

討 2 高炉の通気性に関する化学工学的解析

日本鋼管 技術研究所 ○下間照男 佐野和夫

1. 緒 言

高炉炉内の通気性は、炉内反応、熱交換と共に高炉操業上重要な要因である。炉内通気性を解明するために、高炉炉内の流動機構が化学工学における向流移動層と類似であることを応用して、小型高炉、大型高炉ならびに高圧操業高炉の炉内通気性を化学工学的手法によって解析すると共に、操業ならびに装入物について検討を行なったので報告する。¹⁾

2. 研究方法

2.1 概 要

解析の対象には東大生研 1 t 試験高炉のオ 1 6 次操業結果ならびに鶴見オ 1 高炉 (§ 39. 11~41. 12), 水江オ 1 高炉 (§ 40. 4~41. 12) の操業データを用いて、溢流限界、流動化限界、通気抵抗、炉内圧力分布など、主として通気性の面から操業度および送風限界の差を究明した。またこれらの解析の基礎となる通気抵抗係数、空隙率などを模型実験ならびに高炉における測定結果より求めた。

2.2 要因のとりあげ方

炉内通気性におよぼす要因として、ガス温度分布、ガス組成分布、ガス流れに関するレイノルズ数、炉内圧力分布、炉内圧力損失分布、炉内動圧分布、炉内抵抗係数、通気性指数、操業限界をとり上げて化学工学的な面から解析した。

2.3 モデルの考え方

化学工学的解析を行なうためには、高炉操業を比較的単純なモデル化をしなければならない。このため炉胸部は気相流動の充填塔、炉腹部を気液向流の充填塔と考え装入物分布、粒度分布、空隙率分布などを平均化して用いたが、このまゝでは実操業との間に差が出るので、模型実験、高炉における実測値、推定計算などによってこれを補正した。

3. 研究結果および考察

3.1 ガス流れに関するレイノルズ数および温度分布

炉内ガス流れに関するレイノルズ数 (Re) の計算に次式⁽³⁾を用いた。

$$Re = \rho \cdot w \cdot d / a_t \cdot \eta = Re_o \cdot \eta_o / \eta \cdot 1/a_t \quad (1)$$

w : 流路断面平均流速, d : 充填物直径,

ρ : 流体密度, η : 流体静粘度

$a_t = C/d$, C : 充填物特性係数 (添字 o は標準状態を示す)

式(1)によって東大試験高炉、鶴見オ 1 高炉、水江オ 1 高炉について求めたレイノルズ数分布ならびに実測値を参考にして推定計算により求めた温度分布を図 1, 2 に示す。

これらの結果から試験高炉の炉内ガス流れは、実炉に比較してかなりピストン流れに近い状態であり、水江オ 1 高炉も鶴見オ 1 高炉に較べて同様の傾向があることが推察される。

3.2 炉内圧力損失

炉内充てん層および溶融層における圧力損失について、(2), (3)

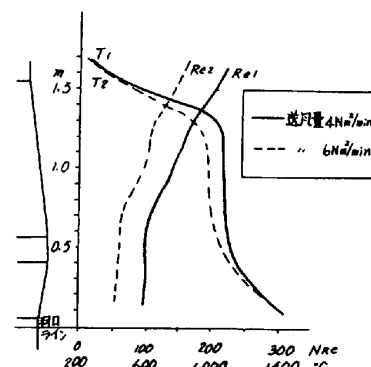


図 1. 炉内レイノルズ数および温度分布 (東大試験高炉)

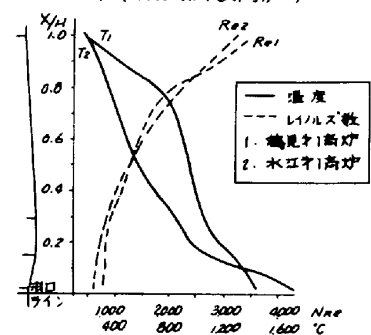


図 2. 炉内レイノルズ数および温度分布

S 674

の通気抵抗式を用いて計算した。

(1) 充填層

$$\Delta P/L = K_1(1-\epsilon_d)^2/\epsilon_d^3 \cdot \mu_L \bar{U}_0/d^2 + K_2(1-\epsilon_d)/\epsilon_d \cdot \rho_L \bar{U}_0^2/d \quad \text{..... (2)}$$

(2) 造滓，熔融層

$$\Delta P \cdot g_c / \rho_0 \cdot L \cdot g = K \cdot (\bar{U}_0^2 / 2 g d) \cdot P \cdot (d \bar{U}_0 \rho_0 / \mu_0)^q \cdot \exp(-K \epsilon_w) \quad \text{..... (3)}$$

$\bar{U}_0$: 炉内ガス平均流速, $\bar{U}_L$: 降下熔融物の平均流速, L : 層厚

ρ_0 : 炉内ガス密度, ρ_L : 降下熔融物の密度, ρ_s : 充填物粒子の密度

ϕ : 形状係数, K, K_1, K_2, q, p, q : 定数, d : 充填物粒子径

a_t : 単位充填体積当りの充填物の表面積, ϵ_d : 乾燥時空隙率

ϵ_w : 缶液時空隙率, g_c : 重力換算係数, g : 重力加速度

μ : 粘性係数

東大試験高炉, 鶴見1高炉, 水江1高炉の炉内における総合圧損値の計算結果を図3, 4に示す。

これらの通気抵抗を逆に操業データの面からチェックするため下記の(4)式による抵抗係数をインジケータとして, 39. 11~41. 3の操業結果について計算して平均値を比較して見ると, 水江1高炉は鶴見1高炉に較べて抵抗係数が $1/3$ で, バラツキで表わされる不安定度が非常に小さい。図5にその計算結果を示す。

$$\text{炉内抵抗係数 } a = (P/P_0)^{-1} / (G_0^2/P_0^2) \cdot (\rho/g)^2 \quad \text{..... (4)}$$

G_0 : 送風量, P : 送風圧, P_0 : 炉頂圧

3.3 シャフト部における通気性

炉内ガス流れに対するシャフト部通気性の影響はかなり大きくこの要因として装入物の分布, 原料整粒度および炉内の壁付きなどが重要なものとしてあげられる。

シャフト部の炉内ガス流速は(5)式で表わされ, 通気性は炉内平均ガス流速の比として表わすことができ, (6)式が導かれる。

$$V_e = \{ [K_1' \cdot (\mu/\rho \cdot d_h)]^2 + K_2' \cdot (\Delta P \cdot d_h) / (L \cdot \rho) \}^{0.5} - K' \cdot (\mu/\rho \cdot d_h) \quad \text{..... (5)}$$

$$V_e = \epsilon_d \cdot V, \quad d_h = \{ \epsilon_d / (1 - \epsilon_d) \} \cdot \phi \cdot d$$

$$V/V_m = \{ [K_1'' \cdot \nu(1-\epsilon_d)/d_r \cdot V_m]^2 + K_2'' \cdot (L_m/L_1) \cdot (\nu \cdot d_r/d_r h) \cdot (1-\epsilon_d)/V_m + (L_m/L_1) \cdot (d_r/d_r h) \}^{0.5} - K'' \cdot \nu \cdot (1-\epsilon)/d_r \cdot V_m \quad \text{..... (6)}$$

V : ガス流速, m : 平均値, $d_r = \phi \cdot d$, $d_r m = \phi \cdot d_m$

これを用いて操業中のシャフト部の通気性について検討を行なった結果, 39. 11~41. 12 におけるシャフト部(コークス層+鉾石層)の V/V_m は表1のようになる。これからわかるように鶴見1高炉は水江1高炉に較べて, シャフト通気性が低下しているうえ, 炉内の断面方向にかなりの差があり通気性が劣ることがわかる。しかし両者とも後期になるほど整粒強化の効果あるいは壁付きの減少によりガス流れは均一化の傾向にある。

3.4 通気性におよぼす装入物形状の影響

装入物の形状, とくに球状ペレット配合の影

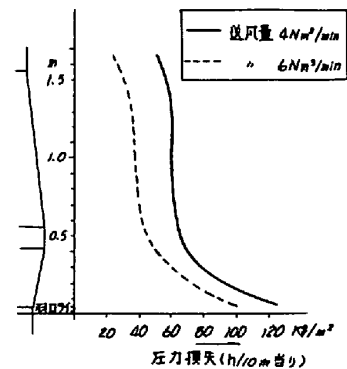


図3. 炉内圧力損失分布
(東大試験高炉)

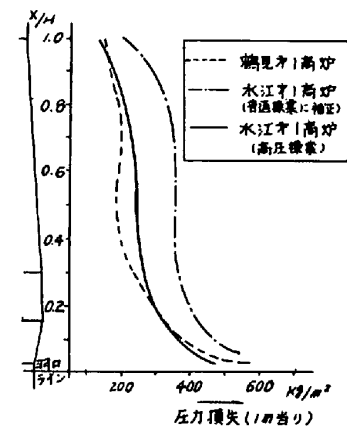


図4. 炉内圧力損失分布

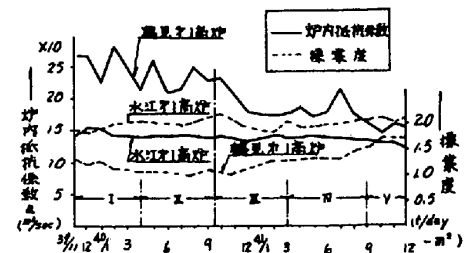


図5. 炉内通気性と操業度との関係

表1. 高炉シャフト部の通気性指数

期 間	鶴見才1高炉	水江才1高炉
1. S. 39. 11~40. 3	0.78~1.05	0.96~1.12
2. S. 40. 4~40. 9	0.81~1.02	0.98~1.18
3. S. 40. 9~41. 2	0.92~1.08	0.98~1.20
4. S. 41. 3~41. 8	0.94~1.10	0.98~1.19
5. S. 41. 9~41. 12	0.95~1.14	0.98~1.20

響は大きい。これは鉱石、焼結鉱に対するペレットの炉中心への流れ込み率、形状係数および空隙率の差によるものと考えられ、適切な配合によって外部操業、内部操業をコントロールでき、シャフト部におけるガスの有効利用が可能となろう。

充填物の形状係数および空隙率の実測値を表2に、これを使って求めた抵抗係数とレイノルズ数との関係を図6に示す。

抵抗係数 ψ ならびにその平均値 $\bar{\psi}$ は(7)、(8)で表わされる。

$$\psi = \Delta P / \rho_0 \cdot v^2 \cdot (d_r / \rho) \cdot \{ \epsilon^3 / (1 - \epsilon) \} \quad (7)$$

$$\bar{\psi} = (160 / Re + 3.1 / Re^{0.4}) \cdot (\epsilon_m / \epsilon)^{0.75} \quad (8)$$

3.5 炉内圧力分布と動圧分布

3.2項で述べた炉内圧力損失および操業データの類別から、棚吊り時における炉内圧力分布には壁付きの有無、あるいは位置によって図7のように、おのおの特徴あるパターンが得られ、またそれによって棚吊り前後の圧力変動が推察され、炉況判定の情報となる。

これらの傾向に対して、炉内動圧分布の変動も炉のプロファイルを含む通気性の一つの要因と考えられ、ピストン流れに近いと推察される東大試験高炉に対して、鶴見1高炉、水江1高炉を比較した結果、図8に示すように鶴見1高炉の場合が最も変動が大きいようである。これが増風の可能性を限界にしている一つの原因ともいえる。動圧については次の(9)式を用いた。

$$u = \rho w^2 / 2 = \rho_0 \cdot (W_0^2 / 2) \cdot (T / T_0) \cdot (P_0 / P) \quad (9)$$

W : ガス流速, T : 炉内絶対温度, P : 炉内絶対圧力

(添字0は標準状態を示す。)

3.6 流動化限界

充填層における装入物粒子の挙動が、炉内通気性に与える影響度を表わすものとして、流動化開始速度を(10)式によって求めた結果を表3に示す。この結果から最低流動化開始速度の範囲は、送風量限界の傾向とかなり一致していることがわかる。

$$u_{mf} = K(d \cdot \phi)^2 \cdot \{ (\rho_s - \rho_0) / \mu_0 \} \cdot g \cdot \{ \epsilon^3 / (1 - \epsilon) \} \quad (10)$$

3.7 操業限界

対象各炉について次のような理論送風限界値を求めて表3に示した。

(1) ローディング速度

$$(\bar{u}_0 / 2g \cdot d) (d \cdot \bar{u}_L \cdot \rho_L / \mu_L)^{0.15} \cdot (48 / a_i \cdot d)^{2.50} = f(\bar{u}_0 / \bar{u}_L) \quad (11)$$

(2) 溢圧速度

$$(\bar{u}_0 \cdot a_i / g \cdot \epsilon d^3) (\rho_0 / \rho_L) \mu_L^{0.2} = \phi(\bar{u}_0 / \bar{u}_L) (\rho_L / \rho_0)^{0.5} \quad (12)$$

(3) 吹き抜け限界

$$U_m = K \sqrt{3g \cdot (\rho_s - \rho_0) \cdot d / \rho_0} \quad (13)$$

表2. 各種充填物に対する特性値

	形状係数(ϕ)	空隙率(ϵ)
鉱石	0.60~0.80	0.31~0.40
焼結鉱	0.56~0.75	0.33~0.43
ペレット	0.81~0.92	0.30~0.38
コークス	0.54~0.72	0.42~0.48

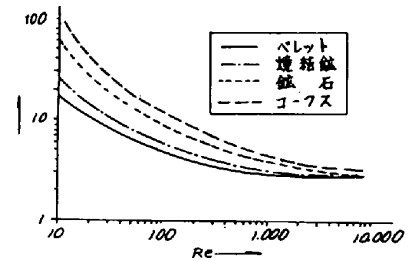


図6. 各種装入物のレイノルズ数と抵抗係数との関係

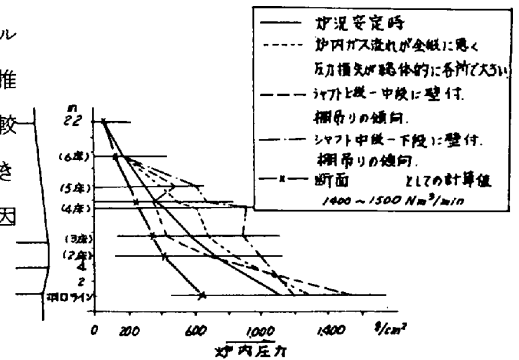


図7. 炉内圧力変動分布 (鶴見才1高炉)

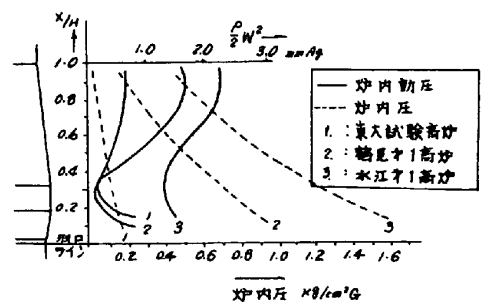


図8. 炉内動圧変動分布

表3. 各炉における流動条件

	流動化開始速度	安定流動層の速度
東大試験高炉	1.7~5.6 m/sec	8.6 m/sec
鶴見才1高炉	0.7~3.5 "	5.5 "
水江才1高炉	1.9~5.1 "	6.0 "

表 4. 各炉についての理論送風限界値

東大試験高炉 (基準送風量 $5.0 \text{ Nm}^3/\text{min}$)				
	空塔流速 (m/sec)	送風圧 (kg/cm^2)	送風量 (Nm^3/min)	送風温度 ($^{\circ}\text{C}$)
ローディング速度	0.367	0.22~0.25	5.1 ± 0.7	500~600
溢 注 速 度	0.945	0.63~0.70	10.3 ± 1.8	500~600
吹き抜け限界	0.706	0.60~0.65	9.7 ± 1.2	500~600
鶴見オ 1 高炉 (基準送風量 $1,500 \text{ Nm}^3/\text{min}$)				
			(壁付きあり) (壁付きなし)	
ローディング速度	0.402	1.04~1.33	930 ± 62 $1,050 \pm 132$	900~1,100
溢 注 速 度	0.786	2.18~2.98	$1,830 \pm 130$ $2,061 \pm 237$	900~1,100
吹き抜け限界	0.723	1.83~2.38	$1,695 \pm 115$ $1,900 \pm 220$	900~1,100
水江オ 1 高炉 (基準送風量 $3,000 \text{ Nm}^3/\text{min}$)				
ローディング速度	0.449	1.76~2.11	$1,600 \pm 200$	1,000~1,200
溢 注 速 度	1.097	2.21~2.78	$3,910 \pm 450$	1,000~1,200
吹き抜け限界	1.075	2.19~2.70	$3,830 \pm 400$	1,000~1,200

4. 結 言

高炉炉内の通気性について、東大試験高炉、鶴見 1 高炉、水江 1 高炉の操業データを対象にして化学工学的解析を試みて次の結論を得た。

- (1) 炉内ガス流れに関するレイノルズ数、炉内圧力損失分布、炉内圧力分布、炉内動圧分布、炉内抵抗係数、理論送風限界など通気特性について各炉の特徴を把握することができた。
- (2) 試験高炉は大型高炉に較べて炉内ガス流れに関するレイノルズ数が著しく小さく、ガス流れが炉内断面径方向に平均的なピストン流れに近く、ガスと装入物の接触率がよいことが操業度の高い原因である。
- (3) 通気性の良好な高炉は炉内ガス流れが断面径方向に平均的なピストン流れに近い状態で、炉内動圧変動も少ない。
- (4) シャフト部 flooding がすぐ棚吊りとはいえないが、それが棚吊りの有力な一原因と考えられる。また、操業条件の変動にともなって炉内ガス流れの片寄りなどによって、局所的な flooding 現象はいずれの場合にも発生していると推察される。
- (5) 炉内通気性の化学工学的解析結果は高炉操業に有力な情報を与えることが出来る。今后さらに反応論的な面も加えて総合的に検討する必要がある。

参 考 文 献

- 1) 下間照男、佐野和夫：日本鋼管技報， No. 41 (1967)，P. 270
- 2) 東大生研試験熔鋇炉委員会編：1965年7~8月 「試験熔鋇炉オ 1 6 次操業報告書」
- 3) M. Hansen: Arch. Eisenhüttenw. 34(1963)3. P. 151
- 4) S. Ergun: Indust. Eng. Chem. 45(1953)2. P. 477
- 5) J. B. Wagstaff and E. A. Nirmaier: Indust. Eng. Chem. 47(1955)6. P. 1129
- 6) K. Polthier: Arch. Eisenhüttenw. 37(1966)5. P. 365
- 7) K. Polthier: Arch. Eisenhüttenw. 37(1966)6. P. 453