

れる。

$$L = 7.4 \sqrt{\frac{ab(85[\text{O}]-1)}{v}} - 0.50 \dots\dots\dots(13)$$

表面気泡の長さを計算した場合と同様にして、この式をもとにして、表面気泡生成範囲におよぼす脱酸度、注入速度、および鑄型形状の影響が知れる。

ここでは、1例として脱酸度の影響のみを取り扱ってみる。計算条件を以下に示す

鑄型 No II : a=80cm, b=40cm

ノズル径 60 mm, 注入開始後 6 min : v=18000cc/sec

この a, b, v を(13)式に代入する。

$$L = 3.12\sqrt{85[\text{O}]-1} - 0.50 \dots\dots\dots(14)$$

この式に種々の酸素濃度を代入することにより、脱酸度と表面気泡生成範囲との関係が知れる。求めた結果を Fig. 4 に示す。計算値と実測値は良好な一致を示し、脱酸度が大きくなると、表面気泡生成範囲は小さくなる。

注入速度、鑄型形状の影響も同様にして求められるがここでは省略する。

6. 結 言

セミキルド鋼塊に発生する表面気泡の長さを凝固速度注入速度の関連のもとに定量的に解析した結果、以下のことが判明した。

- (1) 表面気泡の長さは脱酸度が大きなるにつれて短くなるが、ある酸素濃度範囲のところで変曲域が存在する。
- (2) 注入速度は表面気泡長さにあまり影響をおよぼさない。
- (3) 鑄型断面積が大きくなると表面気泡の長さは長くなる。
- (4) 表面気泡の生成範囲と諸要因との関係も同様な手法で取り扱える。
- (5) 理論計算値と実測値とは良好な一致を示す。

文 献

- 1) C. E. SIMS: *Electric Furnace Steelmaking*, vol II. (1963)
- 2) 浅野, 大橋: 鉄と鋼, 51 (1965), p. 1874
- 3) 加藤: 鉄と鋼, 43 (1957), p. 1104

(152) 粒状気泡帯の生成機構について

(セミキルド鋼塊の凝固組織に関する研究—VI)

富士製鉄, 広畑製鉄所

○渡辺省三・浅野鋼一・大橋徹郎

Mechanism of Formation of Honeycomb Blowhole Zone.

(Study on solidification structures of semi-killed steel ingot—VI)

Shozo WATANABE, Koichi ASANO and Tetsuro OHASHI.

1. 緒 言

前報までにセミキルド鋼の管状気泡表面気泡の生成機構ならびにそれらの形状、分布におよぼす諸要因の影響を取り扱ってきた。

本報では、ひきつづき粒状気泡帯の生成機構について考察したので以下にその結果を報告する。

2. 粒状気泡帯について

粒状気泡帯の代表的な外観写真を Photo. 1 示す。セミキルド鋼塊ではこのように、鋼塊頭部表面から収縮パイプ部までに大きな細長い気泡が数多く発生している。この領域を粒状気泡帯と呼ぶ。粒状気泡帯の形状いかんによつては、均熱炉あるいは加熱炉における加熱に際して鋼塊内部に酸化性ガスが浸透し、歩止りを著るしく低下させるので、この粒状気泡帯の調整はセミキルド鋼製造上きわめて重要な問題となる。

すでに述べたように¹⁾、セミキルド鋼塊は凝固に際して CO ガスを発生するとともに、溶鋼は凝固収縮を起こす。この凝固収縮部を CO ガスが補足しながら凝固が進行するので、写真に見るような粒状気泡帯が形成されるのである。発生する CO ガス量が少ない場合は凝固収縮部を十分補足することができず、大きな収縮パイプが発生し粒状気泡帯は薄くなる。逆に、CO ガス量が多くて凝固収縮部を十分補足し得るならば、収縮パイプは小さくなり粒状気泡帯は厚くなる。したがって、粒状気泡帯の形状は主として、CO ガス発生量および凝固収縮量により決定されるといえる。以下、これらの関係を定量的に考察した。

3. 凝固収縮量

いま、Fig. 1 に示すようなきわめて簡単な鋼塊モデルを考える。鋼塊の長辺長さを 2a cm, 短辺長さを 2b cm, 高さを c cm とし、注入後、時間 t だけ経過したときの残存溶鋼の形状を直方体と仮定し、その長辺を 2x cm, 短辺を 2y cm, 高さを z cm とした。

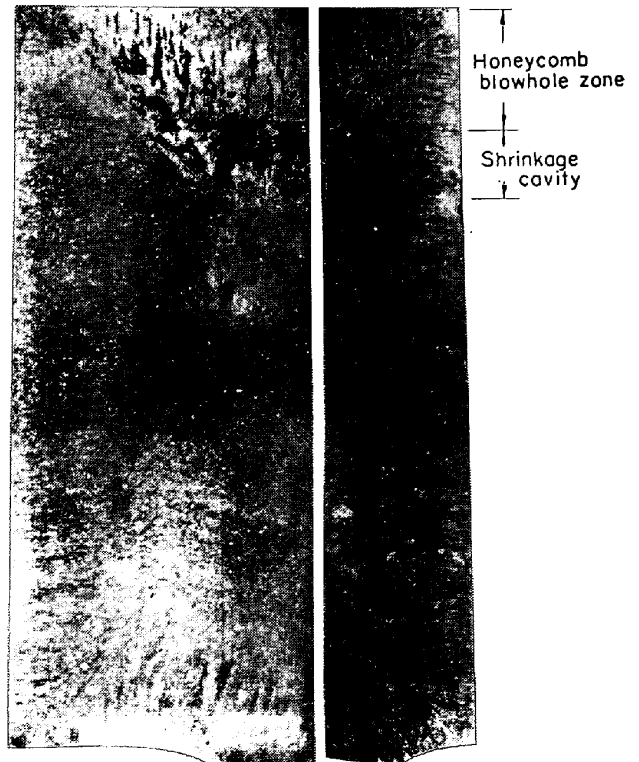


Photo. 1. Vertical section of typical semi-killed steel ingot.

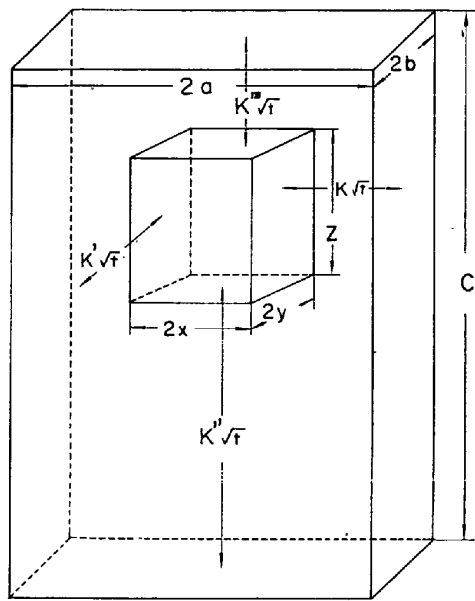


Fig. 1. Solidification model of ingot.

鋼塊各辺からの冷却速度が $D=K\sqrt{t}$ なる近似式で示されるとすると、次式が成り立つ。

$$\left. \begin{aligned} x &= a - K'\sqrt{t} \\ y &= b - K''\sqrt{t} \\ z &= c - K'''\sqrt{t} - K''\sqrt{t} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 K, K', K'', K''' はそれぞれ、鋼塊短辺、長辺、底面および頭部表面からの冷却速度係数である。

一方、鋼の凝固収縮率を α とすると、時間 t だけ凝固が進行したときに生ずる凝固収縮量 V_S は次式で示される $V_S = 4\alpha(abc - xyz) \dots\dots\dots (2)$

(2)式に(1)式を代入することにより、注入後経過時間と凝固収縮量との関係が得られる。

$$\begin{aligned} V_S &= 4\alpha [KK'(K''+K''')t^{3/2} - \{aK'(K''+K''') \\ &+ bK(K''+K''') + cKK'\}t + \{ab(K''+K''') \\ &+ acK'+bcK\}\sqrt{t}] \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

しかし、実際鋼塊においては、鋼塊内部の真の凝固収縮量は、上記 V_S の値から表面気泡や管状気泡の占める体積、さらに鋼塊外殻の収縮にみあう体積を差し引かねばならない。

さて、実際鋼塊の測定データ²⁾によると、冷却後の鋼塊の全長さ収縮は約 2%といわれている。一方、鋼の線膨張係数を $10^{-5} \text{cm}/^\circ\text{C}$ とし³⁾、 1500°C から常温まで冷却した場合の長さ収縮量を計算すると、約 1.5%になる。したがって、凝固収縮のみによる鋼塊の長さ収縮量は 0.5% となり粒状気泡帯が形成される時期ではほとんど無視し得る。

また、表面気泡についてはそれが生成するのは、注入中もしくは注入直後のことなので、表面気泡生成による体積増加は全て溶鋼湯面の上昇に置きかえられるので、凝固収縮量を計算する場合、これは考えなくてもよい。

したがって、鋼塊内部の真の凝固収縮量は、(3)式より管状気泡のしめる体積を引くことにより得られる。管状気泡のしめる体積については、その値を正確に求めることはできないが、いちおう前報で用いた概略値を用いる⁴⁾。

$$V_b = 4\pi r^2 l n h (a+b) \dots\dots\dots (4)$$

v : 管状気泡の半径 (cm), l : 管状気泡の長さ (cm),
 n : 管状気泡の鋼塊単位面積当りの数, h : 管状気泡発生圏の高さ (cm).

これより、鋼塊内部の真の凝固収縮量 V'_S は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} V'_S &= V_S - V_b \\ &= 4\alpha [KK'(K''+K''')t^{3/2} - \{(aK'+bK)(K''+K''') \\ &+ cKK'\}t + \{ab(K''+K''') + acK'+bcK\}\sqrt{t}] - 4\pi r^2 l n h \\ &(a+b) \dots\dots\dots (5) \end{aligned}$$

4. CO ガス発生量

単位体積の溶鋼からの CO ガス発生速度式は、すでに述べたように次式で示される¹⁾。

$$\frac{dn}{dt} = (D_0/\delta)(F/V) \{[O] - P_{CO} \cdot k/[C_F]\} \dots\dots\dots (6)$$

n : CO ガス発生量 (mol/cc), D_0 : 溶鋼中の酸素の拡散恒数 (cm²/sec), δ : ガス-溶鋼界面での拡散境界の厚み (cm), F : ガス-溶鋼界面積 (cm²), V : 溶鋼の体積 (cm³), $[O]$: 溶鋼中の酸素濃度 (mol/cc), $[C_F]$: ガス-溶鋼界面での炭素濃度 (mol/cc), P_{CO} : 気相の CO 分圧, k : Vacher-Hamilton の平衡恒数。

粒状気泡帯の生成を取り扱う場合には、管状気泡、表面気泡を取り扱った場合とかなり様子が異なるので、(6)式に含まれる各定数について改めて検討する必要がある。いま、粒状気泡帯における CO ガス発生量の簡単なモデルを Fig. 2 に示す。時間 $t=t_1$ で実線で示すような凝固鋼があり、体積 V_1 なる空孔に P_{CO} の圧を有する CO ガスが充満しており、それが溶鋼中の $[C], [O]$ と平衡していると考える。 $t=t_2$ になつて凝固鋼は点線で示す位置になり、凝固収縮により溶鋼湯面は H だけ下降し、体積 V_2 なる空隙ができる。このため全空孔内の CO ガス圧力は低下し、平衡関係が破れて CO ガスが新たに発生するこの過程をくり返しなが粒状気泡帯が形成されていく。

4.1 CO ガス-溶鋼界面積 F

すでに前報¹⁾にも述べたように、溶鋼-気相の自由表面では CO 核発生は困難であると考えられ、溶鋼-気相-固相の接触、すなわち図中 P 点にて CO がガス発生すると考えられる。また、粒状気泡帯を形成する時期は凝固中

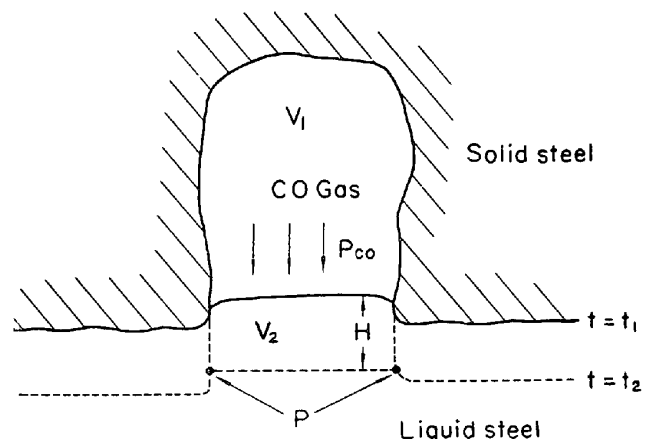


Fig. 2. Schematic model of formation of honeycomb blowhole.

期から末期であるため、溶鋼中に多数の結晶核が浮遊しており、自由表面近傍のこの結晶核も CO 核になりうるものと推定される。いま、この点の P 分布、および単位溶鋼当たりの浮遊結晶核の分布が他の条件によらず一定だと仮定し、きわめて大胆な近似として、CO ガス溶鋼界面積 F は溶鋼自由表面積に比例するとした。

$$F = f' \cdot x \cdot y \dots\dots\dots (7)$$

ここで f' は比例定数であり、種々の条件下において一定値をとると考える。

4.2 気相中の CO 分圧 P_{CO}

(6)式中の P_{CO} は凝固収縮部に存在する CO ガス分圧であるから、凝固収縮が生じた瞬間では 0 であり、時間の経過とともに、CO ガスが発生し、しだいに P_{CO} は大となつて、最終的には CO 平衡圧に達する。このように P_{CO} の値は刻々変化し、一定値を採用するには問題がある。しかし、SHÜHMANN⁵⁾らの行なつた実験によると、瞬間的に減圧状態にした場合、溶鋼中から発生する CO ガス量は、時間の短い範囲においては、時間に対してほぼ直線的に増加することが知られている。したがつて、ここでは P_{CO} として平均値を用いることにし、CO 平衡圧の 1/2 を用いた。もちろん、このような近似にはかなりの問題があるが、CO ガス発生量が過剰酸素量に比例するという前提がある以上、1/2 平衡圧を用いたとしても、それほど大きな誤りはないと考える。

したがつて次式の関係が成立する。

$$[O] - (k \cdot P_{CO} / [C_F]) = \frac{1}{2} [O] \dots\dots\dots (8)$$

4.3 CO ガス発生量

(6)式に(7)、(8)式を代入することにより、粒状気泡帯形成時の CO ガス発生速度式が得られる。

$$\frac{dn}{dt} = \frac{1}{2} (D_0 / \delta) (f' / V) [O] x \cdot y \dots\dots\dots (9)$$

任意の時間 t までに全溶鋼から発生する CO ガス量 N は(9)式を積分することにより得られる。

$$N = \int V \cdot dn = \frac{1}{2} \left(\frac{D_0}{\delta} \right) f' [O] \int_0^t x \cdot y \, dt \dots\dots (10)$$

(10)式に(1)式を代入する。

$$N = \frac{1}{2} \left(\frac{D_0}{\delta} \right) f' [O] \left\{ \frac{KK'}{2} t - \frac{2}{3} (aK' + bK) \sqrt{t + ab} \right\} \cdot t$$

5. 粒状気泡帯の長さ

粒状気泡帯の長さとは、鋼塊頭部表面から収縮パイプ部までの距離を指す。前に述べたごとく、セミキルド鋼塊の凝固過程において、凝固収縮量が大きくなるか、もしくは CO ガス発生量が小となつて、凝固収縮部を CO ガスでもつて補足しきれなくなつた時点で粒状気泡帯の形成は終了し、収縮パイプの形成ははじまる。したがつて粒状気泡帯の形成完了の条件は次式で示される。

$$V_G \leq V'_S \dots\dots\dots (12)$$

ここで V_G は CO ガス発生量を体積で示した値であり、気相の圧力 P、気体定数を R、温度を T (°K) とすると、(11)式から得られる。

$$V_G = \frac{RT}{2P} \left(\frac{D_0}{\delta} \right) f' [O] \left\{ \frac{KK'}{2} t - \frac{2}{3} (aK' + bK) \sqrt{t + ab} \right\} \cdot t \dots\dots\dots (13)$$

(12)式に(5)、(13)式を代入する。

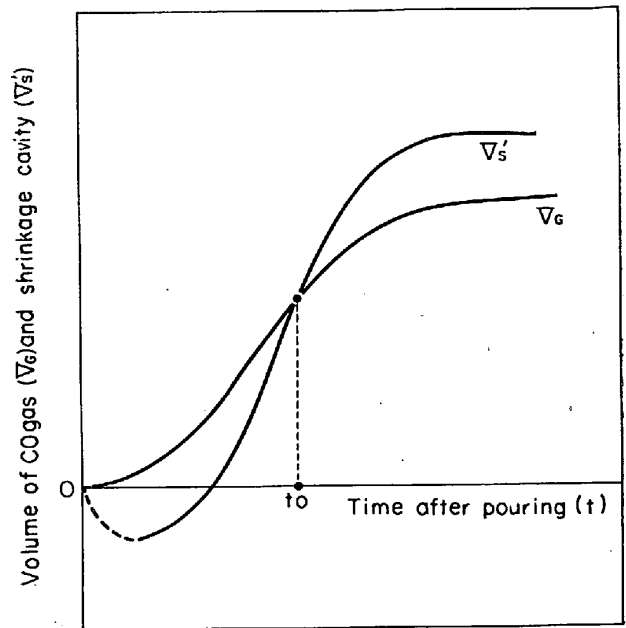


Fig. 3. Relation between volume of CO gas and shrinkage cavity and time after pouring. (Schema)

$$\frac{RT}{2P} \left(\frac{D_0}{\delta} \right) f' [O] \left\{ \frac{KK'}{2} t - \frac{2}{3} (aK' + bK) \sqrt{t + ab} \right\} \cdot t \leq 4\alpha [KK' (K'' + K''')] t^{3/2} - \{ (aK' + bK) (K'' + K''') + cKK' \} \cdot t + \{ ab(K'' + K''') + acK' + bcK \} \sqrt{t} - 4\pi r^2 l n h (a + b) \dots\dots\dots (14)$$

この式を模式的に示すと、Fig. 3 のようになり、t ≥ t₀ で V_G ≤ V_S となる。すなわち注入終了後 t₀ 時間たつたときに粒状気泡帯の形成は終了するのである。したがつて、時間 t₀ までに凝固する鋼塊頭部表面からの凝固厚みを求めると、それが粒状気泡帯の長さになる。

具体的な数値計算、ならびに実測結果との対比については続報で述べる予定である。

6. 結 言

セミキルド鋼塊の凝固時における CO ガス発生量と凝固収縮量とを組みあわせることにより、粒状気泡帯の生成機構が定量的に説明できた。そして、粒状気泡帯の長さを決定する理論式を導いた。

文 献

- 1) 浅野, 大橋: 鉄と鋼, 51 (1965), p. 1871
- 2) L. H. NELSON: Proc. Electr. Furn., 14 (1956), p. 142
- 3) 鉄鋼便覧: (1962)
- 4) 浅野, 大橋: 鉄と鋼, 51, (1965), p.1877
- 5) R. SHÜHMANN: Trans. Met. Soc., Amer. Inst. Min., Met. & Pet. Eng., 212 (1958), p. 132