

単一微粉炭粒子の燃焼メカニズムおよび燃焼率の向上方法

沈 峰満*・稲田 隆信*²・山本 賢作*²・岩永 祐治*²

Combustion Mechanism and Improvement of Combustion Efficiency of Single Pulverized Coal

Fengman SHEN, Takanobu INADA, Kensaku YAMAMOTO and Yuji IWANAGA

Synopsis : For keeping stable operation in PCI (pulverized coal injection) operation of blast furnace (BF), it is important to make clear the combustion mechanism of pulverized coal (PC). In this paper, combustion behavior of a single PC particle was investigated. Improvement of combustion efficiency of PC can be made by effective oxygen supply, because the combustion rate was controlled by oxygen diffusion.

As a new method to improve combustion efficiency, addition of oxidizing agent, was investigated. In present work, $KMnO_4$ solution was used as the oxidizing agent. It was confirmed that the burning time can be shorten with the increase of $KMnO_4$ concentration. The addition of oxidizing agent which improves PC combustion can bring great advantage for larger size PC injection.

Key words : single pulverized coal ; combustion mechanism ; diffusion control ; oxidizing agent ; $KMnO_4$ solution ; disposition.

1. 緒言

高炉プロセスにおいて、微粉炭吹き込みは生産性の向上、生産コストの低減、ならびに環境保全などに有効であるため、吹き込み技術の改善は多くの製鉄技術者に注目されるようになってきている。しかしながら、多量の微粉炭を吹き込むと、微粉炭の燃焼率が低下する²⁾。また未燃の微粉炭はチャーとなって、炉内の充填層に滞留し³⁾、炉内の通気性を悪化させ、安定操業が困難になる。したがって、レースウェイでの燃焼率向上が微粉炭吹き込み操業の一つのポイントになるものと考えられている。このため、微粉炭燃焼メカニズムの解明は高炉操業にとって重要な意味をもっている。

単一微粉炭粒子の燃焼挙動に関する研究⁴⁾⁵⁾がいくつかあるが、ミリオオーダーの大きな粒子に関する研究がほとんどであり、数十 μm の微粉炭の燃焼挙動については不明の点が多い。そこで、本研究では、数十 μm オーダーの単一微粉炭粒子の燃焼メカニズムを実験的に解明し、さらに、微粉炭

の燃焼条件を改善するために酸化剤添加により予め酸素を微粉炭に内装する方法を検討した。

2. 実験

実験装置および実験方法は前報⁶⁾と同様である。

実験は大気圧、室温下で行い、大気中での燃焼をはじめ雰囲気中の酸素濃度を变化させた条件下での実験も行った。試料はTable 1に示すような性状の相異なる3種類の十分乾燥された微粉炭を使用し、供試粒度も75, 150, 230 μm と变化させた。

3. 微粉炭の燃焼メカニズムについて

3・1 着火時間、燃焼時間に及ぼす照射エネルギー密度の影響

Fig. 1は微粉炭の着火時間および燃焼時間に及ぼす照射エネルギー密度 ρ_e の影響を示した⁶⁾ものである。本実験条件下

Table 1. Properties of pulverized coal.

Kind of PC	Approximate composition (mass%)				Elemental analysis (mass%)					Q (kJ/kg)
	V.M.	F.C.	Ash	FC/VM(-)	C	H	N	S	O	
PC-A	38.30	55.00	6.70	1.44	78.60	5.30	1.80	0.72	6.90	32100
PC-B	28.30	60.30	11.50	2.13	84.30	5.00	1.70	0.52	8.50	29910
PC-C	37.60	52.00	10.40	1.38	72.50	5.00	1.60	0.50	10.00	28800

V.M. : volatile matter F.C. : fixed carbon Q : calorific value

平成5年3月31日受付 平成5年10月8日受理 (Received on Mar. 31, 1993; Accepted on Oct. 8, 1993)

* 住友金属工業(株)鉄鋼技術研究所 (現:中国 東北大学) (Iron & Steel Research Laboratories, Sumitomo Metal Industries, Ltd., now Northeast University)

* 2 住友金属工業(株)鉄鋼技術研究所 (Iron & Steel Research Laboratories, Sumitomo Metal Industries, Ltd., 16-1 Oaza-Sunayama Hasakimachi Kashima-gun Ibaraki-ken 314-02)

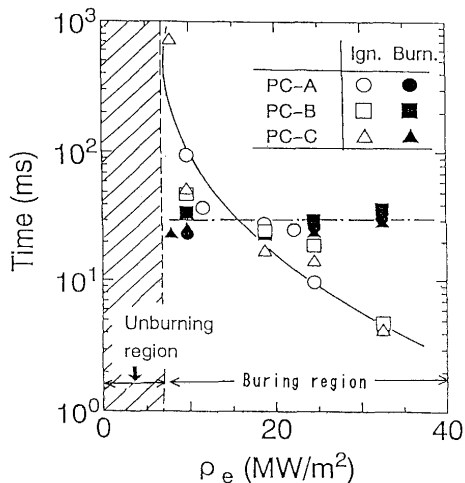


Fig. 1. Effect of irradiating energy density on ignition and burning time.

では、照射エネルギー密度が6.7MW/m²以上の場合、その値が大きいほど、いずれの炭種でも、着火時間は短くなるが、燃焼時間はほとんど変化しない。このように照射エネルギー密度が変化しても、燃焼時間がほとんど変化しない理由として、以下に示す二つの仮説を考えた。

第一は微粉炭燃焼による発熱量が十分大きいので、レーザー照射エネルギーが無視できることである。第二は、6.7 MW/m²以上の照射エネルギーの場合、燃焼反応がガスの拡散に支配され、すなわち、燃焼表面への酸素の供給速度に律速されるため、照射エネルギー密度に依存しないことである。そこで、まず第一の仮説が成り立つかどうかについて次のような考察を行った。

すなわち、燃焼による発熱量よりも照射エネルギーが無視できるかどうかについて、PC-Aの炭種を用いて、32.5MW/m²の照射条件で、照射時間を10、20msに設定し、微粉炭の燃焼挙動を観察した。設定した照射時間は微粉炭の着火時間より長く燃焼完了時間より短い。すなわち、照射エネルギーが無視できれば、燃焼途中でレーザー照射を停止しても燃焼が継続するはずである。しかし、Fig. 2に示すように、通常照射(150ms)の結果(case A)に比較すると、いずれの場合でも、通常照射と同じ着火時間が得られたが、燃焼の

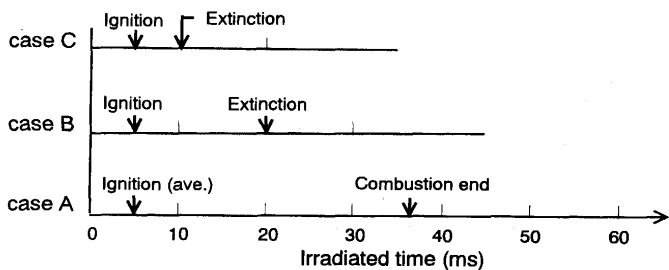


Fig. 2. Effect of irradiated time on burning behavior of a single pulverized coal.
case A: 150ms irradiated, case B: 20ms irradiated, case C: 10ms irradiated

途中でレーザーの照射を停止すると、炎が消えてしまった(case Bおよびcase C)。この結果から、室温、大気中では、レーザーからのエネルギーの供給が停止されると、単一微粉炭粒子の燃焼を継続することができないことがわかる。すなわち、レーザー照射エネルギーの影響が無視できず、第一の仮説が成り立たないことが判明した。なお、計算結果によると32.5MW/m²の条件下では、微粉炭の燃焼発熱量よりレーザーの照射エネルギーのほうが約2倍大きい。

次に、第二の仮説については、微粉炭粒径および雰囲気中の酸素濃度を变化させた実験に基づき、それぞれ3・2節および3・3節にて考察する。

3・2 拡散律速についての考察

Spaldingの研究⁷⁾によると、拡散が律速段階になる場合、直径 d_p の炭素球が定常燃焼する際、その燃焼時間 t_b と d_p^2 との関係は(1)式で表わされる。

$$t_b = B_0 d_p^2 \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 B_0 はバルクの酸素濃度が一定の場合に定数である。

異なる粒子径の燃焼時間と初期粒子径の2乗との関係をプロットした結果をFig. 3に示す。この関係を最小自乗法で整理したところ、PC-AおよびPC-B 2種類の微粉炭に関して、いずれの場合でも d_p^2 と t_b の間により直線関係が得られ、相関係数はそれぞれ1.000および0.996であった。したがって、本実験では微粉炭の燃焼がガスの拡散に支配されている可能性が高い。

3・3 酸素濃度の影響

酸素濃度が高いほど微粉炭の燃焼率が高くなること^{8)~10)}が報告されている。本実験条件下で、微粉炭燃焼が酸素の供給速度に律速されているかどうかについて実験的に検討した。

酸素と窒素の混合ガス中で、酸素濃度を15%から60%まで変化させ、微粉炭の燃焼特性を測定した。得られた結果をFig. 4に示す。図中の実線は微粉炭の燃焼が(2)式の反応

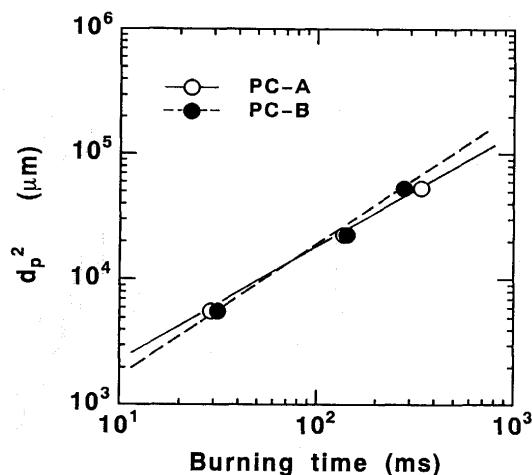


Fig. 3. Relation between burning time and square diameter of pulverized coal.

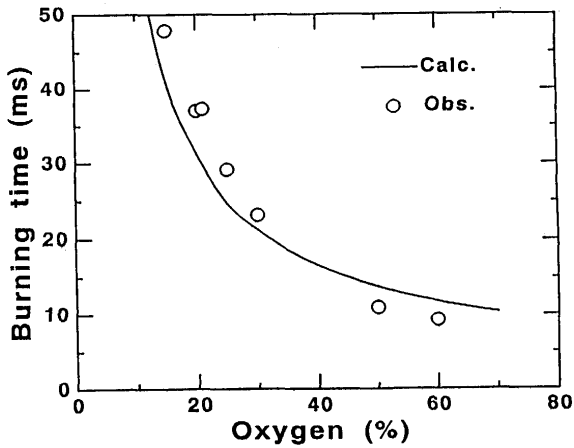
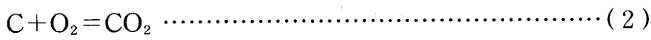


Fig. 4. Effect of immersed time on burning time.

で進行すると仮定し、



酸素の拡散が律速段階になる場合の燃焼時間と酸素濃度との関係、すなわち、(3)式から得られたもの¹¹⁾である。

$$t_b = K / \ln(1 + M_o / M_c \times G_o) \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 K は定数で、その値は、最小自乗法により求め、 2.5×10^{-3} (ms)であった。

M_o , M_c はそれぞれ酸素と炭素の分子量である。

G_o は酸素の質量分率(—)である。酸素と窒素との混合ガスの場合は、(4)式から得られる。

$$G_o = O_2\% \times M_o / (O_2\% \times M_o + N_2\% \times M_N) \dots\dots\dots (4)$$

Fig. 4において実験値はガス拡散が律速する場合の理論計算値と比較的良好な対応があり、Fig. 1における微粉炭の燃焼時間とレーザー照射エネルギー密度との関係は第二の仮説、すなわち、ガス拡散律速が原因しているものと結論される。

以上のように、高炉操業においては、微粉炭の燃焼率を上げるためには、酸素の供給を改善したほうがよいと考えられる。

4. 燃焼率を向上する新しい方法

高炉操業で熱風中への酸素、または、水蒸気の富化あるいはヘマタイト粉と同時に微粉炭を吹き込むいわゆる複合送風は酸素の供給を促進させることから、いずれも結果的には燃焼速度を上昇させる効果を果たす。

微粉炭燃焼が酸素の供給速度に律速されるとの結論に基づき、微粉炭の酸化剤添加処理による燃焼条件を改善する新たな方法を検討した。すなわち、酸化剤を予め微粉炭に内装し、微粉炭が燃焼するとき、内装した酸化剤が熱を受けて分解し、活性酸素を発生する。この酸素は微粉炭の燃焼を促進し、燃焼時間を短縮するものと予想される。

そこで、予め微粉炭に酸素を内装することによりその燃焼時間を短縮させるかどうかについて、実験的に検討した。酸化剤として $KMnO_4$ の水溶液を使用した。異なる粒子径の微粉炭を、異なる濃度の $KMnO_4$ 水溶液の中に一定時間浸漬して、その後自然乾燥したものを、供試試料とした。具体的な酸化剤添加処理の条件をTable 2に示す。

4・1 酸化剤添加後のイメージおよび燃焼後の残骸の比較

CO_2 レーザー燃焼装置を用いて、酸化剤添加処理した単一微粉炭粒子の燃焼実験を行い、その燃焼模様を観察するとともに、着火時間および燃焼時間を測定し、未処理微粉炭

Table 2. Conditions for addition of oxidizing agent.

Oxidizing agent	$KMnO_4$ solution
Concentration (mass%)	1~5
Immersed time (h)	0.5~31
Kind of PC	PC-A and PC-B
PC diameter (μm)	75 150 230

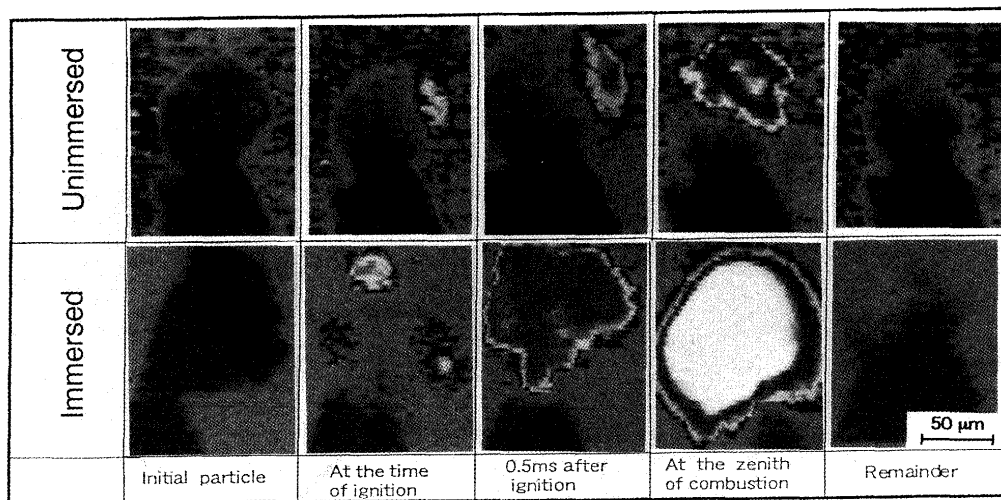


Fig. 5. Comparison between burning images of pulverized coal unimmersed and immersed in 1% $KMnO_4$ solution.

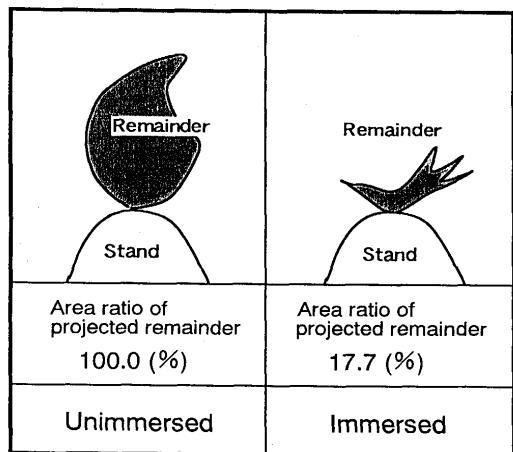


Fig. 6. Comparison between remainders of pulverized coal unimmersed and immersed in 1% KMnO_4 solution.

の燃焼特性と比較した。

燃焼の炎からいずれの場合でも、酸化剤の添加によって未処理の微粉炭より強い燃焼状態が観察された。Fig. 5は照射エネルギー $9.7\text{MW}/\text{m}^2$ 場合、未処理および1% KMnO_4 水溶液に7h浸漬した微粉炭の燃焼の様子を比較したもので、Fig. 5から次のことがわかる。

- (i) 未処理より前処理した微粉炭の炎がかなり大きく、また明るい。
- (ii) 着火0.5ms後の燃焼様子から、未処理より前処理した微粉炭の炎の伝播が速い。
- (iii) 未処理より前処理した微粉炭は燃焼終了後の残骸が少ない。

一方、両者の残骸の垂直面への投影面積を比較すると、Fig. 6に示すように、処理した微粉炭の残骸は未処理の場合の約1/5程度である。

4・2 燃焼特性に及ぼす酸化剤濃度の影響

Fig. 7は燃焼特性に及ぼす酸化剤水溶液の濃度の影響を示したものである。縦軸は着火時間あるいは燃焼時間を、横軸は KMnO_4 の濃度をそれぞれ示している。酸化剤無添加

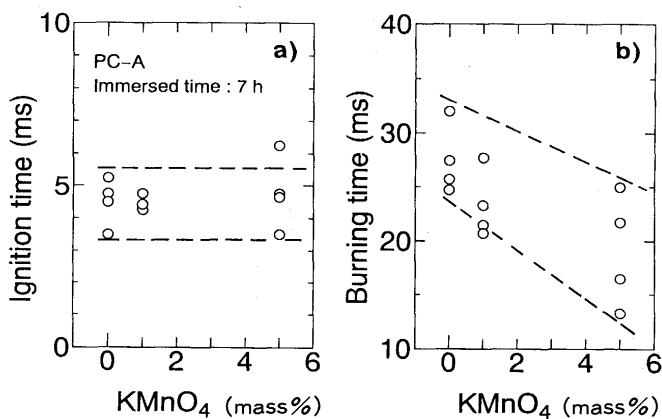


Fig. 7. Effect of oxidizing agent concentration on ignition and burning time of pulverized coal.

(KMnO_4 の濃度がゼロの場合)に比べて、着火時間はほとんど変化していないが、酸化剤水溶液の濃度が高くなるほど燃焼時間が短くなることがわかる。このことは、着火時間が単に温度に依存し、また燃焼時間が酸素の供給に依存することを改めて示唆している。

4・3 燃焼時間に及ぼす酸化剤水溶液中への浸漬時間の影響

燃焼時間に及ぼす酸化剤水溶液中浸漬時間の影響の一例をFig. 8に示す。酸化剤水溶液の濃度が1%で浸漬時間が0(未処理)、0.5、1、7および31hと長くしても着火時間はあまり変わらない。一方、燃焼時間は浸漬により大幅に短縮されるが、浸漬時間の効果は小さい。

そこで、酸化剤の微粉炭中への浸透度合いを調べるべく約 $230\mu\text{m}$ の微粉炭を、1% KMnO_4 水溶液にそれぞれ0.5、7および31h浸漬した後乾燥させ、樹脂に埋め込んでEPMAにより調べた。ここで、酸化剤(KMnO_4)の浸透度合いは、微粉炭中においても KMnO_4 の形で存在するとの仮定を置き、Mn元素の存在厚さを調べることを以って評価した。得られた浸漬時間と浸透深さとの関係をFig. 9に示す。浸漬時間が長くなると、浸透深さが深くなる。0.5h浸漬場合でも浸透

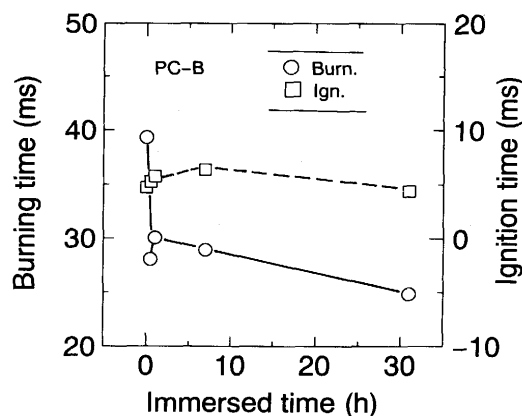


Fig. 8. Effect of immersed time in KMnO_4 solution on ignition and burning time.

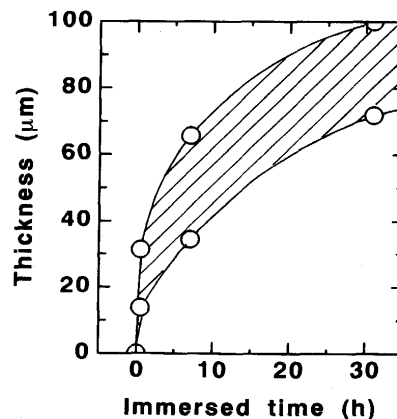


Fig. 9. Relation between immersed time and layer thickness of Mn.

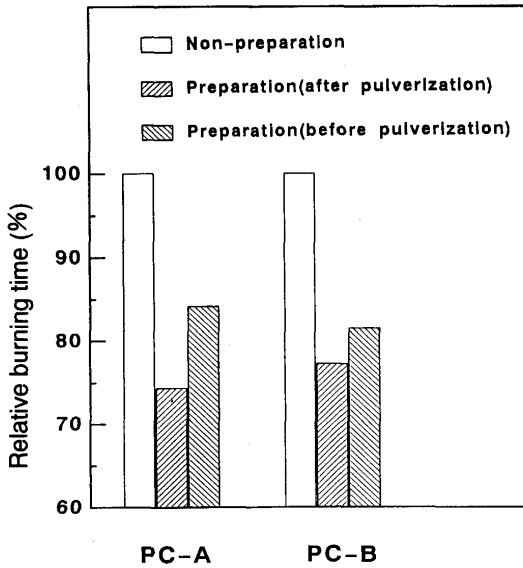


Fig. 10. Comparison of burning time between preparation before pulverization and after pulverization.

深さは14 μ m以上であり、70 μ mの微粉炭に対して酸化剤がしみこんだ体積の割合は80%以上であることを示している。したがって、粒子径70 μ mの微粉炭の場合、0.5h浸漬すれば十分であると考えられる。

なお、微粉炭中における酸化剤の挙動或いは燃焼時の役割については、さらに微粉炭の酸化剤吸収量の量的把握や微粉炭中での酸化剤の形態調査等に基づく考察を加える必要があり、今後の課題と考えられる。

さて、実操業においては、微粉炭は酸化剤水溶液に浸漬され、また乾燥しなければならないので、プロセスとしては不合理なものである。しかし、上述した結果によると、大きい粒子であっても、酸化剤水溶液に長時間浸漬すれば、粒子の中心まで酸化剤を内装することが可能である。そこで、原炭をヤードで数日かけての散水作業と同時に酸化剤添加処理を行い、その後粉碎して微粉炭を製造することを想定し、そのプロセスの可能性について以下のように検討した。

粒子径約30mmの2種類の石炭を1%KMnO₄水溶液に15日間浸漬したものを自然乾燥後に粉碎し、粒子径約75 μ mの微粉炭を作製した。この微粉炭と微粉炭状態で浸漬したものをそれぞれ燃焼させた。得られた結果をFig.10に示す。図の縦軸は、酸化剤添加処理をしない微粉炭の燃焼時間で規格化した相対燃焼時間である。PC-Aの場合には、微粉炭状態で浸漬したものに比べて原炭での浸漬処理効果がやや低いが、PC-Bの場合にはほとんど同じであることがわかった。

4.4 酸化剤添加効果の定量的評価

酸化剤添加の効果を定量的に評価するために、未処理微粉炭の燃焼時間を基準値として、浸漬時間の燃焼時間に及ぼす影響を比較した。結果をFig.11に示す。炭種、浸漬時間に関わらず、1%KMnO₄水溶液で処理すれば、燃焼時間が

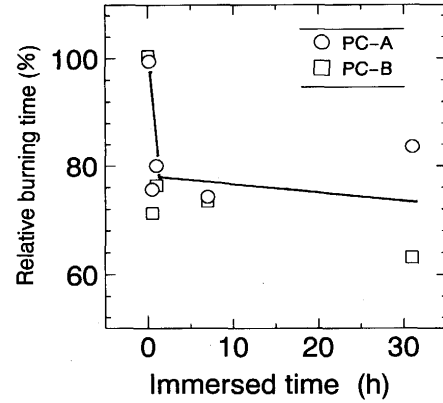


Fig. 11. Effect of immersed time on burning time.

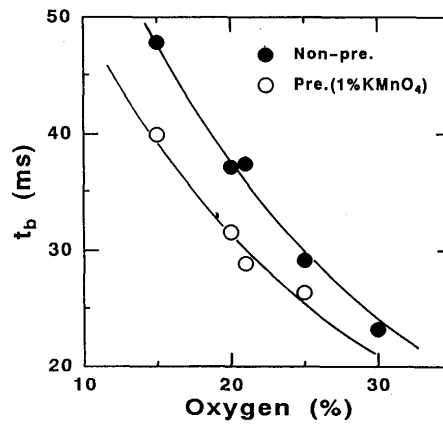


Fig. 12. Comparison of burning time between non-preparation and preparation.

約25%短縮される。

一方、Fig.12に示すように、浸漬処理した微粉炭の燃焼時間は約4%酸素富化した場合の燃焼時間に相当する。したがって、安価な酸化剤の使用により、酸化剤添加処理は酸素富化操業よりさらに簡単かつ経済的なものであると考えられる。酸化剤添加処理を酸素富化操業と併用すると、さらに大きな効果をもたらすことができる。

5. 粗粒子使用の可能性

粗粒微粉炭の吹き込みはコスト低減をはかる上で有効である。そこで、酸化剤添加による粗粒微粉炭使用の可能性について実験的に調べた。試料粒度として約75, 150, 230 μ m 3種類の微粉炭を使用した。

5.1 微粉炭燃焼に及ぼす粒子径の影響

まず、酸化剤無添加条件下で、異なる微粉炭粒子の着火時間および燃焼時間を測定した。結果をFig.13に示す。着火時間、燃焼時間のいずれも粒子径の増加とともに長くなる。したがって、粗粒がそのまま高炉へ吹き込まれると、細粒よりも燃焼率が悪くなると予想される。

一方、Fig.13から着火時間と燃焼時間の変化量を比較する

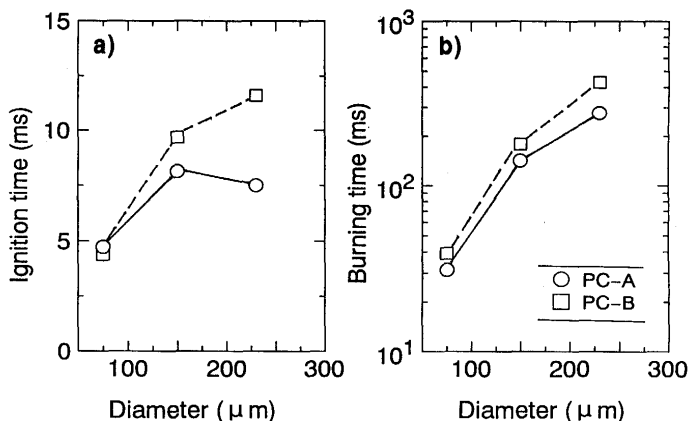


Fig. 13. Effect of diameter on ignition and burning time of pulverized coal.

と、着火時間の変化量より燃焼時間のほうがかなり大きいことがわかる。このことから、粗粒微粉炭の燃焼性を向上させるためには、着火時間を短縮させるよりも、酸化剤添加によって燃焼時間を短縮させるほうが有効であると考えられる。

5・2 酸化剤添加による燃焼時間の短縮

Fig.14は、1%KMnO₄水溶液に7h浸漬した一定粒子径の微粉炭の燃焼時間と未処理のそれとを比較したものである。粒子径の増加にかかわらず、酸化剤の添加により燃焼時間が約20~25%短縮されることがわかる。

以上、酸化剤であるKMnO₄の添加処理効果を確認した。しかしながら、KMnO₄はカリウムを含有するので、高炉操業に悪い影響を与える¹²⁾ため、実用の面では大きな障害となる。したがって、適切な酸化剤を探すのが今後の課題である。

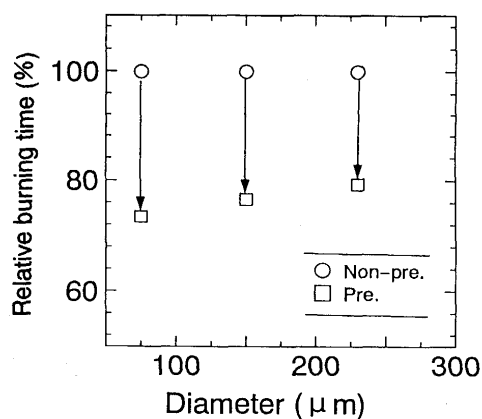


Fig. 14. Comparison of burning time between non-preparation and preparation.

6. 結言

- (1) 単一微粉炭粒子の燃焼は酸素の供給速度に律速される。
- (2) 酸化剤の添加処理により、微粉炭の燃焼性は改善され、燃焼率が向上する。また、酸化剤の濃度が高いほどその効果は大きい。
- (3) 1%KMnO₄水溶液に浸漬した場合、微粉炭の燃焼時間が約25%短縮され、約4%の酸素富化に相当する。したがって、酸化剤添加により微粉炭吹き込み量をより一層増加できることが期待される。
- (4) 酸化剤添加処理によって、粗粒子の使用が可能となり、コスト低減に有効である。

記号

- FC: 固定炭素 (mass%)
- VM: 揮発分 (mass%)
- Q: 発熱量 (kJ/kg)
- ρ_e : レーザー照射エネルギー密度 (MW/m²)
- t_b : 微粉炭の燃焼時間 (ms)
- d_p : 微粉炭粒径 (μm)
- B_0 : 定数
- K : 定数
- M_0 : 酸素の分子量
- M_C : 炭素の分子量
- G_0 : 酸素の重量分率 (-)
- $O_2\%$: 酸素の体積%
- $N_2\%$: 窒素の体積%

文献

- 1) 稲葉晋一, 八木順一郎: 鉄と鋼, 78(1992), p.1186
- 2) C.Yamagata, S.Suyama, S.Horisaka, K.Takatani, Y.Kajiwara, S.Komatsu, H.Shibuta and Y.Aminaga: ISIJ Int., 32(1992), p.725
- 3) 草壁克己, 山木健之, 諸岡成治: 鉄と鋼, 77(1991), p.1413
- 4) O.C.Roberts and I.W.Smith: Combustion and Flame, 21(1973), p.123
- 5) K.W.Ragland and C.A.Weiss: Energy, 4(1979), p.341
- 6) 沈 峰満, 稲田隆信, 山本賢作, 岩永祐治: 鉄と鋼, 80(1994), p.1
- 7) D.B.Spalding: Proc. Inst. Mech. Engrs., 168(1954), p.545
- 8) R.B.Smith and M.J.Corbett: Ironmaking Steelmaking, 14(1987), p.49
- 9) 山岡秀行, 亀井康夫: 鉄と鋼, 77(1991), p.2099
- 10) 大野陽太郎, 古川 武, 松浦正博: 鉄と鋼, 78(1992), p.50
- 11) F.E.Fendell: Combust. Sci. Technol., 1(1969), p.13
- 12) 羽田野道春, 宮崎富夫, 岩永祐治: 鉄と鋼, 65(1979), p.1663