

文章编号:1006-2467(2021)04-0421-13

DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2019.329

# 颗粒柱坍塌运动与堆积特性的研究综述

来志强<sup>1,2</sup>, 江恩慧<sup>1</sup>, 赵连军<sup>1</sup>, 周伟<sup>3</sup>, 田文祥<sup>3</sup>, 马刚<sup>3</sup>

(1. 黄河水利科学研究院 水利部黄河泥沙重点实验室, 郑州 450003; 2. 中国科学院 地理科学与资源研究所, 北京 100101; 3. 武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072)

**摘要:** 通过总结国内外有关颗粒柱坍塌运动模型的研究成果, 分析了颗粒柱初始空间形态特征、颗粒基本物理特性、模型边界及环境条件等因素对颗粒柱运动堆积特性的影响规律及作用机制。颗粒柱的运动距离和堆积高度与其初始宽高比之间存在显著的线性及幂函数关系, 高、低颗粒柱坍塌运动模式和能耗机制差异显著。颗粒粒径、颗粒刚度、颗粒破碎与颗粒潮湿等因素对颗粒柱坍塌运动与堆积特性的影响规律已基本达成共识。不同的挡墙约束条件、由气体掺入导致的流态化现象以及水体环境影响下颗粒柱运动的堆积特征已有初步的研究成果。但是有关颗粒柱初始孔隙率、颗粒摩擦因数、挡墙摩擦因数对颗粒柱运动堆积特性影响的结论仍存在分歧。综观当前的研究成果, 颗粒受力特性与运动机制存在内联关系, 复杂颗粒形状、可侵蚀床面、颗粒密度和水动力条件等对颗粒柱坍塌运动与堆积特性的作用机理均是未来的研究重点。

**关键词:** 颗粒柱坍塌模型; 运动机制; 堆积特性; 颗粒物质

**中图分类号:** TB 122

**文献标志码:** A

## Review of Movement and Accumulation Characteristics of Granular Column Collapse

LAI Zhiqiang<sup>1,2</sup>, JIANG Enhui<sup>1</sup>, ZHAO Lianjun<sup>1</sup>  
ZHOU Wei<sup>3</sup>, TIAN Wenxiang<sup>3</sup>, MA Gang<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Yellow River Sediment of Ministry of Water Resources, Yellow River Institute of Hydraulic Research, Zhengzhou 450003, China; 2. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 3. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** Domestic and foreign relevant literatures of granular column collapse movement models are concluded to analyze the effects of initial spatial characteristics, essential physical properties of particles, boundaries, and environment conditions of model on the movement and accumulation characteristics of granular columns. Besides, the related mechanisms of movement and accumulation characteristics of granular columns are also analyzed. Remarkable linear and power relationships exist between the movement distance and the aspect ratios of initial height to initial width. Similarly, remarkable linear and power relationships exist between accumulation height and aspect ratio of initial height to initial width.

**收稿日期:** 2019-11-15

**基金项目:** 国家自然科学基金青年科学基金项目(51909102, 51539004), 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项项目(HKY-JBYW-2019-02), 第四届中国科协青年人才托举工程全额资助项目(201938), 河南省博士后基金(020101070019), “十三五”国家重点研发计划项目(2017YFC0405204, 2018YFC040720203)

**作者简介:** 来志强(1990-), 男, 河南省安阳市人, 工程师, 现主要从事颗粒流理论及数值模拟研究工作。

**通信作者:** 赵连军, 男, 高级工程师, 电话(Tel.): 0371-66024549; E-mail: zhaolianjun88@163.com.

The movement patterns and energy consumption mechanisms for granular columns with large aspect ratios are significantly different from those with small aspect ratios. A consensus has basically been reached concerning the effect of particle size, particle stiffness, particle breakage, and wet particles on the movement and accumulation characteristics of granular columns. Some preliminary research achievements of the effects of different wall constraints, fluidization phenomenon due to the gas mixing and water condition on the movement and accumulation characteristics of granular column are obtained. However, there still exist disagreements in the conclusions about the influences of initial porosity of granular column, particle friction, and wall friction on the movement and accumulation characteristics of granular column. A review of the current research indicate that the research in the future will be focused on the relationship between forces acted on particles and movement regimes. The mechanisms of the effect of complex particle shape, surface, particle density, and water movement conditions on the movement and accumulation characteristics of granular column collapse will also be focused on in the future.

**Key words:** granular column collapse model; movement mechanism; accumulation characteristics; granular materials

颗粒是自然界中常见的物质存在形式,如泥沙、岩屑石块、矿石、种子、药丸等.由于其独特的物质形态,颗粒物质的动力学行为有时类似固体,有时类似流体,在时间和空间尺度上相互转化,具有多面性和复杂性.例如,岩质边坡坍塌运动、山体滑坡的发生,就是颗粒物质由固态转化为流态的复杂流变现象.此外,颗粒集合体坍塌运动与堆积现象在化工、农业和医药等多个领域均有涉及.近年来,国内外许多学者通过颗粒柱坍塌运动模型研究颗粒物质的坍塌运动与堆积特性.颗粒柱坍塌运动模型最早由 Lajeunesse 等<sup>[1]</sup>和 Lube 等<sup>[2]</sup>于 2004 年提出.由于此模型与众多工程实际问题相关,如在地质灾害或工业制造领域中,模型边界挡墙瞬间移除导致的颗粒柱坍塌运动可概化模拟岩质边坡坍塌、农业、化工、制药等工业中物料颗粒在筒仓或通道中的输运等问题,当挡墙缓慢移动时则可模拟土体的准静态失稳过程.近年来,颗粒柱坍塌运动模型引起了诸多领域学者们的广泛关注.

根据颗粒柱的初始形状和边界挡墙的移除方式,目前颗粒柱坍塌运动模型主要可以分为长方体单向运动模型<sup>[3-4]</sup>以及圆柱体对称运动模型<sup>[5-6]</sup>.尽管两者的几何形状与运动维度较为不同,但是其运动机制相同,因此获得的结论具有共性.目前,颗粒柱坍塌运动模型还被应用于验证颗粒物质动力学特性描述理论和数值模拟方法,如浅层流模型<sup>[7-8]</sup>、基于动力学理论或平均深度理论的连续体模型<sup>[9-10]</sup>、双颗粒温度热力学理论<sup>[11]</sup>、颗粒体系总摩擦因数连续性理论<sup>[12]</sup>、有限差分连续体模型<sup>[13]</sup>、考虑流变特性的 Navier-Stokes 连续体模型<sup>[14]</sup>、离散单元法

(DEM)<sup>[15-16]</sup>、粒子有限元法 (PFEM)<sup>[17-18]</sup>、有限元法 (FEM)<sup>[19]</sup>、光滑粒子流体动力学 (SPH) 法<sup>[20]</sup>、基于移动粒子半隐式法<sup>[21]</sup>和物质点法 (MPM)<sup>[22]</sup>等.由此可见,颗粒柱坍塌运动模型的应用十分广泛,已成为研究颗粒物质动力学特性的经典模型.

本文从影响颗粒物质运动与堆积特性的主要因素,如颗粒柱初始空间形态特征、颗粒基本物理特性、模型边界及环境条件等方面系统地概述了近年来国内外有关颗粒柱坍塌运动与堆积特性的研究进展,讨论了不同因素对颗粒柱动力与堆积特性的影响规律及作用机理,在总结已有成果的基础上,结合近年来工程实践遇到的科学问题,提出目前研究成果存在的争议性及未来研究应集中的方向,旨在提高对颗粒物质运动堆积基础问题的认识.

## 1 颗粒柱初始空间形态特征影响

颗粒柱初始几何形态一般为长方体或圆柱体,目前学者们从颗粒柱初始宽高比和孔隙率两方面对颗粒柱的初始空间形态特征进行描述,研究不同条件下颗粒柱坍塌运动与堆积特性的变化规律.

### 1.1 初始宽高比

颗粒柱的初始宽高比  $a$  决定了颗粒柱的运动机制能够显著影响其运动与堆积特性,这是目前学者们达成的一致结论.定义  $a = H_0/L_0$  (长方体模型)、 $a = H_0/R_0$  (圆柱体模型),模型示意图如图 1 所示.其中:  $H_0$  为颗粒柱初始高度;  $L_0$  为颗粒柱初始长度;  $b_0$  为颗粒柱初始宽度;  $R_0$  为颗粒柱初始半径;  $L_\infty$  为长方体颗粒柱的运动距离;  $R_\infty$  为圆柱体颗粒柱的运动距离.对于由单一粒径颗粒组成的长方体

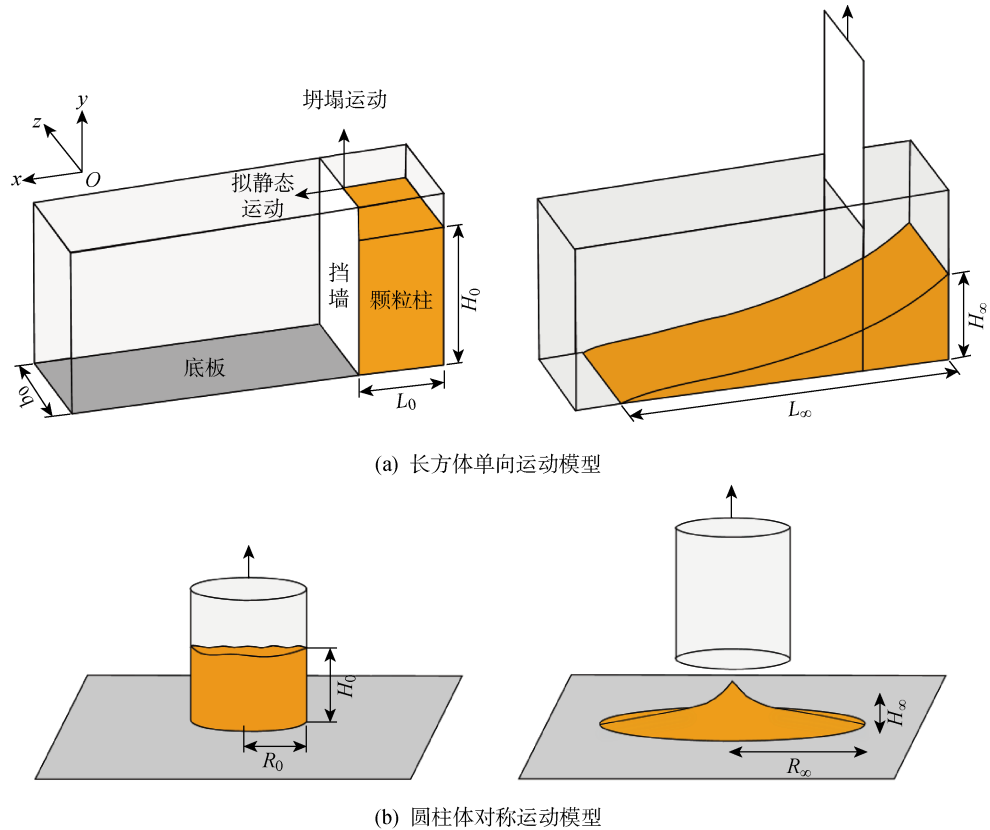


图 1 颗粒柱坍塌运动模型示意图

Fig. 1 Diagram of granular column collapse movement model

(圆柱体)颗粒柱的运动距离  $L_{\infty}$  ( $R_{\infty}$ ) 无量纲参数  $[L]$  ( $[R]$ ) 与  $a$  存在如下关系:

$$[L] = \frac{L_{\infty} - L_0}{L_0} \sim \begin{cases} a, & a \leq a_L \\ a^{c_1}, & a > a_L \end{cases} \quad (1)$$
$$[R] = \frac{R_{\infty} - R_0}{R_0} \sim \begin{cases} a, & a \leq a_R \\ a^{c_2}, & a > a_R \end{cases}$$

最大堆积高度  $H_{\infty}$  的无量纲参数  $[H]$  与  $L_0$ 、 $a$  存在如下关系:

$$[H] = \frac{H_{\infty}}{L_0} \sim \begin{cases} a, & a \leq a_H \\ a^{c_3}, & a > a_H \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $c_1$ 、 $a_L$ 、 $c_2$ 、 $a_R$ 、 $c_3$ 、 $a_H$  为与颗粒基本物理特性和模型边界条件有关的常数。

由式(1)和(2)可知,  $[L]$ 、 $[R]$ 、 $[H]$  与  $a$  之间存在线性和幂律的分段函数关系。一些学者<sup>[1-66]</sup> 通过物理试验和数值模拟获得的  $c_1$ 、 $a_L$ 、 $c_2$ 、 $a_R$ 、 $c_3$ 、 $a_H$  的分布值,如表 1 所示。由表 1 可知,当颗粒的基本物理特性和模型边界条件发生变化时, $c_1$ 、 $c_2$  受其影响不大且均为正数。这表明当  $a > a_L$  ( $a > a_R$ ) 时,  $[L]$  ( $[R]$ ) 与  $a$  之间的幂函数正相关关系具有较强的普适性。一些文献没有给全  $c_3$  的分布值,但是从已有的成果可以看出,当  $a > a_H$  时,  $[H]$  与  $a$  之间也存在正相关关系。

由于相同条件下,圆柱体和长方体的颗粒柱运动机制相同,所以下文以长方体颗粒柱为例进行分析。 $a$  决定了颗粒柱的运动机制,高、低颗粒柱不同坍塌运动机制示意图如图 2 所示,其中  $\alpha$  为破坏面倾角。低颗粒柱 ( $a < a_L$ ) 坍塌运动的主要部位是倾角约为  $\alpha$  的破坏面右上部,颗粒数目所占比例较小,剩余颗粒特别是远离破坏面的颗粒运动速度很小,该过程摩擦力起主导作用。对于高颗粒柱 ( $a > a_L$ ),其破坏面(倾角也为  $\alpha$ ) 左下方部位为静止区域,此处

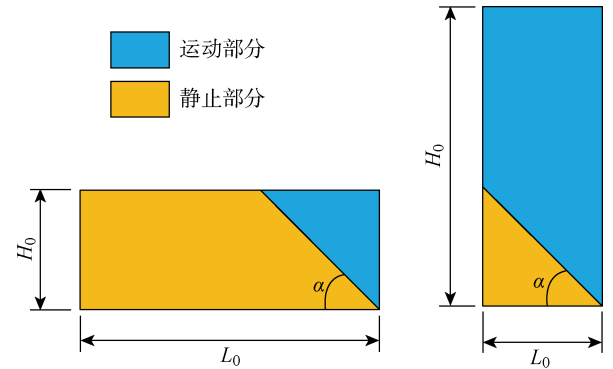


图 2 高、低颗粒柱的不同坍塌运动机制

Fig. 2 Different collapse movement regimes for granular columns at small and large aspect ratios

表 1 已有文献中  $c_1$ 、 $a_L$ 、 $c_2$ 、 $a_R$ 、 $c_3$ 、 $a_H$  参数取值分布

Tab. 1 Distribution of  $c_1$ 、 $a_L$ 、 $c_2$ 、 $a_R$ 、 $c_3$  and  $a_H$  parameter values in previous research

序号	文献	方法	模型	$c_1$ ( $c_2$ )	$a_L$ ( $a_R$ )	$c_3$	$a_H$
1	[1]	物理试验	圆柱体	0.50	0.7	—	0.7
2	[2]	物理试验	圆柱体	0.50	1.7	0.17	1.7
3	[4]	DEM 数值模拟	单向长方体	0.70	3.0	—	—
4	[6]	物理试验	单向长方体	0.66	2.3	0.40	1.2
5	[15]	DEM 数值模拟	双向长方体	0.68~0.73	2.0	0.35	1.0
6	[16]	DEM 数值模拟	单向长方体	0.67	3.0	0.33	0.7
7	[19]	FEM 数值模拟	单向长方体	0.68~0.77	4.0	—	—
8	[23]	物理试验	圆柱体	0.50	3.0	—	0.7
9	[23]	物理试验	单向长方体	0.67	3.0	0.33	0.7
10	[51]	DEM 数值模拟	单向长方体	0.68~0.71	2.5	—	—
11	[57]	物理试验	单向长方体	0.65~0.75	2.0	0.50~0.60	2.0
12	[62]	物理试验、DEM 数值模拟	单向长方体	0.69~0.84	2.2~4.0	—	2.0
13	[63-64]	物理试验	圆柱体	0.66	1.8	0.09	0.8
14	[66]	物理试验	单向长方体	0.50~0.69	1.1~1.6	—	5.0~7.0

颗粒几乎不发生运动,位于破坏面右上方颗粒则产生坍塌运动,颗粒数目所占比例较大,此过程惯性力起主导作用. Utili 等<sup>[3]</sup>和 Lajeunesse 等<sup>[23]</sup>认为  $\alpha$  与颗粒物质内摩擦角  $\phi$  满足 Rankine 理论<sup>[24]</sup> 即  $\alpha = 45^\circ + \phi/2$ , 而 Fern 等<sup>[25]</sup> 却提出  $\alpha$  与  $\phi$  相等, 最终 Xu 等<sup>[26]</sup> 在物理试验中采用粒子图像测速 (PIV) 技术直接测得破坏面倾角  $\alpha = 45^\circ + \phi/2$ , 证明了前者结论的正确性.

在低颗粒柱坍塌运动过程中,垂向应力与颗粒柱高度的相关性较大,越靠近颗粒柱底部位置的垂向应力,其分布值越大,而对于高颗粒柱,垂向应力呈“楔形”分布<sup>[27]</sup>. Xu 等<sup>[26]</sup> 在物理试验中采用接触式压力传感器获得了低颗粒柱 ( $a=1.8$ ) 运动过程中底部压力的分布规律,发现初始状态下小压力 (小于压力平均值) 的概率密度方程呈幂函数分布形式,大压力 (大于平均值) 的概率密度方程则满足 Gaussian 分布,随着坍塌运动的进行,颗粒柱底部压力分布整体减小. 然而,关于高颗粒柱底部压力随其运动的变化规律、颗粒受力与颗粒柱运动机制之间存在的内在联系,目前的研究仍十分不足.

此外,  $a$  显著影响颗粒柱坍塌运动中能量的演化规律. Zenit<sup>[28]</sup> 采用 DEM 模拟了  $a=0.3, 3.0, 12.4$  时, 二维长方形颗粒柱坍塌的运动过程, 发现  $a$  越大, 则颗粒柱相对势能的变化量与相对动能峰值越大, 堆积形态的变化也随之越大. Utili 等<sup>[3]</sup> 利用 DEM 获得了  $a=0.9, 3.3, 5.9, 9.3$  时, 三维长方体颗粒柱能量和动量通量的变化规律, 研究结果表明

颗粒柱坍塌运动的总能耗以颗粒摩擦耗能为主. 当  $a$  增大时, 系统总能耗随之增大, 相比于平动动能, 颗粒系统的转动动能很小, 可以忽略. 此外, 还建立了表征颗粒体动量通量以及瞬时冲击能量通量的无量纲参数, 为离散颗粒体系冲击特性的评估提供了理论基础. 由于 Utili 等<sup>[3]</sup> 模拟时采用理想化的圆球颗粒, 通过对颗粒施加抗转动系数人为控制其转动能力, 但能否忽略颗粒转动特性的影响仍有待进一步考证.

1.2 初始孔隙率

由于颗粒的离散特性, 颗粒在一定空间内堆积时总会存有孔隙, 如图 3 所示. 颗粒柱初始孔隙率  $n$  为孔隙体积占颗粒柱总体积 ( $H_0L_0$ ) 的比例. Kermani 等<sup>[5]</sup> 利用 DEM 分析了  $n(0.40 \leq n \leq 0.45)$  对颗粒柱坍塌运动的影响, 发现  $n$  对颗粒柱运动距离的影响不大, 但对堆积高度的影响显著,  $n$  越小, 初始颗粒柱密实度越大, 则堆积高度越大. Kermani 等<sup>[5]</sup> 认为在剪切作用下密实颗粒柱会产生“剪胀”现象, 松散颗粒柱则产生“剪缩”现象, 两者之间存在一个临界孔隙率值, 颗粒柱运动过程中经历长时间剪切作用后内部孔隙结构达到此临界状态, 因此, 水平运动距离受初始孔隙率影响微弱, 但文献<sup>[5]</sup> 没有解释为何  $n$  会对颗粒柱的堆积高度产生影响. Fern 等<sup>[22]</sup> 采用 MPM 分析了  $n(0.50 \leq n \leq 0.90)$  对颗粒柱运动特性的影响, 发现  $n$  越大, 颗粒柱发生运动部位的体积越大, 势能转化量越大, 水平运动距离就越远, 相同  $n$  条件下  $a$  越小, 则  $n$  的影响越明显. 上述

两种结论不同的原因可能在于文献[5]模拟  $n$  的分布范围过小,获得的结论代表性不强.

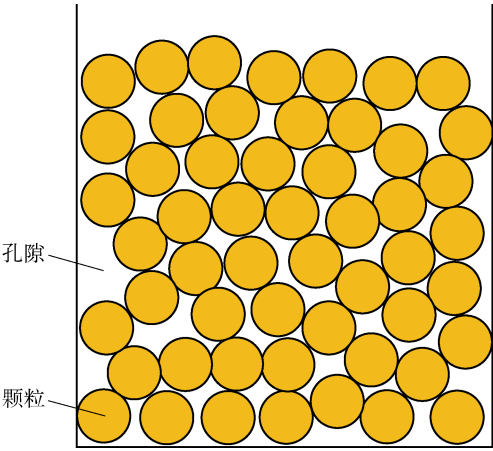


图 3 颗粒柱内部孔隙示意图

Fig. 3 Diagrammatic sketch of internal porosity of granular columns

当颗粒柱在液体环境中作坍塌运动时,  $n$  的影响机制将发生改变. Rondon 等<sup>[29]</sup>进行了不同  $n$  ( $0.38 \leq n \leq 0.45$ ) 条件下颗粒柱在液体环境中的坍塌运动物理试验,发现  $n$  对颗粒柱堆积形态的影响显著. 密实颗粒柱 ( $0.38 \leq n < 0.42$ ) 运动时产生“剪胀”现象,部分液体被吸入颗粒柱内部,在黏滞曳力作用下颗粒柱局部运动速度减慢,运动距离减小,而  $n$  对堆积坡度没有影响,均为颗粒材料的休止角度;松散颗粒柱 ( $0.42 \leq n \leq 0.45$ ) 运动时,将内部孔隙中的水体排出,形成颗粒柱局部流态化,使其运动速度加快,最终形成的堆积体较长,斜面坡度随着  $n$  的增大而增大. Yang 等<sup>[30]</sup>从细观角度解释了上述现象的形成原因,认为密实颗粒柱密集树枝状力链网络阻碍了颗粒体的剪切滑动,导致颗粒柱进行蠕变式缓慢运动,而松散颗粒柱则更易形成“滑水”式快速运动的模式,大大降低了摩擦阻抗. Lee<sup>[31]</sup>的物理试验表明了颗粒间孔隙压力对密实、松散颗粒柱运动的影响机制不同. 对于密实颗粒柱,颗粒间易形成负的超孔隙水压力,增大颗粒间的摩擦,阻碍颗粒柱坍塌运动;对于松散颗粒柱,颗粒间易形成较大的孔隙水压力,减小颗粒间的摩擦,促进颗粒柱坍塌运动.

2 颗粒基本物理特性影响

目前,关于颗粒基本物理特性对颗粒柱坍塌运动的影响研究主要集中在颗粒粒径、颗粒形状、颗粒摩擦、碰撞及变形特性、颗粒破碎与颗粒潮湿等方面. 不同的颗粒基本物理特性对颗粒柱坍塌运动的影响规律不同,作用机制也不同.

2.1 颗粒粒径

相对于具有不同  $H_0$ 、 $L_0$  的颗粒柱,同一颗粒粒径  $d$  的影响效应不同,因此采用无量纲参数  $L_0/d$  反映颗粒粒径与颗粒柱尺寸的相对大小. 现有研究指出当  $L_0/d$  至少为 10 时,颗粒集合体形成的剪切带和力链才能够被精准描述<sup>[32-33]</sup>,因此颗粒柱中的颗粒粒径  $d$  应小于  $L_0/10$ .

关于由单一粒径颗粒组成的颗粒柱, Lube 等<sup>[2]</sup> ( $12.7 \leq L_0/d \leq 303$ ) 和 Artoni 等<sup>[34]</sup> ( $14 \leq L_0/d \leq 35$ ) 的物理试验表明  $d$  对运动距离和堆积形态没有影响. 而 Gabrieli 等<sup>[35]</sup> 物理试验和 DEM 数值模拟却发现  $d$  ( $14 \leq L_0/d \leq 35$ ) 越大,则颗粒柱运动距离越远,堆积角度越低,当颗粒处于潮湿状态时,  $d$  的影响更为显著. Huang 等<sup>[36]</sup> 的物理试验结果表明当颗粒粒径增大时,颗粒柱运动距离减少,但试验所采用的不同粒径的颗粒密度有所不同,因此无法排除颗粒密度对上述规律的影响. 针对上述相悖的结论, Cabrera 等<sup>[37]</sup> 采用 DEM 研究了不同  $a$  ( $0.25 \leq a \leq 16$ ) 条件下,  $L_0/d$  ( $10 \leq L_0/d \leq 200$ ) 对颗粒柱运动堆积特性的影响规律,发现在特定范围内  $d$  才会对颗粒柱的运动时间和运动距离产生影响. 当低颗粒柱  $L_0/d \geq 75$  或高颗粒柱  $L_0/d \geq 50$  时,  $d$  对颗粒柱坍塌运动没有影响.

此外, Phillips 等<sup>[38]</sup> 开展了由两种粒径颗粒组成颗粒柱的运动特性试验研究,发现二元粒径颗粒柱的运动距离比仅由单一粒径颗粒组成的颗粒柱运动距离远. 当小粒径颗粒质量占颗粒体系总质量的比例  $\phi$  约为 0.3 时,颗粒柱运动距离达到最远;当  $\phi \leq 0.2$  时,小颗粒通过自身旋转促进大颗粒运动,随着  $\phi$  的增大,越来越多的大颗粒被小颗粒包裹,使其摩擦减少,整体运动距离增大;当  $\phi \geq 0.7$  时,由于相同体积的小颗粒比大颗粒产生的接触面积多,随着  $\phi$  的增大,颗粒摩擦接触增多、能耗增大,导致运动距离减小;当  $0.2 < \phi < 0.7$  时,颗粒系统处于以上两种作用机制的过渡阶段. 此外,颗粒密度对上述规律没有影响. Degaetano 等<sup>[39]</sup> 通过物理试验也获得了类似规律,当  $\phi = 0.5$  时,颗粒柱运动距离达到最远,颗粒的初始位置越高,其最终堆积位置越远,且大粒径颗粒比小粒径颗粒运动距离远.

一些学者还研究了由多种粒径颗粒组成的颗粒柱运动特性. Vallejo 等<sup>[40]</sup> 采用分形维数  $D$ <sup>[41]</sup> 描述了颗粒柱中小粒径颗粒的含量,  $D$  越大表示小粒径颗粒含量越多. 试验发现当  $D$  增大时,颗粒柱整体运动距离增大. 其原因在于当小粒径颗粒含量增多时,颗粒整体旋转运动增强,颗粒之间剪切摩擦减



弱. 随后, Lai 等<sup>[42]</sup>利用 DEM 进一步探讨了  $D$  的影响发现, 随着  $D$  的增大, 颗粒体断面水平运动速度由线性分布形式逐渐转变为幂律分布形式, 颗粒与底板之间形成边界层效应, 位于此处的颗粒受到强烈的剪切作用而获得较大的运动速度, 颗粒粒径越小, 受到的颗粒接触作用力越大, 导致其水平运动速度越大. 研究成果从细观角度揭示了小粒径颗粒对颗粒柱运动特性的“润滑”作用机制.

## 2.2 颗粒形状

颗粒形状提供了颗粒之间的咬合作用力, 进而导致颗粒具有抗转动的特性. Tapia-McClung 等<sup>[43]</sup>通过 DEM 将不同数目的圆球子颗粒组合成类似棒状的细长颗粒, 采用子颗粒的数目来表征颗粒的长度, 模拟了其组成颗粒柱坍塌的运动过程, 结果发现  $[L]$ 、 $[H]$  与  $a$  均存在如式(1)和(2)所示的函数关系, 颗粒长度对颗粒柱运动过程中的能量演化、等效摩擦力、最终运动距离与堆积高度影响很小, 上述结论与以往颗粒形状显著影响离散颗粒堆积形态和力学特性的认识相悖<sup>[44-45]</sup>, 而文献<sup>[43]</sup>也没有从本质上解释清楚上述现象的发生机制. Owen 等<sup>[46]</sup>分析了由复杂形状块体组成的颗粒柱运动的堆积特性, 发现块体颗粒形状越不规则, 颗粒柱运动距离越小, 堆积高度越大, 但没有明确指出颗粒形状的影响机制. Trepanier 等<sup>[47]</sup>利用物理试验研究了由异形长颗粒棒组成的颗粒柱坍塌运动与堆积特性, 发现当颗粒棒长度  $L_p$  与颗粒粒径  $d$  比值满足  $L_p/d > 24$  时, 颗粒柱保持稳定状态不发生坍塌; 当  $L_p/d \leq 24$  时, 存在颗粒柱初始高度值上下限临界值  $H_U$  和  $H_L$ , 当  $H_0 > H_U$  时, 颗粒柱必定失稳坍塌; 当  $H_0 < H_L$  时, 颗粒柱保持稳定状态不变; 当  $H_L \leq H_0 \leq H_U$  时, 颗粒柱的失稳坍塌概率随  $H_0$  线性增大. 张成功等<sup>[48]</sup>采用 DEM 模拟了球形、正四面体形和长条形颗粒的坍塌运动过程, 结果表明相比于纯球形颗粒, 颗粒的不规则形状降低颗粒角速度, 增大塌落高度, 减小运动距离. 复杂、异形颗粒形状对颗粒柱运动特性的影响机制仍需进一步研究.

有些学者在进行颗粒柱 DEM 数值模拟时, 向圆球施加抗转动系数以考虑颗粒不规则形状对颗粒转动的阻抗效应. Cleary 等<sup>[49]</sup>和 Kermani 等<sup>[5]</sup>的研究均表明当颗粒抗转动特性增强时, 颗粒转动减弱, 颗粒柱运动距离减小, 堆积高度增加. 但抗转动系数无法真实反映颗粒形状之间的咬合互锁效应, 施加抗转动系数的圆球颗粒柱运动距离往往比真实不规则形状的颗粒运动距离大很多.

## 2.3 颗粒摩擦碰撞及其变形特性

有关颗粒摩擦特性对颗粒柱运动距离与堆积形态影响的研究存在一些互相矛盾的结论. 有些学者认为颗粒摩擦特性没有影响, 如基于 DEM 数值模拟方法, Zenit<sup>[28]</sup>、Owen 等<sup>[46]</sup>和 Lo 等<sup>[50]</sup>分别考察了颗粒摩擦因数  $\mu_p$  ( $0.2 \leq \mu_p \leq 1.0$ ) 的影响, 均认为  $\mu_p$  对颗粒柱的运动堆积特征影响不大. 一些学者则认为  $\mu_p$  显著影响颗粒柱的运动特性. Staron 等<sup>[15, 51]</sup>的 DEM 数值模拟结果表明, 当  $\mu_p$  ( $0.01 \leq \mu_p \leq 2.00$ ) 增大时, 颗粒体与滑槽底部逐渐形成静止层, 导致颗粒柱运动距离减小. Cleary 等<sup>[49]</sup>发现当  $\mu_p$  ( $0.2 \leq \mu_p \leq 0.5$ ) 增大时, 颗粒柱运动距离减小, 堆积高度增大. 相关的 PFEM<sup>[17]</sup>、FEM<sup>[19]</sup>和 MPM<sup>[27]</sup>数值模拟研究均得到了类似结论.  $\mu_p$  对颗粒柱运动过程中的摩擦能耗起了决定作用, 特别是对于以摩擦力为主控作用力的低颗粒柱运动过程,  $\mu_p$  的影响会更加显著, 因此需结合颗粒柱初始宽高比  $a$  及其运动机制进一步探讨  $\mu_p$  的影响规律.

颗粒恢复系数  $e = \sqrt{\frac{H_2}{H_1}}$  反映了颗粒碰撞前后的

运动高度(速度)变化, 如图 4 所示, 其中:  $H_1$  为颗粒下落前高度;  $H_2$  为颗粒碰撞后的运动高度. 由能量守恒可知,  $e$  一般小于等于 1.0, 当  $e = 1.0$  时为弹性碰撞, 当  $e < 1.0$  时为非弹性碰撞. Staron 等<sup>[15, 51]</sup>采用 DEM 分析了  $e$  对颗粒柱坍塌运动的影响发现, 当  $e < 0.8$  时,  $e$  对颗粒柱运动堆积特性的影响可忽略; 当  $0.8 < e \leq 1.0$  时,  $e$  的影响则较为显著,  $e$  越大则运动距离越远, 且影响程度随  $a$  的增大而增大. Cleary 等<sup>[49]</sup>通过 DEM 数值模拟发现  $e$  ( $0.2 < e \leq 0.6$ ) 对颗粒柱最终运动距离和堆积高度几乎没有影响. Utili 等<sup>[3]</sup>利用 DEM 分别获取当  $e = 0.5, 1.0$  时, 颗粒柱能量和动量随运动时间的变化规律, 结果表明相比于  $e = 1.0$  时的情况, 当  $e = 0.5$  时, 颗粒柱的能量和动量整体分布形式变化不大, 但分布值有

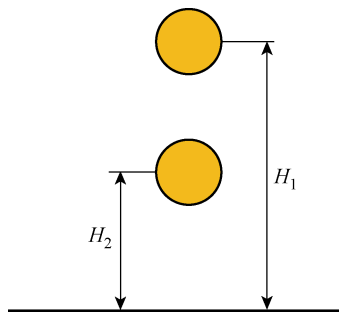


图 4 颗粒恢复系数示意图

Fig. 4 Diagrammatic sketch of restitution coefficient of particles

所改变,水平运动方向上的总动量衰减显著,垂向方向上的总动量变化不大。Jing 等<sup>[52]</sup>利用流固耦合 DEM-CFD(计算流体力学)数值模拟方法研究了不同  $e$  条件下,颗粒柱在水体环境中的坍塌运动过程,获得了与 Staron<sup>[15,51]</sup> 相同的结论,并建议在数值模拟时,取  $e=0.5$  可以在提高计算效率的同时实现对颗粒真实接触行为的模拟。

颗粒刚度表征颗粒在外荷载作用时抵抗自身弹性变形的能力,如图 5 所示,其中:  $F_n$  为颗粒法向荷载;  $F_s$  为颗粒切向荷载;  $k_n$  为颗粒法向刚度;  $k_s$  为颗粒切向刚度;  $u_n = F_n/k_n$  为颗粒法向变形;  $u_s = F_s/k_s$  为颗粒切向变形。当颗粒在法向荷载  $F_n$  和切向荷载  $F_s$  作用下,颗粒刚度(法向刚度  $k_n$  和切向刚度  $k_s$ )越大,则颗粒变形(法向变形  $u_n$  和切向变形  $u_s$ )越小,DEM 数值模拟时间步长越小,计算成本越大。目前已有研究均认为颗粒刚度对颗粒柱的运动堆积特性影响不大,但颗粒刚度越小,DEM 计算完成所需的时间就越短<sup>[16,46,52]</sup>,因此许多学者在 DEM 数值模拟时选取的颗粒刚度一般较实际值小,然而颗粒模拟刚度可比实际刚度具体小几个数量级,此方面的研究仍有待进行。

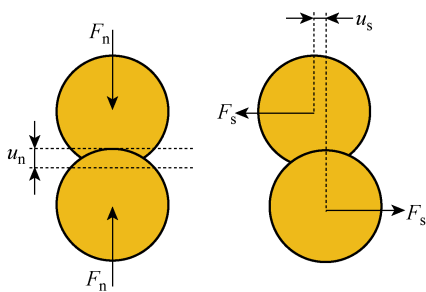


图 5 颗粒刚度示意图

Fig. 5 Diagrammatic sketch of particle stiffness

## 2.4 颗粒破碎与颗粒潮湿

自然界岩质边坡内部存在很多裂隙,这些边坡在坍塌运动时不断发生破碎,导致其运动距离显著提高<sup>[53]</sup>。此外,人工制造的脆性材料如玻璃、陶瓷、混凝土等,由于其材料内部存在诸多微裂纹,在冲击荷载作用下易发生破碎<sup>[54]</sup>。以此为研究背景,Langlois 等<sup>[4]</sup>采用 DEM 将颗粒柱中颗粒粘结为整体,并赋予不同的初始粘结强度以反映不同的裂隙发展程度,研究颗粒破碎对颗粒柱坍塌运动特性的影响。研究发现:当颗粒柱初始粘结强度降低(裂隙发展程度增强)时,颗粒破碎效应增强,颗粒柱滑动距离增大,堆积体表层光滑度提高,堆积形态不规则性降低;破碎后的颗粒累计体积分数比曲线约在 25% 和 75% 两处产生峰值,即呈双峰特征,同时  $[L]$  与  $a$  之间仍

满足式(1)和(2)的函数关系。图 6 定性地给出了不同初始粘结强度下颗粒柱堆积的形态示意图。

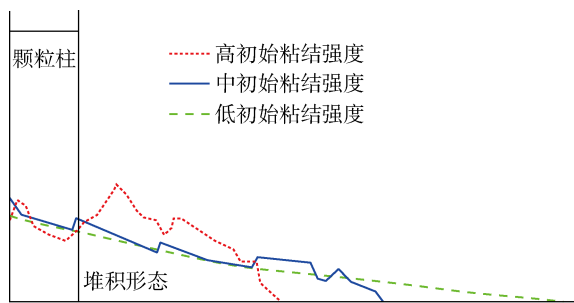


图 6 不同初始粘结强度下,颗粒柱的堆积形态示意图<sup>[4]</sup>

Fig. 6 Diagrammatic sketch of accumulation characteristics of granular columns at different initial bond strengths<sup>[4]</sup>

当颗粒之间存在少量液体(潮湿颗粒)时,颗粒的物理力学性质(如毛细力  $F_c$  的存在,如图 7 所示)将发生改变,进而影响颗粒集合体的动力学特性<sup>[55]</sup>。毛细力  $F_c$  的表达式如下:

$$F_c = \begin{cases} -\pi F_{st} \cos \theta d, & \delta_n < 0 \\ -\pi F_{st} \cos \theta e^{-\delta_n/\lambda}, & 0 \leq \delta_n \leq \delta_n^{\max} \\ 0, & \delta_n > \delta_n^{\max} \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $\delta_n$  为法向液桥距离;  $\delta_n^{\max}$  为法向脱粘距离;  $\theta$  为颗粒与液体接触角;  $F_{st}$  为液体表面张力;  $\lambda$  为与液体和颗粒物理属性相关的参数。Artoni 等<sup>[34]</sup>通过物理试验研究了局部低饱和状态下湿颗粒柱的运动堆积特性,结果表明当液体与颗粒的质量比  $w$  由 0.5% 增大至 1.0% 时,颗粒柱的运动距离减小,堆积高度增大,堆积角度增大;当  $w$  继续增大时,运动距离、堆积高度与角度则不再受其影响;相同  $w$  条件下,颗粒粒径  $d$  越大,则运动距离越大,堆积高度与角度越小。Gabrieli 等<sup>[35]</sup>通过物理试验和 DEM 数值模拟得到了相同规律。Fern 等<sup>[25]</sup>采用 MPM 研究了湿颗粒柱与干颗粒柱坍塌运动的差异,发现湿颗粒柱产生的破坏面较陡,坍塌运动的体积较小,颗粒刚体运动效应较明显。Bougouin 等<sup>[56]</sup>通过物理试验得到了潮湿颗粒柱坍塌后堆积的几何形状与表面张力、颗粒密度、粒径、颗粒柱初始宽高比、液桥距

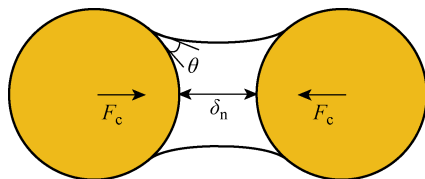


图 7 潮湿颗粒间毛细力示意图

Fig. 7 Diagrammatic sketch of capillary force between wet particles

离、斯托克斯数之间的定量函数关系。

液体改变颗粒柱动力学特性的机制在于:少量液体的存在将湿润颗粒表面积,导致颗粒之间产生毛细力,减弱颗粒柱的离散性,对颗粒柱的宏观运动起阻碍作用。随着  $\omega$  的增大,颗粒之间的控制力由摩擦力逐渐转变为毛细力;颗粒粒径决定了其表面积和质量的大小,颗粒重力、毛细力与其呈正相关关系,而颗粒重力对颗粒柱坍塌运动起到了促进作用,因此应采用颗粒毛细力与颗粒重力的比值描述  $\omega$  与  $d$  的综合作用。

### 3 模型边界及环境条件影响

颗粒柱边界一般采用刚性挡墙对其进行约束,刚性挡墙约束情况及其摩擦特性对颗粒柱的运动堆积过程具有一定的影响。此外,不同学者根据不同的研究背景分析了颗粒柱在气体掺入导致的流态化及水体环境作用下的运动堆积过程,取得了丰硕的研究成果。

#### 3.1 挡墙约束条件及摩擦特性

挡墙是颗粒柱运动的边界条件,其不同的移动方式决定了颗粒柱拟静态或坍塌运动的模式。Owen 等<sup>[46]</sup>和 Mériaux<sup>[57]</sup>在物理试验和 DEM 数值模拟中水平缓慢移动挡墙以模拟土坡的拟静态失稳过程,发现此过程并不满足 Mohr-Coulomb 破坏准则,系统能耗以摩擦能耗为主,颗粒碰撞能耗较少,挡墙移动速度  $v(1.8 \leq L_0/v \leq 26.1)$  对颗粒柱的运动堆积特征没有影响。Zhu 等<sup>[58]</sup>的物理试验发现二元粒径颗粒组成的颗粒柱拟静态运动过程中存在一个边界层,位于边界层以上的颗粒分层滑动,位于边界层以下的颗粒保持静止。Kermani 等<sup>[59]</sup>的研究结果表明,采用基于连续介质理论的光滑粒子流体动力学法和基于离散介质理论的离散单元法均可准确模拟颗粒柱拟静态运动过程,但后者对堆积尖角与颗粒前端模拟更精确,低颗粒柱堆积形态趋向于上端被截断的圆锥体,高颗粒柱堆积形态更相似于圆锥体。

挡墙的几何特征与位置对颗粒柱的坍塌运动过程也存在一定的影响。Girolami 等<sup>[60]</sup>采用 DEM 研究了颗粒柱在无侧限墙体约束下的运动堆积规律,发现颗粒柱运动堆积过程包括 3 个阶段,分别为自由落体、扩展运动和逐渐静止。 $[L]$  与  $a$  之间仍满足线性及幂律函数关系,当  $a \leq 3$  时,低颗粒柱以摩擦力为主控力,运动速度较慢,运动过程满足 Mohr-Coulomb 准则,形成堆积体的坡度与颗粒材料休止角度在相同数量级,堆积形态受侧限墙体的影响不大;当  $a \geq 3$  时,相比于侧限挡墙存在情况,无侧限约

束下颗粒柱逐渐静止阶段耗时长,最终形成堆积体沿  $x$  方向长度较长,堆积坡度约为颗粒材料休止角度的一半, $y$  方向的动量将会更大比例地传递至  $x$  方向。

有些学者还探讨了  $z$  方向挡墙宽度  $b_0$  对颗粒柱坍塌运动与堆积过程的影响。Balmforth 等<sup>[61]</sup>分别进行了极宽、极窄 ( $L_0/b_0$  分别为 0.1、2.0) 条件下的颗粒柱运动堆积物理试验,发现当  $b_0$  增大时,  $[L]$ 、 $[H]$  与  $a$  拟合得到的幂函数指数  $c_1$ 、 $c_2$  均增大。Lacaze 等<sup>[62]</sup>也开展了此方面的物理试验研究,发现当  $b_0$  越接近  $d$  时,颗粒柱局部结晶化现象越显著,而  $b_0$  越接近  $2d$  时,颗粒间的阻塞现象越明显。上述两种现象均会对试验结果产生影响,因此获得的试验规律不具有共性。文献<sup>[62]</sup>还指出当  $b_0 = 1.2d$  时,结晶化和阻塞效应最小,试验能够得到颗粒柱的典型运动堆积特征,随后利用 DEM 重现了该物理试验过程,发现内部静止区域上部的移动层速度满足线性分布形式。

农业工程中,经常将固体化肥或种子等颗粒堆积于以特定频率旋转的离心盘上使其分撒于指定范围。以此为研究背景,Warnett 等<sup>[63-64]</sup>利用物理试验研究了圆柱体颗粒柱在底板旋转状态下的坍塌运动过程。存在临界转动频率  $f_r$ ,当转动频率  $f < f_r$  时,颗粒柱运动不受其影响,当  $f \geq f_r$  时,颗粒柱首先坍塌运动平铺于底板,随后所受向心力大于摩擦力的颗粒将被抛向底板边缘,剩余的颗粒则形成半径为  $R_r$  的堆积主体,相比于底板的非旋转状态,旋转状态下颗粒柱的前端运动速度更快,  $[R]$  与  $a$  之间的关系如下:

$$[R] = \frac{R_\infty - R_0}{R_0} = \begin{cases} aC, & a \leq a_R \\ \frac{R_r - R_0}{R_0}, & a > a_R \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $C$  为与颗粒基本物理特性、模型边界条件有关的常数。

当  $a \geq \tan \phi - (2\pi f^*)^2$  (其中  $f^* = f \sqrt{R_0/g}$ ,  $g$  为重力加速度) 时,形成的堆积体顶端为圆锥型,反之则为截顶锥型。 $f^*$  和  $a$  越大,颗粒柱的坍塌运动时间越长。

Nikooei 等<sup>[65]</sup>初步开展了可侵蚀床面上的颗粒柱坍塌运动堆积特性模拟研究,相比于同等条件下的刚性床面,当颗粒柱在可侵蚀床面上运动时更多的势能转化为水平动能,进而促进颗粒柱的水平运动距离。尽管可侵蚀床面降低了颗粒柱的最大运动速度,但颗粒柱整体质量的增加使得颗粒柱的水平动量和冲击破坏力均有所增大。有关颗粒柱在可侵



蚀床面上的运动堆积机制研究才刚刚引起学者们的关注,此方面的研究仍需加强.

有关挡墙摩擦特性对颗粒柱运动堆积特征的影响规律,目前研究存在相互矛盾的结论. Crosta 等<sup>[19]</sup>的 FEM 数值模拟结果表明,挡墙摩擦因数  $\mu_w$  对颗粒柱运动过程的影响很小,但当颗粒柱位于可侵蚀底板时,颗粒柱运动距离减小,此时  $\mu_w$  越大,颗粒柱运动距离越小,堆积体前端越薄. Lube 等<sup>[2,6]</sup>和 Lajeunesse 等<sup>[1,23]</sup>通过物理试验也获得了  $\mu_w$  对颗粒柱运动堆积特性影响不大的结论. 而 Zhang 等<sup>[17]</sup>的 PFEM 数值模拟结果则表明,当  $\mu_w$  ( $0.36 \leq \mu_w \leq 0.58$ ) 增大时,颗粒柱的运动距离减小,堆积高度增大,且  $a$  越大,  $\mu_w$  的影响越显著. 因此有必要在  $\mu_w$  较大的分布范围内,结合其他因素如  $a$ 、 $\mu_p$ 、 $d$  等影响,细化  $\mu_w$  对颗粒柱运动堆积特征的影响规律,以获得适用性更为广泛的结论.

3.2 气体与水体作用

滑坡碎屑流运动过程中极易将其下方及前方的压缩气体裹入,从而产生流态化现象. 流态化现象是滑坡碎屑流高速远程特性形成的主要原因. 以此为研究背景, Roche 等<sup>[66]</sup>从颗粒柱底部注入空气使其内部产生气体孔隙压力,以减少颗粒间由摩擦效应产生的流态化现象,随后分析了掺气后颗粒体运动堆积过程,发现流态化现象对大颗粒 ( $d=330\text{ }\mu\text{m}$ ) 组成的颗粒柱运动影响很小. 这是因为气体孔隙压力在其运动后迅速衰减,颗粒之间的摩擦效应重新得到恢复. 而小颗粒 ( $d=75\text{ }\mu\text{m}$ ) 组成的颗粒柱在流态化效应影响下的运动距离增大,这是由于运动过程中颗粒柱内部孔隙压力始终保持在较大值,颗粒之间的摩擦阻力较小,颗粒柱的运动距离无量纲参数  $[R] = \lambda_1 a^{\lambda_2}$  ( $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$  为常数),其中  $\lambda_1$  随颗粒摩擦

因数的增大而增大,  $\lambda_2$  则不受颗粒摩擦因数的影响,但随着  $a$  的增大而减小. 由于流态化现象产生的振动波,导致颗粒柱最终的堆积形态呈现墨西哥帽型.

颗粒柱在有水环境中的坍塌运动机制与其在无水环境中不同,主要区别在于颗粒柱在无水环境中运动时前端松散,总是存在远离颗粒主体的散落颗粒;而在有水环境中颗粒柱开始运动时,其右上部开始运动的部位会形成涡旋,随后沿颗粒体的坍塌方向运动,颗粒体运动前端在水体作用下变得较为密实,没有远离颗粒主体的散落颗粒,水体的存在阻碍了颗粒体的坍塌运动,使其运动距离降低,如图 8 所示. 以海底滑坡为研究背景,景路等<sup>[67]</sup>和 Jing 等<sup>[52,68]</sup>采用流固耦合 DEM-CFD 数值模拟方法探讨了低 ( $a=1$ ) 和高 ( $a=8$ ) 颗粒柱在水体环境中的坍塌运动过程. 低颗粒柱的运动过程与上述过程相似;高颗粒柱的水中坍塌运动过程较为复杂. 首先,位于上表层的颗粒主要以自由落体的形式运动,水平位移较小,涡旋运动不明显;随后,颗粒开始堆积并进行以剪切摩擦为主的运动,颗粒体前端变得厚实,同时大量水体涡旋开始发育,颗粒体在其作用下运动速度变慢,并逐渐形成平铺型堆积体;在涡旋冲刷作用下,表层松散颗粒被带走,最终形成的堆积体表层凹凸不平,其中大部分初始势能发生转化,部分能量被水体黏性所消耗. 相比于相同条件下的无水环境,颗粒体表面离散介质受水流影响较大. 此外,当流体的斯托克斯数分布在  $0.06 \sim 6\,430$ 、颗粒与流体密度比分布在  $1.63 \sim 46.99$  时,颗粒柱在流体中的坍塌运动过程可分 3 个阶段,分别为自由下落阶段、流体惯性力作用阶段和黏滞力作用阶段. 随着流体的斯托克斯数的减少,颗粒柱坍塌运动机制由颗粒滑移主导逐渐转变为颗粒悬浮主导.

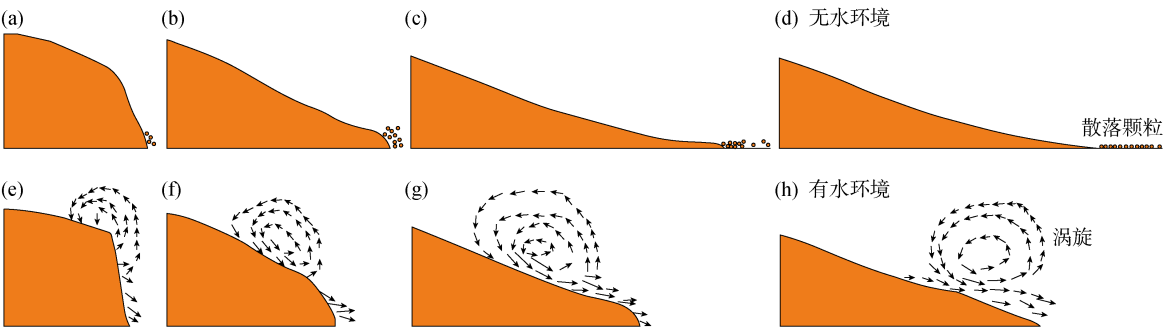


图 8 颗粒柱在无水、有水环境中坍塌运动过程示意图<sup>[67]</sup>

Fig. 8 Diagrammatic sketch of movement and accumulation process for dry and underwater granular columns<sup>[67]</sup>

4 结论

颗粒柱坍塌运动与堆积特性的研究是认识颗粒

物质动力学特性的基础性工作,不同领域的学者从很多影响因素方面开展了大量研究. 通过对相关国内外研究进行归纳,总结了颗粒柱初始形态特征、颗

粒基本物理特性、模型边界及环境条件等因素对颗粒柱运动堆积特性的影响规律与作用机制,其中一些研究结论已经形成统一的认识.针对目前的研究不足和存有分歧的结论,以下几个方面仍需进一步探索.

(1) 有关颗粒柱初始孔隙率、颗粒摩擦因数、挡墙摩擦因数对颗粒柱坍塌运动与堆积特性的影响规律及作用机制还没有形成统一的认识.目前,不同学者得到的研究结论不同甚至相悖,其原因可能在于所探讨的影响因素分布范围小,数值模拟研究受限于自身的计算原理与本构模型,分析其影响规律时没有充分结合颗粒柱初始几何尺度和其他颗粒的物理特性,关于此方面还需深入研究.

(2) 有关颗粒柱坍塌运动过程中内部力链与底部压力分布随初始宽高比变化规律的研究较少,受限于测试技术,目前相关物理试验仅能获取颗粒柱底部的压力分布,难以追踪其内部力链的动态变化规律,而 DEM 数值模拟能够弥补此不足.结合物理试验和 DEM 数值模拟从力学角度分析高、低颗粒柱运动机制的形成差异,揭示颗粒受力特性与颗粒柱运动模式的内联机制,对于提高颗粒动力学特性的认识十分必要.

(3) 复杂颗粒形状对颗粒柱坍塌运动与堆积特性的影响机制.颗粒形状是颗粒物质最基本的物理特性之一,现有研究涉及的颗粒形状较为规则简单或者仅对圆球施加抗转动系数,无法全面地反映颗粒形状的影响效应.研究复杂形状颗粒在运动过程中受力与运动特性,建立颗粒形状表征参数与颗粒柱运动堆积参数  $[L]$ 、 $[R]$ 、 $[H]$  之间的函数关系,这方面研究将有助于从理论上完善对颗粒材料动力学特性的描述.

(4) 滑坡碎屑流在运动堆积过程中对运动路径存在强烈的刮铲效应.目前,绝大部分研究仅关注颗粒柱在刚性床面上的运动堆积过程,涉及颗粒柱在可侵蚀床面上运动堆积机制的研究极少.刮铲效应对碎屑流运动特性和堆积范围的影响机制仍有待深入研究.此外,火山岩碎屑流中经常包含低密度浮石和高密度岩块,而目前涉及颗粒密度对颗粒柱坍塌运动与堆积特性影响机制的研究却十分不足.侵蚀床面和颗粒密度对颗粒柱坍塌运动与堆积特性的影响机制是后续研究中值得关注的问题.

(5) 散体岸坡在动水作用下的失稳运动机制.目前的研究多集中于颗粒柱在静水环境中的运动堆积过程,很少关注水流运动条件对颗粒柱运动与堆积特性的影响机制,此方面需给与重视.研究成果将

对深入了解地震等动荷载作用下海底泥石流的运动机制、我国西南多震库区泥石流、库岸滑动等灾害运动机制及其颗粒堆积后形成的堰塞坝特征等方面具有重要的意义.

## 参考文献:

- [1] LAJEUNESSE E, MANGENEY-CASTELNAU A, VILOTTE J. Spreading of a granular mass on a horizontal plane[J]. **Physics of Fluids**, 2004, 16(7): 2371-2381.
- [2] LUBE G, HUPPERT H E, SPARKS R S J, *et al.* Axisymmetric collapses of granular columns[J]. **Journal of Fluid Mechanics**, 2004, 508: 175-199.
- [3] UTILI S, ZHAO T, HOULSBY G T. 3D DEM investigation of granular column collapse: Evaluation of debris motion and its destructive power[J]. **Engineering Geology**, 2015, 186: 3-16.
- [4] LANGLOIS V J, QUIQUEREZ A, ALLEMAND P. Collapse of a two-dimensional brittle granular column: Implications for understanding dynamic rock fragmentation in a landslide[J]. **Journal of Geophysical Research: Earth Surface**, 2015, 120(9): 1866-1880.
- [5] KERMANI E, QIU T, LI T. Simulation of collapse of granular columns using the discrete element method[J]. **International Journal of Geomechanics**, 2015, 15(6): 04015004.
- [6] LUBE G, HUPPERT H E, SPARKS R S J, *et al.* Collapses of two-dimensional granular columns[J]. **Physical Review E**, 2005, 72(4): 041301.
- [7] KERSWELL R R. Dam break with Coulomb friction: A model for granular slumping? [J]. **Physics of Fluids**, 2005, 17(5): 057101.
- [8] LARRIEU E, STARON L, HINCH E J. Raining into shallow water as a description of the collapse of a column of grains[J]. **Journal of Fluid Mechanics**, 2006, 554: 259-270.
- [9] LEE C, HUANG Z H, CHIEW Y. A three-dimensional continuum model incorporating static and kinetic effects for granular flows with applications to collapse of a two-dimensional granular column[J]. **Physics of Fluids**, 2015, 27(11): 113303.
- [10] DOYLE E E, HOGG A J, MADER H M, *et al.* Modeling dense pyroclastic basal flows from collapsing columns [J]. **Geophysical Research Letters**, 2008, 35(4): 1-5.
- [11] 费明龙, 徐小蓉, 孙其诚, 等. 颗粒介质固-流态转变的理论分析及实验研究[J]. **力学学报**, 2016, 48(1): 48-55.

- FEI Minglong, XU Xiaorong, SUN Qicheng, *et al.* Studies on the transition between solid- and fluid-like states of granular materials[J]. **Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics**, 2016, 48(1): 48-55.
- [12] 孙倩, 彭天骥, 严安, 等. 密集颗粒流动的连续性方法应用研究[J]. **原子能科学技术**, 2019, 53(12): 2367-2374.
- SUN Qian, PENG Tianji, YAN An, *et al.* Application of continuum modeling of dense granular flow[J]. **Atomic Energy Science and Technology**, 2019, 53(12): 2367-2374.
- [13] HOLSAPPLE K A. Modeling granular material flows: The angle of repose, fluidization and the cliff collapse problem[J]. **Planetary and Space Science**, 2013, 82/83: 11-26.
- [14] LAGRÉE P Y, STARON L, POPINET S. The granular column collapse as a continuum: Validity of a two-dimensional Navier-Stokes model with a  $\mu(I)$ -rheology[J]. **Journal of Fluid Mechanics**, 2011, 686(6): 378-408.
- [15] STARON L, HINCH E J. Study of the collapse of granular columns using two-dimensional discrete-grain simulation[J]. **Journal of Fluid Mechanics**, 2005, 545: 1-27.
- [16] GIROLAMI L, HERGAULT V, VINAY G, *et al.* A three-dimensional discrete-grain model for the simulation of dam-break rectangular collapses: Comparison between numerical results and experiments[J]. **Granular Matter**, 2012, 14(3): 381-392.
- [17] ZHANG X, KRABBENHOFT K, SHENG D C. Particle finite element analysis of the granular column collapse problem[J]. **Granular Matter**, 2014, 16(4): 609-619.
- [18] 张雪, 盛岱超. 一种模拟土体流动的连续体数值方法[J]. **岩土工程学报**, 2016, 38(3): 562-569.
- ZHANG Xue, SHENG Daichao. Continuum approach for modelling soil flow in geotechnical engineering[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2016, 38(3): 562-569.
- [19] CROSTA G B, IMPOSIMATO S, RODDEMAN D. Numerical modeling of 2-D granular step collapse on erodible and nonerodible surface[J]. **Journal of Geophysical Research: Earth Surface**, 2009, 114(F3): 1-19.
- [20] WANG C, WANG Y Q, PENG C, *et al.* Two-fluid smoothed particle hydrodynamics simulation of submerged granular column collapse[J]. **Mechanics Research Communications**, 2017, 79: 15-23.
- [21] XU T B, JIN Y C. Modeling free-surface flows of granular column collapses using a mesh-free method[J]. **Powder Technology**, 2016, 291: 20-34.
- [22] FERN E J, SOGA K. The role of constitutive models in MPM simulations of granular column collapses[J]. **Acta Geotechnica**, 2016, 11(3): 659-678.
- [23] LAJEUNESSE E, MONNIER J B, HOMSY G M. Granular slumping on a horizontal surface[J]. **Physics of Fluids**, 2005, 17(10): 103302.
- [24] RANKINE W J M. On the stability of loose earth[J]. **Proceedings of the Royal Society of London**, 1857, 8: 185-187.
- [25] FERN E J, SOGA K. Granular column collapse of wet sand[J]. **Procedia Engineering**, 2017, 175: 14-20.
- [26] XU X R, SUN Q C, JIN F, *et al.* Measurements of velocity and pressure of a collapsing granular pile[J]. **Powder Technology**, 2016, 303: 147-155.
- [27] MAST C M, ARDUINO P, MACKENZIE-HELN-WEIN P, *et al.* Simulating granular column collapse using the Material Point Method[J]. **Acta Geotechnica**, 2015, 10(1): 101-116.
- [28] ZENIT R. Computer simulations of the collapse of a granular column[J]. **Physics of Fluids**, 2005, 17(3): 031703.
- [29] RONDON L, POULIQUEN O, AUSSILLOUS P. Granular collapse in a fluid: Role of the initial volume fraction[J]. **Physics of Fluids**, 2011, 23(7): 073301.
- [30] YANG G C, JING L, KWOK C Y, *et al.* Pore-scale simulation of immersed granular collapse: Implications to submarine landslides[J]. **Journal of Geophysical Research: Earth Surface**, 2020, 125(1): 1-26.
- [31] LEE C H. Underwater collapse of a loosely packed granular column on an inclined plane: Effects of the Darcy number[J]. **AIP Advances**, 2019, 9(9): 095046.
- [32] PETERS J F, MUTHUSWAMY M, WIBOWO J, *et al.* Characterization of force chains in granular material[J]. **Physical Review E**, 2005, 72(4): 041307.
- [33] TORDESILLAS A, WALKER D M, LIN Q. Force cycles and force chains[J]. **Physical Review E**, 2010, 81(1): 011302.
- [34] ARTONI R, SANTOMASO A C, GABRIELI F, *et al.* Collapse of quasi-two-dimensional wet granular columns[J]. **Physical Review E**, 2013, 87(3): 032205.
- [35] GABRIELI F, ARTONI R, SANTOMASO A, *et al.* Discrete particle simulations and experiments on the collapse of wet granular columns[J]. **Physics of**

- Fluids**, 2013, 25(10): 103303.
- [36] HUANG B L, WANG J, ZHANG Q, *et al.* Energy conversion and deposition behaviour in gravitational collapse of granular columns[J]. **Journal of Mountain Science**, 2020, 17(1): 216-229.
- [37] CABRERA M, ESTRADA N. Granular column collapse: Analysis of grain-size effects[J]. **Physical Review E**, 2019, 99(1): 012905.
- [38] PHILLIPS J C, HOGG A J, KERSWELL R R, *et al.* Enhanced mobility of granular mixtures of fine and coarse particles[J]. **Earth and Planetary Science Letters**, 2006, 246(3/4): 466-480.
- [39] DEGAETANO M, LACAZE L, PHILLIPS J C. The influence of localised size reorganisation on short-duration bidispersed granular flows[J]. **The European Physical Journal E**, 2013, 36(4): 1-9.
- [40] VALLEJO L E, ESPITIA J M, CAICEDO B. The influence of the fractal particle size distribution on the mobility of dry granular materials[J]. **EPJ Web of Conferences**, 2017, 140: 03032.
- [41] HOOKE R L B, IVERSON N R. Grain-size distribution in deforming subglacial tills: Role of grain fracture[J]. **Geology**, 1995, 23(1): 57-60.
- [42] LAI Z, VALLEJO L E, ZHOU W, *et al.* Collapse of granular columns with fractal particle size distribution: Implications for understanding the role of small particles in granular flows[J]. **Geophysical Research Letters**, 2017, 44(24): 12181-12189.
- [43] TAPIA-MCCLUNG H, ZENIT R. Computer simulations of the collapse of columns formed by elongated grains[J]. **Physical Review E**, 2012, 85(6): 061304.
- [44] 来志强, 周伟, 杨利福, 等. 基于离散单元法的溜砂坡堆积形态数值研究[J]. **中南大学学报(自然科学版)**, 2017, 48(7): 1839-1848.
- LAI Zhiqiang, ZHOU Wei, YANG Lifu, *et al.* Numerical study of accumulation state for sand-sliding slope based on distinct element method[J]. **Journal of Central South University (Science and Technology)**, 2017, 48(7): 1839-1848.
- [45] 李鹏鹏, 周伟, 熊美林, 等. 复杂形状颗粒 DEM 模拟及其对宏观力学响应影响研究[J]. **武汉大学学报(工学版)**, 2018, 51(6): 478-486.
- LI Pengpeng, ZHOU Wei, XIONG Meilin, *et al.* Study of DEM modeling of irregular shaped particle and its influence on macromechanical response[J]. **Engineering Journal of Wuhan University**, 2018, 51(6): 478-486.
- [46] OWEN P J, CLEARY P W, MÉRIAUX C. Quasi-static fall of planar granular columns: Comparison of 2D and 3D discrete element modelling with laboratory experiments[J]. **Geomechanics and Geoengineering**, 2009, 4(1): 55-77.
- [47] TREPANIER M, FRANKLIN S V. Column collapse of granular rods[J]. **Physical Review E**, 2010, 82(1): 011308.
- [48] 张成功, 尹振宇, 吴则祥, 等. 颗粒形状对粒状材料圆柱塌落影响的三维离散元模拟[J]. **岩土力学**, 2019, 40(3): 1197-1203.
- ZHANG Chenggong, YIN Zhenyu, WU Zexiang, *et al.* Three-dimensional discrete element simulation of influence of particle shape on granular column collapse[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2019, 40(3): 1197-1203.
- [49] CLEARY P W, FRANK M. Three-dimensional discrete element simulation of axi-symmetric collapses of granular columns[EB/OL]. (2006-06-22) [2019-09-09]. [https://www.researchgate.net/profile/Paul\\_Cleary2/publication/228530783\\_Three-Dimensional\\_Discrete\\_Element\\_Simulation\\_of\\_Axi-symmetric\\_Collapses\\_of\\_Granular\\_Columns/links/0c96053c3a9e9dfb82000000/Three-Dimensional-Discrete-Element-Simulation-of-Axi-symmetric-Collapses-of-Granular-Columns.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Paul_Cleary2/publication/228530783_Three-Dimensional_Discrete_Element_Simulation_of_Axi-symmetric_Collapses_of_Granular_Columns/links/0c96053c3a9e9dfb82000000/Three-Dimensional-Discrete-Element-Simulation-of-Axi-symmetric-Collapses-of-Granular-Columns.pdf).
- [50] LO C Y, BOLTON M, CHENG Y P. Discrete element simulation of granular column collapse[C]// **AIP Conference Proceedings**. 2009, 1145(1): 627-630.
- [51] STARON L, HINCH E J. The spreading of a granular mass: Role of grain properties and initial conditions[J]. **Granular Matter**, 2007, 9(3/4): 205-217.
- [52] JING L, YANG G C, KWOK C Y, *et al.* Dynamics and scaling laws of underwater granular collapse with varying aspect ratios[J]. **Physical Review E**, 2018, 98(4): 042901.
- [53] DAVIES T R, MCSAVENEY M J. The role of rock fragmentation in the motion of large landslides[J]. **Engineering Geology**, 2009, 109(1/2): 67-79.
- [54] 陈兴, 马刚, 周伟, 等. 无序性对脆性材料冲击破碎的影响[J]. **物理学报**, 2018, 67(14): 219-228.
- CHEN Xing, MA Gang, ZHOU Wei, *et al.* Effects of material disorder on impact fragmentation of brittle spheres[J]. **Acta Physica Sinica**, 2018, 67(14): 219-228.
- [55] SANTOMASO A C, VOLPATO S, GABRIELI F. Collapse and runout of granular columns in pendular state[J]. **Physics of Fluids**, 2018, 30(6): 063301.
- [56] BOUGOUIN A, LACAZE L, BONOMETTI T. Collapse of a liquid-saturated granular column on a hori-

zontal plane [J]. **Physical Review Fluids**, 2019, 4 (12): 124306.

[57] MÉRIAUX C. Two dimensional fall of granular columns controlled by slow horizontal withdrawal of a retaining wall[J]. **Physics of Fluids**, 2006, 18(9): 093301.

[58] ZHU H W, FENG Y D, LU D F, *et al.* Dynamics of quasi-static collapse process of a binary granular column[J]. **Powder Technology**, 2018, 339: 970-973.

[59] KERMANI E, QIU T. Simulation of quasi-static axisymmetric collapse of granular columns using smoothed particle hydrodynamics and discrete element methods[J]. **Acta Geotechnica**, 2020, 15(2): 423-437.

[60] GIROLAMI L, WACHS A, VINAY G. Unchannelized dam-break flows: Effects of the lateral spreading on the flow dynamics[J]. **Physics of Fluids**, 2013, 25 (4): 043306.

[61] BALMFORTH N J, KERSWELL R R. Granular collapse in two dimensions[J]. **Journal of Fluid Mechanics**, 2005, 538: 399-428.

[62] LACAZE L, PHILLIPS J C, KERSWELL R R. Planar collapse of a granular column: Experiments and discrete element simulations[J]. **Physics of Fluids**, 2008, 20(6): 063302.

[63] WARNETT J M, DENISSENKO P, THOMAS P J, *et al.* Collapse of a granular column under rotation [J]. **Powder Technology**, 2014, 262: 249-256.

[64] WARNETT J M, DENISSENKO P, THOMAS P J, *et al.* Scalings of axisymmetric granular column collapse[J]. **Granular Matter**, 2014, 16(1): 115-124.

[65] NIKOOEI M, MANZARI M T. Studying effect of entrainment on dynamics of debris flows using numerical simulation[J]. **Computers & Geosciences**, 2020, 134: 104337.

[66] ROCHE O, ATTALI M, MANGENEY A, *et al.* On the run-out distance of geophysical gravitational flows: Insight from fluidized granular collapse experiments[J]. **Earth and Planetary Science Letters**, 2011, 311(3/4): 375-385.

[67] 景路, 郭颂怡, 赵涛. 基于流体动力学-离散单元耦合算法的海底滑坡动力学分析[J]. **岩土力学**, 2019, 40(1): 388-394.

JING Lu, KWOK Chungyee, ZHAO Tao. Understanding dynamics of submarine landslide with coupled CFD-DEM[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2019, 40(1): 388-394.

[68] JING L, YANG G C, KWOK C Y, *et al.* Flow regimes and dynamic similarity of immersed granular collapse: A CFD-DEM investigation [J]. **Powder Technology**, 2019, 345: 532-543.

(本文编辑:石易文)