

冷間圧延用ワークロールに使用される ESR 鋼塊の マクロおよびミクロ偏析の改善

Improvement of Macro and Micro Segregation of ESR Ingot for Cold Work Roll

(株)神戸製鋼所 高砂鑄鍛鋼工場 広瀬 和夫*・岡村 正義
(株)コベルコ科研 神戸事業所 長岡 豊

1 緒言

冷間圧延用ワークロール（以後ロールという）は耐肌荒れ性、耐摩耗性、表面の焼入れ硬化層の増大などの品質が要求される。これらのニーズに対して、安定した品質が保証できる ESR 鋼塊が広く使用されてきた。さらに近年、ロールは再生して使用されるようになってきた。すなわち、鋼塊の内部まで使用されるので、鋼塊の製造段階において、凝固中に発生するマクロおよびミクロ偏析の軽減が最も重要な因子となっている。

ESR 鋼塊の内部には、材質に依存するが、鋼塊の直径が大きくなるとともにフレッケルと呼ばれる偏析線が発生する。この箇所は熱処理後硬度が高く、不均質を生ずるためロールとして使用できる有効径は、表層からフレッケルの出現する距離によって決まる。また、耐肌荒れ性に要求されるデンドライト組織の微細化は、ESR の操業条件上はフレッケル対策と相反する処置となる。

そこで本報告では、溶解条件を変化させた ESR 鋼塊を切断調査し、フレッケルの生成条件を明らかにするとともに、デンドライトの微細化についても検討した。

2 実験方法

2.1 鋼塊の化学成分および ESR 条件

実験に用いた ESR 鋼塊の代表的な化学成分を表 1 に示す。実験は直径 690mm、755mm および 840mm の 3 種類の固定式鑄型を用い、溶解速度を変化させて溶解した。溶解中いずれも高径比が 3.0 以上になった後メタルプールの形状を調査するため、FeS (S 含有量 50%) 3kg をカプセルに入れて添加し、直ちに電源を切った。表 2 に実験に用いたスラグの組成を示す。

Table 1 Typical chemical composition of cold work roll
(mass %)

| C | Si | Mn | P | S | Ni | Cr | Mo |
|-----|-----|-----|-------|-------|-----|------|-----|
| .85 | .65 | .55 | <.020 | <.005 | .50 | 3.40 | .30 |

Table 2 Chemical composition of slag
(mass %)

| | |
|--------|--|
| Slag A | 20% CaF ₂ - (40% CaO - 40% Al ₂ O ₃) |
| Slag B | 60% CaF ₂ - (20% CaO - 20% Al ₂ O ₃) |

2.2 調査方法

供試材はトップ端より 450mm 長さの位置を切断した後、中心部を含む 60mm 厚さの縦断面をガス切断で切り出した。また、縦断面試験材を切り出した下側から 40mm 厚さの横断面試験材を切り出した。切断後、すべての供試材は 650℃ でテンパー処理した後、被検面を機械加工により切削した。縦断面は鋼塊の中心部が調査できるように加工した。

縦断面および横断面試験材はサルファープリントとマクロ腐食試験をおこない、縦断面については、メタルプールの形状、デンドライトの成長方向を調査した。フレッケルはマクロ腐食試験で認められるスポット状偏析の平均径が 2mm を越えるものをフレッケルと判定した。また、縦断面試験材はマクロ腐食試験終了後、その下端部で鋼塊の表面から中心部にかけて 20mm 角の小試験片を切り出し、バフ研磨後、ステッド氏液で腐食して、デンドライトの 1 次アームと 2 次アーム間隔を測定した。

平成 4 年 2 月 20 日 受付 (Received Feb. 20, 1992)

* Kazuo Hirose (Steel Casting & Forging Plant, Takasago, Kobe Steel, Ltd., 2-3-1 Shinhama Arai-cho Takasago 676)

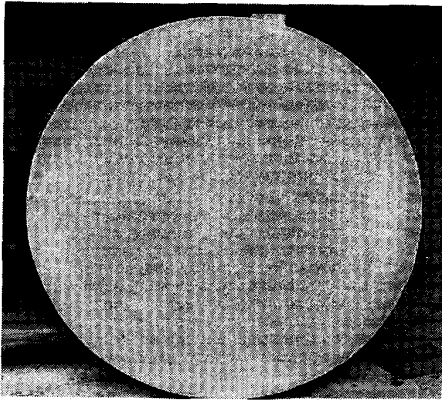


Photo. 1 Typical freckle in transverse section

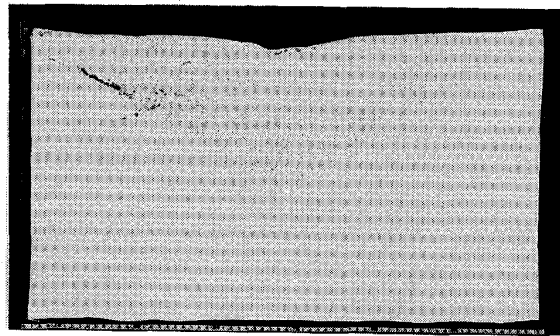


Photo. 2 Shape of typical metal pool during ESR by sulfur addition

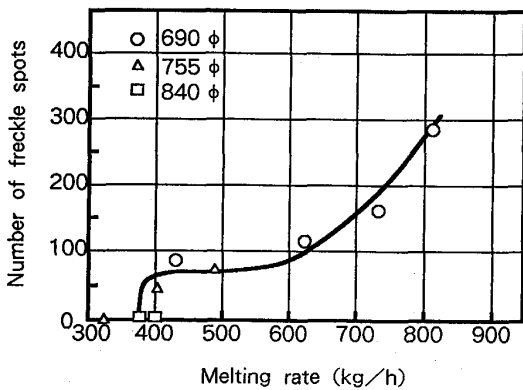


Fig. 1 Relation between number of freckle spots and melting rate

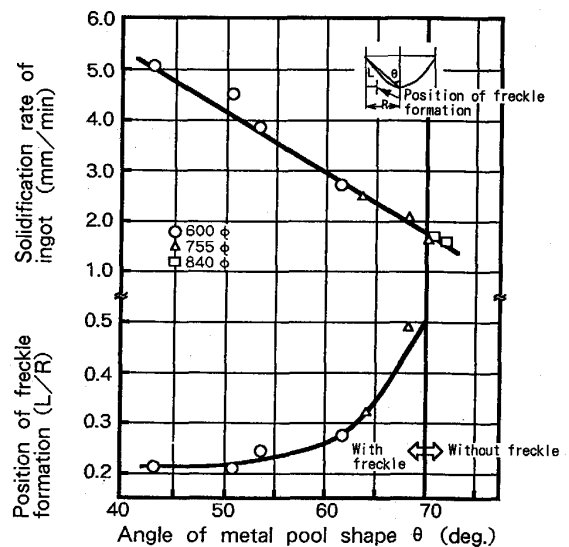


Fig. 2 Relation between position of freckle formation, solidification rate and angle of metal pool shape

3 実験結果と考察

3・1 フレックル発生個数

代表的なフレックルを写真1に示す。フレックルは鋼塊表面および軸心近傍には認められずこの間に発生する。図1にフレックル発生個数と溶解速度の関係を示す。フレックルの総個数は溶解速度の増加にしたがって増加するが、溶解速度が600kg/hを越えると急激に増加する。また、400kg/h以下の溶解速度ではフレックルは発生しなかった。

3・2 フレックルの発生位置と生成メカニズムについて

ESRのメタルプール形状の代表例を写真2に示す。このメタルプール形状を表わすパラメータとして図2に示すθを選び溶解速度とフレックルの発生位置（鋼塊表面からフレックルが認められる位置）との関係を整理した。（図2）このように溶解速度を遅くするとθは大きくなり、フレックル発生位置は軸心側に移動する。すなわち、θが60°まではフレックル発生位置の移動は緩やかであるが、60°をこえると急激に軸心側へ移動し70°をこえるとフレックルは発生しない。

フレックルは固液共存領域において、デンドライト樹間に生じた濃化溶鋼が、周囲との密度差により局部的に浮上し、その上方にある別の濃化溶鋼と合体しながら成長する。このフレックル発生の駆動力は密度差による浮力であり、濃化溶鋼が浮上する過程で凝固層に捕捉されて形成される。したがって、ESR鋼塊のメタルプールが浅くなるとデンドライトの成長方向が軸心方向と平行に近づくため、濃化溶鋼が凝固層に捕捉されにくくなるものと推定

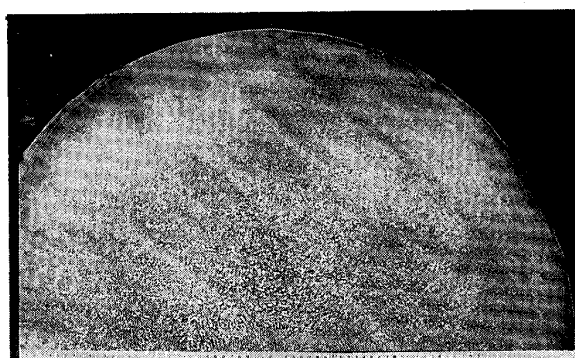
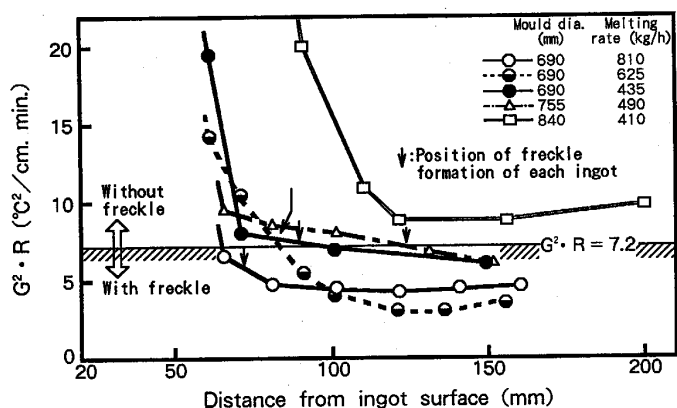


Photo. 3 Macro structure of 840mm dia. ESR ingot without freckle

Fig. 3 Relation between $G^2 \cdot R$ and freckle formation

される。

一方、直径が小さいESR鋼塊については、 θ が小さくてもフレッケルが発生しないこと、そして普通鋼塊の逆V偏析の生成臨界式、 $V \cdot R^{1/2} < \alpha$ をこれらESR鋼塊に適用した結果、^{1)~3)} 低速溶解ほどフレッケルが鋼塊の表層に近づく結果となったため、新たにフレッケル発生時の臨界条件を凝固条件との関連で整理した。

すなわち、フレッケルの生成条件として以下に示すような仮定をたてて作成した。

(1) 凝固は定常凝固であり、(1)式の関係が成立する。

$$V = G \cdot R \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 V は凝固温度範囲の平均冷却速度 ($^{\circ}\text{C}/\text{min.}$)、 G は凝固前面方向の温度勾配 ($^{\circ}\text{C}/\text{cm}$)、 R は凝固前面方向の凝固速度 ($\text{cm}/\text{min.}$)である。

(2) このフレッケルはチャンネル型のマクロ偏析線の一種であるので⁴⁾、M.C.Flemingsらのマクロ偏析の成長条件式⁵⁾、(2)式が成立する。

$$\vec{v} \cdot G / V \leq -1 \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 \vec{v} は固液共存相内の液体の流動速度 ($\text{cm}/\text{min.}$)である。

(3) フレッケル生成の駆動力はS.M.Copleyら⁶⁾によって定義されたフレッケルポテンシャルと考える。

$$\Delta\Phi = K / G^2 \dots \dots \dots (3)$$

ここで、 K は鋼種によって決まる定数である。

(4) フレッケル生成の臨界条件付近では(4)式が成立する。

$$\vec{v} \propto \Delta\Phi \dots \dots \dots (4)$$

以上(1)式~(4)式をもちいて、フレッケル生成の臨界条件として(5)式を導き、ロール材への適用を試みた。

$$G^2 \cdot R < \alpha \dots \dots \dots (5)$$

ここで、 α は鋼種によって決まる定数である。

各位置における平均冷却速度 V は、供試材の表層から中心部にかけてデンドライトの2次アーム間隔を測定し、小型実験により求めた(6)式を用いて求めた。

$$d_{II} = 307 \cdot V^{-0.84} \dots \dots \dots (6)$$

ここで、 d_{II} はデンドライトの2次アーム間隔 (μm)

供試材のデンドライトの2次アーム間隔測定結果から(6)式および(1)式を用いて供試鋼塊の $G^2 \cdot R$ 値を求めた結果を図3に示す。

図中各供試鋼塊のフレッケルが発生し始める位置を↓印で表示したが、 α を7.2とすると実測値とよく一致し、フレッケルの発生条件をよく説明できる。写真3に、直径840mm鑄型で溶解速度410kg/hでESRし、フレッケルが発生していない鋼塊のマクロ組織を示す。

なお、小型ESR鋼塊については、 θ が小さくてもフレッケルが発生しないのは、この臨界値を十分に満たしているためであることを確認した。

3.3 デンドライト組織の微細化

ロールの肌荒れは表面のデンドライト組織が圧延した鋼板の表面に転写される現象で、デンドライトにおけるマイクロ偏析に起因して発生する。したがって、ESR鋼塊のデンドライト組織を微細にし1次アーム間隔を小さくすることが重要である。

このデンドライト組織を小さくするには、MoやVなどの微細化元素の添加も考えられるが、ESRでは再溶解時の鑄型壁からの冷却を大きくすることが大切であり、具体的には鑄型壁と鋼塊表面との間に存在するスラグ殻の厚さを薄くすることである。

図4にフィルレシオとスラグ組成を変えてESRした時のスラグ殻の厚さと溶解速度の関係を示す。スラグ殻の厚さは溶解速度の増加とともに薄くなるが、溶解速度を増加させると前述したフレッケルの発生位置が鋼塊の表層部に移るため、溶解速度には制限がある。したがって、溶解速度を増加させなくても薄いスラグ殻の厚さが得られる低融点スラグが必要でこのスラグの選択とフィルレシオを小さくしたESR溶解により、低速溶解でも薄いスラグ殻の厚さが得られた。

つぎに、図5にデンドライトの1次アーム間隔についてAスラグでESRした鋼塊(A鋼塊)に対してBスラグでESRした鋼塊(B鋼塊)の微細化の割合を比較して示す。B鋼塊の1次アーム間隔は狭くなっている。すなわち、表層から20%深さまでは特に狭くなっており、内部についても約35%狭くなっている。このようにデンドライトの1次アーム間隔が狭くなった要因は、スラグ組成にあると考えられる。

Bスラグの組成は、CaF₂を60%含有しており、AスラグのCaF₂量の約3倍である。この系のスラグではCaF₂量の増加とともにスラグ殻の平均熱伝導率が増加することが示されており⁷⁾、概算でもAスラグの約2倍の平均熱伝導率と推定される。したがって、Bスラグの場合にはスラグ殻の厚さの減少と熱伝導率の増加との相乗効果によって、1次アーム間隔が狭くなったものと推察される。

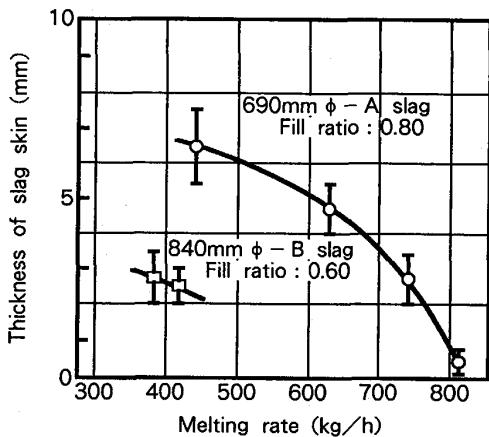


Fig. 4 Relation between thickness of slag skin and melting rate

4 結言

冷間圧延ワークロール用ESR鋼塊について、フレッケルの発生を支配する因子として、溶解速度とメタルプールの形状が影響していることを示し、フレッケルの生成条件をESR鋼塊の凝固条件から統一的に整理した。一方、耐肌荒れ性に対しては、低融点スラグの選択とフィルレシオを小さくすることによりデンドライト組織の微細化を達成した。

文献

- 1) 鈴木是明, 宮本剛汎: 鉄と鋼, 63 (1977), p53
- 2) 山田人久, 桜井隆, 竹之内朋夫: 鉄と鋼, 75 (1989), p97
- 3) 山田人久, 桜井隆, 竹之内朋夫: 鉄と鋼, 75 (1989), p105
- 4) 鈴木章, 長岡豊, 永田弘之, 広瀬和夫: 鉄と鋼, 65 (1979), p126
- 5) R.Mehrobian, M.Kean and M.C.Flemings: Met.Trans. 1 (1970), p1209
- 6) S.M.Copley, A.F.Giamei and M.F.Harnbeker: Met.Trans. 1 (1970), p2193
- 7) 成田貴一, 尾上俊雄, 石井照朗, 草道龍彦: 鉄鋼基礎共同研究会, 特殊精錬部会報告書, p92

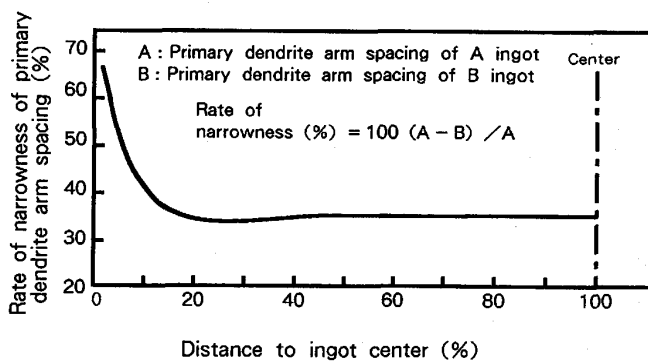


Fig. 5 Effect of slag composition on rate of narrowness of primary dendrite arm spacing