

粒子間付着力に基づく高効率PM2.5除去装置の排熱による連続再生と数値シミュレーションを援用した高度化

横尾, 健人

<https://hdl.handle.net/2324/4475086>

出版情報 : 九州大学, 2020, 博士 (工学), 課程博士
バージョン :
権利関係 :

氏 名 : 横尾 健人

論 文 名 : 粒子間付着力に基づく高効率 PM_{2.5} 除去装置の排熱による連続再生と数値シミュレーションを援用した高度化

区 分 : 甲

論 文 内 容 の 要 旨

粒子状物質(PM)とは主に燃焼器から排出される煤塵であり, 燃焼技術の向上に伴い概ね 2.5 μm 以下の PM_{2.5} が増加している. 人体に悪影響を及ぼす微小な PM は大気中に排出されると風により長距離を輸送されるためその被害は発生源にとどまらず, 世界中で年間数百万人もの人々が亡くなっている. 従来の集塵装置では微小な PM を高効率で捕集することが難しく, 様々な対策がなされているものの十分な効果が得られていない. それに対して, 微粒子で支配的となる粒子間付着力を利用する流動層式の PM 除去法が検討されており, すでにサブミクロンサイズの PM 除去に対する流動層方式の有効性が示されている. しかし, 流動層式 PM 除去装置は長時間連続して運転し PM 堆積量が増加すると捕集効率が低下してしまうことや, 流動状態, ベッド粒子, PM の種類や大きさなど種々の運転条件によって装置性能が大きく左右される等, 実用に向けた課題は多い. 本研究では, 流動層が PM の捕集に有効だけでなく高効率燃焼器としての特性を有することに着目し, 可燃物が主成分である PM の捕集と燃焼処理を同時に行う連続再生式装置として運用することで, 流動層式 PM 除去装置の長寿命化を図った. また, 本装置の高度化を目指して, 種々の運転条件が PM 除去特性に及ぼす影響を数値計算を行って調べた.

第一章では, 本論文の研究背景, 目的, 構成, および既往の研究について述べた.

第二章では, 流動層式 PM 除去装置において, PM の模擬物質としてカーボンブラックを用いることで, PM の捕集と燃焼を同時に行う連続再生が可能であることを示した. また, 温度, 空塔速度, PM 粒径をパラメータとした実験から基礎的な燃焼挙動を明らかにした. 特に, 流動層の大きな接触表面積, 攪拌混合特性, 均一な温度分布等の高効率燃焼器としての特性を利用することで, 従来装置では 600-650°C であった連続再生温度を 400°C まで低減することができた.

第三章では, 燃料の燃焼に伴い生成され燃焼排気ガス中に 5-15 vol.%含まれる水蒸気が PM 燃焼を促進することを示した. 特に, 水蒸気存在下で測定した燃焼速度を基に連続再生に適した運転条件を探索した結果, 連続再生温度を 380°C まで低減することができた.

第四章では, 石炭燃焼の分野で安価な触媒として用いられるカリウム触媒を担持したベッド粒子を用いて PM 燃焼促進効果を調べた. 触媒担持量, 温度, PM 粒径, 空塔速度をパラメータとして基礎的な燃焼特性を明らかにし, ベッド粒子表面の X 線回折(XRD)分析と排気ガスのフーリエ変換赤外分光光度計(FTIR)による分析に基づき燃焼促進機構を推定した. カリウム触媒によって連続再生温度は空気下で 350°C, さらに水蒸気存在下では触媒-水蒸気間の相乗効果によって 330°C まで連続再生温度を低減することができた.

第五章では, PM 燃焼に適した流動状態を探索するために PM 燃焼のモデル化とそれを用いた Euler-Euler 法による数値計算を行った. 通常の熱重量測定装置では流動層内の燃焼速度を過小評価

することが知られており、流動状態の影響を PM-ガス間相対速度による物質移動の影響と見做して、流れ場中で固形試料の燃焼速度を測定できる新たな熱重量測定装置の提案し PM 燃焼モデルを構築した。計算結果は PM 捕集燃焼挙動を再現し、それに基づき流動状態と PM 燃焼との関係を明らかにした。また実験結果との比較から構築した燃焼モデルの妥当性を確認した。

第六章では、連続再生温度をさらに低減するために触媒をより多く担持できる表面の粗いベッド粒子を用いて実験を行った。PM 捕集燃焼実験と Euler-Euler 法による数値計算を基に燃焼特性を明らかにし、増加した触媒担持量によって燃焼排熱程度である 300°C において連続再生を達成した。

第七章では、流動層中の詳細な PM 除去挙動を明らかにするために用いた、個々の粒子の運動を直接計算する離散要素法(DEM)とその並列計算手法をまとめた。粒子分布に空間的偏りが生じると並列計算効率が低下することが一般に知られており、本計算においても流動化や PM の供給と捕集によって粒子分布に大きな空間的偏りが生じる。そこで、動的負荷分割法の一つである 3 次元スライズグリッド法を提案し実装することで高効率での並列計算を可能とした。

第八章では、局所平均化した Navier-Stokes 方程式に基づく数値流体力学(CFD)-DEM 計算を行い実験で測定された微小 PM の高捕集効率を再現した。ほとんどの PM は流動層底部の密なベッド粒子層で捕集され、捕集された PM は支配的な PM-ベッド粒子間の付着力によってベッド粒子上に安定に保持されることが明らかとなった。

第九章では、ベッド粒子周りの詳細な流れ場を考慮しつつ運転条件の影響を明らかにするために埋め込み境界法(IBM)に基づく PM 除去計算を行った。IBM は計算負荷が高いため、前章で PM 除去に最も寄与した流動層底部の密なベッド粒子層を対象として、ベッド粒子を固定した計算を行った。サブミクロンサイズの PM を高効率除去できるという実験結果を再現し、低い空隙率や高い空塔速度の条件において、PM とベッド粒子が接触しやすくなることでさらに大きな捕集効率が得られることを明らかにした。なお、流動層全体を対象とした計算から、ベッド粒子層に大きな空隙や気泡が生じていても比較的密な底部のベッド粒子層において PM の高効率捕集が可能であることを高精度な計算から明らかにした。

第十章では、総括として本論文の結論を述べた。