火力発電所ボイラ炉壁付着物層の全放射率

牧野俊郎、内山雅史

京都大学工学部物理工学科

〒606-01 京都市左京区吉田本町

Branislav D. Brajuskovic

Boris Kidric Institute of Nuclear Sciences

Beograde, Yugoslavia

本研究では、低質炭を燃料とする火力発電所のボイラ壁付着物層とその主要な成分化合物の熱ふく射性質を実験的に調べ、火炉内伝熱の評価のための基礎資料を得る。全ふく射測定器を試作して570～1270 Kの温度域での全放射率を測定し、つぎの諸点を明らかにする：付着物層はふく射の拡散放射体であり、1 mm以上の厚さの層はふく射の不透明体であると見なせる。その全放射率は0.5～0.9の程度である。全放射率は温度の増加とともに減少する。付着物の粉体層は1000 K以上に加熱されると焼結され、その際全放射率には、明瞭な履歴特性が現れる。焼結された層の全放射率は高い。

1. 緒 言

低品質の石炭を多量に産出する国では、その石炭を微粉化して、これを火力発電所のボイラ炉の燃料とする試みが推進されている。この方法はエネルギー資源を有効に利用するためのよい工夫の一つであるが、この場合、ボイラの炉壁や管壁には不燃物の付着物層が厚く形成され、これは炉の性能劣化の原因となる。火炉内伝熱の主要なモードはふく射伝熱であるので、そこでの伝熱の評価のためには、付着物層の熱ふく射性質の知見が不可欠である。ところが、低品質炭の化学組成は多様であり、長期にわたる操業のサイクルごとにも異なる。また、付着物層は高温の炉内で焼結され、地層のように積層構造をとって岩石化するため、巨視的に見ても均質ではない。これまでに行われた付着物層の熱ふく射性質についての実験研究の結果[1-3]は、定性的にも一貫していない。

このような状況の下で付着物層の熱ふく射性質を調べるには、多様な付着物層の平均的な性質を対象として、有効数字1桁めの値あるいは定性的な知見を求めることがまず重要である。また、今後の系統的な研究のためには、ふく射の放射(emission of radiation)の角度特性、ふく射の透過性を評価することが望ましい。

本研究では、3種の付着物層とその成分化合物を対象として、その全放射率(total emittance)の挙動を570～1270 Kの温度域で調べ、上記の諸点について定性的な検討を加える。

記 号

T	: 温度, K
T_r	: 全ふく射測定器内部の温度, K
T_s	: 試料層の表面温度, K
V_b	: 黒体を対象とする場合の全ふく射測定器のデジタル出力値
V_s	: 試料層を対象とする場合の全ふく射測定器のデジタル出力値
α	: 全ふく射測定器の装置定数, K^{-1}
$\epsilon^*(\theta)$	: 試料層の全指向放射率
ϵ^*_N	: 試料層の全垂直放射率, $=\epsilon^*(0)$
θ	: 放射角

2. 実験装置および実験方法

2.1 供試試料

供試試料の素材は、低品質の微粉炭を燃料とするユーゴスラビア国 Kosovo火力発電所で採取した3種の付着物層の塊である。これらの塊はいずれも0.5 mm

程度の厚さの層からなる積層構造をもつ。本実験では、その平均的な性質に注目するために、これらの塊を粉体化して試料とする。Table 1 に3種の試料の主たる成分化合物の含有割合を示す。この表は、X線回折法により化合物を定性分析・同定し、またICP発光分析法により金属とSiの元素重量割合を求めて、その結果をもっとも簡単な化合物の形で表した推算値を与える。実在の状態では、たとえば $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$, $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ などのより複雑な化合物の形をとることがあり、また試料の組成のばらつきも大きいので、表は有効数字1桁の程度の概略値を示すものと言ってよい。試料No.1とNo.2は火炉壁で採取したものであり、No.3は過熱器壁で採取したものである。試料No.1は灰紫色、No.2は赤みがかった灰紫色、No.3は黄土色を呈する。その粒子径は いずれも 75~350 μm の程度である。これらの試料に加えて、表1の化合物のなかから CaSO_4 , Fe_2O_3 , SiO_2 , Al_2O_3 , Na_2SO_4 の4種を選び その粉体試料を別途に準備する。その素材は純度95%以上の市販の試薬であり、粉体の粒子径は 5~300 μm である。以上の8種の試料を広さが 50×50 mm、深さが1, 3, 5 mmのステンレス鋼SUS304製試料容器に入れて軽く圧縮し、巨視的には均質で平滑な平行層をつくる。これがふく射測定の対象となる試料層である。なお、3種の厚さの試料層は、ふく射透過性を検討するために準備するものである。また、試料容器はあらかじめ高温で十分に大気酸化した後を用いる。

2.2 実験装置および実験方法

Fig.1に実験装置の概要を示す。試料層②は、試料容器③の裏面から加熱器⑦で加熱する。その雰囲気は実験室の空気である。加熱器は独立に制御できる2組の炭化ケイ素抵抗体からなる。試料層の外周部は、迷光の影響を抑えるために水冷された多層のふく射シールド⑤で覆っている。試料層の温度分布をその表面・裏面・試料容器底部の計9点に設置した 直径100 μm

mのK(クロメル・アルメル)熱電対④で測定し、試料層表面内で一様な温度分布が実現するように加熱を制御する。とくに、表面部の熱電対は表面に沿うように外部に導く。試料層を 表面温度が570Kから最高温度まで(試料容器下面の温度が1500Kまで)、準静的に加熱しその後冷却し、あるいは再加熱・再冷却して、この温度走査の過程での全放射率の挙動を調べる。

2.3 全ふく射測定器

全放射率の測定は光学的な方法による。すなわち、ふく射の波長特性の無視できる熱的な検知器を備えた全ふく射測定器①を用いて試料層表面からの全ふく射流束を測定し、あらかじめ測定した疑似黒体についての値に照らして、全放射率を算出する。全ふく射測定器は Fig.1に一点鎖線で示す円周に沿って動き、全指向放射の角度特性を、放射角 θ が $-60^\circ \leq \theta \leq +60^\circ$ の領域について調べる。

1. total radiation flux meter	5. radiation shield
2. specimen layer	6. water coolant
3. SUS304 crucible	7. SiC heater
4. K-thermocouple	8. insulation brick

Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus

Table 1 Chemical compositions of ash deposit layers (wt.%)

	CaSO_4	Na_2SO_4	Fe_2O_3	SiO_2	MgO	CaO	Al_2O_3	H_2O
No.1	47.3	12.9	9.7	8.3	1.9	2.5	2.3	0.3
2	44.5	17.8	4.1	5.1	2.3	1.6	1.4	0.3
3	71.5	2.1	12.1	6.6	2.6	2.5	2.3	0.4

全ふく射測定器は市販の焦電検知器を用いるふく射温度計(radiation pyrometer)を改造したものである。すなわち、ふく射温度計の入射光学系のポリエチレン防塵膜を除き、検知器の帯域透過フィルタを KRS-5 窓に交換し、また、増幅・デジタル出力系を 473~1273 K の黒体からの(実効的な)全ふく射流束(2.4節参照)が 12ビットの出力に対応するように改めている。この測定器は、測定器から 1 m の距離にある、光軸に垂直な面内の直径 10 mm の円形領域からの、

$$\pi \{(0.5^\circ/2) \times (\pi/180^\circ)\}^2 \text{ sr}$$

のペンシル状の立体角からの全ふく射流束を観測する。この立体角は、放射角 θ が最大の $\theta = 60^\circ$ の場合には、試料層表面の長辺が 20 mm の楕円形領域に対応する。

2.4 全指向放射率

全ふく射測定器は、この立体角の方向に進む試料層表面からの全ふく射流束と室温の測定器内部の面から全ふく射流束との差に対応するデジタル値 V_s を出力する。同時に、測定器内部の温度 T_r を内蔵の半導体素子で測定し出力する。それゆえ、試料層以外から放射されるふく射に起因する誤差が無視できるとき、試料層表面の全指向放射率 $\varepsilon^t(\theta)$ は、試料層の表面温度を T_s として、式、

$$\varepsilon^t(\theta) = \frac{V_s(T_s) + \alpha T_r^4}{V_b(T_s) + \alpha T_r^4}$$

で求められる。ここで、 $V_b(T)$ は 473~1273 K の任意の温度 T の黒体からのふく射に対応する全ふく射測定器の出力を表す T の関数であり、 α は全ふく射測定器の装置定数である。これらの関数と値は、あらかじめ行った校正実験により既知となっている。代表的に言って、 $T_r = 293 \text{ K}$ のときに、補正項である (αT_r^4) の $V_b(T)$ に対する割合は、本実験の最高の試料層温度である 1270 K では 0.3%，最低の表面温度である 570 K では 7% の程度である。3.5節に示すように、本実験の試料層のふく射透過性は無視できるので、試料層の表面温度 T_s はその中央に設置した熱電対の示す温度で代表する。

3. 実験結果および考察

3.1 付着物試料層の表面状態

厚さ 1 mm と 3 mm の付着物試料層では、3 種の層のいずれの場合にも、1000 K を越える温度に加熱すると、冷却後には、初期のざらざらした灰紫色~黄土色

が、いくぶんつやのある暗い紫色~黄土色に変化し固化しているのが観察された。これは試料層の焼結が起り、それが表面に及んだことを意味する。試料 No. 1 の厚さ 5 mm の層の場合には、層の底部のみが焼結され、表面に明かな変化は認められなかった。

3.2 全放射率測定値の信頼性

全放射率の測定値のばらつきは、もっとも大きい場合に、Fig. 3 (b) の下方の 2 シリーズの $\bigcirc$ 印の実験点列の差の程度であった。この測定値のばらつきは、おもに試料の化学組成や焼結された層の構造のばらつきに起因する。加えて、粉体の試料層表面の熱電対は、高温での焼結にともなう移動することがあり、これは、表面温度に分布があることとともに T_s の測定の系統的な誤差の要因となる。しかし、試料層温度分布の測定値を基に推定すると、この温度測定の誤差は、実験の最高の試料層温度でも 1% の程度であり、この誤差の及ぼす全放射率測定の誤差は、図の実験点の大きさの範囲の程度である。これらの要因によるばらつきや誤差に比べると、全ふく射測定器の不正確さ・不精確さに基づく測定誤差は無視できる。また、試料層以外からのふく射の影響は、本実験の試料層の温度域では小さい。

3.3 付着物試料層の全放射率の角度特性

Fig. 2 に付着物試料層の全指向放射率 $\varepsilon^t(\theta)$ の角度依存性の代表例を示す。この図では、円周方向に放射角 θ を半径方向に $\varepsilon^t(\theta)$ をとっている。実験点は、試料 No. 1 の厚さ 5 mm の層と試料 Nos. 2, 3 の 3 mm の層についてのものであり、それぞれ 3.4 節の

Fig. 2 Angular dependence of total emissances of ash deposit layers

Figs. 3(a)~(c)に示す温度走査の過程で測定した約800Kにおける値である。その節に示すように、 $\varepsilon^{\perp}(\theta)$ の絶対値は試料層の種類と温度に依存し、また加熱過程と冷却過程で異なることがあるが、いずれの場合にも、角度特性については、試料層はおおむね拡散放射体(diffuse emitter)であるといつてよい。 $\varepsilon^{\perp}(\theta)$ は θ の増加とともにわずかに減少するが、一方、 $\varepsilon^{\perp}(\theta)$ の実験点列は $\theta=0^{\circ}$ に対して必ずしも対称ではない、すなわち、平均的な特性を求めるために粉体化した試料層においても、なお、その全放射率に1桁以上の精度は期待できない、この意味で、全放射率は全垂直放射率 $\varepsilon^{\perp}_N (= \varepsilon^{\perp}(0))$ で代表するのが便宜的であり、多くの伝熱評価のためには、 $\varepsilon^{\perp}_N$ は半球放射率に等しいと見なしてよい。

3.4 付着物試料層の全放射率の温度・履歴特性

3.4.1 温度特性 Figs. 3(a)~(c)にボイラ壁付着物試料層の全垂直放射率 $\varepsilon^{\perp}_N$ の温度特性を示す。処女試料層の加熱過程では、 $\varepsilon^{\perp}_N$ の挙動は3種の付着物層について基本的に同一である。いずれの層でも、温度が増加すると $\varepsilon^{\perp}_N$ は単調に減少する。付着物層を構成する誘電体のふく射物性が強く温度に依存することはないので、この $\varepsilon^{\perp}_N$ の温度特性は、分光放射率が短波長側で低いことを示唆する。

3.4.2 焼結と履歴特性 厚さが1mmと3mmの試料層(実験点○と●)では、温度が1000Kを越えてさらに増加すると、全放射率 $\varepsilon^{\perp}_N$ はそれまでとは逆に増加する。この $\varepsilon^{\perp}_N$ の増加は、粉体の再結晶、 SiO_2 の結晶構造の変化、 Na_2SO_4 の融解、 CaSO_4 の解離などの粉体試料層の焼結現象[1,4]に起因する。 $\varepsilon^{\perp}_N$ の増加が始まる温度やその増加過程での $\varepsilon^{\perp}_N$ の値には、ばらつきがあり一定しない。冷却過程では、いずれの層でも温度が減少すると $\varepsilon^{\perp}_N$ は増加するが、表面が焼結された試料層では、 $\varepsilon^{\perp}_N$ は加熱過程の値とは異なる高い値をとり、また、その変化率は加熱過程でのそれに比べて小さい。(分光)放射率スペクトルは焼結前に比べていくぶん灰色的になるものと推定される。加熱・冷却の両過程における $\varepsilon^{\perp}_N$ の差異は最大30%の程度である。

いったん表面が焼結された層のその後の履歴特性を知るために、試料層No. 2の厚さ1mmの試料については、処女試料層を加熱・冷却した後ふたたび加熱して全放射率 $\varepsilon^{\perp}_N$ の挙動を調べたが、この再加熱・再冷却過程で、 $\varepsilon^{\perp}_N$ は1度めの冷却過程における値と実質的に同一の値をとった。

焼結が表面には至らなかった試料No. 1の厚さ5mmの層(実験点●)では、加熱・冷却の両過程における $\varepsilon^{\perp}_N$ の値は実質的に同一である。また、加熱を1000K以下に限った場合には、すべての付着物試料層で、履歴特性は現れない。

3.4.3 化学組成の影響・伝熱評価への応用 試料Nos. 1~3の層の全放射率 $\varepsilon^{\perp}_N$ の挙動を比較すると、成分化合物のなかで融解点が比較的低い Na_2SO_4 の含有率が大きい試料層ほど、すなわちNos. 2, 1, 3の順に、加熱・冷却過程における $\varepsilon^{\perp}_N$ の差が大きい

Fig. 3 Total normal emittances of ash deposit layers

ことがわかる。

本実験の試料を採取した火力発電所ボイラの場合について、本研究の結果を応用する立場から述べると、つぎようになる。この炉の火炎の中心部の温度は1773 Kの程度と推定されるが、炉壁の温度は通常673～773 Kの程度に保たれるので、付着物層の焼結は起こらず、 ϵ'_N は0.5～0.7の程度である。しかし、炉壁に付着物層が厚く堆積すると、その表面の温度は1173 Kを超えることがあり、この場合には ϵ'_N は大幅に増加することになる。燃料や運転温度の異なる炉の付着物層については条件が異なるが、本実験研究の示す定性的な値の挙動と検討事項は、同様であると思われる。

3.5 付着物試料層のふく射透過性

焼結は、基本的に試料層のふく射散乱性を減少し透過性を増加するので、もしこの効果が強ければ、層の厚さ方向に温度分布のある本実験の試料層の場合、厚さの異なる試料層の間では、全放射率が有意な差をもって異なることになる。しかし、本実験では、表面が焼結された試料層の場合にも、加熱・冷却の両過程において、厚さ1 mmの層の ϵ'_N と厚さ3 mmの層のそれとの差は小さかった。高温で層の下部のみが焼結された試料No. 1の厚さ5 mmの層でも、加熱・冷却過程における層の内部構造はたがいに異なるが、この場合にも両過程における ϵ'_N の差は小さかった。これらのことから、厚さが1 mm以上の付着物層はふく射に対して不透明であるといえる。ただし、3.6節を参照すると、 Na_2SO_4 の含有量がさらに多いときには、ふく射透過性が現れる可能性が否定できない。

3.6 成分化合物の全放射率

Fig. 4に付着物層の主たる成分化合物の粉体層の全垂直放射率 ϵ'_N の温度特性を示す。 Na_2SO_4 層は加熱中に融解し、冷却後には透明なガラス状の層になっているのが観察された。Fig. 4に見られる Na_2SO_4 層の1に及ぶ異常に高い ϵ'_N の値は融解層のふく射透過性に起因する測定誤差によるものであり、正しくない値である。他の4種の化合物の層では加熱前後で表面状態の明らかな変化は観察されなかった。一般に、 ϵ'_N は温度の増加とともに減少し、加熱・冷却過程での明瞭な履歴特性は認められなかった。しかし、付着物中に最も多く含有される CaSO_4 の ϵ'_N を厚さが1 mmと3 mmの層について比較すると、高温の下地からのふく射がより透過しやすい1 mmの層の

Fig. 4 Total normal emittances of constituent chemicals of ash deposit layers

ϵ'_N が系統的に高く、高温側でより高い。すなわち、 CaSO_4 のふく射透過性も(Na_2SO_4 のそれほどではないが)認められる。 Fe_2O_3 、 SiO_2 、 Al_2O_3 の全放射率は、付着物層のそれに比べて低い。付着物層の全放射率は成分化合物のそれから単純加算的に評価することはできない。

4. 結 言

本研究では、低質炭を燃料とする火力発電所のボイラ壁付着物層の熱ふく射性質を実験的に調べ、つぎの知見を得た。

- (1) 付着物層はふく射の拡散放射体であると見なせる。その全放射率は0.5～0.9の程度である。
- (2) 付着物層の全放射率は温度の増加とともに減少する。付着物の粉体層が1000 K以上に加熱され焼結されると、その際全放射率には、明瞭な履歴特性が現れる。焼結された層の全放射率は高い。
- (3) 1 mm以上の厚さの付着物層は、ふく射の不透過性が高い。

明体であると思なせる。ただし Na_2SO_4 をより大量に含む層ではふく射透過性が現れる可能性が否定できない。

謝 辞

本研究の全ふく射測定器を試作するにあたっては、ミノルタカメラ(株)のご協力を得た。ここに記して感謝する。

文 献

- [1] M.F.R. Mulcahy, J. Boow, P.R.C. Goard: J. Inst. Fuel, 39 (1966) 385, 394.
- [2] J. Boow, P.R.C. Goard: J. Inst. Fuel, 42 (1966) 412.
- [3] V.V. Mitor, I.N. Konopelko: Teploenergetika, 10 (1970) 41.
- [4] D. Savic, N. Afgan, B. Arsic, Lj. Jovanovic: "Fouling and Corrosion in Steam Generators", (eds. D. Savic, I. Opik), p.43, (IBK-Vinca, Belgrade, 1980).

Total Emittances of Ash Deposit Layers in a Power-Plant Boiler System

Toshiro Makino
and Masashi Uchiyama
Dept. of Engineering Science
Kyoto University
Kyoto 606-01, Japan

Branislav D. Brajuskovic
Boris Kidric Inst. of Nuclear
Sciences, Yugoslavia

Total emittance behavior of thermal radiation is investigated experimentally on ash deposit layers in a power-plant boiler system for low-quality coal powder combustion. The total emittances are measured at 570-1270 K. The deposit layers of more than 1mm in thickness are found to be diffuse and opaque for the infrared radiation. The emittances range from 0.5 to 0.9. The emittances decrease with an increase in temperature, while the pulverized deposit layers which are sintered at higher than 1000 K show a clear hysteresis phenomenon of the emittance. The emittances of the sintered layers are much higher than those of the unsintered layers.

(Received Aug. 24, 1991)

(Accepted for Publication Dec. 3, 1991)