

基于余热回收的颗粒物捕集机理研究

潘春江

华北电力大学能源与机械工程学院 河北保定 071003

摘要: 对于直接接触式喷淋塔系统, 在回收烟气余热的同时, 对烟气内颗粒物具有去除作用。本文通过考虑布朗扩散、惯性碰撞、拦截、热泳和扩散泳等作用的单液滴捕集颗粒物模型, 并与实验对比, 能够较准确的确定颗粒物直径、液滴直径、温度、液滴速度、烟气速度等对单液滴捕集的过程及效率的影响规律。结果表明, 在直接接触式喷淋系统工况下, 可通过扩散泳实现对于亚微米颗粒物的捕集, 解决了亚微米颗粒物难以去除的问题。

关键词: 喷淋塔; 余热回收; 颗粒物捕集; 扩散泳

Research on Particle Trapping Mechanism based on Waste Heat Recover

Chunjiang Pan

School of Energy and Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Baoding, Hebei, 071003

Abstract: Direct contact spray tower system not only recovers waste heat from flue gas, but also removes particulate matter from the gas. This paper presents a single droplet particle capture model for removing particulate matter, which takes into account the effects of Brownian diffusion, inertial collision, interception, thermophoresis, and diffusiophoresis. The model was compared with experiments and was found to accurately determine the influence of particle diameter, droplet diameter, temperature, droplet velocity, flue gas velocity, and other factors on the process and efficiency of single droplet capture. The results show that the diffusion phoretic mechanism can effectively capture submicron particles in the direct contact spray system, solving the problem of difficulty in removing submicron particles.

Keywords: Spray tower; Waste heat recovery; Particulate matter capture; Diffusion swimming

引言

燃煤电厂产生大量颗粒物, 我国对电厂烟气颗粒物的脱除主要采用静电除尘、旋风除尘、布袋除尘等技术^[1-3]。随着超低排放指标的提出, 湿式电除尘、电袋复合除尘、低低温电除尘等高效除尘技术^[4-5]也开始广泛应用。采用新型除尘技术可以实现较高的烟气除尘净化效果, 但由于新增除尘设备造成较高成本。因此, 既要保证烟气除尘器除尘性能, 又要考虑烟气净化系统成本, 成为高效除尘技术顺利推广的关键因素。清华大学^[6-8]首先提出利用吸收式热泵回收烟气余热的技术路线, 经研究发现, 喷淋塔内喷淋液滴与烟气中颗粒物接触, 可通过布朗作用、惯性碰撞、拦截、热泳、扩散泳等捕集作用实现液滴对颗粒物的脱除。该技术既回收了烟气中余热, 又去除了烟气中携带的颗粒物, 协同解决了余热回收协同颗粒物去除两大问题。实践证明, 该技术在供热工况下系统效率可提高 10% 以上, 烟囱出口含尘量也显著下降。

本文从液滴对于颗粒物的捕集机理出发, 保证系统处于喷淋塔余热回收运行工况, 定量计算各种捕集颗粒物机理及其作用效果; 分析不同参数对于颗粒物捕集效率的影响, 为余热回收喷淋塔烟气除尘净化提供理论支撑。

一、单液滴捕集机理^[9-12]

1.1 布朗扩散捕集

颗粒的扩散过程类似于气体分子的扩散过程, 基于烟气中颗粒物热运动的输运现象, 使得颗粒物通过布朗作用由高浓度区域向低浓度区域运动。单液滴效率对颗粒物布朗扩散的定义为: 颗粒扩散到液滴表面的速率与颗粒在液滴横截面积内接近液滴表面的速率之比。布朗扩散捕集效率 η_{diff} 可用经验公式来描述:

$$\eta_{diff} = 0.7 \left\{ \frac{4}{\sqrt{3}} \left(\frac{1-\alpha}{J+\sigma K} \right)^{\frac{1}{2}} Pe^{-\frac{1}{2}} + 2 \left(\frac{\sqrt{3}\pi}{4Pe} \right)^{\frac{2}{3}} \left[\frac{(1-\alpha)(3\sigma+4)}{J+\sigma K} \right]^{\frac{1}{3}} \right\} \quad (1)$$

$$J = 1 - \frac{6}{5} \alpha^{\frac{1}{3}} + \frac{1}{5} \alpha^2 \quad (2)$$

$$K = 1 - \frac{9}{5} \alpha^{\frac{1}{3}} + \alpha + \frac{1}{5} \alpha^2 \quad (3)$$

$$K_n = \frac{2\lambda}{d_p} \quad (4)$$

$$Pe = \frac{d_d U}{D_{diff}} \quad (5)$$

$$D_{diff} = \frac{kTC}{3\pi\mu d_p} \quad (6)$$

1.2 惯性碰撞捕集

惯性碰撞是颗粒物在绕液滴运动时，由于颗粒物具有一定的惯性，在流线发生弯曲时它未能完全沿着绕流流线运动，而是穿过流线，最终撞击到液滴表面。颗粒物的质量以及与液滴运动的相对速度和位置，决定了其能否通过惯性碰撞而被液滴捕集。惯性碰撞捕集效率 η_{imp} 可采用经验公式：

$$\eta_{imp} = \left(\frac{S_i}{S_i + 0.35} \right)^2 = \left(1 - \frac{0.35}{S_i + 0.35} \right)^2 \quad (7)$$

$$St = \frac{\tau_p u_0}{d_d} = \frac{\rho_p d_p^2 C u_0}{9\mu d_d} \quad (8)$$

1.3 拦截捕集

在喷淋内，烟气中夹带的颗粒物向接近液滴运动轨迹，当颗粒物的半径大于液滴表面到颗粒物所在的烟气流线轨迹的距离时，颗粒物会自然而然的撞击液滴从而被拦截。拦截捕集效率 η_{int} 可用经验公式表示。

$$\eta_{int} = \frac{(1-\alpha)}{(J+\sigma K)} \left[\left(\frac{K_R}{1+K_R} \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{K_R}{1+K_R} \right)^2 (3\sigma+4) \right]$$

(9)

$$K_R = \frac{d_p}{d_d} \quad (10)$$

1.4 热泳捕集

颗粒物在液滴周围除了受到惯性等传统捕集机制的作用外，还会存在热泳力的作用。热泳是夹杂在烟气中的颗粒物在温差的驱动下，颗粒物分子不均匀碰撞而产生的现象。Pilaf^[12]等人研究结果显示，液滴与颗粒物温差从 5°C 增加到 60°C 时，对于粒径在 0.1 μ m-1 μ m 的亚微米颗粒物的捕集效率由 0.01 增加到 0.5，因此，热泳力是脱除亚微米颗粒物的主要机制。热泳捕集效率 η_{th} 可用经验公式表示。

$$\eta_{th} = \frac{\eta_{Dav}}{1+\eta_r} \quad (11)$$

$$\eta_{Dav} = \frac{4\beta \left(2 + 0.6 Re_d^{\frac{1}{2}} Pr^{\frac{1}{3}} \right) (T_g - T_d)}{u_g d_d} \quad (12)$$

$$\eta_r = 0.275 \lg Re_d + f(\eta_{Dav}) \quad (13)$$

$$f(E_{Dav}) = 33.26\eta_{Dav}^2 - 5.222\eta_{Dav} - 0.152 \quad (14)$$

1.5 扩散泳捕集

气体介质中挥发性液体的冷凝，引起向着液体表面的气体分子流，如果扩散气体分子的分子量与在其分子的分子量不同，由于气体动量迁移过程的影响，会导致小粒子的迁移，扩散泳捕集效率 η_{di} 可用经验公式表示。

$$\eta_{di} = \frac{4m_1^{0.5} D_w T_g}{(\gamma_1 m_1^{0.5} + \gamma_2 m_2^{0.5}) p_0} \frac{(2 + 0.6 Re^{1/2} Sc_w^{1/3}) \left(\frac{p_w}{T_w} - \frac{p_g RH}{T_g} \right)}{u d_d}$$

(15)

$$D_w = 0.211 \times 10^{-4} \left(\frac{T_w}{273.15} \right)^{1.94} \quad (16)$$

1.6 总捕集效率

Pasceri 和 Friedlander 利用量纲分析和实验建立了撞击、拦截和扩散很重要时球体沉积在圆柱体上的总体靶效率。Strauss 认为各捕集机制之间不相互影响，给出单液滴对于颗粒物的总捕集效率：

$$\eta = 1 - (1 - \eta_{diff})(1 - \eta_{imp})(1 - \eta_{int})(1 - \eta_{th})(1 - \eta_{di}) \quad (17)$$

二、单液滴捕集效率结果及分析

影响单液滴捕集效率的因素包括颗粒物直径、液滴直径、液滴温度及烟气温度、相对速度等。本文通过计算，对比不同因素对单液滴捕集颗粒物影响效果。

2.1 颗粒物直径对捕集效率的影响

经计算发现，布朗扩散机制主要对于直径很小的颗粒物 ($d_p < 0.01\mu$ m) 起作用，这些颗粒物在布朗力的作用下无规则运动，被直径很大的液滴捕集而被去除。颗粒物直径越小，布朗扩散捕集效率越高；对于微米级颗粒物，惯性碰撞则作为主要捕集机制，且随着颗粒物直径的增加，惯性碰撞捕集效果越明显；而对于亚微米颗粒物，布朗作用、惯性碰撞、拦截作用对该尺度颗粒物捕集效率较低，在未引入热泳与扩散泳时，对于亚微米颗粒物脱除效果较差。喷淋系统通过增加温差与水蒸气分压力差，进而增加热泳与扩散泳的驱动力，达到对亚微米颗粒物较高的捕集效果。

通过计算总捕集效率发现，随着颗粒物直径增大，总捕集效率先降低在升高，在直径较小时，由于布朗扩散捕集起主要作用，随着颗粒物直径的增大，布朗扩散捕集的效果降低。在 0.01~0.5 μ m 时，效率最低，此时各捕集机制作用都较

弱。当在直径大于 $1\mu\text{m}$ 时, 颗粒物直径增大, 与液滴碰撞的概率增大, 惯性碰撞机制起主要作用, 捕集效率也逐步提高。

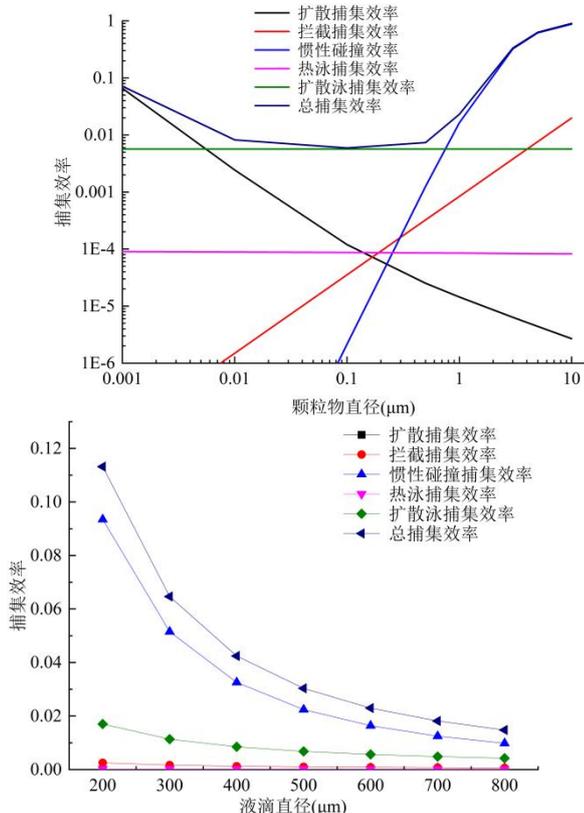


图 1 颗粒物直径对捕集效率的影响

2 液滴直径对颗粒物捕集效率的影响

2.2 液滴直径对捕集效率的影响

由于喷淋系统采用螺旋空心喷嘴, 喷嘴喷出液滴直径在 $400\mu\text{m}$ 到 $800\mu\text{m}$ 之间, 通过计算可知, 随着液滴直径的增大, 各机制捕集效率都降低, 因而总捕集效率降低。造成这一结果的原因是由颗粒物捕集效率的定义所决定的, 液滴直径越大, 颗粒物所捕集的投影面积也会越大, 单个液滴所捕集的颗粒物数量与液滴投影面积掠过的颗粒物数量之比随之减少。

2.3 温度对捕集效率的影响

根据直接接触式余热回收系统运行工况可知, 喷淋塔内的冷却水可降至 20°C 以下, 与经过脱硫塔后 $50^\circ\text{C}\sim 60^\circ\text{C}$ 的烟气混合, 实现回收烟气中余热的目的。在液滴温度 20°C 时, 随着烟气温度的升高, 烟气与液滴的温差增大, 捕集效率提高。烟气与液滴温度的变化, 主要通过影响扩散泳与热泳捕集效果。随着温差的增大, 扩散泳与热泳的作用更明显, 总捕集效率也随之提高。通过与 Pilat 研究的只有布朗运动、惯性碰撞、拦截三种机制下, 单液滴颗粒物的捕集效率相对比,

在引入扩散泳和热泳作用后, 对于亚微米颗粒物的捕集效果明显提升, 对于亚微米级颗粒物, 在总捕集效率较低的情况下, 可通过改变温差使捕集效率显著升高。

2.4 相对速度对捕集效率的影响

相对速度对于不同机制的影响不同, 液滴速度升高, 会使斯托克斯数增大, 进而导致惯性碰撞捕集效率升高, 而对于除惯性碰撞外其他几种机制, 液滴速度越大, 捕集效率越低。但惯性碰撞作用相对较明显, 在液滴速度增加时, 捕集效率有一定提高。

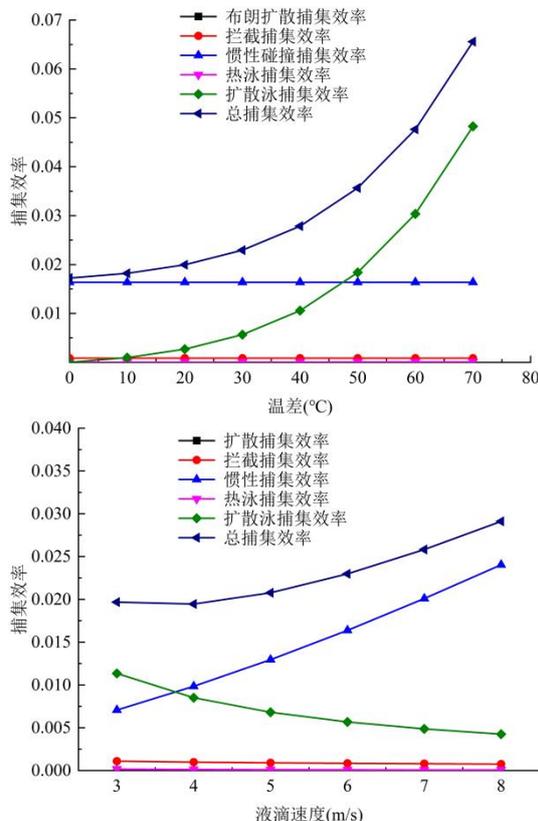


图 3 温度对颗粒物捕集效率的影响图

图 4 液滴速度对捕集效率的影响

三、模型验证

王翱^[13]等通过 FLUENT 软件模拟了所需流场、温度场及水蒸气浓度场分布, 计算出了液滴周围的温度与水蒸气浓度场。计算程序利用颗粒运动方程追踪颗粒在流场、热泳和扩散泳作用下的运动轨迹, 得到颗粒运动的极限轨迹, 计算得单液滴捕集效率。在相同的环境下与该模拟结果对比分析, 对于亚微米颗粒物误差范围在 20% 以内, 微米级颗粒物甚至可以达到 5% 以内。

四、结论

5.1 直接接触式烟气余热回收系统, 不仅可以在利用烟气中余热, 还可以通过烟气与喷淋液滴接触碰撞, 以及热泳、扩散泳等作用, 实现对烟气中颗粒物的捕集。通过计算发现, 对于直径在 $1\mu\text{m}$ 以上的颗粒物, 通过惯性碰撞可达到较高的颗粒物脱除效果; 对于直径 $0.01\mu\text{m}\sim 1\mu\text{m}$ 之间的颗粒物, 各种捕集机制作用效果都很低, 扩散泳捕集机制起主要作用, 并随温度变化较大; 对于直径小于 $0.01\mu\text{m}$ 的颗粒物, 布朗扩散捕集作用为主要捕集机制, 随着颗粒物粒径的减小, 总捕集效率会升高。

5.2 燃煤烟气颗粒物直径在 $0.5\mu\text{m}\sim 2\mu\text{m}$ 时, 质量浓度最大。而传统的高效除尘器对于中间尺度的颗粒物, 各种捕集机理作用效果都较差, 对于该尺度颗粒物难以达到高效去除的目的。而本文所研究的直接接触式喷淋塔系统可增加液滴与烟气温差与水蒸气压力差, 使热泳与扩散泳捕集效果增强, 对于亚微米颗粒物捕集效果显著提高, 对 PM2.5 问题的解决具有重要意义。

参考文献:

[1]毛节泰, 张军华, 王美华. 中国大气颗粒物研究综述[J]. 气象学报, 2002(05): 625-634.

[2]孙和泰, 黄治军, 华伟, 石志鹏, 段伦博. 超低排放燃煤电厂可凝结颗粒物排放特性[J/OL]. 洁净煤技术: 1-7[2021-0729].

[3]万益. 湿式静电除尘水膜均布及细颗粒物强化脱除研究[D]. 浙江大学, 2014.

[4]赵磊, 周洪光. 超低排放燃煤火电机湿式电除尘器细颗粒物脱除分析[J]. 中国电机工程报, 2016, 36(02): 468-473.

[5]Yupeng Feng, Yuzhong Li, Lin Cui. Critical review of condensable particulate matter[J]. Fuel, 2018, 224.

[6]刘华, 周贤, 付林. 接触式烟气冷凝换热器的换热性能[J]. 暖通空调, 2014, 44(09): 97-100+15.

[7]李锋, 付林, 赵玺灵, 肖常磊, 杨巍巍. 天然气锅炉房烟气余热深度回收工程案例[J]. 煤气与热力, 2015, 35(11): 1-6.

[8]李锋, 付林, 赵玺灵. 燃气热电联产烟气余热回收工程案例[J]. 区域供热, 2013(03): 52-55+69.

[9]M.J. Pilat, A. Prem. Calculated particle collection efficiencies of single droplets including inertial impaction, brownian diffusion, diffusiophoresis and thermophoresis[J]. Atmospheric Environment (1967), 1976, 10(1).

[10]H. Michael Davenport, Leonard K. Petersl. Field studies of atmospheric particulate concentration changes during precipitation[J]. Elsevier, 1978, 12(5).

[11]Investigation on emission factors of particulate matter and gaseous pollutants from crop residue burning[J]. Journal of Environmental Sciences, 2008(01): 50-55.

[12]C. H. Jung, K. W. Lee. Filtration of Fine Particles by Multiple Liquid Droplet and Gas Bubble Systems[J]. Aerosol Science and Technology, 1998, 29(5).

[13]王翱, 宋蕾, 姚强. 脱硫塔内单液滴捕集颗粒物的数值模拟[J]. 工程热物理学报, 2014, 35(09): 1889-1893.