

# 水下欠膨胀高速气体射流的实验研究<sup>1)</sup>

戚隆溪 曹 勇 王柏懿

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

**摘要** 采用实验途径研究了水下高速气体射流的动力学特性, 研制了水下高速气体射流实验系统并发展了相应的测试手段。实验中, 用插入式静压探针测量了射流轴线静压分布; 用  $\gamma$  射线衰减法测量了径向空隙率分布, 从而揭示了水下高速气体射流均压和掺混两个过程的基本规律。测量结果表明: 水下高速气体射流在欠膨胀工况下运行时, 近场将出现含有复杂波系结构的膨胀压缩区域, 由于气水的掺混作用, 水下欠膨胀气体射流均压化过程比空气中衰减得快。测量结果还表明, 水下射流在近场区的混合层由气水两相占据, 其流态从靠近气体侧的液滴流型过渡到靠近液体侧的气泡流型。

**关键词** 水下射流, 欠膨胀, 波系结构, 静压, 空隙率, 掺混

## 引言

射流研究是流体力学中的一个重要领域, 并在工程技术中有广泛的应用。到目前为止, 关于射流为高速气体而受纳介质为水体等液态介质的文献还为数不多, 研究工作还待深入与拓展。但是, 这类液体中气体射流在工程领域亦有广泛的应用, 包括液态金属燃烧器、喷氧冶炼炉、直接接触式冷凝器、气体溶解设备、吹气搅拌器、核反应堆压力过压抑制系统以及水下焊接切割与水下导弹发射等领域。

气体在液体中的射流过程相当复杂, 由于液体相对于气体的巨大质量惯性, 当气体射流的流量很小时, 气体射流的流动很不稳定, 使得气体的排放产生波动, 液体还有可能堵住气体的通路。当增加气流速度使得喷嘴出口处达到声速或更高时(此即本文中“高速”射流的含意), 便可以有效地改善流动不稳定和液体拥塞的状况<sup>[1]</sup>。当射流喷嘴出口处气体压力大于环境压力时, 气体离开喷嘴后会继续膨胀。对于这类欠膨胀射流, 喷嘴出口附近区域会出现膨胀区, 这个区域的流动涉及到射流膨胀压缩与卷吸掺混等问题, 会出现胞格型激波结构, 机制十分复杂。我们把射流喷嘴出口处的压力等于周围环境压力的工况称之为适配工况。本文采用压比这个参数来定义声速或超声速射流的工况。这里, 压比为喷嘴出口处气体压力与环境压力之比, 适配工况的压比为 1.0, 欠膨胀射流的压比大于 1.0。

Loth 和 Faeth<sup>[1,2]</sup> 对水中空气射流进行过研究。他们在实验室内模拟了空气射流在静止水环境中的两相混合过程并采用局部均质流动模型及等效射流出口等假设计算了二维射流的流场特性, 但是他们的模型无法处理欠膨胀射流的近场膨胀区均压化过程。王柏懿等人<sup>[3,4]</sup> 对水下高温燃气喷流的形成机制进行了全面分析, 采用数值模拟方法对在有效适配假定条件下水下高温高压燃气喷流流场进行了预报。本文工作则针对水下欠膨胀高速气体射流进行实验研究, 研

1999-03-21 收到第一稿, 1999-09-23 收到修改稿。

1) 国家自然科学基金资助项目(19972069)。

制了射流实验装置和测试系统, 通过测试射流轴线压力分布和不同剖面的空隙率分布, 来研究水下高速气体射流近场区均压化和卷吸掺混的一些基本现象.

## 1 水下高速气体射流实验系统

整个实验系统由气源、储气罐、气流管路、稳压罐、射流装置、水槽、移动支架和固定支架组成. 为了减少水槽壁面对射流的影响, 从几何尺度上要求水槽比射流喷嘴直径大一个数量级以上, 实验观察表明水槽壁面对射流的影响可以忽略. 本研究中水槽为一个长 2.8 m, 宽 0.15 m, 高 0.6 m 的有机玻璃槽. 此外, 还研制了二维移动支架, 其空间分辨率达到 1 mm.

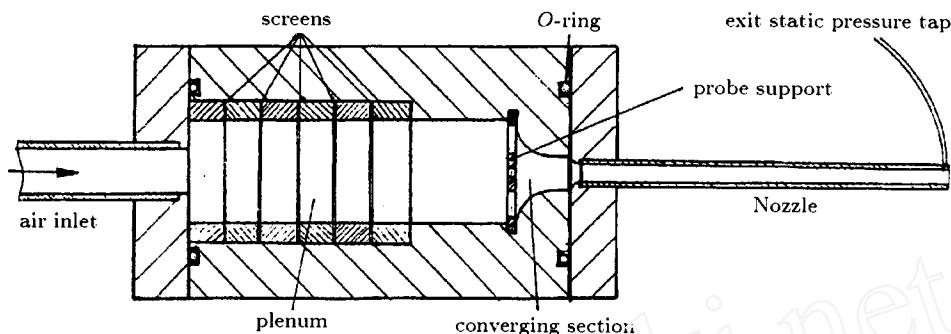


图 1 射流装置结构示意图  
Fig.1 Sketch of round injector

射流装置的结构如图 1 所示, 由安定室, 过渡段和喷嘴三部分组成. 喷嘴采用内径  $D$  为 5.5 mm, 长度  $L$  为 85 mm 的不锈钢管制成, 其长细比  $L/D$  大于 15, 从而保证了喷嘴出口处流动是充分发展的湍流<sup>[5]</sup>. 选用直径为 5.5 mm 的喷嘴, 除了考虑避免水槽壁面对射流的影响外, 还受到气源的供气量以及静压测量准确性这两方面因素的制约. 为了使管内流动均匀, 在射流喷嘴上游的安定室内布置了五层纱网, 对来流进行整流. 此外, 在距离喷嘴出口截面 1 mm 处布置一个静压测试孔, 因为出口截面的气流压力值是确定该处是否达到声速的重要指标. 供气系统由空气压缩机、储气罐和减压伐、临界喷管流量计和电磁伐以及压力表组成.

本文采用理想可压缩气体一维等熵流动模型计算不同工况. 只要适当选定来流总压, 就能保证等截面喷管中的气体作声速流动.

## 2 轴线静压测量

如前所述, 当射流的喷嘴出口压力大于环境压力时, 气流离开喷嘴以后会通过膨胀压缩过程形成复杂的波系胞格结构. 测量近场区射流轴线静压分布, 可以揭示压力均一化过程的规律, 并为探索波系胞格结构提供实验依据.

整个静压测试装置由静压探针、压力传感器、数字电压表三部分组成. 我们先后设计了常规式 (A) 和插入式 (B) 两种静压探针, 探针 A 有一锥型头部, 长度为 35 mm, 外径为 1.5 mm. 距顶端 12 mm 处的管壁上开有直径为 0.5 mm 的静压孔. 静压探针 B 则由一根外径为 1.5 mm 的不锈钢管制成, 距盲端 70 mm 处, 在管壁开有直径为 0.5 mm 的静压孔, 它采用两个支点来固定, 一个支点在喷嘴入口端, 另一个支点在喷嘴外部的探针支架上. 探针开口端均接压力传

传感器，压力传感器把压力信号转变为电信号后输入数字电压表显示并记录。为测量静压分布，我们利用移动支架，使探针沿射流轴线方向移动，最小移动量为 1 mm。

实验中，我们分别用两种探针测试了射流轴线静压。发现静压探针 A 不能准确测量出口附近的轴线静压，原因是探针的移动会影响流场的状态。当测量喷嘴出口附近的静压时，探针顶端将塞入喷嘴内，使喷嘴的截面积变小，从而改变了喷嘴的工况。而探针 B 的移动仅仅是改变静压孔的位置，不会改变流动状态。图 2 给出同一工况下两种探针的测量结果。可以看出：采用探针 A 时，喷嘴出口静压已显著下降。采用探针 B 时，测得的轴线静压沿射流方向围绕环境压力在振荡衰减，其结果是符合实际情况的。

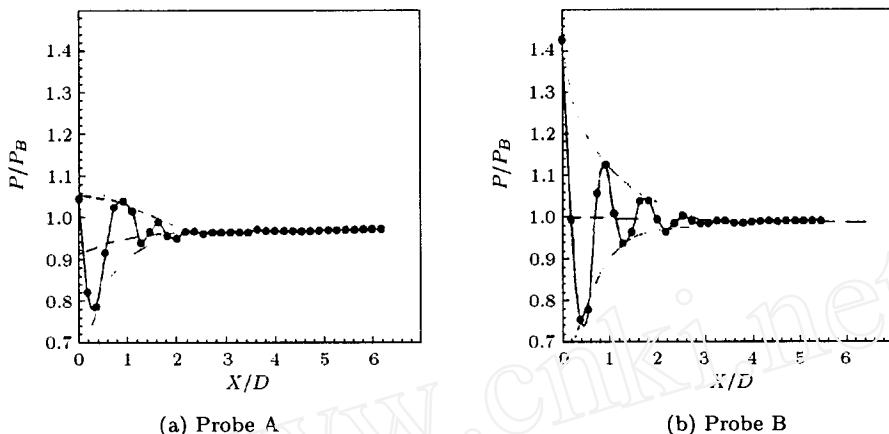


图 2 对  $P_0/P_B = 1.4$  两种探针测量结果的比较

Fig.2 Comparison of detected static pressure distributions with two probes for  $P_0/P_B = 1.4$

实验中，我们分别测试了在静水和空气两种环境介质中不同压比下的轴线静压分布，压比分别为 1.0 (适配)，1.2，1.4，1.6，1.8 和 2.0 等六种工况。实验结果如图 3 所示。

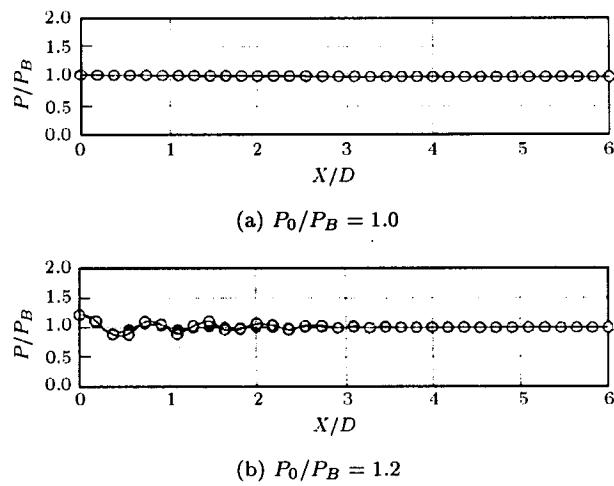


图 3 在不同环境介质中和不同压比下的射流轴线静压分布

Fig.3 Static pressure distributions along axis for different pressure ratios

—●— air-water, -○- air-air

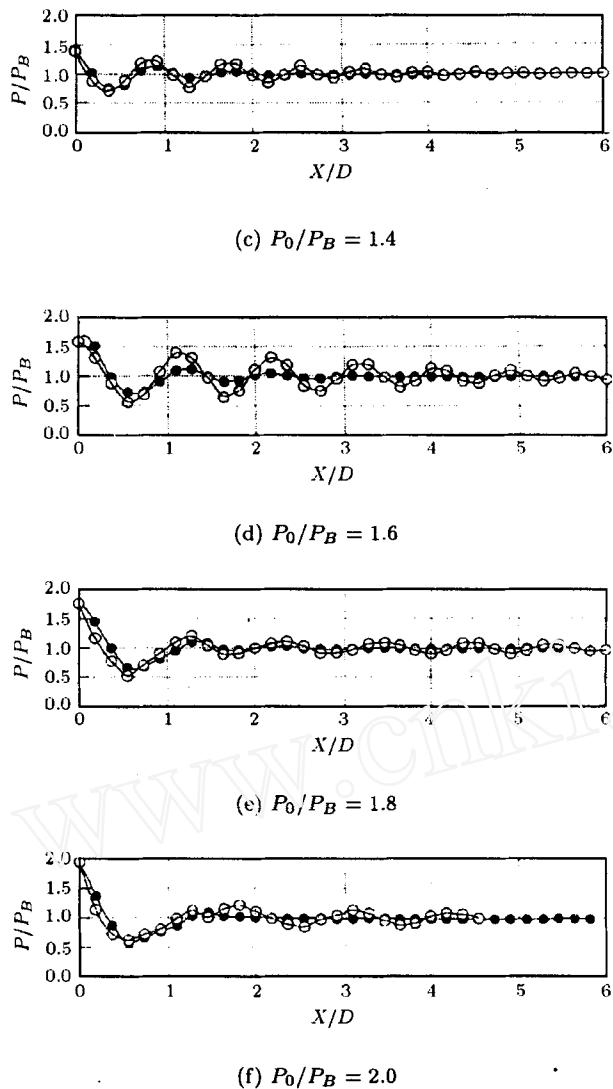


图 3 在不同环境介质中和不同压比下的射流轴线静压分布 (续)

Fig.3 Static pressure distributions along axis for different pressure ratios (continued)

—●— air-water, —○— air-air

### 3 射流空隙率剖面的测量

对于水下气体射流，气液两相混合层的发展是表征这类射流动力学性态的重要方面，它是射流气体与环境介质掺混的结果。距喷嘴出口不同距离剖面上的空隙率分布是射流掺混作用的定量度量。在本实验中，采用  $\gamma$  射线衰减法<sup>[6]</sup> 测量射流的时均空隙率分布。

#### 3.1 测量系统

$\gamma$  射线衰减测量系统包括放射源、探测器、计数器、屏蔽和准直系统。放射源和探测器能够在垂直和水平两个方向上同步移动，最小移动量是 1 mm。本实验采用的放射源是镅 241 ( $^{241}\text{Am}$ )，它密封在铅柱中心，一端开有准直孔（孔径为 2 mm，长度为 15 mm）。 $\gamma$  射线束从准直孔辐射出

来后，穿越水槽中被测区域到达探测器。探测器由闪烁晶体、光电倍增管、前置放大器和计数器组成。为了获得高空间分辨率和保证测量精度，要求放射源和探测器两侧都有准直。准直孔径大小规定了空间分辨率，准直孔还必须足够长，以保证测量精度。

### 3.2 质量吸收系数的标定

质量吸收系数  $\mu$  主要取决于  $\gamma$  射线光子能量和吸收材料的化学组分。质量吸收系数通过标定得到。准直的单能  $\gamma$  射线束通过吸收材料后的衰减可用下式来描述

$$\ln \frac{N_m}{N_c} = -l_s \mu_s \rho_s \quad (1)$$

式中  $N_m$  为有水时的计数率， $N_c$  为空气的计数率，由于水的密度  $\rho_s$  已知，水的吸收厚度  $l_s$  可以测定，因此利用式(1)可以得到水的质量吸收系数  $\mu_s$ ，本实验标定给出  $\mu_s = 0.170 \text{ cm}^2/\text{g}$ 。

此外， $\gamma$  射线计数存在着统计涨落，一般通过增加计数的方法来减少统计涨落的相对误差，从而保证测量的精度。所以测量中要尽可能增加计数率，但本实验中会受到气源能力的制约。含有粗大误差的测定值称为坏值或异常数据，应予以剔除。本实验中，我们采用格拉布斯准则<sup>[7]</sup> 来判定和处理粗大误差。

### 3.3 空隙率分布的测量原理

当放射源和探测器的距离不变时，对准直的单能  $\gamma$  射线束的衰减可用下面的方程描述

$$\frac{N_m}{N_c} = \exp \left( - \int \mu \rho ds \right) \quad (2)$$

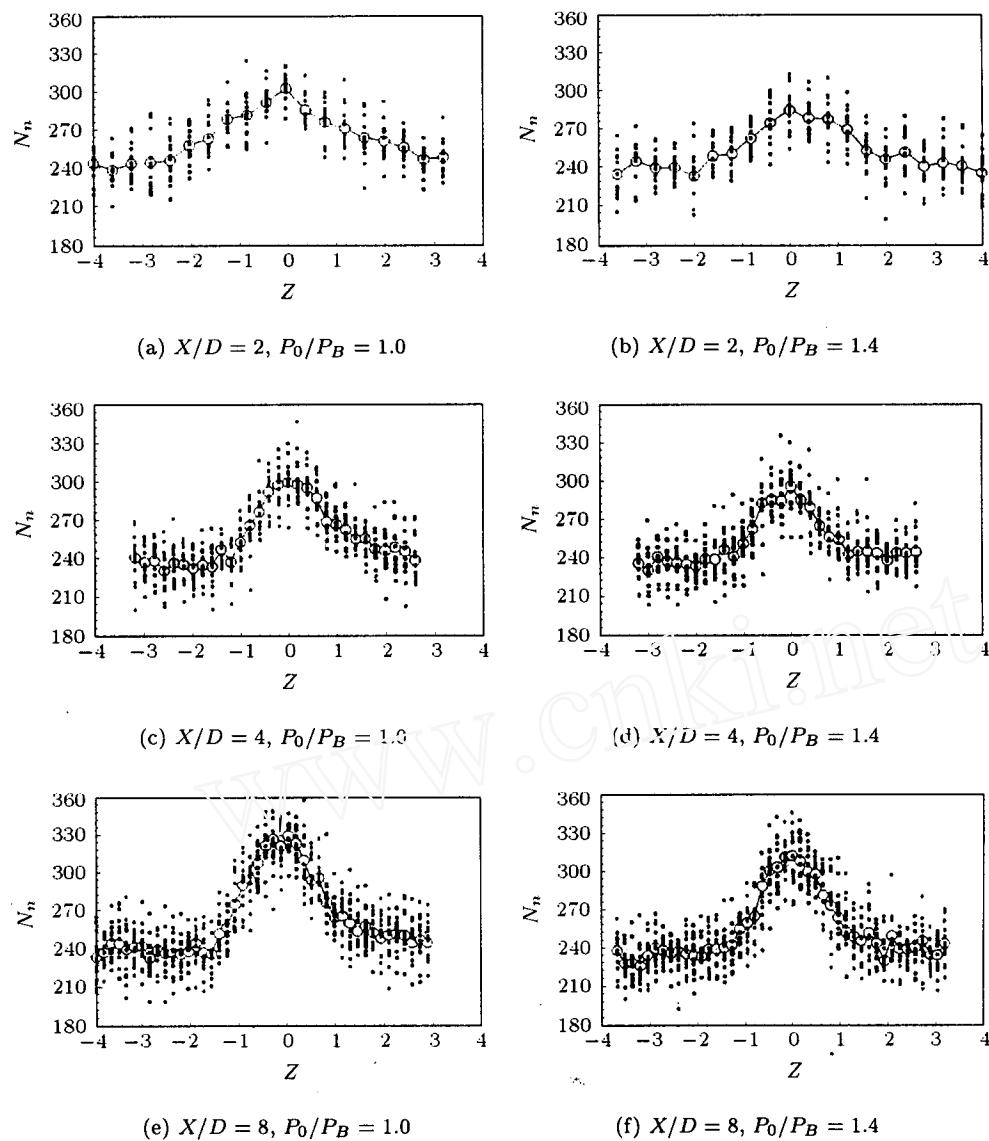
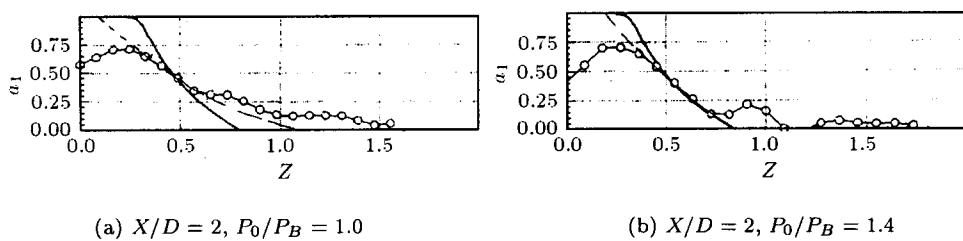
式中  $N_m$  为测量气水混合物时的计数率， $N_c$  为空气中的计数率， $\mu$  为气水混合物的质量吸收系数， $\rho$  为气水混合物的密度， $s$  为沿射线通路的线坐标。因为射流流场内各点的  $\mu, \rho$  都是空间位置的函数，式(2)无法用于实际的计算。空气的质量吸收可以忽略不计，则可得

$$\frac{N_m}{N_c} = \exp[-y\mu_s\rho_s] \quad (3)$$

其中， $y$  为射线通路上的水折合吸收长度。 $\mu_s$  和  $\rho_s$  为已知的纯水质量吸收系数和密度，我们可先利用式(3)算出水槽中有气体射流时水的折合长度  $y$ ，再利用静水时（此时射线通路上全部为水）标定的水吸收厚度  $Y$  减去  $y$ ，就得到  $\gamma$  射线通路上的气体折合长度  $L$

$$L = Y - \ln \left( \frac{N_c}{N_m} \right) / \mu_s \rho_s \quad (4)$$

测量所得到的为射线通路上折合吸收长度的数据，必须对原始测试数据进行反运算处理，才能给出空隙率剖面分布<sup>[8~10]</sup>。本实验测试了三个不同剖面 ( $X/D = 2, 4, 8$ ) 在两个不同压比 ( $P_0/P_B = 1.0, 1.4$ ) 下的计数率分布，测量结果如图 4,5 所示（其中  $z$  为距轴线的径向距离，向上方向为正）。图 4 为测出的剖面计数率分布，图 5 为反演得到相应的空隙率分布。

图 4 在  $P_0/P_B = 1.0, 1.4$  工况下, 三个剖面计数率分布测量结果Fig.4 Distributions of detected time-mean counts at three axis positions for  $P_0/P_B = 1.0$  and 1.4图 5 在  $P_0/P_B = 1.0$  和 1.4 工况下, 三个剖面的空隙率分布Fig.5 Distribution of time-mean void fraction at three axis positions for  $P_0/P_B = 1.0$  and 1.4

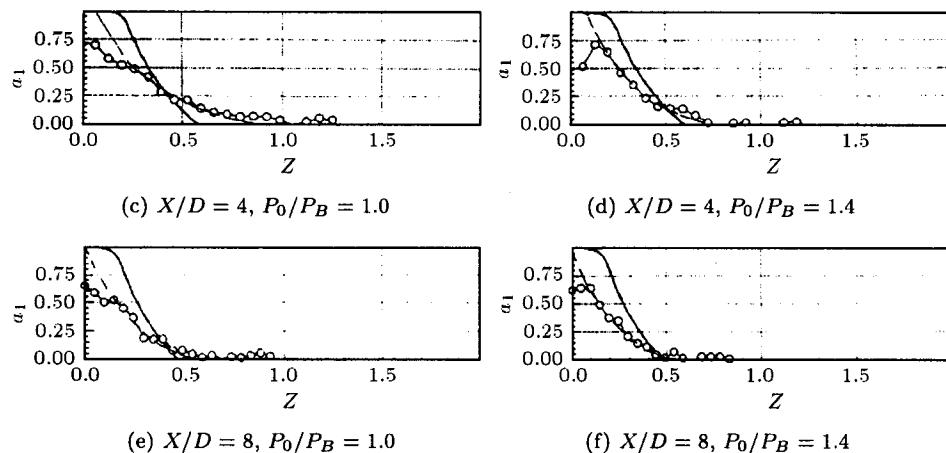


图 5 在  $P_0/P_B = 1.0$  和 1.4 工况下，三个剖面的空隙率分布（续）

Fig.5 Distribution of time-mean void fraction at three axis positions for  $P_0/P_B = 1.0$  and 1.4 (continued)

### 3.4 空隙率分布的误差分析

采用本方法得到的空隙率数据在射流轴线附近不令人满意。在该点附近产生大的误差来自两个方面：(1)由测试系统引起的。为了保证空间分辨率，影响了计数率的精度。本实验的计数率在240~340之间，统计涨落的相对均方根误差为6.5%~5.5%。(2)由反演运算而导致的在点(0,0)附近的数值可信度较差。但是，射流近场区的初始段，从理论上可以直接判定在射流轴线附近的空隙率为1。

#### 4 实验结果的分析与讨论

#### 4.1 欠膨胀声速气体射流近场区均压过程的分析

由图3可知，欠膨胀声速气体射流在静止空气和水两种环境介质中发展时，近场区轴线压力分布呈现以下类似的特征：

- (1) 在适配工况下，射流的轴线压力分布是一条直线，射流轴线处压力维持不变。
  - (2) 当射流在喷嘴出口的压力大于环境压力时，由于射流气体在近场区内的膨胀和压缩过程，射流的轴线静压幅值都要发生振荡，并且压力振幅沿轴线逐渐减小，逐步实现射流压力和环境背压的均一化。
  - (3) 随着射流出口处的压力增大，射流轴线压力曲线的第一波谷值振幅增大，相应的位置也向下游移动。这是由于射流气体的压比增大时出口处产生的膨胀波强度增强，相应的膨胀扇尺度增大。

图 3 同时也显示了欠膨胀声速气体射流在空气和水两种环境介质中轴线压力分布的不同点:

- (1) 对于同一工况, 射流轴线静压在水中振荡幅值的衰减要比在空气中衰减得快。由于水密度要远大于空气密度, 气流卷吸所造成的水下射流的能量损失要远大于空气中射流的能量损失。因此水下欠膨胀射流实现压力均一化所需的距离要比空气中射流的短。

(2) 对于第一个波, 两种介质环境中的幅值和波长较为接近。其主要原因是: 在射流的第一

相比而言，在射流的第二个膨胀压缩波系区域，由于混合层的发展，两种射流的能量损失显示出差异，两种射流的压力波谷值和压力波峰值的距离便有明显的差异。这进一步证实了掺混对均压过程的影响。

从图 3 的轴线静压分布可以看到水下欠膨胀声速射流的近场区内流动具有如下特征：(1) 气体的膨胀压缩过程是均压过程中的主要机制；(2) 气水两相掺混加速均压过程的完成；(3) 对于第一个胞格结构，水下气体射流的流场性态和空气中气体射流十分相似。

#### 4.2 气水两相混合层中空隙率分布特性及其与理论估算的比较

根据本实验测出的两个压比下三个剖面处的计数率分布，我们通过反演运算求出了相应的空隙率分布（参见图 5）。实验表明由于卷吸掺混作用气水之间没有明确的分界面，存在一个气水混合物（空隙率在 0 和 1 之间）占据的两相介质混合层。空隙率分布呈现一个共同特征：从射流轴线处向射流边缘逐渐递减，最后衰减为零。

若将图 5 的空隙率实测曲线外延与  $\alpha = 1$  相交（虚线所示），将交点定义为混合层与核心区的分界。在给定压比下， $X/D = 8$  的剖面处，射流的混合层半径大约为 26 mm，混合层已经扩展到轴线了，气体核心区不复存在，此时初始段结束，射流进入主体段。这些测量结果显示了射流在初始段，空隙率分布曲线在中心区有一个平坦部分，该区域全部为气体占据，即所谓的核心区。高空隙率区域以气体为主，混有液滴，而低空隙率区域以液体为主，混有气体。由此表明了水下气体射流的初始段包含了三种流型，它们之间的过渡是渐变的，主要由湍流输运机制控制。

对于实测的两个典型工况，我们利用现有的计算程序<sup>[4]</sup>进行了数值计算，计算中未考虑水对气体射流的浮力作用。计算结果给出在图 5 中（实线所示），实验数据与理论估算基本相符，说明了我们的处理方法和理论模型是合理可行的。根据图 5 可以得知：由于气水的掺混作用，射流的空隙率沿垂直与轴线方向逐渐减小，单相气体核心区沿轴线方向逐渐减小，射流的混合层沿轴线方向不断向水侧和气侧扩展，最后混合层到达射流的轴线处，此时气体的核心区消失，起始段结束，射流进入主体段。

#### 参 考 文 献

- 1 Loth E, Faeth GM. Noncondensing round turbulent gas jets in liquids. AD-A191191, 1987
- 2 Loth E, Faeth GM. Underexpanded noncondensing turbulent gas jets in liquids. AD-A197939, 1988
- 3 王柏懿, 戚隆溪, 陈启生, 毛鸿羽. 水下高速高温气体射流演化机制探讨. 中国造船, 1955, (增刊): 223~225 (Wang Boyi, Qi Longxi, Chen Qisheng and Mao Hongyu. Investigation of gas jet development in water. *Shipbuilding of China*, 1995, (suppl): 223~225 (in Chinese))
- 4 王柏懿, 马言宝, 戚隆溪. 准平衡气水两相湍射流掺混过程的数值分析. 西北纺织工学院学报, 1997, 11(增刊): 86~89 (Wang Boyi, Ma Yanbao and Qi Longxi. Quasi-equilibrium modeling of turbulent air jet in water and Its entrainment process simulation. *J of Northwest Institute of Textile Sci and Technology*, 1997, 11(suppl): 86~89 (in Chinese))
- 5 钱汝鼎主编. 工程流体力学. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1989 (Qian Ruding. Engineering Fluid Mechanics. Beijing: BSAU Press, 1989 (in Chinese))
- 6 戚隆溪, 谢斌. 用铯-137 $\gamma$  射线衰减法测量土壤密度和含水量. 土壤学报, 1991, 28(1): 58~91 (Qi Longxi, Xie Bing. Measurement of soil density and water content with Cs-137 gamma ray attenuation. *Acta Pedologica Sinica*, 1991, 28(1): 58~91 (in Chinese))
- 7 吕崇德, 姜学智, 杨献勇, 陈泽荣. 热工参数测量与处理. 北京: 清华大学出版社, 1993 (Lu Chongde, Jiang Xuezhi, Yang Xianyong, Chen Zheyong. Measurement and Processing of Thermodynamic Parameters. Beijing: Tsinghua

- University Press, 1993 (in Chinese))
- 8 Santoro RJ, Semerjian HG, Emmerman PJ, Goulard R. Optical Tomography for Flow Field Diagnostics. *Int J Heat Mass Transfer*, 1980, 24(7): 1139~1150
- 9 Shepp LA, Logan BF. The Fourier Reconstruction of a Head Section. *IEEE Trans Nucl Sci*, 1974, NS-24: 1990~1998
- 10 Goulard R, Emmerman PJ. Absorption Diagnostics. AIAA paper, 79-0085, 1979

## EXPERIMENTAL STUDY OF UNDEREXPANDED SONIC AIR JETS IN WATER<sup>1)</sup>

Qi Longxi Chao Yong Wang Boyi

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

**Abstract** The structure and mixing properties of underexpanded turbulent air jets in still water were experimentally investigated in this paper. The experimental system, which consists of compressor, gas tank, injector, water tank as well as pipe, regulator and mount, was built to simulate horizontal sonic jets submerged in water and to measure flow properties of the jets. In order to determine static pressure distribution in the nearfield of the underexpanded jet, two types of horizontally movable, static probes were developed and tested. Static pressures along the axis of jets were obtained for the ratios of static pressures at nozzle passage exit to ambient water being 1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8 and 2.0, were illustrated. Using gamma-ray absorption method, where the Gamma-Ray probe is vertically movable, mean void fraction distributions, for the ratios being 1.0 and 1.4, were measured at 3 different profiles. Among them, as a reference, the ratio of 1.0 represents the full expansion case. The flow structure and mixing properties were analyzed through the distributions of static pressure and mean void fraction. The results are useful for the analysis of the flow in the external-expansion region near the passage exit. Static pressure measurements show that a shock-wave-containing external-expansion region exists for underexpanded sonic air jets in water, which is similar to that of underexpanded air jets in air. Underexpanded air jets in water damp faster than underexpanded air jets in air due to different mixing condition. Mixing entrainment layer surrounding the external-expansion region for air jets in water involved a bubble region near the liquid side and a drop-containing region near the gas side.

**Key words** submerged jet, underexpansion, shock-cell structure, static pressure, void fraction, turbulent mixing

Received 21 March 1999, revised 23 September 1999.

1) The project supported by the National Natural Science Foundation of China (19972069).