

# 气泡雾化下游场液滴速度的预测模型研究

方恒和<sup>1</sup>, 谢 晶<sup>1</sup>, 刘 猛<sup>2</sup>

(1. 上海海洋大学 食品学院, 上海 201306; 2. 东南大学 能源与环境学院, 江苏 南京 210096)

**摘 要:** 为了预测气泡雾化下游场液滴的速度, 借助修正的局部均匀流动模型 (locally homogenous flow, LHF), 建立了针对气液两相雾化下游场液滴速度的预测模型, 并且与采用激光多普勒粒度仪 (Phase Doppler Particle Analyzer, PDPA) 测得的气泡喷嘴下游雾场液滴的速度进行了对比。结果表明, 当气泡喷嘴下游稀相区液滴粒径沿着径向变化不大并且液滴粒径与速度不相关时, 采用修正的 LHF 模型能够预测雾化下游场的液滴速度。随着雾炬轴向距离的增加, 在雾化中心和边缘处液滴速度的预测值与实验值越来越接近。

**关 键 词:** 气泡雾化; 液滴速度; 预测模型

中图分类号: O359 文献标识码: A

## 引 言

由于气泡雾化下游场复杂的气液两相流动以及喷口处气液间的速度滑移使得气泡喷嘴不同于其它类型的喷嘴, 对其雾化下游液滴速度的获得主要借助于先进的测量仪器, 而理论预测模型发展较为缓慢。一些学者采用局部均匀流动 (LHF) 模型预测了单相雾化下游场的液滴速度<sup>[1~4]</sup>, 发现轴向距离  $Z$  与喷口直径  $D_{noz}$  的比值在 150 以内时, 液滴的速度分布特性具有自相似性, 可以较好的预测下游液滴速度, 但是用单相的 LHF 模型预测两相的雾化下游场液滴速度时则会出现较大的偏差。文献 [5] 认为将单相的 LHF 模型运用到两相流体的液滴速度预测需要满足两个假设条件: (1) 下游场液滴的粒径沿着径向距离变化不大, 此时气流场的湍动作用对下游场液滴的粒径和速度影响不大; (2) 液滴粒径—速度之间没有相关性, 不受气液比和空间位置等因素的影响。

因此, 本研究借助经典的速度剖面公式, 结合文献 [5] 提出的一维模型加以修正, 建立了气泡雾化下游场液滴速度的预测模型, 从而对雾化下游场液滴的速度进行预测, 并且与试验结果进行对比。

## 1 理论方法

采用修正的 LHF 模型对气泡雾化下游场中液滴速度进行预测, 首先需要确定轴对称自由湍动射流的速度剖面方程。文献 [6] 将近似的边界条件带入简化后的  $N-S$  方程, 求得速度剖面为:

$$\bar{u} = u_{max} \left( \frac{2}{e^\eta + e^{-\eta}} \right)^2 \quad (1)$$

$$\eta = \beta \cdot \frac{r}{Z} \quad (2)$$

$$u_{max} = b \sqrt{\frac{J}{\rho_e}} \frac{1}{Z} \quad (3)$$

式中:  $\bar{u}$ —射流某处轴向位置液滴的速度平均值;  $u_{max}$ —雾化轴心线上液滴的最大速度;  $J$ —雾化液滴动量随时间的变化率;  $\rho_e$ —周围气体的密度;  $\beta$ 、 $b$ —经验常数;  $r$ —雾化轴心处的径向距离;  $Z$ —喷口下游的轴向距离。

式 (1) ~ 式 (3) 只是描述了单相的速度剖面, 经过修正后可用于确定气液两相流场中液滴的速度剖面。将式 (3) 中引入气液两相动量率:

$$J = m_1 u_1 + m_g u_g \quad (4)$$

式中:  $m_1$ 、 $u_1$ —液体的质量流量和速度;  $m_g$ 、 $u_g$ —气体的质量流量和速度。

将式 (4) 带入式 (3), 可化简为:

$$u_{max} = b \sqrt{\frac{m_1 u_1 (1 + ALR \cdot sr)}{\rho_e}} \frac{1}{Z} \quad (5)$$

式中:  $ALR$ —气液质量比;  $sr$ —气液之间的速度滑移比; 参数  $b$  需要通过气液两相方程来获得。

假设在喷嘴出口处液相是连续的, 那么由质量守恒可得:

$$u_1 = \frac{4m_1}{\pi D_{noz}^2 \rho_1 (1 - \alpha_v)} \quad (6)$$

收稿日期: 2012 - 05 - 08; 修订日期: 2012 - 12 - 20

基金项目: “十二五”国家支撑计划基金资助项目 (2012BAD38B09); 上海市科委工程中心建设基金资助项目 (11DZ2280300)

作者简介: 方恒和 (1953 -), 男, 上海人, 上海海洋大学副教授。

式中: 喷口处截面含气率  $\alpha_0$  可以根据文献 [7~9] 获得, 而速度滑移比  $sr$  与  $\alpha_0$  存在着如下的关系:

$$\alpha_0 = \frac{1}{1 + (\rho_g \cdot sr) / (\rho_l \cdot ALR)}$$

将式 (5) 和式 (6) 带入式 (3) 可得式 (2) 和式 (7) 中两个经验常数  $\beta$  和  $b$ , 可以通过实验数据拟合, 获得其与工况条件的函数关系式, 即:

$$u_{\max} = b \sqrt{\frac{4}{\pi} \frac{m_1}{D_{\text{noz}} Z} \sqrt{\frac{\rho_l}{\rho_e} (1 + ALR \cdot sr)} \times \sqrt{1 + (\rho_l \cdot ALR) / (\rho_g \cdot sr)}} \quad (7)$$

文献 [5] 通过实验给出了  $\beta$  和  $b$  的表达式, 其中  $b$  与  $ALR$  近似成线性关系, 而  $\beta$  则可以用雷诺数  $Re_1$  和  $ALR$  的函数关系式表示:

$$\beta = e \cdot Re_1^c \cdot ALR^d \quad (8)$$

其中:  $Re_1 = 4m_1 / (\pi D_{\text{noz}} \mu_1)$   $e = 40$   $c = -0.37$ ,  $d = 0.15$ 。

将式 (7) 带入式 (1), 可得预测模型的解析表达式, 即:

$$\bar{u} = u_{\max} \left( \frac{2}{e^\eta + e^{-\eta}} \right)^2 = b \sqrt{\frac{4}{\pi} \frac{m_1}{D_{\text{noz}} Z} \times \sqrt{\frac{\rho_l}{\rho_e} (1 + ALR \cdot sr)} \sqrt{1 + \frac{\rho_l \cdot ALR}{\rho_g \cdot sr} \left( \frac{2}{e^\eta + e^{-\eta}} \right)^2}} \quad (9)$$

因此, 在获得  $b$  与  $ALR$  之间的关系后, 运用式 (9) 就可以获得气泡雾化下游场稀相区的液滴速度。

## 2 实验装置

本实验采用内液外气式的气泡喷嘴, 结构如图 1 所示, 混合室上游为液体入口, 表面开有注气孔, 喷嘴出口处加工成缩放形式。喷嘴直径  $D_{\text{noz}}$  为 1.5 mm, 注气孔尺寸为 28 个倾斜  $45^\circ$  的直径为 1 mm 的小孔, 喷头收缩段为  $90^\circ$ 。

喷嘴的供液供气系统包括高压气源和压力罐, 以及流量计和阀门管路, 如图 2 所示。雾化液滴信息的数据采集采用 PDPA。试验过程包括: 在压力罐中装有一定量的液体, 利用管道向液面上方注入高压气体, 压力罐中的液体在高压气体的推动作用下进入喷嘴的混合室, 同时气路高压气体由注气孔进入混合室同液体混合并离开喷嘴实现雾化。实验过程在常温、常压下进行, 注气压力保持在 0.4 MPa, 喷嘴垂直安放。

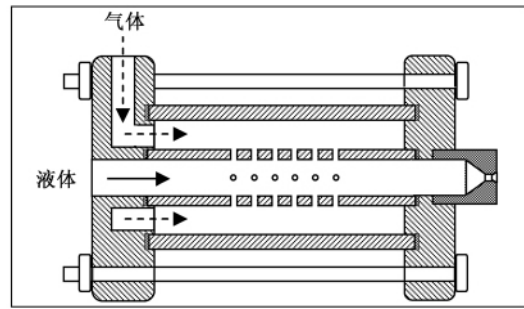


图 1 气泡喷嘴结构图

Fig. 1 Drawing of the structure of an air bubble nozzle

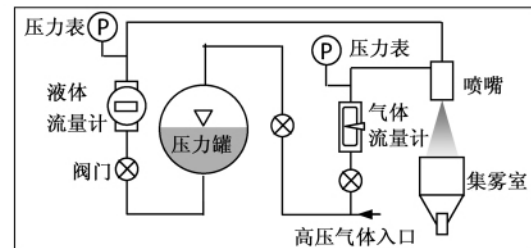


图 2 雾化系统示意图

Fig. 2 Schematic drawing of the atomization system

## 3 结果与讨论

文献 [5] 认为将单相的 LHF 模型运用到两相流体的液滴速度预测需要满足两个假设条件: (1) 下游场液滴的粒径沿着径向距离变化不大, 此时气流场的湍动作用对下游场液滴的粒径和速度影响不大; (2) 液滴粒径—速度之间没有相关性, 不受气液比和空间位置等因素的影响。文献 [6, 10] 研究表明, 当轴向距离为  $Z/D_{\text{noz}}$  大于 100 时, 气液两相的速度受气流场的湍动影响较小, 因此在这里对  $Z/D_{\text{noz}} > 100$  的 3 个轴向距离进行研究。喷嘴直径为 1.5 mm, 3 个轴向距离  $Z$  分别为 250、300 和 350 mm,  $Z/D_{\text{noz}}$  分别为 166、200、233。图 3 为气泡雾化水时, 气体和液体的质量流量分别为 5.5 和 55 kg/h, 注气压力为 0.4 MPa,  $ALR$  为 0.1 时 3 个轴向位置上液滴的粒径沿着径向的分布特性。由图 3 可以看出, 气泡雾化下游场液滴的粒径沿着径向距离的增加并不大, 基本满足假设条件一。

雾化下游场液滴粒径与速度之间的相关系数  $C$  可以通过式 (10) 获得:

$$C = \frac{\sum_{i=1}^N [(u_{d,i} - \bar{u}_d)(d_i - \bar{d})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (u_{d,i} - \bar{u}_d)^2 \sum_{i=1}^N (d_i - \bar{d})^2}} \quad (10)$$

式中： $\bar{u}_d$  和  $\bar{d}$ —液滴的平均速度和粒径； $u_{d,i}$  和  $d_i$ —单个液滴的速度与粒径。

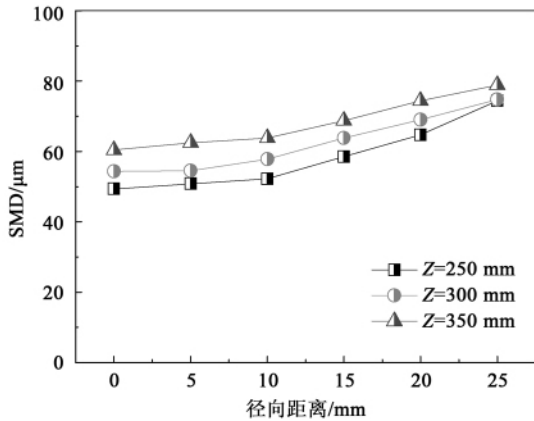


图3 粒径沿着径向距离分布特性

Fig. 3 Particle diameter distribution characteristics at various heights along the radial direction

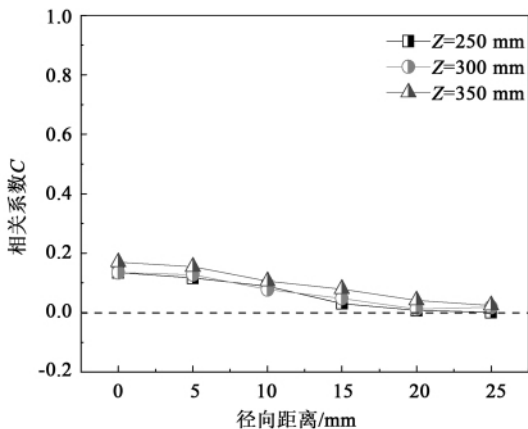


图4 下游场液滴的粒径与速度的相关性

Fig. 4 Correlation characteristics of the particle diameter and velocity of the droplets at the downstream

文献 [3] 表明, 当轴向距离  $Z/D_{noz} < 100$  时, 下游场的液滴与速度相关系数较大, 特别是在雾化的边缘处液滴与速度相关系数接近 1, 但是当轴向距离为  $Z/D_{noz} > 100$  时, 液滴的速度与粒径之间的相关系数就变得很小。图 4 表示在与图 3 相同操作参数下, 雾化下游场 3 个轴向位置上不同径向距离处液滴的速度与粒径之间的相关系数。从图中可以看

出, 在雾化的轴心处, 液滴速度与粒径之间具有很小的相关性, 随着径向距离的增加, 特别在雾化的边缘处, 液滴的粒径与速度基本不相关, 从而符合假设的第二个条件。

$b$  与  $ALR$  的关系主要通过气泡雾化实验数据以及式 (1) ~ 式 (9) 来确定。雾化实验操作参数: 液体质量流量为 55 kg/h, 注气压力为 0.4 MPa,  $ALR$  为 0.0185、0.03、0.0485、0.0615 和 0.1, 对应的气体质量流量分别为 1.0175、1.65、2.6675、3.3825 和 5.5 kg/h。3 个轴向距离下,  $b$  与  $ALR$  的关系如图 5 所示。从图 5 中可以发现, 本次实验中针对气泡喷嘴液滴速度预测的参数  $b$  与  $ALR$  基本成线性关系:  $b = 3.25 + 18.93 \times ALR$ 。对于单相的气体喷射, 参数  $b$  始终维持在 7.4 左右。

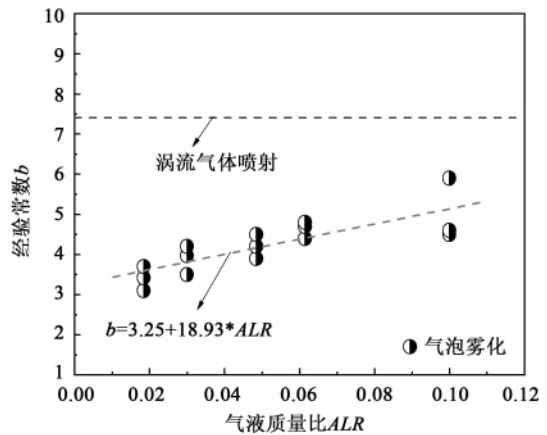


图5 b 与 ALR 的关系

Fig. 5 Relationship between  $b$  and  $ALR$

在获得  $b$  与  $ALR$  的关系之后, 采用式 (9) 就可以获得模型预测下的气泡雾化下游场液滴的速度。图 6 表示了采用未修正的 LHF 模型和修正的 LHF 模型预测气泡雾化下游场液滴速度并与实验数据的对比结果。由图可以看出, 未修正的 LHF 模型预测的液滴速度与实验值偏差较大, 而修正后的 LHF 模型值与实验值比较接近。另外, 比较修正后的 LHF 模型值与实验值可以发现, 在离喷嘴轴向距离为 250 mm 时, 雾化中心和边缘处液滴速度的模型预测值与实验值偏差较大, 而随着轴向距离增加到 300 和 350 mm 时, 雾化中心和边缘处的模型预测值与实验值偏差较小。由图 6 (b) 可知, 整个实验值与修正后 LHF 模型预测值的平均偏差在 7% 以下。

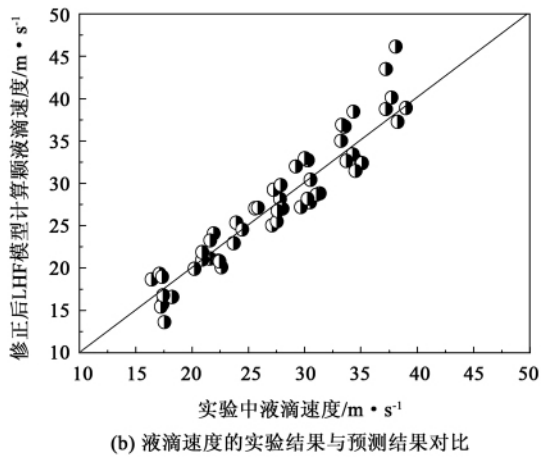
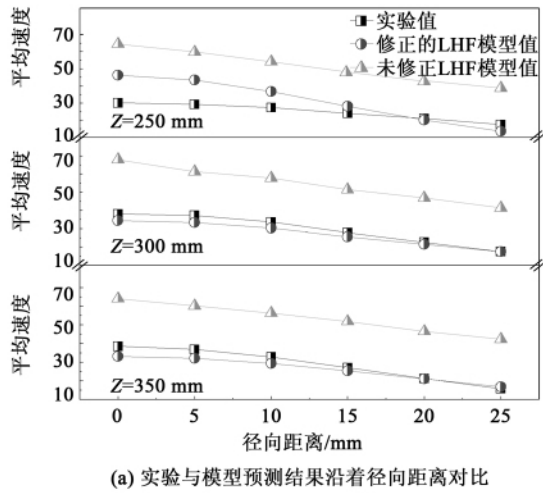


图 6 雾化液滴平均速度的实验结果与模拟预测结果

Fig. 6 Test results and the simulation and prediction ones of the average velocity of the atomized liquid droplets

### 4 结 论

采用修正的 LHF 模型对气泡喷嘴下游场液滴速度进行预测,同时结合喷嘴雾化实验结果进行对比,得出结论:

(1) 在雾化下游场轴向距离大于 250 mm 时,雾化液滴的粒径沿着径向距离变化较小,同时液滴的速度与粒径不相关;

(2) 当液滴速度与粒径满足结论(1)时,采用修正的 LHF 模型可以对气泡雾化下游场稀相区(轴向距离大于 250 mm)的液滴速度进行预测;

(3) 随着轴向距离的增加,气泡雾化中心及边

缘处液滴速度的模型预测值与实验值越来越接近。

### 参考文献:

[1] Jedelsky J, Jicha M, Slama J, et al. Development of an effervescent atomizer for industrial burners [J]. Energy Fuels, 2009, 23(12): 6121-6130.

[2] Ghaemi S, Rahimi P, Nobes D S. Effect of bubble generation characteristics on effervescent atomization at low gas-liquid ratio operation [J]. Atomization and Sprays, 2010, 20(3): 211-225.

[3] Ejim C E. Effect of liquid viscosity, surface tension and nozzle size on atomization in two-phase nozzles [D]. Alberta: University of Alberta, 2008.

[4] Shearer A J, Tamura H, Faeth G M. Evaluation of a locally homogeneous flow model of spray evaporation [J]. Journal of Energy, 1979, 3: 271-278.

[5] Panchagnula M V. High mass flow rate effervescent atomization [D]. Indiana: Purdue University, 1994.

[6] White F M. Viscous fluid flow [M]. New York: McGraw-Hill, 1992.

[7] Catlin C A, Swithenbank J. Physical processes influencing effervescent atomizer quality in the slug and annular flow regimes [J]. Atomization Sprays, 2001, 11(5): 575-595.

[8] Kim J Y, Lee S Y. Dependence of spraying quality on the internal flow pattern in effervescent atomizers [J]. Atomization Sprays, 2001, 11(2): 735-756.

[9] Lorber M, Schmidt F, Mewes D. Effervescent atomization of liquids [J]. Atomization Sprays, 2005, 15(2): 145-168.

[10] Benett F G S, Eisenklam P. Gaseous entrainment into axisymmetric liquid sprays [J]. Journal of the Institute of Fuel, 1969, 42: 309-315.

( 辉 编辑)

### • 书 讯 •

## 环境生物技术实验

本书在汲取国内外众多优秀教材、文献资料的基础上,系统地介绍了当前环境生物技术领域涉及的一些基本实验原理和前沿性研究方法。全书分 5 部分共 28 个实验,主要包括环境生物技术的基本实验技术、综合实验技术、研究性实验技术、应用实验及现代分子实验技术。本书内容全面,文字简明,概念清晰,可帮助读者有效地掌握环境生物技术这一新兴学科的基本知识、操作技能及研究思路与方法。

本书可作为高等院校环境工程、环境科学、给水与排水工程、资源与环境等专业的实验课教材,也可供相关专业科技人员参考。

作者: 刘娜等人

ISBN: 9787302307310

定价: 19 元

出版日期: 2012-12-3

tem when R236fa ,R600 and R114 are used ,a relatively big net power output can be produced with a relatively high thermal efficiency. The variation law of the exergy efficiency of the system with the evaporation pressure is similar to that of the thermal efficiency. The exergy efficiency of the system when R600 is used can hit the highest of 45.98% . To raise the evaporation pressure can effectively enhance the exergy efficiency of the system and decrease the exergy loss of the system. From the viewpoint of the difficulty of the exhaust steam to be condensed ,the authors believe that R245fa and R123 should be the working media applicable for organic Rankine cycle systems. **Key words:** organic working medium ,low temperature waste heat-produced steam ,organic Rankine cycle ,thermodynamic performance

采用射线法对垂直上升管环状流的研究 = **Study of the Annular Flow in Vertical Risers by Using Ray Methods** [刊 ,汉]HU Ri-cha ,BI Qin-cheng ,ZHAO Yu ,et al( National Key Laboratory on Multiphase Flow in Power Engineering ,Xi'an Jiaotong University ,Xi'an ,China ,Post Code: 710049) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2013 28( 2) . - 145 ~ 149

Discussed were the void fraction in a section of a vertical riser in annular flow measured by a single beam of  $\gamma$ -ray and the evolution of the flow pattern. The quick closing valve method was used to calibrate an average void fraction in a section and compared with two calculation formulae of the ray method. The errors as calculated by using the linear and logarithm formula were within a range of  $\pm 6.2\%$  and  $\pm 7.1\%$  respectively. Based on the void fractions in the section and the distribution of the liquid phase ,the evolution of the annular flow in the vertical riser was determined to pass through the following three zones ,namely ,non-uniform distribution zone ,relatively stable zone and fault zone. The chart showing the distribution of void fraction in the section by using the ray method and the magnitude of the relative error as calculated between the two formulae can reflect the evolution of the annular flow. The real-time photos verified the accuracy of the results detected by using the ray method. **Key words:**  $\gamma$ -ray densiometer ,void fraction in a section ,annular flow

气泡雾化下游场液滴速度的预测模型研究 = **Study of a Model for Predicting the Liquid Drop Velocity in the Lower Reaches of a Flow Field Under the Effervescent Atomization** [刊 ,汉]FANG Heng-he ,XIE Jing ( College of Food Science ,Shanghai Oceanology University ,Shanghai ,China ,Post Code: 201306) ,LIU Meng ( College of Energy Source and Environment ,Southeast University ,Nanjing ,China ,Post Code: 210096) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2013 28( 2) . - 150 ~ 153

To predict the liquid drop velocity in the lower reaches of a flow field under the effervescent atomization ,established was a model for predicting the above-mentioned liquid drop velocity under the gas-liquid two-phase flow atomization with the help of a corrected local homogenous flow ( HLF) model and compared was the velocity such obtained with

that measured by using a laser Doppler particle analyzer ( PDPA) . It has been found that when the particle diameter of the liquid drop in the sparse phase zone along the radial direction has little change and is irrelative to the particle velocity ,the corrected LHF model can predict the liquid drop velocity in the lower reaches of the flow field atomized. With an increase of the axial length of the mist torch ,the predicted values of the liquid drop velocities in both atomization center and rim are more and more close to the test values. **Key words:** effervescent atomization ,liquid drop velocity ,prediction model

气液两相横向绕流错列管束上阻力系数和阻力脉动系数的试验研究 = **Experimental Study of the Resistance Coefficient and Fluctuation Coefficient of a Staggered Tube Bundle Laterally Going Around by a Gas-liquid Two-phase Flow** [刊 汉]SU Xin-jun ( Tianjin City Key Laboratory on Refrigeration Technology ,Tianjin Commerce University ,Tianjin ,China ,Post Code: 300134) ,WANG Dong ,LIN Zong-hu( National Key Laboratory on Multiphase Flow in Power Engineering ,Xi'an Jiaotong University ,Xi'an ,China ,Post Code: 710049) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2013 28( 2) . - 154 ~ 157

By using a resistance strain meter and a beam type resistance strain sensor ,experimentally studied were the resistance coefficient and fluctuation resistance coefficient of a staggered tube bundle in three tows laterally swept by a gas-liquid two-phase flow. Organic glass cylinders with a diameter of  $\phi 30$  mm were used as the tubes for testing ,the flow pattern of the gas-liquid two-phase flow was of cell shape and the Reynolds number of the two-phase gas flow was within a range from  $2.0 \times 10^4$  to  $6.0 \times 10^4$  with the void fraction in the section ranging from 0 to 0.30. It has been found from the test that with an increase of the void fraction and the Reynolds number ,the fluctuation resistance coefficient of the cylinders will decrease while the resistance coefficient of the staggered cylinders will increase with an increase of the void fraction. **Key words:** gas-liquid two-phase flow ,fluctuation resistance coefficient ,gap flow ,staggered cylinder

流化床  $O_2/CO_2$  燃烧( V) - 褐煤的高氧浓度燃烧优化 =  **$O_2/CO_2$  Combustion in a Fluidized Bed( V) -Optimization of Lignite Combustion at a High Oxygen Concentration** [刊 汉]ZHAO Ke ,TAN Li ,DUAN Cui-jiu , et al( Engineering Thermophysics Research Institute ,Chinese Academy of Sciences ,Beijing ,China ,Post Code: 100190) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2013 28( 2) . - 158 ~ 163

When combustion at a high oxygen concentration takes place in a circulating fluidized bed ,the thermal fragmentation and combustion characteristics of lignite will change. To optimize the combustion of lignite at a high oxygen concentration ,the influence of the primary air oxygen concentration and the secondary air flow proportion on the combustion stability ,pollutant formation characteristics and combustion efficiency was studied in a 0.15 MW circulating fluidized bed test system. The test results show that lignite can realize a stable combustion when the oxygen concen-