

燃煤 PM₁₀ 在高梯度磁场中的捕集

鲁端峰, 吴 新, 赵长遂, 李永旺

(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: 根据高梯度磁分离原理, 在考虑磁场、流场、布朗扩散和惯性作用的情况下, 建立了高梯度磁场捕集燃煤可吸入颗粒物的模型, 计算了颗粒捕集效率, 并将计算结果与试验结果进行对比分析。结果发现, 在 0.023~9.3 μm 的粒径范围内, 颗粒捕集效率计算值与试验值呈现的趋势基本一致, 1~9.3 μm 的颗粒计算值与试验值吻合较好, 误差在 5% 以内。较高的颗粒磁化强度、磁场强度以及较长的停留时间均有利于颗粒在磁场中的捕集, 布朗扩散对于 $d_p < 1 \mu\text{m}$ 的颗粒捕集效率有较大促进作用, 而惯性作用对颗粒捕集效率影响微弱。研究表明, 采用高梯度磁场捕集燃煤可吸入颗粒物是一种有效可行的方法。

关 键 词: PM₁₀; 燃煤; 高梯度磁场; 数值模拟

中图分类号: X513 文献标识码: A

前 言

可吸入颗粒物是指空气动力学直径小于 10 μm 的颗粒(PM₁₀), 易导致人类呼吸道疾病, 影响大气能见度和气候变化^[1~2]。燃料燃烧特别是煤的燃烧是可吸入颗粒物污染的重要来源。燃煤可吸入颗粒物中富集许多有毒痕量元素, 而且其含量随着颗粒粒径的减小而增加, 因此具有更大的危害性^[3]。常规的除尘方式如电除尘、布袋除尘以及旋风除尘等对燃烧源 PM₁₀ 尤其是 PM_{2.5} 的排放缺乏有效的控制, 研究新的控制燃烧源可吸入颗粒物的理论和方法十分迫切。我国于 2002 年立项进行燃烧源可吸入颗粒物形成与控制技术基础研究, 旨在为控制和脱除燃烧源可吸入颗粒物提供理论基础和实验依据。

燃煤可吸入颗粒物中含有一定量的铁磁性物质。Chengfeng Zhang 和 Yuanzhi Chen 等人的研究发现燃煤可吸入颗粒物中铁氧化物的含量为 4.1%~23.5%^[4~5]; 孙俊民等人的研究发现燃煤产生的细颗粒中铁氧化物主要有 Fe₃O₄、α-Fe₂O₃ 和 γ-Fe₂O₃^[6]。而 Fe₃O₄ 和 γ-Fe₂O₃ 易于磁化, 且具有较

高的饱和磁化强度, 因此应用磁分离技术控制燃煤可吸入颗粒物污染是值得研究的方向, 但是目前有关这方面的报道还很少。

为了分析颗粒物在高梯度磁场中的捕集机理, 研究颗粒在磁场中的运动轨迹是一种直观而有效的方法。Bean 首先提出了轨迹模型的概念, Luborsky 和 Gerber 等人在此基础上进行了理论和试验研究^[7~8], 颗粒轨迹模型得以发展。但到目前为止, 颗粒在高梯度磁场中的受力分析和流场模型的确定都没有统一的认识, 并且以前的研究主要针对的是矿浆或废液中的磁性颗粒, 颗粒几何尺寸较大, 这与气相场中超细颗粒的受力分析有较大区别。

对粒径在 0.023~9.3 μm 范围内的燃煤可吸入颗粒物在高梯度磁场中所受磁场梯度力、流体曳力进行了分析, 建立了高梯度磁场捕集燃煤可吸入颗粒物模型, 计算了颗粒轨迹和捕集效率, 并与试验结果进行对比。研究表明, 采用高梯度磁场捕集燃煤可吸入颗粒物是一种有效可行的方法。

1 颗粒捕集模型

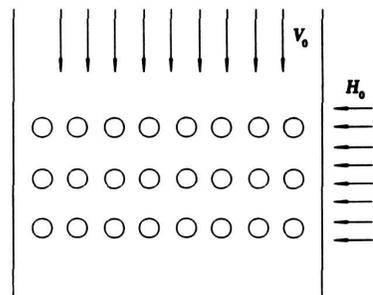


图 1 高梯度磁场作用区域

如图 1 所示, 在一方直通道内, 有规则的布置磁

介质格栅。通道内充满着粘性不可压缩流体, V_0 为颗粒流速, H_0 为外加磁场。磁介质磁化后自身会产生一个磁场, 其与外加磁场相互叠加, 会在磁介质的周围形成较高的磁场梯度。在磁场作用区域内, 磁化后的颗粒受到磁场梯度力的作用而被磁介质吸附, 如图 2 所示。

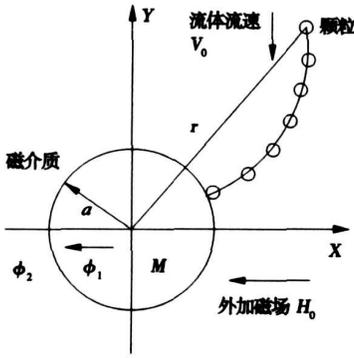


图 2 磁介质捕集颗粒模型

2 颗粒捕集效率

2.1 捕集效率

引入捕集系数的概念, 磁介质格栅捕集颗粒总效率 η 由下式表示^[9]:

$$\eta = (1 - C_{out}) / C_{in} = 1 - \exp(-\lambda L) \quad (1)$$

其中: C_{in} —入口颗粒数目浓度; C_{out} —出口颗粒数目浓度; λ —捕集系数; L —格栅总长度。

捕集系数 λ 与单根磁介质捕集效率 E 之间的关系如下:

$$\lambda = \left[\frac{3\pi}{4} \right]^{1/3} \frac{(1-\epsilon)^{1/3}}{a} \ln(1-E) \quad (2)$$

其中: ϵ —磁介质格栅的空隙率; a —磁介质丝的半径。

2.2 E 的求取

可吸入颗粒物经过高梯度磁场时, 受到磁力、流场曳力和重力等多种力的作用, 其运动式如下^[10]:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{F_D}{m_p} + g + \frac{F_m}{m_p} \quad (3)$$

式中:

流体曳力:

$$F_D = m_p \frac{3\pi\mu d_p}{C_p m_p} (u - v) \quad (4)$$

其中: u —流体流速; v —颗粒速度; μ —流体动力粘度; C_s —坎宁安修正系数, d_p —可吸入颗粒物直径。

磁场作用力:

$$F_m = \mu_0 \nabla(m \cdot H) \quad (5)$$

其中: μ_0 —真空导磁因数; m —颗粒物的磁矩; H —外加磁场强度。

采用 Fluent 对流场进行直接模拟, 求得流场速度 u 的分布。根据电磁学理论分析计算磁场状态 H , 结合计算出的流场, 采用标准四阶 Runge-Kutta 法求解微分式(3), 用拉格朗日方法跟踪计算颗粒运动轨迹, 并由此得到在上述力作用下单根铁磁丝对颗粒的捕集效率 E_m 。

文献[11]指出, 在纤维过滤器中, 颗粒的布朗扩散和惯性作用也必须加以考虑。

布朗扩散作用的影响^[11]:

$$E_d = 1.26 \left[\frac{1 - (1 - \epsilon)^{5/3}}{w} \right]^{1/3} Re^{-2/3} \quad (6)$$

$$w = 2 - 3(1 - \epsilon)^{1/3} + 3(1 - \epsilon)^{5/3} - 2(1 - \epsilon)^2 \quad (7)$$

惯性作用的影响^[11]:

$$E_n = \rho_p b^2 v / 18 \mu a \quad (8)$$

故: $E = E_m + E_d + E_n$, 并根据式(1)和式(2)可以求得不同粒径颗粒的捕集效率。

3 结果与讨论

3.1 颗粒运动轨迹

假设在入口位置, 颗粒在空间内均匀分布。在一定颗粒粒径 d_p 、初始速度 v_0 、磁场强度 B 和颗粒单位体积磁矩 m_0 的条件下, 分别计算不同初始位置颗粒的运动轨迹, 如图 3 所示。颗粒跟随气体流沿 y 轴负向运动, 在流经磁介质周围时, 部分颗粒在磁场梯度力的作用下被磁介质捕集。为简化计算, 本文在计算颗粒运动的过程中未考虑颗粒对流场的影响。

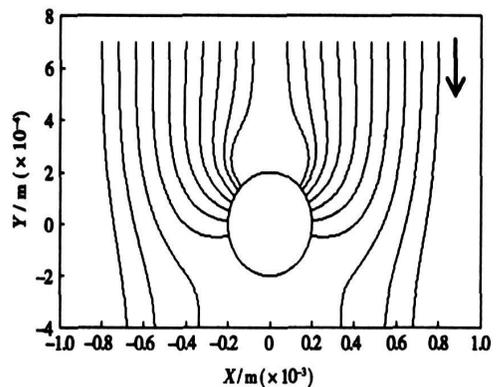


图 3 颗粒运动轨迹

($d_p = 1 \mu\text{m}$, $v_0 = 0.05 \text{ m/s}$, $B = 400 \text{ mT}$, $m_0 = 4000 \text{ A/m}$)

3.2 颗粒捕集效率

利用高梯度磁场捕集燃煤可吸入颗粒物的试验结果对本模型加以验证^[12]。采用 3 种不同磁性的飞灰作为试验样品, 试验通道横截面尺寸 50 mm×50 mm, 长 1200 mm, 磁介质为直径 0.35 mm 的铁丝, 在磁场区域内均匀布置, 填充率为 2.4%。图 4 示出样品 a 的磁滞曲线, 其余两种样品磁滞曲线与之类似, 并且在外加磁场为 500 mT 时颗粒均已趋近饱和和磁化, 饱和磁化强度分别为 (a) 4.4×10^3 A/m、(b) 2.75×10^3 A/m 和 (c) 0.81×10^3 A/m。

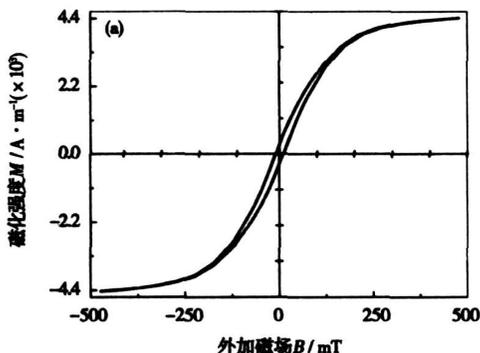


图 4 燃煤可吸入颗粒物磁滞回线

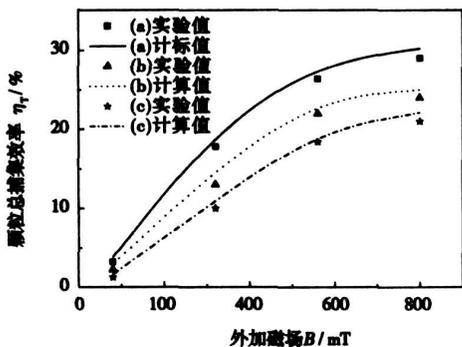


图 5 颗粒总捕集效率与磁场强度的关系
($v_0 = 0.068$ m/s)

按照 3 种样品的实测磁化强度及试验条件对颗粒总捕集效率进行计算, 计算结果与试验结果对比如图 5 所示。由图可知, 颗粒总捕集效率 (η_T) 的计算值与试验值吻合较好, 误差在 10% 以内。根据式 (5) 可知, 颗粒所受磁力由外加磁场的梯度和颗粒本身的磁化强度决定, 结合样品的磁滞曲线可知, B 由 0 mT 增大到 500 mT 时, 外加磁场梯度和颗粒的磁化强度均有较大提高, 引起颗粒所受磁力有较大提高, 从而导致 η_T 有较大升幅; 而 B 由 500 mT 增大到 800 mT 时, 颗粒的磁化强度趋近饱和不再变化, 颗

粒所受磁力的增加不如上一阶段明显, 必然导致 η_T 升幅降低。试验结果得到了与之一致的规律。并且在相同条件下, 磁化强度较高的颗粒, 其捕集效率较高, 这与 3 种样品的磁化特性规律一致。以上分析表明, 在高梯度磁场分离燃煤可吸入颗粒物的过程中, 磁力是主导作用力。

图 6 示出颗粒分级捕集效率。由图可知, 在考虑综合作用的情况下, 模拟计算结果与试验得到得规律基本一致。但在颗粒捕集过程中, 颗粒之间存在着聚并—再分散过程, 这在一定程度上影响颗粒捕集效率。本文计算中未考虑这方面的因素, 导致模拟计算值与试验值存在一定误差。如图所示, $d_p < 1 \mu\text{m}$ 时, 计算值与试验值误差较大, 对于粒径为 $0.023 \mu\text{m}$ 的颗粒, 误差最大, 值为 25.2%。计算发现, 颗粒粒径越小, 布朗扩散作用越明显, $d_p = 0.023 \mu\text{m}$ 时, 由布朗扩散作用引起的颗粒捕集效率达到了 34%。由图也可以看出, 在本文研究的粒径范围内, 惯性作用影响较弱。

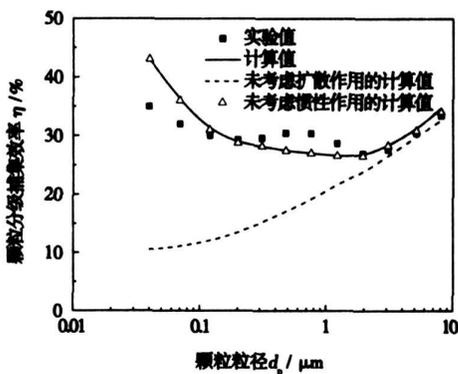


图 6 颗粒分级捕集效率
($v_0 = 0.068$ m/s, $B = 800$ mT)

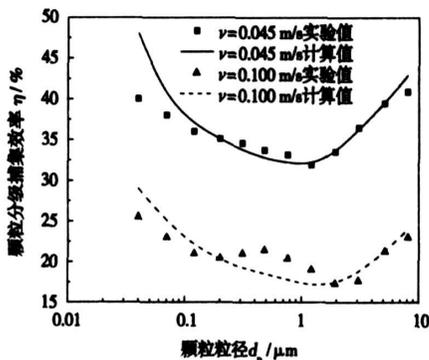


图 7 颗粒分级捕集效率同气体流速的关系
($B = 800$ mT)

图7示出颗粒分级捕集效率同气体流速之间的关系。由图可知,流场在很大程度上影响着颗粒捕集效率, $v=0.045\text{ m/s}$ 时的颗粒总捕集效率比 $v=0.1\text{ m/s}$ 时高15%左右。气流速度较低时,颗粒在磁场区域内的停留时间较长,并且流体拽力作用相对较小,颗粒的跟随性下降,因此颗粒捕集效率较高,并且计算发现流速较低时,小粒子布朗作用有增强的趋势。

4 结 论

对高梯度磁场捕集燃煤可吸入颗粒物($0.023\sim 9.3\ \mu\text{m}$)进行了数值研究,并将与试验结果对照。结果发现,模型预测的颗粒捕集效率与试验结果基本吻合,通过此模型可以较好地分析颗粒在高梯度磁场中被捕集的机理。高梯度磁场捕集燃煤可吸入颗粒物的过程中,磁场、流场和布朗扩散对颗粒捕集效率均有较大影响,特别是 $d_p < 1\ \mu\text{m}$ 的颗粒布朗扩散作用较明显,但是整个粒径范围内,惯性作用影响微弱。较高的颗粒磁化强度、磁场强度以及较长的停留时间都有利于颗粒在磁场中的捕集。研究表明,采用高梯度磁场捕集燃煤可吸入颗粒物是一种有效可行的方法。但由于本文未考虑颗粒与颗粒之间的相互作用、热泳沉积和静电沉积等因素的影响,模型预测值与试验值还有一定偏差,仍需进一步的研究对计算进行改进。

参考文献:

[1] MAYNARD A D, MAYNARD R L. A derived association between am-

bient aerosol surface area and excess mortality using historic time series data[J]. *Atmospheric Environment*, 2002, 36: 5561-5567.

- [2] PENNER J E, NOVAKOV T. Carbonaceous particles in the atmosphere: a historical perspective to the fifth international conference on carbonaceous particles in the atmosphere[J]. *Journal of Geophysical Research D*, 1996, 101: 19373-19378.
- [3] ZHUANG Y, BISWAS P. Submicrometer particle formation and control in a bench-scale pulverized coal combustor[J]. *Energy and Fuels*, 2001, 15(3): 510-516.
- [4] ZHANG CHENGFENG, YAO QIANG, SUN JUNMING. Characteristics of particulate matter from emissions of four typical coal-fired power plants in China[J]. *Fuel Processing Technology*, 2005, 86(7): 757-768.
- [5] CHENG Y Z, SHAH N, FRANK E H, et al. Investigation of primary fine particulate matter from coal combustion by computer-controlled scanning electron microscopy[J]. *Fuel Processing Technology*, 2004, 85(6): 743-761.
- [6] 孙俊民, 姚强, 刘惠永. 燃煤飞灰中铁质微珠的显微结构及其组成研究[J]. *燃料化学学报*, 2005, 33(3): 263-266.
- [7] FRED E, LUBORSKY, SENIOR MEMBER, et al. High gradient magnetic separation: theory versus experiment[J]. *IEEE Trans Mag*, 1975, 11(6): 1696-1700.
- [8] GERBER, LAWSON. The HGMS filter performance exponential law[J]. *IEEE Trans Mag*, 1989, 25(5): 3806-3808.
- [9] SVOBODA J. A realistic description of the process of high gradient magnetic separation[J]. *Minerals Engineering*, 2001, 14(11): 1493-1503.
- [10] JAMES A R, ARMIN D E, KAREN D D. Application of high gradient magnetic separation principles to magnetic drug targeting[J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2004, 280(2): 184-201.
- [11] COOKSON J T. Removal of submicron particles in packed beds[J]. *Environ Sci Technol*, 1970, 4(2): 128-134.
- [12] 鲁端峰, 赵长遂, 吴新, 等. 燃煤可吸入颗粒物在高梯度磁场中的捕集试验研究[J]. *动力工程*, 2007, 27(1): 113-116.

(编辑 何静芳)

(上接第273页)

- [6] LEWIE, GILLIL. Characteristics of fluidized particles[J]. *Ind Eng Chem*, 1949, 41: 1104.
- [7] KWAUK. Generalized fluidization[J]. *Scientia Sinica*, 1963, 4: 587-612.
- [8] 李洪钟, 郭慕孙. 非流态化气固两相流理论及应用[M]. 北京: 北京大学出版社, 2002.
- [9] PUSHNOV A S. Calculation of average bed porosity[J]. *Chemical and Petroleum Engineering*, 2006, 42(12): 14-17.
- [10] 夏军仓, 许世森, 郜时望, 等. 移动颗粒层过滤除尘技术的高压实验研究[J]. *热力发电*, 2001(6): 30-33.

- [11] YANG W C, NEWBY R A, LIPPERT T E. A moving granular bed filter concept for particulate removal at high pressures[R]. New York: Engineering Foundation, 1992.
- [12] 向晓东, 幸福堂, 陈望生, 等. 颗粒层除尘器过滤状态压力损失的研究[J]. *环境科学学报*, 1997, 17(1): 100-105.
- [13] CHITIEN. Granular filtration of aerosols and hydrosols[M]. Boston: Butterworths, 1989.
- [14] 吴晋沪, 王洋. 移动床除尘过程数学模型建立及机理讨论[J]. *燃料化学学报*, 2002, 30(3): 218-222.

(编辑 辉)

el coal PM₁₀. By using the above algorithm, simulated was the aggregation dynamics process of fly-ash fine particles in a uniform magnetic field, which have been produced during the combustion of Dongsheng-origin bituminous coal. A comparison of the simulation results with the test ones shows a complete correspondence between the two results. The dual-subregion algorithm features a relatively good applicability. For particle diameters ranging from 0.023 to 9.318 μm, the aggregation and removal efficiency of the intermediate-sized particles is higher than that of small and large-sized particles. An enhancement of the following factors, i. e. magnetic induction intensity of an outer magnetic field, particle total mass concentration, residence time of particles in the magnetic field and gas flow average velocity, can increase the aggregation and removal efficiency of the particles. After the particles have attained saturation magnetization, the intensification of the outer magnetic field will have no influence on particle aggregation. When the product of the gas flow average velocity and the residence time of the particles in the magnetic field is a constant, the aggregation and removal efficiency of the particles will decrease with an increase of gas flow average velocity. The particle size corresponding to a maximal particle-size-based removal efficiency of the particles and the particle-number median diameter will decrease with an increase of the aggregation-related total removal efficiency. **Key words:** fuel coal PM₁₀, magnetic aggregation, dual-subregion algorithm, ash removal efficiency

燃煤 PM₁₀在高梯度磁场中的捕集 = **Capturing of Fuel Coal PM₁₀ in a High Gradient Magnetic Field** [刊, 汉] / LU Duan-feng, WU Xin, ZHAO Chang-sui, et al (Education Ministry Key Laboratory on Clean Coal Power Generation and Combustion Technology under the Southeast University, Nanjing, China, Post Code: 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2007, 22(3). — 280 ~ 283

According to the high-gradient magnetic separation theory and with the magnetic field, flow field, Brown diffusion and inertia action being taken into account, a model for capturing inhalable particles of fuel coal in a high-gradient magnetic field has been established along with a calculation of the capturing efficiency of particles. A contrast-based analysis of the calculation results and the test ones indicates that for the particle diameters ranging from 0.023 μm to 9.3 μm, the calculated value of the capturing efficiency of particles assumes a basically identical tendency as the test one and for the particle diameters ranging from 1 μm to 9.3 μm, the calculated value is in relatively good agreement with the test one with the error being less than 5%. A relatively high particle magnetized intensity, magnetic field intensity and relatively long residence time can all be favorable to the capture of particles in the magnetic field. The Brown diffusion plays a relatively strong contributory role in enhancing the efficiency of capturing particles having a diameter of less than 1 μm while the inertia action has a weak influence on particle capturing efficiency. The research results indicate that using a high gradient magnetic field to capture fuel-coal-produced inhalable particles is a valid and feasible approach. **Key words:** fuel coal PM₁₀, high gradient magnetic field, numerical simulation

常温空气无焰燃烧在燃煤锅炉煤改气中的应用 = **Application of Flameless Combustion at a Normal Air Temperature for a Coal-fired Boiler Being Converted to Burn Gas** [刊, 汉] / XING Xian-jun, WANG Bao-yuan, LIN Qi-zhao (Department of Thermal Science and Energy Source Engineering, China National University of Science and Technology, Hefei, China, Post Code: 230026) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2007, 22(3). — 284 ~ 287

By installing a flameless combustion reactor operating at a normal-air temperature in the furnace of a coal-fired boiler it is possible to convert a coal-fired boiler into a gas-fired one. Relevant calculation results show that as different from the predominant convection heat-exchange mode adopted by other gas-fired boilers, the furnace of the gas-fired boiler under discussion assumes mainly a radiation heat-exchange mode, thus intensifying in-boiler heat exchange. The actual measurement results indicate that a boiler thermal efficiency of 92.92% can be attained, over 30% higher than that of the boiler before modification and more than 4% higher than that of boilers with the same capacity currently available. As the boiler