

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.08.003

# 环空淹没射流吸气性能与能量耗散特征研究

王超 朱金波 胡标

(安徽理工大学材料科学与工程学院, 淮南 232001)

**摘要:** 淹没条件下喷嘴出口存在外界静压, 引射管的截面和入流压力对环空射流过程中的吸气性能和能量耗散都有显著的影响。为能更好地对淹没条件下环空射流喷嘴进行调控, 采用数值模拟与试验验证的方法分析了不同截面比和入流压力对喷头吸气量和气液比的影响, 并从流场、能量耗散以及涡流强度 3 方面对这些影响进行了研究。结果表明: 低截面比下, 随着入流压力的提高, 吸气量和气液比都随之提高; 高截面比下, 随着入流压力的提高, 吸气量提高而气液比则先增加后降低, 这种工况下气液比存在最大值。随着截面比的提高, 吸气量增加而气液比则降低; 不同入流压力下低截面比对气液比存在高可控性; 不同截面比下高引射流入流压力对气液比存在高可控性。相同的湍动能增量下, 不同截面比的湍流耗散率的增量远大于不同入流压力的湍流耗散率增量, 能量耗散更大。这些特性与不同入流压力时引射流与槽内水压差以及不同截面时引射流对喷嘴的封闭作用有关。

**关键词:** 淹没条件; 环空射流; 吸气性能; 能量耗散

中图分类号: O358; TP6 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2016)08-0014-08

## Suction Performance and Energy Dissipation Characteristics of Annular Submerged Jets

Wang Chao Zhu Jinbo Hu Biao

(College of Materials Science and Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

**Abstract:** Under submerged condition, due to the external static pressure at nozzle exit, the cross section and inflow pressure of ejector pipe have significant impact on the suction performance and energy dissipation of annular jet device. In order to better adjust the annular jet nozzle, the methods of numerical simulation and experimental validation were adopted to analyze the impact of different cross section ratios and different inflow pressures on nozzle's inspiration capacity and gas liquid ratio. From flow field, the energy dissipation and the intensity of vortex were explained for these effects. Results showed that both inspiration capacity and gas liquid ratio were increased in low cross section ratio, but in high cross section ratio inspiration capacity was decreased while gas liquid ratio was increased firstly and then decreased with the increase of inflow pressure, thus the ratio got the maximum value in this case. With the increase of cross section ratio, the inspiration capacity was increased while the gas liquid ratio was decreased. Different inflow pressures had good controllability for the gas liquid ratio with low cross section ratio, meanwhile, different cross section ratios had remarkable controllability for the gas liquid ratio at high inflow pressure. Under the same kinetic energy increment, the turbulent dissipation rate increment at different cross sections was considerably larger than the increment at different inflow pressures, thus the value of energy dissipation at different cross sections was large. All these features had relation to pressure difference between ejection fluid and water in the tank at different inflow pressures and sealing process of ejection fluid for nozzle at different sections.

**Key words:** submerged condition; annular jets; suction performance; energy dissipation

收稿日期: 2016-05-23 修回日期: 2016-06-25

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51374015)和国家自然科学基金青年基金项目(51501002)

作者简介: 王超(1987—), 男, 博士生, 主要从事矿物加工流体机械研究, E-mail: oppooppo5@163.com

通信作者: 朱金波(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事矿物加工流体机械研究, E-mail: jinbo\_zhu@126.com

## 引言

淹没环空射流喷头的吸气性能、能量耗散以及射流打击力将直接影响喷头应用效果。对引射流的研究主要集中于引射机构的流场分析和结构参数的优化选择上。龙新平等<sup>[1]</sup>、曾庆龙等<sup>[2]</sup>采用数值模拟与试验结合的方法对射流泵在不同结构和工况参数下的效率进行了评价和优化。廖达雄等<sup>[3]</sup>结合引射器系统的特点,评估了较高增压比和引射马赫数下两种喷嘴在引射器系统中的应用。刘俊萍等<sup>[4]</sup>采用正交试验探讨了全射流喷头各结构和工况因素对射程的影响规律以及影响的主次顺序。对于淹没射流的研究大多集中于流场和水力特性的研究。袁寿其等<sup>[5]</sup>通过 CFD 数值模拟研究了全射流喷头内部流场流量、压力关系以及速度场分布特性。黄秋君等<sup>[6]</sup>通过理论分析与模型试验对多股多层水平淹没射流消能的水力特性以及高程选择对流场波动的影响进行了分析。王凌等<sup>[7]</sup>采用五孔探针对旋流器的自由淹没气体旋转射流速度场进行了试验研究。丁江明等<sup>[8]</sup>通过 CFD 数值模拟对典型混流式喷水推进器的流场进行了数值模拟。刘超等<sup>[9]</sup>利用 PIV 测速技术分析了斜向淹没射流流场的水力特性,研究了射流入水垫塘的消能机理。目前,对环空淹没射流的研究相对较少。

由于喷头内流场特性的不可视导致测量困难,本文结合数值模拟和试验验证对淹没射流条件下环空喷头的吸气性能及能量耗散特征进行分析。

## 1 试验装置和数值模型

### 1.1 试验装置

试验装置如图 1 所示,试验过程中液泵的出口流量保持不变,通过流量调节阀调节环空射流装置的入流压力,试验采用清水介质为试验液。该环空射流装置的设计喷洒流量范围为 300 ~ 700 L/h,设计引射管入流压力范围为 0.08 ~ 0.14 MPa。试验采用的环空射流喷嘴如图 2 所示,其结构包括引射管、喷嘴、吸药口、混药室、混药管和扩散管

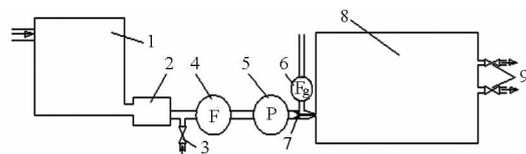


图 1 环空射流试验装置图

Fig. 1 Experiment apparatus scheme of annulus jet

1. 水箱 2. 泵 3. 分流阀 4. 流量计 5. 压力表 6. 空气转子流量计 7. 环空射流喷嘴 8. 观测槽 9. 液面控制阀

等。

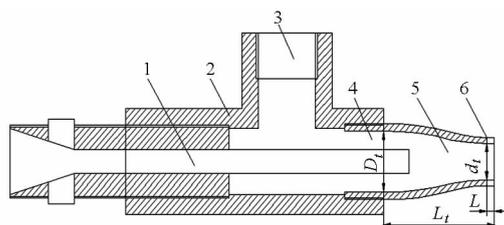


图 2 环空射流喷嘴结构图

Fig. 2 Structure diagram of annulus jet nozzle

1. 引射管 2. 三通管 3. 吸气口 4. 吸气区 5. 混合区 6. 喷嘴

### 1.2 结构参数变量

结构参数中固定参数的选取:研究对象主要集中于吸气区和混合区,引射管采用直管且与三通管分离。根据已有研究<sup>[10]</sup>表明:余弦曲面喷嘴的总能量损失系数最小,其值为 0.06 ~ 0.10,因此本试验采用余弦曲面喷嘴。喷嘴出口直管段长度  $L$  为 3 mm,喷嘴余弦段长度  $L_i$  为 40 mm,入口直径  $D_i$  为 20 mm,出口直径  $d_i$  为 12 mm,根据文献<sup>[10]</sup>的定义,余弦喷嘴锥角  $\beta = 2\arctan\left(\frac{1}{2}\frac{D_i}{L_i}\right) = 28^\circ$ ,射流喷嘴出口直径为可变参数。本文以截面比  $m$  为可变结构参数,截面比  $m$  定义为混合管截面积与射流喷嘴出口截面积之比,即

$$m = \frac{A_i}{A_{nz}} = \left(\frac{d_i}{d_{nz}}\right)^2$$

式中  $A_i, A_{nz}$ ——引射管截面积、喷嘴出口截面积,  $\text{mm}^2$

$d_i, d_{nz}$ ——引射管直径、喷嘴出口直径, mm

### 1.3 吸气特性表征

环空射流装置的吸气特性可用入流压力和截面比与气液比  $q$  和吸气量  $Q_g$  的关系曲线来评价,气液比  $q$  定义为气体的体积流量与水的体积流量之比,即

$$q = \frac{Q_g}{Q_l}$$

式中  $Q_g, Q_l$ ——气体、水体积流量,  $\text{m}^3/\text{h}$

## 2 数值模型方案

### 2.1 数值模型

建立环空射流装置以及水槽的三维模型,为提高模型的网格质量,环空射流装置在引射管、喷嘴、混合区、槽子部分采用结构化网格,槽体与喷嘴交叉等其余部分采用非结构化的四面体网格。设置 2 处交界面,分别是空气入口和喷嘴体接触处以及喷嘴出口和水槽接触处。网格相关性分析认为,网格较稀松时,喷嘴内部计算时容易发散和震荡,因此对喷嘴体网格整体加密,共 15 万个网格,水槽网格相对

稀疏些;同时为更好地模拟射流衰减情况,将喷嘴出口和水槽接触处网格加密<sup>[11]</sup>,共18万个网格,总共33万个网格。

环空射流装置数值计算采用 Realizable  $k-\varepsilon$  湍流模型<sup>[12]</sup>;压力速度耦合项则采用 SIMPLEC 算法<sup>[13-14]</sup>;对于多相流模型,VOF 模型可用于空气和水不能互相融合的体系<sup>[15-16]</sup>,本文选用 VOF 模型模拟气液两相流动。几何模型坐标原点位于喷嘴与引射管交叉处的中心处,以引射管出流方向为  $X$  正方向,以垂直于  $X$  轴向上与吸气光平行的方向为  $Z$  轴正方向。

表1 数值计算设计方案及计算结果

Tab.1 Numerical calculation schemes and results

参数	0.08 MPa			0.10 MPa			0.12 MPa			0.14 MPa		
	4/12	6/12	8/12	4/12	6/12	8/12	4/12	6/12	8/12	4/12	6/12	8/12
$Q_g/(m^3 \cdot h^{-1})$	0.118	0.227	0.396	0.172	0.325	0.475	0.265	0.359	0.553	0.324	0.461	0.607
$Q_l/(m^3 \cdot h^{-1})$	0.498	1.174	2.143	0.557	1.313	2.402	0.613	1.445	2.635	0.667	1.560	2.850
$q$	0.237	0.193	0.185	0.308	0.247	0.198	0.432	0.249	0.210	0.487	0.296	0.213

### 3 数值模拟验证与结果分析

#### 3.1 数值模拟验证

为验证数值模型的可靠性,通过试验系统测量截面比为4/12、入流压力在0.08~0.14 MPa下以及入流压力为0.10 MPa、截面比在4/12~8/12下环空射流装置的吸气量和气液比,并与模拟试验结果进行对比,结果如图3和图4所示。

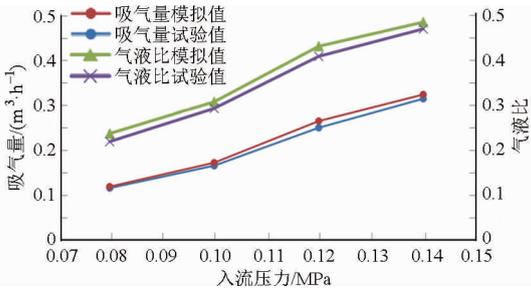


图3 不同入流压力下数值模型与试验验证

Fig.3 Comparison of numerical model and experiment results at different pressures

通过三次多项式回归分析,获得入流压力  $p$  与吸气量  $Q_g$  之间的方程表达式为

$$Q_{gCFD} = -2.577 \cdot 8p^3 + 840.04p^2 - 84.758p + 2.9612 \quad (R^2 = 1)$$

$$Q_{gEXP} = -1.145 \cdot 8p^3 + 387.5p^2 - 39.292p + 1.365 \quad (R^2 = 1)$$

入流压力  $p$  与气液比  $q$  之间的三次多项式回归方程表达式为

$$q_{CFD} = -1.531 \cdot 7p^3 + 509.09p^2 - 51.581p + 1.7706 \quad (R^2 = 1)$$

#### 2.2 数值模拟设计方案

参考射流混药装置研究过程中得到的有效混药比和吸药量范围<sup>[17]</sup>,以及喷射浮选设备研究过程中有效的气液比和吸气量范围作为选取截面比和入流压力的选取依据<sup>[18]</sup>,结合试验前期探索过程中得到相似的气液比和吸气量范围所需的截面比和入流压力,作为本文选取截面比和入流压力的范围。以一定淹没深度(150 mm)以及一定嘴管距(20 mm),计算不同压力和不同截面比下环空射流装置的吸气量  $Q_g$  与气液比  $q$  变化来考察其吸气特性,数值计算试验设计方案及结果如表1所示。

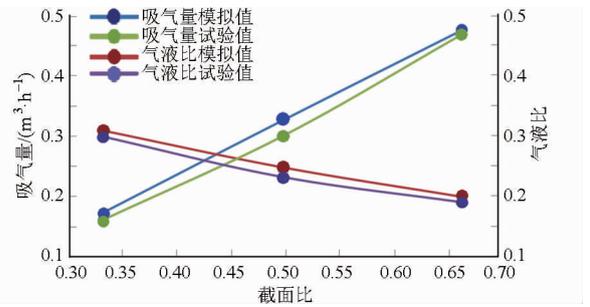


图4 不同截面比下数值模型与试验验证

Fig.4 Comparison of numerical model and experiment results under different cross section ratios

$$q_{EXP} = -2.024 \cdot 7p^3 + 660.04p^2 - 65.685p + 2.2861 \quad (R^2 = 1)$$

通过线性回归分析,获得截面比  $m$  与吸气量  $Q_g$  之间的方程表达式为

$$Q_{gCFD} = 0.909m - 0.1305 \quad (R^2 = 0.9997)$$

$$Q_{gEXP} = 0.924m - 0.1530 \quad (R^2 = 0.9969)$$

截面比  $m$  与气液比  $q$  之间的线性回归方程表达式为

$$q_{CFD} = 0.330m - 0.4160 \quad (R^2 = 0.9961)$$

$$q_{EXP} = 0.324m - 0.4028 \quad (R^2 = 0.9928)$$

下标  $CFD$  和  $EXP$  分别代表数值分析值与试验值。采用无量纲方程获得数值计算与试验的预测误差,即

$$\alpha_{Q_g} = \frac{Q_{gCFD} - Q_{gEXP}}{Q_{gEXP}} \times 100\%$$

$$\alpha_q = \frac{q_{CFD} - q_{EXP}}{q_{EXP}} \times 100\%$$

入流压力取值范围为 0.08 ~ 0.14 MPa, 对应的  $\alpha_{0g}$  值约为 4.2%,  $\alpha_q$  值约为 5.3%; 截面比为 4/12 ~ 8/12 时, 对应的  $\alpha_{0g}$  值约为 5.9%,  $\alpha_q$  值约为 5.0%, 可见, 数值模型有较高的可信度。

### 3.2 计算结果分析

图 5、图 6 为不同工况下吸气量和气液比变化对比曲线。

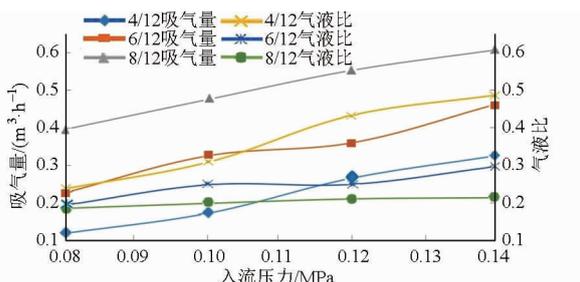


图 5 不同压力下气液比和吸气量变化曲线

Fig. 5 Changing curves of gas-liquid ratio and air inflow at different pressures

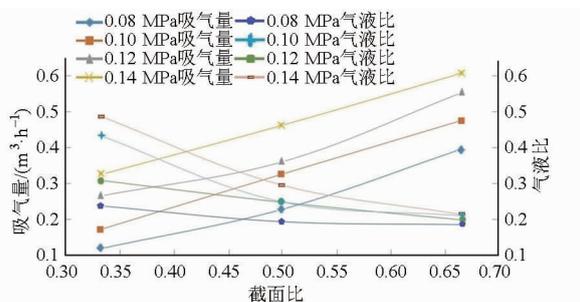


图 6 不同截面比下气液比和吸气量变化曲线

Fig. 6 Changing curves of gas-liquid ratio and air inflow under different cross section ratios

由图 5 可知, 在同一截面比条件下随着入流压力的增大, 吸气量以及气液比随之增大, 截面比为 8/12 时, 随着入流压力由 0.08 MPa 增加为 0.14 MPa, 吸气量由 0.396 m³/h 增大为 0.607 m³/h, 气液比则由 0.185 增大为 0.213, 且在低截面比条件下气液比的增幅大于高截面比, 截面比降低为 4/12 时, 气液比由 0.237 增加为 0.487, 增幅为 105.5% 远大于截面比为 8/12 时的增幅 15.1%; 由图 6 可知, 在入流压力一定时, 随着截面比的增大, 吸气量增大而气液比却随之降低。0.10 MPa 时, 截面比由 4/12 增加为 8/12, 吸气量由 0.172 m³/h 增至 0.475 m³/h, 而气液比则由 0.308 降低为 0.198, 且高入流压力条件下, 气液比的衰减梯度更大, 在射流压力为 0.14 MPa 时, 气液比由 0.487 增加为 0.213, 衰减了 56.3%, 远大于 0.10 MPa 时的衰减度 35.7%。

由上分析, 不同入流压力下低截面比对气液比存在高可控性; 不同截面比下高引射流入流压力对气液比存在高可控性。

### 3.3 内流场分析

图 7 为  $Y=0$  截面、截面比为 8/12 时, 入流压力在 0.08、0.10、0.12、0.14 MPa 条件下的速度矢量和液相体积分数分布。

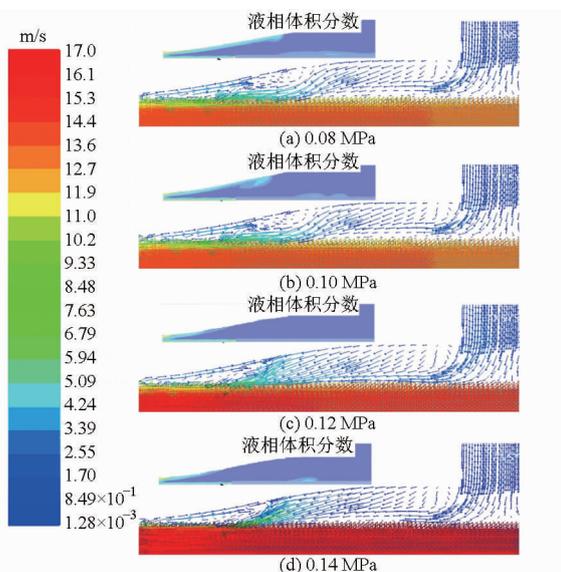


图 7 不同压力下速度矢量和液相体积分数分布

Fig. 7 Velocity vector distribution and volume fraction of liquid at different pressures

随着压力由 0.08 MPa 增加到 0.14 MPa, 核心流速由 12.808 m/s 增大为 16.960 m/s, 而气流区的气流速度最大值也由 5.764 m/s 提高为 8.480 m/s, 吸气量由 0.396 m³/h 增加为 0.607 m³/h; 由矢量图可以看出随着压力的增大, 所携带的动能增大从而与槽内水静压的压差变大, 结合液相体积分数分布可以看到喷嘴内壁附近液相分布区逐渐减少从而对槽内水流进入喷嘴形成了较好的封闭阻碍作用, 因此在气流区上方形成的速度矢量漩涡明显减小, 吸气量和气液比随之变大<sup>[19]</sup>; 由于相同截面比下水流量增量大于气流增量, 气液比增速变缓。

如图 8 所示为  $Y=0$  截面、引射管进口压力为 0.10 MPa 时, 截面比在 4/12、6/12、8/12 工况下的速度矢量和液相体积分数分布。

如图 8 所示, 在截面比为 4/12 时气流区内存在明显的双向流而在双向流中间形成了一个速度较高的气流带, 这是由于低截面比时引射流动能较低, 对喷嘴出口封闭性差, 使得槽内水流入气流区造成气流区的双向流, 从而导致吸气量较少。由液相体积分数看出, 低截面比时液相在气流区喷嘴内壁附近和引射管外壁附近分布比例较大; 随着截面增大到 8/12, 气流区的气流速度最大值由截面比为 4/12 时的 3.571 m/s 提高到 5.733 m/s, 气流区的过流断面随之增大; 由于高截面比所携带的总动能较高, 较好地封闭了槽内流入喷嘴的水, 液相在气流区喷嘴

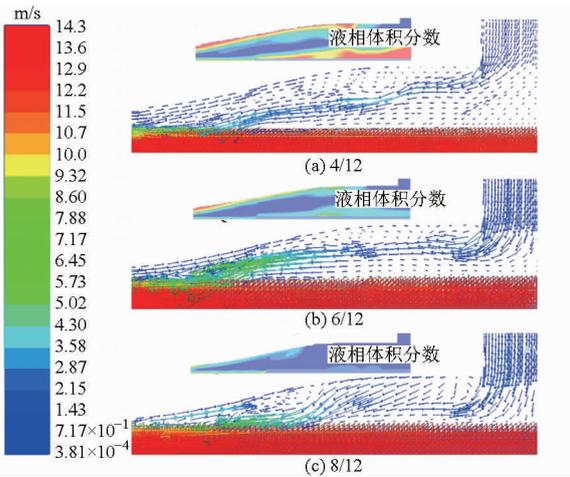


图8 不同截面比下速度矢量和液相体积分数分布  
Fig.8 Velocity vector distribution and volume fraction of liquid under different cross section ratios

内壁附近和引射管外壁附近分布比例逐渐降低,被气相所代替,因此形成的速度矢量漩涡明显减小从而形成较大的吸气量;由于相同的引射管入流压力下流量随引射管截面半径的2次方增大,因此造成气液比增长变缓。

从上述流场的吸气量和气液比变化可推断出,无论同压不同截面比还是同截面比不同压,吸气量都在增加且气液比会随之增量变缓,大截面比下甚至会出现降低。对截面比为8/12气液比进行三次多项式拟合,得

$$q = -143.9p^3 + 41.26p^2 - 3.249p + 0.254$$

$$(R^2 = 1)$$

以  $p = 0.18 \text{ MPa}$  为入流压力,可得气液比  $q$  为 0.168,小于 0.08 MPa 时的气液比 0.213,气液比出现降低。因此要得到高气液比,可选择低截面比时的高入流压力或高截面比时的低入流压力,而要得到高吸气量,则根据实际需要提高截面比或者提高入流压力。

### 3.4 能量耗散特性

引射吸气的过程伴随着剧烈的能量衰减和转化;表征湍流的微观物理量有湍动能  $k$  和湍流耗散率  $\varepsilon$  [20-21]。湍流总动能随时间的变化体现湍流动能的净收支,是衡量湍流发展或衰退的指标。湍流耗散率  $\varepsilon$  为单位质量流体在单位时间内的湍动能损耗,主要表征大涡分裂为小涡、大气泡转换为小气泡的过程中能量损耗速率。

对引射管入流压力 0.10 MPa、截面比为 4/12、6/12、8/12 时的湍动能和湍流耗散率进行分析。图 9 为不同截面比条件下  $Y=0$  平面的湍动能和湍流耗散率变化等值图。

由图 9 可知,湍动能和湍流耗散率的极大值分

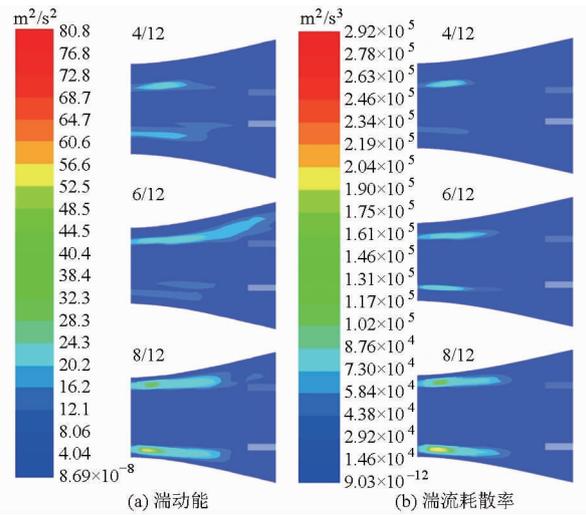


图9 不同截面比下湍动能及湍流耗散率分布  
Fig.9 Distributions of  $k$  and  $\varepsilon$  under different cross section ratios

布在喷嘴混合区附近,且随着截面比的增加,湍流发生区范围向引射管区拓展,能量耗散加剧的范围增大。喷嘴内湍动能及湍流耗散率的值也随之增加。当截面比由 4/12 增至 8/12 时,湍动能极大值从  $35.507 \text{ m}^2/\text{s}^2$  增至  $80.845 \text{ m}^2/\text{s}^2$ ,湍流耗散率极大值从  $220437.1 \text{ m}^2/\text{s}^3$  增至  $292136.2 \text{ m}^2/\text{s}^3$ ,因此无论能量耗散量还是强度都随截面比增加而增加。

图 10 为截面比 8/12、引射管入流压力为 0.08、0.10、0.12、0.14 MPa 时  $Y=0$  平面的湍动能和湍流耗散率变化等值图。

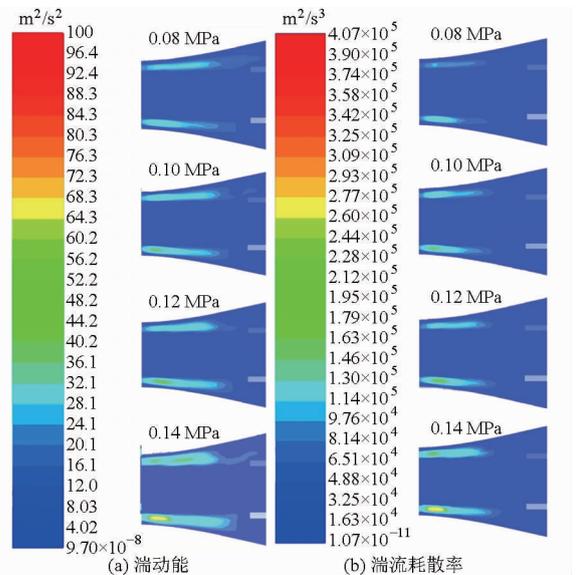


图10 不同压力下湍动能及湍流耗散率分布  
Fig.10 Distributions of  $k$  and  $\varepsilon$  at different pressures

由图 10 所示,湍动能和湍流耗散率极大值分布在喷嘴混合区,当引射管入流压力由 0.08 MPa 增至 0.14 MPa 时,湍动能极大值从  $59.085 \text{ m}^2/\text{s}^2$  增至  $100.392 \text{ m}^2/\text{s}^2$ ,湍流耗散率极大值从  $184838.1 \text{ m}^2/\text{s}^3$  增至  $406753.1 \text{ m}^2/\text{s}^3$ 。湍流发生区范围在接近引射管

出口方向并未发生明显的改变而在喷嘴出口方向扩展明显,这主要是压力的增加使引射管出口流量和流速变大从而具有的总动能变大,喷嘴内气、液与槽内的水在喷嘴出口处进行激烈的碰撞伴随着速度大小和方向的变化以及气液之间激烈的能量的交换和损耗,因此形成的平均值湍动能也较大,此时的能量损耗也达到最大。

由于同样的湍动能增量下,不同截面比的湍流耗散率值的增量远大于不同入流压力的湍流耗散率增量,能量耗散更大,因此根据实际情况需要,要得到高气液比和吸气量时,建议优先选择低截面比高入流压力的工况条件。

### 3.5 涡流强度的影响

涡流强度以及涡流分布影响引射吸气以及气液混合效果。为此可通过分析涡流强度和涡流分布了解流场发生和能量耗散发生的内部原因。图 11 为 0.10 MPa 时不同截面比(4/12、6/12、8/12)下的涡流强度分布。

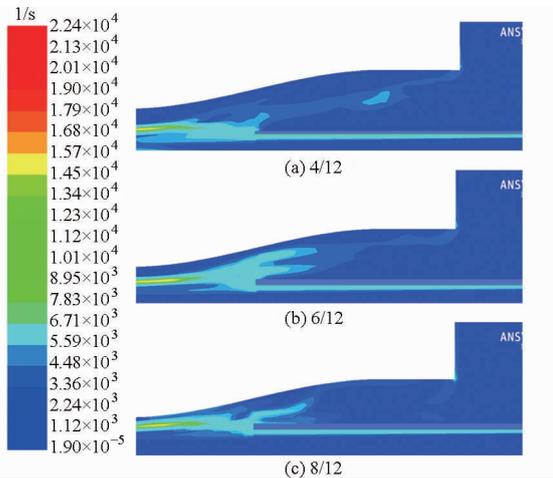


图 11 不同截面比条件下旋涡强度分布

Fig. 11 Distribution of vorticity magnitude under different cross section ratios

如图 11 所示,涡流强度的极大值分布在混合区喷嘴出口附近,在低截面比 4/12 时喷嘴处核心水束截面较小。由于喷嘴出口处存在两相三流混合此时的涡流强度最大,极大值为  $28\ 087.1\ \text{s}^{-1}$ ,且涡流区范围向喷嘴轴心方向发展,涡流在气流区分布较小;随着截面比的增大,涡流区分布范围向气流区方向拓展达到喷嘴的内壁边缘,与空气充分得进行混合。当截面比达到 8/12 时,由于核心水束携带的动能大,较好地对喷嘴进行封闭,此时涡流不存在两相三流混合,极大值降为  $22\ 379.9\ \text{s}^{-1}$ ,强度有所降低但涡流强度沿径向朝喷嘴内壁方向逐渐增大。同时在靠近喷嘴内壁处引射气流对槽内水流进入喷嘴内进行很好地截留从而保持引射流带动气体在气流区整

个径向截面区域内流动,而避免形成如 4/12 和 6/12 截面比下的气液双向流通道,有利于吸气,同时也伴随着更大的湍流能量耗散。

图 12 为截面比为 8/12、不同入流压力(0.08、0.10、0.12、0.14 MPa)下的涡流强度分布。

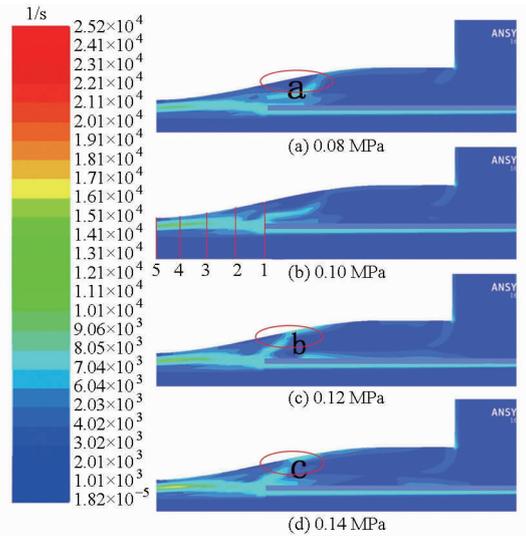


图 12 不同压力条件下涡流强度分布

Fig. 12 Distributions of vorticity magnitude at different pressures

一定的引射流入流压力下,喷嘴混合区的涡流强度沿着径向先增大后减小。由于淹没射流下核心水束克服槽内水压,在气液交界的地方与气体进行强烈混合,涡流强度达到最大;而沿着径向到喷嘴内壁处气体含量增大,水流减少,涡流强度也随之降低。入流压力的增大,涡流区范围向引射管出口上方拓展至喷嘴内壁;随着压力继续变大涡流区变化不再明显,涡流强度极大值也由 0.08 MPa 时的  $19\ 884.9\ \text{s}^{-1}$  增加到 0.12 MPa 时的  $23\ 394.0\ \text{s}^{-1}$  后缓慢增大到 0.14 MPa 时的  $25\ 155.8\ \text{s}^{-1}$ 。涡流强度的增加伴随着气液的激烈混合,这是导致能量的转换与耗散加剧的原因;图 12 为 0.08、0.12、0.14 MPa 3 种工况下相同位置处(图中红色的椭圆边界线内所在区域)涡流分布对比。当入流压力为 0.08 MPa 时,a 所在区域涡流强度为零但压力为 0.12 MPa 时同区域 b 处被涡流强度较大值域覆盖,涡流强度增大;这主要是由于气流速度的增大,速度梯度增大,碰撞混合程度随之加大从而导致的涡流强度增大;而压力增大到 0.14 MPa 时,同区域 c 处涡流强度范围相较于区域 b 未发生较大变化,主要是由于在 0.12 MPa 时引射流已经对槽内水流进入喷嘴进行很好地截留,发生碰撞混合主要发生在引射流与气流之间,同向流碰撞混合程度变化不大。

为更好地了解这种涡流强度变化和不同工况下气流封闭作用,截取  $Y=0$  截面入流管出口处至喷嘴

出口处之间混合区为分析对象,如图12中0.10 MPa工况所示截线,截取间隔为5 mm,截线的起止坐标为 $(x_i, 0, -0.06)$ 和 $(x_j, 0, 0.06)$ ,由于垂直 $x$ 轴截取,因此 $x_i, x_j$ 取值相同,对应值为 $x_i = x_j$ 取值范围 $(0.050, 0.055, 0.060, 0.065, 0.070)$  m,  $i = j$ 取值范围为1, 2, 3, 4, 5;以划分网格的单位节点为截线上的选取点从而得到涡流强度分布图。

取截面比为8/12,入流压力为0.10 MPa工况下不同位置涡流变化情况,如图13所示。

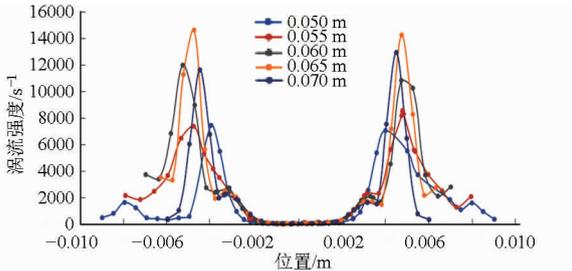


图13 混合区涡流强度径向分布

Fig. 13 Radial distributions of vorticity magnitude around mixing zone

如图13所示,在射流中心处,不存在气体参混,涡流不发生,沿着径向向喷嘴内壁的方向涡流逐渐发生并增强,并在喷嘴附近达到极大值,且沿 $x$ 轴正方向,极大值先由7394.55增大到14541.8,后减小到12859.9,此处主要是槽内水流、引射流以及气体的两相三股对流区,形成了激烈的涡流混合区,也是能量耗散最剧烈的区域。

如图14所示,得到压力为0.10 MPa、截面比为4/12、6/12、8/12时 $Y=0$ 截面上截线4处的涡流强度分布图。截线4的位置为图12中0.10 MPa工况时的4号线位置。

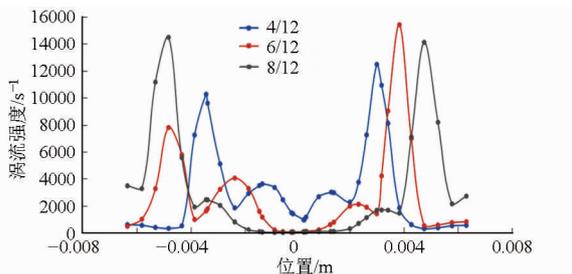


图14 不同截面比涡流强度径向分布

Fig. 14 Radial distributions of vorticity magnitude under different cross section ratios

如图14所示在截面比较低的情况下由于总动能较小,在克服槽内水压差时能量衰减较快,因此在射流中心处便出现涡流,此处的涡流形成主要是由槽内水流和入水管水流碰撞混合形成的涡流此时的涡流强度较小;随着截面比的提高,总动能上升,在喷嘴内能够有效克服槽内水压差因此中心处不再有涡流现象出现。在中心射流的两端,会出现涡流强

度的极大值,3种截面比下极大值出现的位置分别为0.0045 m、0.0036 m、0.0033 m,数值则随截面比增大由 $12859.9 \text{ s}^{-1}$ 增大到 $14528.3 \text{ s}^{-1}$ ,后又降低为 $11554.8 \text{ s}^{-1}$ ;这是由于随着截面比增大,中心射流区域增大,较大的能量带动气液较大的混合,因而形成的涡流强度也较大;但随着截面比的上升中心射流实现了对喷嘴的封闭,气流在引射状态下与引射流同向导致碰撞混合强度和涡流有所降低。而由于涡流区也扩展到喷嘴的内壁边缘,增大了气流引射面积,因此吸气量上升。

如图15所示,截取截面比为8/12时不同压力(0.08、0.10、0.12、0.14 MPa)下 $Y=0$ 截面上截线4处涡流强度分布图,截线4位置如图12中0.10 MPa工况时的4号截线。

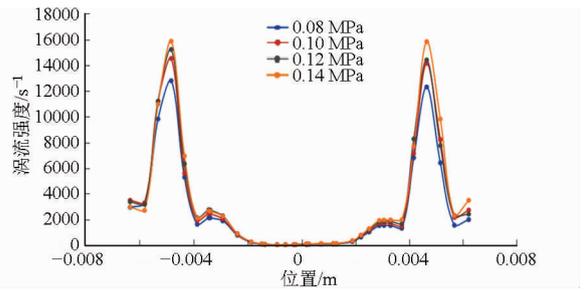


图15 不同入流压力涡流强度径向分布

Fig. 15 Radial distributions of vorticity magnitude at different pressures

如图15所示涡流强度随着压力的增大,涡流强度的变化趋势沿 $Z$ 轴同向,涡流强度的极大值出现的位置几乎相同,都出现在径向0.005 m附近,但随着压力的增大,极大值先由0.08 MPa时 $12805.6 \text{ s}^{-1}$ 增大到0.14 MPa时 $15882.3 \text{ s}^{-1}$ ,增幅不大。这主要是随着压力的增大,引射流对喷嘴形成较好的封闭,引射管出流速度增大从而带动吸气量增大而此时引射流和气流同向形成压差较小,因此在涡流变化的强度和分布上变化不大,吸气量的增量变缓。

## 4 结论

(1) 低截面比时,随着入流压力的增加,吸气量和气液比增加;而高截面比时,随着入流压力的增加,吸气量增加而气液比先增加后降低;低截面比气液比的增幅大于高截面比,因此可选择低截面比、高入流压力得到高气液比。随着截面比的增加,吸气量增加而气液比降低且高引射流入流压力的气液比减少幅度大于低入流压力的气液比减少幅度,对气液比存在高可控性。这些特性主要与不同入流压力时引射流与槽内水静压差以及不同截面时引射流对喷嘴的封闭作用有关。

(2) 入流压力的提高,引射流与槽内水静压差

增大,克服水压阻力的能力增大因此在喷嘴附近形成的漩涡减小;由于喷嘴出口处存在两相三流,湍流区在喷嘴出口方向扩展明显,湍动能和湍流耗散率增大,速度和能量在此区域发生剧烈的交换和损耗,带动吸气量增大;水流量增量大于气流量从而造成气液比增长缓慢。截面比的增加对喷嘴出口的封闭性变好,形成的湍动能扩散区和湍流耗散增大,吸气量增大;由于截面比增大,相同引射管入流压力下水流量变大造成气液比降低。

(3)同截面比、不同压力下径向涡流强度最大值分布位置大体相同且随着压力提高涡流强度增大;引射流和气流同向导致压差较小因此在涡流变化的强度和分布上变化不大,吸气量和气液比增加变缓;同压低截面比下动能低,在核心射流处形成涡流;随着截面比上升混合区核心处涡流消失;核心流边缘出现涡流先增大再减缓,从而造成能量耗散以及吸气量先增加后变缓。

#### 参 考 文 献

- 1 龙新平,朱劲木,梁爱国,等.射流泵喉管最优长度的数值计算[J].水利学报,2003,23(10):14-18.  
LONG Xinping,ZHU Jinmu,LIANG Aiguo,et al. Numerical calculation of optimal length of throat pipe in jet pump[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2003,23(10):14-18. (in Chinese)
- 2 曾庆龙,龙新平,肖龙洲,等.环形射流泵结构优化设计[J].排灌机械工程学报,2014,32(2):98-102.  
ZENG Qinglong, LONG Xinping, XIAO Longzhou, et al. Structure optimization of annular jet pumps[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering,2014,32(2):98-102. (in Chinese)
- 3 廖达雄,陈吉明,余永生,等.引射器增强混合喷嘴性能实验研究[J].实验流体力学,2007,21(3):24-29.  
LIAO Daxiong, CHEN Jiming, YU Yongsheng, et al. Experimental study on the performance of mixing-enhancing nozzles in ejectors[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics,2007,21(3):24-29. (in Chinese)
- 4 刘俊萍,袁寿其,李红,等.全射流喷头射程与喷洒均匀性影响因素分析与试验[J].农业机械学报,2008,39(11):51-54.  
LIU Junping, YUAN Shouqi, LI Hong, et al. Analysis and experiment on influencing factors of range and spraying uniformity for complete fluidic sprinkler[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(11):51-54. (in Chinese)
- 5 袁寿其,朱兴业,李红,等.全射流喷头内部流场计算流体动力学数值模拟[J].农业机械学报,2005,36(10):46-49.  
YUAN Shouqi, ZHU Xingye, LI Hong, et al. Numerical simulation of inner flow for complete fluidic sprinkler using computational fluid dynamics[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2005,36(10):46-49. (in Chinese)
- 6 黄秋君,冯树荣,李延农,等.多股多层水平淹没射流消能工水力特性试验研究[J].水动力学研究与进展,2008,23(6):694-701.  
HUANG QiuJun, FENG Shurong, LI Yannong, et al. Experimental study on energy dissipation characteristics of multi-horizantal submerged jets[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics,2008,23(6):694-701. (in Chinese)
- 7 王凌,张景松,罗锐,等.自由淹没气体旋转射流速度场试验研究[J].清华大学学报:自然科学版,2011,51(4):493-498.  
WANG Ling, ZHANG Jingsong, LUO Rui, et al. Experimental investigation of free and submerged swirling air jet velocity fields[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology,2011,51(4):493-498. (in Chinese)
- 8 丁江明,王永生,张志宏,等.船舶喷水推进器推力分布研究[J].船舶力学,2010,14(8):841-846.  
DING Jiangming, WANG Yongsheng, ZHANG Zhihong, et al. Research on thrust distribution of marine water jet[J]. Journal of Ship Mechanics,2010,14(8):841-846. (in Chinese)
- 9 刘超,李龙国,李乃稳,等.利用PIV技术对淹没射流瞬时流场特性的研究[J].南水北调与水利科技,2015,13(3):471-475.  
LIU Chao, LI Longguo, LI Naiwen, et al. Research on instantaneous flow characteristics of the falling submerged jet in a pool based on PIV technique[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2015,13(3):471-475. (in Chinese)
- 10 杨友胜,郑建平,聂松林,等.水射流喷嘴能量损失研究[J].机械工程学报,2013,49(2):139-145.  
YANG Yousheng, ZHENG Jianping, NIE Songlin, et al. Energy loss of nozzles in water jet system[J]. Journal of Mechanical Engineering,2013,49(2):139-145. (in Chinese)
- 11 洪挺,张文普.贫油直喷燃烧室燃烧稳定性的数值研究[J].中国电机工程学报,2013,33(2):24-30.  
HONG Ting, ZHANG Wenpu. Numerical study on combustion instability in lean direct injection combustor[J]. Proceedings of the CSEE, 2013,33(2):24-30. (in Chinese)
- 12 王福军.流体机械旋转湍流计算模型研究进展[J].农业机械学报,2016,47(2):1-14.  
WANG Fujun. Research progress of computational model for rotating turbulent flow in fluid machiner[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(2):1-14. (in Chinese)
- 13 SRIVEERAKUL T. Performance prediction of steam ejector using computational fluid dynamics: part 1. Validation of the CFD result[J]. International Journal of Thermal Sciences,2007,46(8):812-822.
- 14 ANDREA Mangialardo, WALTER Boreani. Numerical investigation on a jet pump evolving liquid lead for GEN-IV reactors[J]. Nuclear Engineering and Design, 2014,280:608-618.

- 31(9):19-24.  
LIN Jing, QIAN Wei, LI Baofa, et al. Simulation and validation of seeding depth mathematical model of 2BG-2 type corn ridge planting no-till planter[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(9):19-24. (in Chinese)
- 14 董春旺, 胡斌, 坎杂. 工厂化穴盘育苗精量播种装置现状及发展对策[J]. 农机化研究, 2008(8):247-249.  
DONG Chunwang, HU Bin, KAN Za. The existing circumstance and development strategy on industrial precision seedling-machine equipment[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2008(8):247-249. (in Chinese)
- 15 周海波, 马旭, 姚亚利. 水稻秧盘育秧播种技术与装备的研究现状及发展趋势[J]. 农业工程学报, 2008, 24(4):301-306.  
ZHOU Haibo, MA Xu, YAO Yali. Research advances and prospects in the seeding technology and equipment for tray nursing seedlings of rice[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(4):301-306. (in Chinese)
- 16 赵德金, 崔永汉, 朴香兰. 精密排种器检测装置的现状及发展趋势[J]. 农机化研究, 2002(7):5-7.  
ZHAO Dejin, CUI Yonghan, PIAO Xianglan. The actuality and development direction on metering device of precision seed metering device[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2002(7):5-7. (in Chinese)
- 17 王应彪, 赵学观, 徐丽明, 等. 基于电磁振动的玉米种子定向排序输送技术[J]. 农业机械学报, 2015, 46(1):79-88.  
WANG Yingbiao, ZHAO Xueguan, XU Liming, et al. Experiment and directional movement technology of corn seed based on electro-magnetic vibration[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(1):79-88. (in Chinese)
- 18 陈进, 李耀明. 气吸振动式播种试验台内种子运动规律的研究[J]. 农业机械学报, 2002, 33(1):47-50.  
CHEN Jin, LI Yaoming. Study on seeds movement law in sowing test stand with suction and vibration[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2002, 33(1):47-50. (in Chinese)
- 19 李耀明, 赵湛, 陈进, 等. 气吸振动式排种器种子盘内种群运动的离散元分析[J]. 农业机械学报, 2009, 40(3):55-59.  
LI Yaoming, ZHAO Zhan, CHEN Jin, et al. Discrete element method simulation of seeds motion in vibrated bed of precision vacuum seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(3):55-59. (in Chinese)
- 20 李耀明, 王显仁, 徐立章, 等. 水稻谷粒的挤压力学性能研究[J]. 农业机械学报, 2007, 38(11):56-59.  
LI Yaoming, WANG Xianren, XU Lizhang, et al. Study on compression properties of rice grains[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(11):56-59. (in Chinese)
- 21 刘文忠, 赵满全, 王文明. 气吸式排种装置排种性能理论分析与试验[J]. 农业工程学报, 2010, 26(9):133-138.  
LIU Wenzhong, ZHAO Manquan, WANG Wenming. Theoretical analysis and experiments of metering performance of the pneumatic seed metering device[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(9):133-138. (in Chinese)
- 22 罗锡文, 刘涛, 蒋恩臣, 等. 水稻精量穴直播排种轮的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2007, 23(3):108-112.  
LUO Xiwen, LIU Tao, JIANG Enchen, et al. Design and experiment of hill sowing wheel of precision rice direct-seeder[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(3):108-112. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 21 页)

- 15 谷云庆, 牟介刚, 代东顺, 等. 基于气体射流的气液两相流动减阻特性[J]. 推进技术, 2015, 36(11):1640-1647.  
GU Yunqing, MU Jiegang, DAI Dongshun, et al. Drag reduction characteristics on gas-liquid two-phase flow based on gas jet[J]. Journal of Propulsion Technology, 2015, 36(11):1640-1647. (in Chinese)
- 16 HAROUN Y, LEGENDRE D, RAYNAL L. Direct numerical simulation of reactive absorption in gas-liquid flow on structured packing using interface capturing method[J]. Chemical Engineering Science, 2010, 65(1):351-356.
- 17 邱白晶, 徐溪超, 杨宁, 等. 射流混药装置结构参数对混药性能影响的模拟分析[J]. 农业机械学报, 2011, 42(6):76-80.  
QIU Baijing, XU Xichao, YANG Ning, et al. Simulation analysis of structure parameters of jet-mixing apparatus on jet-mixing performance[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(6):76-80. (in Chinese)
- 18 吴静, 石新, 阎其荣, 等. FJCA20-4 型煤用喷射式浮选机工作压力的优选[J]. 煤炭加工与综合利用, 2010, 36(1):7-10.  
WU Jing, SHI Xin, YAN Qirong, et al. Optimal operation pressure of the FJCA-4 jet flotation machine for coal[J]. Coal Processing and Comprehensive Utilization, 2010, 36(1):7-10. (in Chinese)
- 19 欧鸣雄, 贾卫东, 邱白晶, 等. 射流混药装置变工况流场特性试验与数值分析[J]. 农业机械学报, 2015, 46(9):107-111.  
OU Mingxiong, JIA Weidong, QIU Baijing, et al. Experiment and numerical analysis of flow field in jet mixing device under variable working condition[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(9):107-111. (in Chinese)
- 20 张弛宇, 尹侠. 双层圆盘涡轮式搅拌器的 CFX 流场模拟[J]. 化工装备, 2010, 12(2):14-19.  
ZHANG Chiyu, YIN Xia. Numerical simulation for flow field around dual rushton turbine agitators based on CFX[J]. China Chemical Industry Equipment, 2010, 12(2):14-19. (in Chinese)
- 21 张建伟, 程龙, 冯颖, 等. 水平三向撞击流反应(混合)器内湍流数值模拟研究[J]. 沈阳化工大学学报, 2015, 29(3):263-267.  
ZHANG Jianwei, CHENG Long, FENG Ying, et al. Numerical simulation of flow in three-jet impinging streams reactor[J]. Journal of Shenyang Institute of Chemical Technology, 2015, 29(3):263-267. (in Chinese)