

加压喷动流化床最小喷动速度的试验研究

李乾军, 章名耀, 施爱阳

(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: 在内径 100 mm 的有机玻璃冷模装置上进行了加压喷动流化床试验。床料直径为 1.6 mm、2.3 mm 的小米。研究了压力、静止床高及流化风对最小喷动速度的影响。试验结果表明: 喷动流化床的最小喷动速度随压力的增大而减小, 但减小幅度逐渐变小; 静止床高增大, 最小喷动速度增大, 但床高的增加对最小喷动速度的影响随着压力的增大而减弱。流化风风量增加导致最小喷动速度降低。根据试验数据进行了线性回归, 分别得出了 $u_f=0$ 和 $u_f>0$ (u_f 为流化风床内表观风速) 时最小喷动速度的关联式, 相关系数分别为 0.964 和 0.920, 关联式和试验值吻合较好。

关 键 词: 喷动流化床; 加压; 最小喷动速度

中图分类号: TQ051.13 文献标识码: A

引 言

喷动流化床由于其传热、传质效果好, 因此被广泛地运用于干燥、造粒、涂层等物料加工和石油裂

解、煤气化及燃烧等反应过程。在过去 20 年来, 很多人针对喷动流化床的流动特性进行了有价值的试验研究和理论研究。加拿大 UBC (University of British Columbia) 在喷动流化床的研究和应用中扮演了重要的角色^[1~3]。最小喷动速度是喷动流化床设计和操作中的很重要的基本参数, 因此国内外一些学者对其进行了试验研究, 并得出了很多有意义的半经验公式^[4~7]。然而大多数研究者进行最小喷动速度的研究时往往都是针对常压进行的, 加压下研究较少, 且针对流化风对最小喷动速度的影响研究较少。基于此, 本文主要研究了压力、静止床高、流化风对最小喷动速度的影响, 并根据试验数据回归得出最小喷动速度的关联式, 为生产操作和设计提供参考。

1 试验装置

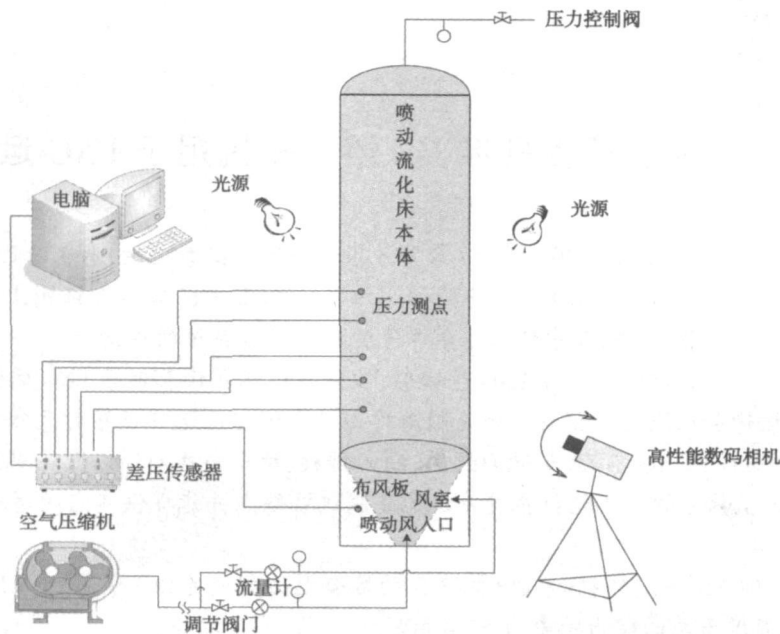


图 1 加压喷动流化床冷态试验系统简图

收稿日期: 2006-12-15; 修订日期: 2007-01-17

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)基金资助项目(G199902210535, 2004CB217702); 国家自然科学基金资助项目(2004CB217702, 2005CB221202, 2006CB20030204, 2006CB705806)

作者简介: 李乾军(1979-), 男, 江苏姜堰人, 东南大学博士研究生。

试验装置如图 1 所示, 床体由圆柱形筒体、风室、布风板和喷动管等组成, 材质为有机玻璃。从布风板底端到筒体上端共计 1 500 mm, 筒体内径为 100 mm, 倒锥形布风板顶角为 60°, 上面分两排均布 72 个小孔, 每个孔直径 1.8 mm, 整个布风板开孔率 1.39%, 喷动管内径为 10 mm。采用小米做床料, 床料的特性如表 1 所示。

表 1 床料特性参数

颗粒	d_p/mm	$\rho_p/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	ϵ_{mf}
小米	1.6	1 330	0.40
小米	2.3	1 330	0.42

表 1 中: d_p 为颗粒比表面积平均粒径; ρ_p 为颗粒的真实密度; ϵ_{mf} 为颗粒体积空隙率。本文的最小喷动速度是指无论是否存在流化风, 逐渐减小喷动风, 中心喷泉突然坍塌时所对应的喷动风床内表观风速。最小喷动速度用 u_{ms} 表示。最小喷动速度的测定采用观察法: 对给定的物料、静止床高、压力、流化风流量, 首先增大喷动风速, 使床中物料达到喷动状态, 然后逐渐减小喷动风速, 当喷泉突然消失和压降突然增大的那一刻所对应的喷动风床内表观风速为最小喷动风速。

2 试验结果

2.1 操作压力对最小喷动速度的影响

压力对最小喷动速度的影响如图 2 所示。压力均指绝对压力, 最小喷动速度随压力的增加先迅速减小然后减小幅度变缓。

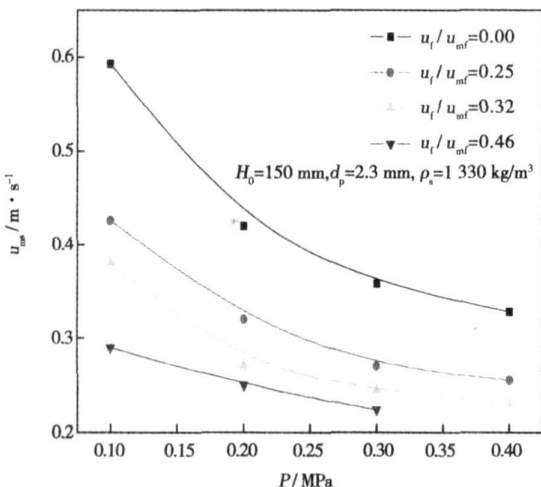


图 2 压力对最小喷动速度的影响

假设喷动区和环形区没有质量和能量交换, 则喷动床中形成喷动的条件是喷动区中气体对床料的曳力等于床料的重力和浮力之差, 气体对床料的作用力来源于气体自身的压能转换的动能。因此形成喷动的基本条件是:

$$(\rho_p - \rho_g)gH_0 = \xi \frac{\rho_g u_{ms}^2}{2} \quad (1)$$

式中: ξ —以喷动速度为基准的阻力系数; ρ_g —气体密度; H_0 —静止床高。由于 $\rho_p \gg \rho_g$, 且 $\rho_g = p^0 \rho_{g0}$ (ρ_{g0} 为常压下气流密度), 则式(1)可以写成:

$$\rho_p g H_0 = \xi \frac{p^0 \rho_{g0} u_{ms}^2}{2} \quad (2)$$

对于一给定床料、静止床高、几何尺寸的床来说, 式(2)可写为:

$$p u_{ms}^2 = C \quad (3)$$

式中: C —常数。由式(3)可见床层压力 p 和最小喷动速度 u_{ms} 的二次方成反比, 压力升高, u_{ms} 降低, 对式(3)进行微分处理可得:

$$\frac{du_{ms}}{dp} = -\frac{c}{2p} \quad (4)$$

式中: c —常数, 由上式可以看出, 当床层压力升高时, $\left| \frac{du_{ms}}{dp} \right|$ 降低, 表现在图 2 中即为随着床层压力的升高, u_{ms} 下降, 但幅度变缓。

2.2 静止床高对最小喷动速度的影响

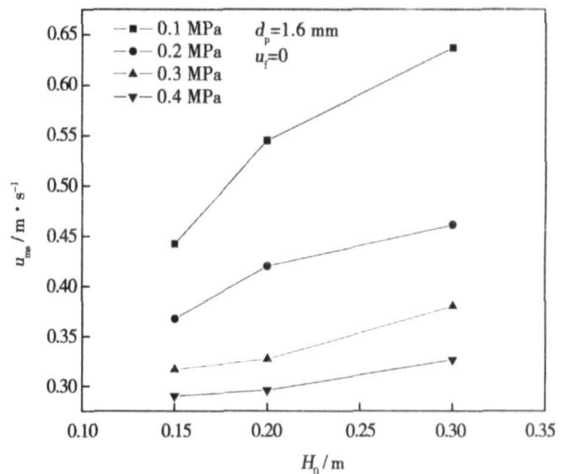


图 3 静止床高对最小喷动速度的影响

图 3 为 3 种静止床高下的最小喷动速度, 从图中可以看出随着床高的增加, 最小喷动速度增加, 这是由于床高增加, 气体要穿透床层形成喷动需克服的阻力增大, 增大的阻力必须由速度的增大来抵消。且喷动气在上升的过程中不断渗入周边环形区, 床高变大, 扩散量必然增大, 导致总气量的增加。另外

从图中也可以看出床高对最小喷动速度的影响随压力的增加而减弱,这是由于压力下气体密度增大,气流的动能增大,对颗粒的作用力增大,因此减弱了床高对最小喷动速度的影响。

2.3 流化风对最小喷动速度的影响

流化风在上升过程中不断扩散进入中心喷动区,因此当流化风增大时,进入中心喷动区的风量也增加了,由于其它条件不变,实现最小喷动的风量是一定的,这使得喷动风量减少,最小喷动速度降低。图4中4个不同的压力下最小喷动速度随着流化风的增大都有同样的趋势。

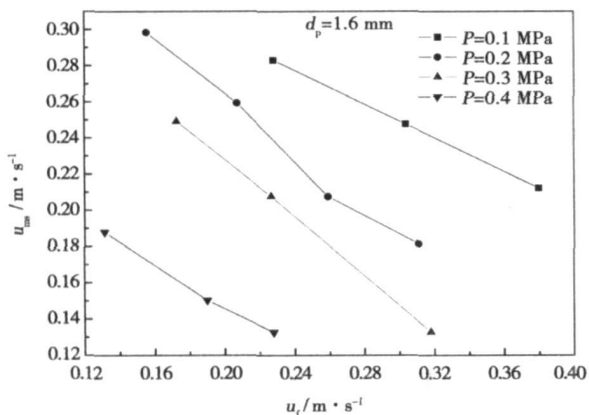


图4 流化风对最小喷动速度的影响

3 最小喷动速度的关联式

3.1 $u_f=0$ 时最小喷动速度关联式的研究

以往的研究者对 $u_f=0$ 的最小喷动速度做了很多研究,并归纳了很多关联式,其中最具代表性的、应用最广的是 Mathur 和 Gisher 提出的关联式^[8];金保升等人在直径 200 mm 的有机玻璃冷态试验台上研究了压力、颗粒粒径、静止床高等对最小喷动速度的影响^[9],根据试验数据得出关联式。

表2 最小喷动速度的关联式

文献	u_{ms} 的关联式($u_f=0$)
Mathur ^[8]	$u_{ms} = \left(\frac{d_p}{D_t} \right) \left(\frac{D_i}{D_t} \right)^{1/3} \sqrt{\frac{2gH_0(\rho_s - \rho_g)}{\rho_g}}$
金保升 ^[9]	$u_{ms} = 211.87 \left(\frac{d_p}{D_t} \right)^{1.15} \left(\frac{D_i}{D_t} \right)^{1/3} \times \left[\frac{2gH_0(\rho_s - \rho_g)}{\rho_g} \right]^{0.5} \left(\frac{p}{p_0} \right)^{-0.5}$
本文	$u_{ms} = 0.246(2gH_0)^{0.5} \left(\frac{d_p}{D_t} \right)^{0.42} \left(\frac{H_0}{D_t} \right)^{-0.26} \times \left(\frac{D_i}{D_t} \right)^{1/3} \left(\frac{\rho_s - \rho_g}{\rho_g} \right)^{0.40}$

图5以试验数据为横坐标,关联式计算值为纵坐标,从图中可以看出 Mathur 公式相对比较接近,只有少数点相对误差超过 $\pm 15\%$ 。本文对试验数据进行了线性拟合得到关联式,如表2所示,相关系数 0.964,最大偏差 10%,平均偏差 3.4%,关联式和试验结果吻合较好。

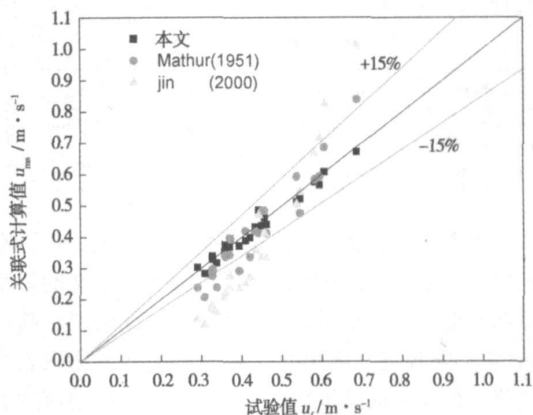


图5 u_{ms} 的试验值和关联式计算结果比较 ($u_f=0$)

3.2 $u_f > 0$ 时最小喷动速度的关联式

很多研究者研究了喷动床的最小喷动速度,并提出了很多关联式, Bi 就这些关联式进行了详细的探讨^[10]。但是这些关联式都是基于喷动床得出的,因此均没有考虑流化风对最小喷动速度的影响。一些研究者对常压下引入流化风的喷动流化床的最小喷动速度进行了试验研究^[11-12],并根据试验数据拟合得到最小喷动速度的关联式。

表3 最小喷动速度的关联式

文献	u_{ms} 的关联式($u_f > 0$, 常压)
唐凤翔 ^[11]	$\frac{1}{1-\epsilon} \frac{d_p u_{ms} \rho_g}{\mu_g} = \cos(\theta/6) \sin(\theta/2) \tan(\beta/2) f(D_i/D_{crit}) \times \left(\frac{H_0}{D_t} \right)^{0.43} \left(\frac{d_p}{D_t} \right)^{1.90} \left(\frac{D_i}{D_t} \right)^{0.33} \left(\frac{\rho_s(\rho_s - \rho_g) g D_t^3}{\mu_g^2} \right)^{0.65} \times (0.051 - 0.00046 Re_t^{0.83})$
钟文琪 ^[12]	$u_{ms} = 24.5(2gH_0)^{0.5} \left(\frac{d_p}{D_t} \right)^{0.472} \left(\frac{D_i}{D_t} \right)^{0.183} \left(\frac{H_0}{D_t} \right)^{0.208} \times \left[1 + \frac{u_f}{u_{mf}} \right]^{-0.284} \left(\frac{\rho_s - \rho_g}{\rho_g} \right)^{0.225}$
本文	$u_{ms} = 0.034 \left(\frac{D_i}{D_t} \right)^{1/3} \left(\frac{d_p}{D_t} \right)^{0.37} \times \left[2gH_0 \frac{\rho_s - \rho_g}{\rho_g} \right]^{0.5} \left(\frac{u_f}{u_{mf}} \right)^{-0.4}$

前人对喷动流化床 $u_f > 0$ 时的最小速度研究基本上是在常压下进行的,研究压力下喷动流化床的流动特性很有必要。本文在内径为 100 mm 的三维

加压喷动流化床上研究了引入流化风, 且不管环形区是否流化时的最小喷动速度, 并根据试验数据线性回归得到关联式, 如表 3 所示, 本公式相关系数 0.92。图 6 是本文试验值和上述关联式计算值的比较, 从图中可以看出关联式与本文关联式计算结果和试验值吻合较好, 大部分偏差都在 $\pm 10\%$ 内, 只有少数超过 $\pm 10\%$, 但是都在 $\pm 20\%$ 内, 平均偏差 6.75%。钟文琪大部分计算值都偏小的原因可能是他的试验装置为准二维喷动流化床^[13], 跟三维床相比, 流化风进入喷动风的扩散量相对要大, 其对喷动形成的贡献要大于三维的, 因此该关联式计算值偏小。唐凤翔的最小喷动速度为喷动流化状态下的最小喷动速度^[11], 而要达到最小喷动流化状态, 流化风必然较大, 从图 4 可以看出, 流化风增大, 最小喷动速度减小, 因此该关联式计算值偏小。

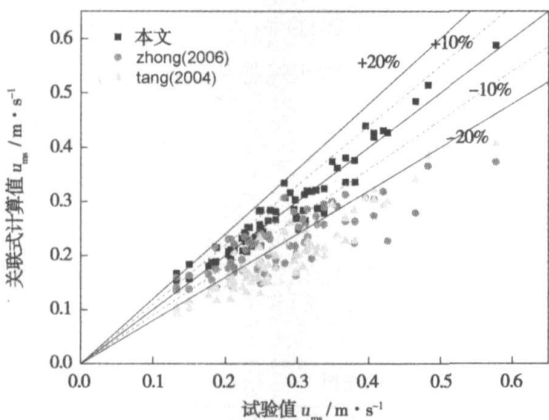


图 6 u_{ms} 的试验值和关联式计算结果比较 ($u_f > 0$)

4 结 论

(1) 喷动流化床的最小喷动速度随压力的增大而减小, 但减小幅度逐渐变小; 静止床高增大, 最小喷动速度增大, 但床高对最小喷动速度的影响随着压力的增大而减弱。流化风风量增加导致最小喷动速度的降低。

(2) 根据试验值进行线性回归, 得到最小喷动速度的关联式:

$$u_{ms} = 0.246 (2gH_0)^{0.5} \left(\frac{d_p}{D_t} \right)^{0.42} \left(\frac{H_0}{D_t} \right)^{-0.26} \times \left(\frac{D_i}{D_t} \right)^{1/3} \left(\frac{\rho_s - \rho_g}{\rho_g} \right)^{0.40} \quad u_f = 0 \quad (5)$$

$$u_{ms} = 0.034 \left(\frac{D_i}{D_t} \right)^{1/3} \left(\frac{d_p}{D_t} \right)^{0.37} \left(2gH_0 \frac{\rho_s - \rho_g}{\rho_g} \right)^{0.5} \times \left(\frac{u_f}{u_{mf}} \right)^{-0.4} \quad u_f > 0 \quad (6)$$

该关联式和试验值吻合较好, 式(5)相关系数 0.964, 偏差范围 $\pm 15\%$, 平均偏差 3.68%; 式(6)相关系数 0.92, 偏差范围 $\pm 20\%$, 平均偏差 6.75%, 具有一定的可信度, 有应用价值。与常压下的同类试验结果也相当一致, 说明加压条件下仅为气体密度有变化, 该变化因素对最小喷动速度的影响, 在无因次数 $\frac{\rho_s - \rho_g}{\rho_g}$ 中已得到体现。

参考文献:

- [1] LIM C J, WATKINSON A P, KHOE G K. Spout, fluidized, spout-fluidized bed combustion of bituminous coal[J]. Fuel, 1988, 67: 1211-1217.
- [2] HE Y L, LIM C J, GRACE J R. Spouted bed and spout-fluid bed behaviors in a column of diameter 0.91 m[J]. Canada Journal of Chemical Engineering, 1992, 70: 848-857.
- [3] LIN B Y C J, GRACE J R. Hydrodynamics of spouted and spout-fluidized beds at high temperature[J]. Canada Journal of Chemical Engineering, 1992, 70: 804-847.
- [4] MADONNA L A, LAMA R F. The derivation of an equation for predicting minimum spouting velocity[J]. AIChE, 1958, 4: 497-498.
- [5] CHOSH B. A study of the spouted bed, part I: a theoretical analysis [J]. Indian Chemical Engineering, 1965, 1: 16-19.
- [6] CHEN J J J, LAM Y W. An analogy between the spouted bed phenomena and the bubbling-to-spray transition[J]. Canada Journal of Chemical Engineering, 1983, 61: 759-762.
- [7] FANE A G, MITCHELL R A. Minimum spouting velocity of scale-up beds [J]. Canada Journal of Chemical Engineering, 1984, 62: 437-439.
- [8] MATHUR K B, EPSTEIN N. Spouted Bed[M]. New York: Academic Press, 1974.
- [9] 金保升, 周山明, 肖 睿. 加压喷动流化床流动和扩散规律冷态实验研究[J]. 燃烧科学与技术, 2000, 6(4): 289-295.
- [10] BI H T. A discussion on minimum spout velocity and jet penetration depth[J]. Canada Journal of Chemical Engineering, 2004, 82: 4-10.
- [11] 唐凤翔, 张济宇. 喷动流化床最小喷动流化速度的多因素影响与关联[J]. 化工学报, 2004, 55(7): 1083-1091.
- [12] ZHONG WENQI, CHEN XIAOPING, ZHANG MINGYAO. Hydrodynamic characteristics of spout-fluid bed; Pressure drop and minimum spouting/spout-fluidizing velocity[J]. Chemical Engineering Journal, 2006, 118: 37-46.

(编辑 滨)

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