

YIDONGCHUANG FANYINGQINEI FEIQIUXING KELI
LIUDONG TEXING DE MONI YANJIU

移动床反应器内非球形颗粒 流动特性的模拟研究

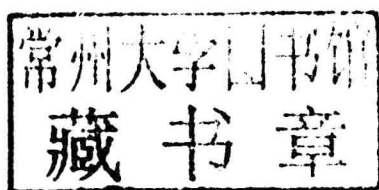
陶 贺 著



黄河水利出版社

移动床反应器内非球形颗粒 流动特性的模拟研究

陶 贺 著



黄河水利出版社
· 郑 州 ·

内 容 提 要

本书采用试验和数值模拟相结合的方法,系统地研究了活性焦脱硫脱硝反应器内非球形颗粒的流动特性,对脱硫脱硝反应器的设计和优化有一定的理论指导意义。建立了可视化移动床试验装置,应用快速摄像/图像处理技术和示踪颗粒技术,对移动床中球形及非球形颗粒的流动特性进行了试验研究,获得了不同形状颗粒在同一移动床中以及同种颗粒在不同移动床中的流型、下料率、平均速度分布及示踪颗粒浓度分布等流动特性,并研究了加装内构件后床内非球形颗粒的流动规律。在试验研究的基础上,建立了非球形颗粒的构建方法。分析了均质及混合非球形颗粒的碰撞机理,建立了非球形颗粒的受力及运动通用性模型。通过与试验结果比较,验证了模型的可靠性。研究了构成每种非球形颗粒的最佳球元数,在保证非球形颗粒模拟精度的前提下使计算时间最短。依据本书建立的三维均质及混合非球形颗粒的构建方法,进行非球形颗粒 DEM 模拟,研究了非球形颗粒在移动床内卸料及加料—卸料时的流动特性。获得了不同物性均质非球形颗粒在移动床中的流动规律,并且研究了异径/异形/异重混合非球形颗粒在移动床内的宏观及颗粒尺度上的流动特性。

图书在版编目(CIP)数据

移动床反应器内非球形颗粒流动特性的模拟研究/陶贺
著. —郑州:黄河水利出版社,2015.9
ISBN 978-7-5509-1221-2

I. ①移… II. ①陶… III. ①流化床反应器—颗粒—
流动特性—研究 IV. ①TQ051.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 214506 号

出 版 社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市顺河路黄委会综合楼 14 层

邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371-6626940、66020550、66028024、66022620(传真)

E-mail:hhsclbs@126.com

承印单位:河南承创印务有限公司

开本:787 mm × 1 092 mm 1/16

印张:13

字数:227 千字

印数:1—1 000

版次:2015 年 9 月第 1 版

印次:2015 年 9 月第 1 次印刷

定价:32.00 元

前 言

二氧化硫(SO_2)和氮氧化物(NO_x)是两种主要的大气污染物,严格控制其排放已成为我国面临的长期而艰巨的任务。活性焦移动床脱硫脱硝作为一种具有硫资源化功能的干法脱硫脱硝技术受到世界各国的高度重视。尽管国内外对活性焦移动床脱硫脱硝做了较多的研究,然而目前并未完全达到预期的效果,除活性焦制备和再生外,非球形颗粒移动床反应器的设计和优化是至今没有完全攻克的技术难点,迫切需要对其进行系统深入的研究。掌握移动床反应器中非球形颗粒的流动规律,对移动床反应器的设计、优化和运行控制,都具有重要的学术意义和工程参考价值。本书采用试验和数值模拟相结合的方法,系统地研究了活性焦脱硫脱硝移动床反应器内非球形颗粒的流动特性。

本书首先建立了一个可视化移动床试验装置,应用快速摄像/图像处理技术和示踪颗粒技术,对移动床中球形及非球形颗粒的流动特性进行了试验研究,获得了不同形状颗粒在同一移动床中以及同种颗粒在不同移动床中的流型、下料率、平均速度分布及示踪颗粒浓度分布等流动特性,并研究了加装内构件后床内颗粒流动特性的变化,掌握了移动床中非球形颗粒的流动规律。

在试验研究的基础上,建立了三维均质颗粒及混合非球形颗粒的构建方法,包括玉米形颗粒、椭球形颗粒、圆柱形颗粒以及玉米形椭球形混合颗粒、椭球形圆柱形混合颗粒、玉米形圆柱形混合颗粒等的构建方法。详细分析了均质颗粒及混合非球形颗粒的碰撞机理,通过分析得出了非球形颗粒之间的碰撞可以归结为球元-球元之间的碰撞和球元-颗粒之间的碰撞,建立了非球形颗粒的受力及运动通用性模型。通过与试验结果比较,验证了模型的可靠性。此外,还研究了构成每种非球形颗粒的最佳球元数,在保证非球形颗粒模拟精度的前提下使计算时间最短。

依据本书建立的三维均质颗粒及混合非球形颗粒的构建方法,进行非球形颗粒 DEM 直接数值模拟,研究了非球形颗粒(包括均质颗粒和异形/异重混合颗粒)在移动床内卸料时的流动特性。获得了不同物性(如颗粒-颗粒滑动摩擦系数、颗粒-壁面滑动摩擦系数、滚动摩擦系数、弹性恢复系数、颗粒密度、颗粒直径、颗粒形状等)的均质非球形颗粒在移动床中卸料时的质量流率、流型、压力分布、速度分布、空隙率、概率密度分布、颗粒分离等宏观及

颗粒尺度上的流动特性,以及同种颗粒在不同移动床内(如不同下料段倾角、不同出口尺寸等)卸料时的流动特性,并且研究了异径/异形/异重混合非球形颗粒在移动床内卸料时的宏观及颗粒尺度上的流动特性。

通过本书建立的非球形颗粒 DEM 直接数值模拟,研究了非球形颗粒(包括均质颗粒及异径/异形/异重混合颗粒)在移动床中连续加料-卸料时的流动特性。获得了不同形状均质非球形颗粒和混合非球形颗粒在移动床中连续加料-卸料时的流型、质量流率等宏观流动特性,以及空隙率、概率密度分布等颗粒尺度上的流动特性,系统地揭示了非球形颗粒在移动床中连续加料-卸料时的流动特性。

著 者

2015 年 6 月

主要符号表

英文符号

L	移动床的长度	$\vec{M}_p$	非球形颗粒所受合力矩
W	移动床的宽度	$\vec{x}_j$	颗粒元 j 的质心
H	移动床的高度	$\vec{X}_i$	非球形颗粒 i 的质心
θ	下料段倾角	e	弹性恢复系数
W_0	移动床出口宽度	γ_p	颗粒泊松比
h_i	内构件高度	γ_w	壁面泊松比
H_i	安装高度	E_p	颗粒纵向弹性模量
θ_i	内构件锥角	E_w	壁面纵向弹性模量
W_i	内构件出口宽度	G_p	颗粒横向弹性模量
M_d	下料率	G_w	壁面横向弹性模量
c	示踪颗粒浓度	r	滚动摩擦系数
m_p	非球形颗粒的质量	Δt	时间步长
$\vec{V}_p$	非球形颗粒的速度	E_k	颗粒的动能
$\vec{G}_p$	非球形颗粒的重力	KE_r	颗粒的转动动能

$\vec{F}_c$	非球形颗粒碰撞力	δ	颗粒的变形量
N	颗粒的碰撞次数	I_p	非球形颗粒的转动惯量
d_p	颗粒当量直径	$\vec{F}_{ce}$	颗粒元 j 上的所有碰撞力
u^*	无量纲水平速度	N_p	非球形颗粒的数量
v^*	无量纲垂直速度	pd	概率密度
N_e	组成非球形颗粒的颗粒元的数量	N_w	壁面的数量
x_i	任一时刻细颗粒/ 轻颗粒的质量分数	$\vec{F}_{ctij}$	碰撞力的切向分力
$\vec{F}_{enij}$	碰撞力的法向分力	S	混合颗粒的分离程度
k_n	法向弹性系数	x_f	细颗粒初始时的质量分数
k_t	切向弹性系数	x_m	轻颗粒初始时的质量分数

希腊字母

$\vec{\delta}_{nij}$	颗粒元法向变形量	Φ_D	颗粒直径比
$\vec{\delta}_{tij}$	颗粒元切向变形量	ε	局部空隙率
μ	颗粒 - 颗粒滑动摩擦系数	ε_{mean}	平均空隙率
ρ	颗粒密度	ρ_c	粗颗粒密度
μ_w	颗粒 - 壁面滑动摩擦系数	ρ_f	细颗粒密度

目 录

前 言

主要符号表

第1章 绪 论	(1)
1.1 研究背景及意义	(1)
1.2 国内外研究现状	(3)
1.3 本书的主要研究内容	(14)
1.4 本章小节	(15)
参考文献	(15)
第2章 非球形颗粒移动床内流动特性的试验研究	(24)
2.1 气固两相流动的试验研究	(25)
2.2 颗粒单相流动的试验研究	(29)
2.3 本章小结	(52)
参考文献	(53)
第3章 非球形颗粒的构建方法及其在三维空间受力和运动模型的建立	(56)
3.1 基于球元思想的非球形颗粒的构建方法	(57)
3.2 碰撞机理	(59)
3.3 基于球元思想的非球形颗粒的运动方程	(67)
3.4 离散单元法参数的确定	(70)
3.5 非球形颗粒的几种构建方式的比较以及试验验证	(72)
3.6 本章小结	(84)
参考文献	(84)
第4章 移动床内非球形颗粒卸料时流动特性的数值试验研究	(87)
4.1 模拟对象及条件	(88)
4.2 均质球形/非球形颗粒在移动床内卸料时的流动特性	(90)
4.3 异径混合非球形颗粒在移动床内卸料时的流动特性	(129)
4.4 异形混合非球形颗粒在移动床内卸料时的流动特性	(153)
4.5 异重混合非球形颗粒在移动床内卸料时的流动特性	(162)

4.6 本章小结	(168)
参考文献	(171)
第5章 移动床内非球形颗粒连续流动时流动特性的数值试验研究	(176)
5.1 模拟对象及条件	(176)
5.2 均质非球形颗粒移动床内连续流动时的流动特性	(178)
5.3 异形混合非球形颗粒移动床内连续流动时的流动特性	(182)
5.4 异径混合非球形颗粒移动床内连续流动时的流动特性	(189)
5.5 异重混合非球形颗粒移动床内连续流动时的流动特性	(195)
5.6 本章小结	(200)
参考文献	(200)

第1章 绪论

1.1 研究背景及意义

随着经济的快速发展和能源消费的急剧增加,我国 SO_2 和 NO_x 的排放量不断增加,已造成生态环境的破坏和人体健康的损害,2004 年造成的经济损失已高达 1 100 亿元,约占当年 GDP 的 3%。如果没有及时有力的措施干预,今后这种损失还将持续不断增加。《全国环境保护“十五”计划纲要》中明确提出 2005 年 SO_2 排放总量要比 2000 年降低 10%。在《中国 21 世纪初可持续发展行动纲要》中又提出 2010 年 SO_2 排放总量要比 2005 年再降低 10%,氮氧化物排放总量控制在 2000 年水平。按照环境容量和全面建设小康社会的基本环境要求,2020 年排放总量至少需要比 2010 年降低 25%,接近 SO_2 和 NO_x 的环境容量。随着人们对环境保护的重视及相关政策法规的出台,对烟气中 SO_2 、 NO_x 等污染物的控制也提出了更严格的要求。

活性焦脱硫脱硝是指在移动床反应器(吸附塔)内利用活性焦颗粒吸附烟气中的二氧化硫、氮氧化物等污染物,并将其氧化贮存在空隙内部的烟气净化技术。吸附过的活性焦颗粒经再生后,可以获得硫酸、液态二氧化硫、单质硫等产品^[1]。其工艺流程图如图 1-1 所示。目前,国内外应用的脱硫方法主要是烟气脱硫,烟气脱硫又分为湿法、半干法和干法工艺。活性焦脱硫属于干法脱硫技术,是很有前景的脱硫脱硝技术之一,其优点在于:可在一个设备上同时进行脱硫、脱硝及除尘,且没有二次污染;不需要工业用水(仅用于硫酸设备以及脱硫浓缩烟气洗净用水),特别适合于工业用水困难或缺乏地区,如我国东北、华北、西北等区域;烟气不需要再升温;排水量少,不需要专用排水处理设备;可回收工业用硫酸或硫黄; SO_x 存在时脱硫功能优先;运行成本低^[2]。

活性焦是一种综合强度(耐压、耐磨损、耐冲击)较高的吸附材料,具有较大的比表面积和丰富的孔结构,其脱硫脱硝性能取决于空隙结构和表面化学性质。在烟气净化过程中,活性焦不仅作为吸附剂,同时还是催化剂和催化剂载体。活性焦的比表面积、微孔面积与微孔孔容表现出与其 SO_2 、 NO_x 脱除能力相同的趋势。因此,如何制备高吸附性能的活性焦是提高脱硫脱硝效率的

一个十分关键的问题。对于活性焦的制备及其机理的探讨已经有大量相关的研究^[3-6],且活性焦的制备技术已经十分成熟,早在 20 世纪 80 年代,日本的三井公司就开始了烟气净化用活性焦的制备。20 世纪 90 年代初,我国宁夏银川活性炭厂与日本可乐丽公司合作,采用宁夏太西无烟煤为原料联合开发出脱硫用 9 mm 圆柱状活性焦,每年向日本出口数千吨;山西部分活性炭厂家采用日本三井重工或我国煤炭科学研究总院的技术,以山西本地烟煤为原料生产的脱硫脱硝用活性焦也销往日本。

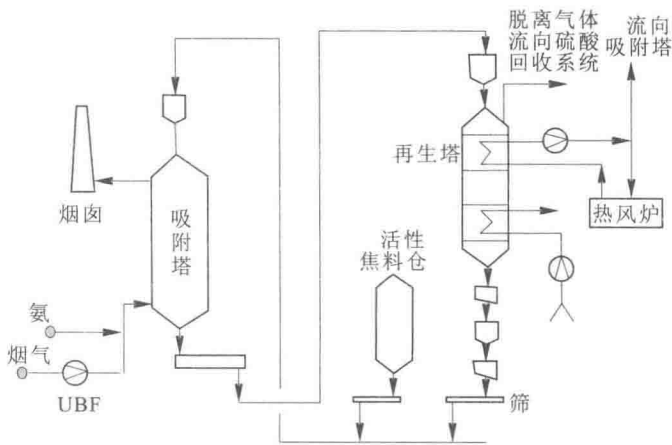


图 1-1 活性焦脱硫脱硝工艺流程图

但活性焦脱硫脱硝的效率并没有达到预期的理想效果。原因是影响活性焦脱硫脱硝效率的因素除活性焦本身的性能外,另一个十分重要的因素是活性焦脱硫脱硝移动床反应器的结构设计的优化问题,而移动床反应器内的颗粒流动是影响移动床结构设计的关键因素,如要求移动床内颗粒呈整体流的流动状态,从而使颗粒停留时间分布均匀,使得颗粒所承受的反应负荷均匀。因此,为了提高活性焦脱硫脱硝效率,需要对移动床内的颗粒流动特性进行深入的研究和探讨。

此外,移动床反应器也是众多化工反应器类型的一种,广泛地应用于冶金、石油化工和环保工程等行业中,如冶金行业的炼铁高炉和干熄炉是典型的气固逆流式移动床,石油烃加工领域内广泛使用的径向流移动床反应器和环保工程中使用的矩形脱硫塔和除尘器均是典型的错流移动床反应器。这些移动床反应器同样需要深入研究床内的颗粒流动特性,特别是非球形颗粒的流动特性,以进一步提高相关性能。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 活性焦脱硫脱硝技术

德国 Bergbau-Forschung 公司 (BF 公司) 于 1965 年最早开始研究活性焦脱除烟气中 SO_2 的工艺, 1974 ~ 1980 年进行了处理量为 $15 \text{ 万 m}^3/\text{h}$ 的示范试验, 发现该方法不仅可以脱除 SO_2 , 还可以在加入 NH_3 的情况下脱除氮氧化物。

1980 年, 美国的 Westvaco 公司开发了一种特殊的活性焦脱除烟气中二氧化硫的方法, 即活性焦在多层流化床内进行烟气中二氧化硫的脱除。该方法与众不同的地方是使用流化床而不是普遍采用的移动床。该方法虽然改善了烟气与活性焦的接触效率, 但是增加了设备投资、维修费用, 同时活性焦磨损严重, 用量大, 目前未见该工艺工业化报道。

1982 年, 日本的三井矿产公司 (MMC) 购得了 BF 公司的许可证, 于 1984 ~ 1986 年在日本大木田进行了处理量为 $3 \text{ 万 m}^3/\text{h}$ 的示范试验。

1990 年, 电源开发若松综合事业所建立了烟气处理量为 $1 \text{ 万 m}^3/\text{h}$ 的脱硫脱硝装置, 脱硫率达 90% 以上, 脱硝率达 80% 以上。

1995 年, 电源开发竹原火力发电厂建立了烟气处理量为 $116.3 \text{ 万 m}^3/\text{h}$ 的脱硫脱硝装置, 脱硝率达 80% 以上。

活性焦脱硫脱硝技术在国内起步较晚。1990 年, 四川豆坝电厂建成了 $5000 \text{ m}^3/\text{h}$ 的中试装置, 1997 年建成了 $10 \text{ 万 m}^3/\text{h}$ 的装置。2001 年, 南京电力自动化设备总厂与煤炭科学研究总院北京煤化所在国家“十五”863 科技计划的支持下合作研发适合于我国国情、具有自主知识产权的活性焦烟气净化技术。

1.2.2 颗粒流动特性的试验研究

移动床内的颗粒流动是颗粒流的一种, 由于颗粒流动十分缓慢, 且颗粒堆积十分密集, 因此移动床内的颗粒流动为慢速颗粒流, 与料斗、筒仓内的颗粒流动十分相似^[7-13]。颗粒流的试验研究非常重要, 试验提供了认识颗粒流动机理的基础, 也是检验数值模拟结果正确与否的必要途径。

Johanson 等 (1968)^[14] 设计了三角形的内构件, 并且研究了作用在内构件处的压力。

Tsunakawa 等(1975)^[15]研究了作用在内构件上的压力分布。

Tüzün 等(1985)^[16]通过试验研究了带有内构件的筒仓的壁面压力分布,并且比较了填料和稳定卸料时的壁面压力的差别。

Standish 等(1985)^[17,18]研究了旋转且壁面倾斜的料斗中颗粒流动时的分离情况,均匀的颗粒混合物加入到料斗中并形成堆,并有了最初的分离现象。在卸料时观察到,最初卸出的物料中细颗粒含量较多,随着卸料的进行,粗颗粒卸出的更多。这个结果与 Denburg 等(1964)^[19]的试验现象一致。

Moriyama 等(1989)^[20]通过在适当的高度插入钢管以减小筒仓主体和渐缩下料段交界处的压力波动。

Standish 等(1991)^[21]通过试验研究了煤颗粒堆积时的堆积密度和堆积角,结果表明,堆的大小、湿度以及颗粒尺寸分布都会对堆积密度和堆积角产生影响。

Tüzün 等(1992)^[22,23]在通过双光子 γ 射线层析技术确定床内颗粒混合均匀后考察了颗粒卸料时的分离情况,且只研究卸料而不是加料卸料连续进行时的分离情况。研究了不同尺寸比的非黏性、二元、三元混合物的颗粒分离情况,以及在下料段角度分别为 30° 和 90° 的料斗中的颗粒分离情况。结果表明,料斗中是整体流时,颗粒的分离程度较小;相反,颗粒流动为漏斗流时,分离情况较严重。且在初始卸料阶段卸出更多的细颗粒,同样在卸料最终阶段卸出最多的还是细颗粒。在此转变过程中存在卸料中细颗粒较少的情况,随后细颗粒增多,在此过程中,存在一个假的稳定现象,即暂时的卸料中细颗粒和粗颗粒的组成均衡的现象。

Strusch 等(1994)^[24]研究了无黏塑性颗粒在带有渐缩下料段的筒仓中的壁面及内构件应力分布。

Hoffmann 等(1995)^[25]研究了松散堆积和密实堆积情况下的床层空隙率分布,并建立了预测空隙率的关联式,关联式里考虑了四种因素,即平均颗粒尺寸、颗粒尺寸分布、颗粒密度和颗粒形状。

Hamel 等(1995)^[26]通过破坏性的试验,即用树脂填满床内空隙之后将床内堆积颗粒固化,并切成很薄的小片,再通过成像分析获得床内空隙率的分布。分析了不同堆积方式下床内空隙率的变化,并建立了关联式。结果表明,床内空隙率分布与颗粒尺寸、堆积方式、壁面距离有关。

Drescher 等(1995)^[27]研究了料斗中阻塞流动的拱形成的机理,并且给出了不形成拱的临界出口尺寸。

Sleppy 等(1996)^[28]通过试验研究了混合十分均匀的两种尺寸的糖粒混

合物分别在整体流和漏斗流系统中的分离状态,试验结果和 Arteaga 得到的结果十分一致,只是在中间的稳态阶段尺寸的时间较少或者不存在这一状态。这种分歧的原因可能是料斗的宽度或者高度不同引起的。在漏斗流中,从卸料中过量的细颗粒转变到过量的粗颗粒是类似正弦曲线的形式;而在整体流中分离遵守 Arteaga 等的模型,即颗粒尺寸比为 5.7 : 1 时,由于细颗粒含量大于极限含量,因此不能发生分离,而颗粒尺寸比为 2 : 1 时,可以发生分离。然而在漏斗流系统中,任意混合物都会发生分离,但是模型中考虑了哪种混合物分离程度较大。

Johanson (1996)^[29]通过试验研究了二元混合物的分离情况,结果表明平均颗粒尺寸对分离没有影响,而两种颗粒的直径比越大,颗粒弹性模量越小,分离越严重。

Zou 等(1996)^[30]通过试验研究了在松散堆积和密实堆积床内不同颗粒形状颗粒对堆积结构如空隙率的影响。结果表明,颗粒的形状对单一尺寸颗粒的床内空隙率有很大的影响。

Markley 等(1998)^[31]研究了料斗尺寸对颗粒分离效果的影响。结果表明,料斗尺寸的大小对颗粒分离程度的影响不大。

Mueth 等(1998)^[32]通过试验研究了随机堆放的单一尺寸颗粒在圆柱形容器中的压力分布,并建立了关联式,成功地预测了压力值。

Humby 等(1998)^[33]在 Beverloo 方程的基础上建立了两种预测下料率的关联式,一种可以通用于有分离和无分离的任何卸料,另一种是只能用于没有分离情况的卸料。

Samadani 等(1999)^[34]研究了二元玻璃珠混合物在透明的二维平底筒仓中的颗粒分离情况,其筒仓厚度是粗颗粒直径的 15 倍。通过对流动的观测,颗粒分离出现在自由表面变成 V 形之后,此时粗颗粒以较大的速度向中心处的出口流动。然而,大多数试验中的颗粒直径比为 2,还有更小的颗粒直径比(1.2),此时颗粒分离情况也会出现,细颗粒质量分数为 15%。

Savage 等(1999)^[35]的研究结果表明,混合颗粒的直径比在 1.2 或 1.3 的时候会产生分离。

Alexander 等(2000)^[36]研究了在两个料斗中重复卸料时的颗粒逐渐分离情况。先将一个料斗中填满颗粒混合物,然后将颗粒卸出到另一个相同尺寸的料斗中,再将上面的料斗移动到下面,将颗粒卸出到其中,如此反复进行。结果表明,经过几次卸料后,颗粒逐渐显示出分离状态,并且此分离状态与第一次卸料时的分离状态有很大差别,且分离程度与初始填料方法无关。

Brown 等(2000)^[37]通过压力计、位移测量装置测得了砂子、豌豆在矩形料斗中流动时产生的压力。结果表明壁面所受到的压力是不均匀的,角落处的压力很大,而中心处的压力相对较小,并且壁面的硬度会影响压力的分布。

Gorham 等(2000)^[38]应用高速摄影仪研究了 5 mm 的球形氧化铝颗粒碰撞到玻璃板或者氧化铝板的反弹情况。测量了碰撞前后的速度、角度和旋转情况。

Sharma 等(2001)^[39]通过试验测出了固定床内颗粒的空隙率,发现了床内空隙率和床高无关的现象,并通过 MRI(磁共振成像)法进行了验证。

Montillet 等(2001)^[40]通过树脂固化及成像技术研究了固定床内颗粒的空隙率分布,尤其是壁面、床顶部、底部对空隙率的影响。

Sederman 等(2001)^[41,42]通过 MRI 研究了松散堆积和密实堆积两种状况下,床径比分别为 9、14、19 时的颗粒内部空隙分布。结果表明,密实堆积下的颗粒间的空隙较松散堆积时变多、表面积变大、体积变大,因此导致床内整体空隙率变小。

Elaskar 等(2001)^[43]通过示踪颗粒法测得了高粱颗粒在倾斜板上流动时的速度分布。结果表明,板的摩擦力和倾斜角度对速度分布有很大的影响。

Endo 等(2002)^[44]通过 Jenike 理论对 90 种不同的物料进行研究,分析下料段角度和出口尺寸对流动指数的影响。结果表明,出口尺寸减小,流动指数增加,且下料段倾角增加,流动指数增加。并且建立了出口尺寸、下料段倾角和流动指数的关联式。

Ismail 等(2002)^[45,46]通过试验研究了三元球形混合物的床中整床空隙率和局部空隙率随堆积方式和床径的变化。结果表明,三元混合物的平均空隙率较二元混合物和单一尺寸颗粒的空隙率要小,且在床高和床的直径比小于 3 的时候,床高对平均空隙率影响很大。同样的,三元混合物的局部空隙率小于单一尺寸的局部空隙率。由于壁面效应,靠近壁面的局部空隙率波动很大。除了靠近壁面部分,轴向和径向的局部空隙率都很稳定。

Rotter 等(2002)^[47]通过试验研究了矩形筒仓中的压力分布,得出的结果是筒仓内压力分布很不均匀,角落里的压力很大,而中心处的压力较小。

Latham 等(2002)^[48]研究了岩石颗粒的堆积特性,文中着重研究了堆积颗粒空隙率的预测,并且指出了预测方程的应用范围。

To 等(2002)^[49]也研究了料斗内阻塞和出口尺寸的关系。

由长福等(2003)^[50]采用 PTV 技术(粒子追踪测速技术)对流化床顶部颗粒稀疏流动区进行了测量,得到了流化床顶部区域内颗粒的运动速度。

Klerk(2003)^[51]详细介绍了各种测空隙率的试验方法,如破坏性方法用熔化的蜡或者环氧树脂等填满床内空隙,或者非破坏性方法如X光摄像技术、MRI方法等。并通过试验研究了均一尺寸球形颗粒堆积而成的松散床层内的空隙率变化。结果表明,近壁面区域的空隙率成振幅不断减小的阻尼振荡形式。并且发现了在同一堆积模式(包括松散堆积和密实堆积)下存在多个稳定的堆积结构,尤其是在床径比较小的情况下。

Tang等(2004)^[52]、Pittenger等(2000)^[53]通过研究得出料斗的几何结构对分离也有很大的影响,下料段与垂直方向角度减小会减小颗粒的分离程度。

Fitzpatrick等(2004)^[54]研究了13种粉末物料的流动特性。通过试验测定了这些物料的尺寸、湿度、堆积密度等物性,并通过流动指数来区分物料是否容易流动。应用Jenike方法计算各种物料适合的料斗开口尺寸。

Chen等(2005)^[55,56]通过试验对大尺寸筒仓内的颗粒流动进行了研究。在试验中,将一些颗粒贴上无线电频率的标签,从而能够测出颗粒在筒仓内的停留时间,知道颗粒何时流出筒仓。

Zuriguel等(2005)^[57]通过试验观察到了通过重力卸料的谷物在卸料过程中产生阻塞的现象。当出口尺寸相对颗粒尺寸不是足够大的时候就会出现阻塞,文中确定了不产生阻塞的临界出口尺寸,并且发现颗粒的物性对阻塞的形成影响不大,但是颗粒的形状确定在很大程度上影响阻塞的形成。

Jasmina等(2005)^[58]研究了颗粒在圆柱形料斗中的流动情况,得出的结论是颗粒物性和出口尺寸对下料率有着重要的影响。文中建立了预测下料率的无量纲方程,预测结果与试验十分吻合。

Boateng等(2005)^[59]通过一个小的剪切装置测得了渗透率与时间的关系,结果表明,渗透率随着颗粒直径比和应力的增大而增大。

Tang等(2005)^[60]通过试验得出渗透率即颗粒的分离随着颗粒直径比的增加而增加,且随着颗粒平均尺寸的增加而增加,这和前人的研究有所不同。

Carson等(2004)^[61]通过研究表明在流动过程中混合颗粒的直径比要在2或3时才能产生分离。

Choi等(2005)^[62]通过高速摄影仪跟踪筒仓内的颗粒,得到了不同出口尺寸和下料段角度的准二维筒仓内的速度分布和下料率,并验证了连续介质模型预测结果的正确性。

Zhang等(2006)^[63]通过X射线法测得了当量直径为1.8 mm的圆柱形颗粒在圆柱形容容器内的空隙率。同时分析了整体和局部空隙率分布、径向函数分布和描述颗粒堆积方向的参数。结果表明,影响颗粒堆积结构的主要参数

是整体的堆积密度,在高堆积密度的床内,近壁面附近的空隙率和内部空隙率分布十分接近。

Mankoc 等(2007)^[64]分析了 Beverloo 方程不能用于出口尺寸很小的缺点,在 Beverloo 方程的基础上建立了适用范围更广的下料率预测方程。

Faqih 等(2007)^[65]通过重力位移流变仪测得了流动指数,从而研究粉末物料的流动特性。即物料的含湿量越大,流动指数越小;下料段的角度越大,流动指数越大。

程绪铎(2008)^[66]研究了在圆筒形容器中堆放的球形颗粒的压力和摩擦力,得到的结论是:颗粒间正压力、颗粒与容器间正压力、颗粒间摩擦力随深度的增加而增大;颗粒间正压力、颗粒与容器间正压力随内摩擦角的增大而减小,但颗粒间摩擦力、颗粒与容器底部间正压力随内摩擦角的增大而增大;在同一个深度,颗粒间正压力、颗粒与容器间正压力随圆筒形容器的直径增大而增大;颗粒间正压力、颗粒与容器间正压力随圆筒形容器壁摩擦系数的增大而减小。

Wu 等(2008)^[67]通过试验研究了移动床内颗粒物性、流速和移动床形状对流型的影响。结果表明,颗粒流速、在死区内放置挡板对流型没有任何影响,而颗粒的形状、尺寸和堆积角却严重影响着流型。减小颗粒尺寸或者增大球形度都可以使得颗粒的流动性变强并且混合能力更强。

Ahn 等(2008)^[68]通过试验研究了平底料斗内连续稳定流动颗粒的流动特性,尤其是用应力计测量了法向应力,并研究了法向应力和颗粒下料率的关系。结果发现会出现三种情况:在不发生堵塞时,下料率随着法向应力的增大而增大,这是第一种情况;随着法向应力的进一步增大,出现了第二种情况,下料率达到了最大值,随后发生堵塞;下料率随着法向应力的继续增大而减小,即第三种情况出现。

Coetzee 等(2009)^[69]通过剪切力试验和压应力试验测得了床内物料的内摩擦角和硬度等参数。试验表明,剪切力与颗粒的摩擦系数和硬度有关,而压应力只和颗粒的硬度有关。并将测得的参数应用于数值模拟,模拟结果与试验十分吻合。

Chou 等(2009)^[70]通过试验研究了一种减小死区的内构件,这种内构件是非等边三角形,且不是轴对称的,通过示踪粒子法可以看到这种内构件成功地减小了料斗内的死区。

Faqih 等(2010)^[71]探讨了大型的料斗装置中的颗粒流动,通过 GDR(重力位移流变仪)测量得到的流动指数与料斗中颗粒的流动息息相关。研究结