

文章编号:1000-694X(2002)03-0237-05

# 含尘大气近地层流底层流动特性及其摩阻系数

戚隆溪, 陈强, 王柏懿

(中国科学院 力学研究所非线性力学国家重点实验室, 北京 100080)

**摘要:** 采用双向耦合的双流体模型, 研究了大气悬浮沙尘的存在对大气边界层中层流底层流动特性及摩阻系数的影响, 计算并讨论了不同沙尘含量下含尘大气相对于无尘大气摩阻系数的变化。结果表明: 摩阻系数的变化取决于悬浮沙尘的初始运动状态和质量载荷率。

**关键词:** 气固两相流; 层流底层; 摩阻系数; 悬浮沙尘

**中图分类号:** P404      **文献标识码:** A

当前, 沙漠的蔓延和沙漠化过程的急剧加速已成为困扰人类生存和发展的全球性问题。我国是遭受沙漠化严重危害的国家之一<sup>[1~3]</sup>。根据《中国荒漠化报告》, 我国荒漠化土地总面积为  $262.2 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 占国土面积的 27.3%; 每年平均增加的数量, 从 20 世纪 70 年代中到 80 年代末为  $2\ 100 \text{ km}^2$ , 过去 10 a 则为  $2\ 460 \text{ km}^2$ 。这导致了可利用土地资源的大量丧失, 以及沙尘暴灾害频繁发生。它不仅严重阻碍了西部地区的发展, 甚至影响到首都北京的安危。例如, 每年从位于河北宣化境内的万亩沙滩黄羊滩卷走的沙尘达 25 700 t, 造成风沙肆虐直逼京城<sup>[4]</sup>。因此风沙物理学的研究, 特别是对风沙流起动—发展—平衡的物理过程进行模拟, 构成了环境流体力学的重要内容。防沙治沙的工程实践最关心的是确定单宽输沙率等宏观量, 国内外众多学者已提出了相当多的经验与半经验公式<sup>[5,6]</sup>, 它们表明了输沙率近似与摩阻风速的三次方成正比。本文将探讨大气中悬浮沙尘的存在对地表摩阻系数的影

响。

## 1 理论

根据动力气象学理论<sup>[7,8]</sup>, 大气边界层(高度为 1~2 km)接近地表部分为表面边界层(或称近地面层), 高度为 10~100 m, 其中湍流交换为主控过程, 垂直输运通量不随高度而变。但是, 地表处湍流脉动为零, 因此毗邻地面的甚薄区域(除非地表相当粗糙)存在着一个高度为 1~10 cm 的层流底层, 这里只需考虑分子粘性。依据表 1 所列数据<sup>[9]</sup>, 可以认为沙漠在空气动力学意义上讲是光滑的。本文考虑下垫面为没有植被覆盖的沙地, 基于粘性边界层理论研究毗邻地表的层流底层流动结构及地面处气流的剪切应力  $\tau_0$ , 继而确定摩阻风速  $u_f = (\tau_0 / \rho)^{1/2}$ , 其中  $\rho$  为大气密度。按照惯例, 人们还采用无量纲参数  $C_f = 2 \tau_0 / \rho U^2$  (其中  $U$  为外流速度) 来表征地表摩擦阻力。该参数在空气动力学中称为摩阻系数, 在气象学中则称为拖曳系数或泄力系数。

表 1 下垫面粗糙度

Tab. 1 Underlying surface roughness

地表类型	冰面	沙地	沙漠	自然雪面	休耕地	小麦地
粗糙程度/cm	0.001	0.01~0.05	0.03	0.1~0.5	0.5~2.0	3~7

众所周知, 含有悬浮沙尘的大气(以下简称含尘大气)为稀相气固两相体系, 其中连续的气相为空气, 离散的固相则由大量沙粒组成。本文采用双向耦合的双流体模型, 即将沙粒相按拟流体处理, 计及沙粒对大气运动的滞止作用, 并假定它们均为球形颗粒, 具有相同的直径  $d$  和质量  $m$ 。在稀相情况

下, 可以忽略沙粒的体积分数及相互碰撞的影响, 而且假定相间动量交换满足粘性流中单球阻力规律。此外, 我们假定含尘大气和地面处于温度平衡状态。这样, 非定常气固两相层流边界层的基本方程为:

气相:

$$\frac{\partial}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (u_i) = 0 \quad (1. a)$$

收稿日期:2001-03-05; 改回日期:2001-06-06

基金项目:国家自然科学基金重点项目(19832060)和面上基金项目(19972069)资助

作者简介:戚隆溪(1939—), 男(汉族), 浙江浦江人, 研究员, 主要从事环境流体力学研究。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j}(-p_{ij} + \tau_{ij}) - F_{pi} \quad (1. b)$$

固相:

$$\frac{\partial \rho_p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho_p u_{pi}) = 0 \quad (1. c)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_p u_{pi}) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho_p u_{pi} u_{pj}) = F_{pi} \quad (1. d)$$

其中  $\rho$ 、 $u$ 、 $p$  为密度、速度和压力(下标  $p$  表示固相),  $\tau_{ij}$  为气相粘性应力,  $F_{pi} = n_p f_{pi}$  为单位体积内沙粒受到的大气总阻力(其中  $n_p = \rho_p / m$  为含尘大气中沙粒数密度,  $f_{pi}$  为单个沙粒所受的阻力)。

本文研究广阔平坦裸露沙地上方的大气(可按不可压流体处理)在  $t = 0$  瞬间突然以速度  $U$  沿水平方向运动后,近壁区流动在初始阶段的时间演化过程。它属于边界层理论中经典的 Rayleigh 问题。在二维笛卡尔坐标系中,  $x$  轴沿水平沙地表面,  $y$  轴从地表算起垂直向上,而相应的速度分量分别为  $u$  和  $v$ 。由于  $\partial/\partial x = 0$  且  $\rho = const$ , 因此不难由方程(1)导出:  $v$ ,  $v_p$  以及  $n_p = const$ 。对于气固两相流动,人们引入了两个特征参数,即速度弛豫时间  $t_v = \rho_s d^2 / 18\mu$  和速度弛豫长度  $l_v = Ut_v$ (其中  $\rho_s$  为颗粒材料密度,  $\mu$  为空气的粘性系数),它们表示在 Stokes 阻力作用下颗粒的滑移速度  $(u - u_p)$  减少到初始值  $U$  的  $1/e$  所经历的时间与距离。这时,颗粒所受阻力为:  $f_{pi} = 3 \rho_p d \mu (u - u_p)$ 。表 2 给出风沙两相流动中弛豫参数的典型值。可以看到:中砂、细砂、粉砂和粘土的弛豫时间量级分别为 1 秒、100 毫秒、1 毫秒和 1 微秒;而在春季的强风条件下,相应的弛豫长度量级则分别为 10 m、1 m、1 cm 和 100  $\mu$ m。

表 2 风沙两相流动弛豫参数

Tab. 2 Relaxation parameters of wind-sand two phase flow

砂粒直径 $d$ /mm	速度弛豫时间 $t_v$ /ms	速度弛豫长度 $l_v$ /cm
0.5(粗砂)	$1.904 \times 10^3$	$4.759 \times 10^3$
0.25(中砂)	$4.759 \times 10^2$	$1.190 \times 10^3$
0.10(细砂)	$7.615 \times 10^1$	$1.904 \times 10^2$
0.05(微砂)	$1.904 \times 10^1$	$4.759 \times 10^1$
0.01(粗粉砂)	$7.615 \times 10^{-1}$	$1.904 \times 10^0$
0.005(细粉砂)	$1.904 \times 10^{-1}$	$4.759 \times 10^{-1}$
0.001(粘黄土)	$7.615 \times 10^{-3}$	$1.904 \times 10^{-2}$

计算中取砂粒材料密度  $\rho_s = 2500 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , 空气粘性系数  $\mu = 1.8239 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{ms}^{-1}$ , 风速  $U = 25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

引入下述无量纲量:  $y^* = y/l_v$ ,  $t^* = t/t_v$ ,  $u^* = u/U$ ,  $u_p^* = u_p/U$ , 我们可以得到描述含尘大气层流边界层的无量纲方程:

$$\frac{\partial u^*}{\partial t^*} = \frac{1}{Re} \frac{\partial^2 u^*}{\partial y^{*2}} - (u^* - u_p^*) \quad (2. a)$$

$$\frac{\partial u_p^*}{\partial t^*} = u^* - u_p^* \quad (2. b)$$

其中  $Re = Ul_v/\mu$  为基于弛豫长度的流动 Reynolds 数,  $m = mn_p/\rho$  为含尘大气中沙粒质量载荷比( $m = 0$  相应于无尘大气)。相应的边初值条件为:

$$(a) y^* = 0: u^* = 0; y^* = \infty: u^* = 1 \quad (3. a)$$

$$t^* = 0: u^* = 1(y^* > 0) \text{ 及 } u_p^* = 1(y^* = 0) \quad (3. b)$$

$$(b) y^* = 0: u^* = 0; y^* = \infty: \frac{\partial u^*}{\partial y^*} = 0 \quad (4. a)$$

$$t^* = 0: u^* = 1(y^* > 0) \text{ 及 } u_p^* = 0(y^* = 0) \quad (4. b)$$

这里,情况(a)表示在初始时刻悬浮沙尘已具有与大气相同的速度  $U$ ,这相应于沙尘是随风从远处挟带过来的;而情况(b)则表示在初始时刻沙粒处于静止状态,这些当地的悬浮沙尘是在风力作用下才开始运动的。因此两种情况下固相初始条件不同。此外,考虑到情况(b)中边界层以外位势流中悬沙和大气之间会发生弛豫过程,而且本文计及沙粒对大气的滞止作用,因此两种情况下气相外边界条件亦不同。

## 2 结果

本文数值计算了含尘大气在风力作用下所形成的层流底层流场结构,并探讨了沙尘含量对流动参数的影响。图 1~4 给出在 3 个不同时刻( $t^* = 0.1, 1, 10$ )下大气和沙尘的速度剖面,其中取  $Re = 1000$ 。它们显示了气固两相之间的弛豫过程:由于气体的粘性效应,大气运动自时刻  $t^* = 0$  开始便呈边界层流动特征,从地表处( $y^* = 0$ )的零速度迅速增加到外流速度。但是,颗粒的惯性效应则趋于维持其在初始时刻的运动状态,由于气相的作用力才驱使固相速度逐渐接近气相速度。在情况(a)中(参见图 1、2),气相使颗粒减速,固相速度分布由初始的均匀剖面  $u_p^*(y^*) = 1$  趋于准平衡态 Rayleigh 剖面,颗粒在地表处可以自由滑移,其速度由初始值  $U$  逐渐减为零。在情况(b)中(参见图 3、4),气相使颗粒加速,固相速度分布由初始的均匀剖面  $u_p^*(y^*) = 0$  亦趋于准平衡态 Rayleigh 剖面,颗粒在地表处的速度一直保持为零值不变。本文结果还表明了:随着沙尘含量增加,含尘大气速

度剖面越加偏离无尘大气的状况；准平衡态 Rayleigh 剖面依赖于沙尘含量，在平衡态下含尘大气

可按一种单相的等效气体来处理。因此，大气悬浮沙尘将极大改变大气边界层的摩擦系数。

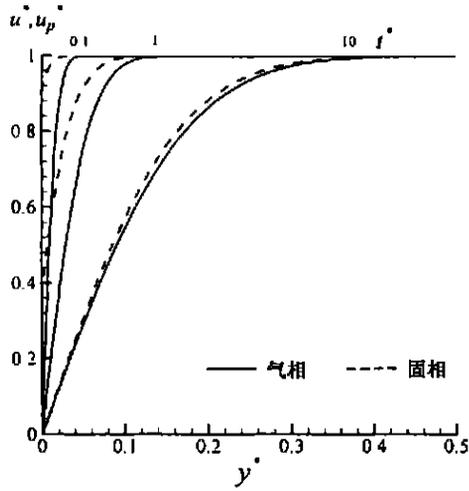


图 1 情况(a)中气固两相速度剖面的时间演化  
Fig. 1 Time development of velocity profiles in two-phase flow condition (a) ( $\alpha=0.1$ )

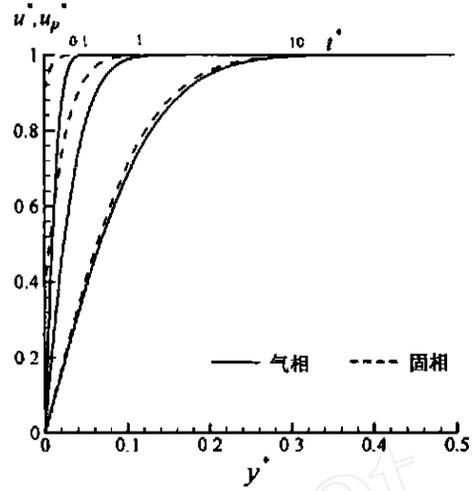


图 2 情况(a)中气固两相速度剖面的时间演化  
Fig. 2 Time development of velocity profiles in two-phase flow condition (a) ( $\alpha=1$ )

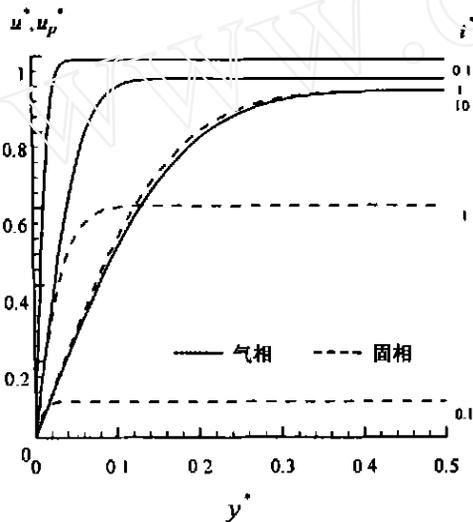


图 3 情况(b)中气固两相速度剖面的时间演化  
Fig. 3 Time development of velocity profiles in two-phase flow condition (b) ( $\alpha=0.1$ )

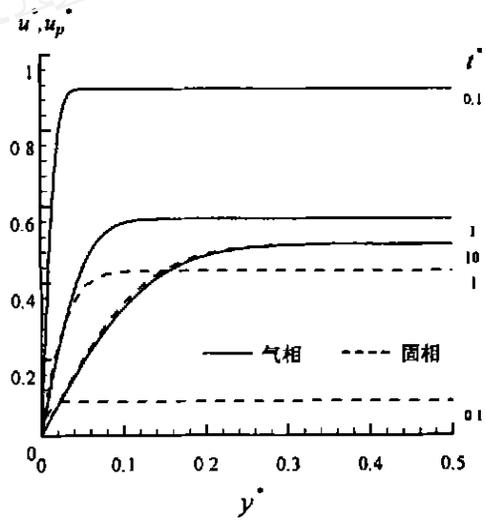


图 4 情况(b)中气固两相速度剖面的时间演化  
Fig. 4 Time development of velocity profiles in two-phase flow condition (b) ( $\alpha=1$ )

如前所述，地表摩擦系数  $C_f$  取决于当地的气流剪切应力  $\tau_0$ ，而地表处剪切应力是由层流底层速度剖面确定的：

$$\tau_0 = \mu \left. \frac{\partial u}{\partial y} \right|_{y=0} \quad (5)$$

图 5、6 分别给出了 (a) 和 (b) 两种情况中含尘大气摩擦系数随时间推移的变化情况，其中的纵坐标取为  $C_f \sqrt{Re} / 2$ ，这样不同风速下的曲线便归并在同一条图线上。为了显示悬浮沙尘的影响，我们还计算给出了无尘大气的结果。结果表明：各种条件下，摩擦系数均在起风瞬间 ( $t^* = 1$ ) 有最大值，然后随

时间的增加而减小。与无尘大气相比，含尘大气的摩擦系数在情况 (a) 中增加，在情况 (b) 中减小。

在两种情况中，随着悬浮沙尘含量的增加，摩擦系数都越加偏离无尘大气的相应值。本文还特别计算了含尘大气相对于无尘大气摩擦系数变化的时间演化规律，相关的数值计算结果见图 7、8 所示，它们分别对应于情况 (a) 和 (b)。图中的纵坐标  $C_f \sqrt{Re} / 2$  表示了含尘大气与无尘大气相比摩擦系数的变化： $C_f = C_f - C_{f0}$  (其中  $C_{f0}$  表示相同风速下无尘大气的摩擦系数)。结果表明：在相同风力条件下，地表摩擦系数的变化随着大气中悬浮沙尘含

量的增加而显著增加。随着时间的增加,摩阻系数的变化开始增加,在  $t^* = O(1)$  时达到某个最大值后逐渐减小,最后在  $t^* = O(10)$  时趋于某个平衡值。这个最大值和平衡值均依赖于悬浮沙尘的含量。含尘大气摩阻系数与无尘大气摩阻系数差值的变化速率在起风瞬间最大,在相同风力条件下,其数值亦随悬浮沙尘含量的增加而增大;在摩阻系数

变化达到最大和趋于平衡时,其变化速率为零。在相同的风力和沙尘含量的条件下,与无尘大气相比较,情况(a)中摩阻系数变化的幅值更大,但达到最大值的时间较晚。在相同风力条件下,情况(a)和(b)中摩阻系数变化幅度的差异随悬浮沙尘含量的增加而增大。

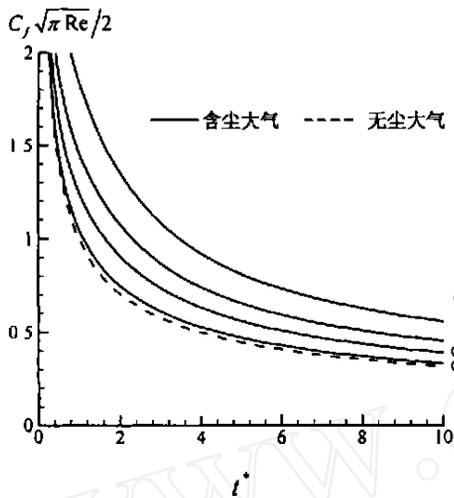


图5 情况(a)中含尘大气摩阻系数的时间演化  
Fig. 5 Time development of friction coefficient in dusty-atmosphere condition (a)

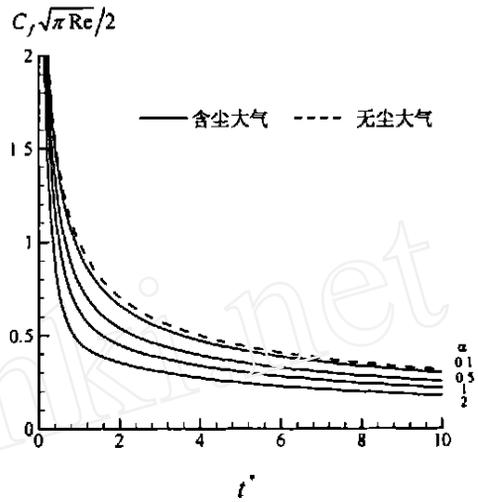


图6 情况(b)中含尘大气摩阻系数的时间演化  
Fig. 6 Time development of friction coefficient in dusty-atmosphere condition (b)

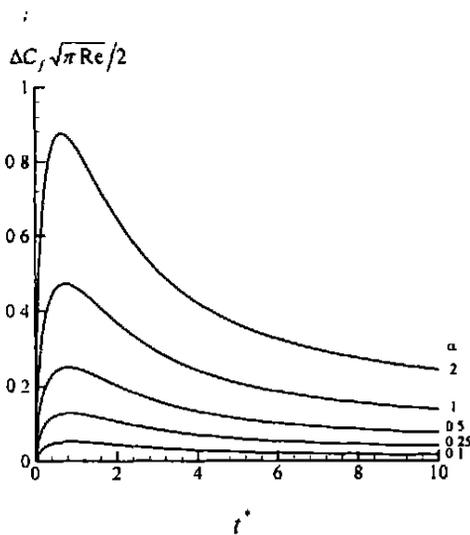


图7 情况(a)中含尘大气摩阻系数变化的时间演化

Fig. 7 Development of friction coefficient difference between dusty- and clean-atmosphere in condition (a)

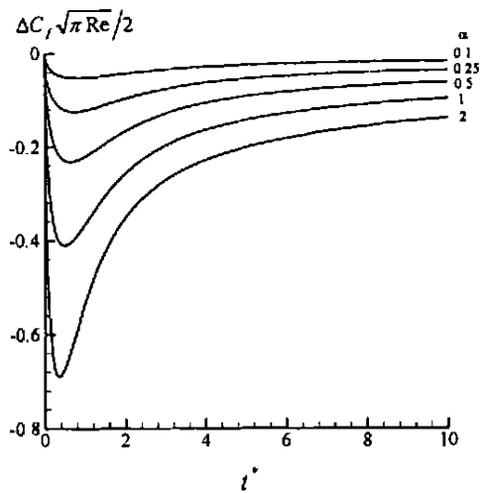


图8 情况(b)中含尘大气摩阻系数变化的时间演化

Fig. 8 Development of friction coefficient difference between dusty- and clean-atmosphere in condition (b)

### 3 结论

稀相气固两相流的双向耦合双流体理论模型可以有效描述风力驱动下含尘大气边界层流动随时间

的演化规律以及空气与沙粒之间动量交换的弛豫过程,从而定量确定悬浮沙尘对大气近地层流底层速度剖面的影响。本文的数值结果表明了摩阻系数的变化取决于悬浮沙尘的初始运动状态和质量载荷率。

### 参考文献(References):

- [1]刘毅华,董玉祥. 刍议我国的荒漠化与可持续发展[J]. 中国沙漠, 1999, 19(1): 17 - 22.
- [2]董光荣,吴波,慈龙骏,等. 我国荒漠化现状、成因与防治对策[J]. 中国沙漠, 1999, 19(4): 318 - 331.
- [3]王涛. 西部大开发中的沙漠化研究及其灾害防治[J]. 中国沙漠, 2000, 20(4): 345 - 348.
- [4]新华社. 北京将治理沙尘暴源——黄羊滩[N]. 人民日报, 2000-12-29(1).
- [5]戚隆溪,王柏懿. 土壤侵蚀的流体力学机制(II):风蚀[J]. 力学进展, 1996, 26(1): 41 - 55.
- [6]董飞,刘大有,贺大良. 风沙运动的研究进展和发展趋势[J]. 力学进展, 1995, 25(3): 368 - 391.
- [7]叶笃正,李崇银,王必魁. 动力气象学[M]. 北京:科学出版社, 1988. 138 - 153.
- [8]小仓义光. 大气动力学原理[M]. 北京:科学出版社, 1981. 173 - 195.
- [8] . . 莱赫特曼. 大气边界层物理学[M]. 北京:科学出版社, 1982. 350 - 351.

## Flow Characteristics and Its Friction Coefficient of Laminar Near-Wall Boundary Layer in Dusty Atmosphere

QI Long-xi, CHEN Qiang, WANG Bo-yi

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

**Abstract:** In the present paper, flow characteristics of laminar near-wall boundary layer in dusty atmosphere and the effects of airborne dust on friction coefficient are investigated. The two-way coupling model is employed for the gas-particle system where both the two phases are considered as a continuum medium. The velocity profiles of the two phases and their time developments are obtained. Based on the numerical simulation results, the dynamic behaviors of surface friction under different initial movement conditions and mass loading ratios of suspended sand are discussed in detail.

**Key words:** gas-particle two-phase flow; laminar sub-layer; friction coefficient; airborne dust