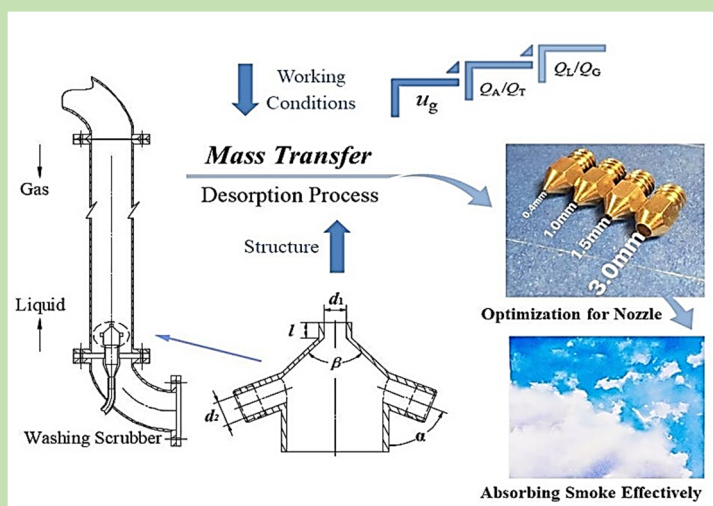


## Optimization of new type of gas-liquid countercurrent impinging scrubber nozzle

Sijia HAO, Changzhuo MAN, Jun XU, Yiping FAN\*

State Key Laboratory of Heavy Oil, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China

**Abstract:** A new type of gas-liquid countercurrent impinging scrubber nozzle was put forward. By using the dissolved oxygen technique, the characteristics of the gas-liquid two-phase mass transfer with different structures of scrubber nozzles were investigated through cold model experiment. Combining the measured desorption rates with the observed flow patterns variation, the effects of five structural parameters including the nozzle outlet diameter, the tangential inlet angle, the conical swirl chamber cone angle, the tangential inlet diameter and the spout length on the mass transfer were analyzed. Thus the optimal



structural dimensions were given. The features of the mass transfer of the optimal nozzle under different operating conditions including the gas velocity, the superficial liquid-gas volume flow rate ratio, and the axial-tangential volume flow rate ratio were investigated further. The nozzle with structure of horizontal angle of the tangential inlet, small outlet diameter (with high orifice speed), and small conical angle of the convergent section of the swirl chamber can gain high mass transfer efficiency. For industrial applications, large size scrubbers should provide as much tangential momentum as possible to cover the entire cross section and increase the gas-liquid contact area, such as choose the angle  $0^\circ$  and  $90^\circ$ , tangential inlet angle and conical swirl chamber cone angle respectively. The results showed that the desirable effect of mass transfer could be obtained then the axial-tangential volume flow rate ratio was 0.4~0.6, especially in a high gas velocity condition. Similarly, there was a better mass transfer area with the change of superficial liquid-gas volume flow rate ratio. In addition, high desorption rates can be achieved with a very small liquid-gas volume flow rate ratio under the condition of high gas velocity. It can also be concluded that this type of washing nozzle with higher operating elasticity can adapt to different conditions of liquid-gas volume flow ratio by adjusting the axial-tangential volume flow rate ratio.

**Key words:** gas-liquid mass transfer; nozzle; optimization; operating parameters

收稿: 2018-05-18, 修回: 2018-08-28, 网络发表: 2018-09-17, Received: 2018-05-18, Revised: 2018-08-28, Published online: 2018-09-17  
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(编号: 21476254)  
作者简介: 郝思佳(1994-), 女, 黑龙江省大庆市人, 硕士研究生, 化工过程机械专业; 范怡平, 通讯联系人, E-mail: fanyipin2002@yahoo.com.

**引用格式:** 郝思佳, 满长卓, 许峻, 等. 新型气液逆流撞击洗涤喷嘴的优化. 过程工程学报, 2019, 19(2): 254-262.

Hao S J, Man C Z, Xu J, et al. Optimization of new type of gas-liquid countercurrent impinging scrubber nozzle (in Chinese). Chin. J. Process Eng., 2019, 19(2): 254-262, DOI: 10.12034/j.issn.1009-606X.218217.

# 新型气液逆流撞击洗涤喷嘴的优化

郝思佳, 满长卓, 许峻, 范怡平\*

中国石油大学(北京)化工过程机械系, 北京 102249

**摘要:**针对一种新型气液逆流撞击式洗涤喷嘴, 通过冷模实验, 采用溶氧法考察了不同结构喷嘴的气液两相传质性能。结合解析率及流型变化, 考察了喷嘴出口直径、切向进液口倾角、旋流室收敛段锥角、切向进液口直径、喷口长度 5 个参数对传质的影响, 确定了优选喷嘴的结构尺寸, 分析了该优选喷嘴在不同操作条件下(气速、表观液气比和轴切比)的传质效果。结果表明, 优选喷嘴在轴切比为 0.4~0.6 且气速较高时传质效果较好。

**关键词:**气液传质; 喷嘴; 优化; 操作参数

中图分类号: TQ027.3; TQ051.7

文献标识码: A

文章编号: 1009-606X(2019)02-0254-09

## 1 前言

工业中化石燃料燃烧产生的烟气中含大量  $\text{SO}_x$ 、 $\text{NO}_x$  和粉尘等有害物质, 湿法烟气洗涤能有效净化烟气, 应用较广泛。气液逆流撞击式洗涤器利用气液两相动量交换, 形成高度湍动的泡沫区, 从而高效净化烟气<sup>[1]</sup>。洗涤器喷嘴性能决定了烟气洗涤的效果。

Burnham<sup>[2]</sup>开发了一种设有中心液体(浆液)通道和螺旋叶片的气液混合式喷嘴。螺旋叶片有助于形成旋转射流, 叶片末端的导流板在出口处形成均匀高速的小液滴。Steven 等<sup>[3]</sup>提出的大口径动力波喷嘴在内壁设置螺旋形导流槽, 在出口处形成具有轴向和切向动量的旋转轴向流, 轴向动量保证气液两相撞击的强度, 而切向动量提供足够的截面覆盖率。为在出口处形成旋转轴向流, 研究者<sup>[4,5]</sup>提出类似结构的旋流部件, 但使用过程中无法调节轴向和切向液流比例, 操作弹性受限。范怡平等<sup>[6]</sup>开发出一种可独立调节轴-切向液流流量的 UPC-A 型喷嘴, 对称布置的两股切向液流和轴向液流在旋流室混合, 在喷口处以旋转轴向流的形式高速喷出, 被内部湍流及外界逆流撞击的气动力进一步破碎成小液滴, 实现气液传质。喷嘴结构几何参数、操作参数等是影响喷嘴性能的重要参数<sup>[7-9]</sup>。

葛宇<sup>[10]</sup>发现 UPC-A 型喷嘴轴切比(轴向液相体积流量  $Q_A$  与切向液相体积流量  $Q_T$  的比值)小于 0.67、气速在 1.2~10 m/s 时, 洗涤效果较好。文献<sup>[11-13]</sup>对 UPC-A 型喷嘴的结构参数进行了分析, 所得结论不一致。对于切向进液口倾角  $\alpha$ , 陈昇等<sup>[11]</sup>认为 90°最佳, 李光晓<sup>[12]</sup>和李萌等<sup>[13]</sup>则认为 60°最佳。产生差异的原因可能为所用实验洗涤器尺寸和喷嘴结构不同, 导致传质效果不同, 也可能是气液传质对切向进液口倾角变化不敏感所致。

本工作通过冷模实验, 改变喷嘴结构参数(喷嘴出口直径  $d_1$ 、切向进液口倾角  $\alpha$ 、旋流室收敛段锥角  $\beta$ 、切向进液口直径  $d_2$  和喷口长度  $l$ ), 考察在不同液气比 ( $Q_L/Q_G$ 、液相体积流量  $Q_L$  与气相体积流量  $Q_G$  的比值)、轴切比( $Q_A/Q_T$ )、洗涤器气速( $u_g$ )条件下气液两相传质, 得到优选喷嘴结构, 为工业设计提供参考。

## 2 实验

### 2.1 实验材料

气体介质为空气, 液体介质为常温富氧水。向富氧水中通入一定量氧气, 使初始溶氧浓度在 20~30 mg/L。

### 2.2 实验装置

实验装置如图 1 所示, 主要分为溶氧系统(1~3)、液体进液控制系统(4, 5)、洗涤系统(6, 7)、分离和集液系统(8, 9)、给风系统。装置主体由内径 170 mm 的有机

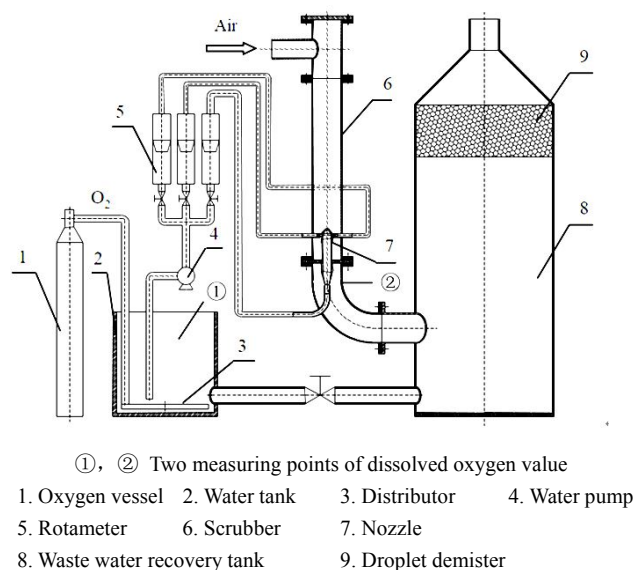


图1 实验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus

玻璃洗涤管、直径 800 mm 的废液回收罐和溶氧器组成，辅助设备有供水管线、供气管和风机等。UPC-A 型喷嘴结构如图 2 所示。

实验前，先向水罐 2 中通过氧气分布器 3 溶入一定量的氧气，由溶氧仪测量初始溶氧浓度。再由离心泵 4 将三股(对称布置的两股切向和一股轴向)进液通过 UPC-A 型喷嘴 7 打入逆喷式洗涤管 6 内，与自上而下的

气流逆流接触、撞击，形成气液两相作用区。气液经有效传质后自然回落到液体回收罐 8，在逆喷式洗涤管 6 的出口处选择取样点，测量解析后的氧气浓度。气体经过除雾器 9 排入大气，液体则从循环管路回流进入水罐，进行下一组实验。

对喷嘴的结构参数进行优化，共涉及 9 个喷嘴，表 1 为喷嘴的结构参数，以喷嘴 A 为基准喷嘴。

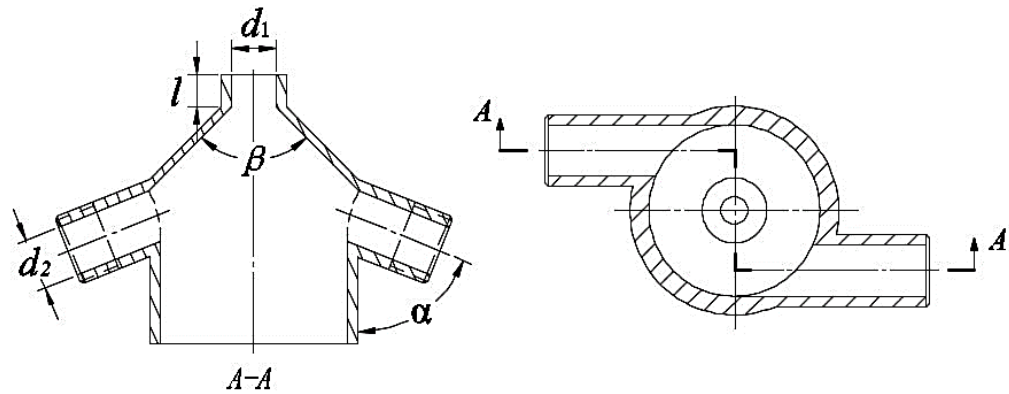


图 2 UPC-A 型喷嘴结构简图  
Fig.2 Structure diagram of UPC-A nozzle

表 1 喷嘴的结构参数  
Table 1 The structure parameters of nozzles

Structure parameter	Nozzle	Nozzle outlet diameter, $d_1$ /mm	Tangential inlet angle, $\alpha$ /°	Conical swirl chamber cone angle, $\beta$ /°	Tangential inlet diameter, $d_2$ /mm	Spout length, $l$ /mm
Type one (change the spout length)	A	8	90	90	15	8
	D	8	90	90	15	4
	E	8	90	90	15	12
Type two (change tangential inlet velocity)	A	8	90	90	15	8
	F	8	90	90	12	8
	G	8	90	90	18	8
Type three (change conical swirl chamber cone angle)	A	8	90	90	15	8
	H	8	90	105	15	8
	I	8	90	120	15	8
Type four (change tangential inlet angle)	A	8	90	90	15	8
	B	8	60	90	15	8
Type five (change nozzle outlet velocity)	A	8	90	90	15	8
	C	6	90	90	15	8

2.3 实验方法

气液两相的传质效果采用溶氧法测量，用 Oxi3310 型便携式溶氧仪(德国 WTW 公司)分别测量两个取样点的溶氧值。用无量纲参数解析率 $\varphi$ 量化传质效果：

$$\varphi = \frac{C_{in} - C_{out}}{C_{in}} \times 100\%$$

式中， $C_{in}$  为溶氧罐内①处的初始溶氧值(mg/L)， $C_{out}$  为洗涤管下端出口②处的溶氧值(mg/L)。

实验中采用的洗涤器气速为 0.61, 1.22, 1.84, 2.45 和 3.06 m/s，轴切比为 0/16, 4/28, 8/28, 4/20, 8/24, 8/20, 8/16, 16/28, 16/24 和 20/28。

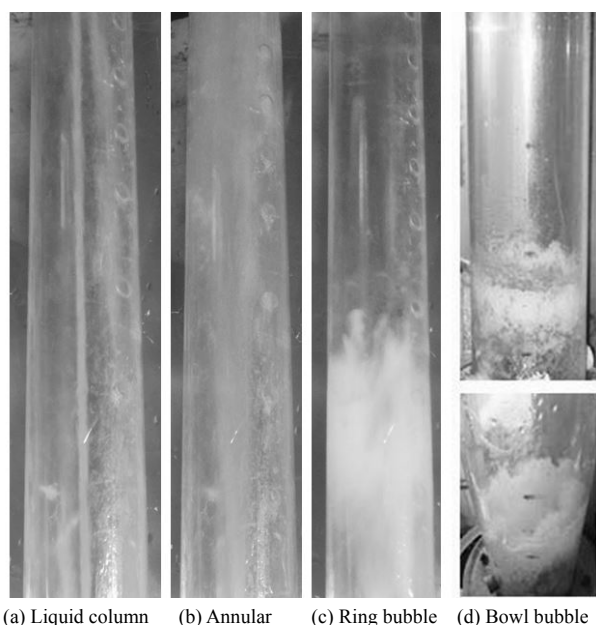
3 结果与讨论

3.1 不同结构喷嘴的传质特性

随操作工况变化，9 个喷嘴在洗涤器内出现 3 种基本流型：液柱型、环流型和泡沫型，与李光晓等<sup>[14]</sup>的实验结果相同。3 种流型如图 3 所示，其中泡沫型又分为环状泡沫型和碗状泡沫型。

固定总进流量和气相流量( $Q_L/Q_G$ )， $Q_A/Q_T$  变化，洗涤器内的流型和两相传质效果变化明显。 $Q_A/Q_T$  较大，只有轴向进液或切向进液量较小时，喷嘴喷出的液流呈液柱状，扩张角与自由射流相近，如图 3(a)所示。液流可在洗涤器内到达很高的位置，但由于截面覆盖率低，

导致气液接触面积小,且喷出的液流在上升过程中须克服自身重力,并受到来自液柱周围逆向流动气流的扰动,使液柱顶端不稳定,出现摆动。增加切向液流的比例,液柱高度降低,喷嘴出口液流的扩张角变大,洗涤液在截面的覆盖率提高,两相作用区的体积明显增大,流型过渡到环流型,传质效果优于液柱型,如图3(b)所示。受射流扩张角的限制,气流尚不能完全与液流接触,部分气体在洗涤器边壁和液流中间所形成的通道内向下流动。随切向液流比例进一步提高,液流高度下降,射流扩张角继续增大,气液在两相作用区内撞击更剧烈,在管壁周围形成大量泡沫,流型过渡到环状泡沫型,如图3(c)所示。继续增加切向流量的比例,喷出液几乎可覆盖洗涤器截面,液流的径向分布更均匀,流型变为碗状泡沫型,射流高度减小,气流穿过液层的时间相应缩短,如图3(d)所示。



(a) Liquid column (b) Annular (c) Ring bubble (d) Bowl bubble

图3 洗涤器内两相流型

Fig.3 The flow patterns in scrubber

无论何种流型,气液高速逆向撞击且两相动量达到平衡时均会在洗涤器的两相作用区内形成泡沫区,气液更新速度快,为气液两相提供大量传质界面。操作条件( $Q_A/Q_T$ ,  $Q_L/Q_G$ 和 $u_g$ )影响泡沫区在洗涤器内的体积及位置。泡沫区体积越大,越容易适应气量变化而不降低洗涤效率<sup>[15]</sup>。

图4和5分别为9种不同结构参数的喷嘴在不同表观气速下解析率与 $Q_A/Q_T$ 和 $Q_L/Q_G$ 的关系。由于液柱型和环流型两相传质效果相对较差,喷嘴优化实验时 $Q_A/Q_T=0\sim 0.75$ ,涉及的流型只有泡沫型。

喷嘴结构尺寸主要分为5类(表1)。第1类为喷嘴

A( $l=8\text{ mm}$ ), D( $l=4\text{ mm}$ )和E( $l=12\text{ mm}$ )。喷嘴长度 $l$ 增加,延长了直通流道,喷嘴处液流的轴向动量增大。 $l$ 过大将显著影响喷嘴内部的切向液流,在流体粘性耗散作用下,产生较大旋转动量损失,液相出口切向分速度随之降低<sup>[16]</sup>。射流扩张角减小,液相在洗涤器内的截面覆盖率降低,洗涤器内气液接触面积变小,降低了液相对气相的吸收率<sup>[17]</sup>。

喷嘴D的性能优于喷嘴E,因为E的喷嘴长度偏大,液相在喷嘴段旋转动量损失相对较小,喷出的液流更完整地覆盖洗涤器截面,气液传质相对更充分。喷嘴A的性能稍好于喷嘴D,主要是因为经由喷嘴A喷出的洗涤液射流更具刚度,液流轴向速度的提高强化了洗涤器内气液相互作用的剪切力。喷嘴长度增加引起旋转动量的耗散作用弱于轴向动量的促进作用。合适的喷嘴长度有利于提高喷嘴的传质效果。

第2类喷嘴为喷嘴A( $d_2=15\text{ mm}$ ), F( $d_2=12\text{ mm}$ )和G( $d_2=18\text{ mm}$ )。切向进液口直径 $d_2$ 最小的喷嘴F传质性能较优,这是因为 $d_2$ 影响切向入口的液速。当切向流量一定时,较小的 $d_2$ 使从切向进入喷嘴的流体动能较大,强化了轴-切方向流体在旋流室内的混合程度及动量交换,提高了喷出液的湍动强度;较大的切向进液速度增大了喷嘴处射流的扩张角,改善了出口流型,使两相接触传质得到强化。

第3类喷嘴为喷嘴A( $\beta=90^\circ$ ), H( $\beta=105^\circ$ )和I( $\beta=120^\circ$ )。旋流室收敛锥角 $\beta$ 最小的喷嘴A传质效果较好。 $\beta$ 影响喷嘴内的液速分布和喷出液扩张角<sup>[18,19]</sup>。旋流室内的混合程度影响气液泡沫区的厚度和高度。 $\beta$ 越小,液流在喷嘴内旋转的曲率半径越小,聚拢效果越好,旋转动量损耗越少,喷出液扩张角越大。液流和气流相互作用区域较大,液膜更容易破碎成小液滴,有利于传质<sup>[20]</sup>。多数情况下 $\beta=120^\circ$ 的喷嘴I传质较差,此时切向液流在收敛形旋流室内旋转的曲率较小,出口切向速度低,不利于形成旋转轴向流。

第4类喷嘴为喷嘴A( $\alpha=90^\circ$ )和B( $\alpha=60^\circ$ )。喷嘴A的性能较好。当切向进液口倾角 $\alpha=90^\circ$ 时,喷嘴内来自轴向和切向的三股液流直接撞击并形成旋转轴向流。固定切向进液量,减小 $\alpha$ 则来自切向的两股液流速度分量降低,使喷出液扩张角减小;喷嘴处液流的轴向动量增加,喷嘴液柱的液膜维持长度会增加<sup>[20]</sup>。喷嘴处形成的流型趋于又高又细,虽然轴向动量增加(射流刚度增加),但截面覆盖率不足,不利于传质。

第5类喷嘴为喷嘴A( $d_1=8\text{ mm}$ )和C( $d_1=6\text{ mm}$ )。喷嘴直径较小的喷嘴C传质效果稍好。出口直径决定出口液速,减小口径能提高孔口雷诺数(喷出液速度增加)<sup>[21]</sup>。

高速湍动的液相更易将气相分散成气泡,形成泡沫区;气液速度差增大有利于液膜和液滴破碎,在洗涤器内易形成泡沫区,强化气液两相作用的剧烈程度。其它结构参数不变, $d_1$ 越小,切向液体从旋流室内旋转至喷嘴出口的减缩段时旋转液流的加速作用越显著,提高了射流

卷吸周围流体的能力,改善传质效果<sup>[22]</sup>。

本工作实验条件下,喷嘴 C( $d_1=6$  mm,  $\alpha=90^\circ$ ,  $\beta=90^\circ$ ,  $d_2=15$  mm,  $l=8$  mm)的传质效果最佳,该喷嘴切向入口水平进液,出口直径小(孔口速度高),旋流室收敛段锥角小。

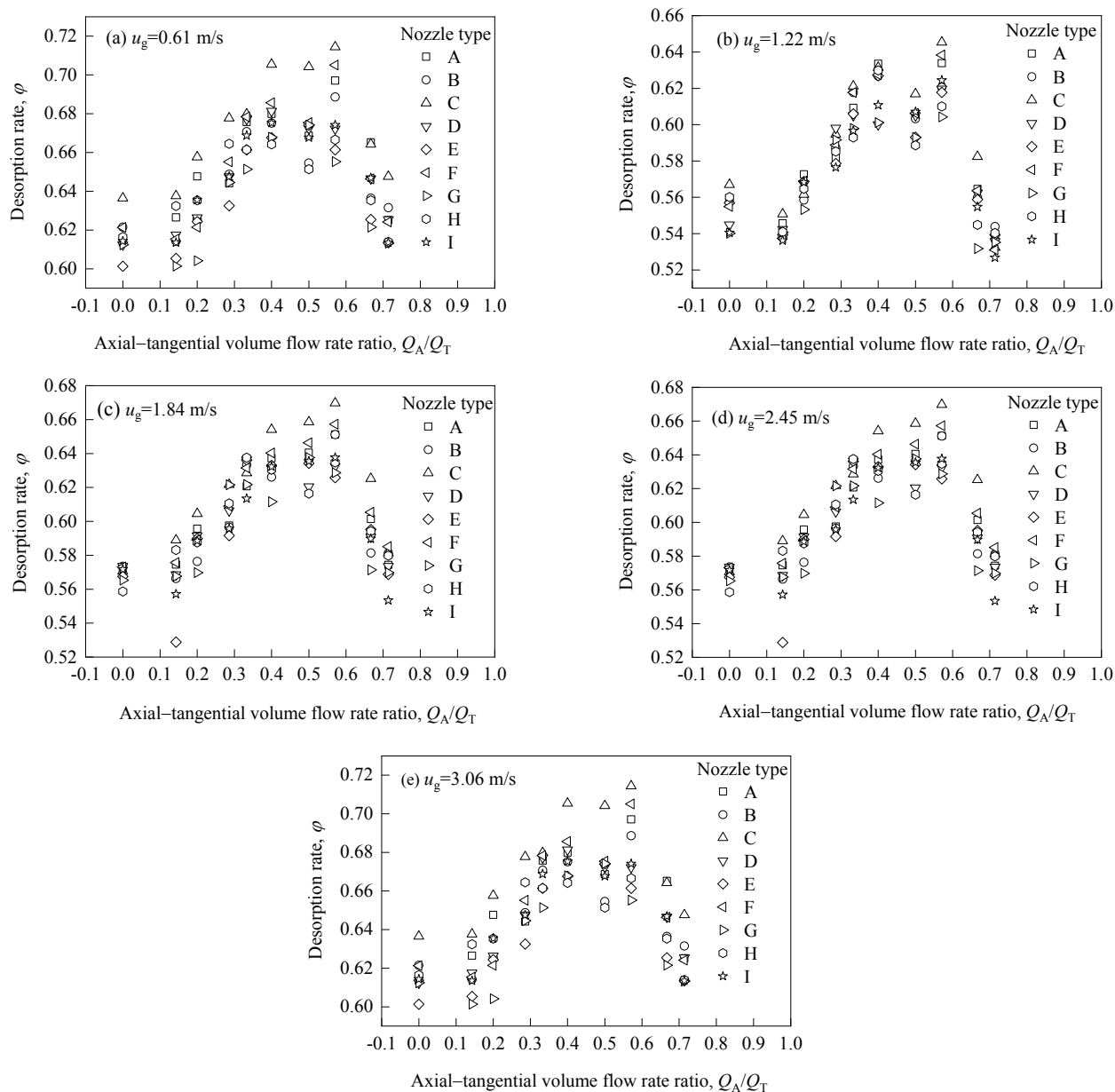


图4 各喷嘴在不同轴切比下的解析率

Fig.4 Desorption rate of nozzle under different ratios of axial-tangential volume flow

李光晓<sup>[12]</sup>认为喷嘴在 $\alpha=60^\circ$ ,  $\beta=90^\circ$ 时传质性能较好,李萌等<sup>[13]</sup>的模拟结果表明,当 $\alpha=60^\circ$ 时喷嘴内的轴一切进液在旋流室内混合较剧烈,气液湍动作用区较大。造成切向进液口角度差异的原因为文献<sup>[12,13]</sup>考察的洗涤器内径为140 mm,比本研究洗涤器内径170 mm小,喷出液无需很大的扩张角即可满足洗涤器截面覆盖率

的要求,对于出口处切向动量的要求并不高。当 $\alpha=60^\circ$ 时,切向进液口处除提供切向速度外,还提供一定的轴向分量,增加射流刚度,文献<sup>[12,13]</sup>也忽略了出口直径减小对气液撞击的促进作用。为获得良好的传质效果,不同尺寸的洗涤器所需喷嘴提供的切向动量也不同。大直径洗涤器需足够的截面覆盖率,需安装能提供更多切向

动量的喷嘴, 可通过调节喷嘴的结构参数(切向进液口倾角 $\alpha$ 、其进口直径 $d_2$ 及旋流室收敛锥角 $\beta$ )改变出口液流切向动量占总动量的比例, 以适应不同尺寸洗涤器的

要求<sup>[23]</sup>。在洗涤器工程设计中, 可参考优选喷嘴的结构, 取 $\alpha=90^\circ$ ,  $\beta=90^\circ$ 。

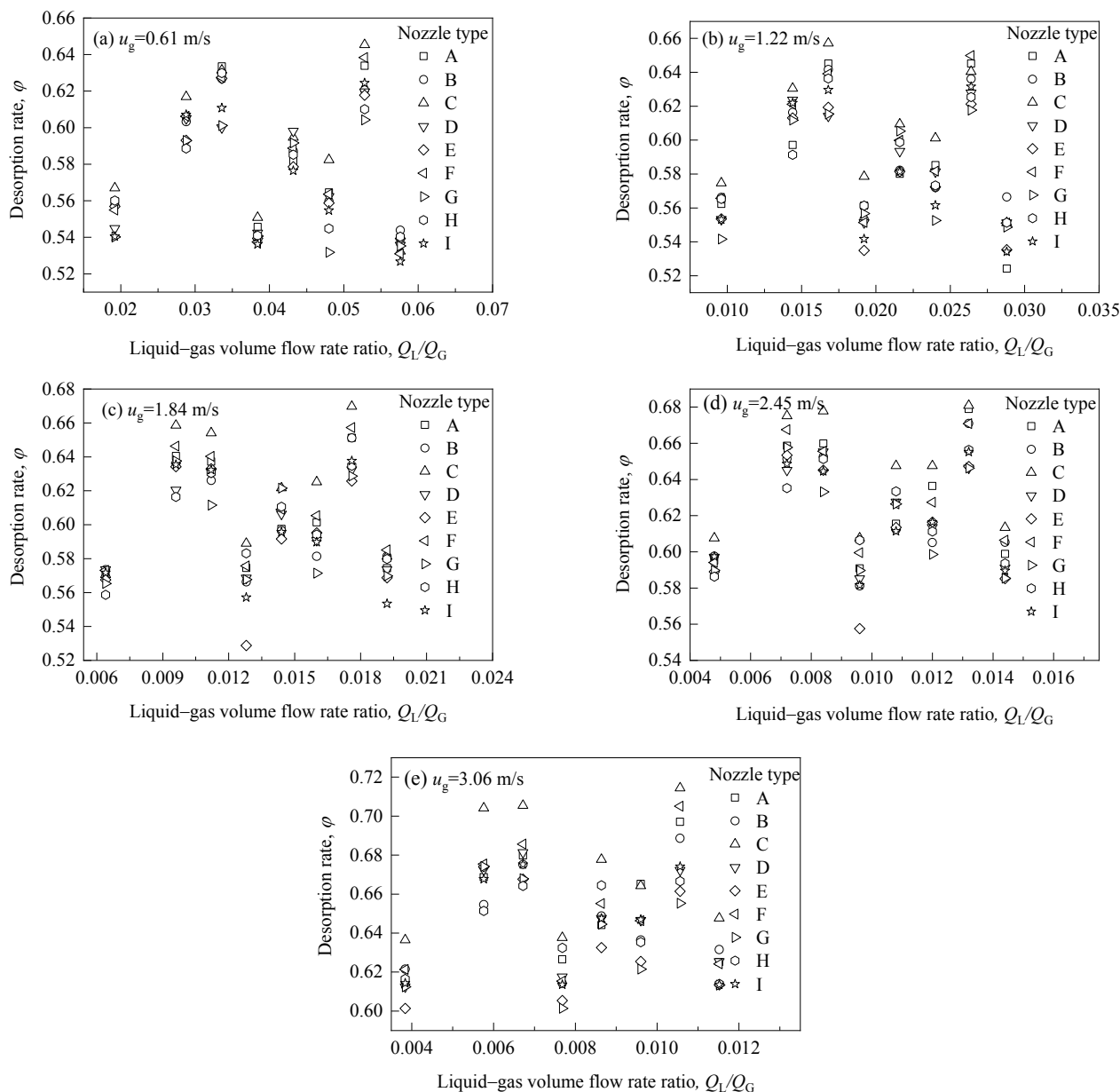


图5 不同气液比下各喷嘴的解析率

Fig.5 Desorption rate of each nozzle under different ratios of gas-liquid volume flow rate

### 3.2 优选喷嘴在不同操作参数下的传质特性

喷嘴C在不同操作条件下的传质效果如图6所示, 其它喷嘴在不同操作参数下的传质特性变化趋势与喷嘴C接近。从图6(a)可知, 各气速条件下两相传质效果随轴切比增加先增加再持平后下降。当 $Q_A/Q_T=0$ 时, 轴向进液为0或切向液量足够大, 流型为碗状, 虽在边壁处形成泡沫区, 但沿轴向动量很低, 出口处液流喷射高度小, 泡沫区厚度小, 有限的气液接触面积使气流在作

用区的停留时间较短。随 $Q_A/Q_T$ 提高, 喷射高度提高, 气液接触时间变长。喷嘴C出口直径较小, 喷口液体动能较大, 有利于气液两相撞击、传质。 $Q_A/Q_T=0.4\sim 0.6$ 时解析率变化不大, 有轻微上升, 气液传质趋于饱和, 两相传质效果最佳<sup>[24]</sup>。当 $Q_A/Q_T$ 进一步增大时, 解析率下降较明显。轴向动量所占比例偏大, 造成了喷射液流和洗涤器边壁间的空洞, 泡沫区的位置也逐渐从洗涤器边壁处转移到中心处, 流型从碗状泡沫型过渡到环状泡



沫型。部分气流经洗涤器边壁的环境区域流过, 未能与液流反应, 且形成的泡沫区体积偏小, 传质效果不如碗状泡沫型。

喷嘴 C 在不同液气比条件下的传质效果如图 6(b) 所示。气速较大时, 喷嘴只需较小的液气比即可达到很高的解析率, 这对工业应用十分有利。

气速一定时, 液相流量过少, 表明喷出的射流扩张角太小或轴向动量不足, 形成的液膜较薄, 不易生成泡

沫层, 解析率较低。随总进液量增大, 泡沫层范围扩大, 增加了气液接触的有效传质面积, 加剧了两相作用的湍动程度。但并非液相流量越大传质效果越好。在气速 0.61~3.06 m/s 范围内, 可发现当  $Q_L/Q_G$  达到某一区域时, 传质效果较优, 该区域  $Q_A/Q_T=0.4\sim0.6$ , 远离该区域传质较差。 $Q_A/Q_T$  和气速会改变气液两相撞击的位置, 导致泡沫区的作用区域不同, 从而影响传质效率。

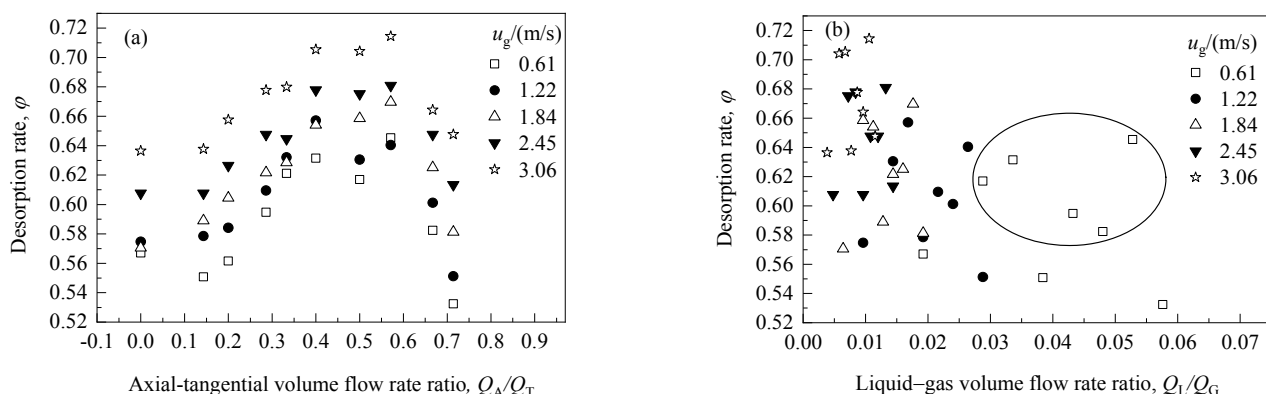


图6 操作工况对解析率的影响

Fig.6 Effect of operating condition on desorption rate

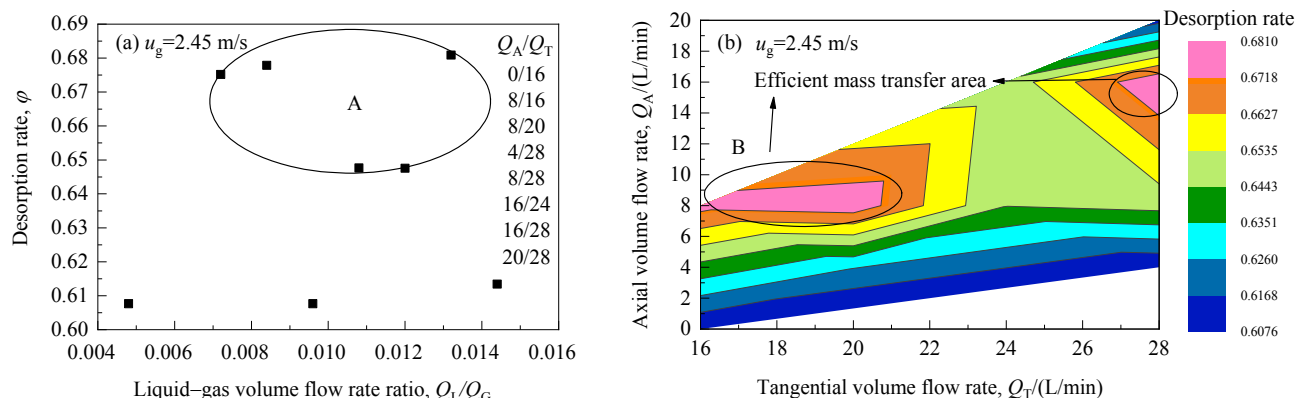


图7 喷嘴 C 在气速 2.45 m/s 下解析率随液气比及轴向液相体积流量和切向液相体积流量的变化

Fig.7 Variation of desorption rate of nozzle C with liquid-gas volume flow rate ratio, axial volume flow rate and tangential volume flow rate at the velocity of 2.45 m/s

气速 2.45 m/s 下解析率随液气比的变化如图 7(a) 所示, 区域 A 对应的液气比工况传质较理想。区域 A 各点的  $Q_A/Q_T$  (从左至右) 分别为 8/16, 8/20, 8/28, 16/24 和 16/28, 在 0.4~0.6 区间, 洗涤器内传质效果好。区域 A 外 3 点对应的  $Q_A/Q_T$  (从左至右) 分别为 0/16, 4/28 和 20/28, 远离 0.4~0.6 区间, 传质差。 $Q_A$  和  $Q_T$  对解析率的影响如图 7(b) 所示, 等高线表示解析率。随  $Q_A$  和  $Q_T$  变化, 区域 B 为最佳传质区域,  $Q_A/Q_T=0.4\sim0.6$  时解析率可高达 0.68。

气速是影响两相传质的重要因素, 总液量一定, 解析率随气速的变化如图 8 所示。气速越大, 气液两相撞击越剧烈, 传质效率越高。气速增加, 气体流量增加, 气液接触面积增大。气体雷诺数大表明湍流的气体会对液体射流产生较大扰动, 使泡沫区湍动加剧, 有利于传质。气速过高会使泡沫区位置下移, 缩短气液接触时间, 降低洗涤液的吸收速率; 过大的气体流量也会消耗更多能量<sup>[25]</sup>。

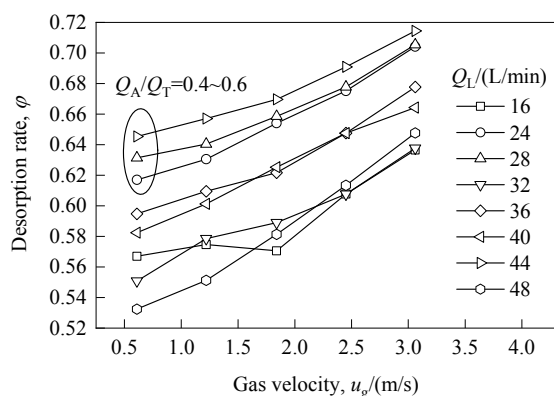


图8 气速对解析率的影响

Fig.8 Effect of gas velocity on desorption rate

## 4 结论

考察了一种新型高效气液接触洗涤器不同喷嘴在各种操作工况下的传质情况, 得到以下结论:

(1) 优选的喷嘴结构为喷嘴出口直径  $d_1=6$  mm, 切向进液口倾角  $\alpha=90^\circ$ , 旋流室收敛段锥角  $\beta=90^\circ$ , 切向进液口直径  $d_2=15$  mm, 喷口长度  $l=8$  mm。喷嘴的特征为切向入口水平进液, 出口直径小(孔口速度高), 旋流室收敛段锥角小。工业应用中对于大尺寸的洗涤器应尽可能多的提供切向动量, 使其覆盖到整个横截面, 增大气液接触面积, 取  $\alpha=90^\circ$ ,  $\beta=90^\circ$ 。

(2) 一定气量下优选的 UPC-A 型喷嘴解析率随轴切比增大先增加再持平后下降, 最佳轴切比为 0.4~0.6。

(3) 解析率较优的区域轴切比为 0.4~0.6。较高气速下只需很小的液气比可达到很高的解析率。该型洗涤喷嘴可通过调节轴向和切向液流的比例, 适用于不同液气比条件, 具有较高的操作弹性。

### 参考文献

- [1] 邵国兴. 带混合元件的动力波洗涤器 [J]. 硫酸工业, 1999, (2): 7-9.  
Shao G X. Dynawave scrubber with mixing elements [J]. Sulfuric Acid Industry, 1999, (2): 7-9.
- [2] Burnham R C. Gas-liquid mixing nozzle: US4456181 [P]. 1984-06-26.
- [3] Steven F M, Linda W M, Kanson X. 炼油厂 FCC 尾气的脱硫除尘新技术—动力波逆喷洗涤塔 [J]. 炼油技术与工程, 2005, 35(2): 25-29.  
Steven F M, Linda W M, Kanson X. A new desulfurization and dust removal technology for FCC off-gas in refinery—dynawave countercurrent scrubber [J]. Petroleum Refinery Engineering, 2005, 35(2): 25-29.
- [4] 郭盛, 方跃法. 一种射流雾化可调双功能喷头: CN201079753 [P]. 2007-07-16.  
Guo S, Fang Y F. A type of jet atomization adjustable dual function nozzle: CN201079753 [P]. 2007-07-16.
- [5] 李仁刚, 管一明, 周启宏, 等. 湿式脱硫高效喷嘴: CN2522156 [P]. 2001-12-25.

- Li R G, Guan Y M, Zhou Q H, et al. Wet desulfurization high-efficiency nozzle: CN2522156 [P]. 2001-12-25.
- [6] 范怡平, 陈昇, 卢春喜. 一种逆喷式湿法烟气洗涤喷嘴: CN202983935U [P]. 2012-12-14.  
Fan Y P, Chen S, Lu C X. A type of countercurrent wet flue gas washing nozzle: CN202983935U [P]. 2012-12-14.
- [7] Xue J, Jog M A, Jeng S M, et al. Influence of geometry on the performance of simplex nozzles under constant pressure drop [C]//15th Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems. Madison: ILASS Americas, 2002: 1-5.
- [8] Halder M R, Dash S K, Som S K. Initiation of air core in a simplex nozzle and the effects of operating and geometrical parameters on its shape and size [J]. Experimental Thermal & Fluid Science, 2002, 26(8): 871-878.
- [9] Dash S K, Halder M R, Peric M, et al. Formation of air core in nozzles with tangential entry [J]. Journal of Fluids Engineering, 2002, 123(4): 829-835.
- [10] 葛宇. 新型逆喷式气液洗涤器的研究 [D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2012: 59.  
Ge Y. Research on a new type of countercurrent gas-liquid scrubber [D]. Beijing: China Petroleum University (Beijing), 2012: 59.
- [11] 陈昇, 范怡平, 卢春喜. 新型逆喷式洗涤喷嘴气液两相传质特性研究 [J]. 高校化学工程学报, 2013, 27(6): 937-944.  
Chen S, Fan Y P, Lu C X. Study on gas-liquid two-phase mass transfer characteristics of a new type of countercurrent washing nozzle [J]. Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities, 2013, 27(6): 937-944.
- [12] 李光晓. 新型高效气液洗涤喷嘴流动特性的研究 [D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2015: 82.  
Li G X. Research on the flow characteristics of a new type of high-efficiency gas-liquid washing nozzle [D]. Beijing: China Petroleum University (Beijing), 2015: 82.
- [13] 李萌, 秦迪, 范怡平, 等. 气液逆流洗涤器内两相流场的实验研究与数值模拟 [J]. 过程工程学报, 2017, 17(4): 689-696.  
Li M, Qin D, Fan Y P, et al. Experimental study and numerical simulation of two-phase flow field in gas-liquid countercurrent scrubber [J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2017, 17(4): 689-696.
- [14] 李光晓, 王钊, 范怡平, 等. 气液两相逆流-错流撞击洗涤器内两相流动与传质特性 [J]. 过程工程学报, 2015, 15(2): 198-203.  
Li G X, Wang Z, Fan Y P, et al. Two-phase flow and mass transfer characteristics in a countercurrent-cross flow impacted scrubber with gas-liquid two phases [J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2015, 15(2): 198-203.
- [15] 李秋萍, 邵国兴, 程建伟. 湿式动力波洗涤器的工业应用 [J]. 化工装备技术, 2006, 27(4): 17-20.  
Li Q P, Shao G X, Cheng J W. Industrial application of wet dynawave scrubber [J]. Chemical Equipment Technology, 2006, 27(4): 17-20.
- [16] 杨立军, 葛明和, 张向阳, 等. 喷口长度对离心喷嘴雾化特性的影响 [J]. 推进技术, 2005, 26(3): 209-214.  
Yang L J, Ge M H, Zhang X Y, et al. Effect of spout length on atomization characteristics of centrifugal nozzle [J]. Propulsion Technology, 2005, 26(3): 209-214.
- [17] 马飞, 张文明. 水射流扩孔喷嘴内部流场的数值模拟 [J]. 北京科技大学学报, 2006, 28(6): 576-580.  
Ma F, Zhang W M. Numerical simulation of internal flow field in



- water jet reaming nozzle [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2006, 28(6): 576–580.
- [18] 侯凌云, 侯晓春. 喷嘴技术手册 [M]. 北京: 中国石化出版社, 2004: 345.
- Hou L Y, Hou X C. Nozzle technical manual [M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2004: 345.
- [19] 邱庆刚, 贾丹丹, 朱晓静, 等. 结构参数对离心喷嘴出口液膜厚度的影响 [J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2015, 36(3): 271–275.
- Qiu Q G, Jia D D, Zhu X J, et al. Effect of structural parameters on liquid film thickness at the outlet of centrifugal nozzle [J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2015, 36(3): 271–275.
- [20] 刘昌波, 雷凡培, 周立新. 两股湍流射流撞击雾化过程的数值研究 [J]. 推进技术, 2014, 35(12): 1669–1678.
- Liu C B, Lei F P, Zhou L X. Numerical study on the impacted atomization process of two turbulent jets [J]. Propulsion Technology, 2014, 35(12): 1669–1678.
- [21] 姚云. 喷射器内气液流动与混合性能的研究 [D]. 青岛: 青岛科技大学, 2009: 149.
- Yao Y. Research on gas-liquid flow and mixing performances in ejector [D]. Qingdao: Qingdao University of Science & Technology, 2009: 149.
- [22] 邱庆刚, 刘丽娜. 喷嘴结构对流动性能影响的研究 [J]. 石油化工高等学校学报, 2011, 24(1): 68–72.
- Qiu Q G, Liu L N. Research on effect of nozzle structure on performance of flow field [J]. Journal of Petrochemical Universities, 2011, 24(1): 68–72.
- [23] 满长卓. 气液逆流洗涤器内流动-传质特性及放大效应的研究 [D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2018: 113.
- Man C Z. Flow and mass transfer characteristics and scale-up effect in a countercurrent cross-flow scrubber [D]. Beijing: China Petroleum University (Beijing), 2018: 113.
- [24] 廖婧. 新型旋转泡沫洗涤器的流体力学和传质特性研究 [D]. 湘潭: 湘潭大学, 2016: 76.
- Liao J. Research on hydrodynamics and mass transfer characteristics of a new type of rotating foam scrubber [D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2016: 76.
- [25] 占旺兵, 李秋萍, 程建伟, 等. 动力波洗涤器中碱液吸收低浓  $\text{CO}_2$  的传质特性 [J]. 化学工程, 2012, 40(2): 33–37.
- Zhan W B, Li Q P, Cheng J W, et al. Mass transfer characteristics of alkali solution absorption of low concentration  $\text{CO}_2$  in dynawave scrubber [J]. Chemical Engineering, 2012, 40(2): 33–37.