

中国矿业大学“211工程”三期创新人才培养项目资助

国家自然科学基金青年科学基金项目 (51204181)

高等学校博士学科点专项科研基金项目 (20110095120004)

中国博士后科学基金项目 (20110491485, 2013T60576)

中央高校基本科研业务费专项资金项目 (2011QNA10)

赵啦啦 著

三维离散元法模拟研究 振动筛分过程的

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

中国矿业大学“211 工程”三期创新人才培养项目资助

国家自然科学基金青年科学基金项目(51204181)

高等学校博士学科点专项科研基金项目(20110095120004)

中国博士后科学基金项目(20110491485,2013T60576)

中央高校基本科研业务费专项资金项目(2011QNA10)

振动筛分过程的三维离散元法模拟研究

赵啦啦 著

中国矿业大学出版社

内 容 简 介

筛分是实现颗粒物质按尺寸分离的主要技术之一,广泛应用于矿物加工等多个散体工业领域中。离散元法是目前研究颗粒物质力学行为的一种有效数值方法,已成功应用于岩土工程、矿物加工等散体工程领域。本书以煤炭颗粒在振动筛分过程中的基本运动规律为主线,介绍了颗粒离散元法基本原理、颗粒振动分层机理、筛面颗粒运动特性及透筛规律等,初步构建了颗粒物料振动筛分过程的三维离散元法模拟研究框架。

本书可供矿业、冶金、化工、建材、食品等领域从事颗粒物料分选等研究的科研人员以及高等院校有关专业的研究生和高年级本科生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

振动筛分过程的三维离散元法模拟研究 / 赵啦啦著.

徐州:中国矿业大学出版社,2013.9

ISBN 978-7-5646-1664-9

I. ①振… II. ①赵… III. ①颗粒物质—振动—筛分—数值方法 IV. ①O32

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 230469 号

书 名 振动筛分过程的三维离散元法模拟研究

著 者 赵啦啦

责任编辑 于世连 姜 华

出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司

(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)

营销热线 (0516)83885307 83884995

出版服务 (0516)83885767 83884920

网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com

印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司

开 本 787×1092 1/16 印张 8 字数 200 千字

版次印次 2013 年 9 月第 1 版 2013 年 9 月第 1 次印刷

定 价 38.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

煤炭的直接燃烧和不洁净利用造成了严重的环境污染和资源浪费。洁净煤技术是我国能源战略的主要发展方向之一,而筛分技术是其中的重要环节。发展高效低成本的筛分技术,从源头上提高煤炭质量,对节能减排、节运及企业增收等方面都有重要的意义。

筛分基础理论的研究是以筛分过程中筛面颗粒流的基本运动规律为理论基础。筛分过程是筛面颗粒间碰撞运动的综合体现,主要包括颗粒群的层析(分层偏析)和透筛两部分。因此,从颗粒尺度研究颗粒层析和筛面颗粒流的运动机理,将更有助于深入认识和理解筛分过程的基本机理,对丰富筛分理论具有重要的理论和实际意义。

离散元方法(discrete element method, 简称 DEM)是目前计算颗粒物质力学行为的一种重要数值方法。由于 DEM 模拟研究能够提供大量的颗粒动力学信息,如颗粒轨迹、各粒级颗粒体积浓度梯度、颗粒能量传递、颗粒流输运特性等,而利用当前物理试验技术很难获取这些参数。因此,DEM 已成为目前矿物加工和物料分选等工程研究领域广泛采用的一种数值方法。

本书基于三维离散元法对颗粒物质的振动分层和透筛过程进行了数值模拟研究,以期深入理解颗粒物质的分层机理、完善筛分理论和研制新型筛分设备提供理论依据。主要包括:振动参数对颗粒系统分层的影响规律,球形及非球形颗粒的分层机理,振动模式对分层过程的影响,振动参数对筛面颗粒的运动状态及透筛过程的影响规律,筛面几何参数、振动参数、振动模式对等厚筛分过程的影响规律,颗粒形状对筛分过程的影响机理等。

本书的研究工作得到了国家自然科学基金青年科学基金项目(51204181)、高等学校博士学科点专项科研基金项目(20110095120004)、中国博士后科学基金项目(20110491485, 2013T60576)、中央高校基本科研业务费专项资金项目(2011QNA10)的资助,在此一并致谢。

由于作者水平有限,难免出现不足之处,敬请读者批评指正。

著 者

2013 年 7 月于徐州

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 筛分理论研究现状	2
1.3 DEM 模拟研究及应用现状	10
1.4 主要研究内容	14
1.5 本章总结	15
第 2 章 DEM 基本原理及试验验证	16
2.1 DEM 基本原理	16
2.2 DEM 试验验证研究	25
2.3 本章总结	30
第 3 章 颗粒分层过程 DEM 模拟及物理机理分析	31
3.1 振动参数对颗粒分层过程的影响	31
3.2 颗粒分层过程的物理机理研究	34
3.3 不同振动模式下的颗粒分离机理分析	39
3.4 本章总结	44
第 4 章 直线振动筛分过程 DEM 模拟研究	46
4.1 直线振动筛面单颗粒运动过程的数值研究	46
4.2 直线振动筛面颗粒流 DEM 模拟	52
4.3 颗粒物料直线振动筛分过程 DEM 模拟研究	58
4.4 本章总结	63
第 5 章 圆和椭圆振动筛分过程 DEM 模拟研究	65
5.1 圆振动筛及其筛分过程 DEM 模拟研究	65
5.2 椭圆振动筛及其筛分过程 DEM 模拟研究	72
5.3 振动模式对颗粒筛分过程的影响	78
5.4 本章总结	83
第 6 章 等厚筛分过程 DEM 模拟研究	84
6.1 等厚筛分法及等厚筛分过程 DEM 模拟	84
6.2 几何参数对等厚筛分过程的影响	89

6.3	振动参数对等厚筛分过程的影响.....	95
6.4	振动模式对等厚筛分过程的影响.....	97
6.5	本章总结	100
第 7 章	颗粒形状对筛分过程的影响及矿物颗粒分形仿真算法研究.....	102
7.1	颗粒形状对筛分过程的影响	102
7.2	矿物颗粒的分形仿真算法研究	108
7.3	本章总结	111
第 8 章	总结.....	112
参考文献		114

第1章 绪 论

本书在总结颗粒物质分选理论的研究现状及存在问题的基础上,首先对三维离散元法的基本数学原理进行详细介绍,并通过对颗粒系统分层过程的试验研究验证离散元法的可靠性。然后,利用三维离散元法对振动激励下的颗粒分离过程进行数值模拟研究,对颗粒分离行为的物理机理进行深入分析;对振动筛分过程中筛面颗粒的运动行为及透筛规律进行系统的数值模拟研究,探索各振动模式及筛分条件下的颗粒运动和透筛规律,以期为筛分理论的研究和新型筛分设备的研制提供理论依据。

1.1 研究背景及意义

煤炭是我国的主要能源,占国家一次能源的70%左右。2011年国家煤炭总产量达到35.2亿t,产量稳居世界首位。目前,我国煤炭行业仍面临着以下两个重要问题。① 原煤质量差:高灰、高硫和难选煤约占半数,原煤的平均灰分约为25%(国际上其他主要产煤国的仅为15%),硫分在1.5%以上的中、高硫煤约占1/4。② 煤炭加工利用程度低:国际上其他主要产煤国的原煤洗选率为70%~80%,而我国原煤洗选率仅为32%左右;国内约有80%的煤炭作为动力煤直接用于燃烧,其热能转换率低,加上一些燃煤设备落后,从而造成了煤炭利用率低、环境污染重、煤炭资源浪费严重的问题。相关统计数据表明,我国燃煤排放的 SO_2 占其总排放量的87%, CO_2 占其总排放量的71%, NO_x 占其总排放量的67%,粉尘占其总排放量的60%。由此造成的酸雨区和污染区已达国土面积的40%以上,对生态环境和经济发展造成十分严重的破坏。因此,为了保证国家经济的可持续发展、提高煤炭的利用率、减少燃煤污染,发展洁净煤技术是我国能源战略的主要方向。

筛分是一种古老的粒度分类的方法,但到目前为止仍是最有效的物料粒度分类方法。筛分基本原理为:通过物料颗粒与筛孔尺寸进行比较,小于筛孔尺寸的颗粒落到筛下而成为筛下物,大于筛孔尺寸的颗粒则留在筛面上而成为筛上物。筛分不但在矿物加工中起着重要的作用,而且广泛应用于冶金、建材、化工、食品等工业部门。筛分是动力煤洗选的关键工艺环节之一,是煤炭有效分选的前提。筛选和洗选联合是我国动力煤的最佳加工工艺,是减轻大气污染的重要措施。对于矿物加工行业,如洗煤厂、选矿厂等,大批筛分机械担负着分级、脱水、脱泥、脱介等任务,并为实现煤炭资源的合理利用和保护环境以及为煤炭企业创造高的经济效益等方面发挥着重要的作用。因此,发展低成本的选煤技术,从源头上提高煤炭质量,对节能减排、企业增收等方面都有重要的意义。

颗粒物质的振动分离是一个非常复杂的过程,颗粒物质在振动激励的作用下可展现出尺寸分离运动、混合运动、对流运动及表面驻波等多种复杂的运动行为,并且容易受到筛分物料的性质(如粒度组成、颗粒形状及湿度等)因素的影响。颗粒物质的研究是当前国际上的一个研究热点,具有重要的基础科学意义和工程应用价值。对于煤炭的筛分这一具体工

程领域,当原煤的外在水分为6%~14%时,按13 mm以下进行干法筛分时就变得非常困难,但是煤炭的干法筛分仍是近年来筛分技术研究的重要课题。

颗粒物是自然界中广泛存在的一种重要物质,但目前还未有一套完整的理论能够很好地解释有关颗粒物质的力学行为。《Science》于2005年将颗粒物与湍流并列称为100个科学难题之一,《Nature》也于近年发表了多篇有关颗粒物力学行为研究的文章,可见颗粒物质的研究正逐渐成为一门科学。同时,颗粒物质的筛分理论研究也得到了国际研究者的重视,在美国的《Coal Preparation》、《Minerals Engineering》,英国的《Filtration & Separation》、《Minerals Processing》及荷兰的《Powder Technology》等国际期刊,每年都有大量关于颗粒物料筛分理论研究的文章发表。

筛分理论的研究与筛分设备的发展是相互促进的,研究筛分理论对现有设备的改进和研制新型高效的筛分设备都具有重要的意义,而筛分理论的研究又以筛分过程中的基本规律为理论基础。然而,传统的筛分理论都是从宏观上定性地叙述推理,而无法进行微观的精确试验,尚不能对筛分过程做出圆满的解释,已不可能解决当前所面临的物料筛分问题。

筛分试验是进行筛分理论和技术研究的基础,传统的筛分试验需要消耗大量的人力、物力和财力,并且容易受到客观条件的限制而影响试验效果。然而,借助于计算机技术的数值模拟研究具有试验成本低,不受场地、时间和次数的限制,可以对复杂试验过程进行真实再现和模拟复杂物理现象等优点。因此,为了在节约资金、减少能耗的前提下进行方便有效的筛分试验,需要对筛分过程的数值模拟技术进行研究,从而实现科学试验过程的可视化。

离散元法(discrete element method,简称为DEM,下同)是20世纪70年代发展起来的用于计算散体介质系统力学行为的一种数值方法。该方法在岩土工程、采矿工程、矿物加工、物料分选等散体工程技术领域中得到了成功的应用,并迅速发展成为一个多学科交叉的研究领域,其核心是帮助人们理解离散颗粒物质的微观及宏观特性之间的关系。

近年来,离散元法已在国际上得到广泛应用,但仅有少数研究者利用离散元法对物料的筛分过程进行过较深入的数值模拟研究,而国内还尚未见到利用三维离散元法对筛分过程进行深入的数值模拟研究的报导。因此,作者利用三维离散元法对振动筛面上颗粒群的筛分过程进行了模拟研究,分析了振幅、振动强度、振动方向角及筛面倾角等振动参数以及入料粒度分布等因素对颗粒群的速度和筛分效率的影响规律,为深入理解和进一步揭示振动筛面上颗粒群的运动规律和筛分机理,以及为完善颗粒物料的筛分理论、提出新筛分理论和研制新型筛分设备提供了理论依据。

1.2 筛分理论研究现状

筛分理论指导和推动着筛分技术及筛分设备的发展,为充分掌握筛分理论研究的现状及瓶颈问题,本节对筛分理论和技术研究现状进行了简单的回顾和总结,提炼出了筛分理论的研究重点和难点问题,找出了本书研究的切入点,以期丰富筛分理论和提出新筛分理论做出有益的工作。

1.2.1 筛面颗粒的运动理论

物料颗粒的运动是实现物料筛分的前提,物料在筛面上的运动形式对筛分机工艺过程的

质量有着决定性的影响。物料运动不但影响着物料的松散和分层状况,而且还影响颗粒的透筛概率。因此,研究筛分物料的运动规律是筛分理论的重要内容。通过研究物料的运动规律,人们认识物料在筛面上的运动机理,以寻求筛分机的最佳运动学参数。这样对保证各种工艺过程的有效进行、提高筛分效率、减低能耗、延长筛分机及其筛面的寿命都具有重要的意义。

颗粒群在筛面上的运动和筛分,一般分为静止、松散、分层和透筛四个过程。当颗粒群以一定速度冲击筛面后,处于短暂的静止状态以获取和积蓄能量,准备下一次的抛射运动。在振动筛面的周期力作用下,颗粒群不断被抛掷。物料被抛起后,使颗粒处于松散状态,有利于大小颗粒之间的分层。分层后小颗粒到达料层底部,与筛面接触并进行尺寸比较,比筛孔尺寸小的颗粒则发生透筛形成筛下物。另外,颗粒群在振动筛分运动过程中,还受到颗粒形状以及颗粒间的水分等物理化学性质的影响。因此,由多粒级组成的颗粒群在振动筛面上的运动非常复杂,颗粒间的碰撞作用使得颗粒运动轨迹具有很大的随机性。

目前,有关筛面物料颗粒运动理论的研究大多是将筛面物料的复杂运动简化为单颗粒的运动,而关于颗粒群运动研究的相关报导较为少见。研究筛面颗粒运动的代表性的理论有定常运动理论和混沌运动理论。

(1) 定常运动理论。

定常运动理论假设颗粒同筛面间的碰撞是完全塑性碰撞,忽略了颗粒在筛面上的滚动现象,并以筛面颗粒的受力分析为基础,研究颗粒在筛面上的运动状态,所得到的颗粒运动方程为线性方程,并指出颗粒的运动状态取决于抛掷强度 K_v 。正常筛分时 $K_v > 1$,颗粒处于跳动状态,如图 1-1 所示。当抛掷强度变化时,颗粒可以出现相对静止、滑动和跳动运动状态,认为抛掷强度是决定筛面颗粒运动状态的唯一因素。

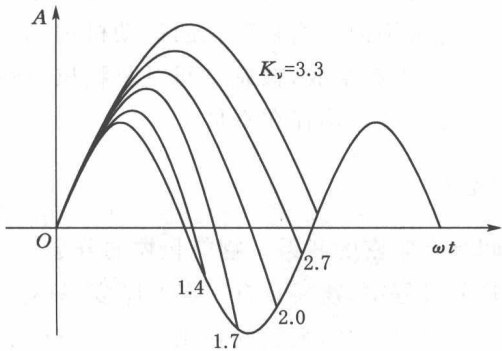


图 1-1 筛面物料颗粒的抛掷运动状态

由于定常运动理论忽略了颗粒与筛面间的碰撞作用,因此与实际筛分过程之间的差别较大。

(2) 混沌运动理论。

混沌运动理论将颗粒与筛面间的碰撞视为弹塑性碰撞,并认为筛面颗粒的运动是一个极为复杂的随机过程,对定常运动理论进行了有益修正。

该理论代表性的研究如下:

孙刚应用混沌分析方法对物料在强化筛中的运动规律进行了数值计算,发现当碰撞恢复系数为 0.6 时,颗粒具有混沌运动的趋势。

尹守仁应用非线性振动的分叉和混沌运动理论,分析了颗粒在筛面上的周期分叉、倍周期分叉和混沌运动,在理论上解释了筛面上大颗粒比小颗粒跳得高的原因。

刘初升利用振动筛与颗粒之间的运动学模型,导出了颗粒运动的周期性条件,并得出了在颗粒的碰撞恢复系数大于0小于1时,颗粒运动经过周期运动、概周期运动、锁相进入混沌运动,振动筛的实际工作状态下颗粒运动不存在周期运动的结论;讨论了颗粒的混沌运动状态同分层、透筛之间的关系。

陆金新进一步研究了单颗粒在筛面上运动的非线性特性,揭示了单颗粒运动随振动强度的变化再经过周期分叉和倍周期分叉向混沌运动的演化过程,如图 1-2 所示(弹性恢复系数 e 为 0.5)。

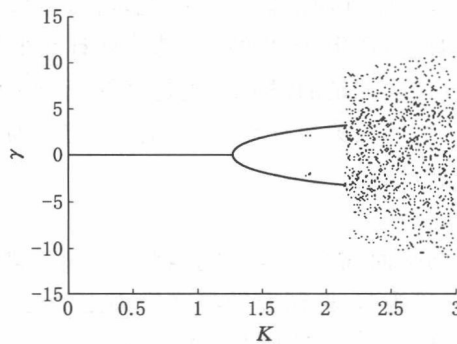


图 1-2 筛面颗粒运动分叉图

需要注意的是,目前无论是定常运动理论还是混沌运动理论均是以筛面单颗粒运动为基本研究对象,得出的结论对理解筛面上物料颗粒的运动机理具有一定的指导性作用。但由于实际筛分中的物料由大量的颗粒组成,颗粒之间以及颗粒与筛面之间地存在着广泛而复杂的碰撞作用,因此这两种运动理论均存在不足。

1.2.2 颗粒物质的分层理论

颗粒的分层与筛分之间具有紧密的联系。物料颗粒的分层行为在矿物加工领域是一个重要的研究内容。在实际筛分过程中,物料具有一定的厚度,只有与筛面接触的颗粒才能与筛孔进行尺寸比较,而混合于颗粒群中的细粒物料则必须通过分层后才能实现透筛。物料的分层与筛分相共存,并且分层是物料筛分的前提,在筛分中起着重要的作用。只有完善的分层,细粒物料才能接触筛面,才能取得好的筛分效果。因此,从理论上搞清物料分层的原因及分层规律具有重要的实际意义,对揭示颗粒分层机理和丰富筛分理论都具有重要的理论指导作用。

颗粒物质是由大量离散固体颗粒构成的集合体,是与流体、固体并存于自然界中的一种重要物质形态。在外部周期力作用下,颗粒可展现出尺寸分离、对流运动、表面驻波、拱起等许多复杂的集体行为。由于颗粒物质的普遍性及应用的广泛性,并且到目前为止还没有一套完整的理论能够准确表述颗粒系统的复杂行为。因此,颗粒系统的研究成为当前国际上的一个研究热点,具有重要的基础科学意义和工程应用价值。

有关颗粒系统分层的研究贯穿于整个颗粒物质流的研究。在颗粒振动系统的早期研究

中,Brown 最早对煤块运输过程中的振动冲击现象进行了较深入的研究,并认为是由于大颗粒周围的局部填充状态的不同而导致其自由度不同,从而使大颗粒上升,同时认为忽略颗粒的接触力时,密度较大的颗粒能够发生下沉现象。Williams 进行了系统的试验研究,定性地考察了振动频率对振动床上单个球形颗粒运动状态的影响规律,指出了颗粒的尺寸、密度、形状及弹性等性质均可促使分层的发生,并描述了轨迹分层、由振动引起的细颗粒渗透和大颗粒上升三种分层机制。

之后,大量研究者逐渐投入到颗粒系统分层机理的研究中,并通过运用直接可视化及磁共振成像等试验技术、分子动力学及蒙特卡洛等数值模拟方法以及分子运动学理论分析等多种手段,针对颗粒分层的深层机理及影响分层过程的颗粒尺寸、密度、弹性、摩擦力、输入能量性质、边界条件、空隙间空气及颗粒间水分等因素的影响规律展开了系统深入的研究。随着试验技术的发展和研究的深入,各国学者们已探索并发展了空隙填充、静态压缩力、对流、浓缩、热扩散、能量非均匀分布、摩擦力等多种物理机制对颗粒系统的复杂运动行为进行了分析和解释。

目前,针对颗粒分层行为的研究多采用球形颗粒,忽略了颗粒形状对分层过程的影响。Cleary 基于离散元法定量地探索了颗粒形状对卸料过程以及对颗粒剪切流的速度、体积分数、颗粒温度及剪切力分布的影响规律,得出颗粒形状能够显著降低卸料速率以及增加颗粒发生剪切流动的难度等结论。Fraige 等利用试验及离散元法研究了球形颗粒和立方体颗粒的卸料过程,并发现利用立方体颗粒模型得到的模拟结果与试验结果更接近。由此可见,颗粒形状对其运动学行为有显著的影响。

另外,已有的研究大多针对振幅、振动频率等外在因素对分层的影响,而粒度比等内在因素对物料分层过程影响的研究较少。针对颗粒系统的分离现象,目前已有的研究大都是在垂直直线振动条件下进行的。相关研究发现,在不同的振动条件下颗粒系统呈现出的巴西果、反巴西果、三明治等多种分离构型,如图 1-3 所示。

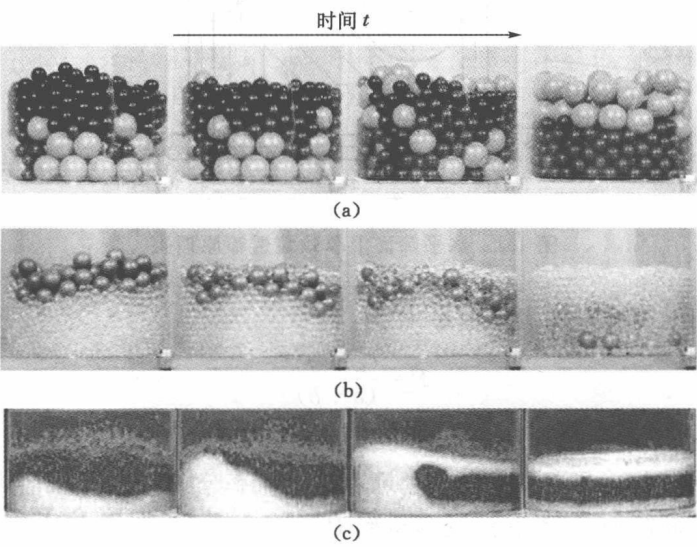


图 1-3 颗粒系统的分离构型

(a) 巴西果构型;(b) 反巴西果构型;(c) 三明治构型

目前,已有部分研究者注意到了振动模式对颗粒分离的影响,并对在不同的振动模式下的颗粒分离行为及物理机理进行了研究。国外的 Cleary、Mullin 和国内的周迪文、郭长睿等研究者对水平直线振动模式下的颗粒分离机理进行了研究。Tennakon 等研究者对倾斜方向直线振动模式下的颗粒静态堆积和对流等特殊现象进行了数值模拟及物理分析。德国的 Schnauhz、aumître 等研究者对水平圆振动模式下的颗粒分离规律进行了深入研究,并发现了水平圆振动模式下的巴西果、反巴西果、聚集等特有现象。显然,在不同模式的振动激励下,颗粒系统表现出了不同的分离特征,而目前大部分研究者却忽略了振动模式的影响。因此,对颗粒系统进行多种振动模式下的分离行为进行研究具有重要的理论意义。

针对上述问题,本书基于三维离散元法对球形及胶囊形颗粒在垂直振动作用下的分层过程进行了数值模拟,对分层过程中的颗粒间的相互作用力及能量交换过程进行了分析,讨论了颗粒的粒度比对分层的影响;对球形颗粒系统在直线、圆和椭圆振动模式下的分离过程进行了数值模拟,对各振动模式下颗粒分离机理进行了理论分析,为深入理解和进一步完善颗粒分离理论提供了理论依据。

1.2.3 颗粒透筛概率模型

(1) 单颗粒透筛概率。

筛分过程是通过颗粒与筛孔的尺寸比较来实现的,因此筛分的基本原理为物料颗粒的透筛概率理论。图 1-4 所示为单颗粒物料垂直投向水平筛面时的透筛原理图,最早是由 Gaudin 和 Taggart 提出的。

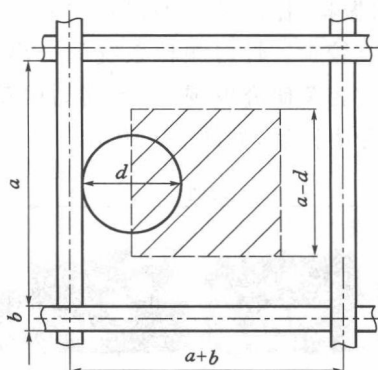


图 1-4 水平筛面上单颗粒透筛原理图

根据该模型可求得颗粒的透筛概率 P 为:

$$P = \frac{(a-d)^2}{(a+b)^2} \quad (1-1)$$

式中, a 为筛孔尺寸; b 为筛丝直径; d 为颗粒直径。

随后, Mogensen 提出了更加精确的单颗粒透筛概率公式(式 1-2)。如图 1-5 所示,当球形颗粒倾斜投向倾斜筛面时,颗粒的透筛概率 P 为:

$$P = \frac{(a - \varphi d - d) [(a+b) \cos(\alpha + \delta) - (1 - \varphi)b - d]}{(a+b)^2 \cos(\alpha + \delta)} \quad (1-2)$$

式中, α 为筛面倾角; δ 为物料下落时对筛面的相对运动方向线与垂直线的夹角; φ 为考虑物

料与筛丝内侧碰撞后仍能落入筛孔的系数。

φ 值计算公式为：

$$\varphi=e^{-2.84\left(\frac{d}{a}+0.0255\right)} \tag{1-3}$$

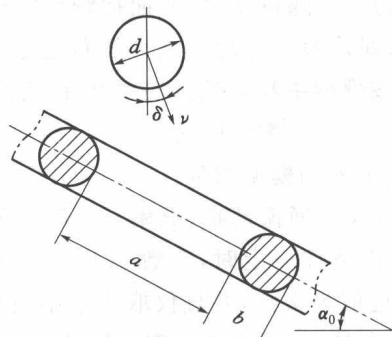


图 1-5 倾斜筛面上单颗粒透筛原理图

同时,Mogensen 还研究了物料在多层筛面上的透筛过程(如图 1-6 所示),并给出了物料透过第 k 层筛面的颗粒量 q 的计算公式(式 1-4)。

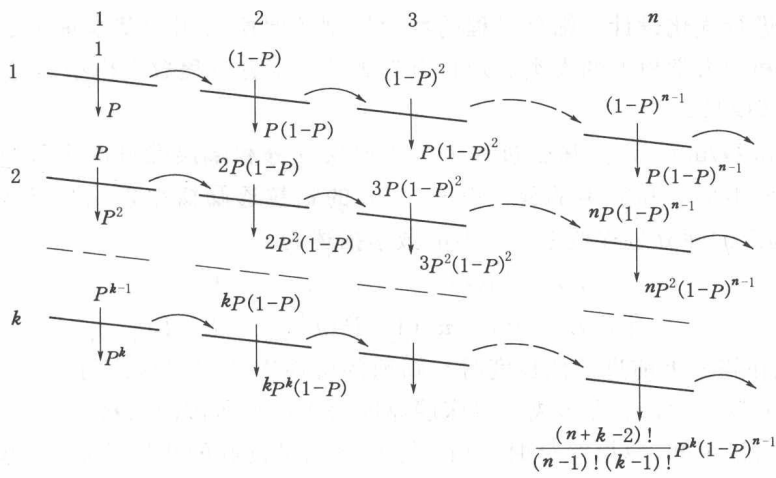


图 1-6 颗粒群在等透筛概率筛面上的筛分过程

$$q=\frac{(n+k-2)!}{(n-1)!(k-1)!}P^k(1-P)^{n-1} \tag{1-4}$$

在单颗粒透筛概率研究的基础上,Schultz 和 Tippin 推导出了整个筛面长度下筛下物的分配方程(式 1-5)。

$$\sum q(k)=\sum_{n=1}^m \frac{(n+k-2)!}{(n-1)!(k-1)!}P^k(1-P)^{n-1} \tag{1-5}$$

之后,Brereton T 全面总结了概率筛分理论,并提出用分离粒度 d_p 和可能偏差 E_p 来评定概率筛分机的筛分质量。闻邦椿对颗粒粒度相同的颗粒群进行透筛概率分析后,得出了物料透过不同倾角筛面的透筛总概率。

(2) 颗粒群透筛概率理论。

为考察颗粒群状态的颗粒透筛概率,陈清如根据试验室模拟概率筛分的试验结果,指出概率筛分时,沿料流方向的筛面各段物料透筛概率基本不变。赵跃民则采用概率统计学的方法对物料的分层透筛过程进行了进一步研究,将同一粒度的颗粒在筛面上的筛分时间,即颗粒在筛面上的滞留时间,视为一个随机变量,从而把颗粒的透筛行为转化为一个“寿命”问题来研究(当某一颗粒透筛时,即认为其寿命终止),从而建立了粒群沿筛面长度的透筛概率分布模型——Weibull 模型。该模型中粒群的透筛概率 P 的计算公式为:

$$P = 1 - e^{-AL^B} \quad (1-6)$$

式中, L 为筛面长度; A 、 B 为大于零的模型参数。

进一步试验研究表明:粒群在普通振动筛、概率分级筛和琴弦概率筛筛面上的透筛概率均服从这一规律。当筛分机工作条件一定时,参数 A 随物料颗粒相对粒度的增大而减小,对于较小粒级的颗粒,参数 B 近似为常数,并且仅取决于筛分机的工作条件。由于 Weibull 颗粒透筛模型以颗粒群的运动为基点,因此该模型与筛分作业的实际情况更加接近。

1.2.4 筛分过程数学模型

从 20 世纪 60 年代起,各国研究者根据理论推导和实践经验建立了一系列的筛分数学模型,以期用数学模型来描述筛分过程,并将数学模型应用于模拟筛分过程、确定筛分参数或对筛分设备进行优化设计。筛分过程的数学模型按照所采用的基本理论思想的不同,可分为概率模型和动力学模型两大类。现将有代表性的筛分过程数学模型描述如下:

(1) 概率学模型。

Brereton 和 Dymott 认为筛分过程可分为厚层筛分和薄层筛分两个阶段,分别对应着沿筛面长度的前半部分和后半部分。以 Gaudin 的颗粒透筛概率理论为基础,Brereton 和 Dymott 建立起来的筛分过程概率学模型的数学描述为:

$$\begin{cases} w(L) = Pw_c nL & L < L_c \\ w(L) = 100 - w_c(1 - P)n^{(L-L_c)} & L \geq L_c \end{cases} \quad (1-7)$$

式中, n 为颗粒在筛面上前进单位长度时与筛面的碰撞次数; L 为筛面长度; L_c 为厚层筛分与薄层筛分的分界长度; w_c 为形成临界床层厚度每次振动所需的给料。

由其试验结果可知,厚层筛分时 $w(L)$ 与 L 之间呈良好的线性关系,而薄层筛分时,由于 L_c 难以确定,因此无法得出准确的试验结果。

陈清如和赵跃民在概率筛模型机上进行了大量的半工业性筛分试验,并在概率统计基础上给出了煤用概率筛的数学模型(式 1-8)。

$$E(x) = \begin{cases} e^{-A(P + \frac{P^2}{2} + \frac{P^3}{3} + \frac{P^4}{4})} & x \geq x_0 \\ \frac{C}{x^D} & 0 < x < x_0 \end{cases} \quad (1-8)$$

式中, x 为颗粒粒度; a 为筛孔尺寸; b 为筛丝直径; A 为颗粒透筛前在筛面上的跳动次数; B 为颗粒下落方向角和筛面倾角的系数; C 、 D 为颗粒黏附系数,反映细颗粒对粗颗粒的污染程度; P 为筛面颗粒的透筛概率。

式(1-8)中 P 的计算公式为:

$$P = \frac{(a-x)[(a+b)B-b-x]}{(a+b)^2 B} \quad (1-9)$$

(2) 动力学模型。

筛分过程的动力学模型是以筛分效率与筛分时间的关系为基本研究内容,其数学描述为:

$$\frac{d(W_0 - W)}{dt} = KW \quad \text{或} \quad \frac{dW}{dt} = -KW \quad (1-10)$$

式中, W_0 为原料中所含筛下物料的重量; W 为筛上物中所含筛下物的瞬时重量; t 为筛分时间,也可由筛面长度代替; K 为比例系数,即透筛系数或筛分速度系数,取决于物料性质、筛面构造参数及筛面的运动性质。

对式(1-10)积分后可得筛分动力学方程如下:

$$E = \frac{W}{W_0} = \exp(-Kt) \quad (1-11)$$

式中, E 为筛下物在筛上产品中的分配率。

Ferrara 和 Preti 基于 Brereton 等对筛分过程进行分区思想,给出了连续函数描述的筛分模型。

对于厚层筛分,其筛分模型的数学描述为:

$$\begin{aligned} \omega_0 \left\{ \int_0^D \frac{f(x,0)}{\chi(x)} [E(X,L)^{\chi(x)} - 1] dx + \int_0^\infty f(x,0) \ln E(X,L) dx \right\} \\ = -k_{50} 2^\sigma \left(1 - \frac{X}{D}\right)^\sigma, X < D \\ E(X,L) = 1, X \geq D \end{aligned} \quad (1-12)$$

式中, X 是作为颗粒动力学特性研究对象的颗粒粒径; x 为筛面上一般颗粒的粒径,其粒径分布影响 X 粒级颗粒的动力学特性; L 为筛面长度; $E(X,L)$ 为 X 粒级物料筛上物的筛分效率; $f()$ 为粒级分布的密度函数; k 为厚层筛分的动力常数,其下标 50 为相对粒度 $X/D = 0.5$; σ 为取决于筛面振动参数和筛面形式的常数,其值由试验确定。

对于薄层筛分,其筛分模型的数学描述为:

$$E(X,L) = \exp \left[-s_{50} 2^\sigma \left(1 - \frac{X}{D}\right)^\sigma L \right] \quad (1-13)$$

式中, s 为薄层筛分时动力学常数;其他符号意义同上。

筛分过程的概率学模型以单颗粒透筛概率理论为基础,并假设颗粒的每次跳动都能与筛网碰撞而发生透筛,反映的是颗粒与筛网碰撞后的透筛情况,未能充分考虑颗粒群的透筛运动及颗粒性质等多种因素的影响。因此,与实际筛分过程相比,筛分过程的概率学模型具有较大的差别。筛分过程的动力学模型以颗粒群为研究对象,能够较真实地反映筛分过程,但在实际使用过程中,存在模型系数难以确定等问题而限制了其使用范围。

由以上分析可知,现有的筛分过程数学模型大都是现象模型,从而导致了筛分过程中颗粒运动的微观物理机理缺少深入的理解。另外,现有模型大都是基于单颗粒运动建立起来的,缺乏对颗粒群运动规律的研究而难以用于指导筛分实践。总体来说,颗粒群的筛分过程取决于颗粒之间以及颗粒与振动筛面之间的相互作用;为深入理解筛分现象,需要从颗粒级的微观尺度来研究筛分过程。然而,利用目前现有的试验技术及试验设备很难获取颗粒间作用力、能量损耗等多种微观信息。因此,需要借助计算机技术进行数值模拟研究,从而架起试验与理论研究之间的桥梁。

1.3 DEM 模拟研究及应用现状

20 世纪 70 年代发展起来的离散元法,最初是为解决岩块系统的问题而提出来的。但随着其理论的不完善以及计算机技术的迅速发展,DEM 发展成了一种使用范围广泛、行之有效的数值模拟方法。该方法已在岩土工程、采矿工程、矿物加工、物料分选等散体工程技术领域中得到了成功的应用,并迅速发展成为一个多学科交叉的研究领域,其核心是帮助人们理解离散颗粒物质的微观及宏观特性之间的关系。

1.3.1 DEM 在散体工程中的应用

目前,国际上 DEM 在散体物料工程领域中已有大量的应用研究。Mishra 等利用三维 DEM 描述了物料颗粒的筛分过程,成功预测了多种类型颗粒中的每一种颗粒通过筛床的浓度,其研究过程中考虑了颗粒类型对筛分过程的影响。Asmar 通过建立三维离散元法模拟程序,实现了对具有黏着作用的球形颗粒振动及颗粒之间相互作用的仿真研究。Cleary 基于 DEM 对粒状物料流从料斗口卸下的过程中物料分层的机理进行了研究,探讨了颗粒形状的对卸料过程的影响规律,并将此思想应用于振动筛物料分级过程的研究中。Ketterhagen 采用一种由迟滞弹簧系统和滑动摩擦力组成的软颗粒建立颗粒的接触模型,深入研究了颗粒的直径比、密度比、料斗壁倾角、卸料部分形状、颗粒性质、摩擦系统和料斗填充方法等对料斗卸料过程的颗粒分层行为的影响机理。Mukherjee 利用 DEM 对颗粒流化分级行为进行了数值模拟,并采用由固体和流体动力构成的颗粒接触力模型,得出了具有不同密度比及尺寸比的颗粒系统的流化分级效率主要取决于流体速度的结论。

DEM 在散体工程领域的应用已有近 30 年的历史,早期的研究多是有关颗粒尺寸、速度分布、应力分布、物料流中颗粒分布域等因素对颗粒行为的影响。近年来,随着研究的不断深入,研究者逐渐认识到颗粒形状在物料分选、混合、破碎、卸料等研究领域中的重要性,并开始了颗粒形状及颗粒物理性质对颗粒行为影响的深入研究。

关于颗粒形状及颗粒物理性质对颗粒行为影响的代表性研究如下所述。Cleary 通过对颗粒形状对剪切流的速度、容积率、颗粒温度及应力分布影响机理的研究,得出了颗粒形状会急剧增加物料颗粒的应力及温度,并导致颗粒流通困难程度增加的结论。Kock 考察了颗粒的形状对沉积过程的影响,发现颗粒形状是导致颗粒发生黏性变形的主要因素,颗粒的非球形度增加导致颗粒粗糙程度增加,使剪切域和颗粒区域的发展受到抑制,从而影响沉积的形成过程。Latham 采用 3D 形状扫描渲染系统,对真实颗粒进行扫描,并将颗粒的表面网格结构存储在形状库中,将颗粒的形状库作为 DEM 仿真研究中的颗粒生成输入模块,对复杂形状颗粒的沉降行为进行了仿真研究。Kruggel-Emden 等详细介绍了一种模拟复杂颗粒形状的多球法,并且论证了该方法既能够准确描述颗粒形状,也能够保证接触检测及接触力计算的效率,提高了散体物料 DEM 仿真的可靠性。Limtrakul 等利用 DEM 对振动流化床的仿真研究中,深入探讨了颗粒形状、颗粒的接触力及黏附力对颗粒运动的影响,得出黏附力对微粒子系统的颗粒运动具有显著影响作用的结论。Kruggel-Emden 在传统 DEM 颗粒系统仿真的基础上,发展了包含具有黏弹性及塑性行为的颗粒碰撞模型,进一步增加了

DEM 仿真结果的科学可靠性。Murase 对由三个颗粒组成的聚团结构的静态及动态液桥力分别进行了数值模拟和试验研究,给出了三个颗粒之间的液桥力分布形态图,并得出动态液桥力主要取决于液桥体积、液体黏度及拉伸速度的结论。Gopalkrishnan 扩展了其原有的研究,提出了用调和平均近似值来表示相互作用实体的有效粒径方法来构造计算不同颗粒之间相互作用力的分析模型,该分析模型不仅能简化不同颗粒间由黏性引起的相互作用力的计算,而且能得到较精确的计算结果。

当前,DEM 在国际上的研究及应用已得到长足的发展。DEM 已能够实现大规模的工业级应用,并能对复杂的散体物料加工过程进行真实的三维模拟。当合理描述颗粒及边界几何形状并采用真实材料性质时,无黏附作用的干颗粒流的定量预测能够达到合理可行的精度。DEM 模拟研究能够提供大量的微观动力学信息,如颗粒轨迹、施加于单个颗粒上的瞬时作用力及能量损耗等,而利用当前物理试验技术难以获取这些参数。因此,DEM 在散体物料工程等领域得到了广泛的应用,并且随着 DEM 技术的发展,其研究的深度和应用的广度都将日益增加。

1.3.2 振动筛分过程的 DEM 模拟研究

振动筛分是散体工程中用于颗粒分离的一种常用方法。振动筛分过程是一个极为复杂的过程,其筛分效果取决于筛孔及颗粒物质的尺寸、形状以及筛面的振幅、振动频率等多种因素。另外,目前的试验手段难以实现对振动筛分过程中颗粒系统的复杂运动行为进行颗粒级的微观研究。因此,借助于计算机技术的数值模拟研究已成为试验和理论分析之外的一种重要研究手段。

物料振动筛分过程的计算机模拟研究始于 20 世纪 60 年代,国内外学者利用计算机仿真技术对筛分过程的研究做了大量的工作,探索出了许多筛分过程计算机模拟的有效方法,使人们对物料的筛分过程有了较深入的了解。受当时计算机发展水平所限,初期的计算机模拟主要是为了解决筛分的部分筛分效率的计算问题,并且筛分过程的研究主要是针对单个颗粒,未能对粒群的筛分运动进行深入研究,也没能考虑颗粒形状及物理性质等的影响,而只是根据筛分模型编制了模拟计算程序,未能实现复杂筛分过程的可视化研究。

近年来,DEM 技术发展迅速,已成功应用于散体工程等工业领域并取得了丰富的研究成果,利用 DEM 能够对筛分过程中的颗粒运动及透筛机理进行深入研究,并能较为准确和便捷地预测筛分效果,但目前仅有极少数学者利用 DEM 对筛分过程进行了数值模拟研究: Cleary 和 Sawley 最早基于三维球模型对垂直振动的方形筛面上固定数量的颗粒物料筛分过程进行了 DEM 模拟研究,对颗粒系统的振动透筛机理进行简要分析,指出 DEM 能够较准确地模拟筛分过程,并能作为筛分设备的设计工具。Li 开发了一种简单的二维圆形颗粒 DEM 模型,并应用于静止倾斜筛面上二元粒级颗粒系统的筛分过程 DEM 模拟研究中,对筛面上不同区域的颗粒运动、分离物理机理以及对筛分效率的影响作用进行了较深入的讨论。随后,Cleary 在原有工作的基础上,对批量的球形及非球形颗粒的振动筛分过程进行了进一步的三维 DEM 模拟研究(模拟过程如图 1-7 所示),分析比较了两种颗粒的筛分过程及透筛机理,得出颗粒形状对筛分过程具有显著的影响,球形颗粒比非球形颗粒更易发生堵孔,球形颗粒的透筛率近似线性减小并且大于非球形颗粒,但部分粒径大于筛孔的非球形颗粒仍能通过调整方位而发生透筛等结论。