

跃移雪颗粒运动特性的数值模拟研究

周珣毅, 刘长卿, 顾 明

(同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

摘要: 运用拉格朗日方法, 根据雪颗粒的运动机理, 对单个跃移颗粒运行轨迹进行了数值计算. 同时, 结合颗粒的受力特征, 对影响其运动的一些参数, 如粒子直径、摩擦速度和颗粒密度等进行了分析. 结果表明, 随着雪颗粒直径或雪粒密度的增大, 粒子竖向受力与重力之比减小, 粒子的跃移高度则随之增大; 而当粒子起跳速度不同时, 水平方向受力与重力之比的变化规律也表现不同, 进而影响其水平方向的跃移长度. 基于经验公式, 建立了雪面侵蚀质量通量与跃移粒子数目之间的关系, 计算了雪颗粒质量传输率, 并与经典文献的计算方法进行了比较. 结果显示, 随着雪颗粒直径和摩擦速度的增大, 粒子质量传输率随之增大; 随着阈值摩擦速度增大, 粒子质量传输率随之减小. 所得计算结果与 Iversen 经验公式吻合较好.

关键词: 拉格朗日方法; 跃移轨迹; 质量传输率; 数值模拟
中图分类号: TU312 **文献标志码:** A

Numerical Simulation on Movement Characteristics of Saltating Snow Particles

ZHOU Xuanyi, LIU Changqing, GU Ming

(State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: According to the movement mechanism of snow particles, the numerical simulation on a single saltating particle's trajectory was carried out with the Lagrange method. At the same time, an analysis was made of some parameters including the particle diameter, the friction velocity and particle density in accordance with the characteristics of forces on particles. The results show that as the snow particle diameter or particle density increases, the ratio of particle vertical force to gravity decreases, but the particle saltation height increases. The ratio of horizontal force to gravity varies with the particle's liftoff velocity, thereby affecting its horizontal saltation length. Based on an empirical formula, the relationship between the mass flux of

snow surface erosion and the number of saltation particles is established to calculate the mass transport rate of snow particles. And the calculation results are compared with the calculated results by a classical empirical formula. The comparison shows that the particle mass transport rate increases with the growth of snow particle diameter and friction velocity, but it decreases while the threshold friction speeds up. The present results agree well with those by Iversen's empirical formula.

Key words: Lagrange method; saltation trajectory; mass transport rate; numerical simulation

风致积雪运动的基本过程按雪粒离开地面的程度分为蠕移、跃移及悬移运动, 许多学者认为, 跃移运动对雪颗粒的迁移有很大的贡献. 研究风致积雪运动的方法大致分为 4 类: 理论分析、实地观测、风洞试验和数值模拟. 数值模拟方法因其成本低, 周期短, 可以方便地改变各种参数来研究其对结果的影响规律, 越来越受到雪工程研究人员的关注.

近年来, 计算流体力学方法在气固两相流的数值模拟中应用越来越广, 受到不同行业学者的关注^[1-2]. Uematsu, Naaim 和 Beyers 等人都曾致力于风雪运动的数值模拟研究. Uematsu 等将雪颗粒跃移和悬移考虑在模型中, 提出了跃移层风雪流输运质量方程^[3]; Naaim 等构建了雪粒堆积和风蚀模型来描述雪表面和风雪流之间的质量交换^[4]; Gordon 等通过实地观测, 得到了雪颗粒形状、粒径等分布情况^[5]; Beyers 等人结合实测数据, 讨论了雪颗粒沉积和侵蚀对雪运动的影响^[6]; X. Y. Zhou 等采用两相流理论模拟风吹雪运动, 在计算流体动力学软件 FLUENT 的平台上进行了二次开发, 对北京首都机场 T3 航站楼屋面的雪荷载分布规律进行了分析, 为结构设计提供了依据^[7]; 周珣毅等在考察雪颗粒运

收稿日期: 2012-06-05

基金项目: 国家自然科学基金(51278368); 科技部国家重点实验室基金(SLDRCE08-A-03); 中央高校基本科研业务费专项资金; 教育部留学回国人员科研启动基金

第一作者: 周珣毅(1975—), 男, 副研究员, 工学博士, 主要研究方向为结构抗风. E-mail: zhouxytj@tongji.edu.cn

动机理的基础上,采用 RANS 方法对无建筑开阔场地的风雪流进行了模拟,并与经典文献中的实测结果进行了对比^[8]。以上学者的研究都是采用欧拉-欧拉方法,即把雪相和空气相都假定为连续相处理;黄宁等采用欧拉-拉格朗日方法对风沙(雪)运动进行研究^[9-11],即把固相认为是离散介质,其方法对风雪流的研究有着借鉴意义。

本文基于雪颗粒跃移质量传输率等相关的经验公式,建立了雪面侵蚀质量通量与粒子跃移数目之间的关系,结合拉格朗日方法,分析了研究粒子起跳速度、粒子直径和摩擦速度等参数对运动轨迹的影响。在此基础上,对雪颗粒质量传输率进行了计算,并与已有的经验公式进行对比分析,验证了本文提出的假设和计算方法的合理性和有效性。

1 理论分析

1.1 跃移质量传输率定义

雪跃移质量传输率,是指单位时间跃移层内单位宽度通过的雪的质量($\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$),即

$$Q_{\text{sal}} = \int_0^{h_{\text{sal}}} u_{\text{sal}}(y) \phi_{\text{sal}}(y) dy \quad (1)$$

式中: h_{sal} 表示雪颗粒的跃移高度; $u_{\text{sal}}(y)$ 表示 y 高度处雪颗粒跃移水平平均速度; $\phi_{\text{sal}}(y)$ 表示 y 高度处雪跃移的浓度,即跃移层中 y 高度处单位体积内雪的质量。 $u_{\text{sal}}(y)$, $\phi_{\text{sal}}(y)$ 都随高度变化,需将两者乘积沿高度积分才能获得 Q_{sal} 。

1.2 雪跃移量经验公式

质量传输率作为描述雪颗粒跃移的重要参数,很多学者都曾经做过大量的研究工作,提出了相关的经验公式。其中,对于空旷环境下的雪颗粒传输率计算,Iversen 与 Pomeroy 的经验公式应用十分广泛。

Iversen 假定跃移雪颗粒的起动速度与 $(u_* - u_{*t})$ 相关,给出跃移雪质量传输率的经验公式^[12]为

$$Q_{\text{sal}} = \frac{\rho}{g} u_*^2 (u_* - u_{*t}) \quad (2)$$

式中: ρ 为空气密度; g 为重力加速度,取为 $9.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$; u_* 为壁面摩擦速度; u_{*t} 为阈值摩擦速度。

Pomeroy 结合平坦流域雪跃移的实测数据,给出雪跃移质量传输率的经验公式^[13]为

$$Q_{\text{sal}} = \frac{0.68\rho}{u_* g} u_{*t}^2 (u_*^2 - u_{*t}^2) \quad (3)$$

1.3 雪侵蚀量经验公式

雪是否发生侵蚀或沉积由近壁面的摩擦速度

(风速)决定。当摩擦速度 u_* 超过阈值摩擦速度 u_{*t} , 壁面上的雪被风吹起,即发生侵蚀。雪侵蚀量(即质量通量, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)可用下式表达^[6]:

$$q_{\text{ero}} = A_{\text{ero}} (u_*^2 - u_{*t}^2) \quad (4)$$

式中: A_{ero} 为常系数,取 $A_{\text{ero}} = 7 \times 10^{-4}$ 。

此外,还有其他学者,如 Uemastu 提出经验公式^[3]为

$$q_{\text{ero}} = w_f \frac{Q_{\text{sal}}}{h_{\text{sal}} u_{\text{sal}}} \quad (5)$$

式中: w_f 为粒子下落速度; u_{sal} 为粒子跃移速度; $u_{\text{sal}} = 2.8 u_{*t}$; h_{sal} 为粒子平均跃移高度,可用下式表达^[13]:

$$h_{\text{sal}} = 1.6 \frac{u_*^2}{2g} \quad (6)$$

2 跃移雪颗粒运动模型

2.1 雪颗粒受力分析

雪颗粒在气流中受力较多,例如气动升力、Saffman 力、Magnuss 力等,但并不是每一种力在运动分析时都需要考虑。同时,考虑到重力、阻力和浮力是雪颗粒运动的主要驱动力,后续的分析都近似忽略其他外力的作用。

$$\text{重力: } F_G = m_p g = \rho_p V_p g = \frac{1}{6} \pi \rho_p d_p^3 g \quad (7)$$

$$\text{浮力: } F_F = \rho V_p g = \frac{1}{6} \pi \rho d_p^3 g \quad (8)$$

$$\text{空气阻力: } F_D = \frac{1}{2} \rho u_r^2 A C_D = \frac{\pi}{8} \rho u_r^2 d_p^2 C_D \quad (9)$$

式(7)~(9)中: m_p 为雪颗粒质量; ρ_p 为雪颗粒密度; V_p 为雪颗粒体积; d_p 为雪颗粒直径; u_r 为雪颗粒与空气的相对速度; A 为雪颗粒迎风面横截面面积; C_D 为阻力系数,采用经验公式^[14] $C_D = \frac{24}{Re} (1 + 0.0806 Re)$, Re 为颗粒雷诺数。

前文所述的粒子下落速度 w_f 按照文献经验公式^[15]取为 $w_f = \sqrt{\frac{4(\rho_p - \rho)d_p}{3\rho C_D} g}$, 将 C_D 与 Re 的表达式代入其中,下落速度可变换为

$$w_f = \frac{-\nu + \sqrt{\nu^2 + 0.0179(\rho_p/\rho)gd_p^3}}{0.161 \cdot 2d_p} \quad (10)$$

式中: ν 为空气的运动黏性系数。

可见,下落速度是雪颗粒密度及直径的函数,如图1所示,随着雪颗粒粒径和密度的增大,下落速度也随之增大。

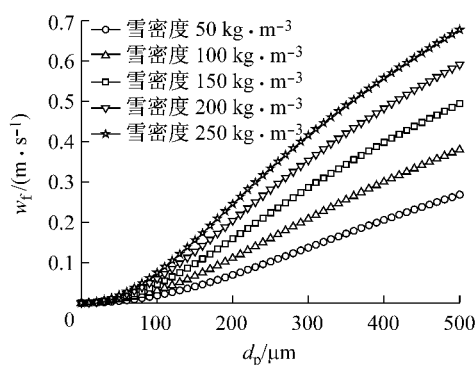


图 1 雪颗粒下落速度变化规律

Fig.1 Settling velocity as a function of snow particle diameter

2.2 雪颗粒竖向起跳速度分布函数

假定在跃移运动中,雪颗粒全部为垂直起跳.当颗粒以不同速度起跳时,记竖向初速度分布函数为 $f(v_0)$,即单位时间从单位面积上起跳的颗粒中,以速度 v_0 起跳的粒子数目与颗粒总数之比为 $f(v_0)$.采用 Anderson and Hallet 提出的如下指数函数形式的初速度分布^[16],见图 2.

$$f(v_0) = \frac{1}{0.63u_*} \exp\left(-\frac{v_0}{0.63u_*}\right) \quad (11)$$

观察图 2,在同一摩擦速度下,以较小速度起跳的雪粒的概率比较大,并且随着雪粒起跳速度的增大,相应的概率逐渐减小.随着摩擦速度增大,以较小速度起跳的雪粒的概率较低,以较大速度起跳的雪粒的概率变大.

2.3 雪颗粒运动方程

经过上述受力分析,把粒子运动简化为二维平面运动,通过坐标与时间 (x, y, t) 表示,运动轨迹方程为

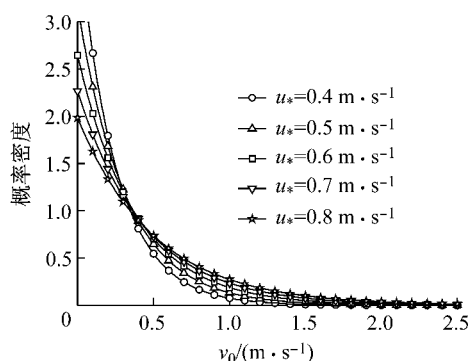


图 2 颗粒竖向起跳速度概率密度分布

Fig.2 Probability distribution of lift-off velocity of particles

$$m_p \frac{d^2 x}{dt^2} = f_x = \frac{1}{2} C_D \rho u_* \left(u - \frac{dx}{dt}\right) \pi \left(\frac{d_p}{2}\right)^2 \quad (12)$$

$$m_p \frac{d^2 y}{dt^2} = f_y = F_F - F_G - \frac{1}{2} C_D \rho u_* \left(\frac{dy}{dt}\right) \pi \left(\frac{d_p}{2}\right)^2 \quad (13)$$

式(12)与(13)中,假定空气只有水平方向速度 u ,竖向速度忽略不计.采用壁面粗糙高度和壁面摩擦速度给出对数律的风速剖面 $u = \frac{u_*}{k} \ln\left(\frac{y}{y_0}\right)$, k 为卡曼

常数;相对速度取为: $u_r = \left[\left(\frac{dx}{dt} - u\right)^2 + \left(\frac{dy}{dt}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}}$.

3 雪颗粒运动轨迹计算分析

3.1 跃移轨迹与雪颗粒粒径关系

由上述运动方程(12),(13)可知,影响雪颗粒运动轨迹的参数因素包括粒子的直径、密度和摩擦速度等因素.表 1 给出了我国天山地区积雪参数的大致范围^[17].可见,雪颗粒的直径大约为毫米量级,而雪颗粒的密度大约为 $40 \sim 300 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 不等.

表 1 我国新疆天山地区积雪参数

Tab.1 Snow parameters of Tianshan region in Xinjiang Uygur Autonomous Region of China

积雪名称	新雪(干雪)	新雪(湿雪)	细粒雪	中粒雪	粗粒雪	融冻雪
直径/mm	<0.5	<0.5	0.5~1.0	1.0~2.0	2.0~3.0	3.0~4.0
密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	40~80	100~200	110~170	170~230	180~240	200~270

给定雪颗粒运动的初始条件:假定粒子的初始坐标为 $(0, 0.005)$,初始速度只有竖向速度,水平速度为零,具体见表 2.运动方程(12),(13)便可通过龙格-库塔方法进行求解,得到雪颗粒的运行轨迹.如无特殊说明,本文的计算按表 2 中取值.

在同等摩擦速度($u_* = 0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)条件下,粒子起跳速度分别为 $0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $2.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,分别绘出粒子直径为 $0.30, 0.45, 0.60$ 与 0.75 mm 的颗粒运行轨迹.从图 3 可得,在相同的起跳速度时,

随着粒子直径的增大,粒子的跃移高度 h 逐渐变大;

表 2 数值计算的相关参数

Tab.2 Numerical calculation related parameters

参数符号	参数名称	参数取值
ρ	空气密度	$1.225 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
ρ_p	雪粒密度	$250 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
d_p	雪颗粒直径	0.45 mm
k	卡曼常数	0.4
u_*	摩擦速度	$0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
v_0	初始起跳速度	$0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

并且,由图 3a 与 3b 对比可知,随着粒子初始速度增大,其所能达到的最大跃移高度也随之增大。例如,当起跳速度由 $0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 增加到 $2.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,粒径为 0.45 mm 的颗粒的最大跃移高度由 0.014 m 增加到 0.053 m 。另外,观察图 3,当颗粒起跳速度不同时,水平跃移距离 l 的变化规律是相反的:图 3a 中,粒子起跳速度较小时,随着粒子直径的增大,粒子的跃移长度逐渐变小;而图 3b 中,粒子起跳速度较大时,随着粒子直径的增大,粒子的跃移长度逐渐变大。

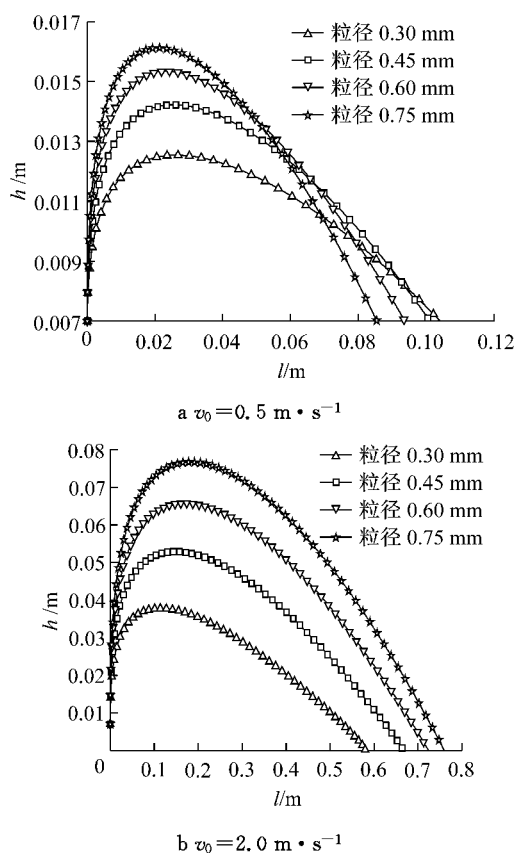


图3 雪颗粒跃移轨迹随直径的变化规律
Fig.3 Saltation trajectory as a function of snow particle diameter

图 4 中箭头 $\uparrow$ 、 $\downarrow$ 分别表示粒子处于上升和下降阶段。通过前文的受力分析可知,粒子在上升过程中,重力和空气阻力竖向分量方向均向下。在粒子达到最大跃移高度处,粒子只有水平方向的速度,空气阻力的竖向分量为零,雪颗粒在竖直方向只受到重力的作用(浮力相比较小),此时竖向受力与重力之比为 1。不难发现,在上升过程中,当粒子以相同的速度起跳时,由于空气阻力起减速作用,较小粒径的雪颗粒受到的空气阻力占竖向力中的比例较大,因而最大跃移高度较小;而较大粒径雪颗粒受到的空气

阻力占竖向力中的比例相对较小,故跃移高度较大。因此,在物理意义上,图 3 中的现象便得到了合理的解释。而且,这与文献[18]的计算结论是类似的,在一定程度上也验证了本文计算结果的准确性。

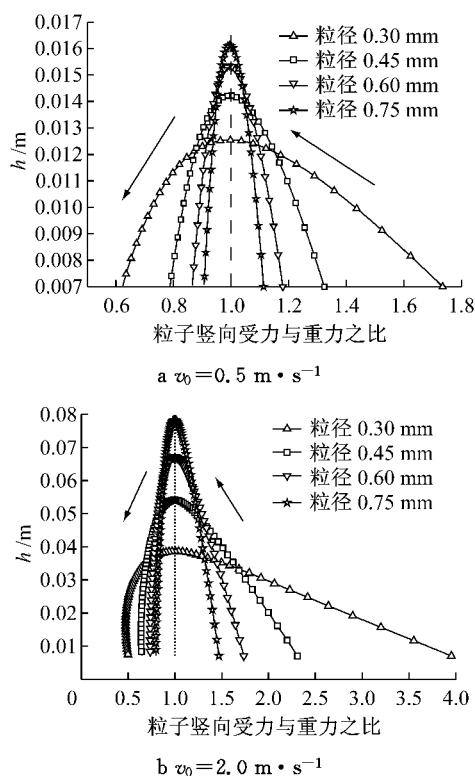


图4 雪颗粒竖向受力与重力之比随跃移高度的变化曲线
Fig.4 Variation curves of the ratio of vertical force to gravity with saltation height

图 5 所示为雪颗粒水平受力与重力之比随跃移高度的变化规律。图中横坐标轴的正负号表示水平受力的方向,“+”表示起加速作用,“-”表示起减速作用。图 5a 中,粒子的粒径越小,其水平方向受力与重力之比越大,且图 5a 中水平力几乎都为正值,即当粒子起跳速度较小时,在运动过程中,粒子速度一直小于风速,水平作用力起加速作用,故而小粒径的雪颗粒跃移长度较大;图 5b 中,下降阶段,水平力为负值,即当粒子起跳速度较大时,在下降过程中,粒子速度一直大于风速,水平作用力起减速作用。且粒径越小,受到的阻力越大,故小粒径的雪颗粒的跃移距离可能会小一些。当然,由于本文对雪颗粒做了球体的假设,这样的结论尚需进一步的验证。

3.2 跃移轨迹与摩擦速度关系

不同粒径的颗粒最大水平跃移距离(即跃移长度)随摩擦速度的变化规律如图 6 所示。与前文 3.1 类似,粒子起跳速度不同时,水平跃移距离的变化规律也不同。当颗粒起跳速度较小时,如图 6a 中, $w_0 =$

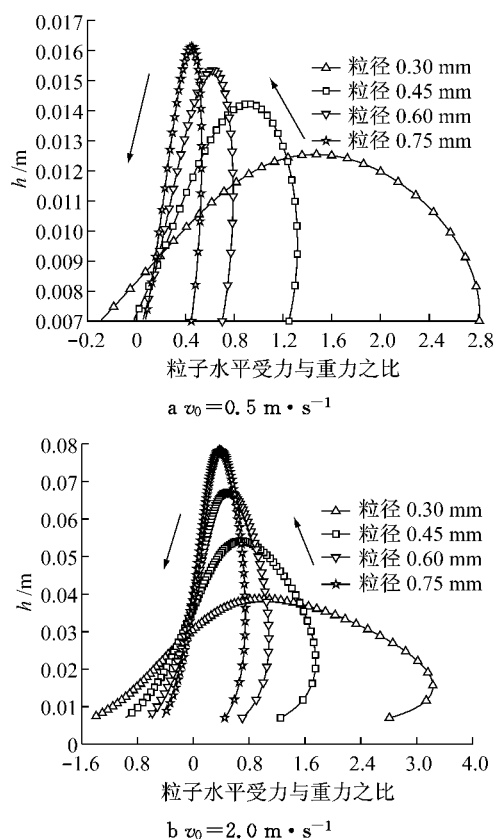


图5 雪颗粒水平受力与重力之比随跃移高度的变化曲线
Fig.5 Variation curves of the ratio of horizontal force to gravity with saltation height

$0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 随着摩擦速度的增大, 颗粒的水平跃移距离先增大后减小; 且随着粒子直径的增大, 水平跃移距离随之减小. 当颗粒起跳速度较大时, 如图 6b 中, $v_0 = 2.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 随着摩擦速度的增大, 不同粒径颗粒的水平跃移距离都随之增大, 但增大的幅度不同. 较小粒径的颗粒水平跃移距离随着摩擦速度的增大幅度相比粒径较大的颗粒增幅小一些. 例如对于粒径为 0.15 mm 的颗粒, 当摩擦速度从 $0.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 增加到 $1.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 水平跃移距离的增大幅度为 0.21 mm ; 而对于粒径为 0.75 mm 的颗粒, 当摩擦速度从 $0.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 增加到 $1.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 水平跃移距离的增大幅度为 0.44 mm , 约为前者的 2.1 倍.

上述现象的具体原因, 可由图 7 中所描述的变化规律予以解释. 由于篇幅所限, 数据较多, 且变化规律类似, 图中只列举了一些代表性的摩擦速度数值下的变化规律(颗粒直径为 0.45 mm). 例如图 7a 中, 当粒子起跳速度较小时, 在上升阶段, 此时粒子速度小于风速, 水平作用力起加速作用. 当摩擦速度 u_* 小于 $0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 随着摩擦速度的增大, 粒子在水平方向的受力与重力之比随之变大, 在 $u_* = 0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 水平受力与重力之比最大; 当摩擦速

度 u_* 大于 $0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 随着摩擦速度的增大, 粒子在水平方向的受力与重力之比随之变小. 这就解释了图 6a 中跃移长度先增大后减小, 且在 $0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时其跃移长度最大的原因. 图 7b 中, 起跳速度为 $2.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 与起跳速度为 $0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的跃移规律明显不同, 在上升阶段, 随着摩擦速度的增大, 粒子在水平方向的受力与重力之比随之变大. 因而当竖向起跳速度较大时, 摩擦速度增大, 水平跃移长度增加.

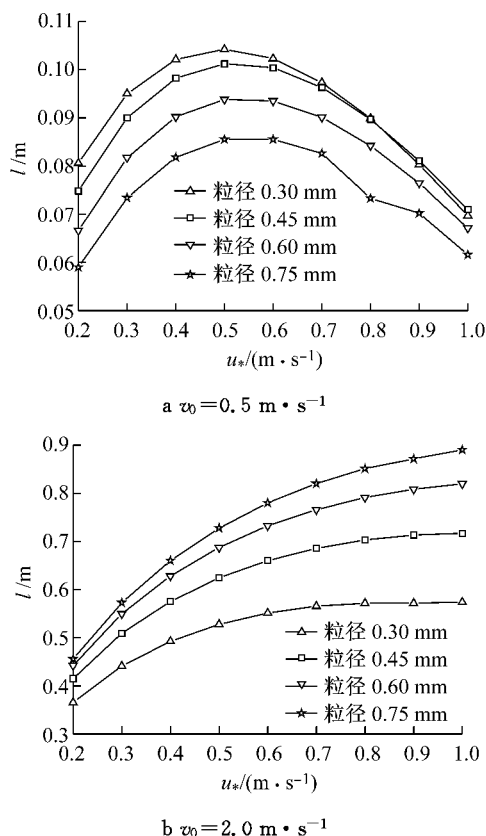


图6 水平跃移距离随摩擦速度的变化曲线
Fig.6 Variation curves of saltation length with friction velocity

由图 8 可知, 在粒径不变的情况下, 随着摩擦速度的增大, 本文所计算出的跃移高度并未发生明显的变化, 基本维持在某一固定值附近; 而经验公式中, 跃移高度与摩擦速度呈抛物线关系. 可以看出, 本文计算出的粒子跃移高度介于平均跃移高度 h_{sal} 最大值与最小值的范围之内, 并且随着起跳速度的增大而增大. 一方面说明了传统经验公式的合理性, 另一方面也进一步验证了本文计算的粒子跃移轨迹的有效性.

3.3 跃移轨迹与雪颗粒密度关系

假定雪颗粒粒径单一不变, 均为 0.45 mm , 颗粒跃移轨迹与雪颗粒密度的变化关系如图 9 所示. 可

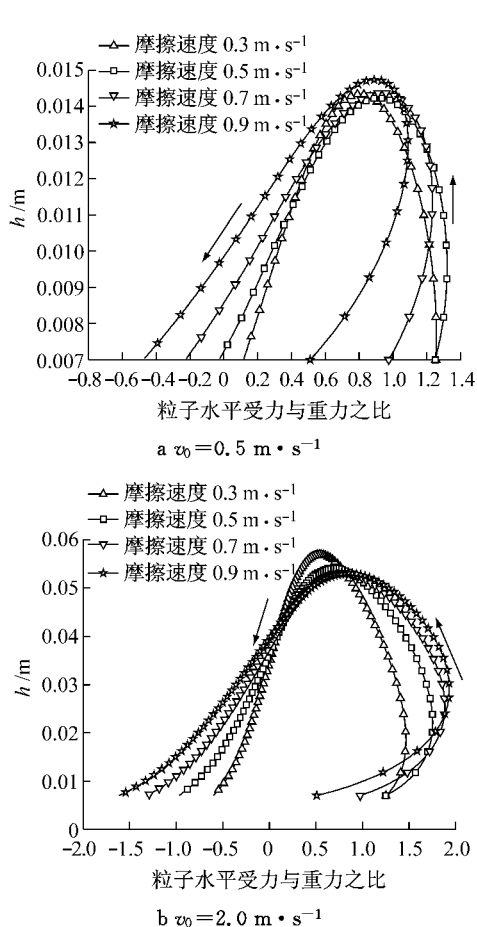


图7 雪颗粒水平受力与重力之比随跃移高度的变化曲线(粒径0.45 mm)

Fig.7 Variation curves of the ratio of horizontal force to gravity with saltation height($d = 0.45$ mm)

见,随着雪颗粒密度的增大,粒子的跃移高度随之增大。

对比图4和图10,通过前文的受力分析可知,粒子在上升过程中,空气阻力竖向分量向下,在粒子达到最大跃移高度处,粒子只有水平方向的速度,空气阻力的竖向分量为零,雪颗粒在竖直方向只受到重力的作用(浮力相比较小)。此时,竖向加速度近似等于重力加速度 g 。在上升过程中,粒子做减速运动,加速度越大,上升的高度越低。由图10可知,竖向起跳速度相同时,较小密度的雪颗粒竖向加速度较大,因而最大跃移高度较低;而较大密度的颗粒的加速度相对较小,故跃移高度较大。这与前文3.1的变化规律类似。

4 雪颗粒跃移质量传输率计算分析

4.1 本文计算模型

本文试图建立雪面侵蚀质量通量与粒子跃移数

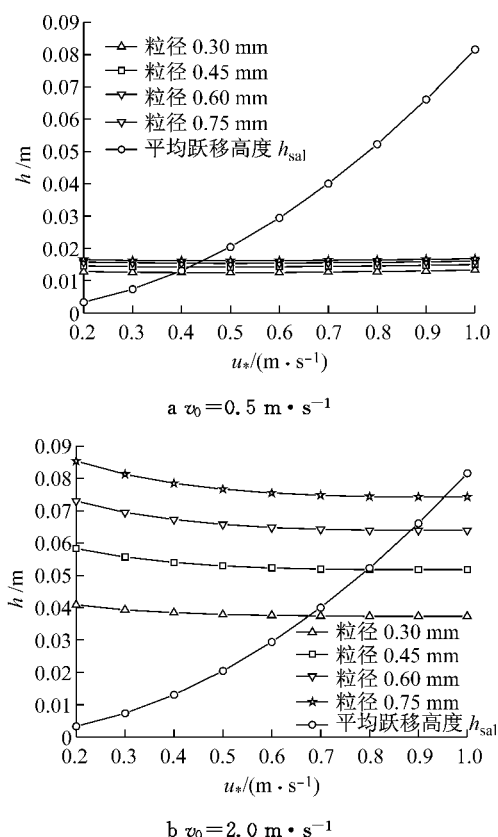


图8 雪颗粒跃移高度随摩擦速度的变化曲线

Fig.8 Variation curves of saltation height with friction velocity

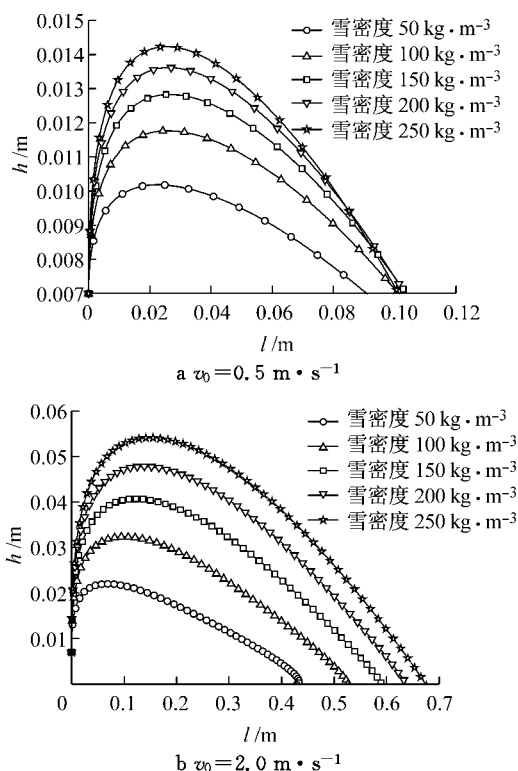


图9 雪颗粒跃移轨迹随颗粒密度的变化规律

Fig.9 Saltation trajectory as a function of snow particle density

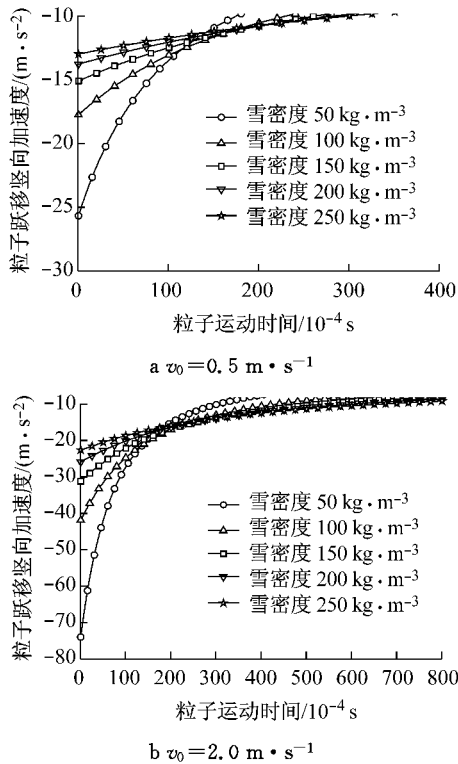


图 10 雪颗粒竖向加速度随密度的变化曲线
Fig. 10 Variation curves of vertical acceleration with snow particle density

目之间的关系,假设单位时间单位面积上起跳的粒子数为 s , m_p 为单个雪颗粒的质量,则 $m_p s$ 为单位时间单位面积上起跳粒子的质量,物理意义上等价于壁面侵蚀量 q_{ero} ,表达形式见公式(4)与(5). 即

$$q_{\text{ero}} = m_p s \quad (14)$$

下文的计算模型参考了文献[9](具体计算过程与之类似),记竖向初速度分布函数为 $f(v_0)$,则单位时间、单位面积内从地面以初速度 v_0 起跳的雪粒质量为

$$m_p s f(v_0) dv_0 \quad (15)$$

进一步可知,以初速度 v_0 起跳的雪粒,在上升($\uparrow$)和下降($\downarrow$)阶段,高度 y 处的质量浓度表示为

$$m_p s f(v_0) \dot{y}_{\uparrow} dv_0 \quad (16)$$

$$m_p s f(v_0) \dot{y}_{\downarrow} dv_0 \quad (17)$$

通过式(16)与(17),可以得到在高度 y 处单位时间内通过单位面积以初速度 v_0 起跳的雪粒质量为

$$m_p s \left(\frac{\dot{x}_{\uparrow}}{\dot{y}_{\uparrow}} - \frac{\dot{x}_{\downarrow}}{\dot{y}_{\downarrow}} \right) f(v_0) dv_0 \quad (18)$$

式中: $\dot{x}$ 与 $\dot{y}$ 表示粒子在跃移运动过程中的速度,可通过公式(12),(13)求解获得.

将式(18)对雪颗粒所有起跳的速度积分,并且从起跳位置高度至最大跃移高度处积分,便可得到

以下颗粒跃移质量传输率的计算公式:

$$Q_{\text{sal}} = m_p s \int_0^{h_{\text{sal}} v_{0,\text{max}}} \int_{v_{0,\text{min}}}^{\dot{x}_{\uparrow}} \left[\frac{\dot{x}_{\uparrow}}{\dot{y}_{\uparrow}} - \frac{\dot{x}_{\downarrow}}{\dot{y}_{\downarrow}} \right] f(v_0) dv_0 dy = q_{\text{ero}} \int_0^{h_{\text{sal}} v_{0,\text{max}}} \int_{v_{0,\text{min}}}^{\dot{x}_{\uparrow}} \left[\frac{\dot{x}_{\uparrow}}{\dot{y}_{\uparrow}} - \frac{\dot{x}_{\downarrow}}{\dot{y}_{\downarrow}} \right] f(v_0) dv_0 dy \quad (19)$$

由公式(2)~(5)可知, q_{ero} 有 3 种表达形式,即通过 Iversen, Pomeroy 和 Beyers 三者的经验公式变换,可分别记为 q_I , q_P 和 q_B , 对应的跃移质量传输率记为 Q_I , Q_P 和 Q_B .

4.2 与经验公式对比分析

将公式(19)与跃移质量传输率的经验公式(2), (3)进行对比,从而验证本文计算结果的合理性,具体见图 11 和图 12 给出的跃移质量传输率的变化规

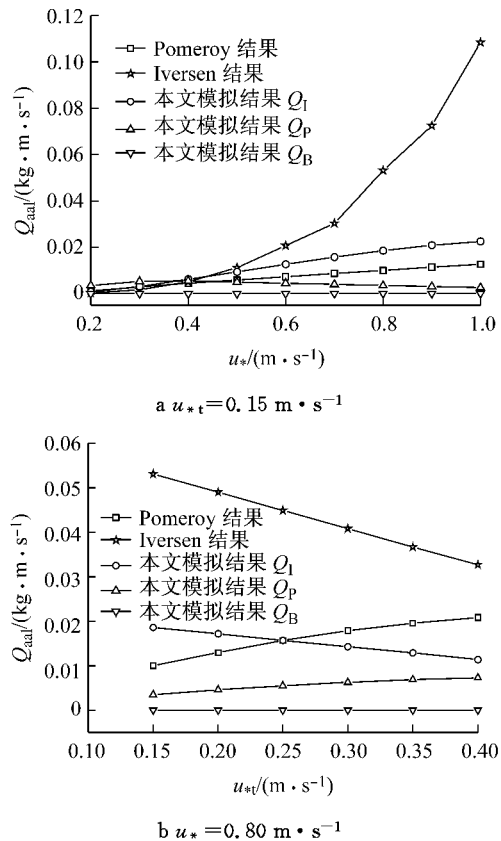


图 11 雪颗粒跃移质量传输率随(阈值)摩擦速度变化规律(粒径 0.30 mm)

Fig. 11 Total snow mass flux as a function of friction velocity/threshold velocity ($d = 0.30 \text{ mm}$)

律. 不难发现:

(1)对比图 11a 和图 12a,在摩擦速度较小时(如 $u_{*t} < 0.4 \text{ m/s}$),本文的计算结果与经验公式吻合较好;在摩擦速度较大时,即粒子处于高风速情况下, Pomeroy 与 Iversen 所计算出的结果相差很大,这是因为前者的计算结果与摩擦速度的平方成正

比,而后者正比于摩擦速度的立方.此时计算结果 Q_t 的数值与经验公式最为接近.

(2)观察图 11b 和图 12b,可知随着阈值摩擦速度的增大,Pomeroy 公式计算的跃移雪质量传输率近似呈直线增加;Iversen 公式的跃移雪质量传输率近似呈直线减小. Pomeroy 与 Iversen 曲线趋势相反,因为后者与 $0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 关系是负相关,故 Iversen 公式计算值减小;而前者与 $0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 关系既有正相关,还有立方的负相关,总体呈现正相关 ($u_{*t} < 1.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$). 可见, Q_t 的数值基本介于两经验公式结果之间,趋势与 Iversen 曲线趋势相同.

(3)对比图 11 和图 12,Pomeroy 与 Iversen 所计算出的结果并未变化,因其是统计意义的平均值;但是本文的计算模型,随着粒径的增大,跃移雪质量传输率也随之增大.

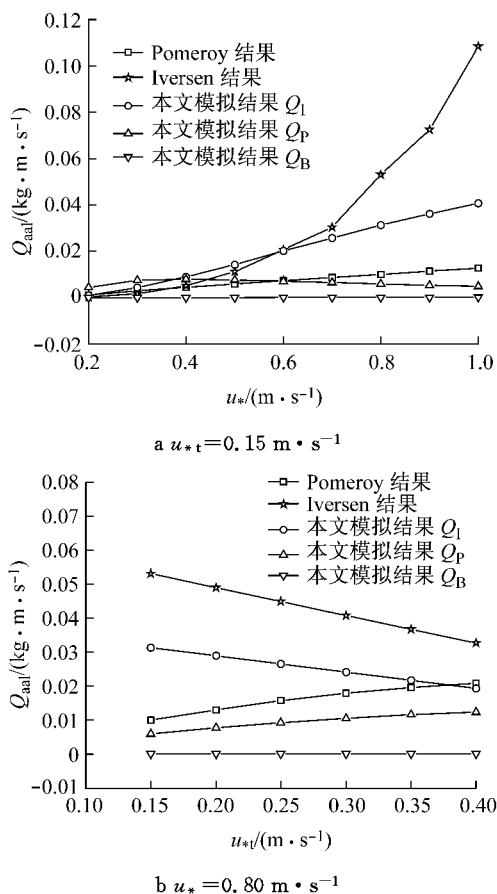


图 12 雪颗粒跃移质量传输率随(阈值)摩擦速度变化规律(粒径 0.45 mm)

Fig.12 Total snow mass flux as a function of friction velocity/threshold velocity($d=0.45 \text{ mm}$)

5 结论

本文通过变化不同的颗粒运动参数,分析其与

雪颗粒运动轨迹之间的变化规律.建立了雪面侵蚀质量通量与粒子跃移数目之间的关系,研究了粒子直径、摩擦速度等参数对质量传输率的影响,并与已有的经验公式比对分析,结论如下:

(1)随着雪颗粒直径、雪粒密度或者摩擦速度的增大,粒子的跃移高度也随之增大;粒子起跳速度不同时,水平跃移距离的变化规律也不同.

(2)本文提出的计算模型与空旷环境下的雪颗粒传输率经验公式计算结果基本吻合,证明了本文假定和方法的合理性,其中部分结果有待与实测或实验进行对比检验.

参考文献:

- [1] Tominaga Y, Mochida A. CFD prediction of flowfield and snowdrift around a building complex in a snowy region[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1999,81(1/3): 273.
- [2] ZHU Zhiwen, LIU Zhenqing. CFD prediction of local scour hole around bridge piers[J]. Journal of Central South University of Technology, 2012,19: 273.
- [3] Uematsu T, Nakata T, Takeuchi K, et al. Three-dimensional numerical simulation of snowdrift[J]. Cold Regions Science and Technology, 1991,20: 65.
- [4] Naaim M, Naaim-Bouvet F, Martinez H. Numerical simulation of drifting snow: erosion and deposition models[J]. Annals of Glaciology, 1998, 26:191.
- [5] Gordon M, Taylor P A. Measurements of blowing snow, part I: particle shape, size distribution, velocity, and number flux at Churchill, Manitoba, Canada[J]. Cold Regions Science and Technology, 2009, 55(1):63.
- [6] Beyers J H M, Sundsb P A, Harms T M. Numerical simulation of three-dimensional, transient snow drifting around a cube [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2004, 92(9): 725.
- [7] Zhou X Y, Li X F. Simulation of snow drifting on roof surface of terminal building of an airport[J]. Disaster Advances, 2010, 3(1): 42.
- [8] 周昉毅,李雪峰,顾明.风致积雪运动数值模拟的两方程模型方法[J].空气动力学学报,2012,30(5):640. ZHOU Xuanyi, LI Xuefeng, GU Ming. Two-equation model for numerical simulation on snow drifting[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2012,30(5):640.
- [9] 黄宁.沙粒带电及风沙电场对风沙跃移运动影响的研究[D].兰州:兰州大学土木工程与力学学院,2002. HUANG Ning. Electrification in wind-blown sand flux and its influence to wind-blown sand saltation[D]. Lanzhou: School of Civil Engineering and Mechanics of Lanzhou University, 2002.
- [10] Huang N, Sang J, Han K. A numerical simulation of the effects of snow particle shapes on blowing snow development[J]. Journal of Geophysical Research, 2011,116, D22206, doi:10.1029/2011JD016657.

(下转第 546 页)