

双侧吸气射流增氧机内吸气作用的分析

周建来¹, 邱白晶², 郑铭³

(1. 淮海工学院机械工程学院, 连云港 222005; 2. 江苏大学农业工程研究院, 镇江 212013;
3. 江苏大学环境工程学院, 镇江 212013)

摘要: 为提高射流增氧机的吸气效率, 在其射流器喷嘴内增设吸气管以增加一次吸气。利用流体分析软件, 结合试验现象, 对内吸气部位的流场进行了 CFD 三维仿真及分析, 从压力分布、流体流速与流动方向两方面, 计算分析喷嘴及内吸气管内部的液、气两相流体运动规律, 以判断喷嘴内能够形成吸气的条件及吸气状况。结果证明当位置系数在一定范围内变化时, 内吸气管确实发挥了吸气作用, 当内吸气管轴向位置系数 $R=0$, 射流器喷嘴内吸气作用达到最佳效果, 而当 $R=1$ 时, 射流器喷嘴内吸气作用最差。此外, 对不能形成吸气的情况进行了对比研究。

关键词: 养殖机械, 流场, 增氧机, 射流器, 内吸气, 仿真

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2009.07.013

中图分类号: S969.32⁺1

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2009)-7-0072-07

周建来, 邱白晶, 郑铭. 双侧吸气射流增氧机内吸气作用的分析[J]. 农业工程学报, 2009, 25(7): 72-78.

Zhou Jianlai, Qiu Baijing, Zheng Ming. Analysis on inner aspiration of dual laterolog aspirating aerator[J]. Transactions of the CSAE, 2009,25(7): 72-78.(in Chinese with English abstract)

0 引言

射流器是射流增氧机的关键部件, 双侧吸气射流器是在普通射流增氧机射流器喷嘴处沿喷嘴轴向设置一个内吸气管(图 1), 目的是增加喷射水流与吸入空气的曝气次数, 提高动力效率^[1]。喷嘴喷出的水流呈圆环状, 与普通射流器喷射出的实心圆柱水流相比较^[2], 能够增加气液两相的接触表面积, 增加工作水带气量, 从而提高增氧效率。Jian-hua WU 等^[3]研究了射流器出射角对出射效果的影响, J. Morchain 等^[4]建立了射流器两相流数值模型, N.A. Deshmukh 等^[5]对射流器传质机理进行了理论研究, 庞云芝等^[6]对冰下深水增氧机的结构设计及性能进行了试验研究, 文献[7]总结了喷射气液传递的研究概况。周建来等^[8]对两侧吸气射流器进行了试验研究, 证实双侧吸气射流增氧机动力效率确实高于普通射流增氧机, 并研究了结构参数对动力效率的影响。但对于内吸气作用发生的机理、条件等尚缺乏详尽的理论研究。本文着重对双侧吸气射流器喷嘴内压力、两相流流速、组分等进行了数值计算, 以揭示内吸气作用的发生条件、状况。

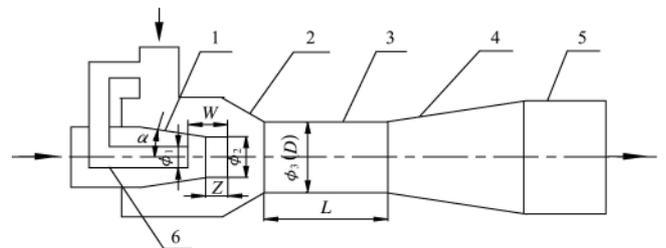
1 试验简述

因为仿真分析中涉及到试验装置的结构和一些试验结论, 此处有必要对它们作必要的介绍。

1.1 射流器结构参数

试验装置所用射流器结构如图 1 所示^[9], 由喷嘴、吸气室、混合管(喉管)和扩散管等组成, 其特点是在射

流器喷嘴处水平放置一内吸气管, 在喷嘴两侧实现双吸气; 由于吸气管的作用, 喷出的水流呈环形射流束(属于同轴射流), 又实现内外吸气, 使工作介质对空气的引射有更好的水力条件和引射效率。内吸气管和喷嘴截面的相对大小及轴向相对位置的不同, 对射流器的引射效率有重大影响。主要研究了影响内吸气作用的 4 个结构参数^[1-2,10]对动力效率的影响, 即:



1.喷嘴 2.吸气室 3.喉管 4.扩散管 5.尾管 6.内吸气管

图 1 双侧吸气式射流器结构示意图

Fig.1 Structural sketch of dual laterolog aspirating aerator

1) 喉管与环形水流面积比 m (简称面积比)

$$m = \frac{\phi_3^2}{\phi_2 - (\phi_1 + 2d)^2} \quad (1)$$

式中: ϕ_1 ——内吸气管直径; ϕ_2 ——喷嘴直径; ϕ_3 ——喉管直径; d ——内吸气管壁厚。

2) 内吸气管口与喷嘴出口相对轴向位置系数 R (简称位置系数)

为反映内吸气管口沿喷嘴轴向的相对位置, 规定:

$$R = W/Z \quad (2)$$

式中: W ——内吸气管口右端面至喷嘴外出口端面距离, mm; Z ——喷嘴出口段轴向长度, mm。

3) 喉管长径比 L/D

收稿日期: 2009-03-10 修订日期: 2009-05-07

基金项目: 淮海工学院自然科学基金项目(Z2007003)

作者简介: 周建来, 副教授, 主要从事养殖机械和农业机械的研究。连云港市 淮海工学院机械工程学院, 222005。Email: al77654444@126.com

4) 喷嘴收缩角 α (本试验采用半角)
增氧效果选取动力效率 E 为研究参数。

1.2 试验结果

1) 本试验装置最佳结构参数是：位置系数 $R=0$ ；面积比 $m=4$ ；喷嘴收缩半角 $\alpha=30^\circ$ ；喉管长径比 $L/D=10$ 。在此组合下，实测的对应增氧动力效率 $E=3.35 \text{ kg/kW} \cdot \text{h}$ 。

2) 影响增氧动力效率 E 各因素的主次顺序是：位置系数 $R \rightarrow$ 面积比 $m \rightarrow$ 喷嘴收缩角 $\alpha \rightarrow$ 喉管长径比 L/D 。

上述试验中通过增设内吸气管、合理搭配射流器主要结构参数，提高了增氧动力效率。但内吸气管对喷嘴内的吸气作用发挥什么样的影响，如何改变射流器内流体运动参数，对气液交换有着多程度的影响，这些问题需要进一步的理论解释和分析。本文利用计算流体分析软件 FLUENT，对内吸气部位的流场进行了 CFD 仿真及分析。

2 内吸气的形成分析

从压力分布、流体流速与流动方向两方面，分析喷嘴及内吸气管内部的液、气两相流体运动规律状况，以此判断喷嘴内是否达到了吸气条件而使交换增氧具备了可能性，并从组分分布判断吸气数量有可能达到多高水平。

2.1 网格划分和条件设置

首先对用于试验研究的射流器结构进行适当简化，数值模拟的模型只保留了射流器结构左端需要重点考察的部分，与此有关的边界条件由试验测取或计算给定。由于内吸气及其相关部分不具有轴对称结构，利用二维计算的结果不可靠，故在 GAMBIT 中按试验装置尺寸建立了三维几何模型。几何模型和网格划分的情况如图 2 所示。选择三维两相流、 $k-\epsilon$ 定常流紊流模型，单精度、

非耦合、采用 Segregated 算法隐式求解^[11]。

设置 3 个边界条件：设置底部水流进口 (WATERIN) 为压力入口，设置气流外部入口 (GASIN) 为压力入口，混合流出口为压力出口，其余边界由系统默认设置为壁面。需要说明的是，图 2 是简化后的内吸气模型，其喷嘴外还有吸气室，该部位边界条件由吸气室内条件给定。

从水流进口 (WATERIN) 开始为流场计算进行初始化。设置求解精度为 0.001，为减少迭代次数， k 、 ϵ 、 V_f 三参数精度设为 0.002。

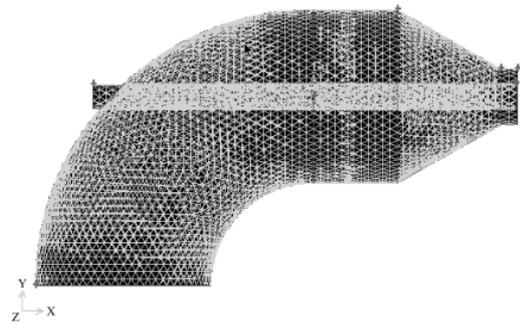


图 2 内吸气模型的网格结构图
Fig.2 Mesh structure diagram of the inner aspirating model

2.2. 发生内吸气的数值计算与分析

坐标系参见图 3，坐标单位为 mm，原点位于喷嘴圆锥与左端连接圆柱交界面中心处，按位置系数 $R=0$ 进行仿真计算，开始求解计算后迭代 81 次，获得收敛结果。

以下选取两个典型截面，对其计算完成后流场的参数分布进行分析：纵向剖面 $Z=0$ 及混合流体出口处 $X=73.23 \text{ mm}$ (喷嘴圆柱右端面)。

流场内压力分布情况见图 3。

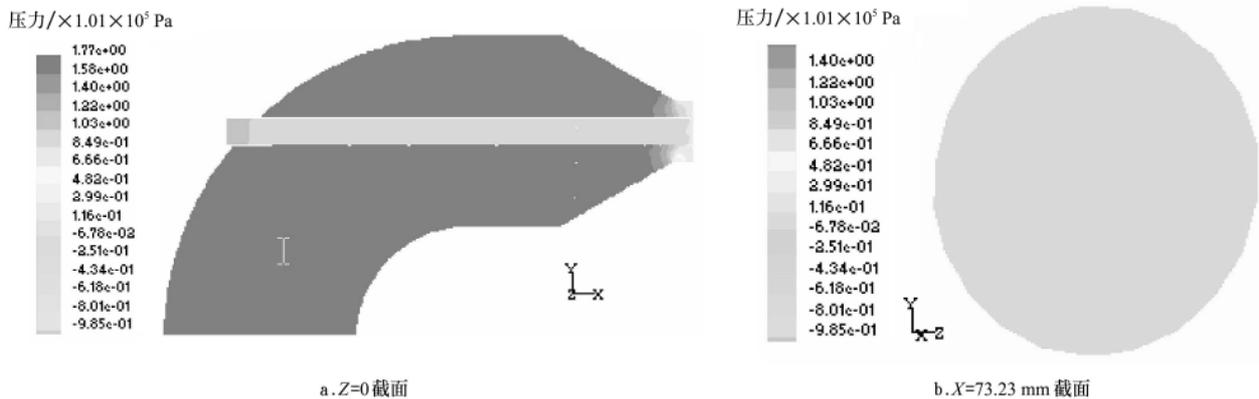


图 3 不同截面上总压力分布图
Fig.3 Distribution of total pressure on different sections

图 3 中，从 $Z=0$ 截面的总压分布图可以知道，喷嘴处压力明显低于大气压，形成了较大的真空度，为气管内空气的进入形成了条件。气管外部是大气压，与喷嘴出口处形成了大约 20% 的压力差。对于空气流动，这个差值理论上可以形成接近 200 m/s 的流速。

$X=73.23 \text{ mm}$ 截面处的总压分布图说明出口处压力分布均匀，它们低于大气压。这是由于工作水流速大幅提高，导致局部压力下降而形成的。

这种压力分布为气体进入内吸气管提供了动力。流场内流速分布情况见图 4。

从图 4 可以看出：气、水在流场内确实都发生了流动，而且流动速度值与试验采用条件吻合程度很高（如水的流速，试验条件下测取该处的值为 13 m/s）。

图 4a $Z=0$ 截面两相流速度分布图反映了此截面流场内流速总体分布情况。与图 4b 结合分析，可以知道：喷嘴出口处水的流速大约为 10 m/s(这个出口速度再经后续

减速, 比较适合养殖场合使用), 与理论计算值 (13 m/s) 吻合。气管内气体流速较大, 出口处达 80 m/s。根据流体力学知识可以知道: 高速气流与相对低速水流之间将产生强烈剪切作用, 促使两相混合。气流速度远低于理论计算值, 除了气管表面粗糙度等影响, 还应该是受阻于出口外的低速扩散水流。

图 4c、d 是 $X=73.23\text{ mm}$ 截面 (出口) 速度分布情况。中心气管内为高速水流, 外部环绕它的是相对低速的水流。可以看出, 两者之间有一定的速度梯度, 水、气之间在出口处开始互相扩散混合。

流场内两相分布计算情况如图 5 (这里体积分率指按体积计算各组成相占据的比例)。

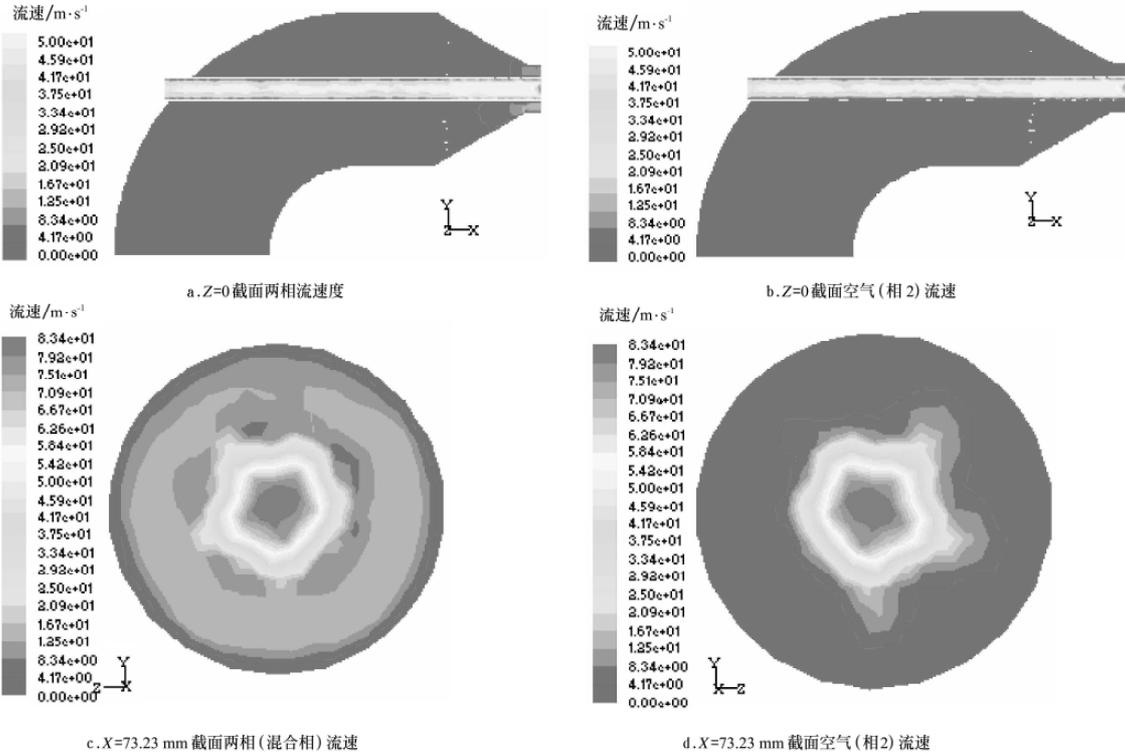


图 4 流场内流速分布图
Fig.4 Distribution of velocity on section

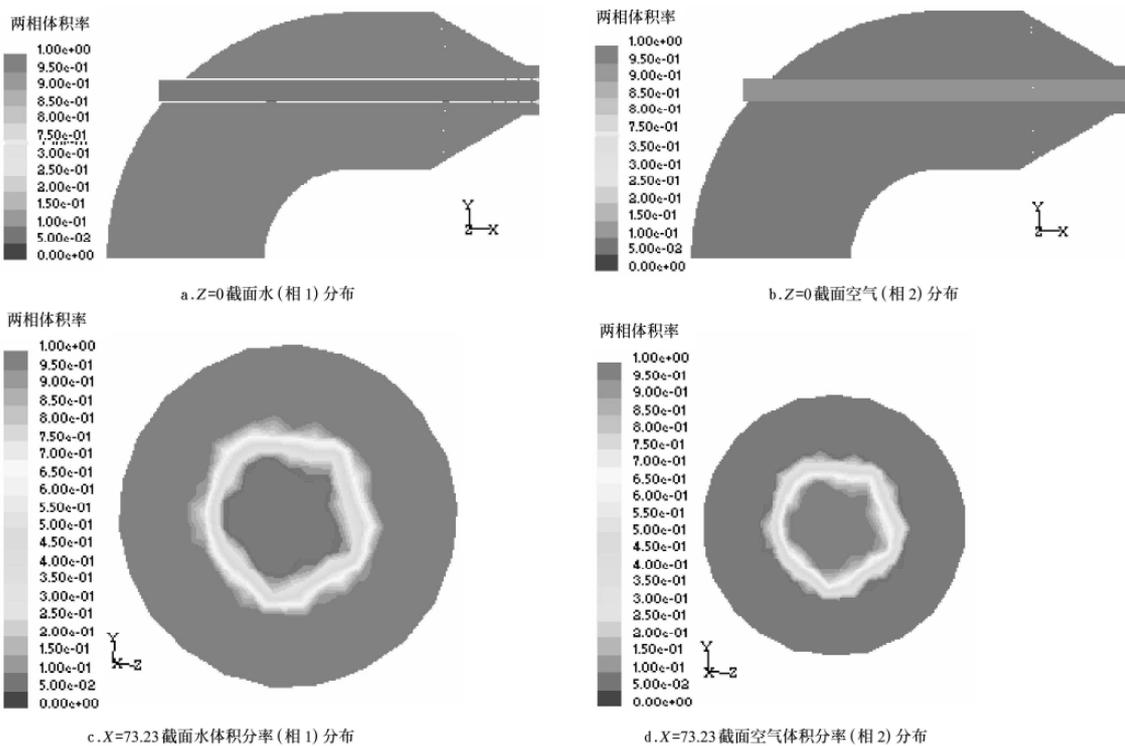


图 5 两相体积分率分布图
Fig.5 Distribution of volume fraction of two phase on section

图 5 反映了流场内两相流体的分布情况：在内吸气管出口以左部分，水走水路，气走气管，此时水与气体各自单相流动；而在内吸气管出口附近及以右部分，则出现气水相混，水中有气。

从图 5 可以得出结论：气管（喷嘴）出口处确实存在在两相的混合，而其他部位的两相分布则各自独立。流场内各部位计算残差见图 6。

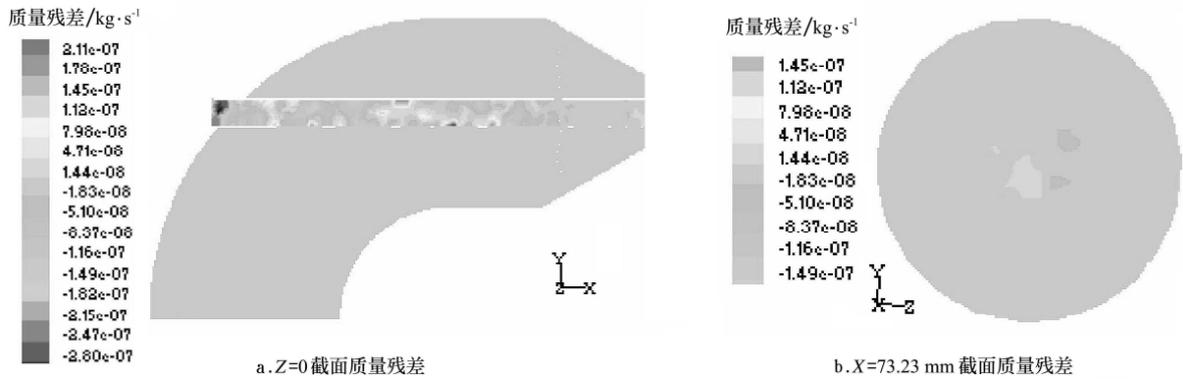


图 6 截面质量残差质量
Fig.6 Mass residue on section

图 6 反映计算中以质量指标，截止停止计算时的误差情况。实际上是对计算是否符合连续性方程等基本理论的检验。质量残差在 10^{-7} 以内，对于农业工程应用来讲，这个精度应该是足够了。

按照同样道理，选取不同值的位置系数进行了计算。结果表明，当 $0 \leq R < 0.95$ ，以上的计算结果相似，只是数值有所差别，随 R 增大，喷嘴处总压上升，内吸管内气流速度降低，内吸管内右端口处气体体积分率减少。这一方面解释了内吸气的形成原理，另一方面也验证了随内吸管内位置左移，内吸气作用将逐步减弱。

2.3 不发生吸气的数值计算与分析

由试验知，内吸管的轴向位置对增氧效果影响最大，因此本文通过改变位置系数，对内吸气的形成进行对比分析。

对 $0.95 \leq R \leq 1$ 情况进行计算，发现当 $R \geq 0.95$ 后，喷嘴处总压接近大气压，内吸气管内的气体流速很小，甚至在内吸气管出现了水流。以下以位置系数 $R=1$ 为例，列出各压力、流速、组分的计算结果（坐标系原点不变，气管出口位于喷嘴内口处，与锥体小径处于同一平面，

坐标 $X=67.24 \text{ mm}$ ）。

以图 7a $Z=0$ 截面总压分布图与 $R=0$ 情况对比：工作水总压略低（人为调整），而喷嘴处总压反而高于 $R=0$ 时对应值，真空度有所下降，最低压力出现在气管出口内接近出口处。这是因为气管轴向位置后退，喷嘴内过流面积有所提高引起。

图 7b $X=67.24 \text{ mm}$ 截面总压分布不均匀，与锥面变化为圆柱面及气管突然消失有关。不影响分析结果。

$R=1$ 时流场内流速分布情况见图 8。

图 8a、b、c 计算表明：喷嘴内压力下降，气管内进气；气体只前进到气管的某个部位，不再前进；工作水倒流进入内吸管内，流出到某个平衡部位停滞；如果喷嘴内总压有波动，将可能产生漏水。

这种现象使内吸气管失去应有的作用，不但不能吸气，反而漏水，消耗能量。

图 8d $X=67.24 \text{ mm}$ 两相流速分布图证明内吸管内出口处无气体通过。

$R=1$ 时流场内两相分布情况如图 9。

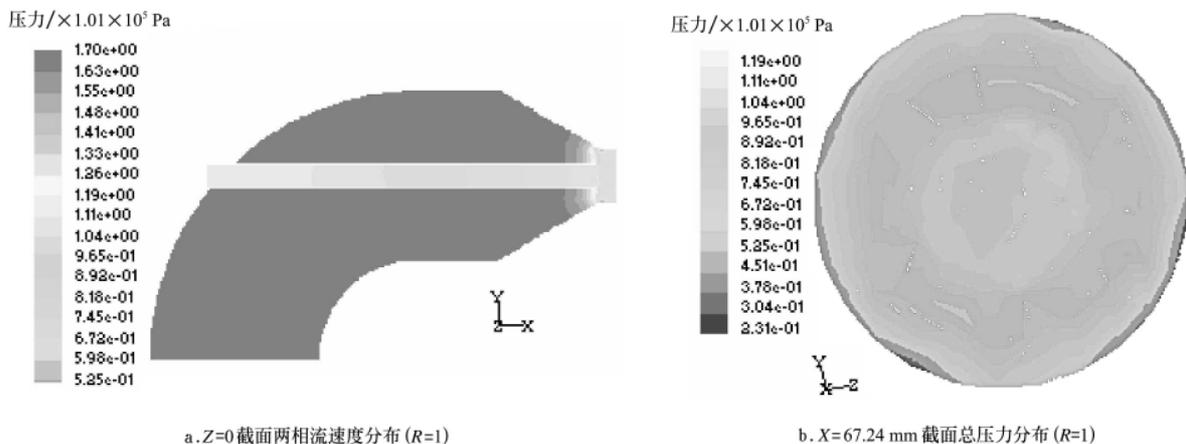


图 7 $R=1$ 时截面上总压力分布图
Fig.7 Distribution of total pressure on section at $R=1$

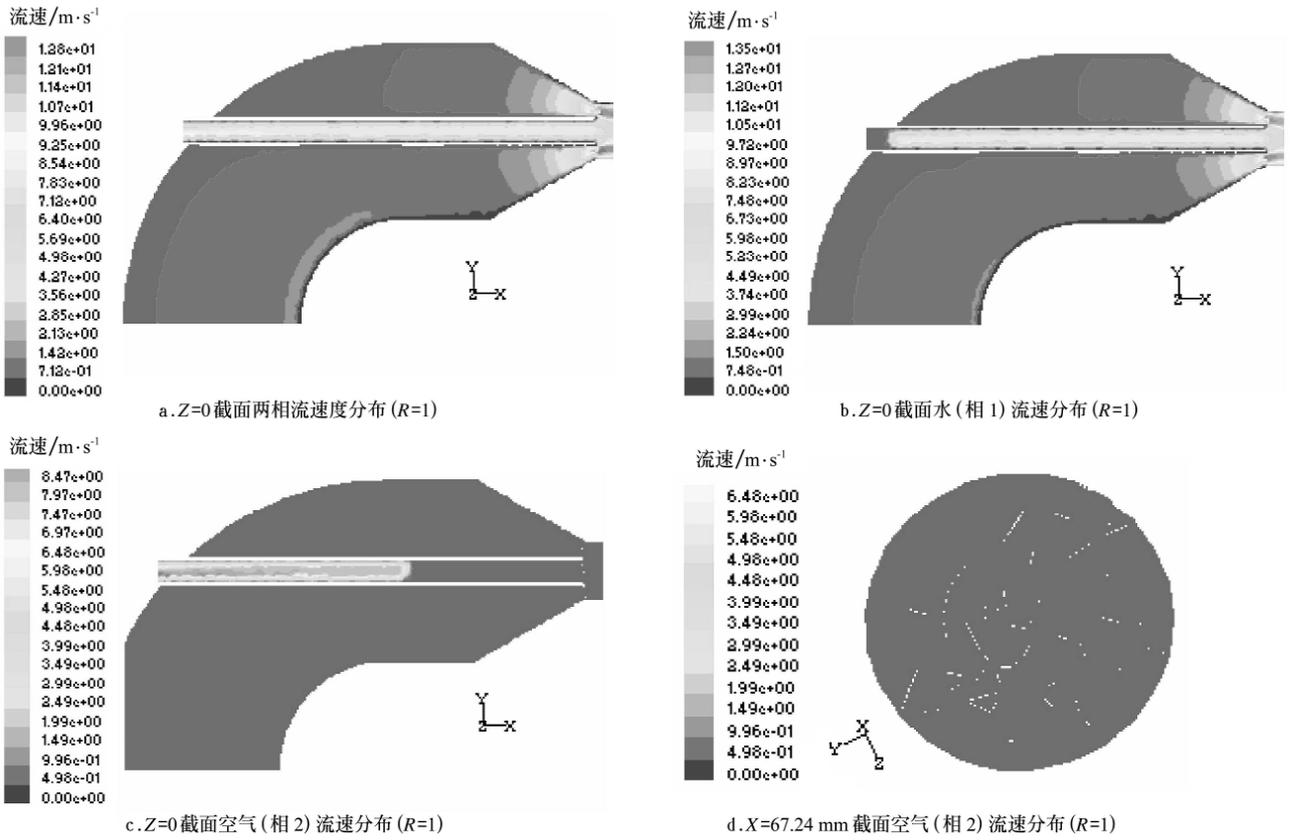


图 8 $R=1$ 时不同截面流速分布
Fig.8 Distribution of velocity on section at $R=1$

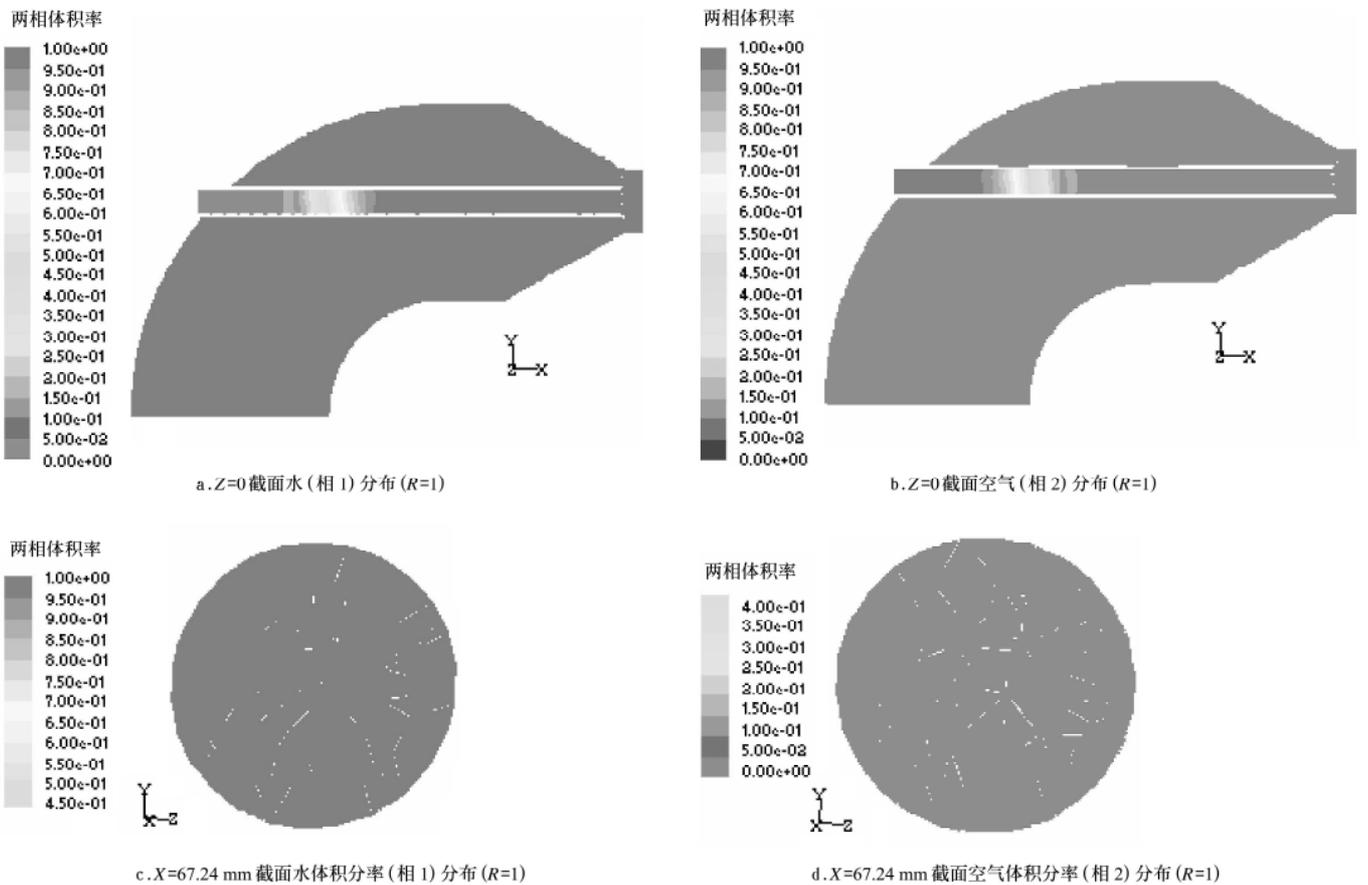


图 9 $R=1$ 时流场内两相体积率分布
Fig.9 Distribution of volume fraction of two phase on section at $R=1$

图9表明: 发 $R=1$ 时流场内水是水, 气是气, 两者除了在气管内有接触界面, 其他没有互相作用的机会, 没有大量气体从喷嘴流出。为了证明这一点, 图10提供了喷嘴出口处水、气体积分率图, 气体含量为零, $X=67.24\text{ mm}$ 处微量进入的气体, (推测) 由于喷嘴内压力高于该处, 这部分气体没能出去。

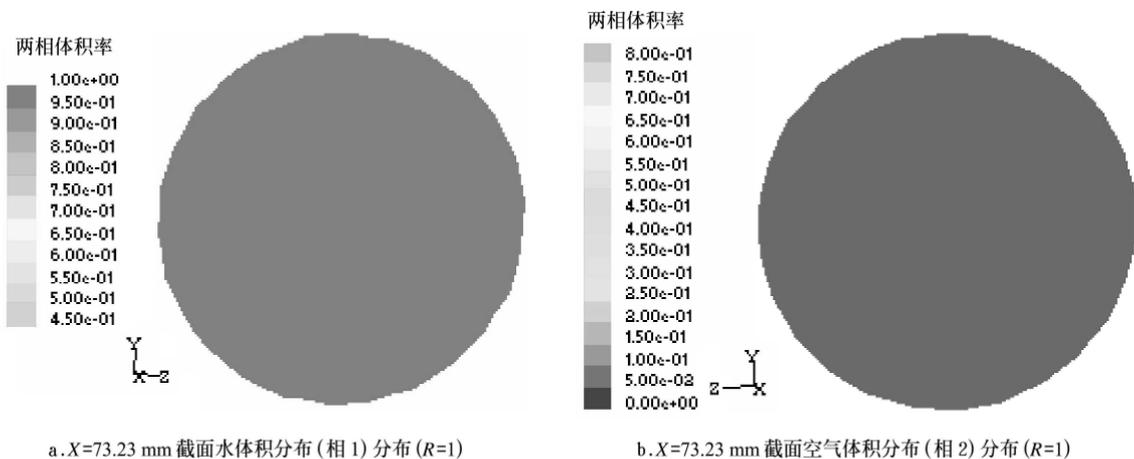


图10 $R=1$ 时截面 $X=73.23\text{ mm}$ 两相体积分率分布

Fig.10 Distribution of volume fraction of two phase on section $X=73.23\text{ mm}$ at $R=1$

位置系数 $R=1$ 时流场内各部位的计算残差 (图略) 计算精度高于 $R=0$ 时对应计算情况, 不可能因为计算误差造成上述结果。两轮数值计算的结果是可靠的。且当位置系数 $R=1$ 时得到的计算结果与试探性试验中观察到的现象 (气管倒出水, 吸气效率与不采用内吸气管相差无几) 一致。

以上从压力、流速、组分分布等方面计算知, 随着位置系数从零逐步加大, 内吸气作用逐步趋弱, 当 $R \geq 0.95$ 时, 内吸气管右端压力接近左端环境压力, 使内吸气作用不能发生。

4 结论

1) 由于喷嘴内部存在负压区, 通过内吸气管抽吸外界气体进入喷嘴, 该部分气体在喷嘴内已经与工作水发生传质, 喷嘴出口处含有一定比例的气体。

2) 当位置系数在一定范围内变化时, 内吸气管确实发挥了吸气作用, 通过对比, 发现内吸气作用的强弱与内吸气管的轴向位置密切相关。

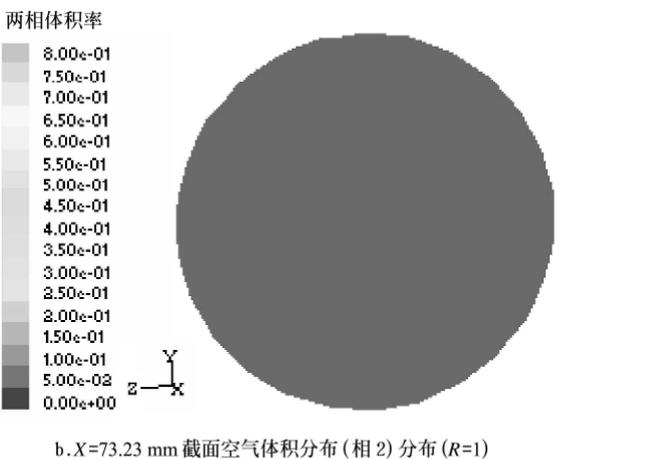
3) 喷嘴、内吸气管处的压力、流体流速、组分分布随内吸气管的轴向位置系数而改变, R 越小, 内吸气作用效果越好, 当内吸气管轴向位置系数 $R=0$, 射流器喷嘴内吸气作用达到最佳效果。反之, 当 R 接近 1 时, 内吸气作用效果很差, 工作水容易发生倒流。

[参考文献]

[1] 陆宏圻, 李长城. 环形液气射流泵的理论及试验研究[J]. 武汉水利电力学院学报, 1990, 23(1): 1-7.
Lu Hongqi, Lin Changcheng. Study on theory and experiment of the liquid-gas jet pump with ring-shape nozzle[J]. Journal

of Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering, 1990, 23(1): 1-7. (in Chinese with English abstract)

可以得出结论: 位置系数 $R=1$ 时, 喷嘴内左端存在一小段负压区, 能够吸进一定数量气体, 但与 $R=0$ 时有根本的差别: 喷嘴内总压力高于气管出口内部压力, 造成工作水顺着内气管向外倒流, 内吸气管不能连续有效地向喷嘴内提供气体, 失去进气作用; 反之, 由于右端压力过高, 工作水进入气管后产生泄露。



[2] 吴世海. 射流自吸式增氧机[J]. 农业机械学报, 2007, 38(4): 88-92.
Wu Shihai. Study on aspirating aerator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(4): 88-92. (in Chinese with English abstract)

[3] Jian-hua Wu, Shi-ping Ruan. Emergence angle of flow over an aerator[J]. Journal of Hydrodynamics, Ser. B, 2007, 19(5): 601-606.

[4] Morchain J, Maranges C, Fonade C. CFD modelling of a two-phase jet aerator under influence of a crossflow[J]. Water Research, 2000, 34(13): 3460-3472.

[5] Deshmukh N A, Joshi J B. Surface aerators: power number, mass transfer coefficient, gas hold up profiles and flow patterns[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2006, 84(11): 977-992

[6] 庞云芝, 李秀金. 水-气引射式冰下深水增氧机的设计与性能试验研究[J]. 农业工程学报, 2003, 19(5): 112-115.
Pang Yunzhi, Li Xiujin. Design of water-air spurting aerator used under ice and in deep water and experimental study on its performance[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2003, 19(5): 112-115. (in Chinese with English abstract)

[7] 向清江. 喷射形式气体吸收装置研究概述[J]. 流体机械, 2005, 33(7): 41-45.
Xiang Qingjiang. Summary of gas absorption device by jet[J]. Fluid Machinery, 2005, 33(7): 41-45. (in Chinese with English abstract)

[8] 周建来, 邱白晶, 郑铭. 双侧吸气射流增氧机的增氧性能试验[J]. 农业机械学报, 2008, 39(8): 70-73.

- Zhou Jianlai, Qiu Baijing, Zheng Ming. Experiment on dual laterolog aspirating aerator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(8): 70–73. (in Chinese with English abstract)
- [9] 陆宏圻. 射流泵技术的理论及应用[M]. 北京: 水利电力出版社, 1989.
- [10] 郭烈锦. 两相与多相流动力学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002.
- [11] 韩占中, 等. FLUENT流体工程仿真计算示例与应用[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2004.

Analysis on inner aspiration of dual laterolog aspirating aerator

Zhou Jianlai¹, Qiu Baijing², Zheng Ming³

(1. Department of mechanical Engineering, Huaihai Institute of Technology, Lianyungang 222005, China;

2. Academy of Agricultural Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China;

3. College of Environmental Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: In order to improve aspiration-efficiency of the jet aerator, an air-in pipe called inner pipe was set up to add one more aspiration in the aerator muzzle. Based on the CFD software FLUENT as well as experiments, the aerator internal fluidic field was computed and aspirating was analyzed. Conditions and status on inner aspirating were investigated in terms of pressure distribution, flowing velocity and volume fraction of air and water. Conclusions were drawn as follows: When the inner pipe was moved along the aerator axis among a certain range, it had an apparent impact on aspiration efficiency. If the axial location coefficient R equalled 0, the dual laterolog aspirating aerator reached its highest aspiration efficiency. Contrarily, while $R=1$, the aerator had its lowest aspiration efficiency. Furthermore, contrastive studies were carried out under conditions of no aspiration.

Key words: aquaculture machinery, flow fields, dissolved oxygen machine, jet aerator, inner aspiration, numerical simulation