

气固两相 Y 型分支管网流量分配特性的试验研究与数值模拟

段广彬, 胡寿根, 赵 军, 王丽珏

(上海理工大学能源与动力工程学院, 上海 200093)

摘 要: 在水平 Y 型分支管道中, 采用压缩空气作为输送动力, 小米作为输送介质进行气力输送试验, 对分支管道的固体流量分配特性进行了研究。试验表明, 变动支管与主管中轴线夹角与气体表观速度对固相分配特性具有较大影响。同时, 采用 Euler-Lagrange 两相流研究方法, 固相采用离散相 (DPM) 模型, 采用 Fluent 软件对 3 种不同夹角的 Y 型分支管内气固两相流动进行了数值模拟。模拟结果较好地预估了颗粒在分支处的流动形态、颗粒在分支管内的运动轨迹, 以及重新实现颗粒相流场均匀分布所需的距离。通过对分支管内固体颗粒质量分配的数值模拟结果与试验结果比较, 发现两者之间相对误差较小。

关 键 词: 气固两相流; Y 型分支管; 流量分配特性; 数值模拟; 夹角

中图分类号: TK223 文献标识码: A

引 言

气力输送是利用气体的能量来输送固体颗粒的一种技术^[1]。目前, 管道气力输送的研究主要集中在单管管内输送, 主要包括水平、垂直、倾斜管道以及弯管气固两相流动特性和相应的数值模拟方面^[2~3], 对于实际工艺中也常采用的管网分流、截管分流时的两相流动特性研究及数值模拟方面的研究较少^[4]。管网分流分支管道输送的研究主要集中在单相流动和气液两相流动方面, 而常用的气固两相流动特性方面的研究则较少, 至今仍未形成统一的理论^[5~9]。

Y 型分支管网具有一定的工程应用背景, 其中, 在石油管路输送大型减压转油线、冶金矿产等行业及机械内部应用最为广泛^[7], 但在气固两相流动中鲜有报道。作为一种常见的管网分流形式, 将该分流形式应用到气固两相流动中, 丰富了气固两相的

管网的分流形式, 为管道布置进一步研究与应用提供了指导, 本研究就是在这样的背景下展开的。

固相流量分配特性是管网分流研究的一个重要参数, 考察其规律性对了解分流过程的性能指标有着重要的应用价值, 本文重点研究了气固两相流在 Y 型分支管网中固相流量分配特性的变化规律及与各影响参数的关系。研究发现, 分支管与主管的夹角对流量分配特性影响最大, 其次是气体表观速度; 而当气体速度较大时, 其对固相流量分配特性影响变小。因此, 在实际应用中, 当保持气体速度较大时, 选用合适的分支角度就能达到一定的质量分配比, 这对管网分流形式的选择具有较大的指导意义。最后, 采用数值模拟的方法对 Y 型分支管内的气固两相流动进行了研究。分析讨论了 Y 型分支管中颗粒的流动形态, 固体颗粒在管内的运动机理, 及分支管内颗粒质量的分配情况, 为进一步了解 Y 型分支管分流情况提供了依据。

1 试验装置

采用水平 Y 形分支管路进行气力输送试验, 系统如图 1 所示。主要由气源、发送系统、回收系统, 输送管道及数据采集系统组成。

试验采用压缩空气为输送动力, 利用涡轮流量计对空气流量进行测量。发料仓底部安装有与主输送管道相连的物料喷射器, 用于控制固体的质量流率^[9]。主输送管道长 8 m, 连接 Y 型分支接头。Y 型分支接头设计如图 2 所示, 以主管及其引线为中心线, 两分支管路中的一支为固定支管 A (收料仓 A), 其主管引线夹角保持 15° 不变, 另一支为变动支

收稿日期: 2008-11-16; 修订日期: 2009-03-06

基金项目: 上海市科委基金资助项目 (08JC1416300); 上海市重点学科建设基金资助项目 (J50501)

作者简介: 段广彬 (1983-), 山东聊城人, 上海理工大学博士研究生。

管 B (收料仓 B), 其与主管引线间夹角 β 分别取 5° 、 10° 、 15° 、 20° 、 25° 、 30° 6 个角度。分支接头采用 $\phi 32$ mm 有机玻璃制作, 便于流型的观测。两分支管路分别长 3.6 m, 其上装有精密压力表和压差传感器。

发料仓和收料仓 B 均装有称重传感器对物料质量进行在线实时测量。输送气体流量、分支管路压差值及发料仓、收料仓 B 的称重值等数据由计算机采集。

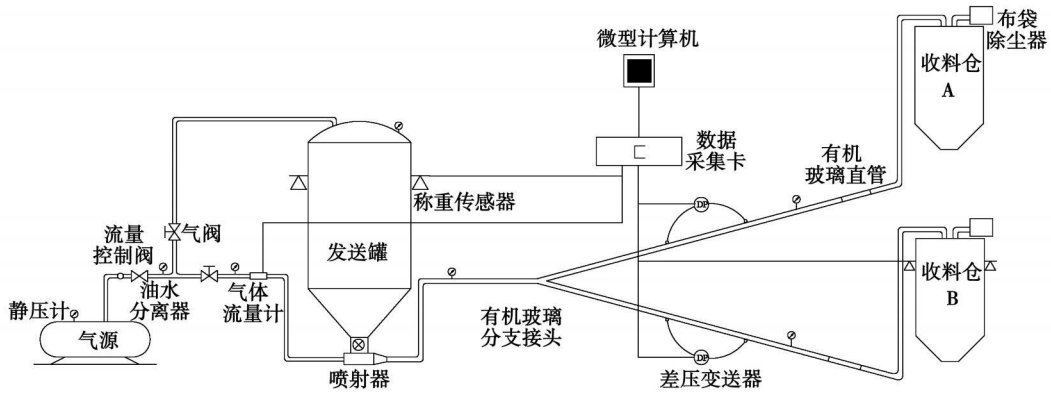


图 1 试验系统简图

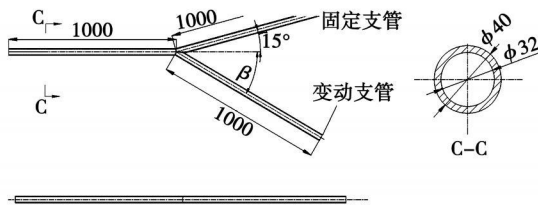


图 2 Y 型分支简图

试验的输送物料采用平均粒径为 2 mm, 密度为 $1\ 340\ \text{kg}/\text{m}^3$ 的小米进行研究。试验中采用的气体质量流率控制在 $35 \sim 65\ \text{m}^3/\text{h}$ 之间, 固气质量比控制在 $15 \sim 25$ 。本研究采用流入 B 分支管内的固体质量占总固体质量分数来表征两相流动的流量分配特性。

2 固相分配特性的研究

2.1 分支接头处的流动分析

试验过程中, 气固两相流体呈均匀悬浮流状态由主管流至 Y 型分支接头处, 因管道流通面积增大, 固相颗粒之间、固相颗粒与管壁面之间的碰撞机会相对减少, 同时, 高速输运状态下的固相颗粒由于受到较大惯性力的作用未沿分支管路外壁面流动, 而是脱离外壁面流向两分支管路内壁, 并在分支管路外壁与气固两相流主体间产生脱体流动, 这属于比较典型的康达效应。气固两相流充分发展后, 在分支管中重新表现为稳定的悬浮流动。

2.2 固相分配特性的表征

图 3 是小米颗粒分配到收料仓 B 中质量分数的变化曲线。由图可知, 当管路内气体流速较低时, 分配到收料仓 B 的固相质量分数较大, 随着表观气速的增加, 分配到收料仓 B 的固相质量分数逐渐减小。在相同的气体表观速度下, 随着变动支管 (B 支) 与主管中轴线角度 β 的增大, 分配到 B 支管路的固体质量逐渐减小。当气体表观速度高于一定值 (即沉积速度) 时, 分配到管路 B 的质量分数基本保持恒定, 有时还会略有增大。这是由于当气体表观速度大于沉积速度时, 高速气体携带固体颗粒行进, 经过分支处固体颗粒来不及重新分配, 在惯性力的作用下流入分支管, 此时气体表现速度对流量分配影响不大; 当气体表观速度小于沉积速度时, 分支管道流量分配特性变化较大。

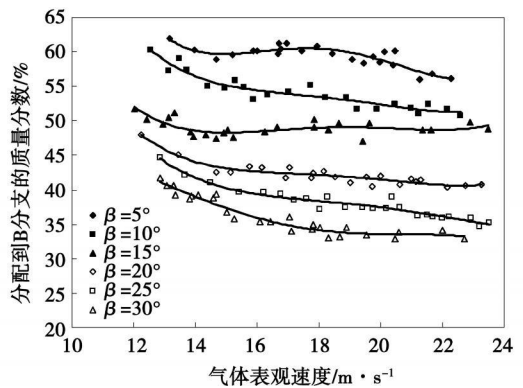


图 3 小米分配到仓 B 的质量比率

当两分支管与主管中轴线夹角相同 (均为 15°) 时, 固定支管和变动支管与主管道之间的局部阻力

及两分支管沿程相同, 收料仓 B 中的固体质量比率在 50% 左右略有波动, 这说明阻力相同的两分支管在气固两相流动过程中的物料分配是均匀的。

当分支管与主管中轴线夹角不相同, 研究发现, 与中心轴线夹角越小的分支管固体颗粒分配越多, 当气体速度降低时, 与主管中轴线夹角小的分支管更容易出现沉积, 固气比增大, 由此固体分配比例更大。同时可以看出, 小米的气体沉积速度 (约为 15 m/s); 对同一根分支管, 由安置于两分支管路上的压差传感器及静压计得到的数据表明: 当变动支 B 与主管中轴线夹角较小时, 变动支管路内的压差较固定支管路内的压差大。分支管路与主管中轴线间夹角越小, 其管路在试验过程中所测得的压差越大; 管道内的静压越小, 气固两相流体在管内所受阻力越小, 使得在 Y 型分支接头处由主管分流至变动支管路内的流体较另一分支多, 因流体气固两相分布均匀, 所以流入该分支管路的固相物料较固定支管路内多, 最终使得流入收料仓 B 的固相物料较多、质量分数较大。随着变动支夹角增大, 变动支管路内压差逐渐减小, 分流至流动支的固相物料也随之减少。由以上分析可以得出, 在本研究的试验条件下, 影响固相流量分配特性的主要因素是两支管与中心线的夹角与气体表观速度。在实际工程应用过程中, 可以根据分配比的不同, 确定相应的支管夹角与气体速度 (工程实际中, 如两个分支管的长度、高度或背压有可能不同, 也可能会影响分支管流量分配的变化, 在下一步研究工作中会有所体现)。

3 气固两相分流过程中的数值模拟

在充分考察气固两相流物理模型的基础上, 作出如下假定^[10]: (1) 颗粒为大小均匀的球形颗粒, 气相为牛顿流体, 各相物理性质不变; (2) 固相体积浓度较小, 颗粒间的相互碰撞可忽略; (3) 忽略湍流的各向异性。

3.1 控制方程

采用 Euler-Lagrange 法进行计算, 将气相视为连续介质, 将颗粒相视为离散介质^[11], 固相采用离散相 (DPM) 模型。

气相控制方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i u_j) = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \times$$

$$\left[\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \overline{u_i u_j} \right] + S_i \quad (2)$$

固体颗粒动量方程:

$$\frac{d u_p}{d t} = F_D (u - u_p) + \frac{g_x (\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F_x \quad (3)$$

其中, $F_D (u - u_p)$ 为颗粒单位质量所受曳力:

$$F_D = \frac{18 \mu C_D Re_p}{\rho_p d_p^2} \cdot 24$$

式中: u —气相速度; u_p —颗粒速度; μ —气体动力粘度; ρ —气体密度; ρ_p —颗粒密度; d_p —颗粒直径; F_x —作用于固相颗粒上的其它力 (包括压力梯度力, 旋转力, Saffman 升力等); Re_p —相对雷诺数 (颗粒雷诺数), 其定义为:

$$Re_p = \frac{\rho d_p |u_p - u|}{\mu} \quad (4)$$

曳力系数 C_D 采用表达式:

$$C_D = a_1 + \frac{a_2}{Re} + \frac{a_3}{Re^2}$$

对于球形颗粒, 在一定的雷诺数范围内, 上式中的 a_1, a_2, a_3 为常数, 由 Morsi 和 Alexander 给出^[12]。

3.2 气相湍流模型

针对所研究的物理模型, 采用 Realizable $k-\epsilon$ 模型, 并根据涡粘模型雷诺应力, 以及湍动能、湍动耗散率的定义, 引入关于 k 和 ϵ 的输运方程^[13]:

$$\frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \epsilon \quad (5)$$

$$\frac{\partial (\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho \epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] +$$

$$\rho C_1 E \epsilon - \rho C_2 \frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{\nu \epsilon}} \quad (6)$$

式中: G_k —由于平均速度梯度引起的湍动能 k 的产生项:

$$G_k = \mu_t \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$$

3.3 固体颗粒湍流耗散模型

固体颗粒的湍流耗散采用随机轨道模型。该模型用单颗粒瞬时动量方程随机给定的流体瞬时脉动速度, 以 Monte-Carlo 法求解随机瞬时流场中颗粒运动的随机轨道^[14]。

气相脉动速度:

$$u' = \zeta \sqrt{\frac{2k}{3}}$$

式中: k —气相湍动能; ζ —随机数。

3.4 计算条件

采用压力修正 (SIMPLE) 计算方法进行计算。

进口处设定气固两相流量、速度、湍动能及湍流耗散率。入口处为速度边界, 气固两相给定相同的入口速度; 每个网格单元追踪固体颗粒数为 5。壁面处对气相采用标准壁面函数法作近壁区处理, 采用无滑移边界条件, 颗粒相在壁面处满足反弹条件; 出口给定背压。

入口湍动能 k 及湍流耗散率 ϵ 按下式计算:

$$k = \frac{3}{2} (uI)^2, \epsilon = C_{\mu}^{3/4} \frac{k^{3/2}}{0.07L}$$

其中, $I = 0.16(Re)^{-1/8}$, L 为入口段特征长度, $C_{\mu} = 0.09$ 。鉴于篇幅限制, 选用了变动支管分别与主管中心轴夹角分别为 5、15、30° 的 3 支管作为研究对象。进口主管段长取 300 mm, 两分支管段长 600 mm, 选择一进口速度气体为 14.67 m/s 的工况进行计算。分支处及壁面处的网格如图 4 所示。

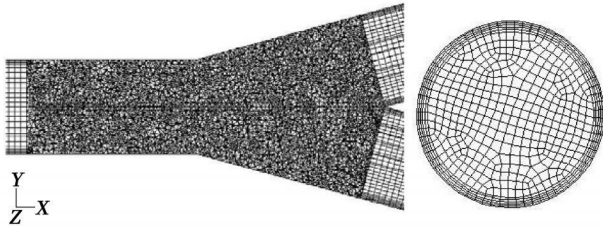


图 4 分支处及壁面网格示意图

3.5 计算结果与分析

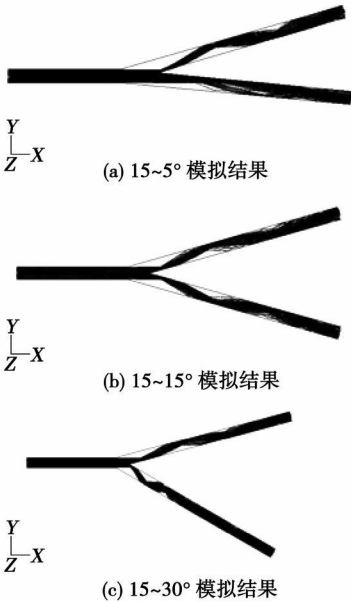


图 5 3 种不同夹角下 Y 型分支管内颗粒的流动形态数值模拟结果

图 5 为通过数值模拟所得的 3 种不同夹角下 Y 型分支管内颗粒的流动形态。如图所示, 固体颗粒

呈悬浮流状态由主管流至 Y 型分支接头处时, 较集中地与分支管内壁面发生碰撞。经过多次与分支管壁面的碰撞后, 重新实现颗粒相流场的均匀分布。同时还可以看出, 在 3 种不同夹角的 Y 型分支管中, 分支管与主管夹角越大, 其固体颗粒在分支管中碰撞壁面的次数越多, 重新实现颗粒相流场均匀分布所需的距离也越短。图 6 为实验所得 Y 型分支管分支处的局部颗粒运动形态, 颗粒在分支处沿分支管内壁运动。将数值模拟结果与实验结果进行比较, 表明采用离散相模型可以较准确地预估颗粒在分支管内的运动形态。

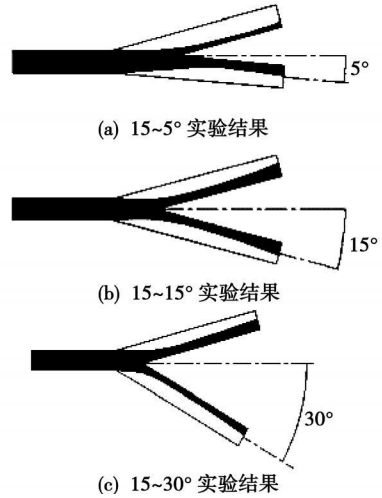


图 6 3 种不同夹角下 Y 型分支管内颗粒的流动形态的实验结果

3.6 分支管内颗粒的运动机理分析

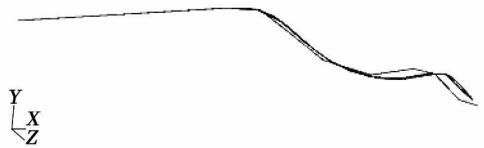


图 7 单组颗粒的运动轨迹

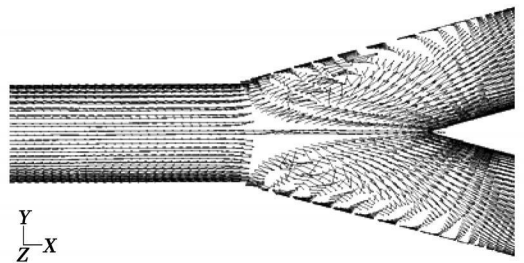


图 8 分支处气体速度矢量分布

图 7 为单组颗粒(颗粒数为 5)的运动轨迹。同

一组颗粒从入口边界处同一个网格中心射出。如图所示,单组颗粒在总管中运动趋势大体一致,运动至分支处,运动轨迹开始发生偏差。这是因为在管道分支处,截面积增大,气体速度减小,并且速度方向发生变化,并在分支管靠近外壁面处产生漩涡,如图 8 所示。由于在随机轨道模型中,对颗粒运动轨迹产生影响的脉动速度 u' 为气相湍动能 k 的函数,在分支处气相湍动能 k 较大,故同一组固体颗粒运动轨迹发生明显偏差。单组颗粒考察的颗粒数越多,越能体现固相流场的真实情况。同时可以看出,采用随机轨道模型,能较好地反映出气相流场的变化对固体颗粒运动轨迹的影响。

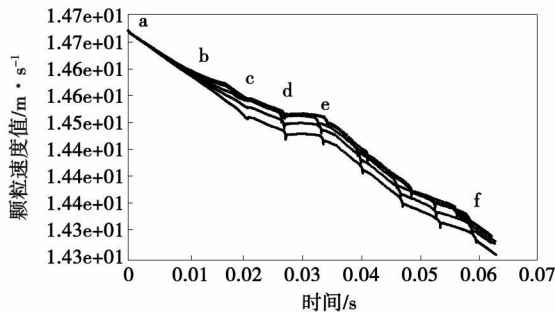


图 9 单组颗粒速度大小随时间的变化

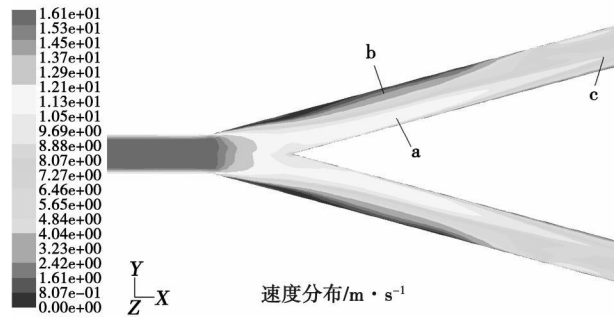


图 10 分支管中心截面气体速度大小分布

图 9 为单组颗粒速度大小的趋势,从图中可以看出,固体颗粒在总管部分运动时,受阻力影响,速度成直线趋势下降(a~b)。至分支处,由于气相流场的变化对固体颗粒的影响,速度大小发生偏差(b~c)。固体颗粒与分支管内壁发生碰撞时,速度大小发生瞬时突变(c处)。气体从分支处流入分支管内后,由于靠近外壁面处存在漩涡,如图 10 中 b 处所示。有效流通截面积减小,气体速度在靠近内壁面处增加,如图 10 中 a 处所示。当固体颗粒运动至该区域时,气固两相相对速度差减小,结合式(3),故图 9 中 d~e 段固体颗粒速度下降的较慢,气体在分支管内速度分布均匀后,气体速度比前段分支管

靠近内壁面处的气体速度小,如图 10 中 c 处所示,气固两相相对速度差增大,故图 9 中 e~f 段固体颗粒速度下降的较快。

3.7 不同夹角下管内颗粒的质量分配模拟

本研究采用的固体颗粒粒径与密度皆为常数,故采用分别追踪两个出口处的颗粒数目的方法,即可得到分支管内颗粒的质量分配情况。不同夹角 Y 型分支管内颗粒的质量分配情况如表 1 所示。

表 1 不同夹角 Y 型分支管内颗粒的质量分配

	n	n_b	$p_b/\%$	$p_{be}/\%$	$Err/\%$
15~5°	1 195	763	63.85	58.90	8.40
15~15°	1 351	676	50.03	47.40	5.55
15~30°	1 401	590	41.71	39.7	5.06

表 1 中: n —成功追踪颗粒总数; n_b —变动支 b 追踪颗粒总数; p_b —运动至变动支 b 的颗粒数占颗粒总数的百分比,%; p_{be} —实验测得变动支 b 内颗粒质量占颗粒总质量的百分比,%; Err —变动支 b 内颗粒质量分配的计算结果与实验数据的相对误差,%。

从数值模拟结果看出,颗粒运动至分支处时,影响颗粒质量分配的主导因素为分支处管道形状,即分支管与主管的夹角。分支管与主管夹角越小,分配到的颗粒质量越多,此与实验结论相一致。

将不同夹角下管内质量分配的数值模拟结果与对应的实验工况数据比较,可见,变动支管与主管分支角度越大,质量分配的相对误差越小,这是由于气相湍流在分支处的局部湍动能较大,则气相对固相的耦合作用较大,更能够反映实际流场的情况。

4 结 论

本研究建立了水平 Y 型分支管网分流系统,采用空气作为输送动力,小米为输送物料进行实验。其中, Y 型分支管分为固定支管和变动支管,固定支管与主管中心轴线的夹角为 15°,变动支管与主管中心轴线夹角分别为 5、10、15、20、25、30°,考察了固相流量分配特性,并且对分流过程进行了数值模拟,得出下列结论:

(1) 在相同的气体表观速度下,随变动支管与主管中心线的夹角增大,分配到变动支管的固体质量分数减小。当气体表观速度大于沉积速度时,改变气体表观速度的大小对固体流量分配特性影响不大;当气体表观速度处于小于临界速度区域时,随气

体表面速度减小, 变动支的固体质量分数增大。

(2) 采用了 Euler-Lagrange 气固两相流动研究方法, 在 Fluent 软件平台上对不同夹角的 Y 型分支管模拟了管内气固两相流动情况。研究发现, 采用离散相模型能够较准确地预估颗粒在分支处沿内壁面流动的趋势, 并且能够较准确地估计颗粒在分支管内经碰撞后重新分布均匀所需的距离。采用随机轨道模型计算管内颗粒的运动轨迹, 能较合理地解释颗粒的运动机理以及气相对颗粒运动轨迹的影响。数值模拟结果能较好地反映出不同夹角的 Y 型分支管内固体颗粒的质量分配, 并通过与实验对比, 发现角度较大时模拟效果较好。

参考文献:

- [1] BEHERA S, DAS S, JONES M G. Desirable conveying characteristics for pneumatic transportation of fly ash, sand, cement and crushed bath [J]. Powder Handling and Processing, 2000, 12(1): 23-25.
- [2] 鹿 鹏, 赵长遂, 陈晓平, 等. 高压密相气力输送固气比实验研究与广义回归神经网络模拟[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(12): 68-71.
- [3] 欧阳洁, 孙国刚, YU AIBING. 垂直管道中塞状流的模拟[J]. 过程工程学报, 2003, 3(3): 193-199.
- [4] 蒲文灏, 熊源泉, 赵长遂. 垂直管煤粉高压密相气力输送特性的模拟研究[J]. 中国电机工程学报, 2008, 17(6): 21-28.
- [5] 范春雷, 陈晓平, 赵长遂, 等. 粉煤加压密相输送特性试验研究[J]. 锅炉技术, 2008, 39(1): 10-13.
- [6] 罗志国, 刘爱华. 大曲率弯管内颗粒运动的数值模拟[J]. 工业加热, 2007, 36(6): 25-27.
- [7] 王晓宁, 胡寿根, 赵 军, 等. 气力输送分支管路流量分配特性的研究[J]. 中国机械工程, 2006, 17(20): 2110-2113.
- [8] ZHAO JUN, HUSHOUGEN. On line control of a dense phase pneumatic conveying system // Proceeding of International Conference on Energy and Environment [C]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 2003.
- [9] MUSLIKHIN HIDAYAT, ANDERS RASMUSON A computational investigation of non-isothermal gas-solid flow in a U-bend [J]. Powder Technology, 2007, 175: 104-114.
- [10] LI H, TOMITA Y. Particle velocity and concentration characteristics in a horizontal dilute swirling flow pneumatic conveying [J]. Powder Technology, 2000, 17: 144-152.
- [11] 周力行. 湍流气粒两相流动和燃烧理论与数值模拟[M]. 陈文芳, 林文漪, 译. 北京: 科学出版社, 1994.
- [12] MORSI S, AALEXANDER A J. An investigation of particle trajectories in two phase flow system [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1972, 55(2): 193-208.
- [13] SHIH T H, LIOU W W, SHABBAR A, et al. A new $k-\epsilon$ eddy viscosity model for high Reynolds number turbulent flows [J]. Compute Fluids, 1995, 24(3): 227-238.
- [14] IOANNIDES GOSMAN D. Aspects of computer simulation of liquid-fuelled combustors [R]. AIAA Paper 81-0323, 1981.

(编辑 陈 滨)

新技术、新工艺

Sasol 和神华共同开发生产由煤转化的发动机燃料

据《Gas Turbine World》2008 年 7~8 月号报道, 南非 Sasol 和中国神华集团宣布, 它们将在 2016 年前在两个共同拥有的 CTL(煤到液体)处理工厂从煤生产用于发动机的液体燃料。

Sasol 是世界上最大的从煤生产发动机燃料的生产者。神华是中国最大的煤生产者。

在中国西北地区两个合资的 CTL 项目的可行性研究正在按期进行, 并计划在 2009 年年末完成。示范试验于 2006 年开始, 花费约 3 亿美元。根据 Sasol 以前的 CTL 项目, 用于每个工厂的建造、试验, 一直到商业启动的总费用估计在 5~7 亿美元。

在陕西省和宁夏回族自治区的这两个项目每年将能生产 340 万 t 柴油、石脑油、液化石油气和喷气发动机燃料。

两个工厂都使用 Sasol 的专利 CTL 技术。神华正在独立地开发一种被称为“直接煤液化”的 CTL 处理方法, 它有望于 9 月在商业上初次登场。

(吉桂明 摘译)

transversely sweeping across a circular cylinder and a square one, the authors have identified the vortex street shedding frequency and the variation of Strouhal number. During the test, the Reynolds number ranges from 0.9×10^4 to 2.3×10^4 and the sectional gas content has a variation range of 0 to 0.2. The test results indicate that in a certain range of gas content, the vortex-street shedding frequency and Strouhal numbers of the two types of cylinders will increase with an increase of the sectional gas content. The increment gradient of the square cylinder Strouhal number is independent of the Reynolds number while that of the circular one is susceptible to the influence of the Reynolds number. **Key words:** gas-liquid two-phase flow, tube-wall pressure-difference method, square cylinder, circular cylinder, vortex street

气固两相 Y 型分支管网流量分配特性的试验研究与数值模拟 = **Experimental Study and Numerical Simulation of the Flow Distribution Characteristics of a Gas-solid Two-phase Y-shaped Branch Pipe Network** [刊, 汉] / DUAN Guang-bin, HU Shou-gen, ZHAO Jun, et al (College of Energy Source and Power Engineering, Shanghai University of Science and Technology, Shanghai, China, Post Code: 200093) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2009, 24(6). — 750 ~ 755

By using compressed air as conveyance power and millet as a transport medium in horizontal Y-shaped branch pipes, the solid flow distribution characteristics of the above pipes were studied. The test results show that the change of the included angle between the central axial lines of the branch and main pipes as well as the superficial gas velocity have a relatively big influence on the solid-phase flow distribution characteristics. In the meantime, by adopting Euler-Lagrange two-phase flow research method and a discrete phase model (DPM) for the solid phase, the authors have employed Fluent software to numerically simulate the gas-solid two-phase flow in the Y-shaped branch pipes having three different included angles. The simulation results have predicted relatively well the flow pattern of particles at the branch points, the movement trajectory of the particles inside the branch pipes and the distance required for resuming a uniform distribution of the particle phase flow field. By comparing the numerical simulation results with the test ones of the solid particle mass distribution in the branch pipes, the authors have found that there exists a relatively small error between the two results. **Key words:** gas-solid two-phase flow, Y-shaped branch pipe, flow distribution characteristics, numerical simulation, included angle

热电联供系统中烟气冷凝传热性能试验研究 = **Experimental Study of the Condensation Heat Transfer Performance of Flue Gases in a Heating-and-power Cogeneration System** [刊, 汉] / ZHAO Xi-ling, FU Lin, ZHANG Shi-gang, et al (Building Technology and Science Department, Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2009, 24(6). — 756 ~ 758

Concerning the problem of the inability to fully recover the waste heat in flue gases, experimentally studied was a flue gas condensation heat recovery device of an innovative heating-and-power cogeneration system that could fully recover the waste heat in flue gases. In this connection, the research emphasis was laid on the heat transfer performance of a smooth tube flue-gas condensing equipment item under the relevant operating condition. The research results indicate that under the test operating condition, the heat transfer coefficient of the dry type condensing section can be as high as $60 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ with that of the condensing section being 90 to $100 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. The heat transfer coefficient of the condensing section is about 1.5 to 1.7 times that of the dry type one. The authors have also worked out a heat transfer criterion-based relational expression under the operating condition, thus providing an underlying basis for popularizing the design and operation of the system in question. **Key words:** heating-and-power cogeneration, flue gas, condensation heat, latent heat, heat transfer performance

平行流蒸发器内气液两相流分配均匀性实验研究 = **Experimental Study of the Distribution Uniformity of the Gas-liquid Two-phase Flow in a Parallel Flow Evaporator** [刊, 汉] / LI Kui-ning, WU Xiao-bo, YIN Ya-ling (College of Power Engineering, Chongqing University, Chongqing, China, Post Code: 400030) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2009, 24(6). — 759 ~ 765