

郭 鸿 著

复杂颗粒流力学特征 仿真模拟

非
外
借



科学出版社

复杂颗粒流力学特征 仿真模拟

郭 鸿 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书系统地阐述由拖拽体激发的复杂颗粒流的力学特征,综合离散元模拟、有限元模拟、室内物理试验的方法,研究不同拖拽体形状时拖拽阻力和升力的变化规律,为分析复杂颗粒流提供新的思路和方法。全书分为7章,包括颗粒和颗粒流的基本概况,颗粒离散元仿真模拟的理论基础,二维半侵入型刚性薄板拖拽模型,倾斜拖拽模型,二维全侵入型拖拽模型,角端效应、颗粒级配效应和湿颗粒问题,结论和讨论。附录给出主要离散元程序核心代码。

本书可供土木工程专业高年级本科生和研究生参考使用,也可作为颗粒流、离散元/有限元数值模拟研究人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

复杂颗粒流力学特征仿真模拟/郭鸿著. —北京:科学出版社, 2019.10
ISBN 978-7-03-062614-1

I. ①复… II. ①郭… III. ①颗粒-流体动力学-数值模拟-研究
IV. ①O351.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第220142号

责任编辑:杨丹 亢列梅 / 责任校对:郭瑞芝
责任印制:张伟 / 封面设计:陈敬

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号
邮政编码:100717
<http://www.sciencep.com>

北京中石油彩色印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019年10月第一版 开本:720×1000 B5

2019年10月第一次印刷 印张:12 1/4

字数:240 000

定价:98.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

颗粒物质是地球上存在最多、与人们最密不可分物质类型之一，在地球表面广泛存在，如沙、石、土颗粒等。颗粒物质如土石，可以支撑高大的建筑物，形成比较固定的“基础”；也可以像液体一样流动，如沙漏中的沙；还可以在受到强烈扰动时产生气体般的力学行为。颗粒流大体分为三种：第一种是准静态密集流，特点是颗粒流动非常缓慢，颗粒之间的作用主要是摩擦接触。第二种是气态流，特点是速度快，颗粒宏观密度较小，颗粒之间的作用以碰撞为主。第三种流介于密集流和液态流之间，既密实，同时又有液体的特征，是目前最复杂的一种流态，颗粒流动整体表现出来的行为很难用传统的理论描述。截至目前，还没有理论能完全描述多变的颗粒力学性质。*Science* 杂志曾把建立颗粒材料的运动学综合运动理论列为世界上最前沿的 125 个问题之一。

关于颗粒流的研究，主要采用以下三种方式：其一，从细观角度入手，利用分子动力学和离散元的理论，结合科学实验，探索颗粒物质在细观尺度上的作用机理；其二，从宏观角度入手，利用连续介质力学的思想，对颗粒物质建立弹塑性模型等；其三，综合细观和宏观角度，利用多尺度方法，探究颗粒物质宏观和细观上的内在联系。目前对颗粒流的研究大多集中在简单的重力激发或整体剪切激发的颗粒流动形式方面。本书研究更为复杂的拖拽体激发的复杂颗粒流，如农业领域的犁地过程、工程器械铲煤铲矿、滑沙及滑雪运动、沙漠生物的运动以及沙漠仿生智能机器人等，在相关研究的基础上，采用间接的方法研究拖拽体在颗粒流动中所受拖拽阻力和升力，从宏-细观层面探明此类复杂颗粒流的力学特性，深入了解拖拽体激发的复杂颗粒流，以期对农业、工业等过程中各种“拖拽体”的设计和使用的理论依据。

本书由郭鸿撰写。撰写过程中，美国伍斯特理工学院的 Mingjiang Tao 教授提出了不少宝贵意见；张仲伟、马帅帅、王普、曹龙、胡团楠、薛道耐、杨震、高海杰、权金九、朱世炜等参与了本书文字整理等工作，在此向他们表示衷心感谢。

颗粒流在诸多领域具有十分广阔的应用前景，其内容远不止本书所涉及的几种形式，作者希望抛砖引玉，吸引更多的学者共同推动这一科学问题的发展。

限于作者水平，书中难免存在不足之处，敬请读者批评指正。

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 颗粒和颗粒流	1
1.2 颗粒流的描述	3
1.2.1 方法论和宏观模型方面	3
1.2.2 物理实验方面	7
1.2.3 数值模拟方面	8
1.2.4 其他方面	10
1.3 平面颗粒流的力学模型	13
1.3.1 平面剪切流	13
1.3.2 环形剪切流	15
1.3.3 垂直斜槽流	16
1.3.4 倾斜平面流	18
1.3.5 堆积流和旋转滚筒流	19
1.4 本章小结	20
第 2 章 颗粒离散元仿真模拟的理论基础	21
2.1 颗粒离散元法向接触力计算	22
2.1.1 赫兹接触理论	22
2.1.2 颗粒接触黏弹性模型	24
2.1.3 线性接触模型	26
2.2 颗粒离散元切向接触力计算	26
2.2.1 简易线性接触模型	26
2.2.2 Mindlin-Deresiewicz 切向接触模型	28
2.3 基于重力增大法的自由平面颗粒生成方法	29
2.4 颗粒不均匀率和孔隙率	31
2.5 颗粒流中的宏观和细观摩擦系数	33
2.6 时间步长	35
2.7 局部阻尼和黏性阻尼	39

2.7.1	局部阻尼	39
2.7.2	黏性阻尼	40
2.8	黏性阻尼和恢复系数的关系	43
2.9	基于 PFC2D 的基本理论验证	49
2.10	本章小结	53
第 3 章	二维半侵入型刚性薄板拖拽模型	54
3.1	概述	54
3.2	颗粒离散元数值模拟方法	55
3.2.1	模型建立	55
3.2.2	容器、边界条件、颗粒以及拖拽体	55
3.2.3	颗粒离散元数值模拟的参数确定	55
3.3	宏观条件和细观条件对拖拽阻力的影响	59
3.3.1	几何条件对拖拽阻力的影响	59
3.3.2	颗粒内部特性对拖拽阻力的影响	64
3.3.3	边界条件对拖拽阻力的影响	65
3.3.4	拖拽速度对拖拽阻力的影响	66
3.4	拖拽阻力的两种不同预测模型	67
3.4.1	基于改进朗肯被动土压力理论的拖拽阻力预测模型	67
3.4.2	基于改进库仑被动土压力理论的拖拽阻力预测模型	74
3.5	楔体模型	75
3.6	惯性矢量和楔体剪切带的关系	76
3.7	拖拽体扰动下颗粒材料的弹塑性模型初探	80
3.7.1	Drucker-Prager 模型	80
3.7.2	基于 ABAQUS 有限元模型的建立	84
3.8	室内物理实验结果验证	86
3.9	本章小结	92
第 4 章	倾斜拖拽模型	93
4.1	颗粒离散元模型建立	94
4.2	倾斜拖拽体的拖拽速度和侵入角度对拖拽阻力和升力的影响	95
4.2.1	拖拽速度对拖拽阻力和升力的影响	95
4.2.2	侵入角度对拖拽阻力和升力的影响	96
4.2.3	拖拽阻力的归一化探讨及其与升力的关系	97

4.3	基于改进库仑被动土压力理论的拖拽阻力和升力预测模型	98
4.3.1	预测模型的数学推导	98
4.3.2	预测模型的离散元模拟验证	101
4.4	本章小结	106
第5章	二维全侵入型拖拽模型	107
5.1	离散元模型	108
5.2	全侵入型拖拽体拖拽阻力的离散元模拟	110
5.2.1	矩形拖拽体的拖拽阻力	110
5.2.2	锯齿形拖拽体的拖拽阻力	112
5.3	全侵入型拖拽体升力的离散元模拟	119
5.3.1	矩形拖拽体的升力	119
5.3.2	锯齿形拖拽体的升力	120
5.4	锯齿倾角的影响	124
5.5	边界条件的影响	129
5.6	本章小结	133
第6章	角端效应、颗粒级配效应和湿颗粒问题	134
6.1	角端效应	134
6.1.1	非薄板拖拽体离散元模型	134
6.1.2	非薄板拖拽问题的角端效应	134
6.1.3	角端效应的定性解释	136
6.2	颗粒级配效应	137
6.2.1	颗粒剪切机理分析	137
6.2.2	颗粒抗剪强度级配效应	141
6.3	湿颗粒问题——以非饱和黄土为例	155
6.3.1	湿颗粒的简化离散元模型	155
6.3.2	湿颗粒的三轴试验	158
6.3.3	模拟方法及结果	159
6.4	湿颗粒基质吸力的理论预测——以非饱和黄土为例	162
6.4.1	PSD 拟合模型	162
6.4.2	SWCC 预测模型	164
6.4.3	一种简化的 SWCC 预测模型	168
6.5	本章小结	169

第 7 章 结论和讨论	171
7.1 结论	171
7.2 讨论	172
参考文献	174
附录 主要程序	181

第1章 绪 论

1.1 颗粒和颗粒流

颗粒物质在大自然及日常生活中广泛存在，如自然界中的沙石、土壤、浮冰、积雪等，日常生活中的粮食、糖、盐等，工业生产中的煤炭、矿石、药品及化工产品等，如图 1-1 所示。颗粒物质是宏观颗粒的统称，尺寸一般大于 $100\mu\text{m}$ 。颗粒物质是地球上存在最多、与人们最密不可分物质类型之一。对颗粒物质的研究广泛存在于土木工程、矿业工程、化学工程、农业工程等诸多领域，如工业生产、泥石流、山体滑坡、雪崩等，这些均和人们的生活生产息息相关。因此，研究颗粒物质具有十分重要的理论意义和实践价值。颗粒流动属于特殊的介质流动，是颗粒物质研究中最核心最根本的问题。然而，对于特性复杂、材料各异、形态不一的各种颗粒材料来说，要全面掌握其物理力学行为绝非易事。对单体颗粒的研究已有比较成熟的理论，如弹性力学和塑性力学，也有相对成熟的数值计算方法，如有限元方法。然而，颗粒流动整体表现出来的行为却很难用传统的理论描述。*Science* 杂志曾把建立颗粒材料的运动学综合运动理论列为世界上最前沿的 125 个问题之一。



(a) 谷物



(b) 药片



(c) 沙漠



(d) 土石

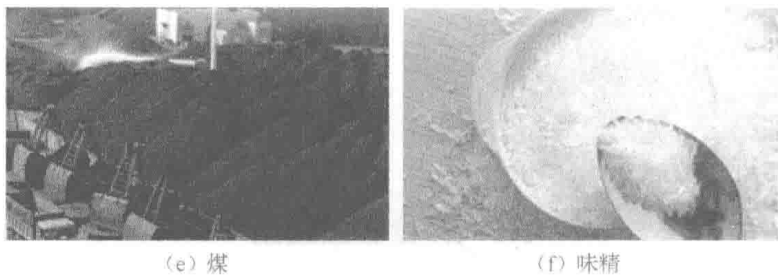


图 1-1 颗粒物质举例

颗粒物质如土石，可以支撑高大的建筑物；也可以像液体一样流动；还可以被风堆起形成沙丘等。颗粒材料可以有固体的力学行为，也可以有液体的力学行为，还可以有气体的力学行为。图 1-2 为颗粒介质的不同形态。颗粒在静止时会产生一定的应力，形成比较固定的“基础”；沙漏中的沙可以像液体一样流动；如果受到强烈扰动，颗粒还可以具有气体般的特征。颗粒物质这种复杂的物理行为近年来引起越来越多学者的关注 (Jaeger et al., 1996)。颗粒研究的应用范围非常广泛，如预测滑坡、雪崩及泥石流等自然灾害 (Cleary, 2010)。探索颗粒物质的运动规律对自然灾害如雪崩、岩石崩塌以及泥石流等的防治，具有十分重要的意义 (石崇等, 2013; 鲍德松等, 2003)。颗粒物质的行为十分复杂，需要进一步探索其力学特性，更重要的是，目前还没有理论能完全描述多变的颗粒力学性质。颗粒介质包含成千上万的颗粒，这个数量远远多于可以用理想的球形颗粒做数值计算的数目。因此，采用连续介质理论描述复杂颗粒流的力学特征是十分必要的。

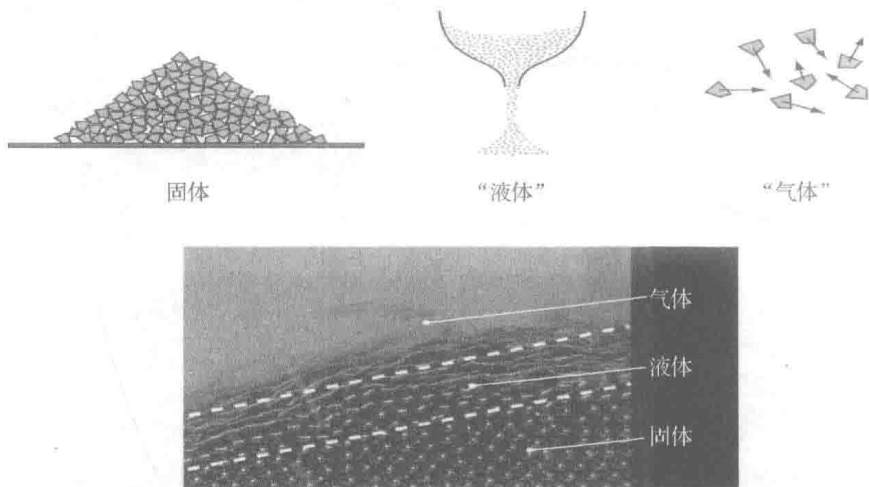


图 1-2 颗粒介质的不同形态 (Pouliquen et al., 2009)

在复杂颗粒流问题方面，研究人员做了大量的工作。例如，准静态密集流，

它的特点是颗粒流动非常缓慢，颗粒之间的作用主要是摩擦接触 (Roux et al., 2002; Wood, 1990; Schofield et al., 1968); 气态流，它的特点是速度快，颗粒宏观密度较小，颗粒之间的作用以碰撞为主; 介于密集流和气态流之间的这种流态最复杂 (Forterre et al., 2008)。颗粒物质的研究概况如图 1-3 所示。

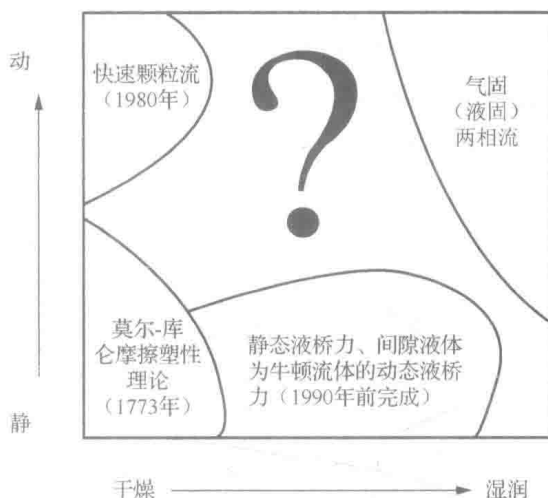


图 1-3 颗粒物质的研究概况 (孙其诚等, 2009)

目前，学界对颗粒流的研究主要体现在以下几方面：其一，从细观角度入手，利用分子动力学 (Rapaport et al., 2004) 和离散元 (Cundall et al., 1979) 的理论，结合科学实验，探索颗粒物质在细观尺度上的作用机理；其二，从宏观角度入手，利用连续介质力学的思想，对颗粒物质建立连续介质模型；其三，综合细观和宏观，利用多尺度方法，探究颗粒物质宏观和细观上的内在联系 (Pouliquen et al., 2009)。然而，目前的研究基本集中在简单的重力激发或者整体剪切激发的颗粒流方面，对于拖拽体激发的复杂颗粒流，还缺乏系统的研究和探索。拖拽体激发的颗粒流在现实中十分常见，如农业领域的犁地过程、工程器械铲煤铲矿、滑沙及滑雪运动、沙漠生物的运动以及沙漠仿生智能机器等。对于拖拽体激发颗粒流的力学行为，本书采用间接的方法，即研究拖拽体在颗粒流动中所受拖拽阻力和升力，既有助于深入理解拖拽体激发的复杂颗粒流，又可以为农业、工业等过程中各种“拖拽体”的设计和使用提供理论依据。

1.2 颗粒流的描述

1.2.1 方法论和宏观模型方面

近年来出现的很多新理论 (Rycroft et al., 2009; Forterre et al., 2008; Mašin,

2005; Midi, 2004; Howell et al., 1999) 大都是基于简单的低维流, 如斜面(雷哲敏等, 2006)、漏斗和库埃特剪切流。在准静态(Thornton et al., 2000)的限制下, 影响流动的摩擦力和惯性力经常被忽略, 因此弹塑性模型, 其中包括著名的剑桥黏土模型, 已经能够成功预测实验室结果(Mašín, 2005; Liu et al., 2002)。对于快速密集流, 有研究人员建议用修正的黏塑性模型, 如 Jop 等的黏塑性模型(Pouliquen et al., 2006)和科瑟拉模型(Nott, 2009), 其中也包括基于双应力影响的旋转效应。这些模型最初是源于水动力学的, 修正后的模型可以考虑颗粒流的一些特殊特征, 包括干扰、剪切带和旋转破坏的一些独特的功能。显然, 这些理论与特定的实验模型是吻合的, 但在许多情况下, 尚不清楚这些理论是否适应不同类型的颗粒流, 尤其是在更复杂的非单向流条件下。

Zhu 等(2005)分别用离散元法(discrete element method, DEM)、传统方法和黏弹塑性连续模型三种手段研究颗粒流。他们认为, 用传统的有限元方法将颗粒物质处理成连续体, 可以得出颗粒流动的速度和应力, 并且认为通过多种方法结合的方式, 可以克服单一方法的缺陷。

Campbell(2006)依据颗粒流是否存在较为稳定的力链把颗粒流分为弹性流和惯性流两大类, 其中弹性流-准静态流和惯性流-碰撞流分别对应准静态流和快速流, 而弹性流和惯性流作为两种极端流动通常处理成连续体。准静态流颗粒流有较高的固体浓度, 基于库仑摩擦准则的摩擦塑性模型对准静态流有较为准确的描述, 常见的有双剪切模型、塑性势模型和双滑移自由转动模型等。

Jop 等(2006)和 Pouliquen 等(2006)基于 3D 模型和实验, 认为用简单的黏塑性本构关系可以较好地描述密集颗粒流的力学特性, 并且能在诸多领域内应用。

孙其诚等(2009)认为除了需要颗粒力学的高效数值算法、并行计算和网络计算等技术发展以外, 在目前以及今后一段时间内, 针对砂土力学的重点应该放在提出新的研究思路或理论框架, 对海量数值模拟数据和实验数据进行综合分析, 建立细观的颗粒相互作用与宏观的颗粒体系力学行为的本质联系, 进而构建普遍适用的颗粒物理力学理论。他们还认为, 跨尺度关联是颗粒物质力学多尺度研究的关键。颗粒性能参数决定力链形态及其稳定性, 而力链网络的复杂动力响应决定了宏观土体力学性质的基本性质。然而, 对于力链网络, 要提出一个合理的标度参数来量化力链网络形态及其演变规律非常困难。

da Cruz 等(2005)和 Forterre 等(2008)提出了一个用来描述颗粒宏观流动的参数, 即惯性数, 其表达式为

$$I = \frac{\dot{\gamma}d}{\sqrt{P/\rho_p}} \quad (1-1)$$

式中, $\dot{\gamma}$ 是剪切速率; d 为颗粒直径; P 是压应力; ρ_p 是颗粒密度。

该惯性数是宏观摩擦系数 μ 的函数, 剪切应力 $\tau = P\mu(I)$ 。他们研究的对象是重力或者剪切作用下的颗粒流动, 但对于拖拽体激发的颗粒流研究也有很好的借鉴作用。

惯性数的概念可以通过图 1-4 来解释。 $1/\dot{\gamma}$ 是某颗粒在宏观时间尺度时剪切速率 $\dot{\gamma}$ 下移动一个颗粒直径长度所需的时间。 $(1/d)\sqrt{P/\rho_p}$ 是某颗粒在惯性时间尺度时外界力作用下移动一个颗粒直径长度所需的时间, 其解释如图 1-4 所示。

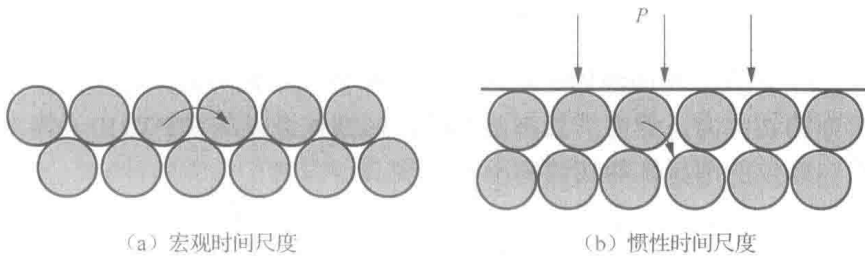


图 1-4 不同时间尺度下一个颗粒移动一个颗粒直径示意图 (Kamrin, 2008)

此理论用一个和剪切速率紧密联系的参数描述颗粒流动的类型。显然快速流具有相对高的剪切速率, 而且在单位时间内耗散更多能量。da Cruz 等 (2005) 认为稳定态流即惯性数 I 对于剪切速率足够敏感, 也就是 I 足够大, 此时惯性数的取值范围为 $10^{-3} < I < 10^{-1}$, 如图 1-5 (a) 所示。

稀疏流 (碰撞流) 惯性数的取值范围为 $I > 10^{-1}$, 该种流态的恢复系数被认为是 0, 颗粒和颗粒的接触持续时间非常短暂, 一般是内能和动能的相互转化。这种情况下颗粒的碰撞类似于气体形态, 如图 1-5 (b) 所示。稀疏流的研究比较成熟, 最有代表性的理论是玻尔兹曼耗散动能理论。

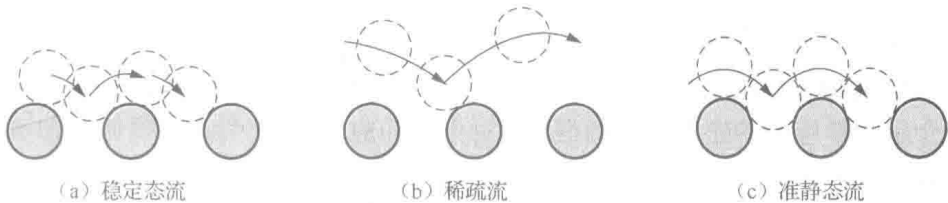


图 1-5 不同流态的机理示意图 (Kamrin, 2008)

惯性数 $I < 10^{-3}$ 时的流态称作准静态流。准静态流的表现密度在简单剪切过程中几乎不随惯性数变化, 而且惯性时间总是足够小, 这为颗粒寻找新的紧密位置提供了可能 [如图 1-5 (c) 所示]。准静态流的能量耗散稍微复杂一些, 其主要表现形式是颗粒间的滑动摩擦以及类黏性动力耗散。由于它的应力/应变率相对比较稳定, 对准静态流系统施加外界剪切率时, 其宏观摩擦系数一般比较稳定。因此,

对于准静态流，可以简单地理解为：对一个在水平面上受法向力 N 的块体，只要施加的水平力为 μN ，块体就可以以任意速度滑动。

Pouliquen 等 (2006) 建立了平面流的本构关系，即平面流摩擦系数和惯性数的关系：

$$\mu(I) = \mu_s + \frac{\mu_2 - \mu_s}{I_0 / I + 1} \quad (1-2)$$

式中， I_0 是常数； μ_s 是颗粒材料在静态下的摩擦系数； μ_2 是最大摩擦系数。对于三维状态下的玻璃珠， $\mu_s = \tan 21^\circ$ ， $\mu_2 = \tan 33^\circ$ ， $I_0 = 0.3$ 。

式 (1-2) 建立了平面流的宏观摩擦系数和惯性系数的关系，由此可以计算任意摩擦平面的切向力。然而需要指出的是，拖拽体激发的颗粒流由于流态复杂，颗粒体任一部位的围压及剪切速率不是常数。

张翀等 (2009) 研究了颗粒形状对模拟双轴实验的影响以及 4 种不同颗粒试样宏观特性随颗粒细观参数的变化关系，得出了以下结论：①通过对建立的 4 种颗粒试样的分析，在其他细观参数相同的情况下，颗粒形状对颗粒试样的宏观特性有较大的影响；②4 种颗粒试样的强度、变形模量和内摩擦角随颗粒摩擦系数的增大有较明显的增长，其中类长形颗粒的增长幅度最明显；③4 种颗粒试样的强度、变形模量随颗粒剪切刚度的增大而增大，而内摩擦角与颗粒剪切刚度的关系不大；④类长形颗粒试样加压后，颗粒方位有明显的水平倾向性，而其他两种异形颗粒试样在加压后没有明显的方位倾向性；⑤总体来说，4 种颗粒试样中，3 种异形颗粒由于其形状的特殊性，在其他细观参数相同的情况下，比圆形颗粒表现出了更多颗粒间的咬合作用，试样的剪切强度增大，其中类长形颗粒的作用最为明显。尽管他们从定性的角度分析了不同颗粒形状下，颗粒的摩擦系数和剪切刚度与试样强度和变形模量的关系，但是并未建立一般情况下的颗粒形状和摩擦系数等细观因素与颗粒材料宏观特性的关系。

曾远 (2006) 通过引入颗粒流理论和开发颗粒流数值模拟技术，避免了传统连续介质力学模型的宏观连续性假设，对土体的应力-应变关系和剪切带形成机理进行细观数值模拟，分析了细观参数对宏观力学特性的影响；将土体的细观结构与宏观力学响应联系起来，建立了材料细观与宏观参数的定量关系，并从细观上揭示了土体中剪切带形成的机制，对土体工程力学特性和剪切带形成与发展以及渐进破坏过程有了更深入的了解。

Forterre 等 (2008) 受黏塑性宾厄姆流体行为的启发，提出了描述颗粒流动的唯一象模型，很好地复现了颗粒在不同边界条件下的复杂流动，获得了速度分布和颗粒浓度等重要参数。该模型易于在自然界中的泥石流、滑坡等灾害和工程问题中得到应用。他们将惯性数与力链联系在一起，即将颗粒受外载荷挤压形成力链

或脱离力链的特征时间与力链持续时间的比值定义为惯性数。

由于力链是细观颗粒和颗粒体宏观力学响应的桥梁,很多研究人员将注意力集中在力链形态的研究上(Bouchaud et al., 1995; Edwards et al., 1989)。然而,不同的颗粒流态力链复杂多变,要准确地捕捉力链的演化规律,从力链的变化形态建立定量的颗粒流力学模型却非常困难。

准静态模型被广泛应用在小应变问题上,如岩土工程中土的变形,地球物理学中的高压现象。颗粒流动中的应力变化规律是非常复杂的,弹性理论虽然可以描述小应变情况下的应力变化规律,但可能过于简化实际模型导致所计算应力偏小(Kamrin, 2008)。

典型状态理论(Schofield et al., 1968)、Rudnicki-Rice-type 模型(Rudnicki et al., 1975)和 Anand 模型(Anand et al., 2000)是目前比较常见的三种描述稳定流的理论和模型。它们都考虑了颗粒体孔隙率变化等因素,而且在小应变情况下用离散元模拟做了相应的验证(Rothenburg et al., 2004)。也有一些基于剪切速率变化的理论和模型(Nedderman, 2005),如纯共轴理论和随机流动模型(Kamrin et al., 2007)。

1.2.2 物理实验方面

Albert 等(1999)研究了拖拽体在颗粒材料中慢速移动时的拖拽阻力,结果表明拖拽阻力与容器的直径成正比,与侵入深度的平方也成正比,与拖拽速度无关。Wieghardt(1975)和 Albert 等(1999)发现,拖拽阻力随拖拽速度增加,先减小、后增大,且拖拽阻力和侵入深度呈 $5/2$ 指数关系,与水平维度呈 $1/2$ 指数关系。Albert 等(1999)把圆柱形拖拽体垂直放置并做圆周运动(这可以认为是周期边界情况)。结果表明,拖拽阻力和圆柱直径成正比,与侵入深度的平方也成正比。

Albert 等(2001a, 2001b)对拖拽体的形状(图 1-6)影响做了物理实验研究,结果表明,拖拽体的“顺流”方向形状和“逆流”方向形状同时影响拖拽阻力。具体来说就是,“顺流”面越尖锐以及“逆流”面越光滑,拖拽阻力就越小。更为重要的是,拖拽体“顺流”方向形状影响的权重要远远大于“逆流”方向形状的影响。然而,“顺流”方向的形状如何定量地影响拖拽阻力还需要进一步深入研究。另外,该实验还得到圆形拖拽体的拖拽阻力和其直径成正比,和侵入深度也成正比的结论。

Soller 等(2006)用立方体刚体在颗粒床中绕中轴旋转,分析了旋转力矩和立方体的厚度、宽度、侵入深度以及颗粒直径的关系。结果表明:此旋转力矩与广义侵入深度(指拖拽体的实际侵入深度和颗粒直径之和)成正比,与矩形横向截面广义对角线(指拖拽体的实际几何对角线尺寸和颗粒直径之和)的立方也成正比。

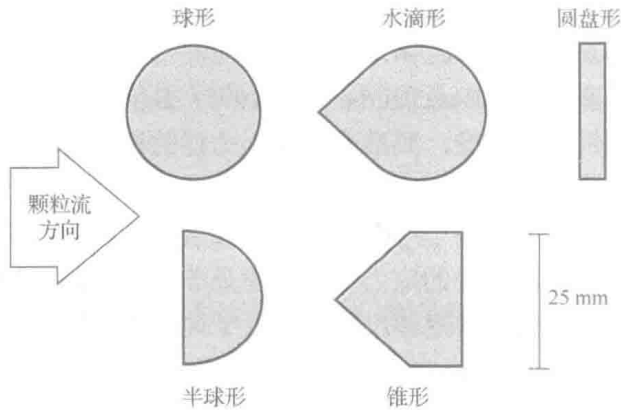


图 1-6 不同形状的拖拽体 (Albert et al., 2001a)

Cavarretta (2009) 利用自行研制开发的仪器, 精确测量砂土颗粒的刚度和摩擦系数, 并建立了相应的模型。通过其研究发现, 颗粒形状和表面粗糙度对颗粒材料的力学性质影响较大。

Umbanhowar 等 (2010) 提出了典型密实率的概念, 在这个典型密实率以下, 颗粒既不剪胀又不剪缩, 且拖拽阻力基本无变化。在典型密实率以上, 拖拽阻力随密实率增加而增加。拖拽体前方的颗粒堆积呈波浪式几何形态。Goldman (2008) 发现拖拽阻力和速度的关系符合二次函数规律; 而 de Bruyn 等 (2004) 发现拖拽阻力随速度线性增加; Lohse 等 (2004) 认为拖拽阻力不随速度变化。

Nichol 等 (2010) 用垂直坠落于颗粒床中的钢球, 得出了非局部效应的结论: 一个位置的应力和应变速率取决于另一个位置的应变速率。Goyon 等 (2008) 也发现了乳剂中的非局部效应。

Ding 等 (2011) 采用室内物理实验和数值模拟相结合的方法, 深入研究了不同形状的完全拖拽体在颗粒中受到的拖拽阻力和升力。结果表明: 拖拽体的形状和侵入深度决定了所受升力的大小及方向。其中, 圆柱形和矩形截面的升力方向向上, 且圆柱形截面的升力相对较大; 半圆形截面 (弧面在上) 所受升力方向向下。他们还发现圆柱形截面上正应力和切应力的分布规律。同时, 基于楔体模型的拖拽阻力和升力计算也得到了实验的验证, 取得了很好的结果。

综合已有的室内实验研究结果, 比较一致的结论是: 密实率、拖拽速度、侵入深度、颗粒大小、拖拽体形状及大小对拖拽阻力有很直接的影响。但是, 速度对拖拽阻力的影响仍然存在争议。

1.2.3 数值模拟方面

Geng 等 (2005) 采用物理实验和数值模拟相结合的方法, 定量总结了拖拽速

度、密实率减小率和颗粒尺寸对拖拽阻力的影响。结果表明：拖拽阻力随拖拽速度呈对数关系缓慢增加，随密实率减小呈指数关系增加，随颗粒增大呈非线性关系增加。另外，Geng等（2001）和Howell等（1999）用光测弹性学方法得出了当力链形成和破坏时拖拽阻力浮动值最大的结论。Costantino等（2008）也证明了颗粒大小对拖拽阻力具有相似的影响规律。近年来，麻省理工学院的Kamrin课题组探索了一条新的有限元和离散元相结合的研究思路。其代表作就是针对密集颗粒流的随机和确定性模型。

魏龙海（2006）在卵石地层颗粒的离散元研究中，得出了颗粒接触刚度和宏观材料模量的关系，摩擦系数和颗粒间相互作用及剪胀现象的关系，以及孔隙率对应力-应变曲线的影响等。

李志勇（2008）以椭球颗粒为研究对象，基于椭球颗粒的接触力计算以及颗粒运动方程等，构建了三维椭球颗粒的离散元基本理论。

Zhou等（2009）用离散元模拟的方法，研究了围压情况下，圆柱形拖拽体在不同形状颗粒材料中的拖拽阻力。结果表明，哑铃形颗粒中的拖拽阻力大于圆形颗粒；随着椭圆形颗粒的长宽比增大，拖拽阻力相应减小；与哑铃形和圆形颗粒相比，椭圆形颗粒中的流场更不规则。

Obermayr等（2011）利用离散元模拟了垂直平板拖拽卵石的情况，应用被动土压力理论计算拖拽阻力，通过离散元的位移场分析，得出了破坏面位置。拖拽阻力随侵入深度和平板宽度的增大而显著增加，随拖拽位移的增大而略微增加。

Percier等（2011）利用数值模拟和物理实验相结合的方法，通过倾斜平板的拖拽，探究了拖拽阻力和升力的影响因素。结果表明，拖拽速度对拖拽阻力影响微弱，而由拖拽引起的堆积体体积和拖拽阻力呈正比。另外，他们也提出了广义摩擦系数的概念，对拖拽形成的“颗粒楔体”采用连续介质力学思想进行了分析，并预测了拖拽阻力和升力。

吴剑（2007）基于颗粒离散元方法，建立了适于大变形的颗粒流环形剪切模型，并通过对比建筑用砂的环剪模型试验和高速环剪试验，验证了颗粒流环剪模型的可行性。

蒋明镜等（2010）通过离散元双轴压缩试验，分析了砂土剪切带的形成机理及发展过程，对边坡工程以及挡土墙等问题提供了有力的理论指导。

贺洁等（2012）借助离散元分析了平移刚性挡土墙情况下被动土压力的影响因素，指出竖直墙体下墙背的光滑程度并不影响被动土压力的分布，土体的摩擦系数对土压力有直接影响。

杜欣等（2012）研究了颗粒形状对宏观摩擦系数的影响，结果表明不规则形状颗粒的摩擦系数是接触面的2倍，椭球形颗粒的摩擦系数和接触面几乎相等。