滚筒中的颗粒运动也十分复杂。但这仅仅是颗粒现象中的一个很小的系统。要想了解滚筒中的颗粒运动及其传热效果，则需要了解颗粒和颗粒状态。

1.1.1 颗粒物料及其状态分类

1. 颗粒物料

颗粒物料是指由许多离散颗粒状固体混合在一起组成的集合体。颗粒间的碰撞伴随着能量损失，这是与微观颗粒物相区别的宏观颗粒物料的典型特征。宏观颗粒不受分子热运动的影响，组成颗粒物料的颗粒必须足够大。因此，一般意义上，颗粒物料中的颗粒最小值在 $1\mu\text{m}$ 左右数量级。大颗粒物料可以是冰山、泥石流等自然系统，太阳系小行星等巨型物体也可看作是空间的宏观颗粒。

颗粒物料不仅在自然界中普遍存在，而且在工业领域经常处理的材料中位居第二位（第一位为水）。实际上，煤、砂子、化肥、各种各样的粮食等都是典型的工业颗粒物料。按物理性质可将颗粒物料分为不同种类，如颗粒尺寸小的粉末颗粒，由于尺寸小，颗粒间的黏性力明显，更容易悬浮在空气中，是一类特殊的颗粒物料。颗粒物料在农业、制药、能源生产等领域中的应用都很广泛。图 1-1 所示为各种各样的颗粒物料。

针对颗粒物料的研究至少可以追溯到哥伦布年代，哥伦布已经得到颗粒物料的摩擦定律。

从物理意义上看，颗粒物料与其他物质存在形态（气相、液相、固相等离子等相态）有不同的表现。在不同的平均颗粒动能下，颗粒物料可以具有类似固体、液体或者气体的特征（图 1-2），显示出特有的物理性质。颗粒物料受激（如振动或者流动）后会有较广泛的状态分布，并可以相互转化。受激颗粒物料本身可以认为是一种复杂系统。

（1）类固态颗粒。

当颗粒的平均能量低时，颗粒之间相对稳定，颗粒物料整体像固体一样堆积。通常，颗粒固体中的应力分布并不均匀，力沿着力链传播，力链是颗粒间相互作用力的网络（图 1-3）。

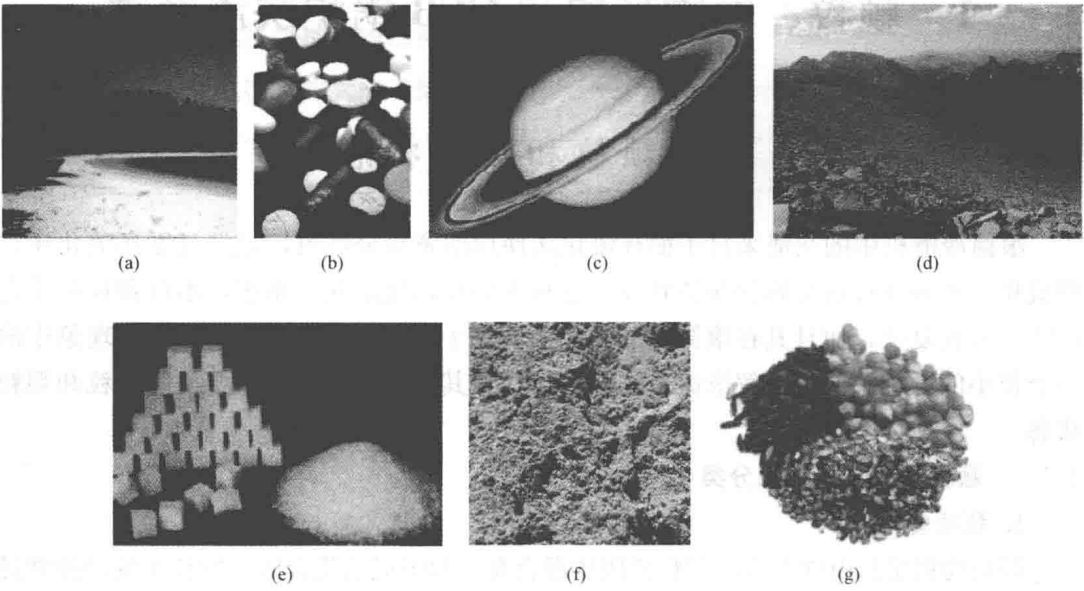


图 1-1 各种各样的颗粒物料

(a) 沙滩；(b) 药丸；(c) 太空中的星球；(d) 砂砾；(e) 食糖；
(f) 土壤；(g) 化学颗粒

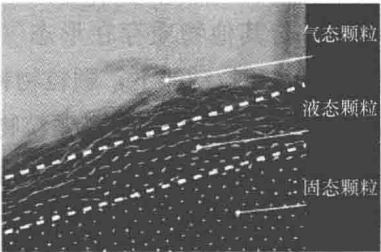
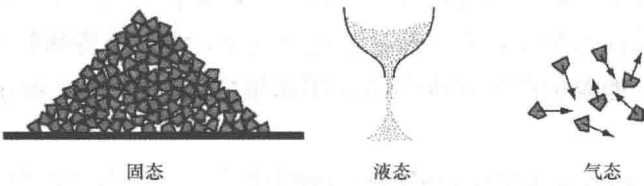


图 1-2 颗粒物料的三种状态

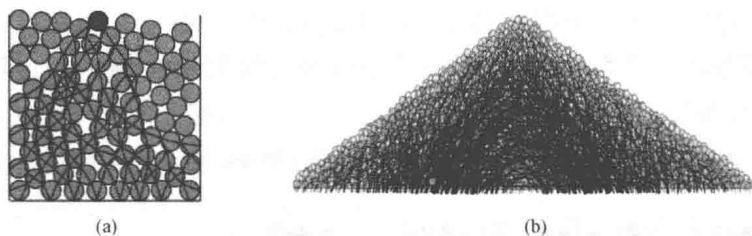


图 1-3 堆积颗粒及其力链分布

(a) 受限颗粒堆积状态；(b) 自由堆积状态

(2) 类液态颗粒。

颗粒物料受到持续的能量（如振动、气体、重力等作用下）作用时，能量驱动颗粒运动，颗粒之间的接触不再恒定不变，颗粒物料开始流动，出现与流体类似的状态。颗粒在自由流动时，显示出类似于牛顿流体的特征。颗粒物料在流动过程中能量耗散很快，限制了能量守恒方程在颗粒集合体上的应用。

流动颗粒又称为密相颗粒流。在这种状态下，固体物料的体积分数与最大体积分数相近。颗粒间的相互作用通过接触网络中的摩擦和接触实现。从现象学的观点看，颗粒流更像是一种具有独特性质的流体。为了更好地理解其流动形态，研究中需要应用不同的流动装置，图 1-4 列举了几种最常用的装置。这些装置一般可以分为两种：一种是局限在壁面间的流动装置，如剪切室和筒仓；另一种为自由表面流装置，如倾斜平板、滚筒和物料堆流动。Gdr Midi 详细总结了颗粒流动装置中的流动性性质，如速度剖面、密度剖面、速度波动等。近年来，通过与经典流体力学的近似，研究了许多复杂的颗粒物流动问题，如溃坝问题、颗粒表面喷涂类似的问题、混合实验、分离库艾特流装置、阻力或曳力问题和不稳定性问题。

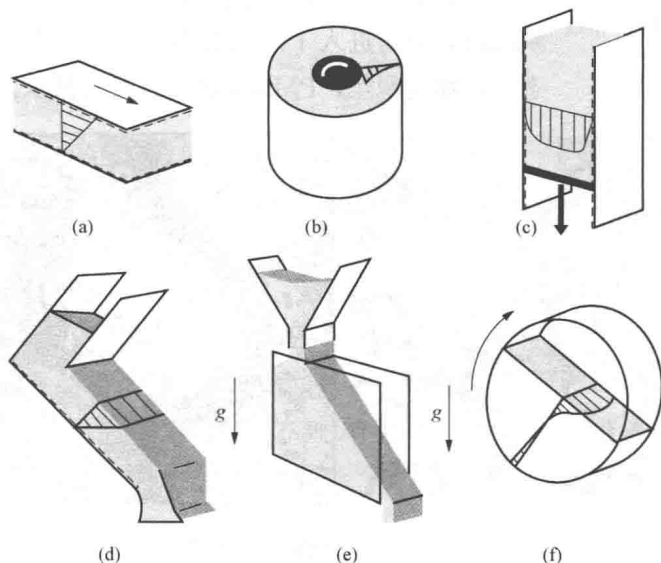


图 1-4 研究流态颗粒的装置

(a) 剪切室；(b) 库特室；(c) 垂直筒仓；(d) 倾斜平板；(e) 物料堆流动；(f) 滚筒

类液态颗粒物料特性与均质流体有如下几个方面的不同：

1) 剪切或振动会导致不同颗粒物料在空间和时间上分布不均匀，如巴西果效应、大小颗粒的分离等。

巴西果效应及滚筒中大小颗粒的分离如图 1-5 所示。

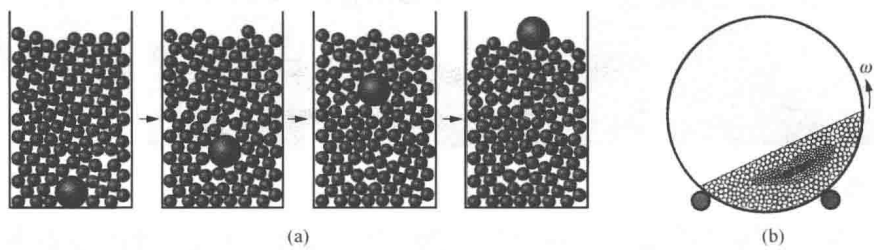


图 1-5 巴西果效应及滚筒中大小颗粒的分离

(a) 巴西果效应；(b) 滚筒中大小颗粒的分离

2) 颗粒依靠重力强制通过容器或储仓缩颈口时，容易导致颗粒的阻塞，如图 1-6 所示。

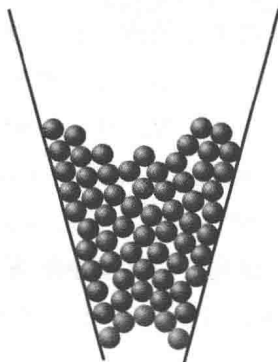


图 1-6 由于颗粒搭桥导致颗粒的堵塞

3) 紧密堆积的颗粒物料在流动前必须经历膨胀（或扩张）才能使颗粒群产生形变，出现颗粒间的运动。

4) 颗粒流动过程几乎不存在湍流。

5) 颗粒材料能够抵抗一定的剪切应力（虽然比较小）。

6) 颗粒物料一般是不均匀和各向异性的。

7) 颗粒物料同时还显示崩塌的性质，如沙堆的崩塌，自组织达到临界点。

(3) 类气态颗粒。

当驱动颗粒物料的能量足够大并且颗粒间的碰撞频率特别高时，物料进入了“气态”，如图 1-7 所示。最典型的气态颗粒物是飘尘，PM2.5 属于类气态颗粒。

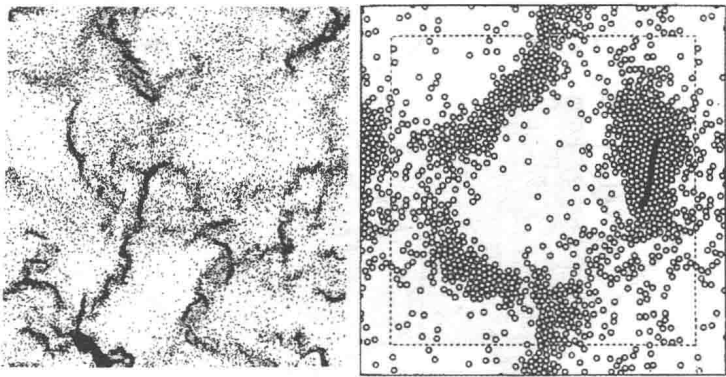


图 1-7 气态颗粒及其形态

与热力学温度定义类似，可以定义颗粒温度，其值等于颗粒速度波动值的方均根。

与一般气体不同的是,由于颗粒间的能量耗散,颗粒物料在运动中出现聚集的现象。这种聚集现象导致了一些有趣的现象。例如:在一个分区的容器中,当其剧烈振动超过一段时间后,里面的颗粒将会聚集于其中的一个分区而不像常见气体那样在所有区域中均匀分布,这种现象称为麦克斯韦颗粒妖。这种现象没有违背热力学原理,其主要原因是在这一过程中能量不断被耗散。

2. 状态间的关系

许多研究者采用 2D 数值模拟探索类液态颗粒与固态颗粒之间的相互转化。一个重要结果表明这种转化取决于恢复系数 e 。1687 年,牛顿定义了颗粒的恢复系数 (Coefficient of Restitution, CoR),其值等于颗粒碰撞后的相对速度 (相对于碰撞物体) 与碰撞前相对速度的比值,即

$$\text{CoR} = \frac{v_b - v_a}{u_b - u_a}$$

式中 v_a ——第一个物体碰撞后的速度;

v_b ——另一个物体碰撞后的速度;

u_a ——第一个物体碰撞前的速度;

u_b ——另一个物体碰撞前的速度。

当 $\text{CoR}=1$ 时,为弹性碰撞; $\text{CoR}<1$ 时,为非弹性碰撞。

研究者经常利用基于接触时间或力链长度的不同标准来区分运动颗粒状态,如类液态颗粒流动的接触时间及力链长度相对于气态颗粒而言都会增加。

接触时间和力链长度给出了相同的颗粒状态相图, ϕ - e 相图 (图 1-8), 其中, ϕ 为颗粒体积分数, e 是颗粒恢复系数。图中存在一个临界体积分数 ϕ_c , 颗粒体积分数大于 ϕ_c 时,颗粒物料不再连续流动 (类气态、类液态)。此时如果物料再流动,就会导致颗粒的变形。当颗粒恢复系数减小时,类液态颗粒的体积分数的分布范围会增加。图 1-8 所示的相图是建立在 2D 模拟基础上的, 3D 相图与其类似, 但其向类气态的转变会延迟, 主要是由于在三维中能量耗散会增加。

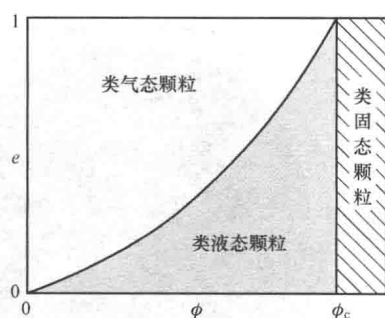


图 1-8 颗粒状态相图, 体积分数与恢复系数之间的关系

1.1.2 颗粒在滚筒中的运动

滚筒中的颗粒运动可分为若干种流动状态, 每种状态拥有独特的流动结构。根据滚筒转速 (或 Fr 数) 的不同, 大致分为六种流动结构, 如图 1-9 所示。

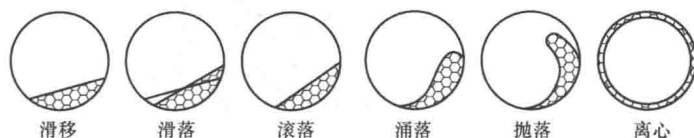


图 1-9 转筒横截面上床层物料的运动

Fr 数表示颗粒在滚筒中受到的离心力与重力之比，其表达式为

$$Fr = \frac{R\omega^2}{g}$$

式中 ω ——筒壁的旋转角速度；

R ——圆筒体半径；

g ——重力加速度。

物料的运动对应的 Fr 数见表 1-1。

表 1-1 物料的运动对应的 Fr 数

序号	流动状态	$Fr=R\omega^2/g$
1	滑移	$Fr<1.0\times10^{-5}$
2	滑落	$1.0\times10^{-5}<Fr<0.3\times10^{-3}$
3	滚落	$0.5\times10^{-3}<Fr<0.2\times10^{-1}$
4	涌落	$0.4\times10^{-1}<Fr<0.8\times10^{-1}$
5	抛落	$0.9\times10^{-1}<Fr<1$
6	离心	$Fr>1$

滚筒冷渣机与回转窑不同的是，回转窑通常在恒速下运行，而滚筒冷渣机可以根据锅炉的排渣量调整滚筒转速（图 1-10）。即锅炉排渣量提高，滚筒转速提高，此时灰渣冷却效果减弱。回转窑在低速（如 $R=0.8\text{m}$ ， $1\sim3\text{r/min}$ 情况下）下为滚落状态，在高速（如 $R=0.8\text{m}$ ， $4\sim6\text{r/min}$ ）下为涌落状态。滚筒转动为物料的上升提供了能量，当颗粒接近或达到物料的动态安息角时，在自身重力的作用下沿着料层斜面开始下落。颗

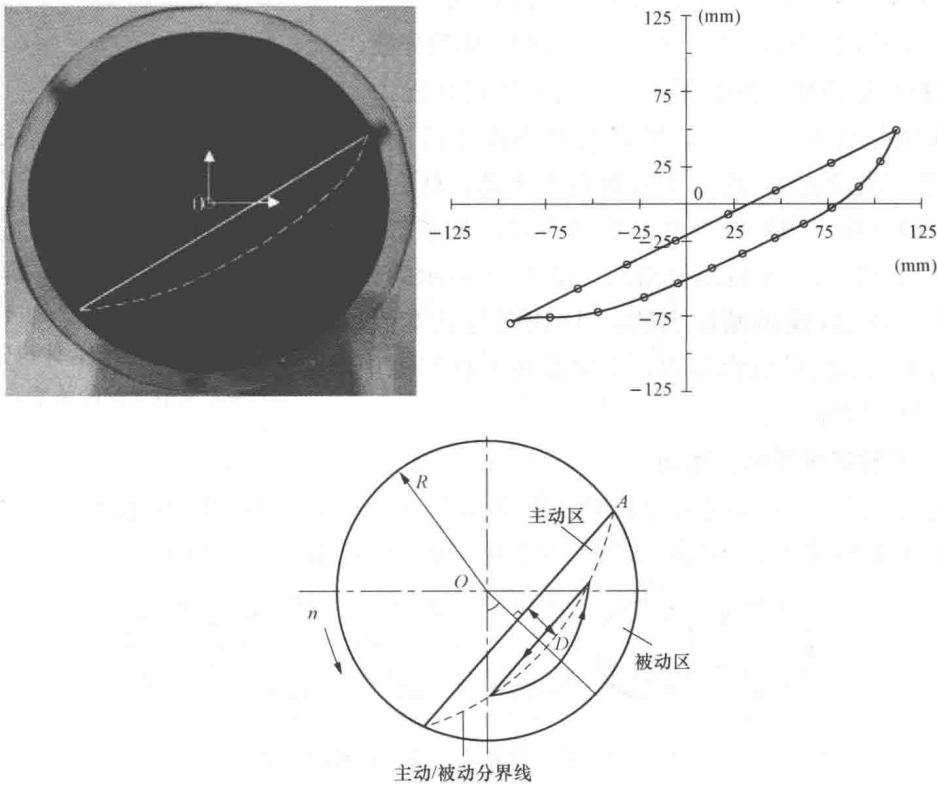


图 1-10 光筒中颗粒的运动形态及分区（滚筒半径±125mm）

粒在滚筒内的运动如图 1-10 所示,可分为主动区和被动区两个区域(也称被动层和主动层或活动区和静止区)。被动区中的颗粒随滚筒做圆周运动,颗粒间没有相互运动,相互间的距离保持不变;颗粒接近动态安息角时,在自身重力及上层运动颗粒的作用下开始偏离圆周运动的轨迹,进入主动区,沿斜面开始向下运动,此时颗粒间的位置时刻在变化。

按照前述的颗粒状态,滚筒冷渣机中的颗粒可分为三种:第一种是被动区中的类固态物料;第二种是主动区中的类液态物料;第三种是扬料板抛撒的物料颗粒中的某些类气态物料。

由以上分析可知:

(1) 颗粒在滚筒中的运动包括一种以上的形态。

(2) 颗粒在转动过程中不断循环往复,即颗粒不断重复着由主动区进入被动区,在被动区颗粒沿圆周曲线向上运动。主动区颗粒沿斜面向下运动,存在速度过渡区和核心区(图 1-10 中的 D)。

(3) 滚筒中的颗粒运动是分层的,被动区靠近壁面附近的颗粒往往更容易到达主动区的上表面。当其下滑时,虽然颗粒之间有混合,但在概率上更容易到达最低端,进而容易进入被动区距离壁面较近的区域。

根据实际滚筒尺寸和颗粒平均粒径,可以建立滚筒内颗粒运动的简单模型,或利用离散元方法(DEM)进行数值模拟,分析滚筒内的颗粒运动。

图 1-11 给出了没有扬料板滚筒中颗粒的运动状况。可以看到:

(1) 滚筒物料流动过程中,自由表面并不是一个严格的平面[图 1-11(a)]。

(2) 由图 1-11(b)及图 1-11(d)的对比可以看出,颗粒床主动区中颗粒快速运动,其颗粒体积份额(密度)小于被动区的颗粒体积份额。

(3) 被动区颗粒沿着滚筒做圆周运动,颗粒间没有相对运动。主动区颗粒沿着颗粒床表面向下运动,速度梯度较大[图 1-11(c)]。

(4) 被动区与主动区交界处,颗粒的运动速度为零,有明显的分界线。

工业滚筒为强化工作过程(传热或传质),采用扬料板技术增加物料颗粒与反应气体的接触或暴露时间,图 1-12 给出带有扬料板滚筒的工作过程。

如图 1-12 所示,滚筒加装了扬料板之后,部分颗粒由此到达滚筒的上部,连续洒落在颗粒床表面。这个过程中,滚筒中的物料混合受到加强。可以看出:

(1) 下落颗粒获得了比主动区更大的动能。

(2) 颗粒床核心区被大量物料包裹,不利于传热传质。

实际装置中,由扬料板带入空中的颗粒只占了颗粒总数的一部分。如果不增加强化过程的内部机构,扬料板的作用是有限的。

根据滚筒用途可以设计不同的滚筒结构,各种滚筒内部结构及物料流动如图 1-13 所示。图 1-13(a)是所谓的三分仓结构,分仓结构有助于增加滚筒强度,缩小核心区体积,增加传热面积。图 1-13(b)是旨在强化传热的对流受热面内部结构,颗粒被扬料板提升后直接抛撒在内部结构上,并直接滑落形成颗粒的冲刷传热。

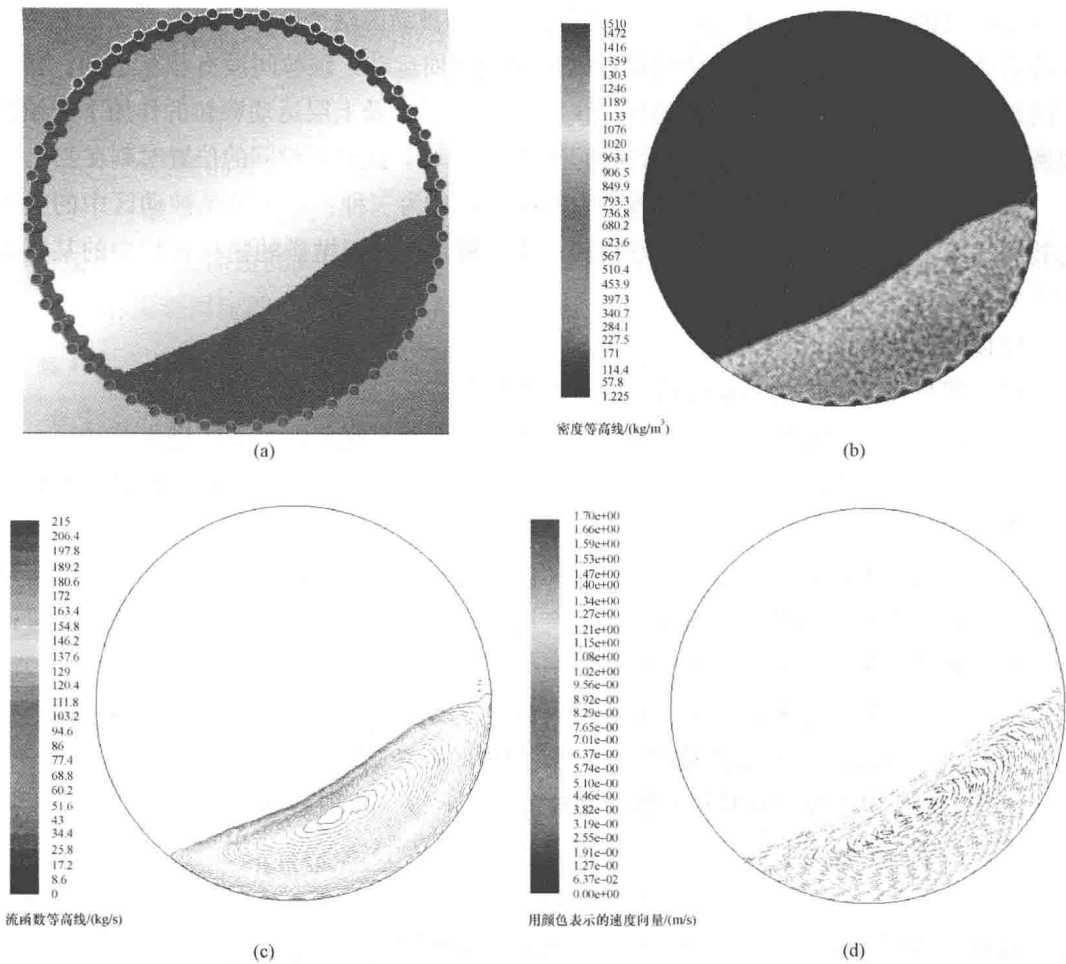


图 1-11 无扬料板滚筒中物料运动模拟及其参数分布

(a) 物料分布；(b) 密度分布；(c) 流函数等值线（流线）分布；(d) 速度矢量图

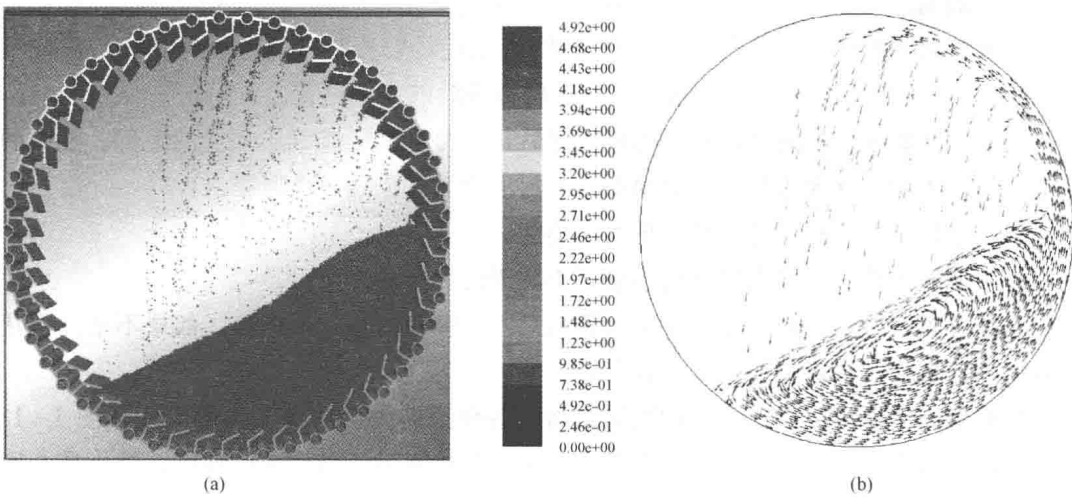


图 1-12 带扬料板滚筒中的颗粒流动

(a) 物料的分布；(b) 速度分布（速度矢量长度不变）

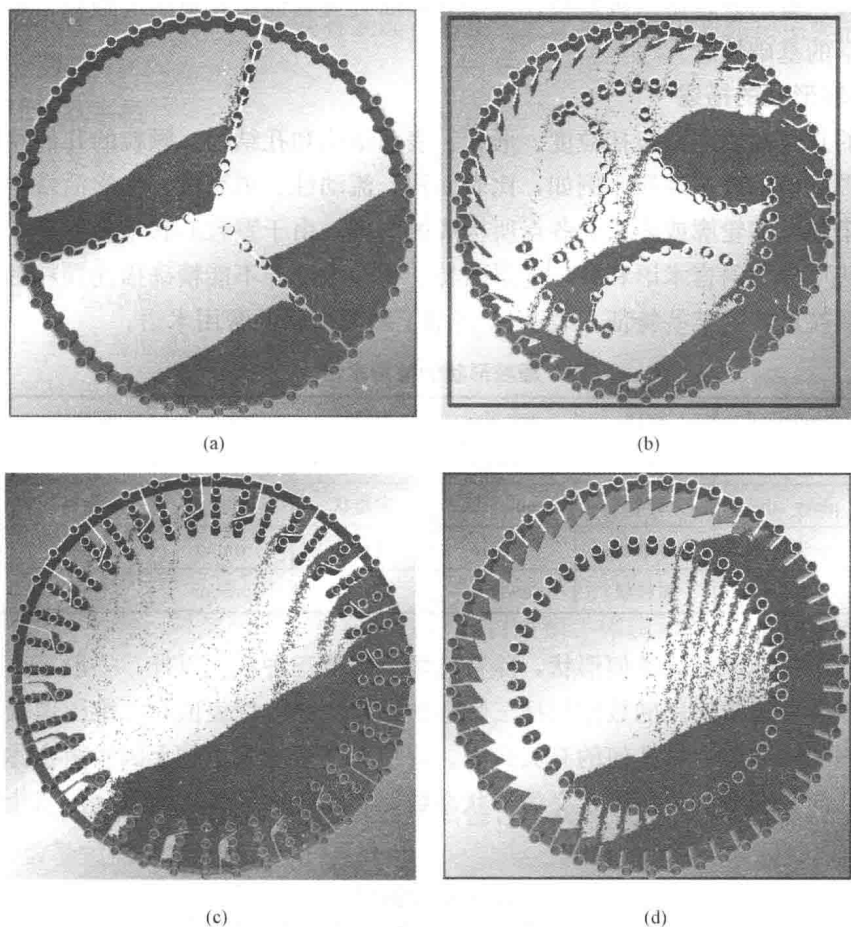


图 1-13 各种类型滚筒中颗粒的运动

(a) 三分仓滚筒剖面；(b) 强化对流的滚筒剖面 1；(c) 强化对流的滚筒剖面 2；(d) 强化对流的滚筒剖面 3

图 1-13 (c) 和图 1-13 (d) 分别是与扬料板配合的两种滚筒结构，旨在增加物料中埋管的热工性能（加热或冷却），既增加了传热面积，也提高了物料的扰动。

为了有利于颗粒物料与壁面的传热，除了考虑滚筒的传热面积、冷热介质的温差，在物料流动上也需要考虑以下几个方面：

- (1) 增强颗粒间的混合强度，有利于各处壁面上颗粒的传热。
- (2) 减小或消除核心区域。
- (3) 整体流通通道应保证物料的顺畅流动，更好地适应大灰渣流量下滚筒的高效运行。
- (4) 增加灰渣与滚筒水冷壁面的接触时间。

1.2 颗粒几何形貌及其描述方法

各种工业过程中广泛存在不同形状、尺寸、密度的颗粒物。从不同角度看，颗粒尺寸和形状都需要有明确的指标来描述。作为直接处理各种颗粒物的滚筒机械，有的处理

毫米级颗粒，有的处理微米级颗粒，很少有滚筒处理其他尺寸范围的颗粒。本节介绍颗粒和颗粒学的基础概念。

1.2.1 颗粒形状的描述

颗粒的几何性质主要包括粒度、形状、表面结构和孔结构。颗粒的几何性质直接影响或决定颗粒群的许多性质。例如，比表面积、流动性、填充性、化学活性等。颗粒形状是指一个颗粒的轮廓或表面上各点所构成的图像。由于颗粒形状千差万别，描述颗粒形状的方法可分为语言术语和数学术语两类。有些术语并不能精确描述颗粒形状，只能大致反映颗粒形状的某些特征。表 1-2 列举了颗粒形状的常用术语。

表 1-2 颗粒形状的常用术语

球形	spherical	粒状	granular	海绵状	sponge	聚集体	alomelate
立方体	cubical	棒状	rodlike	块状	block	中空体	hollow
片状	platy - disco	针状	needle - like	尖角状	sharp	粗糙	rough
柱状	sprismoidal	纤维状	fibrous	圆角状	round	光滑	smooth
鳞状	flaky	树枝状	dendritic	多孔	porous	毛绒的	fluffy

数学术语描述颗粒的几何形状，除特殊场合需要三种数据以外，一般至少需要两种数据及其组合。通常使用的数据包括三轴方向颗粒大小的代表值，二维图像投影轮廓线以及表面积和体积等立体几何的有关数据。习惯上将颗粒大小的无因次组合称为形状指数，立体几何各变量的关系则定义为形状系数，它们统称为形状因子。形状指标的分类见表 1-3。

表 1-3 形状指标的分类

名称	分类号	分类名称	基准几何形体	指标名称	数据种类
形状 指数	I		长方体	长短度、扁平度 Zingg 指数、柱状比	三轴径
	II	充满度	长方体	体积充满度、面积比	三轴径、投影面积
			矩形	面积充满度	体积
	III	平面立体几何指标	球体	球形度、圆形度表面指数	体积、表面积、投影面积 周长、各种当量直径
			圆形	圆角度	曲率半径
	IV	基于轮廓曲线的各种指数	无	各种代表径和平均径比、统计量 CAR 指数、形状述子	投影轮廓曲线各参数及各代表径
形状 系数	V		球体	体积、表面积、比表面积形状系数	立体几何各量
	IV	其他指标	椭圆	球形度	

1.2.2 形状系数

形状系数是表示颗粒形状与球形颗粒不相一致的程度，是根据颗粒的两个基本几何

特征（面积和体积）导出的，主要有表面积形状系数、体积形状系数和比表面积形状系数，它们分别为

$$\text{表面积形状系数} \quad \Phi_S = S/d^2 \quad (1-1)$$

$$\text{体积形状系数} \quad \Phi_V = V/d^3 \quad (1-2)$$

$$\text{比表面积形状系数} \quad \Phi_{SV} = S_V d = \Phi_S / \Phi_V \quad (1-3)$$

式中 d ——颗粒直径；

V ——颗粒体积；

S ——颗粒表面积；

S_V ——比表面积。

卡门（Carman）形状系数

$$\Phi_C = 6/S_V d_V = 6V/S d_V = d_{SV}/d_V \quad (1-4)$$

式中 d_{SV} ——比表面积当量径；

d_V ——等体积球当量径。

颗粒群形状系数：研究对象为颗粒群时，其表面积、体积和粒径均采用平均值，即

$$\Phi_S = \bar{S}/(\bar{d})^2 \quad (1-5)$$

$$\Phi_V = \bar{V}/(\bar{d})^3 \quad (1-6)$$

1.2.3 形状指数

形状指数根据使用的目的，先做出理想图像，将理想形状和实际形状的关系指数化，用各种数学式描述颗粒。

(1) 均齐度。颗粒两个外形尺寸的比值称为均齐度，即

$$\left. \begin{aligned} \text{长短度} = N = \text{长径} / \text{短径} &= \frac{L}{B} \\ \text{扁平度} = M = \text{短径} / \text{高度} &= \frac{B}{T} \end{aligned} \right\} \quad (1-7)$$

式中 L 、 B 、 T ——按 Heywood 规定：当放置在水平面上的单一颗粒处于稳定状态时，在相互正交的三轴方向测得的最大值；

T ——厚度（上下两平行平面所夹颗粒的距离）；

B ——短径（两竖直平行平面所夹颗粒的最小距离）；

L ——长径（在与短径正交方向上，两垂直平面所夹颗粒的距离）。

(2) Zingg 指数 F_Z 。颗粒长短度和扁平度之比，即

$$F_Z = N/M = LT/B^2 \quad (1-8)$$

该值又称为轮廓比。

(3) 球形度 φ_w 、 φ_K 。表示颗粒接近球体的程度。

Wadell 球形度

$$\varphi_w = \text{与颗粒体积相等的球体表面积} / \text{颗粒的表面积} = \frac{\pi d_V^2}{S} \quad (1-9)$$

Krumbein 球形度