

由对比分析可以得到如下结论,即本算例通过腔内自然对流造成流体非正压条件;流体非正压(斜压)产生大涡旋;而粘性对涡旋的生成及扩散一般在大 Gr 条件下仅局限于固壁附近。

参 考 文 献

1 清华大学工程力学系编. 流体力学基础(上册). 北京: 机

械工业出版社, 1980. 180~182

2 吴望一. 流体力学(上册). 北京: 北京大学出版社, 1982. 218~220

3 施天谟著. 计算传热学. 北京: 科学出版社, 1987. 412~415

(1997年1月17日收到第1稿,

1997年7月2日收到修改稿)

关于风沙层中颗粒垂向浓度分布规律等的思考*

董 飞 刘大有

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

摘要 本文采用统计平均方法和二相流连续介质模型方法研究了风沙流场中颗粒浓度和输运通量沿高度的分布规律. 结果表明: 即使对均匀沙这一简单情形, 现有的理论模型也很难证明这两个量一定服从负指数分布. 针对负指数分布是经验规律这一事实, 我们对现阶段常用的测算颗粒浓度的方法进行讨论, 指出引进更高精度实验手段的必要性.

关键词 风沙流场, 浓度分布, 输运通量分布, 负指数分布, 均匀沙

引 言

风沙流结构一直是学者们感兴趣的问题. 很长时间以来, 国内外不少学者认为风沙层中颗粒输运通量沿高度呈负指数分布^[1~3]. 也有一些学者认为风沙层中颗粒浓度沿高度呈负指数分布, 并据此建立关于风沙运动的理论模型^[4~5]. 探究这些结论的来源, 发现都是通过拟合观测结果而得到的经验规律, 并没有令人信服的理论模型能够予以支持.

本文先用统计平均方法研究风沙流场, 通过对细观的颗粒运动的运动时间加权平均得到宏观的颗粒沿高度的浓度分布. 分析结果显示, 即使是对能够提供解析解的模型, 颗粒浓度严格服从负指数型分布也只

在很凑巧的条件下成立, 对颗粒输运通量结论也类似. 之后, 我们从悬浮体二相流连续介质模型出发, 进行了更一般性的讨论, 其结果也支持了我们第一步的结论. 最后, 通过讨论现有的风沙流观测手段的误差来源, 指出了引进高精度测试手段的必要性.

1 用统计平均方法的研究结果

风沙流场中存在着相当数量的颗粒. 如果我们能够获得流场中各处的颗粒运动状态(一般是速度)分布函数, 就可以把不同运动状态的颗粒对宏观运动的贡献按此分布函数进行加权而得到风沙流中颗粒的宏观运动特性(其中包括颗粒浓度沿高度的分布).

由于在风沙流场中颗粒间碰撞的机会很小^[6], 可以引进“流场中颗粒间无碰撞”的假设. 这时, 流场中各处的颗粒速度分布函数都可以由颗粒自床面起跳时的速度分布函数求得.

考察颗粒垂向运动只考虑重力作用时的情形¹⁾. 记单位时间内从单位面积的床面上起跳的颗粒总数为 N_0 , $f(w_0)$ 是归一化了的起跳颗粒垂向速度分布函数²⁾. 当风沙流达到定常充分发展(对应 $N_0 = \text{con-}$

*国家自然科学基金资助课题.

1) “垂向运动无阻力”是获得颗粒垂向浓度分布解析表达式的必要条件之一. 这个假设本身没有多少道理, 但由于它可以大大简化有关分析, 因而很多人还是这么用, 至少在做第一步工作时是如此.

2) 其物理意义是: 单位时间内从单位面积床面上起跳的颗粒中, 垂向速度介于 $w_0 \sim w_0 + dw_0$ 的总数为 $N_0 f(w_0) dw_0$.

st.) 之后, 任一时刻在高度区间 $[z, z + dz]$ 上单位底面积的柱体微元中颗粒数目 ndz 可表示为

$$ndz = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{2N_0 dz}{\sqrt{w_0^2 - 2gz}} f(w_0) dw_0 \quad (1)$$

式中 n 就是颗粒数密度.

从 (1) 式中可以看出, 计算某一高度区间内颗粒的数密度时, 除了应按颗粒起跳时垂向速度的分布函数进行加权外, 还应按颗粒在该区间内的运动时间进行加权¹⁾. 这种按运动时间加权平均的思想是以往一些学者的同类工作^[4,7]中所忽视的.

假设颗粒起跳时的垂向速度服从如下分布

$$\left. \begin{aligned} f(w_0) &= Aw_0^m \exp(-Bw_0^m) \\ A &= m_2 B \frac{m_1+1}{m_2} / \left[\frac{m_1+1}{m_2} \right] \end{aligned} \right\} \quad (2) \quad \text{引}$$

式中 B 、 m_1 和 m_2 均为正的常数, $\int_0^x t^{x-1} e^{-t} dt$ 是第一类广义积分函数, A 根据归一化条件得到. 为积分简便起见, 此处考虑 “ $m_1 = 2k + 1$ (k 为非负整数), $m_2 = 2$ ” 的情形²⁾. 由 (1)、(2) 得

$$n = 2N_0 \sqrt{B} \exp(-2Bgz) \cdot \frac{1}{k!} \sum_{i=0}^k C_k^i (2Bgz)^i \left[k - i + \frac{1}{2} \right] \quad (3)$$

由式(3)不难看出, 仅当 $m_1 = 1$ ($k = 0$), $m_2 = 2$ 时, 才会有风沙层中颗粒数密度沿高度呈负指数分布. 如果考虑颗粒垂向运动阻力, 尽管仍然可能会有某个(些)特殊形式的起跳垂向速度分布函数对应的风沙层中颗粒数密度沿高度分布接近负指数分布, 但这显然不是普适的结论³⁾.

关于颗粒输运通量 q 的分布, 它与数密度 n 的关系为 $q(z) = m \cdot n(z) \cdot u(z)$, 其中 m 是单个颗粒的质量, $u(z)$ 是在 z 高度上颗粒平均的水平运动速度. 由于 $u(z)$ 不仅取决于起跳颗粒垂向速度分布(根据运动时间加权平均的思想), 还取决于起跳颗粒水平速度分布、风场水平速度以及颗粒在风场中的阻力特性等诸多因素, 一般只能针对具体情况给出数值结果而无法得到一般性的解析表达式. 但是可以预期, 输运通量的负指数分布最多只在某个(些)比较凑巧的场合才可能得到.

¹⁾事实上, 求所有颗粒运动宏观量(包括平均速度、输运通量、脉动强度、脉动应力等)均应遵循这一原则.

²⁾较为一般的讨论参见中国科学院力学研究所科技报告 STR-97003.

³⁾这里讨论的是均匀沙情形. 关于非均匀沙的讨论参见本文第3节.

⁴⁾而且由于床面上不同粒径颗粒之间的相互影响, 非均匀沙情况下每一种粒径颗粒的起跳速度分布也不一定与该粒径均匀沙的分布相同.

2 用二相流基本方程的研究结果

刘大有^[8]曾对定常充分发展的水平剪切流 $\left\{ \frac{\partial}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial y} = 0 \right\}$ 分析了流场中均匀粒径颗粒的数密度分布. 他从两相各自的垂向动量方程出发, 得到固相垂向脉动正应力沿高度的变化关系

$$\left. \begin{aligned} \text{续} \left(\overline{nw_p^2} \right)_z &= \left(\overline{nw_p^2} \right)_{z_0} \cdot \exp \left\{ - \frac{z - z_0}{\mu} \left[\left(1 - \frac{a}{\mu} \right) g - \frac{a}{1 - \mu} \right] \right\} \quad (4) \end{aligned} \right\} \quad \text{这}$$

式中 $\overline{w_p^2}$ 是颗粒无规则运动垂向分速度的平方平均值, 它表征颗粒垂向无规则运动的强度; a 是颗粒运动过程中垂向除重力、浮力外其它作用力(如空气阻力和升力等)造成的加速度.

先讨论 $a = 0$ 的情况. 不妨令 $\overline{w_p^2} = z$, 其中 μ 为常数. 可以证明, 若:

1) $\mu > 0$, 即 $\overline{w_p^2}$ 沿高度向上递增, 则 $n(z)$ 沿高度的衰减慢于负指数分布;

2) $\mu = 0$, 即 $\overline{w_p^2}$ 沿高度维持常数, 则 $n(z)$ 沿高度的衰减服从负指数分布.

3) $\mu < 0$, 即 $\overline{w_p^2}$ 沿高度向上递减, 则 $n(z)$ 沿高度的衰减快于负指数分布.

当 $a \neq 0$ 时, 对应于每一种 $a(z)$ 的分布, 最多只有特定的 $\overline{w_p^2}$ 的分布才会得到 $n(z)$ 的负指数分布. 所以, 综上所述, $n(z)$ 的负指数分布应该最多只是比较特殊条件下的结果.

3 讨论和结论

(1) 采用统计平均方法和二相流连续介质模型两种方法讨论了风沙层中颗粒浓度和输运通量沿高度的分布规律. 结果表明, 对均匀沙而言, 除非很凑巧, 否则颗粒浓度和输运通量分布一般都不是负指数分布.

(2) 颗粒级配的影响

当颗粒粒径服从一定级配(非均匀沙)时, 不同粒径的颗粒可能有不同的起跳速度分布⁴⁾. 在引进“流场中颗粒间无碰撞”假设的条件下, 仍可象前文所述那样逐一求得各种粒径的颗粒沿高度的浓度分

布,而流场中颗粒总的浓度分布就是所有这些颗粒浓度分布的简单迭加.一般情况下迭加后的函数形式与参加迭加的各函数形式会有较大不同,所以很难说非均匀沙情况下流场中颗粒浓度呈负指数分布有多少必然性.对输运通量的分布结论也类似.

(3) 关于实验测试手段的讨论¹⁾

据前所述,从现有的理论模型来看,无论是颗粒浓度分布还是输运通量分布,一般都不大可能恰好是负指数型分布.那么,如何看待文献中见到的支持负指数型分布的数据呢?

事实上,对于风沙流场中粒子浓度的测定,目前还没有很有效的方法,一般只能由粒子输运通量和粒子相的平均速度来折算粒子浓度.对于粒子输运通量的测量,目前常用的方法是使用惯性集沙仪.这种方法虽公认为较其他方法为好,但也有其难以克服的缺点,具体表现在沙面附近测量不准和对惯性较小的粒子测量不准^[9].粒子相平均速度的测量一般是借助频闪摄影技术实现的.这种做法虽然很常用,但很难保证精度:首先,需要采用外推法来获取颗粒在较低高度上的轨迹,而这种外推计算不一定能保证精度;其次,求粒子相平均水平速度时,必须有足够数量的样本粒子才能保证较高的统计平均精度.从已进行的这类工作看,这一点往往得不到保证.

我们不排除风沙层中颗粒输运通量沿高度呈负指数分布作为经验规律的可能性,但要理论上最终辨明其可靠性,还需要进一步提高实验工作的精度.鉴于此,我们认为下阶段应考虑对实验测量工作做以下改进:第一,更充分地利用频闪摄影技术研究颗粒运

动时的受力模型,包括其阻力特性和升力特性,以便完善现有的理论模型;第二,研制更高精度的粒子捕集器,用以替代现有的惯性集沙仪.我们希望新仪器能够提供更多的测点和更可靠的数据;第三,引进一些新的测试项目,譬如直接测量粒子数密度等,以便与现有的测试手段一起来获得可以相互印证的结果.

参 考 文 献

- 1 White B R. Two-phase measurements of saltating turbulent boundary layer flow. *Int J Multiphase Flow*, 1982, 8: 459 ~ 473
- 2 吴正. 风沙地貌学. 北京: 科学出版社, 1987
- 3 Nalpanis P, Hunt J C R, Barrett C F. Saltating particles over flat beds. *J Fluid Mech*, 1993, 251: 661 ~ 685
- 4 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. 科学通报, 1992, 37 (23): 2175 ~ 2177
- 5 朱久江. 气体-颗粒两相湍流边界层的理论与实验研究: [博士论文]. 西安: 西安交通大学, 1996. 第一部分
- 6 贺大良, 高有广. 沙粒跃移运动的高速摄影实验研究. 中国沙漠, 1988, 8 (1): 12 ~ 29
- 7 Raupach M R. Saltation layers, vegetation canopies and roughness lengths. *Acta Mech. (Suppl.)*, 1991 (1): 83 ~ 96
- 8 刘大有. 论气(水)力输送中颗粒悬浮机理和悬浮功. 见: 第七届全国化学工程论文报告会文集, 1994. 251 ~ 254
- 9 贺大良, 申建友, 刘大有. 风沙运动的三种形式及其测量. 中国沙漠, 1990, 10 (4): 9 ~ 17

(1996年12月6日收到第1稿,

1997年7月9日收到修改稿)

***** : 新书架 : *****

自本刊今年第一期发表龙运佳教授的《无簧混沌振动器》研究简报之后,很多读者来函问及如何能买到其参考文献,即清华大学出版社出版,由龙运佳教授所著《混沌振动研究:方法与实践》一书.本书从工程角度,用科技人员能理解的简明语言,全面系统、由浅入深地介绍其基本概念、理论与方法.书中包括新实践、新应用、新产品的介绍.全书图文并茂,内容丰富,分

为5个部分21章.第一部分,概念与方法;第二部分,应用与新例;第三部分,测试与调控;第四部分,产品与专利;第五部分,文献与资料.本书可供高校师生、科技人员阅读,也可作为大学有关课程的参考.

如有需要该书者,请寄款至:100083 北京中国农业大学东校区图实书店 王争鸣 (9.6元/册).

¹⁾详见力学所科技报告 STR-97003.