

文章编号:1006-2467(2019)04-0473-07

DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2019.04.012

# 层结环境中浮力羽流的质量输移过程

赵 亮<sup>1</sup>, 张 巍<sup>1</sup>, 贺治国<sup>1,2</sup>, 谈利明<sup>1</sup>, 蒋后硕<sup>3</sup>

(1. 浙江大学 海洋学院, 浙江 舟山 316000; 2. 国家海洋局第二海洋研究所, 杭州 310012;

3. 伍兹霍尔海洋研究所, 美国 伍兹霍尔 02543)

**摘 要:**在线性层结盐水中进行 18 组浮力羽流实验,采用粒子图像测速(PIV)技术获取羽流的时空高分辨率流场,提出浮力羽流最大输移质量计算公式,并定量分析羽流卷吸及质量输移过程.实验结果表明:卷吸系数从喷口处开始沿着射流方向逐渐增加,并在最大穿透距离 0.3~0.5 倍时,于数值 0.11 左右波动,之后逐渐减小为负值.浮力羽流在羽干处卷吸入周围环境流体后,沿射流方向被输移到最大穿透距离处,并在其约 0.65 倍处垂向质量通量达到最大值;混合后的羽流最终在中性浮力层向四周扩散;最大输移质量由浮力通量、浮力频率和与喷口处于相同高度的周围环境密度共同决定.层结环境折射率变化引起的伪湍动进而导致最大输移质量计算误差约为 3%,因此折射率变化的影响可以忽略.

**关键词:**浮力羽流;线性层结;粒子图像测速法;最大输移质量;伪湍动

**中图分类号:** P 731

**文献标志码:** A

## The Process of Mass Transport for a Buoyant Plume in Linearly Stratified Environment

ZHAO Liang<sup>1</sup>, ZHANG Wei<sup>1</sup>, HE Zhiguo<sup>1,2</sup>, TAN Liming<sup>1</sup>, JIANG Houshuo<sup>3</sup>

(1. Ocean College, Zhejiang University, Zhoushan 316000, Zhejiang, China;

2. Second Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Hangzhou 310012, China;

3. Woods Hole Oceanographic Institution, Woods Hole, MA 02543, USA)

**Abstract:** Eighteen experimental cases for the buoyant plume were conducted in linearly stratified saltwater. The particle image velocimetry (PIV) technique was used to acquire flow fields of plumes in high spatial and temporal resolutions. A new formula for maximum transported mass of buoyant plumes in stratified fluids was proposed. The process for entrainment and mass transport of plumes were analyzed quantitatively. Results show that the entrainment coefficient  $\alpha_e$  increases gradually along the jetting direction from the source, fluctuates at 0.11 from  $0.3Z_{\max}$  to  $0.5Z_{\max}$  ( $Z_{\max}$  is the maximum penetration distance) and then decreases gradually to negative. The buoyant plume which entrains ambient fluids from the plume stem is transported to  $-Z_{\max}$  along the jetting direction and its vertical mass flux reaches the maximum at about  $-0.65Z_{\max}$ . The mixed plume finally spreads to surroundings at the neutral buoyancy layer. The maximum transported mass is determined by the buoyancy flux, the buoyancy frequency and the environment density at the same level. The calculation error due to pseudo turbulence caused by

收稿日期:2017-09-30

基金项目:国家自然科学基金(11672267),浙江省自然科学基金(LR16E090001),深圳市科技研发资金(JCYJ20160425164642646)

作者简介:赵 亮(1993-),男,湖北省襄阳市人,博士生,从事环境流体力学方面研究.

通信作者:贺治国,男,教授,博士生导师,E-mail: hezhiguo@zju.edu.cn.

variations of the refractive index within the stratified fluid is about 3%, so the influence of refractive index is negligible.

**Key words:** buoyant plume; linear stratification; particle image velocimetry (PIV); maximum transported mass; pseudo turbulence

浮力羽流指在不同流体介质中受浮力驱动的柱状流动形态<sup>[1]</sup>. 在自然环境及工程应用中普遍存在着浮力羽流运动形态,如火山喷发形成的气流、火箭喷射出的高温气流、汽车尾气、烟气羽流、深海热液羽流等. 浮力羽流在运动发展过程中不断夹带周围环境流体并发生物质交换,引起的物质输移对周围环境具有重大影响. 火源上方形成的烟气羽流在火灾科学中为一重要概念,其输移质量决定了烟气生成量,是防排烟工程中的重要参考量<sup>[2]</sup>;深海热液羽流运动过程中伴随的质量输移对海洋的物质循环和生物活动有重要影响<sup>[3]</sup>,喷射时携带大量矿物粒子与金属粒子,这些粒子少部分直接在喷口附近沉积,大部分则随着羽流运动到一定高度并向周围扩散,参与大洋物质循环<sup>[4]</sup>.

国内外对于浮力羽流已形成完备的理论体系,且有充足的数值模拟和物理模型实验作为支持<sup>[5-10]</sup>. Morton 等<sup>[5]</sup>在 1956 年提出经典 MTT 模型(以 Morton、Taylor 和 Turner 首字母命名),给出了层结环境中点源浮力羽流的流场解析解,并详细分析羽干卷吸过程,不仅适用于热液羽流,而且适用于气相羽流等大多数流态. 魏文礼等<sup>[6]</sup>采用欧拉双流体模型和混合模型结合标准  $k-\epsilon$  紊流模型研究气泡浮力羽流的动力特性,认为欧拉双流体模型的结果更优. 何标等<sup>[7]</sup>采用大涡模拟对气体羽流分层特性进行数值模拟,发现密度较小的组分主要分散在空间上部 80% 的范围内. Pham 等<sup>[8]</sup>应用二维及三维粒子图像测速(PIV)技术研究纯羽流,观测到羽流的涡结构,揭示了其在卷吸过程中的作用. Han 等<sup>[9]</sup>同样采用 PIV 技术测得伴随反应发生的羽流流场,并指出反应放热会降低羽流的卷吸速率. Mirajkar 等<sup>[10]</sup>研究层结环境中浮力羽流的扩散过程,并且建立了羽流横向扩散速度随时间的变化关系. 目前,对于层结环境中浮力羽流所引起质量输移还有待深入研究,而密度层结是常见的羽流发生环境,尤其在海洋环境中.

本文通过层结盐水发生装置,在静止的线性密度层结盐水中开展一系列浮力羽流实验. 采用时间解析 PIV 技术获得羽流的时空高分辨率流场,通过计算羽流的卷吸系数及垂向质量通量,定量分析羽

流在演化发展过程中所产生的质量输移过程;提出了羽流最大输移质量计算公式并通过实验数据进行验证,为进一步深入研究自然界及工程活动中的羽流过程所产生的物质输运与混合奠定了理论基础.

## 1 实验方案与研究方法

### 1.1 实验装置

基于“双缸法”<sup>[11]</sup>,采用课题组前期搭建的层结盐水发生装置<sup>[12]</sup>,在有机玻璃实验水槽(50 cm×50 cm×50 cm)中生成稳定静止的线性密度层结盐水. 实验时将喷口垂直向下固定在水槽正上方中心位置,并通过以高密度盐水从顶部向下注入线性层结盐水的办法,进行浮力羽流实验. 实验水槽中线性层结盐水深度为 47 cm,喷口位于水面下 3 cm(图 1). 实验时浮力羽流的运动方向虽然与实际情况相反,但两者等效驱动力与运动方向一致,即两者动力学过程相同,浮力羽流的射流方向并不会影响其流体动力学过程<sup>[13-14]</sup>.

应用 PIV 获得浮力羽流发展与演变过程中的可视化二维图像及流场,解析流场的演变过程. PIV 系统分为图像采集与数据后处理系统两部分,其中图像采集系统由激光器和高频相机组成. 实验采用连续波(波长 532 nm,激光源功率 10 W)垂直照射实验水槽的侧表面,形成厚度约 3 mm 的薄光面,使之经过喷口中心线,即通过羽流的中心线. 在实验水槽正前方布置高频 CMOS 相机(采样频率 200 帧/s),相机采用 16 mm F2.0 镜头,在垂直方向  $z-y$  平面 28 cm( $z$ )×21 cm( $y$ )范围内获取羽流发展的二维可视化图像,坐标及示意图如图 1 所示. 采集的 PIV 图像分辨率为 2 320 像素×1 726 像素,8 bit 灰度图;添加到喷口射流盐水及密度层结盐水的 PIV 粒子直径 15  $\mu\text{m}$ ,为与盐水密度相近的尼龙微粒,质量浓度 3%(图 2). 需要指出的是,本文浮力羽流在达到充分演化发展时尺度均不超过实验水箱尺寸的 3/4,即羽流到水槽底边界及边壁的距离均超过实验水箱尺寸的 1/4,因此边界影响较小,可以忽略边界效应<sup>[8,14-15]</sup>. 采用 PIV 通用后处理软件对羽流二维图像进行处理,算法为多通迭代法,诊断窗口尺寸为 32 像素×32 像素,初始与最终诊断窗口的重叠区为

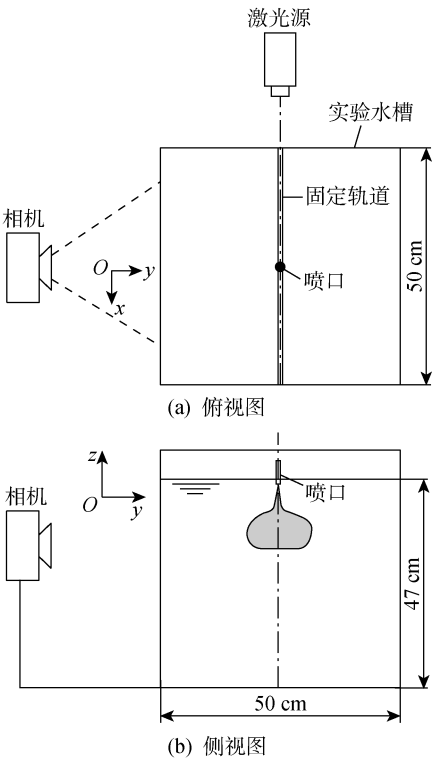


图 1 实验装置示意图  
Fig.1 Experimental setup

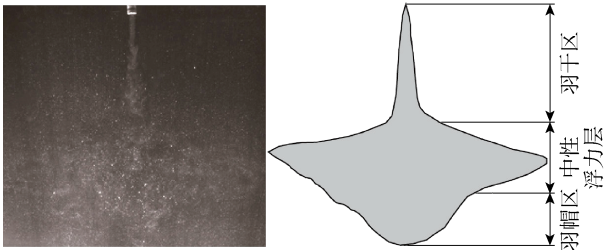


图 2 PIV 采集的原始图像(工况 10)  
Fig.2 The initial image collected by PIV (Case 10)

50%。获得流场数据后,再通过 MATLAB 进一步分析数据。

1.2 工况设计

浮力频率( $N$ )定量表征环境的密度层结性,初始浮力通量( $B$ )为喷口入射条件的度量,两者是浮力羽流的基本参数. 计算表达式分别为

$$N = \sqrt{-\frac{g}{\rho_b} \frac{\partial \rho_1}{\partial z}}$$
 (1)

$$B = g \frac{\rho_0 - \rho_a}{\rho_a} Q$$
 (2)

式中:  $g$  表示重力加速度;  $\rho_0$  表示喷口出流盐水密度;  $\rho_a$  表示与喷口处于相同高度的周围环境盐水密度;  $\rho_b$  表示水槽底部的环境盐水密度;  $Q$  表示喷口出流盐水的体积通量(喷口流量);  $\partial \rho_1 / \partial z$  表示层结环境的密度梯度. 表 1 所示为根据  $N$ 、 $Q$ 、 $\rho_0$  和喷口直径

表 1 实验工况相关参数  
Tab.1 Experimental parameters

工况	$N/\text{s}^{-1}$	$\rho_0/(\text{kg} \cdot \text{m}^3)$	$Q/(\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	$B/(\text{cm}^4 \cdot \text{s}^{-3})$	$d/\text{cm}$
1	0.90	1 019	3.12	56.0	0.5
2	0.64	1 026	3.09	81.6	0.5
3	0.88	1 026	3.23	81.7	0.5
4	0.90	1 026	3.26	80.4	0.5
5	0.82	1 026	3.43	80.1	0.5
6	0.66	1 006	3.24	20.4	0.7
7	0.65	1 011	3.08	35.4	0.7
8	0.63	1 011	3.30	37.6	0.7
9	0.87	1 011	3.30	17.1	0.7
10	0.57	1 019	2.55	46.0	0.7
11	0.88	1 019	3.09	55.5	0.7
12	0.66	1 019	3.25	20.2	0.7
13	0.63	1 019	3.39	63.0	0.7
14	0.55	1 019	3.90	67.5	0.7
15	0.65	1 026	1.15	27.6	0.7
16	0.66	1 026	3.06	80.5	0.7
17	0.91	1 026	3.25	82.6	0.7
18	0.64	1 026	3.42	90.0	0.7

$d$  等参数,设计的 18 组不同的实验工况。

在实验水槽的壁面等较深位置处布置 8 个针状采水器(分别距离底部 0、6、12、18、24、30、36、42 cm). 在线性密度层结形成后,羽流实验开始前,抽取少量水样,确定羽流发生环境的盐度分布,并根据状态方程<sup>[16]</sup>计算盐水密度. 应用最小二乘法对各组工况的盐水密度随水深分布进行线性回归分析,保证浮力羽流的发生环境具有良好的线性层结性<sup>[12]</sup>。

1.3 参数计算方法

所有实验工况中,CMOS 相机记录的羽流演变发展持续时间约为 50 s. 羽流在发展过程中的瞬时流速具有随机波动性,已有研究<sup>[17]</sup>指出:当羽流演变发展至某一时刻  $t^*$  后,羽流流场便会达到稳定阶段,  $t^*$  为与  $N$  相关的浮力时间尺度,且  $t^* = 2\pi/N$ . 对于所有实验工况,在  $3t^* \leq t \leq 5t^*$  稳定阶段,由羽流瞬时流场数据计算得到羽流时均速度场:

$$\left. \begin{aligned} U(x,z) &= \langle u(x,z,t) \rangle \\ W(x,z) &= \langle w(x,z,t) \rangle \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中:  $U$  和  $W$  分别表示时均速度场水平( $x$  轴)和垂直( $z$  轴)方向速度分量;  $u$  和  $w$  分别表示通过 PIV 后处理得到的瞬时速度场水平和垂直方向速度分量;符号  $\langle \rangle$  表示对所有瞬时速度场进行时间平均处理. 通过得到的羽流速度场计算卷吸率和输移质量,

定量研究浮力羽流的质量输移过程。

**1.3.1 卷吸系数** 卷吸率指一种流体在运动过程中吸入另一种流体的速率,通常用卷吸系数  $\alpha$  表示。卷吸过程是羽流在演化发展过程中产生物质输移的根本原因。对于单喷口浮力羽流,卷吸系数的计算表达式为:

$$\alpha_e = u_h/v_e \tag{4}$$

式中: $u_h$  表示羽流边界处的水平速度分量; $v_e$  表示同一高度处的羽流最大垂向速度分量。

经典 MTT 模型理论<sup>[5]</sup>认为:对于单喷口浮力羽流,卷吸作用主要发生在羽干处;对于羽干同一高度  $z_k$  处的羽流质点,其垂向速度分量  $W(x, z_k)$  呈现高斯分布。

$$W = W_m e^{-(x-x_m)^2/b^2} \tag{5}$$

式中: $W_m$  表示位于  $(x_m, z_k)$  处羽干中线的最大垂向速度分量; $b$  表示位于高度  $z_k$  处的羽干半径。

羽流在发展阶段,羽干半径  $b$  与羽流高度呈线性相关,即

$$b = cz + b_0 \tag{6}$$

式中: $b_0$  为截距常数;斜率  $c$  表示羽干半径的垂向变化梯度  $-db/dz$ ,与  $\alpha_e$  关系如下<sup>[18]</sup>:

$$\alpha_e = 5c/6 \tag{7}$$

利用  $b$  随羽流穿透距离  $z$  的垂向变化梯度计算羽流的卷吸系数  $\alpha_e$ 。由式(6)和(7)可得:

$$\alpha_e = \frac{5}{6} \left( -\frac{db}{dz} \right) \tag{8}$$

**1.3.2 垂向质量通量** 浮力羽流对于海底成矿、海洋勘探等具有重要影响。其输移质量可通过垂向质量通量  $M$  来表示为<sup>[17]</sup>

$$M(z) = \int_0^\infty 2\pi\rho W r dr \tag{9}$$

式中: $r$  表示圆柱坐标系中的羽流水平半径,且最大值  $r_{max}=b$ ; $\rho$  表示羽流密度。

2 实验结果与分析

2.1 卷吸过程

为了便于显示,将羽干平均分成 11 层,采用式(5)对每层羽流垂向时均速度分量进行曲线拟合(图 3),从而得到  $b$ ,再通过有限差分法计算  $-db/dz$ ,由式(8)计算得到  $\alpha_e$ 。羽干各层垂向速度分量的拟合结果如表 2 所示,羽干的垂向时均速度分量符合高斯分布,表明本文实验满足 MTT 模型卷吸理论中关于羽干垂向速度分布的假设。

采用文献[12]中的方法确定本实验中羽流的最大穿透距离  $Z_{max}$ ,并将其作为无量纲化参数,对羽流

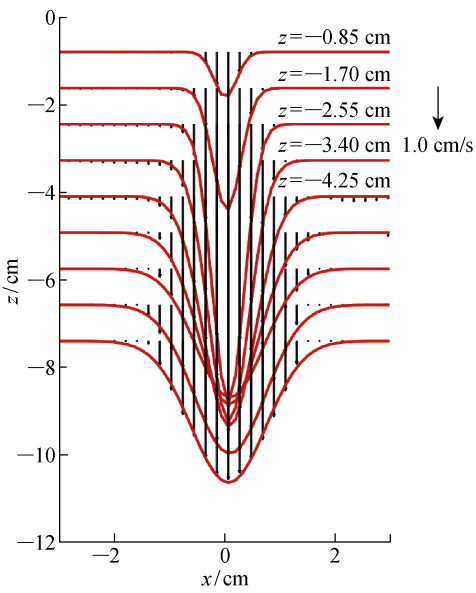


图 3 垂向时均速度分量的高斯曲线拟合(工况 10)  
Fig. 3 Gaussian fitting of mean vertical velocity (Case 10)

表 2 羽干各层垂向时均速度分量的高斯曲线拟合(工况 10)  
Tab. 2 Results of Gaussian fitting for mean vertical velocity component at each level (Case 10)

<i>z</i> /cm	<i>W<sub>m</sub></i> /(cm·s <sup>-1</sup> )	<i>x<sub>m</sub></i> /mm	<i>b</i> /mm	拟合残差
-0.85	-1.46	0.50	4.35	6.20×10 <sup>-7</sup>
-1.70	-3.69	0.92	4.75	2.69×10 <sup>-6</sup>
-2.55	-5.84	1.01	5.56	3.27×10 <sup>-6</sup>
-3.40	-5.78	1.11	6.65	2.17×10 <sup>-6</sup>
-4.25	-5.38	1.20	7.95	6.83×10 <sup>-6</sup>
-5.10	-4.77	1.26	9.04	2.17×10 <sup>-5</sup>
-5.95	-3.96	1.36	9.90	5.38×10 <sup>-5</sup>
-6.80	-3.93	1.42	10.2	4.98×10 <sup>-5</sup>
-7.65	-3.62	1.20	10.3	6.98×10 <sup>-5</sup>
-8.50	-2.87	1.60	10.2	6.89×10 <sup>-5</sup>
-9.35	-1.40	1.70	7.56	1.28×10 <sup>-5</sup>

垂向穿透深度  $z$  进行标准化处理。所有工况的卷吸系数随标准化穿透深度的平均分布曲线如图 4 所示。 $\alpha_e$  随着穿透距离明显变化:从喷口原点至  $z \approx -0.3Z_{max}$ ,  $\alpha_e$  逐渐增加; $z \approx (-0.3 \sim -0.5)Z_{max}$  处,  $\alpha_e$  在 0.11 附近稳定波动,该段深度对应羽干区;之后,  $\alpha_e$  从  $z \approx -0.5Z_{max}$  处的 0.1 减小至在  $z \approx -0.7Z_{max}$  处的 0,此处对应中性浮力层<sup>[12]</sup>,即羽流主要向周围扩散,而卷吸过程相对较弱;在  $z \approx (-0.7 \sim -1)Z_{max}$  处,  $\alpha_e$  为负值,这段深度对应羽帽区<sup>[17]</sup>。本实验得到的羽干区卷吸系数为 0.09~0.13,与文献[17]范围相一致,表明了可靠性。

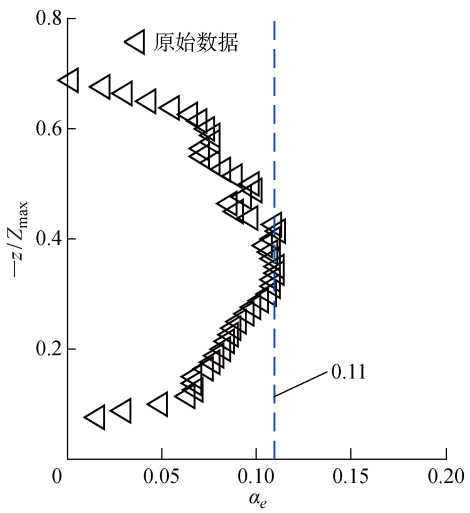


图 4 所有工况的  $\alpha_e$  随标准化穿透深度分布  
Fig. 4  $\alpha_e$  for all cases versus normalized penetration

2.2 输移质量

将式(5)代入式(9),并将直角坐标系转化为相应的圆柱坐标系,可得:

$$M(z) = \int_0^\infty 2\pi\rho W_m r e^{-r^2/b^2} dr \tag{10}$$

变形可得:

$$M(z) = -\pi W_m b^2 \int_0^\infty \rho e^{-r^2/b^2} d\left(-\frac{r^2}{b^2}\right) \tag{11}$$

本文实验中喷口出流盐水密度与层结环境的盐水密度差异均在 3% 以内,可认为满足 Boussinesq 假设,即密度变化对羽流发展的影响可忽略<sup>[5]</sup>. 假定在同一深度的羽流内部密度恒定且为常数,因此式(11)中的密度  $\rho(z)$  只是  $z$  的函数,与  $r$  无关. 对式(11)进行积分求解,

$$M(z) = \left[-\pi\rho W_m b^2 e^{-\frac{r^2}{b^2}}\right]_{r=0}^\infty \tag{12}$$

代入并整理可得:

$$M(z) = \pi\rho W_m b^2 \tag{13}$$

式(13)与文献[2]中气体羽流水平截面的质量流量表达式相同,垂向质量通量与最大垂向速度分量和羽流半径这两个参数密切相关. 采用式(13)得到标准化垂向质量通量随标准化穿透深度分布,如图 5 所示. 羽流垂向质量通量从喷口处开始迅速增加,到喷口附近  $z\approx-0.1Z_{\max}$  处增速变缓,再到  $z\approx-0.65Z_{\max}$  处达到最大值,此后逐渐减小直到接近于 0. 当  $z=-0.65Z_{\max}$ ,该处属于中性浮力层,这说明在中性浮力层以上,羽流由于卷吸作用不断从周围环境吸收质量;在中性浮力层及以下,携带大量物质的羽流向四周扩散,同时将自身携带和环境吸收的物质输运到更远处.

根据  $\pi$  定理,对最大质量通量  $M_{\max}$  进行量纲分

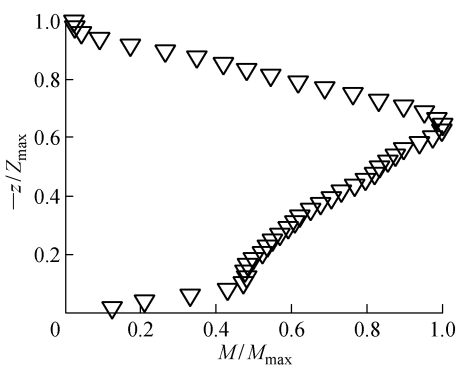


图 5 所有工况  $M/M_{\max}$  随标准化穿透距离分布  
Fig. 5  $M/M_{\max}$  versus normalized penetration

析,得到其函数表达式:

$$M_{\max} = C_M \rho_a B^{3/4} N^{-5/4} \tag{14}$$

式中: $C_M$  为待定常数,可由实验确定;所有工况的最大垂向质量通量相关参数见表 3. 对所得数据进行线性相关分析,结果如图 6 所示,矩形符号表示原始数据,实线表示拟合直线.

表 3 $M_{\max}$ 线性相关分析的相关参数					
Tab. 3 Parameters with linear correlation for $M_{\max}$					
工况	$B^{3/4} N^{-5/4} /$ ( $\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	$M_{\max} \rho_a^{-1} /$ ( $\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	工况	$B^{3/4} N^{-5/4} /$ ( $\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	$M_{\max} \rho_a^{-1} /$ ( $\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )
1	23.3	7.7	10	36.1	10.2
2	47.3	10.5	11	24.0	6.1
3	32.0	10.2	12	15.9	6.9
4	29.3	7.3	13	40.0	14.2
5	34.4	7.5	14	49.9	14.0
6	16.2	4.9	15	20.5	8.1
7	24.8	11.0	16	45.4	9.5
8	27.0	9.1	17	31.0	6.9
9	9.99	3.9	18	50.9	13.1

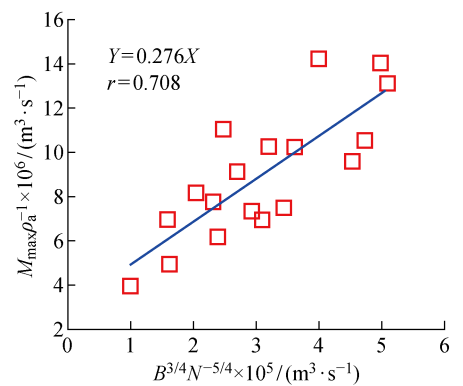


图 6  $M_{\max}$  线性相关分析结果  
Fig. 6 Linear correlation for  $M_{\max}$



通过最小二乘法计算得到 Pearson 相关系数, 评估线性相关程度, 用  $r$  表示,  $r$  值越大表示相关性越强. 所有工况数据拟合得到  $r=0.708$ , 待定常数  $C_M=0.276$ . 通过假设检验, 计算  $P$  值为  $1.01 \times 10^{-3}$  ( $P < 0.01$ , 样本量  $n=18$ ), 这表明  $M_{\max}/\rho_a$  与  $B^{3/4}N^{-5/4}$  有显著的线性相关性. 线性层结环境中的羽流  $M_{\max}$  由  $B$ 、 $N$  和  $\rho_a$  共同决定:

$$M_{\max} = 0.276\rho_a B^{3/4} N^{-5/4} \quad (15)$$

结合羽流卷吸系数分布、质量通量分布及羽流的发展演化形态<sup>[12]</sup>可知: 从喷口喷出的浮力羽流在羽干处卷吸入周围环境流体后沿射流方向被输移到更远处; 在羽帽区, 羽流与吸入的环境流体发生混合后, 最终在中性浮力层被输移到周围, 这是浮力羽流的物质输移过程.

### 2.3 误差分析

本文层结环境中的浮力羽流是典型的变密度流动, 折射率会随着流体局部密度的变化而改变. 折射率的非定常会引起图像中示踪粒子的模糊, 导致 PIV 测量误差. 折射率变化引起的速度脉动现象被称为伪湍动, 有必要评估其大小.

沿着中心线方向, 在喷口下方 2 cm 处垂直固定一根直径为 2 mm 的黑色细杆, 并在杆表面标出 7 个白点, 如图 7 所示. 在相同的实验设置基础上, 不在层结盐水及射流盐水中添加 PIV 示踪粒子, 并重复实验工况 10, 得到层结环境中浮力羽流中心线 7 个固定点的瞬时速度时间序列. 其中, 位于羽干中部点  $B$  的瞬时速度随时间波动最为剧烈, 其时间序列如图 8 所示, 时均速度分量为  $U_B=1.1 \times 10^{-3}$  m/s,  $W_B=-2.0 \times 10^{-3}$  m/s. 工况 10 的相同位置的垂向时均速度分量为  $W=6.2 \times 10^{-2}$  m/s, 即由式 (13) 计算羽流最大输移质量, 最大误差约 3%. 因此, 伪湍动对于羽流的真实时均速度场影响有限, 对于浮力羽流最大输移质量的影响可忽略.

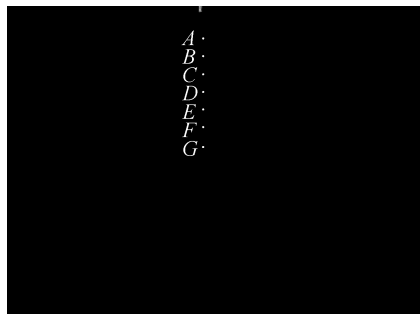


图 7 初始时刻通过固定点评估伪湍动的 PIV 图

Fig. 7 The image of fixed particles for the initial moment collected by PIV to assess pseudo turbulence

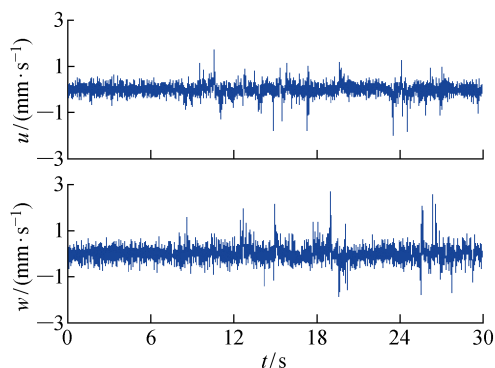


图 8 折射率变化引起的羽流流场中固定点  $B$  的瞬时流速时间序列

Fig. 8 Measured time series of velocity components of fixed Particle  $B$  due to variations of refractive index

### 3 结语

在线性层结盐水中开展浮力羽流实验, 通过 PIV 技术获得流场数据, 分析其卷吸及质量输移过程, 提出浮力羽流最大输移质量计算公式.

(1) 羽流位于相同高度处的垂向速度分量符合高斯分布. 从喷口原点至  $z \approx -0.3Z_{\max}$  范围内,  $\alpha_e$  逐渐增加; 在  $z \approx (-0.3 \sim -0.5)Z_{\max}$  时,  $\alpha_e$  在 0.11 附近波动; 在  $z \approx (-0.5 \sim -0.7)Z_{\max}$  时,  $\alpha_e$  逐渐减小至 0; 在  $z \approx (-0.7 \sim -1)Z_{\max}$  时,  $\alpha_e$  为负值.

(2) 从喷口喷出的浮力羽流在羽干处卷吸入周围环境流体后沿射流方向被输移到更远处, 在  $-0.65Z_{\max}$  处羽流垂向质量通量达到最大值; 在羽帽区, 羽流与吸入的环境流体发生混合后, 在中性浮力层被输移到周围, 垂向质量通量减小至 0.  $M_{\max}$  由浮力通量、浮力频率和与喷口处于相同高度的周围环境密度共同决定.

(3) 折射率变化引起的伪湍动对于羽流真实速度场的影响可忽略, 其导致的浮力羽流最大输移质量计算误差约为 3%.

本文实验在静止恒温的盐水环境中进行, 有待进一步开展考虑侧向流、温度变化等环境条件下的羽流实验. 本文得到的最大输移质量计算公式及相关结论为系统研究羽流演化过程中产生的物质混合与输移提供了理论依据.

### 参考文献:

- [1] TURNER J S. Buoyant plumes and thermals [J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 1969, 1: 29-44.
- [2] 易亮, 杨洋, 李勇, 等. 水平风作用下火羽流的质量

- 流率 [J]. *燃烧科学与技术*, 2011, 17(6): 505-511.  
YI Liang, YANG Yang, LI Yong, *et al.* Mass flow rate of plume under horizontal wind [J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2011, 17(6): 505-511.
- [3] 李军, 孙治雷, 黄威, 等. 现代海底热液过程及成矿 [J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 2014, 39(3): 312-324.  
LI Jun, SUN Zhilei, HUANG Wei, *et al.* Modern seafloor hydrothermal processes and mineralization [J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 2014, 39(3): 312-324.
- [4] LUPTON J E. Hydrothermal plumes: Near and far field [C]//HUMPHRIS S E, ZIERENBERG R A, MULLINEAUX L S, *et al.* *Seafloor Hydrothermal Systems: Physical, Chemical, Biological, and Geological Interactions*. Washington DC, USA: the American Geophysical Union, 1995: 317-346.
- [5] MORTON B R, TAYLOR G, TURNER J S. Turbulent gravitational convection from maintained and instantaneous sources [J]. *Proceedings of the Royal Society of London, Series A*, 1956, 234(1196): 1-23.
- [6] 魏文礼, 赵小军, 刘玉玲. 气泡浮力羽流动力特性三维数值模拟研究 [J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2014, 42(5): 229-234.  
WEI Wenli, ZHAO Xiaojun, LIU Yuling. Three-dimensional numerical simulation of dynamic characteristics of air bubble buoyancy plume [J]. *Journal of Northwest A&F University (Nat. Sci. Ed.)*, 2014, 42(5): 229-234.
- [7] 何标, 蒋新生, 孙国骏, 等. 基于大涡模拟的气体羽流分层特性数值模拟 [J]. *后勤工程学院学报*, 2015, 31(1): 38-44.  
HE Biao, JIANG Xinsheng, SUN Guojun, *et al.* Numerical simulation of gas plume stratification characteristics based on large eddy simulation [J]. *Journal of Logistical Engineering University*, 2015, 31(1): 38-44.
- [8] PHAM M V, PLOURDE F, KIM D S. Three-dimensional characterization of a pure thermal plume [J]. *Journal of Heat Transfer*, 2005, 127(6): 624-636.
- [9] HAN D, MUNGAL M G. Direct measurement of entrainment in reacting/nonreacting turbulent jets [J]. *Combustion and Flame*, 2001, 124(3): 370-386.
- [10] MIRAJKAR H N, BALASUBRAMANIAN S. Effects of varying ambient stratification strengths on the dynamics of a turbulent buoyant plume [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2017, 143(7): 04017013.
- [11] GHAJAR A J, BANG K. Experimental and analytical studies of different methods for producing stratified flows [J]. *Energy*, 1993, 18(4): 323-334.
- [12] 张巍, 赵亮, 贺治国, 等. 线性层结盐水中的羽流运动特性 [J]. *水科学进展*, 2016, 27(4): 602-608.  
ZHANG Wei, ZHAO Liang, HE Zhiguo, *et al.* Characteristics of plumes in linearly stratified salt-water [J]. *Advances in Water Science*, 2016, 27(4): 602-608.
- [13] HELFRICH K R, BATTISTI T M. Experiments on baroclinic vortex shedding from hydrothermal plumes [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1991, 96(C7): 12511-12518.
- [14] AYOTEE B A, FERNANDO H J S. The motion of a turbulent thermal in the presence of background rotation [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1994, 51(13): 1989-1994.
- [15] RICHARDS T S, AUBOURG Q, SUTHERLAND B R. Radial intrusions from turbulent plumes in uniform stratification [J]. *Physics of Fluids*, 2014, 26(3): 036602.
- [16] FOFONOFF N P, MILLARD R C. Algorithms for computation of fundamental properties of seawater [R]. Paris, France: Division of Marine Science Unesco, 1983.
- [17] JIANG H S, BREIER J A. Physical controls on mixing and transport within rising submarine hydrothermal plumes: A numerical simulation study [J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2014, 92: 41-55.
- [18] TURNER J S. Turbulent entrainment: The development of the entrainment assumption, and its application to geophysical flows [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1986, 173: 431-471.

(本文编辑:蒋霞)