

文章编号: 1000_0887(2002) 12_1276_07

流动环境中高浓度射流扩散实验研究

张 燕, 王道增, 樊靖郁

(上海大学, 上海市应用数学和力学研究所, 上海 200072)

(戴世强推荐)

摘要: 通过流动显示和定量测量对浅水流动环境条件下, 高浓度流体垂体向抛射入水后形成的射流运动扩散及浓度分布特征进行了水槽实验研究. 实验分析了射流入水后与环境水流条件的相互作用, 通过数据分析给出了射流中心线着底点与横向扩散角的拟合公式. 实验结果表明高浓度射流在近区呈现出不同于一般淹没射流的复杂流动形态及扩散特征, 以异重流的形式向下游推移.

关键词: 高浓度射流; 异重流; 扩散

中图分类号: O357.5 **文献标识码:** A

引 言

射流是指从各种排泄口射出或靠机械推动流入周围环境流体的一股运动流体. 若射流起始密度和周围流体的密度不同, 射流进入周围流体后会与环境水体发生掺混并不断改变其密度, 属于变密度射流. 当两种或两种以上的流体相互接触, 密度有一定的差异, 在运动过程中, 各层流体能保持原来的面貌, 不因交界面上的作用而发生全局性的掺混, 这种现象称为异重流^[1]. 射流和异重流都是自然界中的基本流动现象.

环境工程中的废气、废水排放和工业冷却水排放中的射流, 受到初始动量及密度差产生的浮力的双重作用, 这种射流称为浮射流^[2]. 对浮射流浓度分布的分析与预报对工程设计及生态环境的保护具有重要意义.

在航道疏浚工程中, 边抛式疏浚是将耙吸出的泥浆通过输泥管道直接抛到航道侧面一定距离处, 具有挖泥量大、效率高的优点, 是一种经济、方便、高效的疏浚方案. 研究高浓度泥浆射流入水后在环境水流作用下的运动、扩散和输运规律, 对施工方案的可行性及对周围水域水环境可能产生的影响, 具有重要的工程指导意义^[3].

当前, 在环境流体力学领域, 对浅水流动环境中的高浓度射流、异重流的扩散及浓度分布研究在国内外尚不够完善^[4], 对高浓度射流所形成的异重流研究得更少. 本文对浅水流动水域中的高浓度射流进行了水槽实验研究, 通过流动显示和浓度测量得到了垂向抛射入环境水流中的高浓度射流的扩散及浓度分布特征.

收稿日期: 2000_12_12; 修订日期: 2002_04_09

作者简介: 张燕(1976), 女, 辽宁锦西人, 博士生, 研究方向: 环境与工程流体力学(E-mail: dzwang@yc.shu.edu.cn)

1 实验概况

1.1 实验设备

实验在两座玻璃水槽中进行: 一为宽玻璃水槽, 总长 60 m, 宽 5 m, 高 1 m, 有效长度 34 m, 底坡为平坡; 另一水槽长 26 m, 宽 0.5 m, 高 0.8 m, 底坡调节范围最大为 0.01。两种水槽的试验水深、流速均可按试验要求给出, 在水槽试验段顶部安装有高浓度流体的搅拌及抛射装置。从射流入水处至下游布置 6 个采样断面, 每个断面上有 7 条采样垂线。利用虹吸原理采集水样, 对水流干扰较小。

1.2 实验流体及测量方法

环境水流用清水, 密度 ρ_a 近似为 $1\ 000\ \text{kg}/\text{m}^3$; 高浓度流体采用加有色素的饱和盐水溶液, 密度 ρ_0 为 $1\ 170\ \text{kg}/\text{m}^3$ 。盐水溶液中加入色素, 可以对采集的样本用分光光度计测量其吸光度得到浓度值, 此方法具有较高的精度。同时, 还可以采用流动显示及录像技术记录分析射流入水后的运动形态和扩散特征。

表 1 试验参数

试验组次	射流出口速度 $U_0/(\text{m}/\text{s})$	射流管径 D/m	抛射高度 l/m	环境水深 h/m	环境流速 $u_a/(\text{m}/\text{s})$
1	0.935	0.005	0.039	0.025	0.06
2					0.10
3					0.12
4				0.045	0.06
5					0.10
6					0.12
7				0.100	0.06
8					0.10
9					0.12
10	1.56	0.014	0.11	0.05	0.10
11					0.164
12					0.20
13				0.10	0.10
14					0.164
15					0.20
16				0.15	0.10
17					0.172
18					0.20

1.3 试验参数

高浓度盐水溶液以垂直环境水流的方向抛射入水。表 1 为试验参数。实验时, 调节环境水深及流速, 然后打开射流管(射流流量通过流量计监控), 待射流充分扩散并达到稳定后采样。环境水流的 Reynolds 数 $Re = u_a h / \nu = 1.5 \times 10^3 \sim 3.0 \times 10^4$ 。射流出口密度 Froude 数 F_{d0}

$= U_0 / \sqrt{[(\rho - \rho_a) / \rho_a] g D} = 10.21$, 与实际边抛疏浚中泥浆的出口密度 Froude 数一致

2 实验结果

高浓度射流抛射入环境水流后, 按其流动形态和扩散特征一般可以分为近区与远区两个区域, 它们分别受到不同流动和扩散机理的控制: 在近区, 高浓度射流扩散特性主要受射流起始动量、密度差、出口断面特征、环境水流条件以及边界条件等因素的影响; 在远区, 射流起始参数的影响已很微弱或消失, 物质的扩散输运主要受到环境水流的水深、流速、紊动特性等因素影响 本文主要研究高浓度射流在近区的扩散及浓度分布特征

2.1 射流流动形态和扩散特征

高浓度射流从距离水面一定高度抛射入水, 流动显示的结果表明, 近区范围内射流受初始动量、重力和环境水流的作用向槽底沉降并逐渐形成异重流向下游推移, 射流与环境水流始终有比较明显的分界面 图 1 为射流抛射入水后近区的扩散示意图, 按其流动特征, 在近区沿射流流向可分为如下 4 个区域: 射流区、冲击区、反弹过渡区、异重流区 各区域范围随环境水流条件的不同而有所差别, 但总体趋势相同 图中虚线所示为射流中心线位置

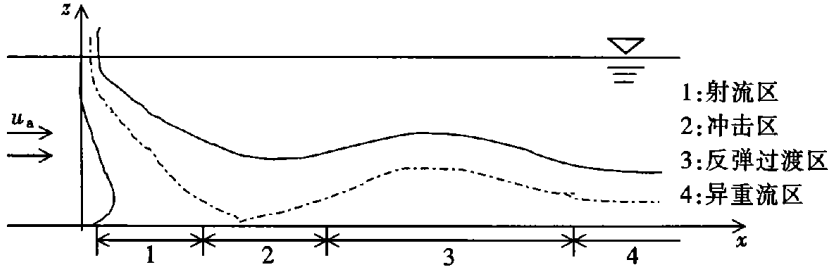


图 1 射流入水后近区扩散示意图

在射流区, 由于受初始动量和环境水流共同作用, 射流向槽底跌落 在射流到达槽底前, 射流与环境水流间速度的不连续产生强剪切层, 射流因湍流卷吸作用不断与环境水流发生掺混而不断稀释

在冲击区, 射流由于受到水槽底壁的限制不能在垂向充分发展, 同时又受到环境水流拖曳作用, 主射流向下游偏转, 流速迅速减小, 压力急剧增大, 对槽底产生较大的冲击压力, 射流着底点压强最大 此区域有强烈的紊动掺混

在反弹过渡区, 主射流贴底后反弹跃起, 射流厚度明显增加 由于底壁的限制, 射流厚度的扩展不满足线性关系, 受环境水流条件的影响增大 之后在密度差的作用下, 高浓度射流重新潜入底层

在异重流区, 初始动量的影响渐趋消失, 射流形成异重流向下游推移

近区的范围约为射流入水点下游 $800D$ 处 之后, 随着交界面与环境水体不断掺混和紊动扩散的影响, 异重流逐渐向水流表面方向扩散, 垂线浓度分布趋于均匀, 异重流特征消失, 主要受环境水流的紊动扩散而向下游输移形成远区的输运扩散

2.2 射流特性参数

射流中心线着底点位置坐标 x 受射流出口速度 U_0 、管径 D 、射流密度 ρ_0 、抛射角 α 、环境流体密度 ρ_a 及水流运动粘滞系数 ν 、环境水流速度 u_a 和水深 h 的影响 其表达式可以写为如下

无量纲形式:

$$\frac{x}{D} = f \left[\frac{U_0}{\sqrt{[(\rho - \rho_0)/\rho]gD}}, \frac{U_0 D}{\nu}, \frac{u_a}{U_0} \frac{h}{D} \right] \quad (1)$$

实验保持射流出口密度 Froude 数 $F_{d0} = U_0 / \sqrt{g^* D}$ 、Reynold 数 $Re_0 = U_0 D / \nu$ 基本不变, $g^* = [(\rho - \rho_0) / \rho] g$ 射流中心线着底点坐标可表达为: $x/D = f(h/D, u_a/U_0)$, 即研究环境流速及水深对中心线着底点位置的影响 采用指数关系: $x/D = k(h/D)^m (u_a/U_0)^n$, 由实验数据确定常数 k, m, n 的值, 得到射流中心线着底点坐标方程为:

$$\frac{h}{D} < \left(\frac{h}{D} \right)_{cr}, \quad \frac{x}{D} = 39.06 \frac{h}{D} \left(\frac{u_a}{U_0} \right)^{1.58}, \quad (2)$$

$$\frac{h}{D} > \left(\frac{h}{D} \right)_{cr}, \quad \frac{x}{D} = 0.93 \left(\frac{h}{D} \right)^2 \frac{u_a}{U_0}, \quad (3)$$

式中 $(h/D)_{cr}$ 为临界无量纲水深, 其值约为 12 ~ 15 图 2 为实验数据及拟合公式, 其中图 2(a) 为 $h/D < (h/D)_{cr}$, 图 2(b) 为 $h/D > (h/D)_{cr}$ 的情况

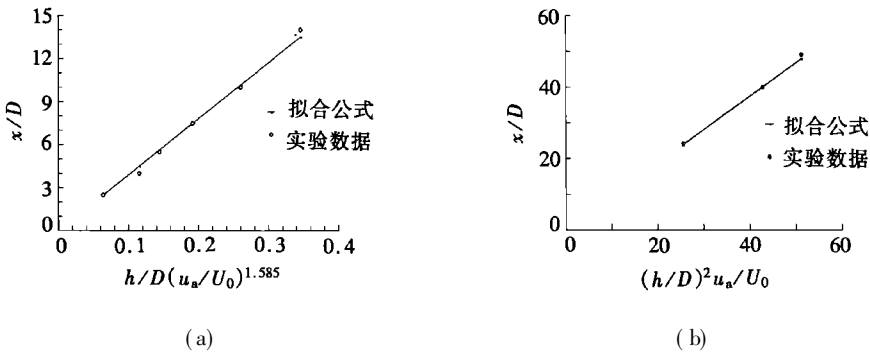


图 2 射流中心线着底点位置坐标

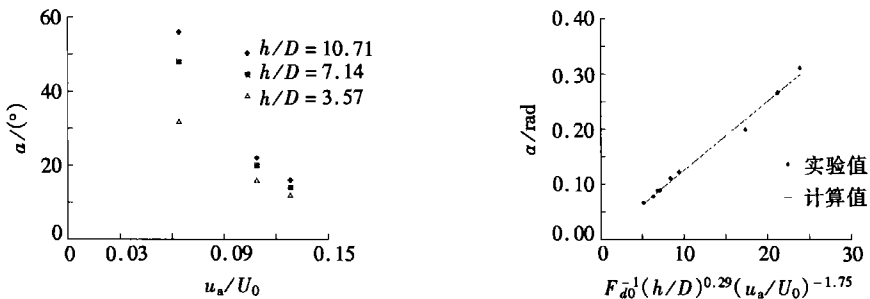


图 3 环境水流条件对横向扩散角影响

图 4 射流横向扩散角

本文通过宽水槽实验研究了高浓度射流入水后的横向扩散情况 高浓度射流抛射入水后, 在横向将逐渐散开, 横向扩散范围要比纵向(顺流)扩散范围小得多, 基本上是以抛物线扩展, 横向扩散角与环境水流与水深、流速密切相关

图 3 为环境水流条件对横向扩散角的影响 由于射流着底后形成异重流, 因此图中表示的是底层(近槽底 $h/3$ 以下区域)高浓度流体的扩散角 由图可见, 环境流速越大, 流体的对流扩散越占主导地位, 高浓度射流受环境水流影响迅速向下游扩散, 故横向扩散角越小 同

时,水深越大射流入水后发展得越充分,横向扩散越明显,横向扩散角增大。随环境流速的增加,水深对横向扩散角的影响有减小的趋势;而当水深增加时,环境流速对横向扩散角的影响同样有减小的趋势。

由量纲分析及实验资料,可得射流横向扩散角随环境水流的变化符合:

$$\theta = 0.0125 F_{a0}^{-1} \left(\frac{h}{D} \right)^{0.29} \left(\frac{u_a}{U_0} \right)^{-1.75} \quad (4)$$

图4所示为实验数据及拟合公式,其中 θ 为弧度。

2.3 浓度测量结果及讨论

通过对射流偏转段断面浓度分布测量可以看到,射流区断面上的最大浓度会偏离中心线位置,在对称面的两边出现两峰值。射流区的浓度分布特征对射流着底以后下游区域的扩散形态和浓度分布有重要的影响。图5为底层沿流向不同断面位置的横向浓度分布,可以看到,高浓度射流着底以后,最大浓度出现位置依然会偏离射流中心线。随着射流向下游的推移,横向浓度分布趋于均匀。

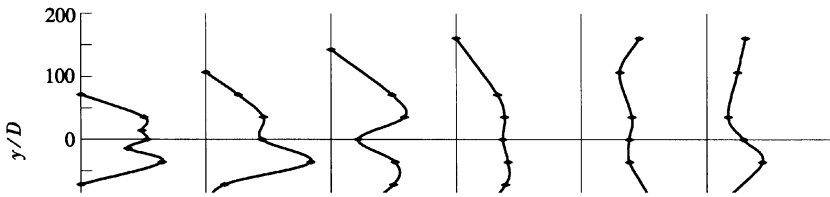


图5 底层沿流向不同断面位置的浓度横向分布($h/D = 7.14, R = 9.35$)

图6为一组沿流向不同断面的中心区垂向浓度分布图。从图中可以看出,在射流近区不同流向位置, $h/3$ 以下的底层浓度都要比上层浓度高出1~2个数量级,这说明射流入水后潜入水槽底部,并稳定地向下游推移。由录象资料也可以观察到,高浓度射流与环境水体有比较稳定的分界面,不会发生全局性的掺混,表现为典型的异重流流动形态。

射流入水形成异重流后的浓度衰减,不仅受环境水深的影响,同时还受到环境水流流速的作用。图7为不同环境水流条件下射流底层中心区浓度的沿程分布。由图可见,在射流近区底层均存在一浓度急剧减小的区域($x/D = 25 \sim 60$),这也定量验证了前面所描述的反弹区的存在。环境水深越小,此区域中浓度的变化就越剧烈;环境水深较大时,反弹区底层浓度的变化幅度相对较小,说明射流着底以后只有轻微的反弹。由浓度的沿程变化可见,相同水深条件下,环境水流的速度越大,异重流的浓度衰减就越明显。这是由于环境水流的速度越大,则速度梯度引起的剪切离散作用就越大,异重流的浓度衰减就越迅速。从实验录象中也可观察到,环境水流速度大,则在异重流表面有比较强烈的掺混涡,垂向扩散快,沿流向浓度衰减也快;环境水流速度小,则异重流比较稳定,层面光滑,沿流向浓度衰减比较慢。另外,当环境水深较小时,在 x/D 约小于200的近区范围内,环境流速的变化对射流浓度分布的影响较小;而在 x/D 大于200的区域,环境流速的影响逐渐增大。当环境水深较大时,在整个近区范围内,环境流

速对浓度衰减的影响都很显著

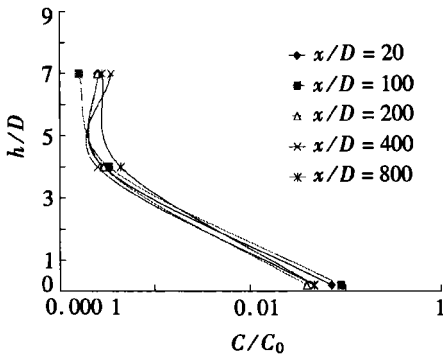


图6 沿程垂线浓度分布 ($u_d/U_0 = 0.107$)

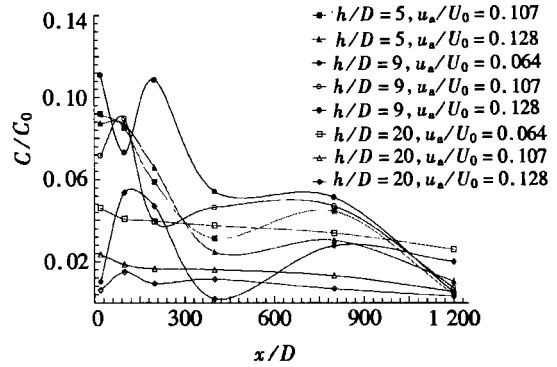


图7 底层中心区沿程浓度分布

3 结 论

(1) 浅水流动环境中高浓度射流抛射入水后的扩散,在近区沿射流主流方向可分为如下4个区域:射流区、冲击区、反弹过渡区、异重流区。各区域范围及射流中心线着底点位置随环境水流条件不同而有所差别。近区的范围约为射流入水点至下游 $800D$ 处。

(2) 高浓度射流入水后,在近区与环境水体有比较稳定的分界面,着底以后表现为异重流流动形态,异重流厚度约为环境水流高度的 $1/3$,浓度比上层水体大一至两个数量级。

(3) 底层异重流在横向的扩散大致成抛物线形状,水平扩散角与环境水流条件密切相关。最大浓度出现位置会偏离射流中心线,随着射流向下游推移,横向浓度分布趋于均匀。

(4) 高浓度射流入水后沿流向浓度衰减受环境水流条件影响很大。当环境水深较小时 ($h/D < 10$),在 x/D 约小于 200 的近区范围内,环境流速的变化对射流浓度分布的影响较小;而在 x/D 大于 200 的区域,环境流速的影响逐渐增大;当环境水深较大时 ($h/D > 10$),整个近区范围内,环境流速对射流浓度衰减的影响都很显著。

[参 考 文 献]

- [1] 钱宁, 万兆惠. 泥沙运动力学[M]. 北京: 科学出版社, 1991.
- [2] 余常昭. 紊动射流[M]. 北京: 高等教育出版社, 1993.
- [3] 杨永荻, 刘桦, 王道增. 边抛疏浚的回淤率研究[J]. 水运工程, 1999, (10): 75-78.
- [4] Rodi W. Turbulent Buoyant Jets and Plumes[M]. Oxford: Pergamon Press, 1982.

Experimental Investigations on Diffusion Characteristics of High Concentration Jets in Environmental Currents

ZHANG Yan, WANG Dao_zeng, FAN Jing_yu

(Shanghai Institute of Applied Mathematics and Mechanics,
Shanghai University, Shanghai 200072, P R China)

Abstract: By means of flow visualization and quantitative measurement, the diffusion pattern and concentration distribution characteristics of high concentration jets vertically discharged into shallow moving waterbody were experimentally investigated in water channel. The interactions between the high concentration jets and environmental flow conditions were analysed, and the formulae of impinging point coordinate and transverse spread angle are gained from data analysis. Experimental results indicate that the jets show complicated flow patterns and diffusion characteristics in near region, which are different from common submerged jets, and spread downstream in the manner of density currents.

Key words: high concentration jet; density current; diffusion