

# 成形コークス形状の通気性と内部熱応力への影響

古牧 育男\*・池田 耕一\*<sup>2</sup>・加藤 健次\*・一田 守政\*・森寺 弘充\*

Effects of Formcoke Shape on Gas Permeability and Internal Thermal Stress

Ikuro KOMAKI, Kouichi IKEDA, Kenji KATO, Morimasa ICHIDA and Hiromitsu MORIDERA

**Synopsis :** In order to improve the gas permeability of formcoke as with a chamber oven coke, an examination was made about the betterment of the shape of formcoke.

The result has revealed that by employing a concave shape having a U-shaped permeation groove on the surface and making the shape larger, the gas permeability and voidity in case of filling can be improved as with the chamber oven coke.

In addition, it has been made clear that the internal thermal stress responsible for the fissuring of the new shape formcoke can be reduced below that of the conventional formcoke.

**Key words :** coke ; coking ; formcoke ; shape ; permeability ; thermal stress ; fissure.

## 1. 緒言

成形コークス法は非微粘結炭からの高強度コークス製造に特徴を持つプロセスであるが、近年では環境汚染度の低さと生産弾力性の高さに注目が集まっている。成形コークスの高炉使用試験は1970年代から80年代にかけ行われ成形コークス使用量が10,000トンを越える大規模試験も約10例あるが、殆どの試験で通気圧損の上昇が報告されている<sup>1-3)</sup>。

1978年から1986年にかけて実施された日本鉄鋼連盟による成形コークス法研究では、枕型形状で成型炭容積92cm<sup>3</sup>、コークス容積75cm<sup>3</sup>の成形コークスが使用された。高炉で20%成形コークスを使用した場合平均して4%の通気圧損上昇が認められた<sup>4)</sup>。圧損の上昇はコークス層の通気抵抗が支配的な炉下部で顕著であり、高炉内圧損の解析から成形コークス層の通気抵抗は従来室炉コークス層の約2倍と結論された。高炉への微粉炭吹込みによる低コークス比操業条件のもとでは通気圧損の上昇が成形コークス使用上の大きな障害となると考えられる。

本報告では、成形コークス形状の通気性へ与える影響を評価し形状の改善を検討する。又、改善された形状の成形コークスの内部熱応力につき併せて報告する。

## 2. 通気性へ及ぼす形状の影響

### 2・1 従来知見と実験

初めに、成形コークスの形状およびサイズの通気圧損に

対する影響についてSchultzら<sup>5)</sup>の結果をFig. 1に示す。成形コークス容積100cm<sup>3</sup>を境にして容積の減少とともに通気圧損が急激に増加しており、鉄鋼連盟共研の成形コークスは通気抵抗の遷移域にあることがわかる。成形コークスの通気抵抗を低下するためには容積の増大が有力な手段であり、実験では形状とともに容積の影響を検討した。

実験は内径600mmの円筒型通気抵抗測定装置に試料を層厚500mm充填した後、下部から空気を導入し空塔速度を0.5~1.2m/sの範囲で変化させた際の試料層圧力損失を測定した。実験に用いた試料は各種形状の石膏モデルおよび実際に製造された室炉コークスと成形コークスであり、Table 1に示す。ここで、枕型成形コークスの形状をFig. 2に示すが伸長率および扁平率を式(1)(2)で定義した。なお、共研時の成形コークスでは伸長率が0.41、扁平率が0.40であ

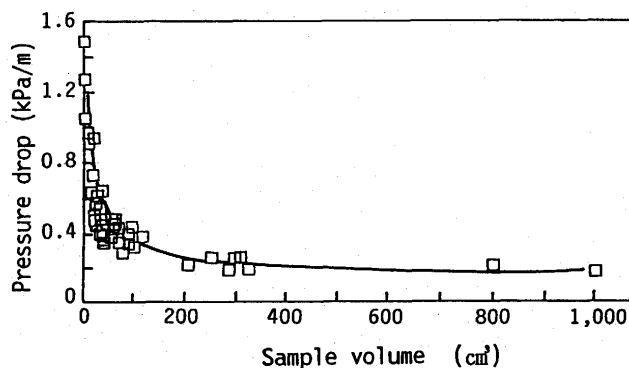


Fig. 1. Effect of coke volume on gas permeability.

平成7年11月1日受付 平成8年1月18日受理 (Received on Nov. 1, 1995; Accepted on Jan. 18, 1996)

\* 新日本製鐵(株)プロセス技術研究所 (Process Technology Research Laboratories, Nippon Steel Corp., 20-1 Shintomi Futtsu 293)

\* 2 新日本製鐵(株)石炭液化化研究プロジェクト班 (Coal Liquefaction Project, Nippon Steel Corp.)

Table 1. Samples for gas permeability measurement.

symbol	volume (cm <sup>3</sup> )	size (mm)	dimensions (mm×mm×mm)	stretchiness (-)	flatness (-)
L	271	68.6	113×80×55	0.407	0.459
M	138	54.9	90×64×44	0.407	0.459
S	63	42.8	71×50×34	0.407	0.459
SL	62	36.1	84×42×29	1.00	0.459
SF	78	46.5	83×59×29	0.407	1.00
FC	40.0	(formcoke plant product)			
CC	55.0	(chamber oven product)			

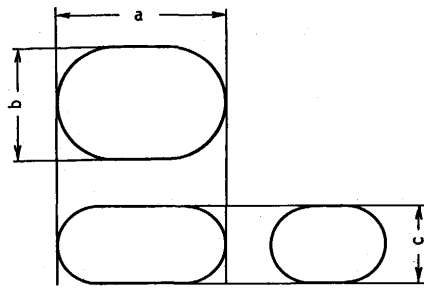


Fig. 2. Shape of pillow type formcoke.

る。通常の角篩での篩分け粒径は(3)式で与えられる。

伸長率:  $A = (a/b) - 1$  ..... (1)

扁平率:  $B = (b/c) - 1$  ..... (2)

粒径:  $S = (b^2 + c^2)^{0.5} \cdot 2^{-0.5}$  ..... (3)

2・2 結果と考察

Fig. 3に各試料の充填層の単位高さあたり圧力損失の測定結果を示す。枕型相似の形状変更による圧力損失への影響は小さく粒径の影響が大きいことがあきらかとなった。そこで成形コークスの粒径効果と室炉コークスとの差異をより詳細に調査するため、各々単一粒径試料および粒度分布を持つ製品コークス試料につき圧力損失および空隙率を測定し、エルガンの式(4)により高炉内での通気圧損を計算した。

$$\frac{\Delta P}{L} = K_1 \frac{(1-\epsilon)^2}{\epsilon^3} \cdot \frac{\mu u}{D_p^2 g} + K_2 \frac{1-\epsilon}{\epsilon^3} \cdot \frac{\rho u^2}{D_p g} \text{ ..... (4)}$$

- $\Delta P$  : 圧力損失(KPa),  $L$  : 充填層厚(m)
- $\epsilon$  : 空隙率,  $D_p$  : 粒径(m)
- $\mu$  : 粘性係数(kg/m・s),  $u$  : 空塔速度(m/s)
- $\rho$  : ガス比重(kg/m<sup>3</sup>),  $g$  : 重力加速度(m/s<sup>2</sup>)
- $K_1, K_2$  : 係数

(4)式の変形により(5)式が導かれ、通気圧損等の測定値より係数 $K_1, K_2$ を実験的に求めた。

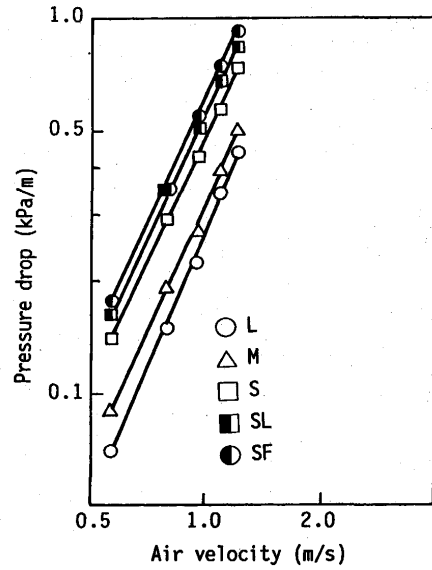


Fig. 3. Gas permeability measurement results of samples.

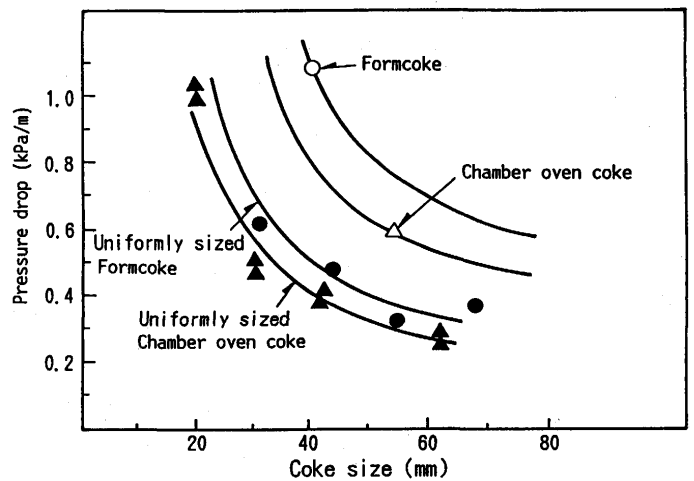


Fig. 4. Comparison of gas permeability between chamber oven coke and formcoke.

$$\frac{\Delta P}{L} \cdot \frac{D_p^2 g \epsilon^3}{\mu u (1-\epsilon)^2} = K_1 + K_2 \frac{D_p \rho u}{\mu (1-\epsilon)} \text{ ..... (5)}$$

得られた係数 $K_1, K_2$ と高炉操作条件(空塔ガス流速1.43m/s, 炉内平均温度1202°C, 炉内平均圧力3.49kg/cm<sup>2</sup>)から各試料の高炉内での通気圧損値を算出した。

計算結果をFig. 4に一括して示す。この結果、枕型成形コークスは室炉コークスに比べて同一粒径で通気抵抗が約20%高いこと、粒径の増大により成形コークス、室炉コークスともに通気抵抗が低下することがわかる。従来型の粒径43mmの成形コークスの通気抵抗は0.5kPa/mであり、平均的な粒径55mmの室炉コークスの0.3kPa/mに対し大幅に高い値となっている。又、製品コークスを比較すると成形コークスは変形、割れが顕著であり、単一粒径試料の約2倍

に通気抵抗が増加している。

### 2・3 高通気性成形コークスの形状

成形コークスの形状を検討するにあたり、単一粒径での通気性を室炉コークスと同等とすることを目的とした。Fig. 4の結果から、成形コークスを室炉コークス並みの通気抵抗とするには粒径70mm、容積300cm<sup>3</sup>程度迄の大型化が必要と推定できる。この場合成形コークスは0.3kgを越える重量となり輸送時の粉化が大きな問題となる。コークスのハンドリング面からは成形コークスの粒径を室炉コークス並みとすることが現実的である。また、高炉操業面からは嵩密度の上昇を避け高炉内でのコークス層厚を維持することが要求される。以上の理由から、成形コークスの枕型形状を変更し充填層の空隙率を増大することにより通気性と嵩密度を室炉コークスに近似することが必要である。

新しい形状は、生産性の高いダブルロールプレスで製造出来ることを前提に、充填状態で空隙を形成し易い形状として枕型の中央部を切り欠いた中凹型形状を採用した。成形コークスの粒径は室炉コークス並みの55mm程度を目標とした。

新しい形状と実測した空隙率、通気抵抗値をFig. 5, Table 2に示す。表面にU字型通気溝を持った結果、空隙率は室炉

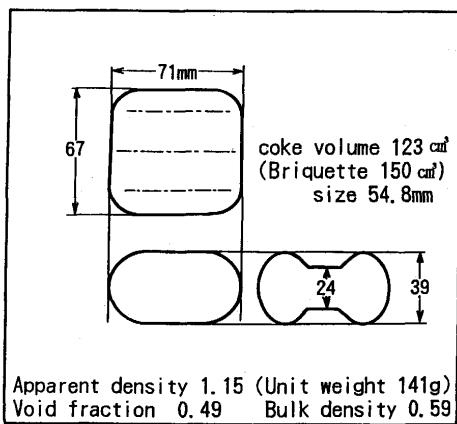


Fig. 5. New shape of formcoke.

Table 2. Gas permeability of formcoke.

	Chamber oven coke	Conventional Formcoke	New shape Formcoke
Coke size (mm)	55	43	55
Pressure drop (kPa/m)	0.30	0.56	0.30
Voidity (-)	0.52	0.44	0.49

コークスとほぼ同等の0.49に増加し、通気抵抗測定値は50%減少し室炉と同等の0.3kPa/m迄低下した。但し、嵩密度は室炉コークスの0.5に対し0.59とやや高い値となっている。

新形状の通気抵抗低下の要因は以下と解析した。成形コークスの空隙率を従来枕型の0.44から0.49に増加させた場合の通気圧損値をエルガンの式から算出すると約40%低下となり、この効果は形状変更由来と考えた。また、同様の計算から粒径を43mmから55mmに大型化することにより通気抵抗は約10%減少したと考えられる。

### 3. 熱応力へ及ぼす形状の影響

#### 3・1 大型成形コークスの熱応力

成形コークス形状を変化させた場合、乾留時の熱応力による割れが問題となる。従来から、割れの原因として熱応力が支配的と考えられており、球近似モデルによる熱応力の推定とX線CT乾留炉およびガス加熱乾留炉による亀裂生成の観察結果が報告されている<sup>6)</sup>。

まず、大型化による割れ現象を評価するため、従来型の92cm<sup>3</sup>および相似形で大型化した180cm<sup>3</sup>、350cm<sup>3</sup>の成型炭につき熱応力の発生挙動を検討した。熱応力モデルにより推定した結果をFig. 6に示す。亀裂発生の原因となる引張り応力は乾留時間10800sec.前後のコークス中心部温度750°C近傍から急激に発生し、成型炭サイズに比例して増大することが判る。

同様試料を乾留し製造した各種成形コークスのシャッター試験後(2m×3回)粒度分布をTable 3に示す。大型コークスは全て割れが発生し、50~25mmの粒径成分が増加していることから数本の亀裂の発生により細粒化したと判断さ

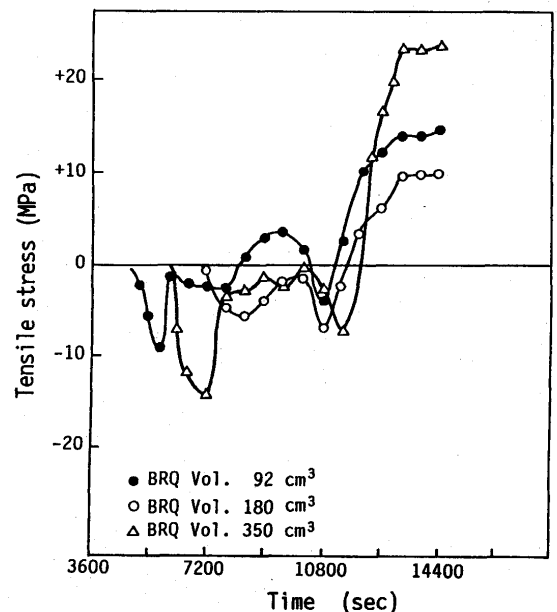


Fig. 6. Effect of formcoke size on thermal stress during carbonization.

れる。測定されたコークス中心部の最大昇温速度も、92cm<sup>3</sup>成型炭で5.0°C/min, 180cm<sup>3</sup>で7.5°C/min, 350cm<sup>3</sup>で12.0°C/minと大幅に上昇した。いずれもコークス収縮温度域である750°C前後でピークを示しており、中心部がコークス化し収縮するとともに引張り応力が発生し亀裂を生成したと推定される。

以上の結果から、枕型成形コークスを相似形で大型化した場合、乾留時の割れを回避することは非常に困難であるといえよう。

3・2 新形状成形コークスの熱応力

大型化し更に形状を複雑にした新形状成形コークスの熱応力の解析を行うため、先ず乾留時のコークス中心部温度を測定した。成型炭は金型プレスにより製造した。新形状は従来型に比べて容積で1.6倍大型化しているが、昇温特性はFig. 7に示すように大型枕型成形コークスよりむしろ従来の小型枕型に近似していることが判明した。この結果は、新形状が熱応力低下に有利であることを示している。

複雑な形状の成形コークスは、前項で述べた球近似熱応

力モデルでの取り扱い是不可能であり、新しく有限要素法による計算モデルを作成した。計算対象は成形コークスの1/8部分であり分割要素数は408, 接点数は567である。成形コークス表面温度および熱膨張率, 熱伝導率は乾留実験の実測値を用い, 比熱はAgroskinらの測定値<sup>7)</sup>, ヤング率は丸山ら<sup>8)</sup>, ポアソン比は磯部らの値<sup>9)</sup>を用いた。

熱応力の計算結果例として、枕型92cm<sup>3</sup>および新形状150cm<sup>3</sup>成型炭の乾留時間12000sec.での中心部応力分布および応力方向をFig. 8に示す。最大主応力は中心部が高く表面方向に低減していき、新形状では最大主応力発生点が両端凸部方向へ移動しつつ応力レベルが低下していることが判る。Fig. 9に枕型92cm<sup>3</sup>, 150cm<sup>3</sup>および新形状150cm<sup>3</sup>成型炭を乾留した場合の最大主応力の乾留過程での推移を示す。

Table 3. Size distribution of large formcoke after shatter tests.

	as-shaped coke size (mm)	observed coke size (mm)	observed size distribution (wt.%)			
			>50	50/35	35/25	25/15 <15
Conventional (briq.vol. 92cm <sup>3</sup> )	43.2	39.4	0.0	77.3	21.6	0.0 1.1
Large (briq.vol.180cm <sup>3</sup> )	52.1	39.8	0.0	84.2	11.0	2.4 2.4
Very large (briq.vol.350cm <sup>3</sup> )	69.8	40.3	0.0	85.2	12.6	0.9 1.3

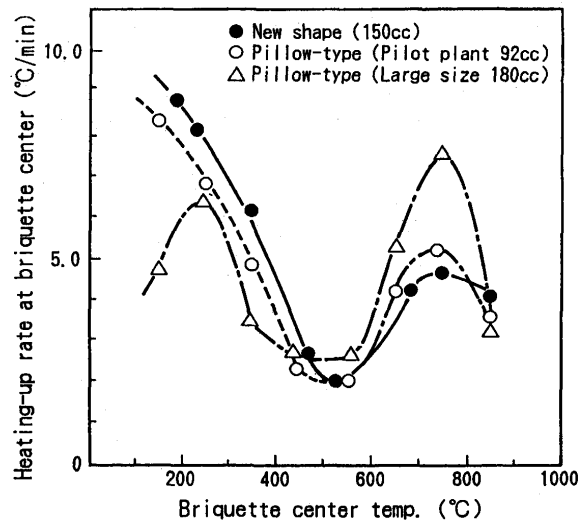


Fig. 7. Heating rate changes of formcoke during carbonization.

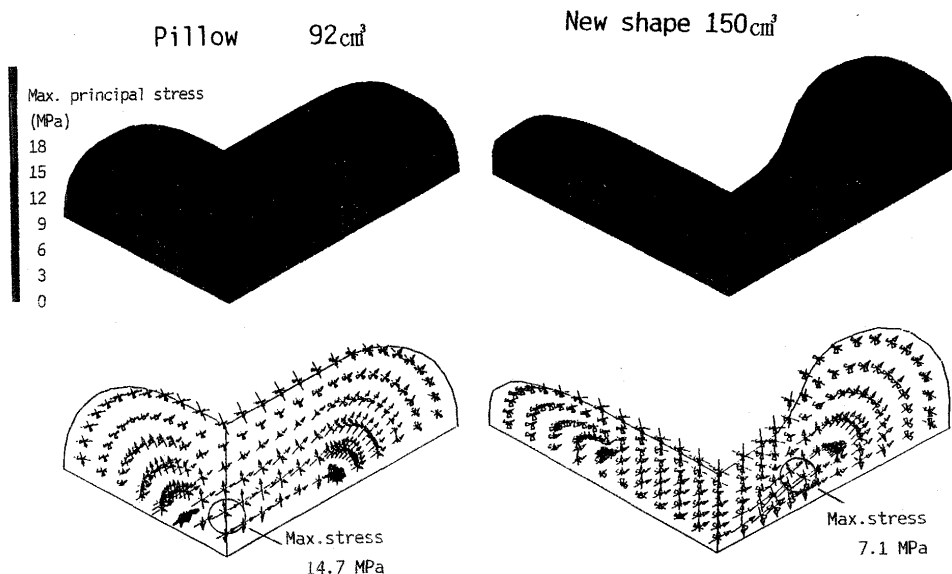


Fig. 8. Thermal stress analysis by F.E.M.

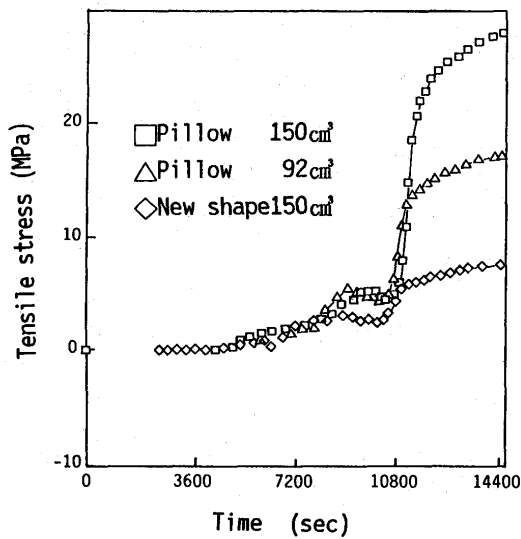


Fig. 9. Effect of formcoke shape on thermal stress during carbonization.

新形状成形コークスの熱応力は従来の枕型成形コークスに比べても約1/2低く、今回決定した形状は内部亀裂が低下し乾留時割れ抑制に適していると判断した。

但し、応力絶対値はFig. 6に示した球近似モデルでの推定値に比べて約2倍であり、乾留実験により成形コークス内部亀裂の詳細な評価を行い本計算結果の絶対値を吟味する必要がある。

#### 4. 結言

成形コークスの通気性を室炉コークスと同等に改善する

ために、成形コークス形状の改善について検討した。

新しい成形コークス形状として、表面にU字型の通気溝を有する中凹型形状の採用と大型化の組み合わせが適当であると結論した。この成形コークスの通気性は、従来の枕型成形コークスの約2倍であり室炉コークスと同等である。また、この新しい形状は充填時空隙率についても室炉コークスなみであることを確認した。

成形コークス乾留においては、コークス内部熱応力に由来する割れが問題となる。大型枕型成形コークスおよび新形状成形コークスにつき発生熱応力を推定し、新形状成形コークスでは内部熱応力を従来成形コークス以下へ低減できることをあきらかとした。今後、新形状成形コークスの乾留時割れについての実験的確認を予定している。

#### 文 献

- 1) E.Teichert, V.N.Gupta and W.Hermann: Stahl und Eisen, **94** (1974), 1330.
- 2) J.A.Cordier and R.Rochas: Proceedings of 2nd International Symposium on Agglomeration, (1977), 996.
- 3) P.K.Strangway and M.O.Holowaty: Proceedings of 2nd International Symposium on Agglomeration, (1977), 1012.
- 4) S.Kubo, H.Ono and K.Inokuchi: Ironmaking Proceedings, AIME, **49** (1990), 405.
- 5) H.J.Schultz and O.Abel: Gluckauf, **110** (1974), 517.
- 6) K.Ikeda, I.Komaki and T.Okuhara: Ironmaking Proceedings, AIME, **51** (1990), 593.
- 7) A.A.Agroskin, E.I.Goncharov and L.A.Makeev: Coke and Chemistry, (1970)5, 7.
- 8) 丸山勝久, 山口 潔: 燃料協会第80回コークス特別会予稿集, (1986), 25.
- 9) 磯部光利, 鈴木吉哉, 館 充, 北川英夫: 鉄と鋼, **66** (1980), 307.