

# 沙粒跃移击溅函数的高速数字摄像研究

王大伟<sup>1</sup>, 王元<sup>1</sup>, 杨斌<sup>1</sup>, 张玮<sup>2</sup>

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安; 2. 韩国浦项工科大学  
实验流体控制与生物流体实验室, 790-839, 韩国浦项)

**摘要:** 采用高速 CMOS 数字相机拍摄的方法记录沙粒与床面的碰撞过程, 通过分段图像叠加的算法对获得的实验图像进行处理, 提取出沙粒运动时序位置, 并计算其入射以及反射的速度和角度. 通过统计分析得出跃移沙粒与沙床碰撞过程中的控制参数——碰撞平面角、速度和能量恢复系数的分布, 都近似满足正态分布. 实验结果表明, 沙粒与沙床碰撞过程中损失的动能超过总能量的一半, 且由于碰撞平面角大于  $0^\circ$  的比例达到 70%, 即使沙粒在碰撞过程中能量有所损失, 沙粒与沙床碰撞后垂直分速度增加的现象仍比较普遍, 使得沙粒在与气流相互作用的过程中获取更多的能量, 从而为沙粒的持续跃移提供了保证.

**关键词:** 沙粒跃移; 高速数字相机; 击溅函数; 碰撞平面角

**中图分类号:** O359 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2009)07-0125-04

## Research on Sand Saltation Splash Function by High Speed Digital Camera

WANG Dawei<sup>1</sup>, WANG Yuan<sup>1</sup>, YANG Bin<sup>1</sup>, ZHANG Wei<sup>2</sup>

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Experimental Flow Control & Biofluid Laboratory, Pohang University of Science and Technology, Pohang 790-839, Korea)

**Abstract:** A high speed CMOS digital camera was used to record the process of sand grain collision with the sand bed. With the subsection addition image processing method, the temporal position of saltating sand grain was extracted from the experimental images, and the speed and angles of impacting and rebounding were also calculated. With the statistical method, some parameters of the collision process were presented, including the distributions of speed, energy recoverable coefficients and collision angles and these parameters displayed normal distribution. The results show that, during the period of collision between the sand grain and the sand bed, the lost kinetic energy is more than half of the total energy. Moreover, because the percentage of collision angles with more than  $0^\circ$  is up to 70%, the vertical speed of sand increases even if the kinetic energy decreases, which ensures that the sand particles can receive more energy from the air to keep on the saltation movement.

**Keywords:** sand saltation; high speed digital camera; splash function; collision flat angle

沙粒对沙床表面的冲击过程是沙粒跃移中最重要物理过程之一, 而击溅函数是描述这一过程的有效形式. 早在 1941 年 Bagnold<sup>[1]</sup> 就曾指出: “沙的运动这一主题属于物理学比属于地貌学远为恰当,

而若想推进我们在这方面的知识, 就必须从研究单一沙粒在风中的运动着手”. 自从那时开始, 作为风沙流中沙粒三种主要运动形式之一的跃移, 就一直受到广大风沙物理学研究者的重视<sup>[1-9]</sup>. 贺大良等人

采用人工判读高速摄影胶片的方式研究了跃移沙粒的运动<sup>[4]</sup>. Anderson 等人采用数值模拟的方法给出了 80 个碰撞样本的速度和方向分布,建立了击溅函数的模型<sup>[5]</sup>. 邹学勇等人研究了风沙流结构中起跃沙粒垂直初速度分布<sup>[6]</sup>. Lee 等人采用低速 CCD 相机(30 帧/s)记录了沙粒在水中的跃移轨迹和碰撞过程参数<sup>[7-8]</sup>. 董志宝等人利用相位多普勒测速仪(PDA)单点测量的方法得到沙粒起跳速度的数据<sup>[9]</sup>,何丽红等人利用该数据给出了沙粒起跳满足 Weibull 分布的结论<sup>[10]</sup>. 然而受技术手段的限制,碰撞过程沙粒的起跳速度(即反射速度)与入射速度的关系至今没有进行过确切的研究. 本文采用高速 CMOS 数字相机(2 000 帧/s)拍摄的方法记录沙粒与床面的碰撞过程,从图像处理得到的沙粒位置参数来计算其入射以及反射的速度和角度,并通过统计的方法给出沙粒碰撞后速度和能量恢复系数以及碰撞平面角的分布,达到给定入射速度和角度得到相应的反射速度和角度的目的,确定了击溅函数,同时在实验过程中发现,由于碰撞平面角大于 0°的比例达到 70%,使得沙粒与沙床碰撞后垂直分速度增加的现象比较普遍.

## 1 实验设计及数据处理方法

实验在韩国浦项工科大学实验流体控制与生物流体实验室的大气边界层风洞(测试段长为 6.75 m,宽为 0.72 m,高为 0.6 m)中进行. 沙床采用 300~500 μm 的沙粒铺成,尺寸为 1.00 m×0.20 m×0.02 m. 为了准确重现沙粒与沙床碰撞过程,实验在一种弱跃移的状况下进行,来流风速为 8.5 m/s. 采用日本 Photron 公司的 Ultima-APX 高速 CMOS 数字相机进行图像捕捉,光源采用连续冷光源片光垂直向下投射. 相机分辨率设为 1 024×512 像素,速度设为 2 000 帧/s,曝光时间为 1/3 000 s.

实验得到的结果为数字图像,可以对沙粒的位置进行精确定位. 由于每张图像上只有沙粒在某时刻的位置且图像数目巨大,给数据处理带来了麻烦. 因此,在处理图像的过程中采取了时序分段图像叠加的方法:

- (1)将某一碰撞过程的图像序列进行定位;
- (2)对该序列图像进行局部加法运算得到碰撞的离散轨迹图,见图 1,其中图 1a~图 1e 为序列中某时刻的图像,图 1f 为整个序列图像相加后的结果, $T$  为碰撞过程的初始时刻;
- (3)利用标记算法得到沙粒碰撞过程中不同时

刻的位置坐标;  
(4)利用沙粒位置坐标计算碰撞过程的入射及反射各参数,并进行统计分析.

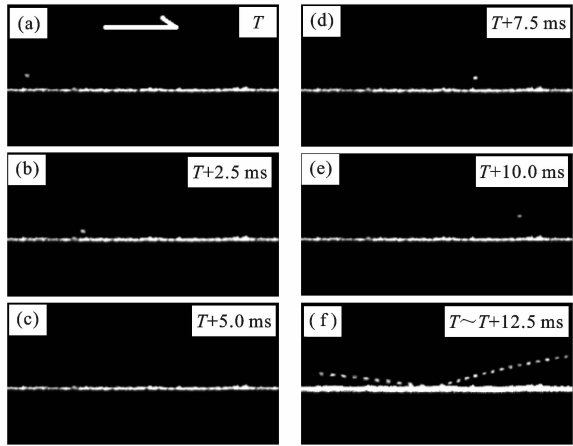


图 1 沙粒沙床碰撞离散轨迹图

## 2 实验结果与分析

### 2.1 碰撞结果分类

通过对实验图像的分析发现,沙粒与沙床碰撞后通常有 3 种结果:①沙粒由跃移变为蠕移;②沙粒反弹继续跃移;③沙粒本身反弹继续跃移并引起其他沙粒的溅射起跳. 尽管部分跃移沙粒反弹带有溅射颗粒同时出现,但由于溅射颗粒的速度比较小,无法达到反弹颗粒运动的高度和距离,故可以利用这个特点来区分它们. 通过对图像进行分析处理,共得到了 108 个碰撞样本,按照上述分类,可得统计数据如表 1 所示.

表 1 沙粒碰撞结果分类的统计数据

| 碰撞结果    | 出现次数 | 频率/% |
|---------|------|------|
| 跃移变蠕移   | 10   | 9.3  |
| 跃移反弹无溅射 | 64   | 59.3 |
| 跃移反弹有溅射 | 34   | 31.4 |

由表 1 可知,沙粒与沙床碰撞后产生反弹的比例高于 90%,且反弹沙粒与溅射沙粒图像区别比较明显,因此本文针对反弹沙粒进行研究.

### 2.2 反弹沙粒的速度和能量恢复系数

在由入射速度得到反射速度的过程中,采用沙粒的速度和能量(动能)恢复系数( $C_U=U_2/U_1$ ,  $C_E=U_2^2/U_1^2$ )来给出反射速度和入射速度之间关系. 图 2 分别给出了沙粒  $u$  速度、 $v$  速度、合速度  $U$  的恢复

系数及能量恢复系数  $C_E$  的分布. 由分布图可看出, 沙粒  $u$  速度、 $v$  速度、合速度的恢复系数及能量恢复系数的分布近似呈正态分布. 对能量恢复系数分布进行拟合得到如下表达式

$$f_{C_E}(x) = C_0 + \frac{A}{\omega(\pi/2)^{1/2}} e^{-2(\frac{x-x_c}{\omega})^2} \quad (1)$$

式中:  $f_{C_E}(x)$  为能量恢复系数分布拟合函数; 拟合常量  $C_0=0.01, A=0.09, \omega=0.41, x_c=0.38$ , 相似度为 94%. 由于能量恢复系数为  $U$  速度恢复系数的平方, 所以可知由其中任一种分布就可得到另一种分布.

能量恢复系数除了能表征沙粒与沙床碰撞前后速度大小的变化外, 同时还能反映沙床对入射沙粒动能的吸收程度. 实验中能量恢复系数平均值为 0.455, 碰撞后沙粒超过一半的能量都被沙床吸收. 可见, 沙粒与沙床的碰撞过程是沙粒间能量传递的重要途径. 以前的相关研究都没有对能量恢复系数进行过分析, 但可以从平均反弹速度和入射速度推算得到. 对 Nalpanis 等人<sup>[3]</sup>得到的沙粒跃移数据进行推算, 发现当沙粒粒径在  $90\sim300\ \mu\text{m}$  时, 得到的能量恢复系数为 0.31~0.44. 这与本文实验所得结果吻合.

2.3 反弹沙粒碰撞平面角

根据碰撞理论, 反射角总是与入射角大体相等, 而在实际沙粒与床面的碰撞实验过程中, 反射角与入射角相差较大, 且  $v$  速度恢复系数在大多数情况下大于 1 (即沙粒反射速度的垂直分量大于入射速

度的垂直分量), 究其原因是因为沙床表面并不是平面, 即碰撞平面与沙床平面不重合. 这里给出碰撞平面角的定义, 用来表征碰撞平面与沙床平面的偏离程度. 如图 3 所示, 沙床表面法线 ( $OY$ ) 与碰撞平面法线 ( $OY'$ ) 的夹角  $\theta$  为碰撞平面角, 以逆时针方向为正. 根据碰撞理论有

$$\alpha + \theta = \beta - \theta$$

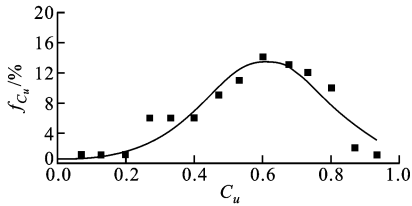
可得

$$\theta = \frac{(\beta - \alpha)}{2}, \quad \beta = \alpha + 2\theta$$

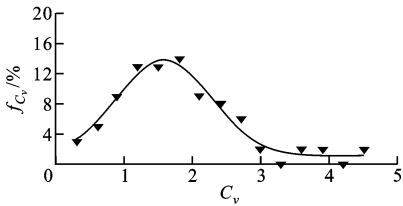
式中:  $\alpha$  为入射角;  $\beta$  为反射角. 由上式可知, 对于给定的人射角, 给出碰撞平面角的分布就可以求得反射角的分布. 对实验数据进行了统计, 得到碰撞平面角的分布如图 4 所示, 对其进行拟合得

$$f_{\theta}(x) = C_0 + \frac{A}{\omega(\pi/2)^{1/2}} e^{-2(\frac{x-x_c}{\omega})^2} \quad (2)$$

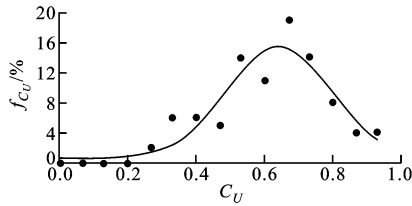
式中:  $f_{\theta}(x)$  为碰撞平面角分布拟合函数; 拟合常量  $C_0=0.02, A=2.15, \omega=6.90, x_c=3.56$ , 相似度为 98%. 由图 3 可知, 有约 70% 的沙粒碰撞平面角大于  $0^\circ$ . 因此, 尽管沙粒在碰撞过程中能量有所损失, 但由于碰撞平面角的存在且大于  $0^\circ$  的分布占很大的比例, 导致沙粒碰撞后垂直方向的速度增加. 从图 2 中发现,  $v$  速度恢复系数大于 1 的现象很普遍. 垂直方向速度的增加会延长沙粒在气流中的滞留时间, 使得沙粒在与气流相互作用的过程中获取更多的能量, 从而为沙粒的持续跃移提供了保证.



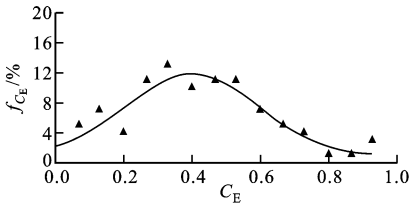
(a)  $u$  速度的恢复系数分布



(b)  $v$  速度的恢复系数分布



(c) 合速度的恢复系数分布



(d) 能量恢复系数分布

图 2 沙粒速度及能量恢复系数的分布

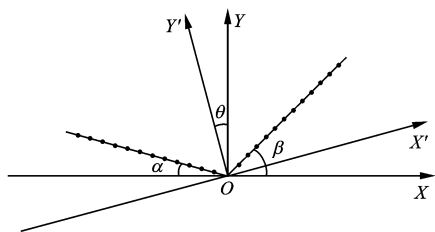


图3 碰撞平面角示意图

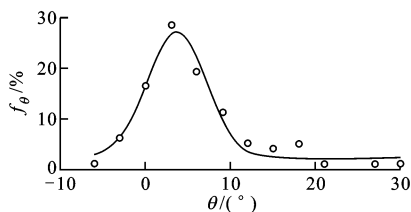


图4 碰撞平面角分布图

### 3 结 论

(1)时序分段图像叠加的图像处理算法可以有效处理高速CMOS相机拍摄的大量数字图像,简化处理过程。

(2)跃移沙粒与沙床碰撞过程中的控制参数,碰撞平面角、速度和能量恢复系数都近似满足正态分布。能量恢复系数实验结果表明,沙粒与沙床碰撞过程中损失的动能超过总能量的一半。

(3)由于碰撞平面角大于 $0^\circ$ 的分布占据很大的比例,即使沙粒在碰撞过程中能量有所损失,沙粒与沙床碰撞后垂直分速度增加的现象仍比较普遍,使得沙粒在与气流相互作用的过程中获取了更多的能量,为沙粒的持续跃移提供了保证。

### 参考文献:

- [1] BAGNOLD R A. The physics of blown sand and desert dunes [M]. London, UK: Mathuen & Co Ltd., 1941;3.
- [2] OWEN P R. Saltation of uniform grains in air [J]. J

Fluid Mech, 1964, 20(2): 225-242.

- [3] NALPANIS P, HUNT J C R. Saltating particles over flat beds [J]. J Fluid Mech, 1993, 251: 661-685.
- [4] 贺大良, 高有广. 沙粒跃移运动的高速摄影研究 [J]. 中国沙漠, 1988, 8(1): 18-29.  
HE Daliang, GAO Youguang. The study of sand saltation movement with high velocity cinecamera [J]. Journal of Desert Research, 1988, 8(1): 18-29.
- [5] ANDERSON R S, HAFF P K. Simulation of eolian saltation [J]. Science, 1988, 241(4867): 820-823.
- [6] 邹学勇, 朱久江, 董光荣, 等. 风沙流结构中起跃沙粒垂直初速度分布函数 [J]. 科学通报, 1992, 37(23): 2175-2177.  
ZOU Xueyong, ZHU Jiujiang, DONG Guangrong, et al. The distribution function of the vertical lift-off speeds of saltating particles in the blown sand flow structure [J]. Chinese Science Bulletin, 1992, 37(23): 2175-2177.
- [7] LEE Hongyuan, CHEN Yensu, YOU Jiingyun, et al. Investigation of continuous bed load saltation process [J]. J Hydraulic Engineering, 2000, 126(9): 691-700.
- [8] LEE Hongyuan, YOU Jiingyun, LIN Yingtien. Continuous saltation process of multiple sediment particles [J]. J Hydraulic Engineering, 2002, 128(4): 443-450.
- [9] DONG Zhibao, LIU Xiaoping, LI Fang, et al. Impact-entrainment relationship in a saltating cloud [J]. Earth Surf Process Landforms, 2002, 27(6): 641-658.
- [10] 何丽红, 郑晓静, 武建军. 跃移沙粒起跳垂直速度分布函数的统计分析[J]. 兰州大学学报, 2004, 40(2): 31-35.  
HE Lihong, ZHENG Xiaojing, WU Jianjun. A statistical analysis of the distribution function of the vertical lift-off speeds of saltating particles [J]. Journal of Lanzhou University, 2004, 40(2): 31-35.

(编辑 王焕雪)

### [本刊相关文献链接]

风水流中沙粒相输移的测量. 西安交通大学学报, 2006, 40(7): 846-850.

微通道内流的微尺度粒子图像测速技术实验研究. 西安交通大学学报, 2007, 41(11): 1355-1359.

粗糙元特征对风洞中大气表面层模拟的影响. 西安交通大学学报, 2009, 43(3): 87-91.

一种新的测定流体质扩散系数的全息干涉图像处理方法. 西安交通大学学报, 2008, 42(11): 1350-1355.

一种基于小波的 Contourlet 变换的图像压缩算法. 西安交通大学学报, 2007, 41(4): 479-483.

基于双密度双树复数小波变换的图像去噪. 西安交通大学学报, 2006, 40(2): 246-248.