

稠密颗粒射流倾斜撞击颗粒膜特征

王悦 李伟锋 施浙杭 刘海峰 王辅臣

Characteristics of granular sheet of dense granular jet oblique impact

Wang Yue Li Wei-Feng Shi Zhe-Hang Liu Hai-Feng Wang Fu-Chen

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 67, 104501 (2018) DOI: 10.7498/aps.67.20172092

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20172092>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I10>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[稠密颗粒射流撞击壁面颗粒膜表面波纹特征](#)

Characteristics of surface waves on the granular sheet of dense granular jet impingement

物理学报.2016, 65(21): 214501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.214501>

[垂直气液两相流混沌吸引子单元面积分析](#)

Element area analysis of chaotic morphology of vertical gas-liquid two-phase flow

物理学报.2016, 65(3): 034701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.034701>

[椭球颗粒搅拌运动及混合特性的数值模拟研究](#)

Numerical simulation on stirring motion and mixing characteristics of ellipsoid particles

物理学报.2015, 64(11): 114501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.114501>

[密集剪切颗粒流中速度波动和自扩散特性的离散元模拟](#)

Velocity fluctuation and self diffusion character in a dense granular sheared flow studied by discrete element method

物理学报.2014, 63(13): 134502 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.134502>

[对颗粒物质运动的一致性进行控制的随机力场](#)

Control of the fluctuation in the uniform granular flow by a random force field

物理学报.2013, 62(16): 164502 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.164502>

稠密颗粒射流倾斜撞击颗粒膜特征*

王悦¹⁾²⁾ 李伟锋^{1)2)†} 施浙杭²⁾ 刘海峰¹⁾²⁾ 王辅臣¹⁾²⁾

1)(华东理工大学, 煤气化及能源化工教育部重点实验室, 上海 200237)

2)(华东理工大学, 上海煤气化工程技术研究中心, 上海 200237)

(2017年9月21日收到; 2018年3月16日收到修改稿)

采用高速摄像机对稠密颗粒射流倾斜撞击形成的类液体颗粒膜特征进行实验研究, 考察了颗粒粒径、射流速度以及射流含固率等因素对颗粒膜形态及动态特征的影响. 结果表明: 随着颗粒粒径增大, 稠密颗粒倾斜撞击流由颗粒膜向散射模式转变; 随着射流速度增加, 气固不稳定增强, 射流流量出现脉动, 正面与侧面分别表现为颗粒膜的非轴对称振荡和表面波纹结构; 颗粒膜非轴对称振荡的振荡频率和振荡幅度随射流速度的增大而增大; 表面波纹速度和波长沿传播方向增大, 波纹间存在叠加现象. 颗粒膜出现非轴对称振荡主要是因为喷嘴出口由气固不稳定性引起的射流流量脉动, 射流流量脉动频率与撞击面振荡频率基本相当.

关键词: 稠密颗粒射流, 撞击流, 颗粒膜, 非轴对称振荡

PACS: 45.70.Mg, 47.55.Ca, 47.60.Kz

DOI: 10.7498/aps.67.20172092

1 引言

自1961年前苏联科学家Elperin提出撞击流的概念之后, 众多学者对其进行了大量的研究. 因其独特的相间传递特性, 气固两相撞击流已被广泛应用于干燥、气化、燃烧、混合^[1-3]等工业过程中, 得到了众多学者的关注和研究. 因此对气固撞击流进行深入研究, 考察各种因素对气固撞击流流动形态的影响以及揭示撞击区颗粒运动特征具有重要的学术意义以及工业前景.

迄今为止, 已有较多学者对稀疏气固撞击流进行了实验和模拟研究. 刘红娟等^[4]基于玻尔兹曼方法对稀疏气固两相撞击流中单颗粒运动行为进行了模拟. 孙志刚等^[5,6]采用高速摄像机和PV6D型颗粒测速仪分别研究了单颗粒在撞击流中的运动特征和稀疏气固两相撞击流的流动特征. Xu等^[7]应用基于颗粒流动力学的欧拉-欧拉方法模拟了气固平面撞击流, 观察到了撞击面的周期性偏转振荡现象, 研究发现喷嘴间距、初始射流雷诺数和

颗粒粒径对振荡周期影响较大. 一些学者还利用DSMC(direct simulation Monte Carlo method)模拟对稀疏气固撞击流进行了研究. Du等^[8,9]通过改进的DSMC方法对稀疏气固撞击流进行了模拟, 结果发现可将其分为三个区域: 颗粒碰撞区、颗粒射流区以及颗粒散射区. Liu等^[10]在考虑颗粒自身旋转和碰撞的前提下, 采用基于三维的欧拉-拉格朗日方法的DSMC模拟对稀疏气固撞击流的流动特性进行了研究. 但是与稀疏气固两相撞击流相比, 稠密气固撞击流的相关研究非常有限.

一些学者对稠密颗粒射流撞壁进行研究, 发现稠密颗粒射流撞壁会形成类液体颗粒膜形态. Cheng等^[11]通过实验研究发现: 当稠密颗粒射流撞击有限尺寸壁面时, 会形成仅有几个颗粒厚度的类液体颗粒膜, 而随着颗粒射流内颗粒数量的减少, 其撞击形态由颗粒膜转变为散射形态. Cheng等^[12]还以颗粒流射流通过非圆形截面验证了颗粒膜的各向异性. Johnson和Gray^[13]使用实验和数值模拟手段对稠密颗粒射流撞击倾斜平板进行

* 国家自然科学基金(批准号: 91434130, 21776072)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: liweif@ecust.edu.cn

了研究,发现撞击后会形成月桂形的“水跃”现象. Boudet等^[14,15]研究了稠密颗粒射流撞击无限大壁面时颗粒膜波纹结构的产生和传播过程,发现颗粒膜上波纹的形成受到颗粒与平板之间摩擦力的影响.最近,本课题组也对稠密颗粒射流撞击圆形壁面进行了实验研究^[16-18],发现稠密颗粒射流撞击壁面后会呈现颗粒膜与散射形态,其形态主要受 D/d (D 为喷嘴直径, d 为颗粒粒径)与颗粒射流含固率的影响,同时在颗粒膜表面上可以观察到明显的波纹结构,形成表面波纹主要是因为颗粒射流在气固相互作用下变得不稳定.

目前为止,仅有的对稠密颗粒撞击流的研究均为实验模拟. Huang等^[19]在对撞壁流进行研究的基础上,采用离散单元法对两股对置稠密颗粒射流撞击进行了初步模拟.结果表明,稠密颗粒射流对置撞击后的运动形态与 d/D_{jet} (d 为颗粒粒径, D_{jet} 为射流直径)、法向弹性系数和撞击间距有关.在特定的撞击间距下,两股颗粒射流对置撞击形成颗粒膜. Ge等^[20]采用能量最小多尺度模型(EMMS)模拟了两股颗粒射流倾斜撞击,结果表明,在质量流量相同的情况下,撞击后颗粒会发生振荡. O'Rourke和Snider^[21]采用基于MP-PIC (multiphase-particle-in-cell)方法的修正BGK (Bhatnagar, Gross, and Krook)颗粒碰撞模型对稠密颗粒射流倾斜撞击进行数值模拟,发现当不考虑颗粒间的碰撞作用时,两股稠密颗粒射流倾斜撞击的流股相互交叉流过;考虑颗粒间碰撞阻尼作用时,两股颗粒射流发生弯曲;当同时考虑碰撞阻尼和各向异性作用时,撞击后的颗粒发生散射. Elowitz^[22]观察到稠密颗粒对置撞击表现出的类流体现象之后,为了研究二者相似的原因,采用离散单元法进行了模拟.结果表明,两股稠密颗粒射流撞击之后会产生驻点振荡现象,撞击形态与颗粒本身性质无关.值得注意的是,上述模拟结果尚无实验数据进行验证,因此非常有必要对稠密颗粒射流撞击进行实验研究.

本文以华东理工大学多喷嘴对置式气化炉为研究背景,采用高速摄像机和图像处理软件对稠密颗粒射流倾斜撞击过程进行了实验研究,考察了颗粒粒径、射流速度以及含固率等因素对类液体颗粒膜形态的影响.本文旨在揭示稠密颗粒射流倾斜撞击过程中类流体结构及其形成机理,为工业应用中

广泛出现的稠密颗粒射流撞击流提供理论依据.

2 实验方法

2.1 实验装置及流程

稠密颗粒射流倾斜撞击实验装置和流程如图1所示,实验在常温下进行,密闭储料罐内的玻璃微珠在钢瓶中高压空气的推动作用下,从两个间隔一定间距、呈一定角度的喷嘴中喷出,形成两股稠密颗粒射流,然后撞击形成稠密颗粒撞击流.通过调节储料罐内的空气压力可以改变喷嘴出口质量流量.如图1(a)和图1(b)所示,金属喷嘴出口直径 $D = 3$ mm,两喷嘴出口夹角 2θ 为 60° ,撞击间距 $L/D = 3$ (L 为两喷嘴中心点直线距离).颗粒为玻璃微珠,密度 $\rho_p = 2490$ kg/m³,粒径 $D_p = 82, 122, 184$ 和 246 μm .实验中,采用FASTCAM APX-RS型高速摄像机,在1300 W的卤素聚光灯的照射下,分别从侧面(yox 平面)和正面($yozy$ 平面)对颗粒撞击区的流场形态进行拍摄,拍摄的快门速度为1000 fps或3000 fps,曝光时间为 $1/8000$ s,拍摄图片分辨率为 1024×1024 .

定义喷嘴出口处颗粒射流含固率:

$$x_p = \frac{m_p}{Au_0\rho_p}, \quad (1)$$

其中 u_0 为喷嘴出口截面平均速度(m/s); m_p 为喷嘴出口质量流量(kg/s); ρ_p 为颗粒密度(kg/m³); A 为喷嘴出口截面积(m²),可通过上述含固率的计算公式得到不同工况下稠密颗粒射流的含固率值.实验中对不同颗粒粒径含固率随颗粒射流速度的变化规律进行了测量,结果如图2所示.实验结果表明,相同颗粒射流速度下,稠密颗粒射流含固率随颗粒粒径的增大而减小.

实验中采用PV6D型颗粒速度测量仪对稠密颗粒射流在喷嘴出口的截面平均速度(u_0)进行测量,通过计算两通道信号互相关函数来测量颗粒运动速度.互相关函数曲线最大值处的延迟时间为 τ ,为被测稠密颗粒射流通过某一个固定距离 $l = 2.1$ mm的时间,通过 $V = l/\tau$ 可得颗粒在这段距离内的平均运动速度,实验中测量次数不小于20次,测量误差小于5%.图1(b)为稠密颗粒射流倾斜撞击中颗粒膜上波纹传播过程的示意图.在正面示意图($yozy$ 平面)中,通过跟踪单位时间内波峰的

位移可得该位置处的波纹传播速度 u_s ; 通过跟踪 10 个表面波纹的波峰经过同一位置处的时间, 然后同一个数据点测量 10 次取平均值, 则可得到表面波纹传播频率 f_s ; 颗粒膜在沿 y 轴正方向上两相邻波峰间的距离为波长 λ_s . 通过测量 500 张叠加的正面和侧面图片中颗粒膜形成的角度可分别得到正面

扩展角 (α) 与侧面扩展角 (β). 在侧面示意图 ($yo x$ 平面) 中, 定义某位置处波峰的 x 坐标值为颗粒膜振荡幅度 A_b ; 颗粒膜非轴对称振荡频率 f_b 的测量方法与表面波纹传播频率 f_s 的测量方法相同. 本文在处理实验数据时, 同一数据点重复测量 10 次, 10 次测量结果的标准方差在图中用误差棒表示.

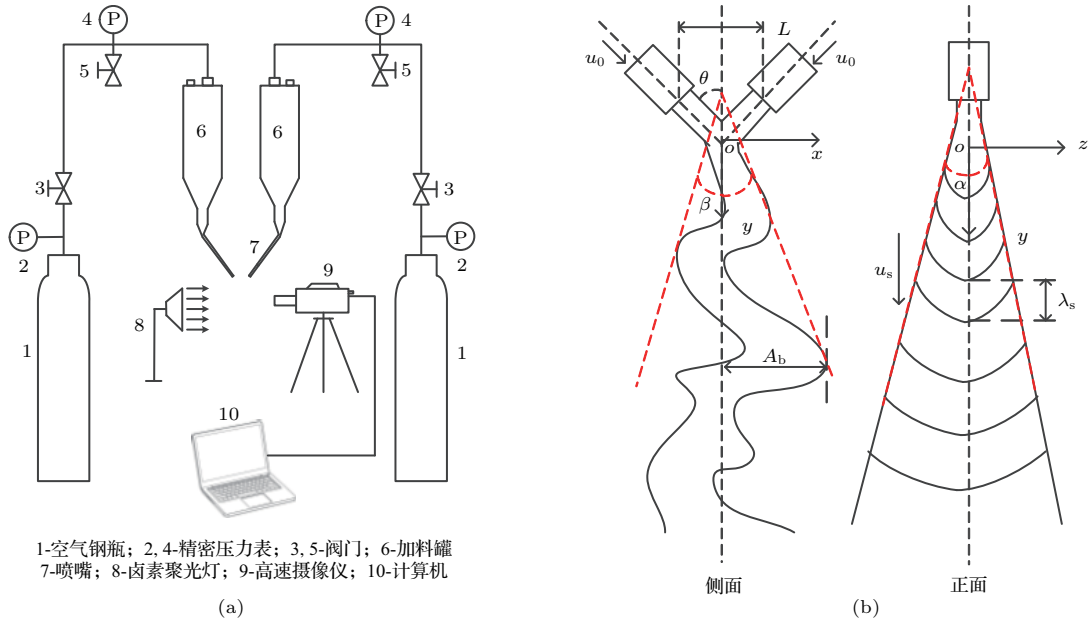


图 1 稠密颗粒射流倾斜撞击实验图 (a) 流程图; (b) 流场示意图

Fig. 1. Sketch of the experimental setup of dense granular impinging jets: (a) Flow chart; (b) flow diagram.

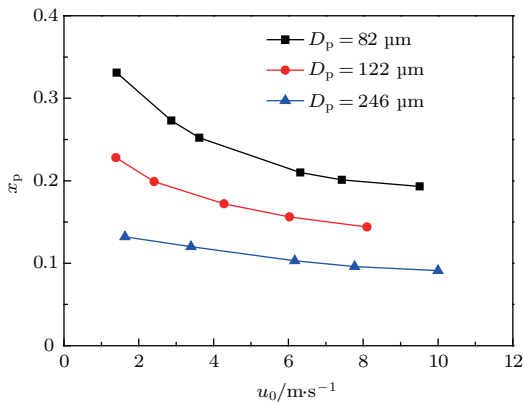


图 2 不同颗粒粒径含固率随射流速度的变化

Fig. 2. Solid content of different particle diameter varies with granular jet velocity.

3 结果与讨论

3.1 稠密颗粒射流倾斜撞击运动特征

图 3 为不同颗粒粒径下稠密颗粒射流倾斜撞击的可视化图像. 由图 3 可知, 稠密颗粒射流倾斜

撞击表现出两种形态: 当颗粒粒径为 $82 \mu\text{m}$ 时, 撞击后形成较平滑的颗粒膜形态, 与液膜类似; 当颗粒粒径为 $246 \mu\text{m}$ 时, 撞击后的许多颗粒沿轴向 (x 方向) 运动, 呈现为散射形态. 这是因为随着颗粒粒径的增大, 颗粒射流含固率减小, 单位体积内所含颗粒数目减少, 颗粒运动自由程增加, 颗粒间碰撞概率减小, 颗粒膜形态消失 [12].

图 4(a)–(c) 与图 4(d)–(f) 分别为不同颗粒射流速度下的稠密颗粒射流倾斜撞击侧面与正面的可视化图像. 从图 4(a)–(c) 可以看出, 在颗粒射流速度较小时, 颗粒撞击后呈现为竖直的颗粒膜形态, 几乎稳定在与两射流垂直的平面内, 不发生振荡. 随着射流速度的增加, 颗粒膜发生弯曲、摆动, 呈现非轴对称振荡. 如图 4(d)–(f) 所示, 在颗粒膜表面上可以观察到明显的波纹结构, 由撞击中心沿 y 轴正向发展. 随着射流速度的增大, 由于颗粒膜发生非轴对称振荡, 均匀分布的细小波纹逐渐演变为波长增大的显著波纹.

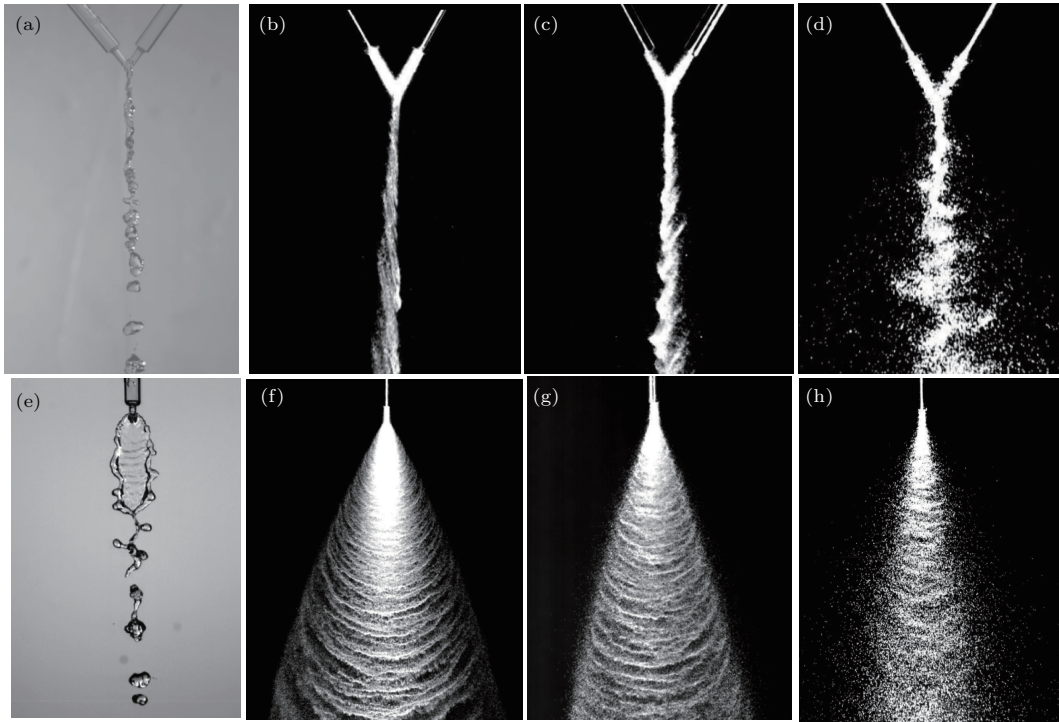


图3 稠密颗粒射流倾斜撞击流动模式可视化图像 (a), (e) 水, $u_0 = 1.46$ m/s; (b), (f) $D_p = 82$ μ m, $u_0 = 1.41$ m/s, $x_p = 0.32$; (c), (g) $D_p = 122$ μ m, $u_0 = 1.39$ m/s, $x_p = 0.23$; (d), (h) $D_p = 246$ μ m, $u_0 = 1.64$ m/s, $x_p = 0.13$

Fig. 3. Flow regimes of dense granular impinging jets: (a), (e) Water, $u_0 = 1.46$ m/s; (b), (f) $D_p = 82$ μ m, $u_0 = 1.41$ m/s, $x_p = 0.32$; (c), (g) $D_p = 122$ μ m, $u_0 = 1.39$ m/s, $x_p = 0.23$; (d), (h) $D_p = 246$ μ m, $u_0 = 1.64$ m/s, $x_p = 0.13$.

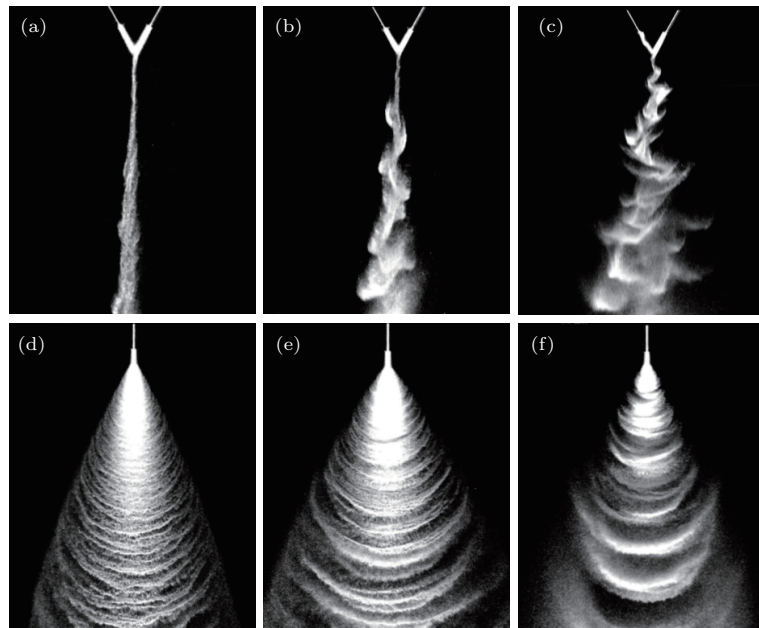


图4 稠密颗粒射流倾斜撞击振荡模式可视化图像 ($D_p = 82$ μ m) (a), (d) $u_0 = 1.41$ m/s, $x_p = 0.33$; (b), (e) $u_0 = 3.62$ m/s, $x_p = 0.25$; (c), (f) $u_0 = 7.43$ m/s, $x_p = 0.20$

Fig. 4. Images of surface waves of dense granular impinging jets at $D_p = 82$ μ m: (a), (d) $u_0 = 1.41$ m/s, $x_p = 0.33$; (b), (e) $u_0 = 3.62$ m/s, $x_p = 0.25$; (c), (f) $u_0 = 7.43$ m/s, $x_p = 0.20$.

图5为稠密颗粒射流倾斜撞击颗粒膜正面与侧面扩展角的变化特征. 结果显示, 随着射流速度的增大, 颗粒膜正面扩展角先增大后减小, 而侧面

扩展角一直增大. 将图5与图4进行对比, 可以发现, 颗粒膜正面扩展角达到峰值时的速度与颗粒膜开始发生非轴对称振荡对应的速度基本一致. 当颗

粒膜发生非轴对称振荡时, 颗粒除了具有沿竖直方向 (yoz 平面) 的分速度之外, x 方向也存在分速度, 因此正面扩展角减小, 侧面扩展角增大. 从图 5 中还可以看出, 在相同射流速度下, 颗粒膜正面扩展角随颗粒粒径的减小而增大, 侧面扩展角随颗粒粒径的变化不明显. 这是因为随着颗粒粒径的增大, 含固率降低, 稠密颗粒射流撞击形态由颗粒膜逐渐向散射形态转变, 颗粒也向 x 轴方向运动, 颗粒变得分散, 正面扩展角减小; 对于侧面扩展角而言, 改变颗粒粒径对其扩展角的影响不明显, 说明射流速度对侧面扩展角的影响大于颗粒粒径对其的影响.

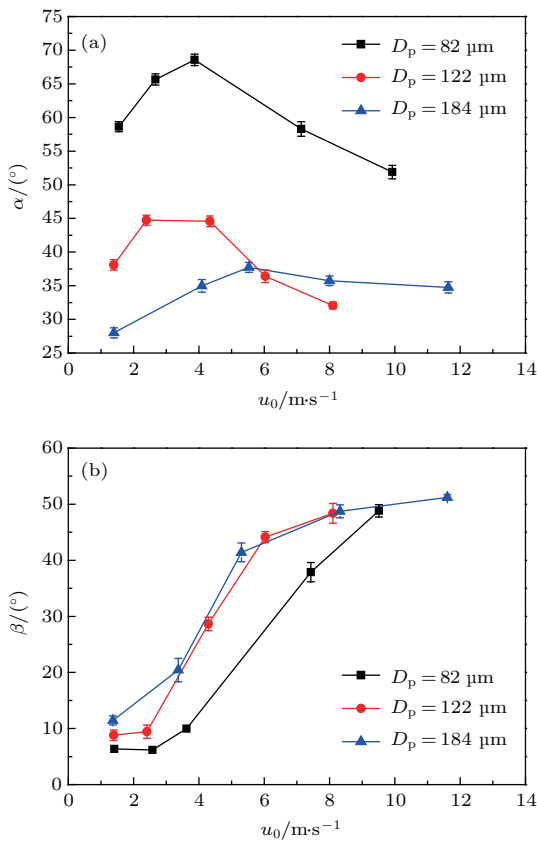


图 5 扩展角随射流速度变化特征 (a) 正面扩展角; (b) 侧面扩展角
Fig. 5. Variation of opening angles with velocities from the front view (a) and the side view (b).

3.2 稠密颗粒射流倾斜撞击颗粒膜动态特征及影响因素

从图 4(a)—(c) 中可以看出, 颗粒膜非轴对称振荡由撞击点处产生, 沿着 y 轴距离的增大, 其振幅逐渐增大. 在靠近撞击点处, 颗粒膜振幅较小, 统计困难; 在距离撞击点较远处, 颗粒膜上的颗粒发生散射, 其振幅较难清晰分辨, 统计误差较大, 因此选取 $y/D = 4$ 作为特征位置对颗粒膜的非轴对

称振荡进行表征. 图 6 为稠密颗粒射流倾斜撞击颗粒膜侧面 $y/D = 4$ 处的非轴对称振荡频率和无量纲振荡幅度 (A_b/D) 随射流速度的变化特征. 从图 6 中可以看出, 随着射流速度的增加, 颗粒膜振荡频率与无量纲振荡幅度均增大; 随着颗粒粒径的增大, 颗粒膜非轴对称振荡频率减小, 无量纲振荡幅度增大; 颗粒膜进行准周期的非轴对称振荡.

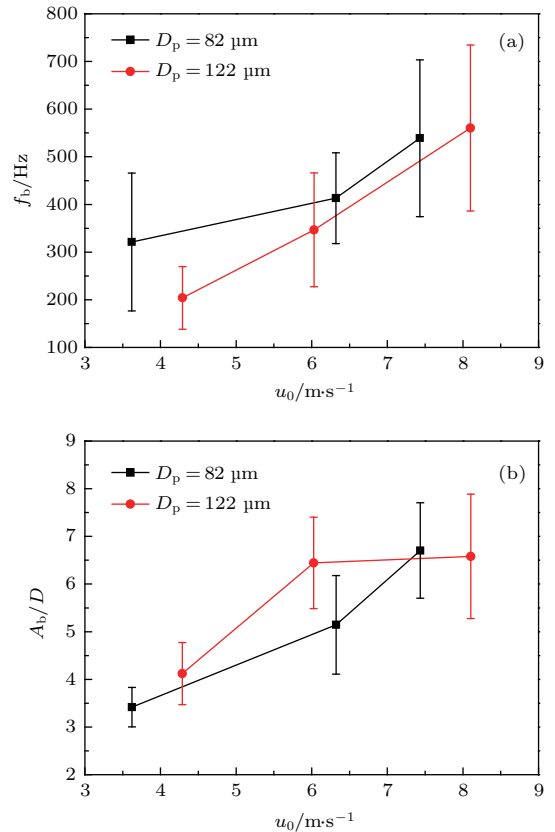


图 6 $y/D = 4$ 处颗粒膜振荡频率和无量纲振荡幅度随射流速度变化特征 (a) 振荡频率; (b) 无量纲振荡幅度
Fig. 6. Variation of oscillation amplitude and frequency with velocity at $y/D = 4$: (a) Oscillation frequency; (b) non-dimensional oscillation amplitude.

图 7 展示了颗粒膜表面波纹无量纲传播速度沿径向的变化特征. 可以看出, 稠密颗粒射流倾斜撞击表面波纹的无量纲传播速度沿 y 轴正向距离的增大而增大, 并且颗粒膜表面波纹传播速度与射流速度之比 (u_s/u_0) 在 0.7—0.9 之间. 这是因为在此速度 ($u_0 \geq 3.62 \text{ m/s}$) 下, 颗粒膜发生非轴对称振荡, 所测得的表面波纹速度为颗粒流在 y 方向的分速度, 因此二者速度比小于 1, 而撞击后在重力的加速作用下, 表面波纹速度沿 y 轴正向距离增大. 钱文伟等 [16] 发现稠密颗粒射流撞壁实验中表面波纹速度与射流速度之比约为 0.4, 这是由于撞壁过程中颗粒间非弹性碰撞更加频繁, 速度耗散较大, 同

时颗粒间基本无相互作用力,且波纹传播方向与重力方向垂直,因此随着径向距离的增大,表面波纹速度基本保持不变.黄国锋^[23]发现液膜表面波纹的无因次传播速度在0.7—0.9之间,呈现逐渐减小的趋势.这是因为撞击之后液膜主要受到表面张力的影响,表面张力促使液膜收缩,阻碍波纹传播.

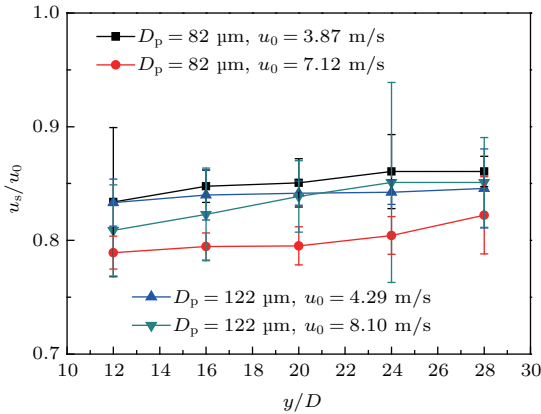


图7 表面波纹无量纲速度沿y轴正向变化特征
Fig. 7. Variation of the non-dimensional velocity along y direction.

由图8(a)可以看出,稠密颗粒射流倾斜撞击产生的表面波纹频率随径向距离的增大而减小,相同位置处,射流速度越大,表面波纹频率越大.与射流速度相比,颗粒粒径对表面波纹频率的影响不显著.由图8(b)可知,颗粒膜表面波纹的波长随径向距离和射流速度的增大而增大.同时在颗粒膜表面波纹传播过程中观察到了颗粒膜波纹的叠加现象,并且波纹叠加现象在时间和空间位置上存在明显的偶然性和随机性,这与黄国锋等^[24]发现的液膜上波纹的融合现象相似.颗粒膜上波纹的运动属

于非稳态运动,波纹的运动速度存在瞬时波动性,这是导致波纹叠加的主要原因.如图9所示,该现象使得颗粒膜表面波纹频率随着径向距离的增大而减小,波长随着径向距离的增大而增大.

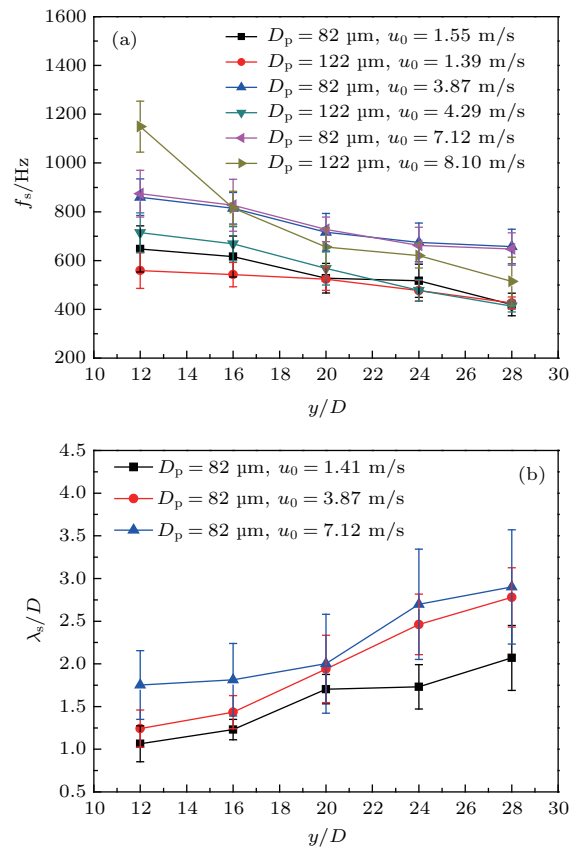


图8 表面波纹频率及无量纲波长沿径向变化特征 (a) 表面波纹频率; (b) 无量纲波长
Fig. 8. Variation of the frequency and non-dimensional wavelength of surface waves along radial direction: (a) Frequency of surface waves; (b) non-dimensional wavelength of surface waves.

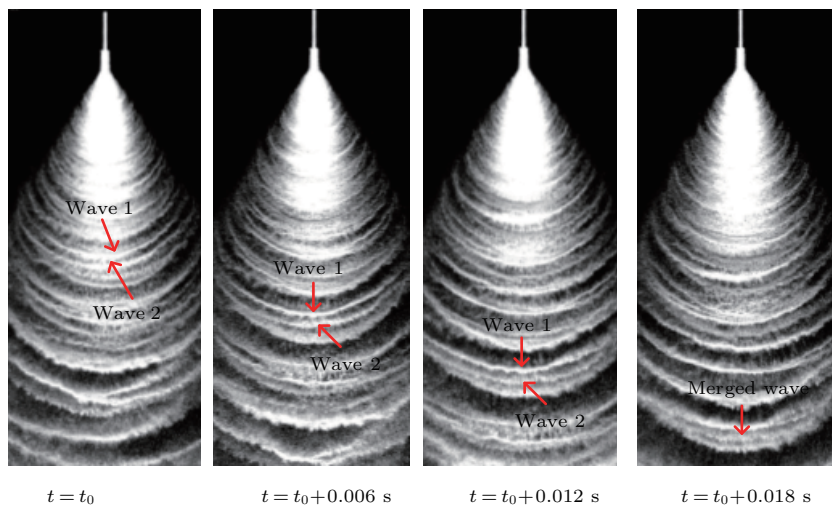


图9 $D_p = 82 \mu\text{m}$, $u_0 = 3.87 \text{ m/s}$, $x_p = 0.25$ 时颗粒膜表面波纹叠加过程
Fig. 9. Merging process of surface waves at $D_p = 82 \mu\text{m}$, $u_0 = 3.87 \text{ m/s}$, $x_p = 0.25$.

4 讨 论

实验中, 在喷嘴出口观察到了明显的射流不稳定性现象, 并且随着储料罐内空气压力的增大, 颗粒射流速度增大, 气固不稳定性增强, 射流不稳定性也增强. 定义颗粒射流流量脉动频率 f_j 为单位时间内喷嘴出口处颗粒射流由于不稳定性发生收缩或摆动的次数, 如图 10 所示, 将喷嘴出口射流流量脉动频率与 $y/D = 4$ 处颗粒膜非轴对称振荡频率进行对比, 发现 f_b/f_j 大约为 1, 表明由气固不稳定性引起的喷嘴出口射流脉动是颗粒膜发生非轴对称振荡的关键因素. 从图 10 中可以看出, 随着射流速度的增大, 气固不稳定性增强, 射流脉动频率逐渐增大, 因此颗粒膜发生非轴对称振荡的频率也增大. 而在稠密颗粒射流撞击圆形壁面的实验研究中, 认为颗粒膜上表面波纹的产生源于颗粒射流振荡不稳定性^[18], 其表面波纹频率主要受到射流不稳定性频率的影响. 由图 8 可知, 颗粒膜表面波纹频率大于射流流量脉动频率, 因为颗粒膜表面波纹既受喷嘴出口射流流量脉动的影响, 也受到撞击不稳定性的影响^[25].

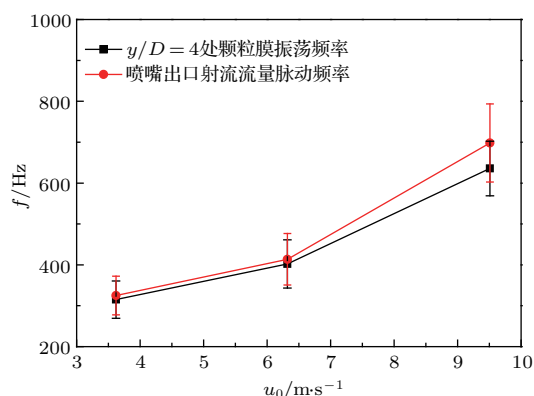


图 10 $D_p = 82 \mu\text{m}$ 射流流量脉动频率与颗粒膜振荡频率的对比

Fig. 10. Comparison the pulsation frequency of the granular jet with oscillation frequency of the granular film at $D_p = 82 \mu\text{m}$.

5 结 论

采用高速摄像机对稠密颗粒射流倾斜撞击过程进行了实验研究, 刻画了稠密颗粒射流倾斜撞击的类流体颗粒膜现象, 揭示了颗粒膜形成非轴对称振荡的原因. 得到以下主要结论:

1) 稠密颗粒射流倾斜撞击主要呈现两种不同的形态, 当颗粒粒径较小时, 稠密颗粒射流倾斜撞击呈现类液体颗粒膜形态; 随着颗粒粒径的增大, 含固率减小, 单位体积内所含颗粒数目减少, 颗粒运动自由程增加, 颗粒间碰撞概率减小, 颗粒膜形态消失, 形成散射形态;

2) 随着射流速度的增大, 颗粒膜出现非轴对称振荡, 颗粒膜表面出现波纹结构; 颗粒膜的非轴对称振荡频率和振荡幅度随射流速度的增大而增大; 当颗粒粒径与射流速度保持不变时, 沿着传播方向的距离增大, 表面波纹传播速度略微增大, 且 u_s/u_0 在 0.7—0.9 之间; 因为波纹间存在叠加现象, 沿着传播方向, 其表面波纹波长增大, 波纹频率降低;

3) 稠密颗粒射流撞击形成非轴对称振荡的主要因素是喷嘴出口由气固不稳定性引起的射流流量脉动, 射流流量脉动频率与颗粒膜的非轴对称振荡频率基本相当, 而颗粒膜表面波纹的形成原因较复杂, 受到喷嘴出口射流流量脉动和撞击不稳定性的双重影响.

参考文献

- [1] Wu Y 2001 *Chem. Indus. Eng. Prog.* **11** 8 (in Chinese) [伍沅 2002 化工进展 **11** 8]
- [2] Guo Q H, Yu G S, Wang F C, Wang Y F, Dai Z H 2017 *XIAO Danfei* **4** 1 (in Chinese) [郭庆华, 于广锁, 王辅臣, 王奕飞, 代正华 2017 氮肥与合成气 **4** 1]
- [3] Liang T, Bai J, Zhang L, Chang C, Fang S H, Han X L 2016 *Petrochem. Technol.* **3** 360 (in Chinese) [梁腾波, 白净, 张璐, 常春, 方书起, 韩秀丽 2016 石油化工 **3** 360]
- [4] Liu H J, Zou C, Tian Z W, Zheng C G 2008 *J. Huazhong Univ. Sci. Technol. (Natural Science Edition)* **5** 106 (in Chinese) [刘红娟, 邹春, 田智威, 郑楚光 2008 华中科技大学学报: 自然科学版 **5** 106]
- [5] Sun Z G, Li W F, Liu H F, Yu Z H 2009 *Chem. Reaction Engineer. Technol.* **2** 97 (in Chinese) [孙志刚, 李伟锋, 刘海峰, 于遵宏 2009 化学反应工程与工艺 **2** 97]
- [6] Sun Z G 2009 *Ph. D. Dissertation* (Shanghai: East China University of Science and Technology) (in Chinese) [孙志刚 2009 博士学位论文 (上海: 华东理工大学)]
- [7] Xu H, Zhao H, Zheng C 2014 *Chem. Eng. Process. Process Intensify* **76** 6
- [8] Du M, Hao Y L, Liu X D 2009 *CIESC J.* **60** 1950 (in Chinese) [杜敏, 郝英立, 刘向东 2009 化工学报 **60** 1950]
- [9] Du M, Zhao C, Zhou B 2011 *Chem. Eng. Sci.* **66** 4922
- [10] Liu X, Chen Y, Chen Y 2014 *Chem. Eng. Process. Process Intensify* **79** 14
- [11] Cheng X, Varas G, Citron D, Jaeger H M, Nagel S R 2007 *Phys. Rev. Lett.* **99** 188001

- [12] Cheng X, Gordillo L, Zhang W W, Jaeger H M, Nagel S R 2014 *Phys. Rev. E* **89** 042201
- [13] Johnson C G, Gray J M N T 2011 *J. Fluid Mech.* **675** 87
- [14] Boudet J F, Amaroucheme Y, Bonnier B, Kellay H 2007 *J. Fluid Mech.* **572** 413
- [15] Boudet J F, Amaroucheme Y, Bonnier B, Kellay H 2005 *Europhys. Lett.* **69** 365
- [16] Qian W W, Li W F, Shi Z H, Liu H F, Wang F C 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 214501 (in Chinese) [钱文伟, 李伟锋, 施浙杭, 刘海峰, 王辅臣 2016 物理学报 **65** 214501]
- [17] Shi Z H, Li W F, Qian W W, Wang F C 2017 *Chem. Eng. Sci.* **62** 1
- [18] Shi Z H, Li W F, Liu H F, Wang F C 2017 *AIChE J.* **63** 3276
- [19] Huang Y J, Chan C K, Zamankhan P 2010 *Phys. Rev. E* **82** 031307
- [20] Ge W, Chen F, Gao J 2007 *Chem. Eng. Sci.* **62** 3346
- [21] O' Rourke P J, Snider D M 2010 *Chem. Eng. Sci.* **65** 6014
- [22] Ellowitz J 2016 *Phys. Rev. E* **93** 012907
- [23] Huang G F 2014 *M. S. Dissertation* (Shanghai: East China University of Science and Technology) (in Chinese) [黄国锋 2014 硕士学位论文 (上海: 华东理工大学)]
- [24] Huang G F, Li W F, Tu G Y 2014 *CIESC J.* **10** 3789 (in Chinese) [黄国峰, 李伟锋, 屠功毅 2014 化工学报 **10** 3789]
- [25] Li W F, Yao T L, Liu H F, Wang F C 2011 *AIChE J.* **57** 1434

Characteristics of granular sheet of dense granular jet oblique impact*

Wang Yue¹⁾²⁾ Li Wei-Feng^{1)2)†} Shi Zhe-Hang²⁾ Liu Hai-Feng¹⁾²⁾ Wang Fu-Chen¹⁾²⁾

1) (Key Laboratory of Coal Gasification and Energy Chemical Engineering of Ministry of Education, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

2) (Shanghai Engineering Research Center of Coal Gasification, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

(Received 21 September 2017; revised manuscript received 16 March 2018)

Abstract

Dense granular impinging jets widely exist in natural flow phenomena and industrial processes, such as the rapid heating, cooling or drying, and gasification. It is important to investigate the factors influencing the flow patterns of dense granular impinging jets and reveal the evolution rules of the flow patterns. The dynamic behaviors of the dense granular impinging jets are experimentally studied by a high-speed camera and image processing software of Image J. The effects of the particle diameter, the granular jet velocity (u_0) and the solid content of the granular jet (x_p) on flow pattern of the granular impinging jet are investigated. Two flow regimes of the dense granular impinging jets, i.e., the liquid-like granular film and the scattering pattern, are identified. The results show that with the increase of the particle diameter and the granular jet velocity, both the solid content of the granular jet and the inter-particle collision frequency decrease, which results in the transition of granular sheet to scattering pattern. With the increase of granular jet velocity, the opening angle of the granular sheet from the side view increases, while the opening angle from the front view increases first and sharply decreases later. The results also show that with the increase of the granular jet velocity, the liquid-like granular film becomes unstable and a non-axisymmetric oscillation appears. And the amplitude and frequency of the liquid-like granular film increase with granular jet velocity increasing, and are significantly affected by particle diameter. The interesting behaviors of the liquid-like surface waves are observed on the granular sheet. The surface waves become remarkable with the increase of the granular jet velocity, and their propagating velocities normalized by the granular jet velocity vary from 0.7 to 0.9. The waves propagating on the granular sheet may emerge, which will reduce the frequencies of the surface waves and increase the surface wavelengths. The results also show that the oscillation frequency of the granular film nearly equals the pulsation frequency of the granular jet. It is indicated that the gas-solid interaction inside the nozzle increases with granular jet velocity increasing, and causes the instability of the granular jet, resulting in the non-axisymmetric oscillation on the granular sheet consequently. The results in this paper present significant knowledge of the dense granular impinging jets and also provide some principles for the applications in dense granular impinging jets in industrial processes.

Keywords: dense granular jet, jet impact, granular sheet, non-axisymmetric oscillation

PACS: 45.70.Mg, 47.55.Ca, 47.60.Kz

DOI: 10.7498/aps.67.20172092

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 91434130, 21776072).

† Corresponding author. E-mail: liweif@ecust.edu.cn