

高压密相气力输送

固相流量的实验与 GRNN 网络预测

鹿 鹏, 陈晓平, 赵长遂, 梁 财

(东南大学 洁净煤发电及燃烧技术教育部重点实验室, 江苏 南京 210096)

摘 要: 煤粉高压密相气力输送是气流床加压气化的关键技术之一。在输送压力可达 3.7 MPa, 管路固气比可达 660 kg/m^3 的气力输送实验台上进行系统的研究, 考察输送压力、输送差压、流化风量、充压风量、补充风量、煤粉含水率等条件对固相质量流量的影响。结果表明: 固相流量随着输送差压的增大而增大; 随着流化风量的增大而先增大后趋向于某一定值; 注入风量一定时, 随着充压风量的增大而先减小后增大; 与补充风量的大小基本无关; 随着煤粉含水率的增大而减小。同时建立广义回归神经网络 (GRNN) 对固相流量进行了有效预测, 最大预测误差在 2.3% 以内。上述工作将为系统的控制和运行提供一定的指导, 同时为深化高压密相气力输送的研究奠定基础。

关 键 词: 气力输送; 高压; 密相; 固相流量; 广义回归神经网络

中图分类号: TQ53 文献标识码: A

符号说明

M —料罐内的煤粉质量/kg	Q_p —充压风量/ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$;
t —时间/s	Q_f —流化风量/ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$;
G_s —固相流量/ $\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$;	Q_s —补充风量/ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$;
P_1 —发料罐压力/MPa;	W —煤粉含水率/%
ΔP —输送差压/MPa;	

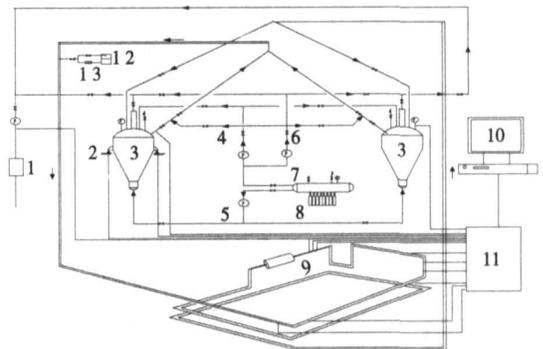
引 言

气力输送在能源、化工、冶金、医药和食品加工等领域的应用非常广泛, 但主要以稀相输送为主。稀相输送中, 颗粒被高速气体携带, 颗粒之间以及颗粒同管壁之间的碰撞和摩擦非常剧烈, 设备磨损严重, 输送效率低; 而高压密相气力输送由于颗粒对管道磨损轻, 输送效率和煤气品质高而愈来愈受到关注, 煤粉的高压密相气力输送已成为气流床加压气化的关键技术^[1-2]。

粉体密相输送, 已经取得了很多有价值的研究

成果^[3-8]。密相输送在工业上主要用于电厂粉煤灰输送和钢铁厂高炉煤粉喷吹系统等^[9-10], 但这些系统的工作压力远低于干煤粉加压气化炉的输煤系统。目前对高压密相气力输送机理的了解尚不深入, 可借鉴资料很少, 其难题之一是如何精确地对固相流量进行预测。固相流量通常与物料的性质、系统的几何参数、操作条件和物料含水率等因素有关^[11]。本文在国家 973 项目“大规模高效气流床煤气化技术的基础研究”的资助下, 系统研究了输送压力、输送差压、流化风量、充压风量、补充风量和煤粉含水率等条件对固相流量的影响, 并建立 GRNN 网络, 对固相流量进行了很好的预测。

1 实验装置和实验结果及讨论



1—电动调节阀; 2—荷重传感器; 3—发(收)料罐; 4—充压风; 5—流化风; 6—补充风; 7—缓冲罐; 8—氮气瓶; 9—可视窗(高速摄影仪); 10—计算机; 11—传感器及 A/D 转换; 12—水箱; 13—计量泵

图 1 高压超浓相气力输送试验台系统图

输送气体由并联工作的高压氮气瓶提供, 经过

收稿日期: 2007-01-30; 修订日期: 2007-03-08

基金项目: 国家重点基础研究发展计划基金资助项目(2004CB217702)

作者简介: 鹿 鹏(1981—)男, 江苏徐州人, 东南大学博士研究生

缓冲罐分为充压风、流化风和补充风3路,如图1所示。通过阀门切换,发料罐与收料罐可互换。发料罐中的煤粉在流化风作用下处于部分流化状态,在输送差压作用下进入输送管道,在发料罐出口引入补充风增强输送能力并保持适当的固气比,充压风用于维持发料罐的压力。收料罐压力由排气管道上的电动调节阀根据设定值自动控制。系统工作压力可达4 MPa。料罐体积为0.648 m³,输送管尺寸为Φ16×3 mm,输送距离45 m,发料罐内煤粉的实时质量由高精度箔式电子秤称量。压力及差压传感器分别采用瑞士Keller公司生产的PA-21SR和PD-23型,精度为0.3%。充压风、流化风和补充风流量采用开封仪表厂提供的AM-1521Q型金属管转子流量计测量。输送管路的上游设置了煤粉加湿子系统,给水由柱塞式计量泵均匀地注入管路,流量可在0~8 L/h无级调节。试验物料为山东兖州煤粉,平均粒径36 μm,密度1350 kg/m³,未加湿前的含水率为0.77%。

图2为某工况下收料罐内煤粉质量随时间的变化曲线,在长达20 min的时间内,曲线的整体线性度良好,输送稳定;输送差压(即发料罐与收料罐的压力之差)是气力输送的动力源。固相流量随着输送差压的增大而增大,如图3所示。

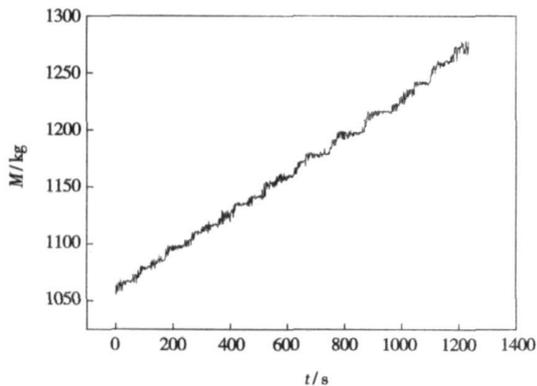


图2 收料罐内煤粉质量随时间变化曲线

流化风穿过发料罐底部的布风板,利用气体上升时的曳力把煤粉颗粒悬浮起来,发生流化。在保持其它条件不变的前提下逐渐改变补充风量,当流化风量很小时,煤粉的流化效果很差,煤粉颗粒之间的空隙很小,摩擦很大,固相流量较小;随着流化风量的增大,流化效果好转,固相流量增大;继续增大流化风量,固相流量逐渐趋向于某一定值,此时煤粉已被充分流化,如图4所示。

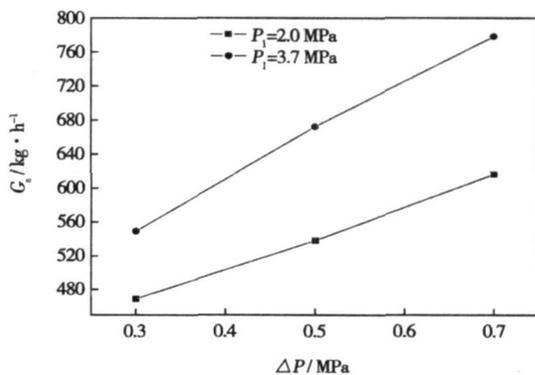


图3 固相流量与输送差压的关系

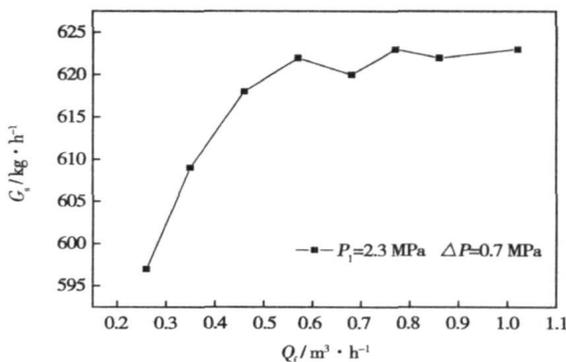


图4 固相流量与流化风量的关系

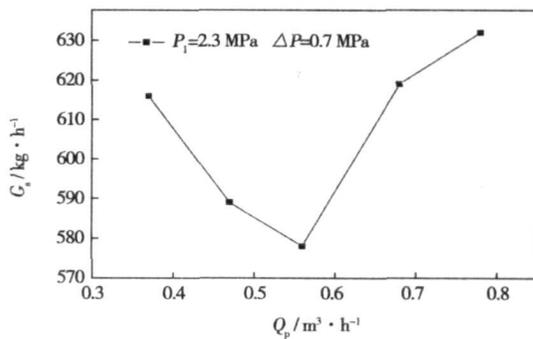


图5 固相流量与充压风量的关系

定义注入风量为进入发料罐的两路风量,即流化风量与充压风量之和。实验中保持注入风量不变,逐渐改变其组分之一充压风量的大小。如图5所示,固相流量经历了一个先减小后增大的特殊过程,在充压风量为0.56 m³/h左右达到最小值。这是充压风与流化风共同作用的结果。在充压风量达到0.56 m³/h之前,流化风量的大小对于固相流量起着主要作用,流化风量的减小使其下降;在充压风量达到0.56 m³/h之后,充压风起到主要作用,充压

风量的增大使固相流量上升。

在其它条件不变时, 可认为固相流量与补充风量基本无关, 如表 1 所示。物料含水率是影响流动特性的重要参数。在发料罐压力为 3.7 MPa, 在 0.7 MPa 和 0.3 MPa 两个差压下, 固相流量均随着含水率的增加而降低, 且在含水率 < 2.5%, 含水率对固相流量的影响较大, 如图 6 所示。

表 1 固相流量与补充风量的关系

($P_1=3.7\text{ MPa}$ $\Delta P=0.7\text{ MPa}$)

补充风量/ $\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$	固相流量/ $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$
0.43	769
0.51	776
0.62	773
0.7	775
0.88	781
0	760

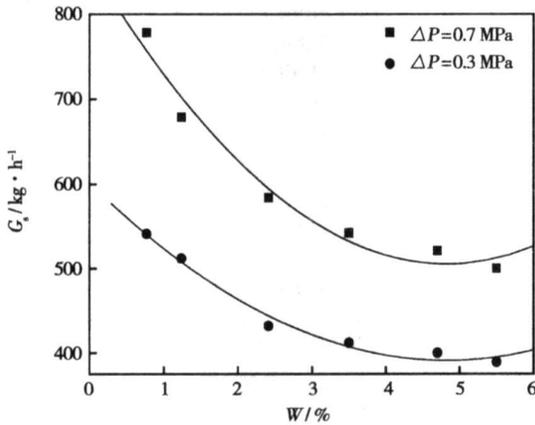


图 6 固相流量与煤粉含水率的关系

2 GRNN 的基本结构与算法

GRNN 最早由 Sprech 提出, 具体公式推导和理论分析见文献[12~13]。GRNN 由一个径向基网络层和一个线性网络层组成, 网络结构如图 7 所示, a_{i1} 表示第一层输出 a^1 的第 i 个元素, $iw_{1,1}$ 表示第一层权值矩阵 $IW_{1,1}$ 的第 i 行元素。 P 表示输入向量, R 表示输入维数, Q 表示每层网络中的神经元个数, 同时也表示训练样本的个数。

网络的第一层为径向基隐含层, 单元个数等于训练样本数 Q , 该层的权值函数为欧几里德距离度量函数(用 $\|\text{dist}\|$ 表示), 其作用是计算网络输入与第一层的权值 $IW_{1,1}$ 之间的距离, b^1 为隐含层阈值。符号“ \odot ”表示 $\|\text{dist}\|$ 的输出与阈值 b^1 的元素与元素之间的乘积关系, 并将结果形成净输入 n^1 , 传送到传递函数。隐含层的传递函数为径向基函数, 常用高斯函数 $R_i(x)=\exp(-\frac{\|x-c_i\|^2}{2\sigma_i^2})$ 作为网络的传递函数, 式中, σ_i 决定第 i 个隐含层位置处基函数的形状, σ_i 越大则基函数越平缓, 故又被称为光滑因子。

网络的第二层为线性输出层, 其权函数为规范化点积权函数(用 nprod 表示), 计算出网络的向量 n^2 , 它的每个元素就是向量 a^1 与权值矩阵 $LW_{2,1}$ 每行元素的点积再除以向量 a^1 各元素之和的值, 并将结果 n^2 送入线性传递函数 $a^2=\text{purelin}(n^2)$, 计算网络输出。

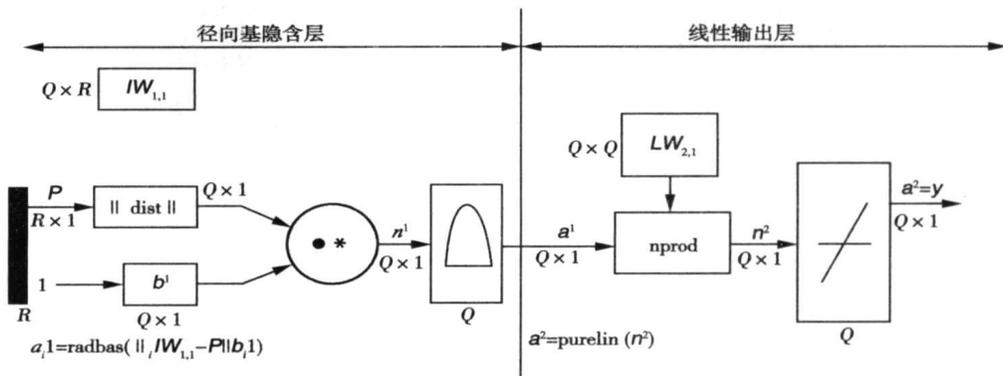


图 7 GRNN 网络结构图

GRNN 连接权值的学习修正仍然使用 BP 算法, 由于网络隐含层节点中的作用函数(基函数)采用高

斯函数, 对输入信号将在局部产生响应, 即当输入信号靠近基函数的中央范围时, 隐含层节点将产生较

大的输出,由此看出这种网络具有局部逼近能力,这也是该网络的学习速度更快的原因。此外,GRNN人为调节的参数少,只有一个阈值。网络的学习全部依赖数据样本,这个特点决定了网络得以最大限度地避免人为主观假定对预测结果的影响。

3 固相流量预测的 GRNN 模型及结果分析

流量预测可以利用 BP 网络^[14],但是这种网络存在收敛速度慢和局部极小的缺点;广义回归神经网络 GRNN 在逼近能力、分类能力和学习速度方面具有较强优势,网络最后收敛于样本量积聚最多的优化回归面,并且在数据缺乏时,效果也较好,网络可以处理不稳定的数据^[15]。

表 2 验证样本原始数据

工况	P_1 /MPa	ΔP /MPa	Q_b /m ³ ·h ⁻¹	Q_s /m ³ ·h ⁻¹	Q_f /m ³ ·h ⁻¹	W /%	G_s 实验值 /kg·h ⁻¹
1	2.3	0.7	0.72	0.49	0.77	0.77	623
2	3.7	0.7	1.05	0.51	0.36	0.77	776
3	3.7	0.3	0.75	0.68	0.4	0.77	550
4	2	0.3	0.43	0.53	0.36	0.77	466
5	3.7	0.7	0.68	0.53	0.66	4.7	521

注:实验值由整个工况内料罐内的煤粉质量变化量除以工况时间(一般为 30 min)所得。

选取发料罐压力、输送差压、充压风量、补充风量、流化风量和煤粉含水率等影响固相流量的 6 个最主要因素作为网络输入,以固相流量作为网络输出。光滑因子分别取为 0.05、0.1、0.2 和 0.3,光滑

因子越小,网络对样本的逼近性能就越强;光滑因子越大,网络对样本的逼近过程就越平滑。

从 36 组实验数据中选择 31 组数据作为训练样本,另外 5 组数据作为验证样本。网络对训练样本的逼近误差如图 8 所示,对验证样本的预测误差如表 3 所示。

当光滑因子为 0.1 时,训练样本的最大逼近误差为 0.8%,如图 8 所示,验证样本的最大预测误差为 2.3%,如表 3 所示,误差都比较小,符合精度要求。

为了便于比较,同时建立了最大训练步数为 8000,目标误差为 0.02 的 BP 网络。从图 8 和表 3 可以看出,对于本例,BP 网络的逼近误差和预测误差与 GRNN 相比并无优势可言,并且训练时间较长。

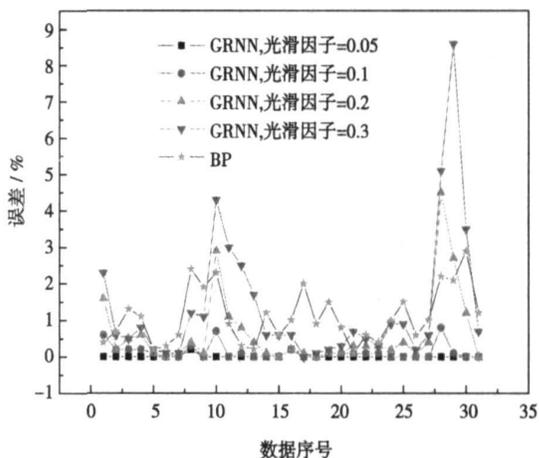


图 8 网络的逼近误差

表 3 网络的预测误差

(%)

工况	GRNN 相对误差 (光滑因子=0.05)	GRNN 相对误差 (光滑因子=0.1)	GRNN 相对误差 (光滑因子=0.2)	GRNN 相对误差 (光滑因子=0.3)	BP 相对误差
1	0.3	0.3	0.3	0.4	0.2
2	0.2	0.3	2.2	3.7	0.5
3	1.3	1.1	0.7	1.1	1.2
4	2.6	2.3	1.2	0.7	1.5
5	4.0	1.9	0.0	1.1	3.3

4 结 论

(1) 高压密相气力输送实验中,系统固相流量稳定;固相流量随着输送差压的增大而增大;随着流化风量的增大而先增大后趋向于某一定值;注入风量一定时,随着充压风量的增大而先减小后增大;与

补充风量的大小基本无关;随着煤粉含水率的增大而减小。

(2) 本文建立的 GRNN 网络,当光滑因子取 0.1 时,最大逼近误差为 0.8%,最大预测误差为 2.3%,具有很好的预测能力。而且就网络训练而言,由于需要调整的参数比较少,只有一个光滑因子,因此可以很快地找到合适的预测网络,与 BP 神经网络相

比, 具有较大的优势。

参考文献:

- [1] JIAO SHUJIAN. Discussion about the scheme of gasification of IGCC [J]. Gas Turbine Technology, 1994, 7(1): 6-20.
- [2] XU YUE, WU YINING, WEI SHIRANG. Simulation and analysis on gasification technology of a two-stage dry feed entrained flow bed [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(10): 187-190.
- [3] CHENG KEQIN. A review of dense phase pneumatic conveying at low velocity [J]. Design of Sulphur and Phosphorous and Powder Engineering 2001(2): 22-26
- [4] SINGER T. Dense-phase pneumatic conveying: applications, system design, and troubleshooting [J]. Powder and Bulk Engineering 2003, 17(3): 27-33
- [5] WYPYCH P W, YI JIANGLIN. Minimum transport boundary for horizontal dense-phase pneumatic conveying of granular materials [J]. Powder Technology, 2003 129(1-3): 111-121.
- [6] SOLT P E. Comparing dilute and dense-phase conveying [J]. Powder and Bulk Engineering, 2003 17(3): 64-68
- [7] SANCHEZ L, VASQUEZ N, KLINZING G E, et al. Characterization of bulk solids to assess dense phase pneumatic conveying [J]. Powder Technology, 2003, 138(2-3): 93-117.
- [8] 龚 欣, 郭晓镭, 代正华, 等. 高固气比状态下的粉煤气力输送 [J]. 化工学报, 2006, 57(3): 640-644
- [9] MIAO YUWANG. Study on the resistance properties for dense phase pneumatic conveying of fly ash of power plant [J]. Journal of North China Electric Power University, 1997, 24(1): 32-36.
- [10] AN WUSHENG, YANG ZONGCHENG, SUN HONGWU. Practice of PCI system at Lingyuan iron and steel (group) Co [J]. Iron and Steel, 2000, 35(4): 10-12.
- [11] MOLEROUS O. Overview: pneumatic transport of solids [J]. Powder Technology, 1996 88: 309-321.
- [12] SPRECHT D F. A General regression neural network [J]. IEEE Trans Neural Networks, 1991, 2: 568-576.
- [13] SPRECHT D F. The General regression neural network rediscovered [J]. Neural Networks, 1993 6: 1033-1034.
- [14] YONG YAN, SENIOR MEMBER, LIJUN XU, et al. Mass flow measurement of fine particles in a pneumatic suspension using electrostatic sensing and neural network techniques [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2006, 55(6): 2330-2334.
- [15] 阎平凡, 张长水. 人工神经网络与预测进化计算 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.

(编辑 滨)

船舶动力装置

Lloyd's 船级社批准 GE 燃气轮机用于 LNG 运输船

据《Turbomachinery International》2005 年 7~8 月号报道, Lloyd's (劳埃德) 船级社已批准基于 GE LM2500 燃气轮机的推进系统用于 LNG (液化天然气) 运输船。该船级社已用证书形式证明上述推进系统技术的安全性。这一批准将推进在 LNG 运输船中使用基于燃气轮机的推进系统的观念。

劳埃德船级社最近已入级了 59 艘 LNG 运输船, 按装货体积算代表世界 LNG 运输船队的 37%。

传统上, LNG 运输船由汽轮机驱动。但是随着建造更大的船以适应世界对天然气日益增加的需求, 标准的推进系统开始表明存在一些不足, 如低的效率、高的排放、缺少合格的操纵汽轮机装置的船员。

GE Energy 公司坚信它的燃气轮机推进系统能克服这些缺点并能提供其它的得益, 包括有能力燃烧来自 LNG 舱容系统的汽化气。

GE 提供在双 COGES (燃气轮机和汽轮机联合的综合电力推进系统) 布置中的 LM2500 航改型船舶燃气轮机, 在 30℃ 环境温度下总的输出功率为 57.4 MW。

(吉桂明 供稿)

structure proposed by the authors and the rational configuration of such systematic parameters as liquid drag, heat dissipation, transmission medium, spring rigidity and the effective area of the piston etc. has the ability to realize a stepless speed control at a rated speed of 1500 r/min and a speed ratio of 0.15 ~ 1, meeting the practical engineering demands of thermal power-generation enterprises. **Key words:** hydro-viscous drive, liquid viscous transmission, stepless speed control, development, study

高压密相气力输送固相流量的实验与 GRNN 网络预测 = **Experimental Study of High-pressure Dense-phase and Pneumatically Transported Solid-phase Flow and its Prediction Based on a GRNN (generalized regression neural network)** [刊, 汉] / LU Peng, CHEN Xiao-ping, ZHAO Chang-sui, et al (Education Ministry Key Laboratory on Clean Coal Power Generation and Combustion Technology, Southeast University, Nanjing, China, Post Code: 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2008, 23(1). — 41 ~ 45

Pulverized-coal high-pressure dense-phase pneumatic transmission represents one of the key technologies for the pressurized coal gasification of a gas fluidized bed. A systematic study was performed on a pneumatic transmission test rig featuring a transmission pressure up to 3.7 MPa and a pipeline solid-gas ratio of 660 kg/m³ to investigate the influence of such conditions as transmission pressure, transmission pressure difference, fluidized air quantity, pressurized air quantity, supplementary air quantity and water content of pulverized coal etc. on the solid-phase mass flow rate. The results of the study show that the solid-phase flow rate increases with the increase of transmission pressure difference. It first increases with an increase in fluidized air flow rate, and then tends to be a constant value. When the injected air quantity reaches a constant one, the flow rate in question will first decrease and then increase with the increase of the pressurized air quantity, basically independent of the supplementary air quantity. The flow rate will decrease with an increase of the water content of the pulverized coal. In the meantime, a generalized regression neural network (GRNN) was established to effectively forecast the solid-phase flow rate with the maximal prediction error being within 2.3%. All these efforts will somewhat provide guidance for system control and operation, and at the same time lay a solid foundation for an in-depth study of the high pressure dense-phase pneumatic transmission. **Key words:** pneumatic conveyance, high pressure, dense phase, solid phase flow rate, generalized regression neural network

加压喷动流化床最小喷动速度的试验研究 = **Experimental Study of the Minimum Spouting Velocity in a Pressurized Spouted-fluidized Bed** [刊, 汉] / LI Qian-jun, ZHANG Ming-yao, SHI Ai-yang (Education Ministry Key Laboratory on Clean Coal Power Generation and Combustion Technology, Southeast University, Nanjing, China, Post Code: 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2008, 23(1). — 46 ~ 49

A pressurized spouted-fluidized bed experiment was performed on an organic-glass cold model device with an inner diameter of 100 mm. Millet having a diameter of 1.6 mm and 2.3 mm respectively was used as the bed material. The influence of pressure, static bed height and fluidized air on the minimum spouting velocity was studied. The test results show that the minimum spouting velocity in a spouted-fluidized bed decreases with the increase of pressure, but the margin of such a decrease will gradually diminish. When the static bed height increases, the minimum spouting velocity will also increase. The influence of any increase of bed height on the minimum spouting velocity, however, becomes weakened with an increase of pressure. The increase of fluidized air quantity can lead to a decrease of the minimum spouting velocity. Based on the experimental data, a linear regression was conducted, and the minimum spouting velocity correlation formulae were obtained respectively when u_f equals to and is greater than 0 (u_f represents the apparent air velocity in the fluidized air bed) with their correlation coefficients being respectively 0.964 and 0.920. The results obtained from the correlation formulae are in relatively good agreement with those of the experimental measurements. **Key words:** spouted-fluidized bed, pressurization, minimum spouting velocity

纳米 TiO₂ 催化煤燃烧的实验研究 = **Experimental Study of Nano-TiO₂ Catalyzed Coal Combustion** [刊, 汉] / WANG Shu-qin, ZHAO Yi, LI Dan-dan, et al (College of Environmental Science and Engineering, North China Electric