

悬移质运动增强水流紊动强度的一个必要条件

李丹勋, 王兴奎, 禹明忠

(清华大学水沙科学教育部重点实验室, 北京 100084)

摘要: 从气固两相流颗粒增强流体紊动的有关研究成果出发, 结合悬移质和推移质的划分标准, 推导出悬移质运动增强水流紊动强度的一个必要条件, 并通过已有试验资料进行了验证。

关键词: 悬移质; 紊动强度; 气固两相流

中图分类号: TV 143⁺.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-6791(2002)04-416-04

泥沙运动的存在会对水流的紊动结构造成一定的影响。近年来的研究表明, 在不同条件下, 颗粒对流体紊动强度的作用相反: 细小的颗粒会削弱紊动, 而粒径较大的颗粒会使紊动增强^[1,2]。本文在这个认识的基础上, 结合悬移质和推移质的划分标准, 推导悬移质运动增强水流紊动强度的一个必要条件, 并用有关的实测资料进行验证。

1 悬移质运动增强水流紊动强度的必要条件

1.1 理论推导

1.1.1 推移质与悬移质的划分

在泥沙运动力学中, 一般用悬浮指标 $z = \omega / (ku^*)$ 来划分推移质运动和悬移质运动, ω 为颗粒沉速, k 为卡门常数, u^* 为摩阻流速。设悬浮指标的分界值为 n , 若颗粒以悬移质形式运动, 则有 $z < n$, 即

$$\omega < nku^* \quad (1)$$

由式(1)可得

$$\omega^2 < n^2 k^2 u^{*2} \quad (2)$$

颗粒沉速可由下式计算^[3]:

$$\omega = \sqrt{\frac{4}{3} \frac{1}{C_D} \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} g d_p} \quad (3)$$

式中 C_D 、 d_p 、 γ_s 、 γ 分别表示阻力系数、颗粒直径、颗粒比重及水的比重。在均匀二维流动中, 摩阻流速可表示为

$$u^* = \sqrt{ghJ} \quad (4)$$

式中 h 、 J 分别为水深和能坡。

将式(3)、(4)代入式(2)可得

收稿日期: 2001-06-06; 修订日期: 2001-09-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50009003)

作者简介: 李丹勋(1970-), 男, 山东青岛人, 清华大学讲师, 博士, 主要从事泥沙运动力学研究。

$$\frac{4}{3} \frac{1}{C_D} \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} g d_p < n^2 k^2 g h J \quad (5)$$

由式(5) 可得

$$\frac{d_p}{h} < \frac{3}{4} \frac{\gamma}{\gamma_s - \gamma} C_D n^2 k^2 J \quad (6)$$

记

$$\eta_1 = \frac{3}{4} \frac{\gamma}{\gamma_s - \gamma} C_D n^2 k^2 J \quad (7)$$

则当 $(d_p/h) < \eta_1$ 时, 颗粒以悬移质形式运动。

1.1.2 悬移质颗粒增强水流紊动机理

气-固两相流实验研究表明, 在不同的条件下, 颗粒对流体紊动强度的作用恰好相反: 细小的颗粒因被漩涡所带动而削弱紊动, 而粒径较大的颗粒则因产生尾涡脱落而使紊动增强^[1,2]。

设颗粒增强、减弱紊动的粒径分界参数为 m , 即 $(d_p/l_e) > m$ 时, 颗粒的存在会增强水流的紊动, $(d_p/l_e) < m$ 时, 颗粒的存在会削弱水流紊动, l_e 为流体载能漩涡的尺度。在明渠均匀二维紊流中, 流体载能漩涡的尺度 l_e 和水深是同一量级, 因此可以表示为: $l_e = \alpha h$, α 为介于 0 和 1 之间的参数。这样, 颗粒增强水流紊动的条件可表示为: $(d_p/h) > \alpha m$ 。

记

$$\eta_2 = \alpha m \quad (8)$$

则当 $d_p/h > \eta_2$ 时, 颗粒的存在会增强水流的紊动。

1.1.3 悬移质颗粒增强水流紊动的必要条件

由上述分析可知, 就目前的认识水平而言, 悬移质颗粒增强水流紊动需满足以下条件, 即

$$\begin{cases} (d_p/h) < \eta_1 \\ (d_p/h) > \eta_2 \end{cases} \quad (9)$$

而式(9) 有解条件为

$$\eta_1 > \eta_2 \quad (10)$$

将式(7)、(8) 代入式(10) 可得

$$\frac{3}{4} \frac{\gamma}{\gamma_s - \gamma} C_D n^2 k^2 J > \alpha m \quad (11)$$

整理可得

$$\frac{\gamma}{\gamma_s - \gamma} J > \frac{4}{3} \frac{\alpha m}{C_D n^2 k^2} \quad (12)$$

定义

$$\sigma = \frac{\gamma}{\gamma_s - \gamma} J \quad (13)$$

$$\sigma_c = \frac{4}{3} \frac{\alpha m}{C_D n^2 k^2} \quad (14)$$

则式(12) 可写为

$$\sigma > \sigma_c \quad (15)$$

式(15)表明, 悬移质运动增强水流的紊动强度, 需满足的必要条件之一是参数 σ 大于某一特定值 σ_c , 而该特定值 σ_c 的大小由 5 个参数决定。对于 σ_c 的大小, 下面作一简单的估算。

现有的量测资料表明, σ 随水深的变化范围大致为 $\sigma = 0.1 \sim 0.7$, 而且随分析方法的不同, 其取值也有变化^[4], 这里为分析方便, 暂取 $\alpha = 0.5$; 对于参数 m 的取值, Gore & Crowe^[1]总结了有关的实测资料后发现, 绝大部分使紊流削弱的试验条件都符合 $(d_p/l_e) < 0.1$, 而使紊流增强的试验条件都符合 $(d_p/l_e) > 0.1$, 因此取 $m = 0.1$; 一般情况下, 推、悬运动的悬浮指标的分界值 n 可取为 $5^{[3]}$, 卡门常数 k 取为 0.4 ; 阻力系数 C_D 的变化比较复杂, 对于直径为 0.1 mm 的轻质塑料沙 ($\gamma_s = 1.05$), 有 $C_D = 880^{[3]}$. 在这样的简化条件下可得: $\sigma_c = 1.89 \times 10^{-5}$. 而对于同等粒径的天然沙 ($\gamma_s = 2.65$), 有 $C_D = 30$, 计算可得 $\sigma_c = 5.56 \times 10^{-4}$. 随粒径的增大, σ_c 持续增大, 见图 1.

若把式(13)代入式(15), 则可得

$$J > \sigma_c \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} \quad (16)$$

由式(16)可知, 对于一定比重的悬移质颗粒, 若其运动增大了水流的紊动强度, 则该水流的能坡必须大于一特定值 J_c :

$$J_c = \sigma_c \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} \quad (17)$$

1.2 试验验证

现有的关于悬移质运动影响水流紊动强度的试验资料不多, 由于试验条件、量测手段及分析方法的不同, 不同研究者得到的结果往往离散性较大. 这里收集的几组资料都是近 20 年来有影响的研究成果(表

1). 表中 Muste & Patel 的资料采用的是水深 $(y/h) < 0.2$ 的资料, 其它文献则采用全水深数据的平均值. 表中 $u'_{s'}$, u'_c 分别表示含沙水流和相同条件下清水的紊动强度.

表 1 引用的有关文献

Table 1 Introduced experimental evidences

参 数	Cellino ^[5]		李福田 ^[6]		Kaffori ^[7]		Muste ^[8]	
	SLF1	SLF2	4	6	30	31	Run2	Run3
d_p/mm	0.135	0.135	0.675	1.75	0.275	0.900	0.220	0.220
γ_s	2.65	2.65	1.05	1.05	1.05	1.05	2.60	2.60
$\omega/(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	12.0	12.0	8.41	20.7	2.30	10.0	27.8	27.8
α	0.183	0.201	0.60	0.60	0.60	0.60	0.25	0.25
C_D	20.3	20.3	6.22	2.66	34.0	5.90	5.90	5.90
$J/10^{-3}$	1.50	1.50	0.71	0.76	0.55	0.65	2.85	2.85
$\sigma_c/10^{-3}$	0.301	0.330	3.21	7.52	0.59	3.39	1.41	1.41
$\sigma/10^{-3}$	0.91	0.91	14.2	15.2	11.0	13.0	1.74	1.74
σ/σ_c	3.03	2.76	4.42	2.02	18.6	3.83	1.23	1.23
$(u'_{s'} - u'_c)/u'_c, \%$	8.6	2.1	13.2	16.1	6.2	8.7	5.7	8.9

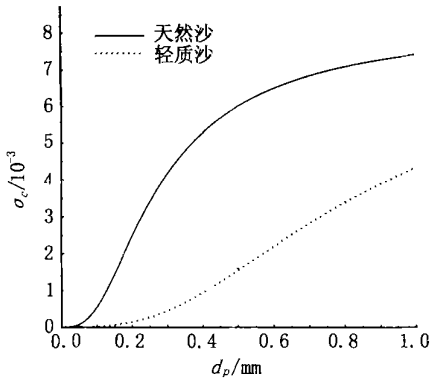


图 1 参数 σ_c 与颗粒粒径 d_p 的关系

Fig. 1 Relationship between σ_c and d_p

需要指出的是, 参数 σ_c 的值是根据式(14)实际计算得出的, 式中 α 和 C_D 的取值由文献中的试验条件确定, 若原文献中 α 的值无法直接确定, 则由文献 [4] 给出的经验公式估算

$$\alpha = \begin{cases} \sqrt{y/h} & y/h < 0.6 \\ 0.77 & y/h > 0.6 \end{cases} \quad (18)$$

由表1可以看出, 在观测到悬移质运动增强水流紊动强度的试验中, 都有 $\sigma_c > \sigma$ 成立。

由于本文给出的式(15)表示的是悬移质颗粒增强水流紊动的一个必要条件, 而且式(15)本身也仍需要更多的实测资料加以验证, 因此仅仅据此来正确推断悬移质影响水流紊动的程度是远远不够的, 还需要更多的理论和试验研究。

2 结 论

从气固两相流的有关研究成果出发, 结合悬移质和推移质的划分, 推导出悬移质运动增强水流紊动强度的一个必要条件, 即 $\frac{Y}{Y_s - Y} J > \frac{4}{3} \frac{\sigma m}{C_{Dn}^2 k^2}$ 。通过已有的试验资料对此进行了检验, 结果表明, 已有的悬移质增强水流紊动强度的试验均满足该条件。

参考文献:

- [1] Gore R A, Crowe C T. Effects of particle size on modulating turbulent intensity[J]. International Journal of Multiphase Flow, 1989, 15(2): 279- 285.
- [2] Kenning V M, Crowe C T. On the effect of particles on carrier phase turbulence in gas particle flows[J]. International Journal of Multiphase Flow, 1997, 23(2): 404- 408.
- [3] 钱 宁, 万兆惠. 泥沙运动力学[M]. 北京: 科学出版社, 1983. 309- 310.
- [4] Nezu I, Nakagawa H. Turbulence in open channel flows[M]. IAHR & AIRH monograph, A. A. Balkema, Netherlands, 1993. 71- 72.
- [5] Cellino M, Graf W H. Sediment laden flow in open channels under noncapacity and capacity conditions[J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 1999, 125(5): 455- 463.
- [6] 李福田. 挟沙水流紊动结构的试验研究[J]. 泥沙研究, 1986, (1): 38- 46.
- [7] Kafouri D, Hetsroni G, Banerjee S. Particle behavior in the turbulent boundary layer. I Velocity and distribution profiles [J]. Physics of Fluids, 1995, 7(5): 1107- 1121.
- [8] Muste M, Patel V C. Velocity profiles for particles and liquid in open channel flow with suspended sediment[J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 1997, 123(9): 742- 751.

A necessary condition for suspended load enhancing turbulence^{*}

LI Dan-xun, WANG Xing-kui, YU Ming-zhong

(Key Laboratory for Water and Sediment Sciences of Ministry of Education, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Based on recent development of gas-solid two-phase flows, a necessary condition for suspended particle enhancing turbulence in open channel flows was derived, which incorporates with the standard for distinguishing suspended load and bed load. The analysis result is in good agreement with existing experimental evidences.

Key words: suspended load; turbulence intensity; gas-solid two-phase flow

* The project is supported by National Natural Science Fund of China (No. 50009003).