

## 油水乳化液中长气泡漂移速度的研究

王跃社, 刘 磊, 周芳德

(西安交通大学 动力工程多相流国家重点实验室, 陕西 西安 710049)

**摘 要:** 建立圆管内滞止液体中长气泡漂移速度动量分析模型。用高速动态分析仪测量不同含水率  $\beta$  下, 滞止油水乳化液中弹状流型时 Taylor 气泡的漂移速度。结合前人的实验数据, 依据 Wallis 的流动分类准则, 给出了油水乳化液中长气泡漂移速度的半经验性公式; 揭示了流动特性不同的液体中, 长气泡的运动规律。

**关键词:** 油水乳化液; Taylor 气泡; 漂移速度; 研究

中图分类号: O359

文献标识码: A

## 符号说明

$A$ —管道流通截面积/ $m^2$	$C$ —系数
$D$ —管道直径/ $m$	$Eö$ —Eötvös 数
$Fr_{T0}$ —Taylor 气泡无量纲漂移速度	$g$ —重力加速度/ $m \cdot s^{-2}$
$h$ —高度/ $m$	$k$ —系数
$P_0$ —滞止压力/ $Pa$	$Re$ —雷诺数
$R_{T0}$ —无量纲速度比率	$U_{f0}$ —下降液膜运动速度/ $m \cdot s^{-1}$
$U_{T0}$ —Taylor 气泡漂移速度/ $m \cdot s^{-1}$	$\alpha$ —含气率
$\beta$ —含水率( $\frac{\text{水相体积}}{\text{水相体积} + \text{油相体积}}$ )	$\theta$ —管道倾角
$\nu$ —动力粘度/ $Pa \cdot s$	$\rho$ —密度/ $kg \cdot m^{-3}$
上角标	下角标
—平均值	TB—Taylor 气泡的

## 1 前言

油气运输和化工生产中, 经常出现的流动型态是弹状流。弹状流是以几乎充满流通截面的长气泡为主要特征。研究长气泡的运动规律, 对深刻理解弹状流的流动特性和形成机理以及建立气、液两相流的机理模型, 具有重要的理论价值。

在过去几十年中, 对于滞止液体管内长气泡(又称 Taylor 气泡)的运动已做了大量的研究工作<sup>[1]</sup>。但是针对油水乳化液的研究工作开展得很少, 可借鉴的第一手实验数据非常匮乏, 所以进行这方面的工作显得很有必要。

油水乳化液在气体扰动和不同状态下, 既有粘性牛顿流体的性质, 又有非牛顿流体的流变特性<sup>[2]</sup>,

因而其粘度变化很大。为了突出油、气、水混合物流动的特殊性, 必须设法减弱粘度  $\mu$  和表面张力  $\sigma$  的影响, 为此本文引入无量纲速度比率<sup>[3]</sup>:

$$R_{T0} = \frac{Fr_{T0}(Re, Eö, \theta)}{Fr_{T0}(\infty, Eö, \theta)} \quad (1)$$

式中分母对应着惯性控制流动, 在本文中是空气—水系统, 即体积含水率  $\beta = 1$  时。其中  $Fr_{T0} = \frac{U_{T0}}{\sqrt{gD}}$ ,

$$Re = \frac{ud}{\nu}, Eö = \frac{\rho g D^2}{\sigma}.$$

## 2 实验方法

美国 Kodak 公司生产的 EKTAPRO 1000 型高速动态分析仪是先进的磁带记录式高速摄像系统。本系统可用于气液、气固、液固多相流系统及运动物体或状态的动态变化过程与特性的记录和分析。特别是对于高速运动的场合尤为有效。本文利用高速动态分析仪可以得到 Taylor 气泡的运动速度和 Taylor 气泡的平均含气率。实验在西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室油气水实验台上进行。实验步骤如下:

(1) 将实验段中充满水, 关闭水路。

(2) 用空压机将空气吹入实验段内, 调节气量至出现一个理想的 Taylor 气泡为止, 即刻关闭气路。

(3) 用高速动态分析仪以 1 000 幅/秒的速度拍摄, 取得气弹上升漂移速度和相关量。

(4) 调整管路倾角, 重复步骤 2~3。

在  $0 < \beta < 1$  时, 事先按比例将油水混合物充分搅拌混合, 沿水路送入实验段, 重复步骤 2~3。

## 3 Taylor 气泡漂移过程的动量分析模型

倾斜管内滞止液体中 Taylor 气泡在浮力的作用下沿管子上升, 与此同时气泡上部的水在气泡挤压

下在气泡下部以下降液膜的形式向下运动, 以填充 Taylor 气泡向上运动后产生的空间。为了分析方便, 特作以下假定:

- (1) 气泡形状固定不变, 即不考虑上升引起的压力改变对其形状的影响。
- (2) 下降液膜在经过 Taylor 气泡头部后, 其厚度  $\delta$  保持恒定不变。
- (3) 气液界面和气固界面的摩擦力不计。

在此假设的基础上, 对 Taylor 气泡头部区域进行动量分析, 建立 Taylor 气泡漂移速度的物理机理模型。

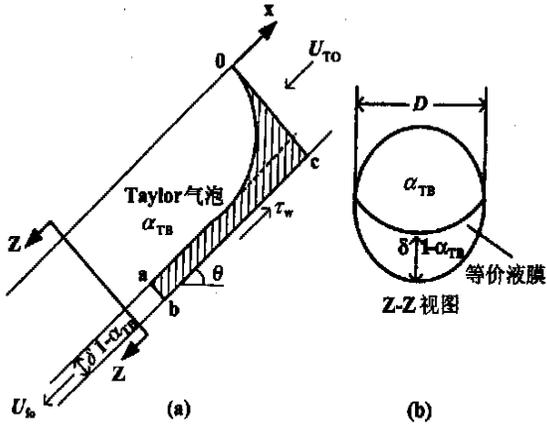


图 1 滞止液体中 Taylor 气泡流动结构示意图

假定 Taylor 气泡以速度  $U_{T0}$  沿管子向上运动, 如图 1(a) 所示。将坐标系原点固定在气泡头部顶点 0 上, 指向沿管子上升方向, 那么 Taylor 气泡头部的上游液体将以相对于气泡  $U_{T0}$  的速度向下运动, 气泡下部的液膜以速度  $U_{f0}$  向下运动。取 Taylor 气泡头部以下的液体为研究对象 (图 1(a) 中的阴影部分 0-a-b-c-0)。作用于该区域的力有滞压力 (a-b 面和 0-c 面)、摩擦切应力  $\tau_w$  (b-c 面)、气泡所受浮力的反作用力 (0-a 面) 和重力。在所选坐标系中, 0 为滞止点, 由于不计气液和气固界面摩擦力, 依据 Bernoulli 方程可得滞止点 0 的压力为:

$$p_0 = -\frac{1}{2} \rho U_{T0}^2 \quad (2)$$

截面 0-c 轴线上作用的滞压力为:

$$p_0 A + \rho g \frac{D}{2} A \cos \theta \quad (3)$$

下降液膜在经过头部后, 其厚度  $\delta$  可保持恒定。即达到了自由下降液膜, 因而作用在 0-c 截面的摩擦切应力  $\tau_w$  将与重力平衡。换句话说, 作用于控制体的重力和摩擦力对于研究对象的动量不产生贡献。这里将倾斜管中下降液膜的形状当成半椭圆形来处理

(如图 1(b)) (长轴为  $D$ , 短轴为  $D-2\delta$ ), 并且认为下降液膜的压力重心距气液界面的距离  $h$  满足:

$$h = \left( \frac{1}{2} - \alpha_{TB} - \frac{4\alpha_{TB}}{3\pi} \right) D \quad (4)$$

式中  $\alpha_{TB}$  为 Taylor 气泡区的含气率。

那么, 作用在 a-b 截面的滞压力可表示为:

$$\rho g h \cos \theta (1 - \alpha_{TB}) A \quad (5)$$

另外, 作用在 0-a 截面上浮力作用力为  $\rho V g$ ,  $V$  为气泡头部体积。

a-b 截面的动量为:

$$\rho U_{f0} (1 - \alpha_{TB}) A \cdot U_{f0} \quad (6)$$

0-c 截面动量为:

$$\rho U_{T0} A \cdot U_{T0} \quad (7)$$

由动量定理, 综合以上各式可得:

$$\rho U_{f0}^2 (1 - \alpha_{TB}) A + \rho g \cos \theta \cdot h (1 - \alpha_{TB}) A - \frac{1}{2} (\rho U_{T0}^2 A + \rho g D A \cos \theta) = \rho V g \sin \theta \quad (8)$$

由连续方程可得:

$$U_{f0} = \frac{U_{T0}}{1 - \alpha_{TB}} \quad (9)$$

将式(9)代入式(8)中, 并引入无量纲量:

$$Fr_{T0} = \sqrt{\frac{2(1 - \alpha_{TB})}{(1 + \alpha_{TB})}} \left\{ \frac{V}{AD} \sin \theta - X \cos \theta \right\} \quad (10)$$

其中

$$X = \left[ \alpha_{TB}^2 \left( 1 - \frac{4}{3\pi} \right) + \alpha_{TB} \left( \frac{4}{3\pi} - \frac{3}{2} \right) \right] \quad (11)$$

只须已知 Taylor 气泡头部形状  $V$  和气泡区的含气率  $\alpha_{TB}$ , 式(10) 就可以作为 Taylor 气泡漂移上升速度的机理模型关系式。

#### 4 静止水中 Taylor 气泡漂移速度

本文实验在  $D = 40 \text{ mm}$ ,  $\theta = 90^\circ, 85^\circ, 80^\circ$  条件下完成的, 为了保持数据的可信度, 每个量在同一条件下测量十次, 再取其平均值。同时还参照不同管径内, 相近倾角条件下, Zukoski (1966)<sup>[4]</sup> 的实验数据。

Taylor 气泡区的含气率  $\alpha_{TB}$  在该区域内含气率的大小取决于壁面摩擦切应力和液膜重量的平衡过程。在本文实验条件下, 对应的  $Re$  数较高, 结合 Zukoski<sup>[4]</sup> 的数据, 可以发现由于管倾角的改变会引起剪应力改变, 进而引起摩擦力和重量的平衡关系的改变, 也就引起含气率的改变。在高  $Re$  数时, 含气率是  $Re$  数的弱函数, 而主要取决于管倾角, 如图 2

所示,依据最小二乘拟合法, Taylor 气泡区的含气率  $\bar{\alpha}_{TB}$  应满足下述关系:

$$\bar{\alpha}_{TB} = 0.519 + 0.096\theta^{0.2823} \quad (12)$$

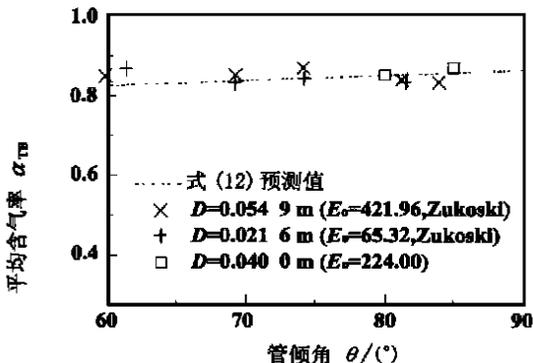


图2 含气率  $\alpha_{TB}$  随管倾角变化示意图

Taylor 气泡头部的体积  $V$  由上节动量分析可知, Taylor 气泡的上升漂移速度对其头部形状有很大的依赖性。结合 Zukoski<sup>[4]</sup> 的实验数据和本文的实验数据发现,在  $90^\circ$  倾角时,所有管径下气泡头部体积几乎相同。对于所有数据,空气-水系统表面张力  $\sigma$  为常数,  $E_o$  数随管径而变化。当  $E_o$  较大时,惯性力占主导地位,这时下降液膜达到平衡厚度需要较长的距离,这样气泡头部形状相对较大,也就对应着较大的体积  $V$  和漂移速度  $Fr_{T0}$ 。反之,气泡头部更圆滑,使得头部体积  $V$  和  $Fr_{T0}$  数减小。

如图3所示,无量纲气泡头部形状  $\frac{V}{AD} \sin\theta$  大约为正弦函数和线性函数的和。因此,假设下列关系式成立:

$$\frac{V}{AD} \sin\theta = k_1 + k_2\theta + k_3 \sin 2\theta \quad (13)$$

表面张力效应在系数  $k_1, k_2, k_3$  中计入。通过实验数据,依据最小二乘拟合法可得:

$$\begin{aligned} k_1 &= 0.301 E_o^{0.199} - 0.463 \\ k_2 &= -0.301 E_o^{0.199} + 1.555 \\ k_3 &= 2.661 E_o^{0.04} - 2.539 \end{aligned} \quad (14)$$

Taylor 气泡的漂移速度至此式(10)~式(14)提供了  $E_o > 60$  时基于物理机理的空气-水系统 Taylor 气泡漂移速度模型。图4表明预测式(10)和本文以及 Zukoski<sup>[4]</sup> 的实验数据符合良好。

### 5 油水乳化液中 Taylor 气泡漂移速度

为 40 mm 的有机玻璃管内完成的。油水两相注入管内之前进行了充分的混合。在  $\theta = 80^\circ, 85^\circ$  和  $90^\circ$  三个角度下,用高速动态分析仪和光纤探针辅助测量的方法,详尽测定了六种含水率 ( $\beta = 0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 0.6, 0.8$ ) 下 Taylor 气泡漂移速度。在所有实验范围内,也就是说无论是水包油 ( $\beta > 0.3$ ) 流动,还是油包水 ( $\beta < 0.3$ ) 流动<sup>[2]</sup>, Taylor 气泡漂移速度的总趋势均相似,即随着倾角从垂直方向减小,气泡漂移速度将逐渐增大,这一点与空气-水系统所呈现的规律相近。但也有一点与空气-水系统截然不同,在垂直管内,气泡的上升漂移速度在不同含水率时不再趋近于同一值,而是存在着很明显的差异。

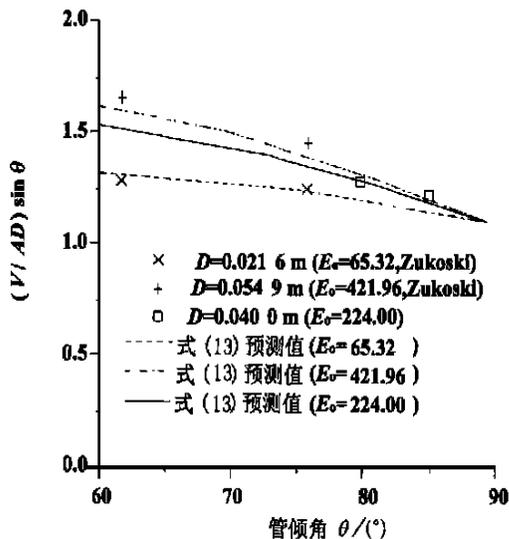


图3 无量纲气泡体积  $\frac{V}{AD} \sin\theta$  随管倾角变化示意图

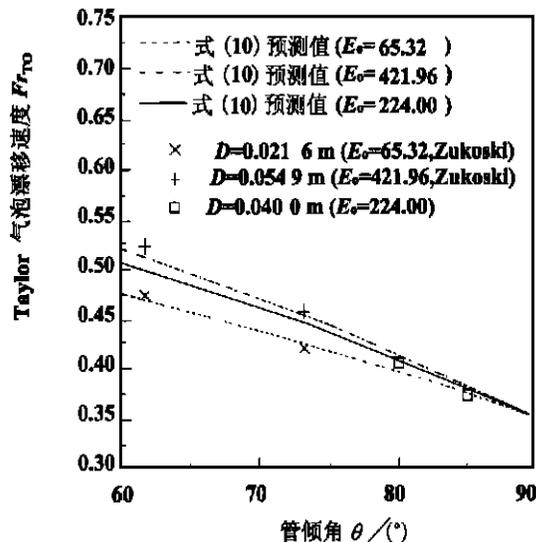


图4 式(10)预测值与实验数据的对比

油水混合物中 Taylor 气泡漂移速度是在管内径

图 5 为油包水流动时, Taylor 气泡漂移速度随管子倾角的变化曲线图。随着分散相水相的增大, 平均气泡漂移速度在减小, 特别是在  $\beta = 0.3$  附近, 即油包水和油包水连续相转化点时, 气泡的平均漂移上升速度减小得很多。图 6 为水包油流动时, Taylor 气泡上升漂移速度的实验数据。随着分散相油相的减小, 气泡平均上升漂移速度在增大, 但增大的程度与油包水流动时相比要小得多。

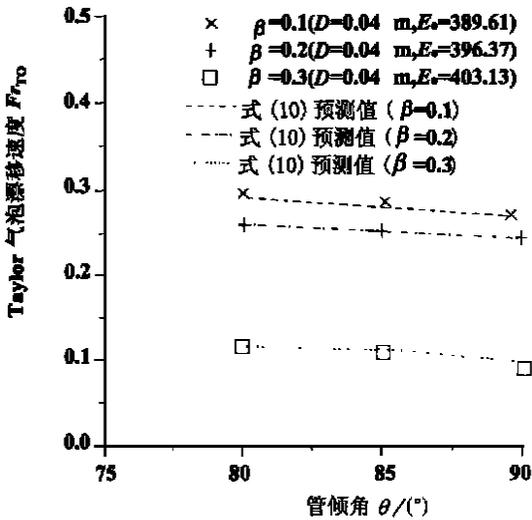


图 5 油包水时长气泡漂移速度随管倾角示意图

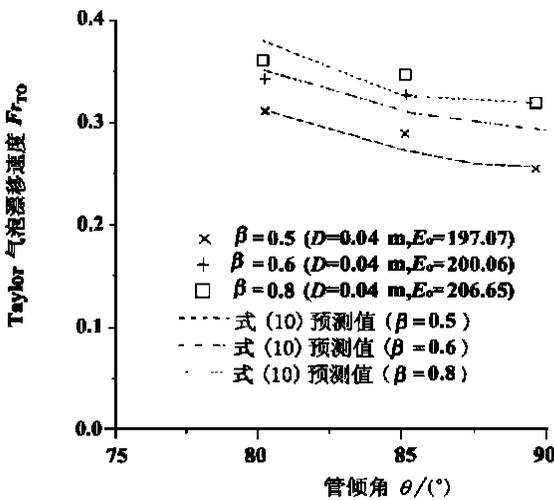


图 6 水包油时长气泡漂移速度随管倾角示意图

由此可见, 在油、气、水系统中 Taylor 的漂移速度更多地受到系统粘度、表面张力(由于连续相的不同)的影响。

### 6 油水乳化液中 Taylor 气泡漂移速度的半经验性模型

本文的实验数据如图 7 所示。为了进一步揭示大范围内 Taylor 气泡的运动规律, 本文按照 Wallis 流动分类原则<sup>[3]</sup>, 将本文数据加以归纳总结, 给出油水混合物中 Taylor 气泡漂移速度半经验性模型关系式。

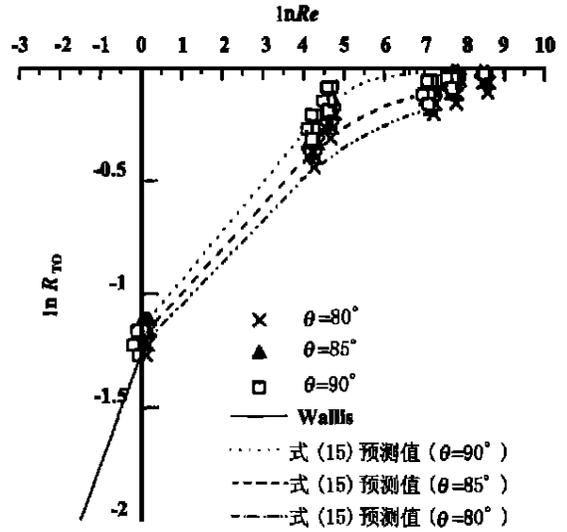


图 7  $0.3 < \beta < 0.8$  时 Taylor 气泡漂移速度示意图

(1)  $Re > 2000$  ( $0.3 < \beta \leq 1$ )

这个区域的流动为惯性力控制区, 对应着油、气、水三相弹状流的水包油流型。在该流动区内, 所有倾角条件下  $Re \rightarrow \infty$ , 对应着  $R_{T0} \rightarrow 1$ 。这时无无论在何种流动特性流体中, Taylor 气泡的漂移速度均可用式(10) ~ 式(14)来预测。

(2)  $Re < 2000$  ( $\beta < 0.3$ )

这个区域内, 属于油、气、水三相流的油包水流型区域, 此时惯性力和粘性力效应交织在一起, 因而流动比较复杂。由于油水乳化液本身的物理性质, 很难准确地测量出含气率  $\alpha_{TB}$ , 以及气泡头部形状  $V$ , 所在该区域内的流动速度只能表示为无量纲速度比率  $R_{T0}$  随  $Re$  数的变化关系, 如图 7 所示。

结果表明, 本文得到油水混合物中在不同倾角下, Taylor 气泡的漂移速度比率随  $Re$  数的变化满足对数抛物线规律。依据 Wallis<sup>[3]</sup> 的渐近线模化方法, 可得出下列符合本文油水两相混合物中 Taylor 气泡漂移上升速度的半经验性关联式。

$$\ln R_{T0} = 0.11C \left[ \left( \frac{\ln Re - 5.18}{C} \right)^2 + 1 \right]^{\frac{1}{2}} + 0.11(\ln Re - 5.18) \quad (15)$$

其中

$$C = \frac{4.561}{\ln\theta} + 5.108\sin 2\theta \quad (16)$$

上式和本文中数据的拟合情况较好(图7)。通过式(15)和式(10)的相互迭代,能较好地预测本文的实验结果(图5和图6)。

对于 Wallis 的粘性控制区 ( $Re < 3$ ), 本文涉及的管内流动不存在这种特性。图7中同样给出了 Wallis 的结果。

## 7 结论

(1) 针对空气—水系统建立了基于物理概念上的 Taylor 气泡漂移速度动量分析机理模型。给出滞止空气—水系统中 Taylor 气泡漂移速度的预测公式(10)。

(2) 详细测定了  $D = 40\text{ mm}$  管内, 三个管倾角, 不同含水率条件下, 滞止油水混合物中 Taylor 气泡上升漂移速度。引用 Wallis 关于多相流体的流动分类方法和概念, 给出不同流动区域油水混合物中

Taylor 气泡漂移速度的半经验预测模型。对于油水乳液, 当  $\beta \leq 0.3$  时, Taylor 气泡的漂移速度处于惯性力和粘性交织控制区, 流动极为复杂, 利用式(10)和式(15), 联合迭代给本文的实验数据作出了较合理的预测。 $0.3 < \beta < 1$  时, 此时  $Re > 2000$ , 流动处于惯性力控制区, 式(10)的预测结果与本文的数据相吻合。

## 参考文献:

[1] DAVIES R M, TAYLOR G I. The mechanism of large bubbles rising through liquids in tubes[J]. *Proc R Soc London*, 1950, A200(4): 375—390.

[2] 王跃社. 垂直及倾斜上升管内油气水三相弹状流流动特性的研究[D]. 西安: 西安交通大学, 1998.

[3] WALLIS G B. One dimensional two-phase flow[M]. New York: Mc Graw Hill, 1969.

[4] ZUKOSKI E E. Influence of viscosity, surface tension and inclined angle on motion of long bubble in closed tubes[J]. *J Fluid Mech*, 1996, 25(5): 821—837.

(何静芳 编辑)

(上接第 600 页)

依次减少, 高于  $1000\text{ }^\circ\text{C}$  时, 灰中硫含量随时间延长有不同程度的增加。这是由煤中无机硫化物的释放和钙基矿物的硫化反应同时起作用引起的, 低温下煤中无机硫化物的释放起主要作用, 延长停留时间提高其释放率, 高温下钙基矿物的固硫作用占优势, 增加停留时间能够提高钙基矿物的转化率。

## 5 结论

(1) 燃烧温度、停留时间和反应气氛对钙基固硫产物  $\text{CaSO}_4$  的生成和分解影响显著。

(2) 神木煤钙基矿物高温下能够脱除烟气中部分  $\text{SO}_2$ 。

(3) 神木煤钙基矿物脱硫主要发生在煤粉燃烧后期, 即煤灰中的  $\text{CaO}$  起脱硫作用。

## 参考文献:

[1] 史学锋, 冯波. 流化床煤燃烧中的脱硫研究综述[J]. 电站系统工程, 1998, 14(6): 18—22.

[2] 熊友辉. 煤中钙基矿物的自脱硫作用. [J] 电站系统工程, 1998,

14(2): 40—42

[3] YANG R T, SHEN M S. Fluidized-bed combustion of coal with lime additive catalytic sulfation of lime with iron compounds and coal ash [J]. *American Chemical Society*, 1978 12(8): 950—959.

[4] MUZIO L J, OFFEN G R. Assessment of dry sorbent emission control technologies Part1. Fundamental processes[J]. *Air Pollut Control Assoc* 1987(37): 642—654.

[5] HEAP M. Energy and Environmental Research. Corp[M]. Irvine, Cal, 1983.

[6] WUYIN WANG, INGEMAR. Modeling of high-temperature desulfurization by Ca-based sorbents[J]. *Chemical Engineering Science* 1998, 53(11): 1973—1989.

[7] TURKDOGEN E T. Physical Chemistry of High Temperature Technology[R]. New York: Academic Press, 1980.

[8] 戴长文. 硫酸盐热分解温度的原子势标度[J]. 化学通报, 1986, 49(11): 37—40, 63.

[9] GRUNCHAROV IV, PELOVSKI Y. Effect of some additive on the thermochemical decomposition of phosphogypsum[J]. *Gypsum & Lime*, 1986(205): 385—388.

[10] 周松林, 胡道和. 磷石膏分解工业反应动力学的研究[J]. 化肥工业, 1994, 21(2): 16—23.

[11] WHEELOCK T D. Sulfuric acid from calcium sulfate[J]. *Chemical Engineering Progress* 1968, 64(11): 55—60.

(渠源 编辑)

Sb, Co, Ni) have their quantity increased consecutively, depending on the content of bottom ash—fly ash—slag—fouling. Meanwhile, rare earth elements and radioactive element (U, Th) on the contrary assume an opposite tendency. In the fly ash of burned coal the content of many trace elements in iron particles happens to be higher than that of calcium and silicon-aluminum particles. The distribution characteristics of in-coal accompanying elements in the combustion products is related to the chemical properties and assigned state of the element itself. **Key words:** accompanying element in coal, fly ash, bottom ash, slag and fouling, iron micro-ball

**油水乳化液中长气泡漂移速度的研究 = A Study on the Drift Velocity of Long Bubbles in Oil-water Emulsion**

[刊, 汉] / WANG Yue-she, LIU Lei, ZHOU Fang-de (National Key Lab of Power Engineering Multi-phase Flow under the Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. —2001, 16(6)—604~608

Set up was a momentum analysis model of the drift velocity in stagnant liquid of long bubbles in an annular tube. Taylor bubbles drift velocity at various rates of water content in stagnant oil-water emulsion and under a slug flow regime was measured with the use of a high-speed dynamic analyzer. In conjunction with available experimental data and on the basis of Wallis' flow classification criteria put forward is a semi-empirical formula for Taylor bubble drift in oil-water emulsion, which reveals the law of motion of long bubbles in liquids with different hydrodynamic characteristics. **Key words:** oil-water emulsion, Taylor bubble, drift velocity, study

**炉内喷钙脱硫技术的工业应用研究 = Industrial Applied Research of In-furnace Sorbent Injection-based Desulfurization Technology**

[刊, 汉] / WU Shu-zhi, ZHAO Chang-sui, DUAN Yu-feng, et al (Education Ministry Key Lab of Clean Coal-based Power Generation and Combustion Technology under the Southeastern University, Nanjing, China, Post Code: 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. —2001, 16(6)—609~611

Presented is a desulfurization project undertaken on two 10 t/h chain grate stokers along with some relevant test results. The desulfurization system comprises two parts: 1. The injection of sorbent into a furnace in conjunction with four-corner vortex firing technology; and 2. The humidification and activation of desulfurization agents for a tail portion through the use of a Venturi nozzle and water-film dust collector. The test results indicate that the introduction of a four-corner vortex and secondary air techniques can markedly improve the mixed calcination of desulfurization agents in the furnace without affecting the boiler operation and is conducive to enhancing the desulfurization efficiency in the furnace. The use of Venturi water nozzle and a dust collector can lead to the activation of those calcium oxide particles, which have not undergone reaction, thus increasing the reaction speed of desulfurization. This makes it possible to realize a higher desulfurization efficiency at a relatively low Ca/S ratio. During the upgrading for environmental protection purposes of industrial boilers originally fitted with Venturi water nozzles and water-film dust collectors the technology of in-furnace sorbent injection with tail portion humidification and calcium oxide activation enjoys a significant techno-economic edge. **Key words:** desulfurization, upgrading, sorbent injection into a furnace, Venturi wet dust collector

**烟煤与石油焦掺混燃烧特性研究 = Research on the Combustion Characteristics of Burning Bituminous Coal Mixed with Petroleum Coke**

[刊, 汉] / YANG Ya-ping, CAI Song (Thermal Energy Engineering Research Institute under the Southeastern University, Nanjing, China, Post Code: 210018) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. —2001, 16(6)—612~614, 631

Based on a combustion test of burning a mixture of petroleum coke and coal dust on a small-sized test rig an analytical study was conducted of the effect of various factors on the combustion process. These factors include: fuel characteristics of bituminous coal and petroleum coke, ignition performance of mixed fuel dust, combustion characteristics, pulverized coal fineness, air distribution conditions and thermal load intensity. **Key words:** combustion unit, mixed pulverized coal, pyrolytic characteristics, combustion characteristics