

一种表征粉体流动性的新方法

欧阳鸿武, 黄誓成, 王 琼, 刘卓民

(中南大学 粉末冶金国家重点实验室, 长沙 410083)

摘 要: 粉体同时具有固体和流体的特征, 粉体的“固-液”转变和表征粉体流动性成为粉体科学与工程中的一个热点和难点问题。根据低速转鼓中颗粒物质表面流动层剪切率 $\dot{\gamma}$ 的线性特征, 提出将 $t_{\dot{\gamma}}=1/\dot{\gamma}$ (即颗粒物质发生剪切变形的时间) 作为表征粉体流动性的参数, 并提出相应的测量和计算方法, 其结果与采用霍尔流量仪测得的数据在特定条件下有良好的 consistency。

关键词: 粉体; 流动性; 表征

中图分类号: TF 122.5 **文献标识码:** A

New method of charactering powder flowability

OU YANG Hong-wu, HUANG Shi-cheng, WANG Qiong, LIU Zhuo-min

(The National Key Laboratory of Powder Metallurgy, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: Granular matter behaves both like solid and liquid, and the solid-liquid transition as well as characterization of granular flow ability has been an intense research subject in physics and engineering. According to the linear characteristic of the velocity grads of the granular surface flowing layer, it is proposed that the deformation time $T_{\dot{\gamma}}$ can be used to describe the flow ability of granular matter. This method is simplicity and relevance, and the results are in good agreement with the data getting from the hopper and repose angle tests.

Key words: powder; flow ability; characterize

近年来, 颗粒物质之所以引起极大的关注, 其主要原因是人们开始将颗粒物质当作不同于固态、液态和气态的新物态来认知^[1]。静态颗粒物质能承载一定剪切应力而保持固定的形态, 当剪切应力一旦超过某一临界值时颗粒物质又可以像流体一样流动, 即颗粒物质同时具有固体和液体的秉性^[2]。颗粒物质屈服后的致密流动行为因颗粒物性、边界条件和初始条件的不同而异常复杂^[3-6]。

对于颗粒物质的固体/液体特征, 土木工程师和工艺师有不同的甚至互相矛盾的需要: 土木工程师希望颗粒物质保持固体状态, 而工艺师则希望颗粒顺畅流动。因为土木工程师担心颗粒屈服而发生运动; 工艺工程师则不希望材料在输送中(如料斗、管道)发生堵

塞。因此, 颗粒材料流动性的检测和表征一直是建筑师和工艺师共同关心的焦点。在粉末冶金^[7-8]、食品^[9-10]、制药^[11]、钢铁^[12]和农业^[13]等生产过程中, 广泛涉及到颗粒物质流动, 如筒仓卸料、传输、混合、流化和固/气分离等^[8, 10, 12], 把握颗粒材料的流动特性, 对于防止发生粉料堵塞、控制颗粒成分的均匀性和一致性都具有至关重要的意义。

颗粒流动性通常被定义为在给定环境下的流动特性^[14]或流动能力^[15]。据此人们相继发展出一些颗粒物质流动性的检测方法, 根据其测量参数和原理的不同, 可以归纳为两大类: 基于测量颗粒质量流率的方法(主要方法有霍尔流量仪^[7, 16], 低速转鼓中的颗粒物质的坍塌规模或质量流率^[9-11])和基于测量颗粒摩擦

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50574103, 10476034)

收稿日期: 2008-04-09; **修订日期:** 2008-08-25

通讯作者: 欧阳鸿武, 教授, 博士; 电话: 0731-8877192; E-mail: oyhw@mail.csu.edu.cn

的方法(静力学安息角^[7]、剪切单元^[17-18]、振实密度与松装密度之比^[8])。由于颗粒物质的流动不仅与颗粒物质的尺寸大小、形状、环境及干湿程度等^[3, 19]密切相关,还受到颗粒流动的边界条件和工艺条件(工艺参数和仪器尺度)^[3, 20]等因素的影响。颗粒物质流动性是颗粒物质抗剪切能力和保持流动状态能力的综合特性。因此,表征颗粒物质流动性的参数不仅要综合反映颗粒物性的本质特征,还应结合颗粒物质的运动状态和运动环境(边界条件和初始条件)。值得注意的是,以往的颗粒物质流动性测量方法都是一个灰色过程^[21-22],测量数据或结果大多不能反映流动状态和过程对剪切变形能力的影响而难以充分反映颗粒流动性的物理意义。因此,将颗粒物性、流动状态结合起来,综合表征颗粒物质的流动性成为必然。

采用转鼓研究颗粒材料的流动性始于20世纪90年代,CHEN^[9]通过测量转鼓中细小粉末或颗粒(咖啡、糖果、面粉、干奶粉)从转鼓径向孔中流出的粉末流率,并采用简化的Navier-Stokes微分方程,对粉末的连续液态流动能力进行分析。该方法的核心思想是“质量流”,与颗粒的漏斗流一脉相承,用它可以评估粉末粘性及密度对粉末流动性的影响,所预测的结果与实验数据一致^[9]。欧洲药典也提出一种采用转鼓测量药物粉末流动性的新方法^[11]:即将粉末颗粒装入转鼓中让其缓慢转动,测定固定转速下每旋转一圈颗粒发生坍塌的次数 N 。 N 越大,流动性越好; N 越小,流动性越差。该方法反映了颗粒流动的稳定性及临界转变,更重要的是涉及了坍塌及其规模,这是流动性测量概念的进步。

转鼓中颗粒表面流因流速不同从上到下可分为3个区域:即稀疏流动区^[23]、致密流动区^[5]和蠕变区^[24]。在低转速下,稀疏流动区很小(薄),致密流动区成为主要流动部分,蠕变层内颗粒的运动速度很慢流量很小(实验的尺度下),且从蠕变层到致密流动区域颗粒的流动速度呈线性分布^[5, 25]。在表面致密流动层中有效摩擦因数取决于剪切率^[3](即颗粒流动的速度梯度^[4]),因而剪切率的变化对颗粒流动特征和运动状态具有决定性影响。本文作者研究转鼓中多种颗粒材料的流动行为,依据低转速下转鼓中颗粒表层流速分布呈线性的特征,提出颗粒流动性的新定义,并将转鼓中颗粒流动的特征参数(如剪切速率或流动层厚度)与流动性联系起来,进而提出一种新的表征方法。

1 实验

实验所用的转鼓为半径 R 为130 mm,深度 L 为

62 mm的圆筒,端盖为透明玻璃。转鼓固定在由电动机驱动的水平转轴上,如图1所示。实验中,颗粒的填充率均为50%。滚筒的转动速率由变频微调装置控制,转速在0.8 r/min到110 r/min之间连续可调,读数精度为0.05 r/min。根据不同颗粒的实际运动情况,转速大致范围1~9 r/min时颗粒能够保持稳定的流动^[26],且自由表面保持平直。在转鼓正前方放置一台相机拍摄颗粒运动照片。图2所示为实验中典型的颗粒的流动情况实验照片。测量转鼓内颗粒流动表层厚度 h ,即测量从涡心(如图2所示的 O 点)到流动层表面的垂直距离^[3]。同时,确定稳定流动表面角,即动力学安息角 θ ,各参数的测量如图2(a)所示。

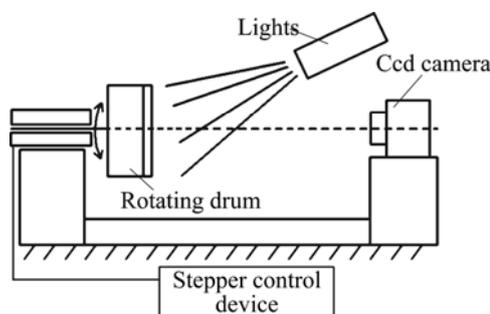


图1 实验装置示意图

Fig.1 Sketch of experimental equipment

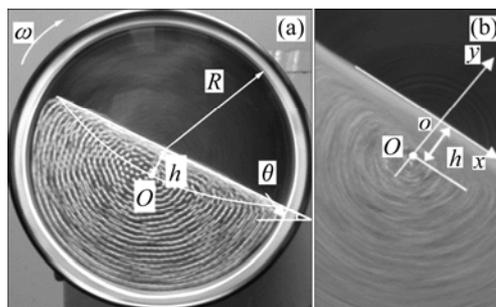


图2 典型实验图

Fig.2 Typical experimental images: (a) Sketch of parameters measurement; (b) Flowing layer of 0.104 mm sand near core

为了便于进行对比,分别测量平均粒度分别为0.104 mm CuP粉、0.05 mm Fe粉和0.104 mm沙子3种粉末流经霍尔流动仪(体积均为 25 cm^3)的时间 t 来预测3种粉末的流动能力,实验数据如表1所列。3种粉末的流动时间分别为57、61和65 s,它们的流动能力依次减弱。此外,动力学安息角 θ 同样可以用来表征颗粒流动能力^[5],即 θ 越大,流动能力越差。由表1中数据表明:0.104 mm CuP粉、0.05 mm Fe粉

和 0.104 mm 沙子 3 种粉末流动能力依次变差。两者的结果定性一致。

表 1 几种颗粒材料的 θ 和 t

Table 1 θ and t of different granular matter

Granular matter	$\theta/(\circ)$	t/s
0.104 mm CuP powder	29.5	57
0.05 mm Fe powder	30.1	61
0.104 mm sand	32.0	65

2 结果分析

2.1 颗粒物质流动性定义及其表征参数

2.1.1 颗粒物质的流动性

颗粒物质流动不仅对颗粒表面粗糙度及形状非常敏感, 并且, 特征尺度(如漏斗开口尺寸和颗粒尺寸等)对颗粒流动也有影响。因此, 不能通过单独分析某一个参数的变化而获得颗粒物质流动能力的全面认识。为此, 要对颗粒物质流动性进行明确定义和表征, 必须从颗粒物质流动的状态和过程出发, 综合反映出颗粒物质物性的差异, 寻求最能反映其流动本质的参数。

颗粒物质的固态和液态之间的转变是稳定性研究中的核心问题^[4]。根据早先对致密流动的研究^[3], 颗粒物质在颗粒尺度基础上的剪切变形才能使颗粒从静态向动态转变。因此, 颗粒物质在颗粒尺度基础上的剪切变形能力充分反映出颗粒物质流动机制。图 3 所示为 4 个颗粒组成的四面体结构^[27], 当倾斜度较低时颗粒能保持稳定, 当斜面倾斜度达到一个临界值, 上面颗粒在重力的切向分力作用下发生剪切变形而越过下面的颗粒, 产生一个颗粒尺寸的相对位移, 颗粒物质打破原来的稳定状态发生运动, 如图 4 所示。显然, 在不同剪切程度下颗粒的运动状态不同。颗粒物质的运动状态取决于一个无量纲的惯性数 I ^[23], 它描述了惯性与压力的比值。GDR MIDI 研究组^[3]把惯性数定义为压力 p 作用下颗粒的微观重排时间 t_p (表示上层颗粒落入下层中某一空位所耗的时间)与宏观剪切变形时间 t_y (表示上下两层颗粒发生相对位移为一个颗粒直径所耗的时间)的比, 即 $I=t_p/t_y$ 。根据 I 的大小可以将颗粒的运动分为 3 种状态^[23]: $I \leq 0.01$ 对应于土力学中的蠕变状态; $0.01 \leq I \leq 0.2$, 对应于动力学理论的致密流动; $I \geq 0.2$, 则对应于稀疏流动。研究表明^[3, 25]: 不同转速和转鼓直径下从涡心到自由表面的致密流动

区域内颗粒的剪切变形速率都具有线性变化特征, 平均剪切率 $\dot{\gamma}$ 体现了颗粒流动的平均剪切变形能力, 综合体现了颗粒尺寸、形状、摩擦因数及流动状态等因素的影响。

为此, 提出用致密颗粒流动层内平均剪切速率 $\dot{\gamma}$ 的倒数, 即颗粒物质的剪切变形时间 t_y 来表征颗粒物质的流动性:

$$t_y = 1 / \dot{\gamma} \tag{1}$$

通过测量颗粒物质的平均剪切率 $\dot{\gamma}$, 就可以得到 t_y , 以此表征颗粒物质的流动性。

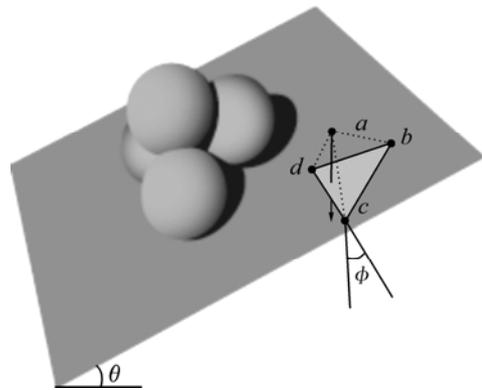


图 3 斜面上颗粒物质稳定模型

Fig.3 Stability model of granular matter in inclined plane

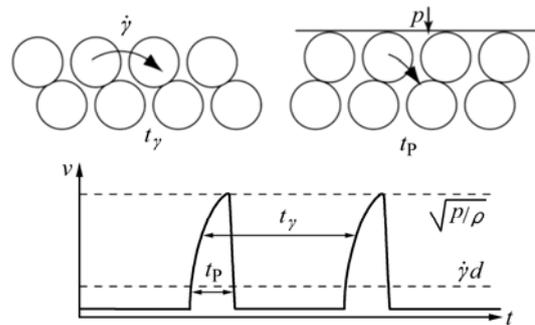


图 4 颗粒剪切变形时间 t_y 和重排时间 t_p 物理含义示意图

Fig.4 Schematic showing physical meaning of deformation t_y and rearranged timescale t_p

2.1.2 颗粒物质剪切率及其影响因素

颗粒在转鼓中的运动有一个显著特点, 即可以大致分为流动表层和静止底层两个区域, 将颗粒物质从静止状态发展到流动、再由流动通过堵塞转变为静止的全过程有机地统一起来。通过调节转鼓的旋转速度, 可控制颗粒物质的流动过程与流动状态。静止层(涡心以下区域)与流动层(涡心以上区域)单位宽度颗粒流率 $Q_{\text{下}}$ 和 $Q_{\text{上}}$ 分别为(坐标系如图 2 所示):

$$Q_{\text{下}} = \int_h^R \omega y dy = \frac{\omega(R^2 - h^2)}{2} \quad (2)$$

$$Q_{\text{上}} = \int_0^h v dy = \int_0^h y \dot{\gamma} dy = \frac{h^2 \dot{\gamma}}{2} \quad (3)$$

其中 R 为转鼓半径, h 为流动层厚度(颗粒直径的倍数), ω 为转鼓的转速, v 为颗粒流动速度, y 为图 2 坐标中颗粒沿 y 轴到原点 o 的距离。由于静止层与流动层的运动方向相反, 根据转鼓中质量流守恒, 则有 $Q_{\text{下}} = Q_{\text{上}}$, 可推出流动层中颗粒的平均剪切率 $\dot{\gamma}$:

$$\dot{\gamma} = \omega[(R/h)^2 - 1] \quad (4)$$

通过实验测量不同转速下表面流动层的厚度 h , 从而确定流动层的平均剪切率。将式(4)代入式(1)可得到 t_{γ} 的表达式:

$$t_{\gamma} = \frac{1}{\omega[(R/h)^2 - 1]} \quad (5)$$

由于 t_{γ} 为 h 和 ω 的函数, 耦合了颗粒物质的物性(形状、尺寸等)、剪切膨胀的基本物理特征及转速 ω (运动状态)的影响^[28]。流动层厚度 h 的变化(伴随颗粒物质密度的改变和流速的变化)体现了颗粒物质在不同转速下运动状态的改变。对于同一颗粒材料, 随着转速的改变 t_{γ} 会发生相应变化, 所以流动层厚度 h 能很好地体现运动过程的变化情形。可见, 颗粒物质的剪切变形时间 t_{γ} 能充分反映颗粒物质从静态到动态变化时的状态与过程, 以及保持运动状态的能力。用 t_{γ} 表征颗粒物质流动性不仅物理概念清晰, 而且测量过程的可操作性和重复性强。

2.2 几种颗粒材料流动性的表征

根据实验测得不同转速下转鼓中颗粒流动层厚度及式(5), 绘制 t_{γ} 与 ω 的关系, 如图 5 所示。由图 5 可以看出在同一转速下, 0.104 mm CuP 粉、0.05 mm 铁粉和 0.104 mm 沙子 3 种粉末的平均剪切变形时间依次变大, 所以它们的流动性也依次降低, 这与漏斗中预测的结果和运用动力学安息角预测结果都具有定性的一致。结果表明:

1) 颗粒物质的流动性不是一个定值, 在不同运动条件或运动状态下(如转速改变), “流动性”将发生变化。尽管致密流动层内颗粒的剪切率成线性关系, 但颗粒流是非牛顿流体, 在转鼓中其运动状态随转速的改变而变化, 当转速提高接近 9 r/min 时, 3 种不同颗粒物质的 t_{γ} 值逐渐达到相近的饱和值。这一方面说明外界条件的变化对于颗粒剪切能力有重要影响, 另一方面也表明, 在一定条件下不同颗粒物质的流动性可能会趋于一致。

2) 不同的颗粒(如粒径大小、形状不同)流动性存在一定差别。在特定条件和状态下, 颗粒物质的流动性具有稳定性, 测量结果重复性较好。BONAMY 等^[3, 27]研究发现球形颗粒在转鼓中稳定流动时的剪切率基本相同, 近似等于 $0.5\sqrt{g/d}$ 。由于本研究中的颗粒物质是具有一定粒度分布的异形粉末, 其实验结果有别于单一尺度球形颗粒的流动性。这表明异形粉末的剪切率因颗粒形状的改变而偏离了球形颗粒的特征, 说明颗粒形貌的变化将显著地影响颗粒物质的物性。

3) t_{γ} 耦合了颗粒物质的特征长度、边界/外部条件及颗粒物性对其流动性的影响, 深刻地反映了颗粒剪切变形能力随着流动状态和过程的变化而改变的特征, 用其来表征颗粒流动性具有可行性。测量颗粒物质在转鼓中流动层厚度随转速的变化情况(处于稳定流动时), 得到地结果与霍尔流动测试结果具有良好的 consistency, 可区分不同颗粒物质或不同流动状态下流动性的差异, 表明将转鼓作为测量颗粒物质流动性的装置具有可行性、良好的操作性和测量的准确性, 也避免了其他流动性测量方法的不足。

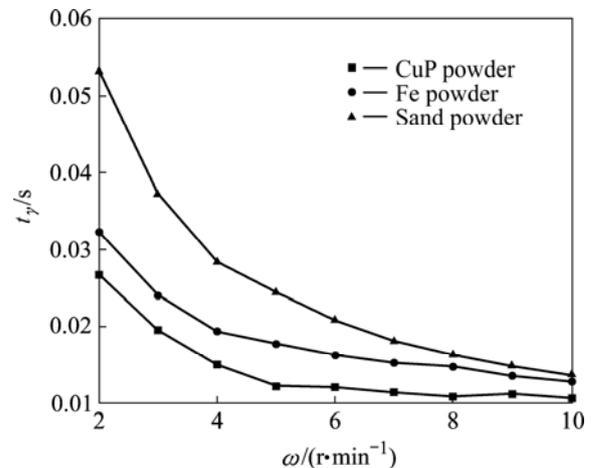


图 5 剪切变形时间随转速的变化

Fig.5 Relations between shearing deformation time and rotating velocity

3 结论

1) 颗粒间的剪切变形速率反映了颗粒物质抗剪切或保持稳定流动状态的能力。采用剪切变形时间 t_{γ} 作为颗粒物质流动性的表征参数, 不仅反映出颗粒流动的状态特征, 还综合了颗粒物性的影响。

2) 根据转鼓中颗粒物质流动层厚度或自由表面倾角, 获得流动层的剪切速率, 进而计算得到颗粒物

质的流动性, 方法简便可靠, 具有良好的一致性, 其结果与采用霍尔流动仪检测到的结果定性一致, 在一定条件下具有可比性。

REFERENCES

- [1] JAEGER H M, NAGEL S R, BEHRINGER R P. Granular solids, liquids, and glasses[J]. *Rev Mod Phys*, 1996, 68(4): 1259–1273.
- [2] HECKE M V. Granular matter: A tale of tails[J]. *Nature*, 2005, 435(7045): 1041–1042.
- [3] MIDI G D R. On dense granular flows[J]. *Eur Phys J E*, 2004, 14(4): 341–365.
- [4] ORPE A V, KHAKHAR D V. Solid-fluid transition in a granular shear flow[J]. *Phys Rev Lett*, 2004, 93(6): 068001–1–4.
- [5] POHLMAN N A, SEVERSON B L, OTTINO J M. Surface roughness effects in granular matter: Influence on angle of repose and the absence of segregation[J]. *Phys Rev E*, 2006, 73(3): 031304–1–9.
- [6] DE GENNES P G. Granular matter: a tentative view[J]. *Rev Mod Phys*, 1999, 71(2): 374–382.
- [7] 黄培云. 粉末冶金原理[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2004. HUANG Pei-yun. Elements of powder metallurgy[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2004.
- [8] HAUSNER H H. Friction conditions in a mass of metal powder [J]. *International Journal of Powder Metallurgy*, 1967, 3(4): 7–13.
- [9] CHEN X D. Mathematical analysis of powder discharge through longitudinal slits in a slowly rotating drum: Objective measurements of powder flowability[J]. *Journal of Food Engineering Volume*, 1994, 21(4): 421–437.
- [10] TEUNOU E, FITZPATRICK J J, SYNNOTT E C. Characterisation of food powder flowability[J]. *Journal of Food Engineering*, 1999, 39(1): 31–37.
- [11] XU X D, YAO S J, HAN N, SHAO B. Measurement and influence factors of flowability of microcapsules with high-content β -carotene[J]. *Chin J Chem Eng*, 2007, 15(4): 579–585.
- [12] SANTOMASO A, LAZZARO P, CANU P. Powder flowability and density ratios: the impact of granules packing[J]. *Chemical Engineering Science*, 2003, 58(13): 2857–2874.
- [13] PRASANNA KUMAR G V. Effect of drum-grain-operating parameters on the flow rate through the orifices on the rotating drum[J]. *Europhysics Letters*, 2005, 71(4): 576–582.
- [14] THALBERG K, LINDHOLM D, AXELSSON A. Comparison of different flowability tests for powders for inhalation[J]. *Powder Technology*, 2004, 146(3): 206–213.
- [15] LI Q, RUDOLPH V, WEIGL B, EARL A. Interparticle van der Waals force in powder flowability and compactibility [J]. *International Journal of Pharmaceutics*, 2004, 280: 77–93.
- [16] SCHÜSSELE A, BAUER-BRANDL A. Note on the measurement of flowability according to the European Pharmacopoeia[J]. *International Journal of Pharmaceutics*, 2003, 257: 301–304.
- [17] JENIKE A W. A measure of flowability for powders and other bulk solids[J]. *Powder Technology*, 1975, 11(1): 89–90.
- [18] SVAROVSKY L. Powder testing guide-methods of measuring the physical properties of bulk powders[M]. London: Elsevier, 1987.
- [19] FAQIH A M N, MEHROTRA A, HAMMOND S V, MUZZIO F J. Effect of moisture and magnesium stearate concentration on flow properties of cohesive granular materials[J]. *International Journal of Pharmaceutics*, 2007, 336(2): 338–345.
- [20] DURY C M, RISTOW G H. Boundary effects on the angle of repose in rotating cylinders[J]. *Phys Rev E*, 1998, 57(4): 4491–4497.
- [21] BEVERLOO W A, LENIGER H A, VAN DE VELDE J. The flow of granular solids through orifices[J]. *Chem Eng Sci*, 1961, 15(3/4): 260–269.
- [22] CLIFT R. Powder technology and particle science[J]. *Powder Technology*, 1996, 88(3): 335–339.
- [23] DA CRUZ F, EMAM S, PROCHNOW M, ROUX J N, CHEVIOR F. Rheophysics of dense granular materials: Discrete simulation of plane shear flows[J]. *Phys Rev E*, 2005, 72(2): 021309–1–17.
- [24] KOMATSU T S. Creep motion in a granular pile exhibiting steady surface flow[J]. *Phys Rev Lett*, 2001, 86(9): 1757–1860.
- [25] BONAMY D, DAVIAUD F, LAURENT L. Experimental study of granular surface flows via a fast camera: A continuous description[J]. *Physics of fluids*, 2002, 14(5): 1666–1673.
- [26] TABERLET N, RICHARD P, HINCH E J. S shape of a granular pile in a rotating drum[J]. *Phys Rev E*, 2006, 73(5): 050301–1–4.
- [27] NOWAK S, SAMADANI A, KUDROLLI A. Maximum angle of stability of a wet granular pile[J]. *Nature physics*, 2005, 1(1): 50–52.
- [28] FELIX G, FALK V, ORTONA U D. Granular flows in a rotating drum: the scaling law between velocity and thickness of the flow[J]. *Eur Phys J E*, 2007, 22(1): 25–31.

(编辑 陈爱华)