

风沙流中沙粒速度分布的实验研究

亢力强^{*}, 郭烈锦, 刘大有

西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 西安 710049;

中国科学院力学研究所工程科学部, 北京 100080

* E-mail: klq@sohu.com

收稿日期: 2007-06-06; 接受日期: 2008-02-26

国家自然科学基金(批准号: 10532030)和国家重点基础研究发展计划(编号: G2000048702)资助项目

摘要 采用相位多普勒粒子分析仪(phase Doppler particle analyzer, PDPA)测量了风沙两相流动中沙床面上沙粒碰撞和起跳速度概率分布以及不同高度处沙粒速度概率分布。结果表明, 沙床面上沙粒碰撞和起跳速度概率分布均可用对数正态分布函数描述, 碰撞和起跳角度均可用指数分布函数描述。沙粒平均碰撞角度为 $28^{\circ}\sim 39^{\circ}$, 平均起跳角度为 $30^{\circ}\sim 44^{\circ}$, 平均起跳速度为平均碰撞速度的 $0.81\sim 0.9$ 倍, 向后碰撞沙粒占总碰撞沙粒的比例为 $0.05\sim 0.11$, 向后起跳沙粒占总起跳沙粒的比例为 $0.04\sim 0.13$ 。沙粒水平速度概率分布在 4 mm 高度处表现为正偏斜类型, 在 20 mm 高度处沙粒水平速度的变化范围更加广泛, 在 80 mm 高度处沙粒水平速度变化范围小于 20 mm 高度处的变化范围。沙粒垂直速度概率分布在不同高度处均可表示为正态分布函数。

关键词
风沙流
概率分布
沙粒速度

风沙流动在自然界中广泛存在, 例如在干旱的沙漠、沿海的沙滩上。当沙床面上的风足够强时, 沙粒就开始运动。风沙流中沙粒的运动形式通常分为三种: 蠕移、跃移和悬移, 其中跃移是最主要的运动形式, 约占总输沙量的 $3/4$ ^[1]。跃移沙粒通过碰撞将气流动量转移到沙面, 从而使更多的沙粒起跳, 这些起跳沙粒在气流中不断加速, 又在重力作用下降落, 通过碰撞再次将从气流中获得的动量转移到沙面, 如此不断的运动。跃移的这种运动本质使其在风沙流中得到了广泛研究。沙粒速度在风沙流中的空间概率分布状态是沙粒跃移运动状态的一个反映, 是本文研究的主要内容。

沙床面上颗粒间碰撞作用十分强烈, 颗粒碰撞是破坏沙表面并造成侵蚀的主要原因, 大量跃移沙粒以不同的速度和角度碰撞沙床面而反弹, 或击溅起更多的床面沙粒进入气流。沙粒和沙床面的碰撞过程决定着沙粒起跳速度分布状态, 进一步影响沙粒跃移运动轨迹以及输沙通量分布。沙粒起跳速度分布又是联系宏观和微观研究的桥梁^[2]。Anderson 和 Haff^[3]的研究

认为在跃移平衡状态中风力直接起动的沙粒可以忽略, 只有跃移沙粒的碰撞可以使沙粒起跳离开沙床表面. 因此, 研究沙粒碰撞和起跳状态分布具有重要意义.

跃移沙粒的跳跃运动行为使其在不同高度处速度分布变化广泛. Dong 等人^[4]的测量表明沙粒水平速度可以从 -20.43 m/s 变化到 20.56 m/s, 沙粒垂直速度在 -2.8 m/s 和 2.9 m/s 内变化, 沙粒水平速度概率分布为 Gauss 函数分布, 小颗粒(直径 $0.1\sim 0.3$ mm)垂直速度概率分布可表示为 Lorentz 函数分布, 而大颗粒不能用简单分布函数描述. Zou 等人^[5]认为跃移沙粒的速度大小分布为 Pearson 分布类型. Greeley 等人^[6]现场研究表明上升和下降沙粒的速度分布柱状图均为单峰值分布.

跃移沙粒造成的侵蚀大大强于干净气流的侵蚀, 沙粒速度是确定其动能并估计其侵蚀能力的一个重要因素. Greeley 和 Iversen^[7]从碰撞能考虑认为最大侵蚀能力发生在最接近地面的部分. 而 Sharp^[8]发现最大侵蚀强度在地面以上约 $0.1\sim 0.15$ m. Zou 等人^[5]的风洞实验给出沙粒群动能随高度的分布可用 Pulsepow 函数表示, 与 Anderson^[9]的理论计算结果相似.

先进可靠的测量技术对于研究风沙流中沙粒速度分布是非常重要的. 大多数观测都采用高速摄像系统测量单个沙粒速度和运动轨迹, 但其捕获数目有限而不利于统计分析, 而且在非常低的高度下(5 mm 以下), 由于沙粒密集, 难以直接获得沙粒速度.

近年来, 基于激光多普勒技术的测量方法开始直接用来测量跃移沙粒层中沙粒运动速度(Dong 等人^[4,10]). PDPA 非常适合测量经过空间某点处大量粒子的运动速度, 其采用激光多普勒技术测量粒子速度, 不干扰流场. 本文采用 PDPA 测量风沙流中沙粒运动速度, 研究沙床面上沙粒碰撞和起跳速度概率分布特征以及不同高度处沙粒速度概率分布状态.

1 实验方法和仪器

实验在西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室的风沙两相流实验风洞内进行. 该风洞为吹气式非循环风洞, 实验段长 12 m, 横截面高 0.6 m, 宽 0.4 m, 在实验段前部布置粗糙元, 来加速边界层厚度的发展, 在测量位置的气流边界层厚度可达 0.16 m. 风洞内自由来流风速可连续变化到 40 m/s.

实验中所用的自然石英沙粒按筛分粒径分为三组: $0.17\sim 0.30$, $0.30\sim 0.36$, $0.36\sim 0.44$ mm. 实验时, 首先在风洞地板上铺上长 4.0 m, 宽 0.4 m, 厚约 $3\sim 4$ cm 的沙层, 并将沙床面铺平. 根据 Dong 等人^[11]的研究, 该沙层长度可以保证跃移沙云层有比较充分的发展.

在跃移沙云层中的沙粒速度分布采用 PDPA 行测量. 风洞来流风速采用热线风速仪测量, 来流风速是指沙床前面风洞中心位置点的风速. 风洞实验段测量布置示意图见图 1 所示.

PDPA 是一种非接触式测量系统, 不干扰流场, 测量可靠性高. 3 轴坐标架系统来精确控制不同的测量位置, 而风洞侧壁透明玻璃窗口来保证 PDPA 激光束进入风洞内部. 计算机采集系统记录采集的沙粒速度数据.

相位多普勒粒子分析仪主要由激光器、发射光路系统、接受光路系统、信号处理器和数据采集处理系统组成. PDPA 测量颗粒速度的基本原理是多普勒效应^[12]. 当粒子穿越两束相干激光相交形成的测量体时, 会产生多普勒频移, 粒子在垂直于测量体干涉条纹方向上的速度大小为^[12]



图 1 实验段测量布置示意图

$$u_y = d_f f_D, \quad (1)$$

式中 f_D 为多普勒频移, d_f 为干涉条纹间距, 由下式确定:

$$d_f = \frac{\lambda}{2 \sin \beta}, \quad (2)$$

式中 λ 为激光束波长, β 为两激光束相交后形成的半夹角.

实验中 PDPA 测量系统的参数设置见表 1 所示.

表 1 PDPA 系统参数设置

项目	参数
发射透镜焦距/mm	600
波长/nm	514.5 (绿光)
	488 (蓝光)
激光束分离距离/mm	25 (绿光)
	50 (蓝光)
激光束直径/mm	1.8
干涉条纹间距/ μm	12.35 (绿光)
	5.86 (蓝光)
测量体长度/mm	10.484 (绿光)
	4.975 (蓝光)
测量体直径/mm	0.218 (绿光)
	0.207 (蓝光)

在风沙流风洞实验中要保证风洞模拟和实际风沙流的风速廓线相似. 无起沙的近地表干净气流以及起沙后的风沙边界层上部气流中的风速廓线均为对数律分布. 在起沙后的风沙流边界层内部, 由于沙粒运动对风速的影响, 风速廓线通常不完全遵循对数律变化, 尤其是在近地表区域, 但是如果风沙流边界层上部气流流动相似, 那么风沙流边界层内部气流流动也会是相似的.

对数律风速廓线可表示如下:

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{k} \ln \frac{z}{z_0}, \quad (3)$$

式中 u 为高度 z 处的风速, k 为 von Karman 常数, u_* 为摩阻速度, z_0 为粗糙长度.

(3)式中 u/u_s 和 z/z_0 可分别看作是无量纲风速和无量纲高度. 由(3)式可知, 只要风洞中模拟的风速廓线为对数律分布, 那么风洞模拟就和实际风沙流的风速廓线相似.

2 结果与分析

2.1 沙面上沙粒碰撞速度和角度概率分布

在沙床面附近, 如果沙粒的垂直运动速度向下, 那么该沙粒被认为是碰撞沙粒. 如果沙粒的垂直运动速度向上, 那么该沙粒为起跳沙粒. 沙粒碰撞速度是指碰撞沙粒的水平垂直速度的合成速度, 沙粒碰撞角度是指沙粒碰撞速度与来流风向的夹角. 沙粒起跳速度是指起跳沙粒的水平垂直速度的合成速度, 沙粒起跳角度是指沙粒起跳速度与来流风向的夹角.

沙粒碰撞速度概率分布见图2所示. 图2中 d_p 为沙粒直径, u_{f0} 为自由来流风速. 从图2中可以看出, 沙粒碰撞速度概率分布为单峰值分布.

沙粒碰撞速度概率分布可用下述对数正态分布函数表示:

$$P(u_1^*) = \frac{A}{\sqrt{2\pi B u_1^*}} \exp\left(-\frac{(\ln u_1^* - \ln C)^2}{2B^2}\right), \quad (4)$$

式中 P 为概率, u_1^* 为无量纲的沙粒碰撞速度, $u_1^* = u_1/U_1$, u_1 和 U_1 分别为沙粒碰撞速度和其平均值(单位 m/s), A , B 和 C 为拟合常数.

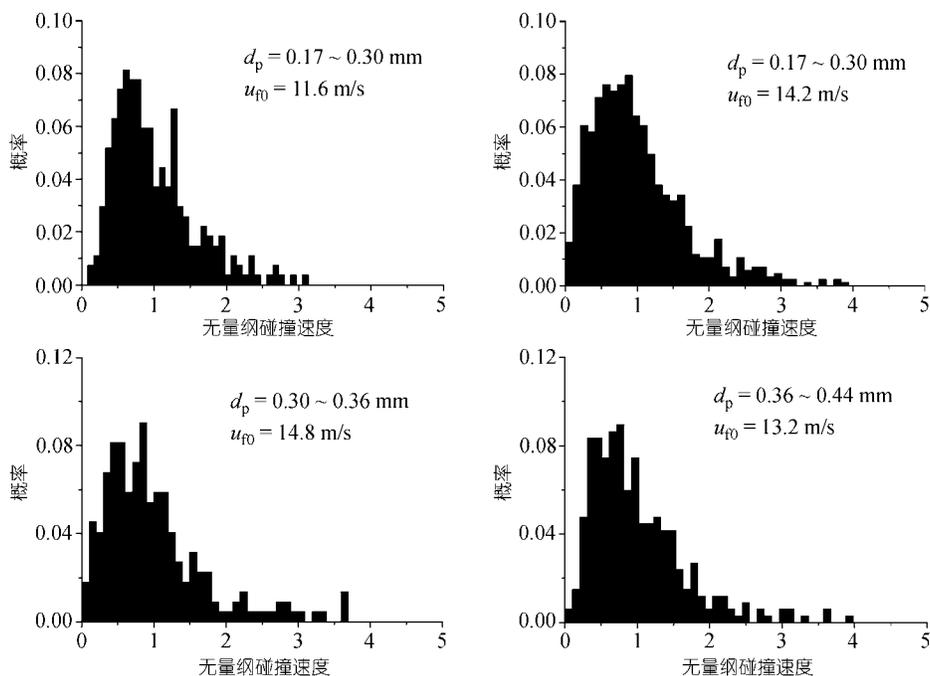


图2 沙粒碰撞速度概率分布

沙粒碰撞速度概率分布拟合曲线参数见表2所示. 表中 R^2 为拟合曲线的相关系数. 从表2中可以看出, 对数正态分布函数对沙粒碰撞速度概率分布的关联程度较好, 大多数拟合曲线的相关系数大于0.9.

表2 沙粒碰撞速度概率分布拟合参数

沙粒粒径/mm	来流风速/ $m \cdot s^{-1}$	A	B	C	R^2
0.17~0.30	10.9	0.087	0.578	0.819	0.86
	11.6	0.083	0.581	0.879	0.94
	14.2	0.109	0.758	0.934	0.94
0.30~0.36	11.1	0.114	0.624	0.802	0.98
	14.8	0.102	0.744	0.879	0.89
0.36~0.44	12.3	0.123	0.636	0.872	0.94
	13.2	0.105	0.684	0.866	0.96
	15.8	0.104	0.707	0.864	0.90

沙粒碰撞角度概率分布见图3所示. 从图中可以看出, 沙粒碰撞角度概率分布与指数衰减分布相似, 可用下述指数分布函数来描述:

$$P(\alpha_1) = \frac{1}{A} \exp\left(-\frac{\alpha_1}{B}\right), \quad (5)$$

式中 P 为概率, α_1 为沙粒碰撞角度(单位为 $^\circ$), A 和 B 为拟合常数.

沙粒碰撞角度概率分布拟合曲线参数见表3所示. 表中 R^2 为拟合曲线的相关系数. 除了一

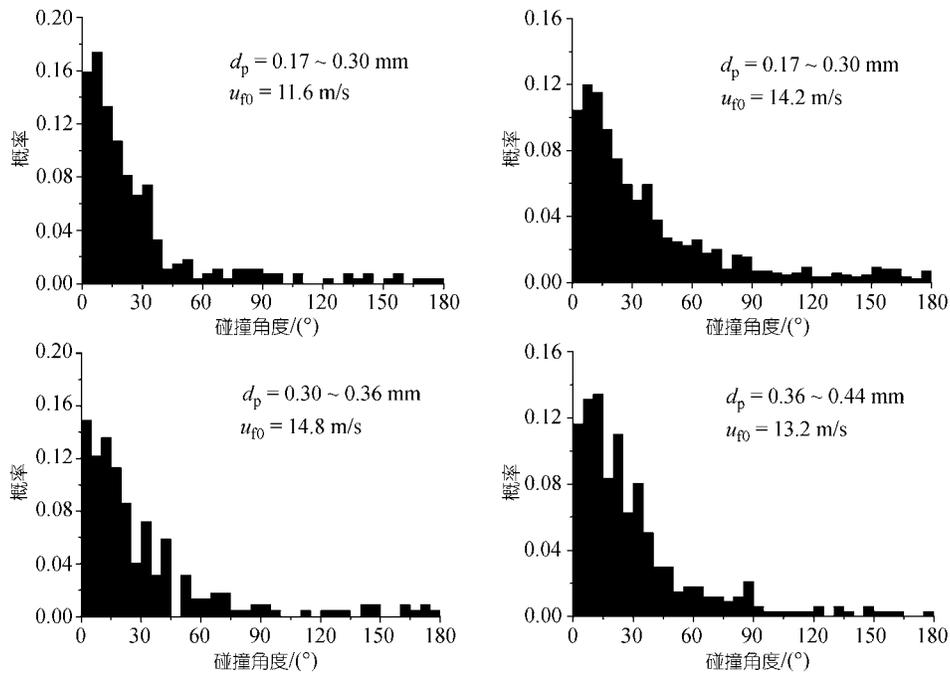


图3 沙粒碰撞角度概率分布

表 3 沙粒碰撞角度概率分布拟合参数

沙粒粒径/mm	来流风速/m·s ⁻¹	A	B	R ²
0.17~0.30	10.9	5.0	24.5	0.88
	11.6	4.8	23.7	0.96
	14.2	7.4	36.3	0.96
0.30~0.36	11.1	7.2	35.2	0.93
	14.8	5.7	28.0	0.93
0.36~0.44	12.3	8.0	41.0	0.91
	13.2	6.3	32.5	0.93
	15.8	6.2	30.7	0.97

条拟合曲线外, 其他拟合曲线的相关系数都大于 0.9.

从图 3 还可以看到, 一些碰撞沙粒的碰撞角度大于 90°, 即这些沙粒向后碰撞沙床面, 其运动方向与来流气流的运动方向相反. 这些向后碰撞沙粒主要是由于沙粒在到达沙面之前已在气流中发生碰撞而产生的, 沙粒碰撞对向后运动的沙粒有重要影响. 进一步分析表明, 向后碰撞沙粒所占总碰撞沙粒的比例约为 0.05~0.11. 而 Dong 等人^[13]报道了更多比例的向后运动沙粒, 向后碰撞沙粒所占的比例为 0.11~0.43.

本文测量得到的沙粒平均碰撞角度在 28°~39°之间, 大于一些已有文献的报道^[1,14~17]: 10°~16°, 6°~12°, 13.9°, 9.6°~12.7°和 11°~14°, 但小于 Dong 等人^[13]报道的 40°~78°.

本文和高速摄像实验结果的差异很可能归因于对跃移沙粒取样的差异. 高速摄像很难看清楚一个跃移沙粒和沙层碰撞后发生了什么^[17], 因此 Nalpanis 等人^[17]将沙粒运动轨迹外插到沙床面进行统计计算, 而且沙床面附近一些低能运动粒子的轨迹由于无法在照片上辨认也会被遗漏掉.

Dong 等人^[13]的风洞实验的进口来流风速范围为 8~18 m/s, 风洞实验段横截面高 0.6 m, 宽 1 m, 所铺沙层长度为 2.5 m, 沙粒粒径在 0.1~0.6 mm 之间. 本文风洞实验来流风速范围为 10.9~15.8 m/s, 沙粒粒径范围为 0.17~0.44 mm, 在 Dong 等人^[13]的实验风速和沙粒粒径范围内. 本文实验沙层长度为 4 m, 大于 Dong 等人^[13]的实验沙层长度, 这更能使风沙流动发展到一个平衡发展状态, 本文所得的实验结果均是在该状态下的结果, 因此, 在这一点上, 本文实验条件更理想, 结果更可信.

2.2 沙面上沙粒起跳速度和角度概率分布

沙粒起跳速度概率分布见图 4 所示. 从图 4 中可以看出, 沙粒起跳速度概率分布形式与碰撞速度概率分布十分相似, 均为单峰值分布.

实验还检测到, 沙粒起跳速度变化范围可以从 0 变化到 3 m/s 左右, 沙粒碰撞速度可以从 0 变化到 3.75 m/s 左右, 但碰撞速度和起跳速度较大的高能量沙粒所占比例很小.

沙粒起跳速度概率分布可用下述对数正态分布函数描述:

$$P(u_L^*) = \frac{A}{\sqrt{2\pi B u_L^*}} \exp\left(-\frac{(\ln u_L^* - \ln C)^2}{2B^2}\right), \quad (6)$$

式中 P 为概率, u_L^* 为无量纲的沙粒起跳速度, $u_L^* = u_L / U_L$, u_L 和 U_L 分别为沙粒起跳速度和其

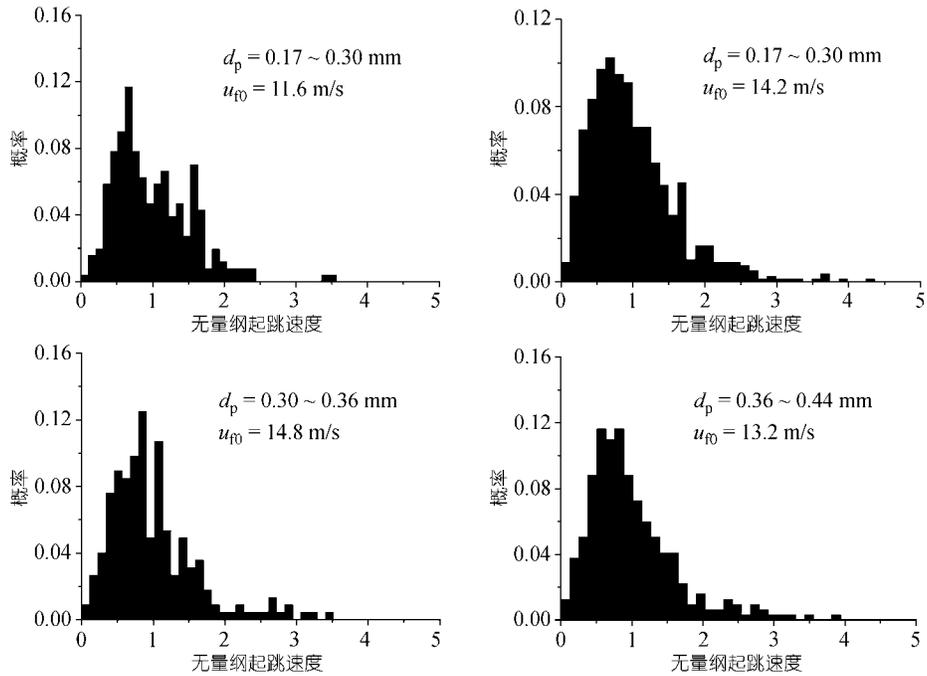


图 4 沙粒起跳速度概率分布

平均值(单位 m/s), A , B 和 C 为拟合常数.

沙粒起跳速度概率分布拟合曲线参数见表 4 所示. 大多数拟合曲线的相关系数大于 0.9, 拟合曲线对实验数据的符合程度较好.

表 4 沙粒起跳速度概率分布拟合参数

沙粒粒径/mm	来流风速/ $m \cdot s^{-1}$	A	B	C	R^2
0.17~0.30	10.9	0.102	0.656	0.88	0.91
	11.6	0.104	0.61	0.912	0.88
	14.2	0.129	0.668	0.919	0.97
0.30~0.36	11.1	0.135	0.707	0.90	0.92
	14.8	0.113	0.579	0.895	0.88
0.36~0.44	12.3	0.139	0.666	0.829	0.97
	13.2	0.125	0.577	0.883	0.97
	15.8	0.118	0.6	0.93	0.90

沙粒起跳角度概率分布见图 5 所示. 从图中可以看出, 沙粒起跳角度概率分布与碰撞角度分布一样, 都类似于指数衰减分布. 在图 5 中还可看到起跳角度分布广泛, 一些起跳沙粒的起跳角度大于 90° , 这些沙粒向后起跳, 也表明沙面附近沙粒碰撞强烈, 沙粒有可能向各个方向起跳.

Bagnold^[1], Chepil^[14]和 Owen^[18]认为沙粒几乎垂直床面起跳. 本文测量的沙粒平均起跳角度在 $30^\circ \sim 44^\circ$ 之间, 与 Nalpanis 等人^[17]报道的 $34^\circ \sim 41^\circ$ 接近, 但没有 Dong 等人^[13]报道的平均起

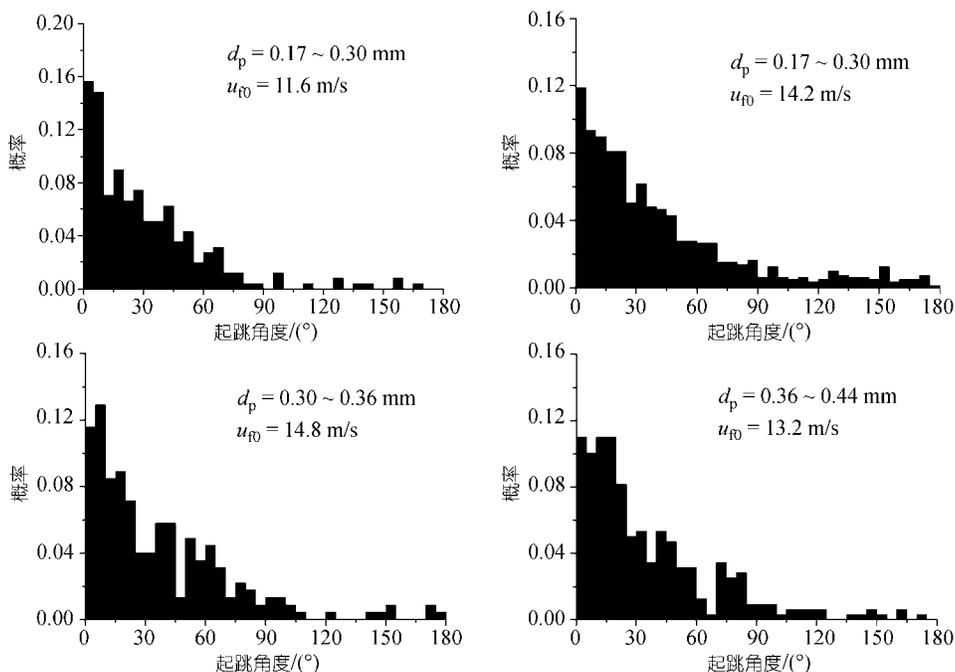


图 5 沙粒起跳角度概率分布

跳角大(39°~94°). 本文与这些实验的差异如前面所述, 可能来自对沙粒采样以及实验条件的差异.

沙粒起跳角度概率分布可用下述指数分布函数表示为

$$P(\alpha_L) = \frac{1}{A} \exp\left(-\frac{\alpha_L}{B}\right), \quad (7)$$

式中 P 为概率, α_L 为沙粒起跳角度(单位为(°)), A 和 B 为拟合常数.

沙粒起跳角度概率分布拟合曲线参数见表 5 所示. 拟合曲线对数据点的关联程度比较好. 采用高速摄影技术的一些风洞实验结果表明起跳速度和角度概率密度分布类似于对数正态分布或者 Gamma 分布形式^[15~17], 但 Anderson 和 Hallet^[19]建议使用指数分布, 因为这些风洞实验

表 5 沙粒起跳角度概率分布拟合参数

沙粒粒径/mm	来流风速/m·s ⁻¹	A	B	R ²
0.17~0.30	10.9	7.8	39.1	0.84
	11.6	6.2	31.1	0.94
	14.2	8.2	40.6	0.98
0.30~0.36	11.1	8.0	40.1	0.92
	14.8	7.7	38.7	0.92
0.36~0.44	12.3	8.8	44.3	0.95
	13.2	7.6	38.8	0.93
	15.8	6.8	34.2	0.93

观察偏向于更易观察到的高能运动颗粒. Dong 等人^[13]的风洞实验测量表明沙粒碰撞速度和起跳速度均可以用 Weibull 函数描述, 而碰撞角度和起跳角度不能用简单函数描述.

本文实验表明沙粒碰撞速度和起跳速度概率分布均可用对数正态分布函数描述, 沙粒碰撞角度和起跳角度均可用指数衰减函数描述, 这为沙床面上沙粒速度分布状态的研究提供了一个实验参考资料.

2.3 沙粒碰撞和起跳关系

沙粒平均碰撞速度和起跳速度的变化关系见图 6 所示. 如果沙粒平均碰撞速度较大, 那么通常沙粒平均起跳速度也大, 反之亦然, 这与 Dong 等人^[13]报道的变化趋势一致. 沙粒平均起跳速度随平均碰撞速度的变化可关联为如下的线性关系:

$$U_L = 0.14 + 0.718U_I, \quad R^2 = 0.93, \quad (8)$$

式中 U_L 和 U_I 分别为沙粒平均起跳速度和平均碰撞速度.

从图 6 还可看出, 沙粒平均起跳速度小于平均碰撞速度, 这是合理的, 因为碰撞过程中沙粒机械能或多或少会有损失. 根据本文的实验, 沙粒平均起跳速度为平均碰撞速度的 0.81~0.9 倍, 或者说, 平均碰撞速度为平均起跳速度的 1.11~1.24 倍. 一些文献报道的平均碰撞速度为平均起跳速度的 1.6~2 倍^[17]、2.3 倍^[15]、1.6 倍^[16], 而 Dong 等人^[13]的结果范围更广, 平均起跳速度为平均碰撞速度的 0.48~1.17 倍.

图 7 为沙粒平均碰撞角度和起跳角度的变化关系. 沙粒平均起跳角度均大于平均碰撞角度, 这是可以理解的, 因为沙粒的垂向速度(绝对值)因空气阻力而减小, 而沙粒水平速度受风速带动而增加, 这两者都会使碰撞角大于起跳角. 沙粒平均起跳角度通常随平均碰撞角度的增加而增大.

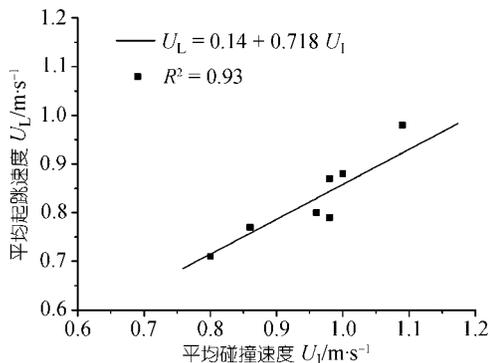


图 6 平均碰撞速度和起跳速度关系

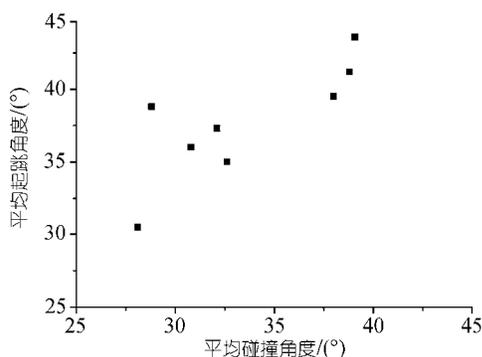


图 7 平均碰撞角度和起跳角度关系

本文实验测量得到的碰撞和起跳沙粒数目见表 6 所示. 从表中可以看出, 起跳沙粒与碰撞沙粒的数目比值在 0.94~1.12 之间, 表明在测量过程中有的沙床面处于净损失状态, 有的处于沉积状态.

表 6 还统计了向后碰撞和向后起跳的沙粒数目, 这些沙粒水平运动速度与气流流动方向

表 6 碰撞和起跳沙粒数目^{a)}

沙粒粒径/mm	来流风速/m·s ⁻¹	N _I	N _{IB}	N _{IB} /N _I	N _L	N _{LB}	N _{LB} /N _L	N _L /N _I
0.17~0.30	10.9	195	14	0.07	218	20	0.09	1.12
	11.6	270	18	0.07	256	11	0.04	0.95
	14.2	841	89	0.11	791	92	0.12	0.94
0.30~0.36	11.1	320	30	0.09	323	34	0.11	1.01
	14.8	221	17	0.08	224	17	0.08	1.01
0.36~0.44	12.3	533	60	0.11	500	67	0.13	0.94
	13.2	335	18	0.05	318	23	0.07	0.95
	15.8	263	19	0.07	269	20	0.07	1.02

a) N_I 为碰撞沙粒总数, N_{IB} 为向后碰撞沙粒数目, N_L 为起跳沙粒总数, N_{LB} 为向后起跳沙粒数目

相反. 向后碰撞沙粒所占总碰撞沙粒的比例为 0.05~0.11, 向后起跳沙粒所占总起跳沙粒的比例为 0.04~0.13.

向后运动的碰撞沙粒和起跳沙粒所占比例之间也有较好的关联, 见图 8 所示. 如果向后碰撞的沙粒增多, 那么向后起跳的沙粒一般也会增加. 回归分析表明, 向后碰撞和起跳沙粒所占比例之间有如下线性关系:

$$F_L = -0.006 + 1.17F_1, \quad R^2 = 0.82, \quad (9)$$

式中 F_L 和 F_1 分别为向后运动的起跳沙粒和碰撞沙粒所占的比例.

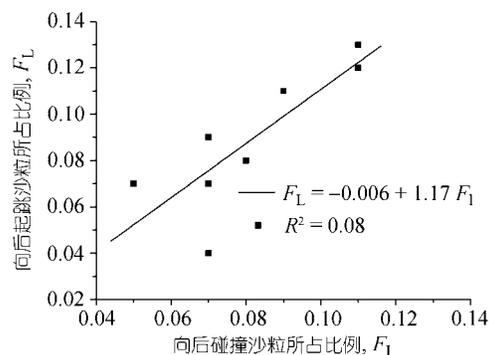


图 8 向后碰撞和起跳沙粒所占比例关系

2.4 不同高度处沙粒速度概率分布

沙粒在不同高度处的运动速度分布状况是大量跃移沙粒运动情况的一个反映.

下面主要分析了 3 个不同高度处的沙粒速度概率分布情况. 高度选择为 4, 20 和 80 mm, 分别处于跃移边界层的底部、中部和上部.

图 9 为不同高度处沙粒水平速度概率分布. 图 9 中 z 为高度. 无量纲沙粒水平速度 u_p^* 定义为 $u_p^* = u_p / \bar{u}_p$, u_p 和 \bar{u}_p 分别为沙粒水平速度和其平均值. 从图中可以看出, 沙粒水平速度概率分布在不同高度均有一个典型的峰值. 在 4 mm 高度处, 沙粒水平速度概率分布不对称, 分布类型表现为正偏(即右偏斜). 实验还表明在 4 mm 高度处大量沙粒的水平速度集中在 1 m/s 附近, 速度较大的沙粒出现较少. 这可能是由于沙粒碰撞过程中, 只有一个颗粒获得了碰撞沙粒的大部分水平动量, 更多的沙粒只获得少量动量而产生低的跳跃轨迹. 从图 9 中还可看到在 4 mm 高度出现了向后运动的沙粒, 这也表明在跃移边界层底部颗粒碰撞作用强烈.

在 20 mm 高度, 沙粒水平速度的变化范围更加广泛, 这一高度沙粒碰撞比下部高度减弱, 既有来自沙面的一些低能量跳跃粒子, 也有来自在气流中经过加速的高能量跃移粒子.

在 80 mm 高度的跃移边界层上部, 颗粒碰撞作用很弱, 只有高能跃移粒子才能达到这一高度.

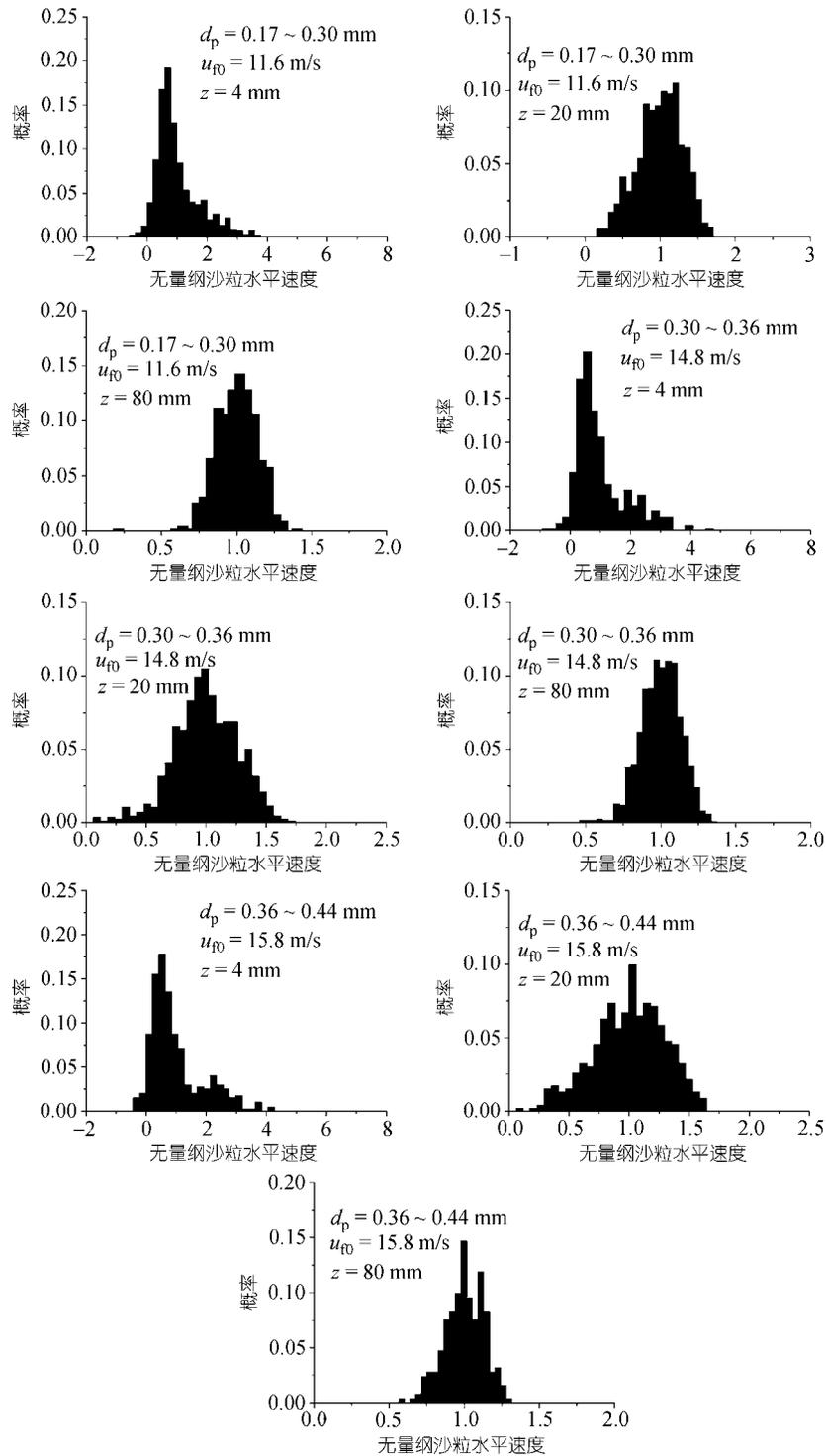


图9 沙粒水平速度概率分布

与 80 mm 高度位置相比, 如果跃移沙粒从 20 mm 高度位置上升, 那么该沙粒需要经过更长的气流作用才能下降到这一高度处, 沙粒水平速度变化较大, 因此, 在 80 mm 高度处的沙粒水平速度变化范围要小于 20 mm 高度处的变化范围。

图 10 为不同高度处沙粒垂直速度概率分布. 无量纲沙粒垂直速度 v_p^* 定义为 $v_p^* = v_p / \bar{u}_p$, v_p 为沙粒垂直速度. 从图 10 中可以看出, 不同高度处沙粒垂直速度概率分布形式均基本类似于正态分布, 可用下述正态分布函数描述:

$$P(v_p^*) = \frac{A}{\sqrt{2\pi}B} \exp\left(-\frac{(v_p^* - C)^2}{2B^2}\right), \quad (10)$$

式中 P 为概率, A , B 和 C 为拟合常数.

沙粒垂直速度概率分布的回归分析参数见表 7 所示. 拟合曲线对实验数据的符合程度较好, 除了一条回归曲线外, 其他回归曲线的相关系数均大于等于 0.97.

实验还检测到沙粒垂直速度大都集中在 -2 m/s 到 2 m/s 之间, 这与 Dong 等人^[4]的报道基本一致, Dong 等人^[4]测量的沙粒垂直速度在 -2.8 和 2.9 m/s 之间变化.

表 7 沙粒垂直速度概率分布拟合参数

沙粒粒径/mm	来流风速/m·s ⁻¹	高度/mm	A	B	C	R ²
0.17~0.30	11.6	4	0.096	0.231	-0.051	0.99
		20	0.038	0.103	-0.033	0.98
		80	0.024	0.078	-0.004	0.98
0.30~0.36	14.8	4	0.109	0.252	0.007	0.98
		20	0.03	0.122	-0.009	0.97
		80	0.019	0.079	0.001	0.97
0.36~0.44	15.8	4	0.105	0.231	-0.023	0.98
		20	0.029	0.094	-0.008	0.98
		80	0.018	0.072	0.003	0.91

3 结论

本文对风沙流中沙床面上沙粒碰撞速度和起跳速度概率分布以及不同高度处沙粒水平速度和垂直速度概率分布进行了详细分析. 分析表明沙粒碰撞速度和起跳速度概率分布均可用对数正态分布函数描述, 碰撞和起跳角度均可用指数分布函数描述.

沙粒碰撞和起跳参数之间有一定的相关性. 沙粒平均起跳速度小于平均碰撞速度, 如果沙粒平均碰撞速度较大, 那么沙粒平均起跳速度通常也大. 沙粒平均起跳角度均大于平均碰撞角度, 并且通常随着平均碰撞角度的增加而增大. 向后运动的碰撞和起跳沙粒所占比例之间也有一定的关联, 如果向后碰撞的沙粒增多, 那么向后起跳的沙粒一般也会增加. 沙粒碰撞对这些向后运动的沙粒有重要影响.

沙粒水平速度概率分布在跃移边界层不同高度处有区别, 在 4 mm 高度处表现为正偏斜类型, 在 20 mm 高度处沙粒水平速度的变化范围更加广泛, 在 80 mm 高度处沙粒水平速度变化范围小于 20 mm 高度处的变化范围. 沙粒垂直速度概率分布在不同高度处均可表示为正态分

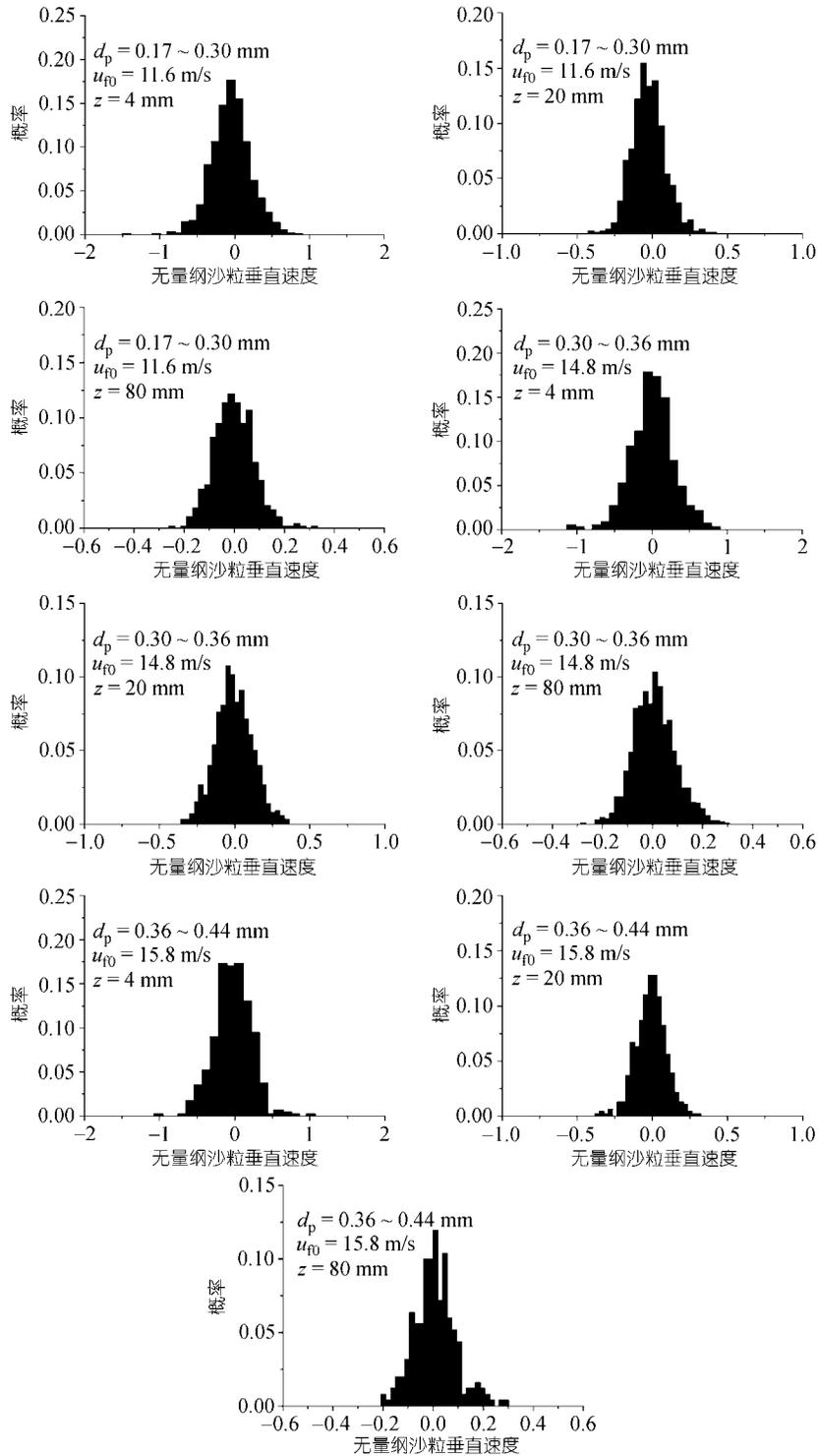


图 10 沙粒垂直速度概率分布

布函数.

本文实验结果为风沙流中沙粒速度分布状态的研究提供了一个参考资料, 同时也为风沙流理论研究提供实验数据参考.

参考文献

- 1 Bagnold R A. The Physics of Blown Sand and Desert Dunes. London: Methuen, 1941
- 2 Cheng H, Zou X Y, Zhang C L. Probability distribution functions for the initial liftoff velocities of saltating sand grains in air. *J Geophys Res-Atmosph*, 2006, 111: D22205
- 3 Anderson R S, Haff P K. Wind modification and bed response during saltation of sand in air. *Acta Mech*, 1991, (suppl.1): 21—51
- 4 Dong Z B, Liu X P, Wang X M, et al. Experimental investigation of the velocity of a sand cloud blowing over a sandy surface. *Earth Surf Proc Landf*, 2004, 29: 343—358
- 5 Zou X Y, Wang Z L, Hao Q Z, et al. The distribution of velocity and energy of saltating sand grains in a wind tunnel. *Geomorphology*, 2001, 36: 155—165
- 6 Greeley R, Blumberg D G, Williams S H. Field measurements of the flux and speed of wind-blown sand. *Sedimentology*, 1996, 43: 41—52
- 7 Greeley R, Iversen J D. Wind as a Geological Process on Earth, Mars, Venus and Titan. Cambridge: Cambridge Univ Press, 1985
- 8 Sharp R P. Wind-driven sand in Coachella Valley, California. *Geol Soc Amer Bull*, 1964, 75: 785—804
- 9 Anderson R S. Erosion profiles due to particle entrained by wind: Application of an eolian sediment-transport model. *Geol Soc Amer Bull*, 1986, 97: 1270—1278
- 10 Dong Z B, Wang H T, Liu X P, et al. Velocity profile of a sand cloud blowing over a gravel surface. *Geomorphology*, 2002, 45: 277—289
- 11 Dong Z B, Wang H T, Liu X P, et al. The blown sand flux over a sandy surface: A wind tunnel investigation on the fetch effect. *Geomorphology*, 2004, 57: 117—127
- 12 Crowe C T, Sommerfeld M, Tsuji Y. Multiphase Flows with Droplets and Particles. Boca Raton: CRC Press, 1998
- 13 Dong Z B, Liu X P, Li F, et al. Impact-entrainment relationship in a saltating cloud. *Earth Surf Proc Landf*, 2002, 27: 641—658
- 14 Chepil W S. Dynamics of wind erosion: I. Nature of movement by wind. *Soil Sci*, 1945, 60: 305—320
- 15 White B R, Schulz J C. Magnus effect on saltation. *J Fluid Mech*, 1977, 81: 497—512
- 16 Willetts B B, Rice M A. Intersaltating collisions. In: Barndorff-Nielsen O E, et al, eds. Proceedings of International Workshop on the Physics of Blown Sand. Aarhus: University of Aarhus, 1985. 83—100
- 17 Nalpanis P, Hunt J C R, Barrett C F. Saltating particles over flat beds. *J Fluid Mech*, 1993, 251: 661—685
- 18 Owen P R. Saltation of uniform grains in air. *J Fluid Mech*, 1964, 20(2): 225—242
- 19 Anderson R S, Hallet B. Sediment transport by wind: Toward a general model. *Geol Soc Am Bull*, 1986, 97: 523—535