

# 掺气减蚀的小气泡保护作用及研究展望

陈先朴, 邵东超

(安徽省~水利部淮河水利委员会水利科学研究院, 蚌埠, 233000, Email:cxp6769@163.com)

**摘要:** 根据近年在模型试验和原型观测中应用针式掺气流速仪测量高速水流掺气浓度场、流速场, 气泡尺寸及其概率分布的研究成果, 提出了掺气减蚀小气泡保护作用的新概念, 主要为: 原型流速高, 水流韦伯数高, 形成微小气泡能力强, 微小气泡可以沿程挟带而不上浮逸出。与掺气保护作用关系最密切的是单位体积内的气泡数量, 而不是掺气浓度。0.2mm 以下的微小气泡在掺气减蚀中起主要作用。可能只要很小掺气浓度即可达到掺气减蚀保护的效果。掺气减蚀的小气泡保护作用研究, 尚处在初步阶段, 还需要进行大量的模型研究、专题研究、工程原型观测加以逐步完善。

**关键词:** 高速水流; 掺气浓度; 掺气减蚀; 针式掺气流速仪; 气泡尺寸; 气泡韦伯数

## 1 前言

高速水流泄水建筑物, 过流面常遭空蚀破坏。自 20 世纪 60 年代开始应用掺气减蚀措施, 取得了很大成功。近年工程设计中认为掺气浓度达到 2%~3%, 即可达到掺气减蚀的保护作用。在工程实践中, 常有掺气浓度小于 2%~3%, 而并未发现空蚀破坏的例子, 如鲁布革水电站左岸泄洪洞距离上掺气坎下游较远处掺气浓度为 0.4%<sup>[1]</sup>。而在船舶螺旋桨的研究中<sup>[2]</sup>, 只要很微小的空气含量 0.006%, 即有明显的减蚀效果。在掺气坎的保护长度方面, 在已建工程中, 采用的保护长度从 60~560 m<sup>[3]</sup>, 也是差别巨大。这说明, 我们对掺气减蚀机理的认识很不完善, 需要深入研究。通过利用近年开发的针式掺气流速仪测定高速水流的掺气浓度场和流速场, 分析水流中的气泡尺寸及其概率分布, 笔者提出了掺气减蚀小气泡保护作用的新概念<sup>[4-10]</sup>。

## 2 针式掺气流速仪简介

针式掺气流速仪的掺气探针为细铂金电极(图 1)。气泡通过针尖时信号为 1, 水通过针尖时信号为 0。应用示踪法原理, 测量气泡信号通过 2 个掺气探针的时间, 可以得出流速<sup>[5]</sup>, 并分析出掺气浓度、气泡尺寸及概率分布。适合于掺气水流运动规律、掺气减蚀机理的研究。

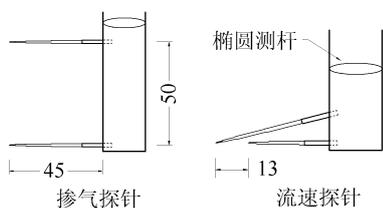


图1 掺气流速探针

### 3 掺气水流的运动特性

#### 3.1 掺气水流的分区<sup>[6]</sup>

泄洪洞出流掺气水流运动状况沿程可划分为3段(图2)。空气掺入段,空气自挑流水舌的上下表面卷吸掺入水中,水中空气含量沿程增大;过渡段,空气掺入量少于逸出量,空气含量沿程减小;稳定段,掺入和逸出水中的空气平衡,空气含量沿程不变。在稳定段,模型中由于流速小、气泡大,上浮快,底部掺气浓度往往为0;但是在原型,底部掺气浓度虽然较小,微小气泡的数量仍然巨大。

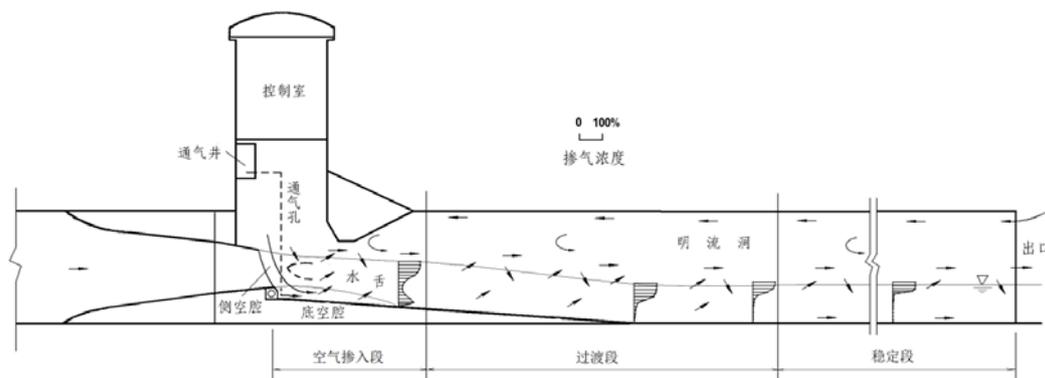


图2 小浪底工程泄洪洞掺气水流流态示意图

#### 3.2 垂线分布

图3为水槽末端<sup>[11]</sup>掺气水流接近稳定段的流速 $V$ 、掺气浓度 $A$ 、气泡尺寸 $d_{50}$ 、概率 $P$ 、气泡密度 $D_b$ 的垂线分布。掺气浓度在底部边界处很小,向上逐渐增大。这与紊流研究成果,垂向紊动强度分布规律一致。边界以上流速分布与明渠一致,当掺气浓度开始快速增加时,流速达到最大值,然后向水面略有减小。气泡尺寸 $d_{50}$ 也是从底部向上逐渐增大。靠近底板处虽然掺气浓度很小,但是气泡尺寸 $d_{50}$ 也很小,小尺寸气泡概率大,因此气泡密度最大。

不同气泡尺寸的垂线分布见图4,  $\leq 1\text{mm}$ 的气泡,掺气浓度向上逐渐增大,大约0.2mm水深以后不再变化。

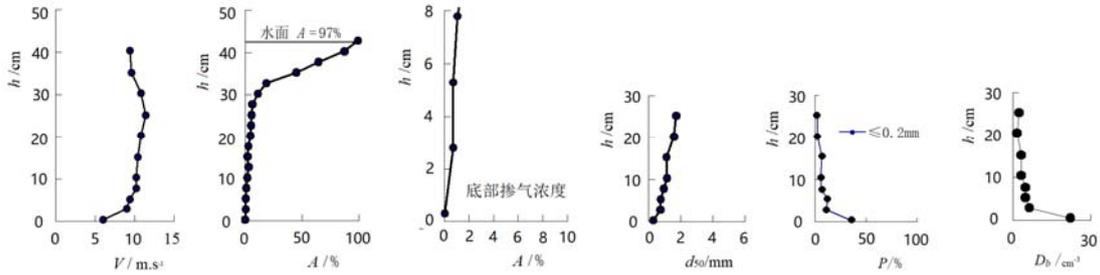


图3 垂线分布 (水槽)

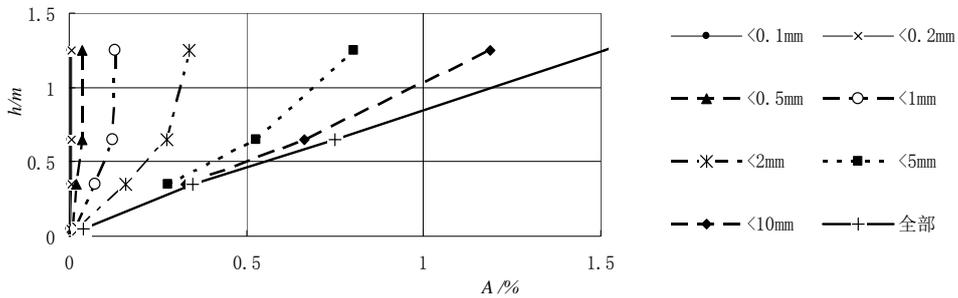


图4 不同气泡尺寸掺气浓度垂线分布(小浪底泄洪洞 1:20 模型)

### 3.3 掺气浓度的沿程分布

分析采用距离底板大约 0.2 mm 水深处的掺气浓度代表近底部的掺气浓度。这与常用的电阻式掺气仪测量成果基本一致。各组次的掺气浓度沿程变化见图 5。掺气浓度的沿程衰减符合指数规律，可以用下式表示；

$$A = A_0 e^{-\beta L/h} \quad (1)$$

式中： $A$ 为掺气浓度； $\beta$ 为衰减系数； $L$ 为自空腔末端计算的距离； $h$ 为水深。

各组次掺气浓度的衰减系数与流速对比见表 1，流速越大，衰减系数越小。

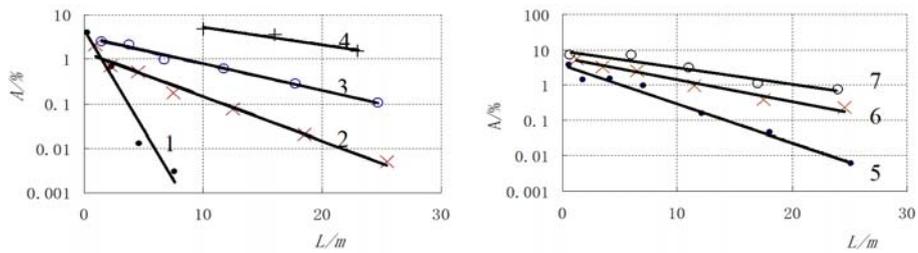


图5 掺气浓度沿程变化 (图中数字为试验组次)

掺气浓度的衰减系数可以表示为韦伯数  $W_b$ 、佛汝德数  $Fr$ 、雷诺数  $R_e$  等无量纲数的函数。

$$\beta = f(W_b, Fr, R_e) \quad (2)$$

$$W_b = \frac{V\sqrt{l}}{\sqrt{\frac{\sigma}{V\rho}}} \quad (3)$$

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gh}} \quad (4)$$

$$R_e = \frac{Vh}{\nu} \quad (5)$$

式中： $V$  为流速； $l$  为特征长度； $\sigma$  为表面张力系数； $\rho$  为水的密度； $\nu$  为水的黏性系数； $g$  为重力加速度。

经过分析得到如下公式：

$$\beta = 6.82W_b^{-0.263} Fr^{-1.90} \quad (6)$$

式(6)表明，掺气浓度的衰减系数随韦伯数、弗汝德数的增大而减小。说明模型试验成果不能简单的按照重力相似原理引伸到原型。以第6组的模型（1：20），如果按照重力相似引伸到原型，则掺气浓度从5% 衰减到1%的流程是228m。而按照式(6)的计算，由于原型韦伯数比模型大20倍，掺气浓度的衰减系数小，掺气浓度从5% 衰减到1%的流程为455m。

表1 掺气浓度的衰减系数与流速

组次	1	2	3	4	5	6	7
V(m/s)	4.72	6.64	8.83	12.32	6.51	9.03	11.28
$\beta$	0.129	0.0289	0.0171	0.0112	0.0626	0.0353	0.0274

### 3.4 小气泡掺气浓度的沿程分布

图6为3组不同流速的小气泡掺气浓度的沿程分布情况。随着流速增大到11.28 m/s，尺寸为0.2 mm及0.5 mm以下的小气泡的沿程衰减明显减小。预计在原型流速大于30 m/s的情况下，应该存在尺寸小于0.2 mm的微气泡沿程不衰减的情况。就象在河道中的细颗粒泥沙可以长距离输送入海，而不沉淀一样。

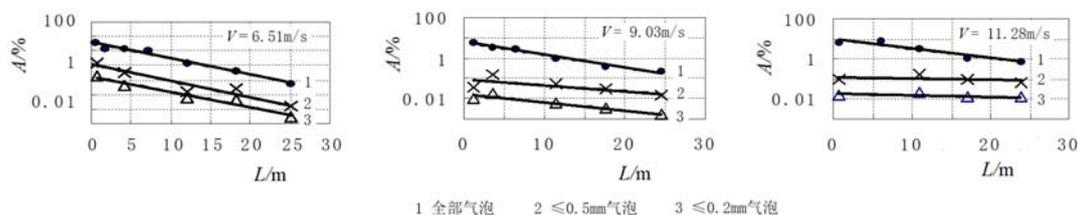


图6 小气泡掺气浓度的沿程分布

### 3.5 模型与原型掺气浓度对比

从垂线分布看，模型与原型针式掺气仪的测量成果完全一致。原型在底部，电阻式测量的掺气浓度明显大于针式。这是由于，虽然电阻式传感器贴于地板上，但是其感应域为上半域空间（图7）。从沿程分布看（图8）。模型中针式与电阻式测量的掺气浓度沿程分布规律一致，电阻式测量值略大，大约相当于 0.2 mm 水深处针式掺气仪的测量成果<sup>[12]</sup>。原型针式距离底板只有 0.7 cm，测量成果小于模型大约 0.2 mm 水深处针式和电阻式测量的掺气浓度是合理的。

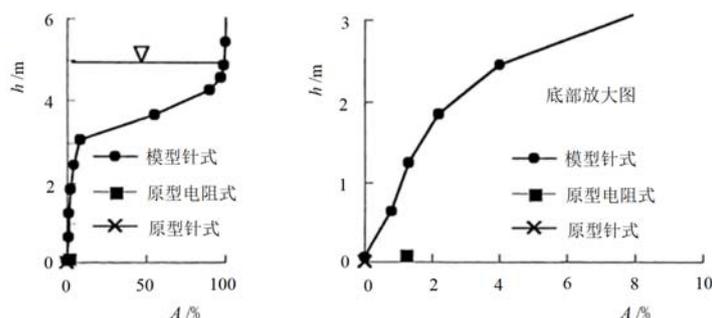


图7 掺气浓度的垂线分布（小浪底泄洪洞）

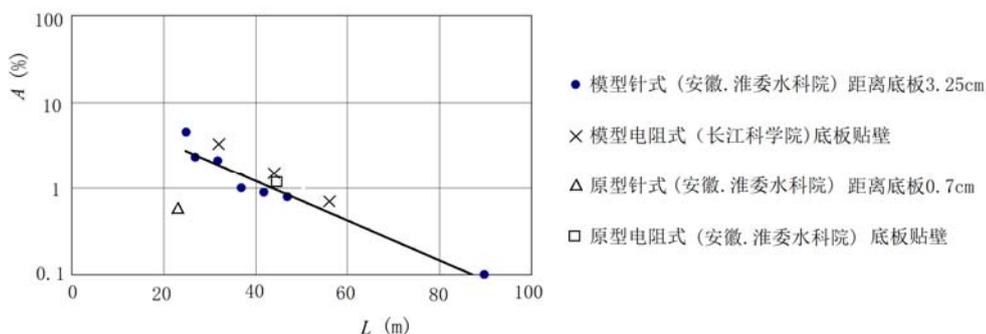


图8 掺气浓度的沿程分布（小浪底泄洪洞）

### 3.6 原型气泡尺寸的预测

在此引入底部气泡韦伯数  $W_b$  的概念<sup>[13]</sup>，在水槽中以能够测量出气泡尺寸的最后断面（接近稳定段），距底部 3mm 的气泡尺寸  $d_{50}$  做为计算韦伯数的特征长度，如式 7。

$$W_b = \frac{V\sqrt{d_{50}}}{\sqrt{\sigma/\rho}} \quad (7)$$

气泡韦伯数与流速关系见图 9，气泡韦伯数随流速变化不大。其中第 1 组的气泡韦伯

数偏小，其余各组的可以用下式表示：

$$W_b = 13.17V^{0.244} \quad (8)$$

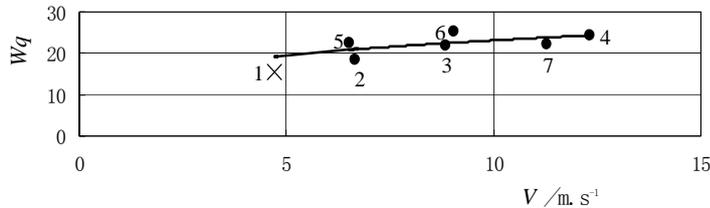


图9 气泡韦伯数与流速

以此推算，在原型 40m/s 流速时，气泡韦伯数为 32.4，底部气泡尺寸  $d_{50}$  为 0.048mm。以上试验成果与分析表明，在原型接近底板处，气泡尺寸很小，掺气减蚀主要依靠大量微小气泡。

#### 4 掺气减蚀的小气泡保护作用

壁面不平整引起的空蚀破坏作用域仅仅限于距离壁面数厘米的空间。在金属构件上，空蚀破坏呈针眼状，说明破坏是空泡在距离壁面数毫米的空间内溃灭造成的。掺气坎下游的掺气水流在此空间内大尺寸气泡很少，掺气浓度也很小，但是微小气泡的数量很多，掺气减蚀主要依靠小尺寸气泡的保护作用。笔者认为，与掺气保护作用关系最密的是单位体积内的气泡数量，而不是掺气浓度。对气泡尺寸、气泡密度、气泡间距、掺气浓度及保护作用进行了分析，如表 2。目前预测原型 40m/s 流速时，底部气泡尺寸  $<0.05\text{mm}$ 。按照表 2，气泡密度达到 10000 个/cm<sup>3</sup>，掺气浓度也不到 0.1%。因此用 0.2mm 以下小气泡的掺气浓度，作为判断掺气减蚀作用的指标将更为准确。

表 2 气泡尺寸、气泡密度、气泡间距、掺气浓度 (%) 及保护作用

气泡 密度 个/cm <sup>3</sup>	气泡 间距 /mm	预计 保护 作用	掺气浓度 A/%						
			气泡尺寸 $d_{50}$ mm						
			0.02	0.05	0.1	0.2	0.5	1	2
1	10	弱	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.0065	0.0524	0.42
100	2.15	较强	<0.001	<0.001	0.0052	0.042	0.654	5.24	41.9
10000	0.464	强	0.0042	0.065	0.524	4.2	65.4		

## 5 研究展望

(1) 小气泡保护作用的抗蚀试验。前人的掺气保护抗蚀试验都没有控制和检测气泡尺寸<sup>[14]</sup>，达到掺气保护作用需要的掺气浓度比较大。需要深入研究 0.2mm 以下微小气泡达到掺气保护作用需要的掺气浓度。

(2) 针式掺气流速仪改进。原型高流速时，预计底部气泡尺寸小于 0.05mm，现有的探针尺寸 0.05mm 明显偏大。需要开发出 0.02mm 和 0.01mm 尺寸的掺气探针。并研制专用的试验台，检测高流速时测量微小气泡的准确性。

(3) 原型观测。结合具体工程，研究迅速产生微小气泡的措施和保护范围。在工程的设计和施工时及时介入原型观测的设计与布置。特别是在掺气坎的保护的末端设置实体和各项观测设备。验证掺气减蚀小气泡保护原理的应用效果。

(4) 建立掺气试验水槽。流速范围 6~26m/s，使用 0.01mm、0.02mm、0.05mm 直径的探针，重点测量水槽末端掺气稳定区底部掺气浓度和气泡尺寸。以确定掺气坎的保护长。

## 6 结语

原型流速高，形成微小气泡能力强，微小气泡可以沿程挟带而不上浮逸出。与掺气保护作用关系最密切的是单位体积内的气泡数量，而不是掺气浓度。预计 0.2mm 以下的微小气泡在掺气减蚀中起主要作用。可能只要很小掺气浓度即可达到掺气减蚀保护作用。

进一步研究，需要进行 0.2mm 以下微小气泡保护作用的抗蚀试验，验证小气泡保护所需要的掺气浓度。改进针式掺气流速仪。建立流速 6~26m/s 的系列掺气试验水槽，系统研究掺气水流的运动规律。结合具体工程，应用研究取得的成果进行设计。工程实施后，组织原型观测，验证掺气减蚀小气泡保护原理的应用效果。

研究工作得到柴恭纯教授的大力推动。

## 参 考 文 献

- 1 李文欣, 等. 鲁布革水电站左岸泄洪洞水力学原型观测[C]. 昆明勘测设计研究院科研所, 泄水工程与高速水流论文集, 1994:45-48.
- 2 H. Kato, T. Meada, A. Magaino, 空蚀的机理与模拟[M]. 高速水流译文选集. 水利电力部西北勘测设计院, 1984.
- 3 常银兵, 等, 掺气保护长度研究进展[J], 水利科技与经济, 2012(10):1-5.
- 4 陈先朴, 柴恭纯, 梁斌. 泄水建筑物安全监测模拟试验报告[R]. 安徽省~水利部淮委水利科学研究院, 2005.

- 5 陈先朴,柴恭纯,等. 针式掺气流速仪[C]. 水利量测技术论文选集第四集, 2005:37-42.
- 6 陈先朴,邵东超,等. 黄河小浪底工程 3 号泄洪洞中闸室掺气水工模型试验报告[R]. 安徽省~水利部淮委水利科学研究院, 2000.
- 7 陈先朴,梁斌,等. 黄河小浪底工程 1 号泄洪洞中闸室水力学原型观测报告[R]. 安徽省~水利部淮委水利科学研究院, 2000.
- 8 邵东超,陈先朴,等. 泄洪洞掺气水水流型试验[J]. 水利水电技术, 2001(10):29-31.
- 9 陈先朴,柴恭纯,等. 掺气减蚀研究的新方向[J]. 水利水电技术, 2001(10):13-16.
- 10 陈先朴,西汝泽,等. 掺气减蚀保护作用的新概念[J]. 水利学报 2003(8):70-74.
- 11 陈先朴,邵东超,等. 掺气水流特性水槽试验研究[R]. 安徽省~水利部淮委水利科学研究院, 2005.
- 12 王有欢,张元良,夏煜. 小浪底水利枢纽工程 3 号孔板泄洪洞中闸室水工模型试验研究报告[R]. 长江科学院, 2000.
- 13 陈先朴,邵东超,等. 掺气减蚀的小气泡保护作用[C]. 第十三届海峡两岸水利科技交流研讨会, 2009.
- 14 董志勇,等. 减免空蚀掺气浓度的试验研究[J]. 水力发电学报, 2006(3):106-109.

## **The protect effect of micro bubbles in entrain air to reduce cavitation damage and its research prospects**

CHEN Xian-pu, SHAO Dong-chao

Anhui & Huaihe River Water Resources Research Institute, Hefei, 230000, China.

**Abstract:** Air concentration, velocity field, size and probability distribution of bubble are studied by using needle-type air concentration probes both at model and prototype in recent year. It is found that the micro bubbles play important role in entrain air to reduce cavitation damage. In prototype, the velocity, Weber number, and the capability of producing micro bubble is higher than model. The micro bubbles can be holding along flow, and don't float out of water surface. In entrain air to reduce cavitation damage, the protect effect mainly depend on bubble quantity in unit cubage, but not the air concentration. Air bubbles in aerated flow with diameter below then 0.2mm plays important role in reduce cavitation damage. May be very little air concentration can protect construction free from cavitation erosion. This paper is a preliminary study on micro bubbles protect effect in entrain air to reduce cavitation damage. It is need doing a great deal study in laboratory and prototype in future.

**Key words:** high velocity hydraulics, air concentration, entrain air to reduce cavitation damage, velocimeter by using air concentration probe of needle-type, air bubble size, Weber number of bubble.