乾式流動型大勾配磁気分離法による 微粉炭の品位向上

Coal Powder Beneficiation by Dry Fluidized HGMS Process

小田哲治・國末義英*・増田閃一

東京大学工学部電気工学科，東京都文京区本郷 7-3-1 (〒113)

*新日本製鉄堺製作所，堺市築港八幡町 1 (〒590)

T. Oda, Y. Kunisue*, and S. Masuda

Dept. of Electrical Engng., Univ. of Tokyo,

3-1, Hongo 7 chome, Bunkyo-ku, Tokyo, 113

*Sakai Works, Nippon Steel Co., 1, Tsukiminatoyawatacho, Sakai, 590

A novel dry type high gradient magnetic separation (HGMS) device comprising a fluidized bed is investigated for the purpose of obtaining pulverized Chinese coal beneficiation. The ash component of Chinese coal, indicating high magnetic susceptibility, can be cleaned well by this device compared with other coals such as Australian coal. The separation performance of the device tested is related to the magnetic field, gas velocity, processing time and process repetition frequency. The fluidization of the coal was found to be the most essential factor for obtaining good separation. Increase in magnetic susceptibility of the coal is observed by means of a pre-heating process, but improvement in the separation performance concerning the ash is not yet confirmed. Correlation points between the ash reduction and the coal recovery are centered in one curve in spite of the various parameters. About 30% ash reduction at 90% coal recovery and 45% ash reduction at 80% coal recovery are expected.

1. ま え が き

石油代替エネルギー源として最も簡便な石炭エネルギーは，燃焼時に多量の灰分やガス状有害汚染物質を大気中に放出するため，環境対策に大きな負担がかかる。こうした背景から石炭の品位向上に関する研究が世界的になされ，硫黄分や灰分の除去に大勾配磁気分離処理が有効であるとの報告が多くある^{1)~4)}。その大部分は液体分散媒を用いた湿式処理であり，経済的には燃焼用に微粉砕された石炭をそのまま処理できる乾式処理が望ましい。

筆者らは，微粉体を大勾配磁界領域中で流動化させることにより，乾式処理で効率の低さを改善した流動型大勾配磁気分離方式 (FHGMS) を提案し，オーストラリア炭処理を試みた結果，磁性分の除去には有効であるが，灰分除去に関しては不十分な性能であった⁵⁾。数種類の微粉炭燃焼フライアッシュの電気的・磁気的的特性を調べたところ，Table 1 に示されるように産地により性質が非常に異なることが判明した。最も磁性分が多いとみられる中国炭について実験したところ灰分の除去にも有効であることがわかった⁶⁾。また，超電導磁石による類似手法で脱硫に有効との報告⁷⁾もある。

本論文では，前報^{5), 6)}に続き動作パラメータの分析，

予備加熱・静電気効果，炭分歩留りと脱灰率の相関などの観点から，FHGMS の中国炭に対する品位向上性能について検討した結果について報告する。

2. 実験方法

使用した FHGMS 装置の基本構成と動作原理は前報⁵⁾とはほぼ同一であり (Fig. 1)，その後の主な改良点は，

- 1) 装置全体の気密性を改善し，装置内圧力を大気圧より少し大きくしてキャリアガス出口を大気圧とした。
- 2) 出口に粒子捕集部を設け，キャリアガスとともに外部に排出されてくる粒子を回収した。以後，この粒子を排出分 (top tail) と呼ぶ。
- 3) 流動セル内の強磁性線 (直径 0.8 mm，一部 0.3 mm の鉄線) の本数を $15 \cdot 23 \cdot 45$ 本と増加した⁸⁾。

点である。以後，磁性線に捕獲された粒子を捕獲分

Fig. 1 Experimental apparatus.

Table 1. Magnetic susceptibility of fly ash and its content of magnetic components.

Fly ash (country)	Magnetic susceptibility (emu/g)	Magnetic components (weight %)
South Africa	2.4×10^{-5}	21.5
Japan	3.0×10^{-5}	20.9
Australia	2.9×10^{-5}	16.5
China	9.7×10^{-5}	52.0

Table 2 Size distribution and its ash content of Chinese coal.

Diameter range (μm)	Weight percent	Ash content (%)
297 <	34.5	9.2
210-297	12.3	7.5
105-210	21.0	7.2
88-105	4.1	7.0
63-88	6.8	7.1
53-63	0.8	7.1
44-53	2.5	7.1
<44	18.0	10.6

(mags), 処理後に残っている粒子を残留分 (bottom tail), 処理前を原料炭 (feed) と本文中では呼ぶ。

本研究で用いた試料は、中国産石炭 (Table 1 と類似の石炭) をボールミルで1時間粉碎した後、音波ふるい器で粒径選別した微粉炭である。この粒度分布と各粒径ごとの灰分含有率を Table 2 に示す。灰分含有率は、大気中に 800°C 加熱燃焼後の残留灰分の重量百分率でをる。磁化率の測定は簡易ファラデー法により、絶対値の校正はしていない。

本装置の性能評価パラメータとしては、各部分の重量、灰分含有率、磁化率および次式の脱灰率と炭分歩留りを用いた。

脱灰率 = 捕獲分中の灰分重量 / 原料炭中の灰分重量

炭分歩留り = 排出分と残留分の重量 / 原料炭の重量

3. 実験結果と考察

捕獲分中の灰分重量と印加磁界との関係を Fig. 2 に示す。オーストラリア炭では飽和傾向がある³⁾のに反し、ほぼ直線的関係が 1.4 T まで続き、磁界が強いほど有効なことが認められる。

各粒径範囲別の捕獲分重量と灰分含有率を Fig. 3 に示す。210 μm 以上では、捕獲分が減少し灰分含有率が高い。粒子が大きいと流動化がむずかしく吹きあげ状態になるため磁性が強く灰分の多い物のみ吸着する結果と思われる。44~63 μm では灰分含有率が半減 (~10%)

Fig. 2 Magnetic field dependence on the ash separation performance.

Fig. 3 Separation performance of Chinese coal concerning with its sizes.

し、44 μm 以下では流動が悪く分散せず、分離効果がなくなる。

キャリアガス速度 V_g 依存性は、中国炭の場合にもオーストラリア炭の場合³⁾と同様であった。粒径 44~63 μm の場合、 $V_g=0.16 \text{ m/s}$ で脱灰率 9.7%, $V_g=0.33 \text{ m/s}$ で脱灰率 13.2% となり、肉眼では十分に流動しているように観測されたが、流動の微妙な違いが大切なことがわかる。 V_g が 0.3~0.4 m/s の間を詳しく調べた結果が Fig. 4 である。捕獲分中の灰分は 0.26 g とほぼ一定である。炭分歩留りを考えると 0.37 m/s の方がよいがその差は少ない (Fig. 8 BH と BG 参照)。

本方式の特徴は処理時間が短いことで、Fig. 4 に示す。捕獲分重量は 5 秒で既に大きいと灰分含有率は少ない。これは最初に吹き上げられた粒子が付着する機械的捕集によると考えられる。30 秒処理すると流動粒子の衝撃効果で磁性分だけに純化され捕獲分は減少するが灰分含有率は最大となり、さらに処理時間が長くなると堆積効果の影響で再び機械的捕集が増加するものと思われる。したがって 30 秒処理が最適である。強引であるが試料の交換時間などを無視すると磁界領域 43 cm^3 の本装置で 3.6 kg/h の処理が可能といえる。

本方式の性能は、強磁性線の太さ³⁾、本数³⁾、処理量³⁾、磁界、ガス速度、時間などのパラメータが複雑に関係しあい、最適条件の決定はむずかしく、磁性線の飽和も考えられ、また本質的性能限界を知る必要から高品位化し

Fig. 4 Carrier gas velocity dependence on the separation performance.

Fig. 5 Processing time dependence on the separation performance.

た微粉炭を何度か繰り返し処理をして捕獲分を調べた。残留分のみを再処理する方式Ⅰと排出分と残留分を混ぜて再処理する方式Ⅱとを比較した。一般に、排出分は量は少ないが高品位なため、Ⅰの方が総合分離性能は良いと予想されたが結果は逆であった³⁾。詳しく調べた結果を Fig. 6 に示す。捕獲分の灰分含有率は2回目以降常にⅡの方が高く、処理回数を増すにつれ差が大きくなる。Ⅰでは7~8回目では原料炭の値に近く、分離性能の劣化ははっきり認められる。一方、捕獲分の重量は、Ⅰ・Ⅱ共に3回目までで急激に減少し、3~6回目ではⅡの方が幾分多い。Ⅰでは3回目以降はほとんど一定で7~8回目ではⅠよりも多い。処理Ⅰでは残留分は処理するごとに流動しにくい粒子が増加し、最初に吹き上げられた粒子が機械的に捕獲されるため灰分含有率の少ない粒子が一定量ずつ毎回捕獲された結果と思われる。一方、Ⅱでは微粉炭は常に同一条件で流動し FHGMS が有効に動作するため、3回目までに灰分除去がほぼ完了し、それ以後は磁性分が減少した結果、捕獲分が減少したと解釈できる。光学的にもⅡでは常に十分流動しており、Ⅰでは処理回数が進むにつれ磁界領域での粒子の流動が減少してくることが観測され、流動状態の重要性を示し

Fig. 6 Effects of two kinds of repeated processes.

Table 3. Preheating effects on magnetic susceptibility of Chinese coal.

Diameter range (μm)	Magnetic susceptibility		
	original	pre-heated*	pre-heated**
297 <	1.3×10^{-7}	3.3×10^{-7}	2.9×10^{-7}
210-297	8.3×10^{-8}	2.5×10^{-7}	3.1×10^{-7}
105-210	1.9×10^{-7}	4.6×10^{-7}	5.9×10^{-7}
88-105	1.8×10^{-7}	6.0×10^{-7}	7.7×10^{-7}
63-88	5.9×10^{-7}	1.5×10^{-6}	1.9×10^{-6}
44-63	2.9×10^{-7}	8.7×10^{-7}	1.4×10^{-6}
<44	5.1×10^{-7}	3.2×10^{-8}	2.6×10^{-6}

* RT→330°C→RT (RT=room temperature)

** RT→330°C→RT→240°C→RT

た。経済的有用性を考えると3回処理までが有効で、これは磁化率測定による結果とも一致している。

微粉炭を予備加熱すると不純物の磁化率が増し磁気分離性能が向上する可能性がある。Kelland らの数値²⁾をもとに 330°C まで予備加熱した時の粒径別磁化率を Table 3 に示す。330°C 加熱で磁化率が約3倍になる。一方、熱サイクル効果²⁾はわずかであった。予備加熱温度ごとの磁気分離性能を Fig. 7 に示す。120°C を越すと捕獲分は増加して一定値となるが、同時に灰分含有率は低下するため原料炭の磁気率が3倍になるにもかかわらず脱灰率の向上は 20% 程度である。120°C 付近で微粉炭内部でどのような変化が起こり捕獲分の増加と灰分含有率の低下をもたらしているのかについては現在不明であり、脱灰効果の有無についても確認できていない。

流動による接触帯電により炭素は正に、灰分（カオリナイト等）は負に帯電しやすいこと⁸⁾から、磁性線と磁石間に直流電圧を印加して分離性能の向上を試みた結果、オーストラリア炭⁹⁾と異なり、電圧印加による影響は観測されなかった。ただし、予備加熱処理をした微粉炭では、処理を繰り返すごとに印加電圧の極性によらず脱灰率が向上し、しかも飽和傾向を示さない。この場合、捕

Fig. 7 Pre-heating effects on the separation performance.

Fig. 8 Correlation between coal recovery ratio and its ash reduction ratio.

獲分の灰分含有率は小さく、処理を繰り返すと炭分歩留りが小さくなるわりには脱灰率が大きくならない点を総合的に考慮すると結局電圧を印加しない方がよい。

微粉炭品位向上技術としての実用的性能を考える場合、脱灰率と炭分歩留りとの関係が最も重要である。この関係を Fig. 8 に示す。同一記号は繰り返し処理をした場合の総合性能で、() 内は粒径範囲と磁性線の本数を示す。実線は単に無処理で捕獲分と回収分とを分離した場合の脱灰率を示し、この線の傾きに近い傾きを示す処理は効果がないことを示す。処理回数は装置の構造や処理の仕方に依存するが、本質的分離性能は図中破線で囲まれた比較的狭い範囲に集約され、この領域が中国炭に対する FHGMS 処理性能である。図より、炭分歩留り 90% で脱灰率 30%、炭分歩留り 80% で脱灰率 45% が性能上限として期待される。流動条件の改善により少ない回数で達成できることが望ましい。図中 () 内の

点は、残留分の灰分含有率が高いため、捕獲分といっしょにして計算した値で、歩留り 75% で脱灰率 50% となる。また、回収方式の不備で、一部粒子 (2~10%) が大気中に飛散するので、これは排出分と同一とみなし炭分歩留りに含めている。粒径が小さいほど炭分と灰分との分離が良いことが予想され、微小粒子の流動技術が確立されれば、さらに性能が高まるものと思われる。

本装置での捕獲分磁化率の実測結果によると磁化率 1×10^{-8} emu/g 程度が分離限界であり、これを 1 桁向上させて湿式と同程度の分離性能とするには磁束密度を少なくとも 1.4 T から 4 T 程度に上げる必要がある。

4. 結 び

乾式の流動型大勾配磁気分離処理は、中国炭のように磁性成分の多い微粉炭処理には有効なことが判明した。その結果をまとめると、

- 1) FHGMS の処理性能は、粒子の流動状態に大きく影響を受ける。したがって、その流動状態の改善がなされればさらに性能が向上する可能性がある。
- 2) 脱灰率と炭分回収率とは強い相関があり、本研究で用いた中国炭の場合、回収率 90% で脱灰率 30%、回収率 80% で脱灰率 45% 程度が限界のようである。
- 3) 120°C 以上の加熱処理で磁化率は 3 倍となるが脱灰率の向上は小さい。また、電界印加効果は観測されなかった。

文 献

- 1) C. J. Lin, Y. A. Liu, and D. L. Vivese: *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-12**, 513 (1976).
- 2) E. Maxwell and D. R. Kelland: *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-14**, 482 (1978).
- 3) Sala Magnetics: EPRI Report CS-1517, **3** (1981).
- 4) J. I. Dijkhuis and C. B. W. Kerkdijk: *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-17**, 1503 (1981).
- 5) 小田, 國末, 藤田, 増田: 日本応用磁気学会誌, **6**, 159 (1982).
- 6) T. Oda, Y. Kunisue, and S. Masuda: *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-19**, 2121 (1983).
- 7) Y. A. Liu: Digests of Intermag., BA-3 (1983).
- 8) I. I. Inculet, R. M. Quigley, and K. B. Filliter: Rec. IEEE/IAS Annual Meeting, 1014 (1980).

1983 年 12 月 12 日受理, 1984 年 2 月 14 日採録