

文章编号: 0455-2059(2010)05-0067-04

风沙流中静电力对剪切力的影响

吕萍^{1,2}, 黄建平¹, 董治宝²

(1. 兰州大学大气科学学院, 兰州 730000;

2. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所沙漠与沙漠化重点实验室, 兰州 730000)

摘要: 根据模拟的风沙跃移层中风速廓线分布结果, 讨论了电场力对风沙流中气载剪切力和颗粒作用于单位体积气流的体积力的影响. 结果表明: 沙粒带正电荷时的气载剪切力和颗粒作用于单位体积气流的体积力最大, 不带电荷时次之, 沙粒带负电荷时的气载剪切力和体积力最小.

关键词: 电荷; 气载剪切力; 体积力**中图分类号:** P445; O351**文献标识码:** A

Effects of electrostatical force on shear stress in wind-sand flow

LÜ Ping^{1,2}, HUANG Jian-ping¹, DONG Zhi-bao²

(1. School of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;

2. Key Laboratory of Desert and Desertification, Cold and Arid Regions Environmental and

Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Based on the numerical results of wind velocity in wind-blown sand saltation, the effects of electrostatical force on the air-borne stress and the force per unit volume exerted on the wind by the blown sand cloud were studied. The results showed that the air-borne stress and the force per unit volume exerted on the wind reached the maximum for $q > 0$, and reached the minimum for $q < 0$.

Key words: charge; air-borne stress; force per unit volume

在风沙跃移层中, 运动沙粒在受到风力作用而起跳的同时, 对风也会产生阻滞作用. 由前人的研究^[1-5]可知, 这种阻滞作用会使得风速廓线发生重新调整, 即风沙跃移层以内的风速分布远远偏离对数规律, 在半对数坐标中表现为一条上凸的曲线; 风沙跃移层以上的高度, 风速分布仍服从对数分布, 在半对数纸上风速沿高度的变化曲线仍为一条直线.

通过分析风沙流中不同高度上的气载剪切力和颗粒作用于单位体积气流的体积力可以使我们对这种风速廓线的重整有更进一步的认识. 在过去的二十多年间, 有的学者已经开展了这方面的研究^[6-8], 并得出了一些重要的结论: 气载剪切力随着高度以及自由风速的增大而增大; 颗粒作用于单位体积气流的体积力随着自由风速的增大而增大, 随着高度的增大而减小, 在离床面 0.6 m 的

高度处减小为零. 但是这些学者的研究都集中于沙粒不带电的情形.

早在 20 世纪 40 年代, 人们在强风沙运动和沙尘暴中就已经探测到沙粒的带电现象以及由此产生的风沙电场^[9]. 风沙电场导致的作用于跃移运动沙粒上的静电力与沙粒所受重力相当^[10], 因此, 风沙电场会对沙粒的运动、风沙流结构以及贴地风速廓线等产生显著影响^[11]. 20 世纪末期, Schmidt 等^[10]对野外风沙流中的风沙电场进行了系统的实验测量, 并利用野外观测到的电场强度及沙粒的平均带电量, 采用数值模型模拟了静电力对沙粒跃移轨迹的影响, 结果表明静电力对跃移沙粒的跃移轨迹有显著影响. 近年来, 一些学者^[11-16]对伴随风沙运动的沙粒带电现象、风沙电场及其影响开展了一些试验和数值模拟研究工作, 得出以下结论: 粒径小于 250 μm 的运动沙粒带负电荷, 大

收稿日期: 2009-12-11; **修回日期:** 2010-08-26**基金项目:** 国家自然科学基金项目(40871003); 西部之光博士项目(290828911); 甘肃省自然科学基金项目(096RJZA125)**作者简介:** 吕萍(1972-), 女, 甘肃宁县人, 副研究员, 博士, e-mail: lyping@lzb.ac.cn, 研究方向为风沙物理.

于 $500\ \mu\text{m}$ 的沙粒带正电荷;风沙流中的风沙电场主要是由运动着的带电沙粒形成的,其方向垂直地面向上,与晴天电场的正方向相反,且其强度随着风速和高度的增大而增强.

众所周知,风沙运动中包含大量沙粒,它们在碰撞、跃移中不断相互作用.当沙粒带电后,风沙流中的带电沙粒一方面在产生电场的同时,也会受到电场力的作用而改变其运动,进而影响到风沙流运动的宏观特征.但是到目前为止,有关沙粒带电和风沙电场的已有工作主要是人们对沙粒带电现象和风沙电场存在的研究,而对其所服从的规律(如:沙粒所带电荷量和带电符号与沙粒粒径、风速、高度等的关系)及定量研究还远远不够.另一方面,由于人们对风沙电现象的认识比较有限,有关沙粒带电产生的原因及机理不是很清楚,同时受测量技术的限制,所以目前对沙粒带电的机理研究尚停留在各种推测与假说阶段^[17].

概括以上,目前对风沙运动带电现象的描述和其影响规律的揭示研究出现一定的滞后,多数描述风沙两相流运动的数学模型与理论分析几乎都没有考虑静电力的影响作用.由郑晓静等^[17]的研究可知,静电力对风沙流中沙粒跃移轨迹以及风速廓线有显著影响,那么它对风沙流中气载剪切力和颗粒作用于单位体积气流的体积力有什么影响呢?本文就对其进行了研究.

1 基本模型及结果讨论

首先来分析风沙流中气载剪切力及颗粒作用于单位体积气流的体积力计算公式.

在风沙两相流中,大量颗粒受到风力作用而被起动、加速,从而对气流产生相应的作用力,使剪切力发生变化,受力分析如图1所示:

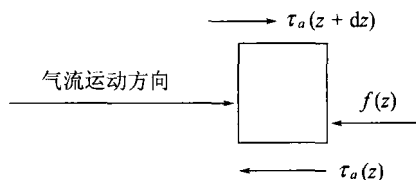


图1 风沙流中气流受力示意图

Fig. 1 Force diagram in wind-blown sand flow

由牛顿第二定律,

$$\tau_a(z) + f(z)dz = \tau_a(z + dz). \quad (1)$$

其中: $\tau_a(z)$ 为 z 高度上气流的剪切力, $\tau_a(z + dz)$ 为 $z + dz$ 高度上气流的剪切力,由气流速度梯度所致,称之为气载剪切力^[2]; $f(z)$ 为颗粒作用于单位体积气流的力(体积力),产生于运动颗粒对气流

动量的分散^[7].因不同高度上运动颗粒的数量、速度不同,其对气流动量的分散亦有很大差异,所以,在受颗粒运动影响的区域内(本文定为风沙跃移层内),气流的剪切力随高度发生变化,此时

$$\frac{d\tau_a(z)}{dz} = f(z), \quad (2)$$

其变化导致风沙运动过程中风速廓线的重新调整.在不受风沙运动影响的区域内, $f(z) = 0$.

由混合长度理论可知

$$\tau_a = \rho\kappa^2 z^2 \left(\frac{du_z}{dz}\right)^2. \quad (3)$$

其中: ρ 为空气密度; κ 为卡曼常数; u_z 为存在风沙活动时 z 高度上的水平风速.

所以,在风沙运动过程中,气流对沙粒的作用产生风沙运动,而由于运动颗粒对气流的反馈,使风速廓线发生重新调整.风沙流中风速廓线的调整可由不同高度上的气载剪切力和颗粒作用于单位体积气流的力来表征.

由(2), (3)式可知,一旦建立起风沙流中的风速廓线方程,就可以获得上述这两个物理参数.

首先利用已经建立的风、沙粒以及静电力相互耦合的运动方程,详见文献[18],计算了沙粒带电时风速沿高度的分布廓线(表1).根据模拟的

表1 不同电场力条件下风速随高度变化的回归分析结果

Tab. 1 Regression relationship between velocity and height under different electrostatic force

| 电场力/ ($\mu\text{C}/\text{kg}$) | 摩擦速度/ (m/s) | a | b | c | 相关 系数 |
|-------------------------------------|----------------------------------|---------|---------|--------|----------|
| +60 | 1.90 | -6.4396 | 35.2095 | 0.2800 | 0.99 |
| | 1.70 | -6.4341 | 33.4209 | 0.2711 | 0.99 |
| | 1.54 | -5.9528 | 27.0755 | 0.2617 | 0.99 |
| | 1.30 | -5.0071 | 24.2279 | 0.2505 | 0.99 |
| | 1.25 | -5.2304 | 21.2021 | 0.2441 | 0.99 |
| | 1.20 | -7.1057 | 18.6025 | 0.2410 | 0.99 |
| | 1.00 | -7.4732 | 13.7968 | 0.2351 | 0.99 |
| | 0.80 | -8.6981 | 10.5163 | 0.2173 | 0.99 |
| | 0.40 | -0.1299 | 08.7650 | 0.1879 | 0.99 |
| 0 | 1.54 | -6.8519 | 25.7664 | 0.2584 | 0.99 |
| | 1.30 | -5.2450 | 21.7087 | 0.2496 | 0.98 |
| | 1.25 | -4.5896 | 18.2651 | 0.2364 | 0.98 |
| | 1.20 | -5.0186 | 15.6263 | 0.2200 | 0.98 |
| | 1.00 | -3.9953 | 11.0135 | 0.2161 | 0.98 |
| | 0.80 | -5.4755 | 08.9269 | 0.1900 | 0.99 |
| | 0.40 | -1.3970 | 07.0192 | 0.1665 | 0.99 |
| | 1.54 | -2.4809 | 22.5538 | 0.2500 | 0.98 |
| | 1.30 | -2.6517 | 18.1508 | 0.2423 | 0.98 |
| -60 | 1.25 | -2.7088 | 15.5398 | 0.2313 | 0.98 |
| | 1.20 | -6.1114 | 12.0738 | 0.2056 | 0.98 |
| | 1.00 | -5.6520 | 09.6214 | 0.1853 | 0.98 |
| | 0.80 | -4.8086 | 07.4138 | 0.1695 | 0.99 |
| | 0.40 | -2.2524 | 05.6406 | 0.1418 | 0.99 |

拟合方程: $u_z = a + bz^c$.

风速廓线试验数据, 运用最小二乘法拟合不同电场力作用下风沙流中的风速廓线方程, 结果表明指数廓线(4)式可以较好地拟合风沙流中风速随高度的变化. 这一结果与 Lee 等^[19]和 MeKenna 等^[20]的研究结果相符合.

$$u_z = a + bz^c, \quad (4)$$

其中: u_z 为高度 z 处的风速; a, b, c 为回归系数. 回归系数 b 随着摩擦速度的增大而增大, 其大小也受静电力的影响, 同一摩擦速度下, $q = -60 \mu\text{C}/\text{kg}$ 时

b 值最小, $q = 60 \mu\text{C}/\text{kg}$ 时最大; 回归系数 c 的变化范围在 0.14~0.28 之间.

由(4)式分别可以得到气载剪切力以及颗粒作用于单位体积气流的体积力随高度分布的公式:

$$\tau_a(z) = \rho k^2 z^{2c} b^2 c^2, \quad (5)$$

$$f(z) = 2\rho \kappa^2 b^2 c^3 z^{2c-1}. \quad (6)$$

图 2, 图 3 分别为气载剪切力及体积力随高度的分布图.

由图 2 可以看出: 在三种电场力作用下, 气载剪

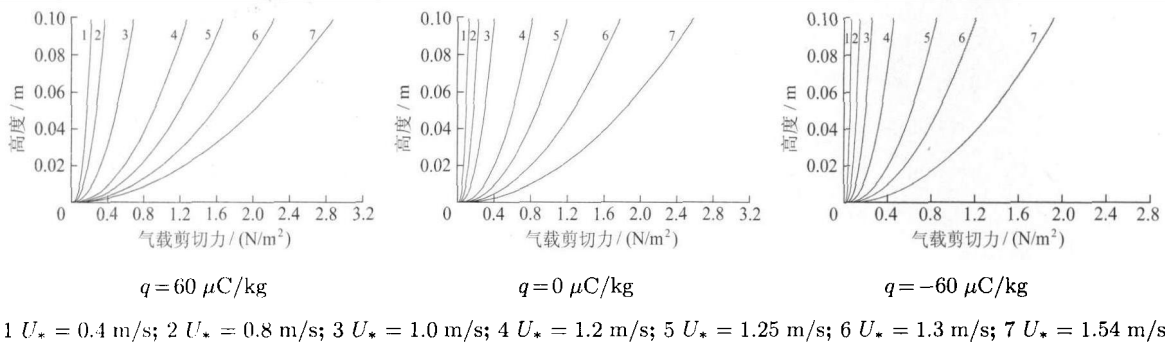


图 2 不同电场力下气载剪切力随高度的分布

Fig. 2 Distribution of air-borne stress with height under different electrostatic force

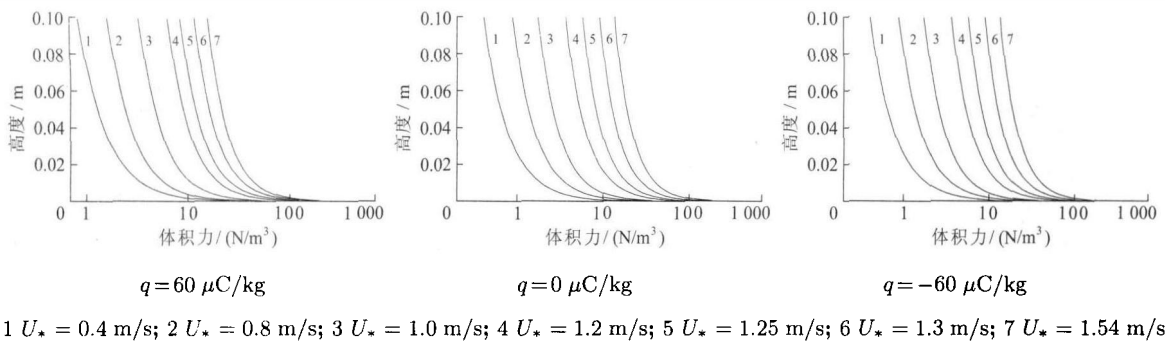


图 3 不同电场力下颗粒作用于单位体积气流的体积力随高度分布

Fig. 3 Distribution of force per unit volume with height exerted on the wind by sand particles under different electrostatic force

切力都随着高度的增加而增大, 且与摩擦速度的大小成正比, 这一结果相同于文献[3, 8]的数值模拟结果. 同一摩擦速度条件下, $q = 60 \mu\text{C}/\text{kg}$ 时的剪切力最大, $q = 0 \mu\text{C}/\text{kg}$ 时次之, $q = -60 \mu\text{C}/\text{kg}$ 时的气载剪切力最小, 这说明沙粒带正电荷时更容易脱离地表而进入大气中.

由图 3 可以发现颗粒作用于单位体积气流的体积力随高度的增加而减小. 这意味着颗粒从气流中所获取的能量随高度的增加而减小, 其大小也受摩擦速度的影响, 摩擦速度越大, 颗粒作用于单位体积气流的体积力也越大, 即颗粒作用于单位体积气流的体积力会随着气流速度的增大而增大. 同一摩擦速度条件下, $q = 60 \mu\text{C}/\text{kg}$ 时的体积

力最大, $q = 0 \mu\text{C}/\text{kg}$ 时次之, $q = -60 \mu\text{C}/\text{kg}$ 时的体积力最小. 由图 2 分析可知, 沙粒带正电荷时可以从空气中获得更多能量用来克服阻力而进入大气中, 即此时的输沙率较沙粒不带电和带负电荷时的输沙率最大, 所以此时颗粒作用于单位体积气流的体积力也最大.

2 结论

本文利用已经建立的风、沙粒以及静电力相互耦合的运动方程, 计算了沙粒带电时风速沿高度的分布廓线. 根据模拟的风速廓线试验数据, 讨论了电场力对风沙流中气载剪切力和颗粒作用于单位体积气流的体积力的影响, 得到如下结论: 在三种电场力作用下气载剪切力和颗粒作用于单位

体积气流的体积力都随着高度的增加而增大,且与摩阻速度大小成正比;同一摩阻速度下,沙粒带正电荷时的气载剪切力和颗粒作用于单位体积气流的体积力最大,带负电荷时这两个量最小。

参 考 文 献

- [1] RUBINOW A, KELLER J. The transverse force on a spinning sphere moving in a viscous fluid [J]. *J Fluid Mech*, 1991, 111: 447–459.
- [2] OWEN P R. Saltation of uniform grains in air[J]. *J Fluid Mech*, 1964, 20: 225–242.
- [3] MCEWAN I K, WILLETTS B B. Numerical model of the saltation cloud [J]. *Acta Mech*, 1991, 1: 53–66.
- [4] GILLETTE D A, MARTICORENA B, BERGAMENTTI G. Change in the aerodynamic roughness height by saltating grains: experimental assessment, test of theory and operational parameterization[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1998, 103(6): 6 203–6 209.
- [5] 王洪涛,董治宝,钱广强,等.关于风沙流中风速廓线的进一步实验研究[J].*中国沙漠*, 2003, 23(6): 721–724.
- [6] UNGAR J, HAFF P K. Steady state saltation in air[J]. *Sedimentology*, 1987, 34(1): 289–299.
- [7] ANDERSON R S, HAFF P K. Wind modification and bed response during saltation of sand in air[J]. *Acta Mech*, 1991, 1: 21–25.
- [8] MCEWAN I K, WILLETTS B B. Adaptation of the near-surface wind to the development of sand transport[J]. *J Fluid Mech*, 1993, 252: 99–115.
- [9] GILL E W B. Frictional electrification of sand[J]. *Nature*, 1948, 162: 568–569.
- [10] SCHMIDT D S, SCHMIDT R A, DENT J D. Electrostatic force on saltating sand[J]. *J Geophys Res*, 1998, 103(D8): 8 997–9 001.
- [11] HUANG Ning, ZHENG Xiao-jing, ZHOU You-he, et al. The simulation of wind-blown sand movement and probability density function of lift-off velocities of sand particles[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2006, 111(D10): 6 559–6 566.
- [12] HUANG Ning, ZHENG Xiao-jing. A laboratory test of the electrification phenomena in wind-blown sand flux[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2001, 46(5): 417–420.
- [13] HUANG Ning, ZHENG Xiao-jing. Theoretical simulation of developing process of wind-blown sand movement[J]. *Key Engineering Materials*, 2003, 243/244: 589–594.
- [14] HE Qing-song, ZHOU You-he, ZHENG Xiao-jing. Scattering and attenuation of electromagnetic waves in sand storm[J]. *Key Engineering Materials*, 2003, 243/244: 577–582.
- [15] ZHENG Xiao-jing, HUANG Ning, ZHOU You-he. Laboratory measurement of electrification of wind-blown sands and simulation of its effect on sand saltation movement[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108(D10): 4 322–4 329.
- [16] 张鸿发,王涛,屈建军,等.沙尘暴电效应的实验观测研究[J].*地球物理学报*, 2004, 47(1): 47–53.
- [17] 郑晓静,黄宁,周又和.风沙运动的沙粒带电机理及其影响的研究进展[J].*力学进展*, 2004, 34(1): 77–86.
- [18] LÜ Ping, DONG Zhi-bao. The dependency of sand transport rate by wind on the atmospheric stability: a numerical simulation[J]. *Geomorphology*, 2008, 99(1): 296–301.
- [19] LEE H Y, YU U M. Velocity profile of sediment-laden open channel flow[J]. *International Journal of Sedimentary Research*, 1991, 6(1): 25–51.
- [20] MCKENNA N, NICKLING W G. Momentum extraction within saltation: implications for experimental evaluation of wind profile parameters[J]. *Boundary Layer Meteorology*, 1994, 68(1): 35–50.

(责任编辑:张勇)