

線材圧延における水冷技術とスケール制御への適用

森高 満*・小泉富士雄**

*技術開発本部・生産技術研究所 **神戸製鉄所・条鋼圧延部

Water Cooling Technology in Rod Rolling and its Application to Scale Control

Mitsuru Moritaka・Fujiyo Koizumi

A rise in finishing temperature caused by an increasingly faster rod rolling finishing speed generally results in product quality deterioration. Therefore, the practical water cooling characteristics of interstand block mill cooling tubes and the finishing cooling tubes were investigated. A temperature simulation model based on forced water cooling was developed. A rod surface scale weight reduction was achieved using this water cooling simulation technology. In addition, the cause of oxide whisker formation was determined and the criteria of oxide whisker formation was developed.

まえがき = 線材には、後工程での加工を容易とするため、幅広い多くの異なる性質が要求される。とりわけ線材圧延においては、その後の伸線などの二次加工の効率を高めるため、組織微細均一化、高延性化、高靱性化、などを目的とした制御圧延や、制御冷却が適用されつつある。

また、生産性を高めるために圧延速度の高速化も進められているが、仕上げ圧延速度の高速化は圧延温度の上昇をもたらす、圧延材の剛性低下、スケール量の増加、内部組織制御性の低下などを招く。さらに、スケール量低減のために、強冷却により巻取り温度を下げれば、線材表面に赤いスケールが生成するなど、スケール性状が悪くなる場合がある。このような課題を解決し、さらに制御圧延・制御冷却技術を改善していくためには、強制水冷をとともなう線材圧延過程で圧延材の温度推移を把握すること、把握したデータをもちいて仕上げ圧延温度を下げる工夫をおこなうことが必要である。ここでは、仕上げ圧延温度低下法の一つであるブロックミル内冷却管と高速線材冷却に汎用されている成品冷却用冷却管について各々の冷却特性、圧延・冷却過程での温度シミュレーション結果ならびに実機での水冷制御技術の適用例について述べる。

1. ブロックミル内冷却管と冷却特性

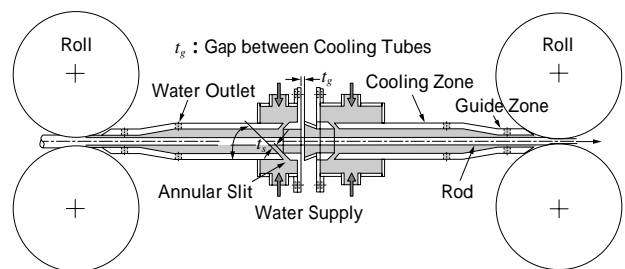
高速圧延における有効な仕上げ圧延温度の制御法の一つとして、ブロックミル内水冷があり、ミルメカなどから概要が報告されているが⁽¹⁾⁽²⁾、ここでは、従来よりも高い冷却能力をもつ冷却管を設計したので紹介する。

1.1 冷却管の構造とモデル実験

ブロックミル用冷却管には次のことが要求される。

- (i) 高い冷却能力、(ii) 線材のスムーズな通過
- (iii) 容易なメンテナンス

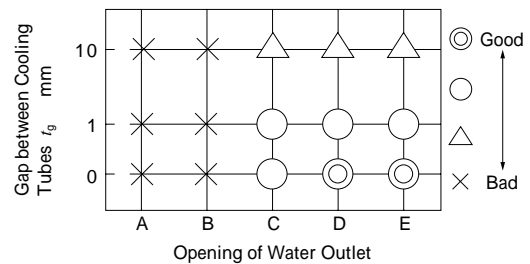
これらを満足させるために、第1図に示すように、入、出側冷却管とも冷却管部と圧延材ガイド部とを一体化し、冷却管部は冷却能力の高い浸漬形式³⁾、ノズル部は環状スリットとした。冷却管部内径30mmのアクリル製冷却管を製作し、スリット幅 t_g 、水抜き口の開度、入、出側冷却管のギャップ t_g などを変化させ、



第1図 ブロックミル用冷却管

Fig. 1 Interstand cooling tube of block mill

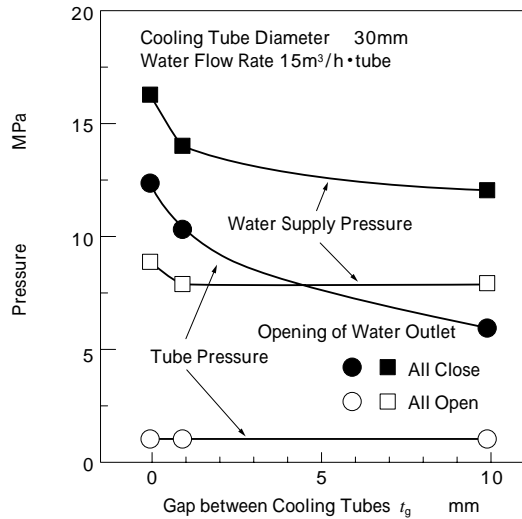
Opening of Water Outlet	
A	All Open
B	Open 1/2 Close
C	Open Close
D	1/2 Close Close
E	All Close



第2図 流動特性の評価

Fig. 2 Evaluation of water flow Characteristics

冷却管部圧力、冷却水供給圧力および冷却水の流動状況を調査した。この結果を第2図および第3図に示す。水抜き口の開度および冷却管ギャップ t_g はいずれも小さいほど、冷却水の流動状況は良好である(第2図)。とくに、水抜き口全開では、全開に比べて冷却管部圧力はいちじるしく高く冷却能力が向上する。なお、冷却管ギャップ $t_g=0$ 、水抜き口全開の場合でも冷却水供給圧力は20MPa以下であった(第3図)。以上の結果から、実機実験用冷却管には水抜き口は設置せず、冷却管ギャップ t_g は極力小さくした。



第3図 冷却管間のギャップおよび水抜き口が冷却管圧力に及ぼす影響
Fig. 3 Effect of gap (t_g) and water outlet opening on cooling tube pressure

1.2 実機実験による冷却特性

最適条件に設定した冷却管を、ブロックミル内の4箇所ある「丸」断面のロール間に設置し、5.5mm軟鋼線材圧延時に冷却水流量および圧延速度を変化させて圧延材表面温度を実測した。この結果にもとづいて算出した熱伝達率を第4図に示す。これらの結果から、ブロックミル用冷却管が実機で高い冷却能力を有することを確認した。

1.3 ブロックミル内冷却の実機への適用

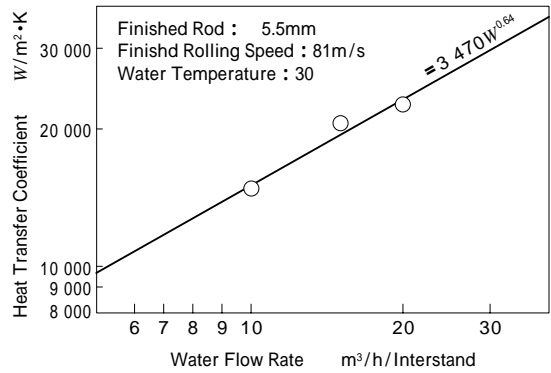
ブロックミル内水冷有、無の場合のブロックミル入、出側での実測温度にもとづいて解析した当社異形鉄筋D6圧延材の温度推移を第5図a)、b)に示す。ブロックミル内水冷を最大限に活用することにより、仕上げ圧延温度は1000以下とブロックミル内冷却なしの場合にくらべて大きく低下し、結果として巻取り温度も低くできることがわかる。また、これによりスケール生成量が0.2wt%以下と従来レベルの2/3程度に軽減でき、地鉄との密着性が向上するため、曲げ加工後の残留スケール量も適正值となることを確認した。このようにブロックミル内冷却は仕上げ圧延温度の低減に有効で、スケール性状の改善に寄与している。

2. 成品冷却帯冷却管

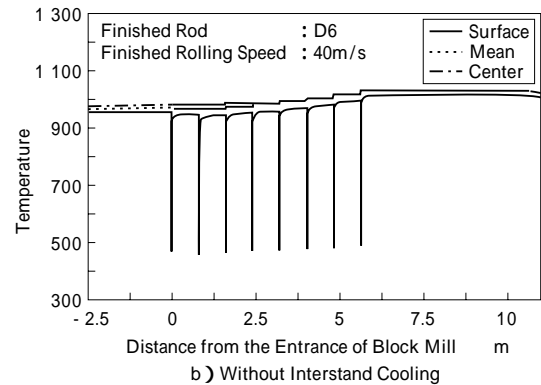
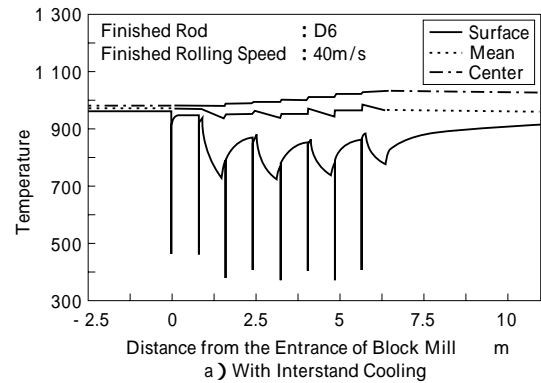
線材圧延では、1) 機械的性質の制御とばらつきの低減(均一性)、2) スケールなど表面性状の向上、3) ハンドリングの効率性、などのために、仕上げ圧延機と巻取り機間に成品冷却帯が設置される。

2.1 冷却管の構造

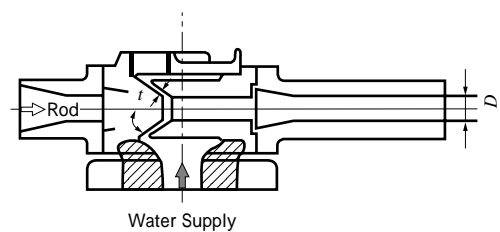
当社線材工場仕上げ圧延ラインのブロックミル-巻取り機間の成品冷却帯には、第6図に示すような冷却管を設置しており、この型式の冷却管は冷却能力と線材走行性の両方に優れることから汎用されている。幅 t の環状スリットから圧延材の進行方向に角度 θ で傾斜させて噴射された冷却水は線材表面に衝突して管内を流れ、出側の開口部から排水される。管内径が小さいため、管内



第4図 冷却水流量が熱伝達率に及ぼす影響
Fig. 4 Effect of water flow rate on heat transfer coefficient



第5図 圧延材の温度推移
Fig. 5 Calculated temperature profiles of rod in the finishing mill train



第6図 成品冷却帯の冷却管
Fig. 6 Cooling tube of finishing cooling zone

では浸漬冷却に近い状態となる。

2.2 実機冷却特性

実機冷却管の熱伝達率は、冷却前後の圧延材の実測表面温度から、温度解析によって算出した。その際、冷却面温度依存性および水温依存性は既報³⁾の浸漬冷却時の結果をもちいた。

熱伝達率に及ぼす冷却水流量の影響を第7図に示す。図中には、熱伝達率と冷却域1mあたりの冷却水流量との関係を最小2乗法により1次回帰した直線で示した。同図から、同一冷却水流量であっても、冷却管内径によって熱伝達率すなわち冷却能力が異なることがわかる。この冷却能力の相違は、冷却管内径によって通過する圧延材の線径すなわち圧延速度、厳密には圧延材と冷却水の相対速度が異なることに加えて、つぎに現象に起因している。すなわち、冷却管内径が小さいほうが、(i)管内への冷却水吐出にともなう入側開口部からの空気の巻込み量が少ないこと、(ii)管内圧が高くなることにより、冷却水と圧延材表面との接触が促進されること、などが寄与している。また、熱伝達率と冷却水流量 W との関係式として、 W^n をもちいた場合の流量指数 n はいずれの場合も約0.9で、浸漬冷却管の場合³⁾よりもやや大きな傾向を示した。

2.3 冷却能力の一般式

2.2節において、成品冷却帯冷却管の熱伝達率に及ぼす冷却水流量の影響を示した。これらの結果および第8図に示す浸漬冷却時の熱伝達率の圧延材表面温度 T_s への依存性³⁾および水温 T_w の影響³⁾をもちいと、任意の $W(\text{m}^3/\text{h})$ 、 T_w および T_s における熱伝達率($W/\text{m}^2\cdot\text{K}$)は、冷却域1mあたりの $W = 10\text{m}^3/\text{h}$ 、 $T_w = 30$ を基準条件にして、各内径 D の冷却管について次のように算出できる。

$$h = \left(\frac{D}{D_0}\right)^{b_0} \frac{b(T_s)}{b_0} (W/10)^{0.9} \{1 - 0.013(T_w - 30)\} \dots (1)$$

ここに、 D_0 ：内径 D の冷却管の $T_s = 700$ における熱伝達率(第7図)

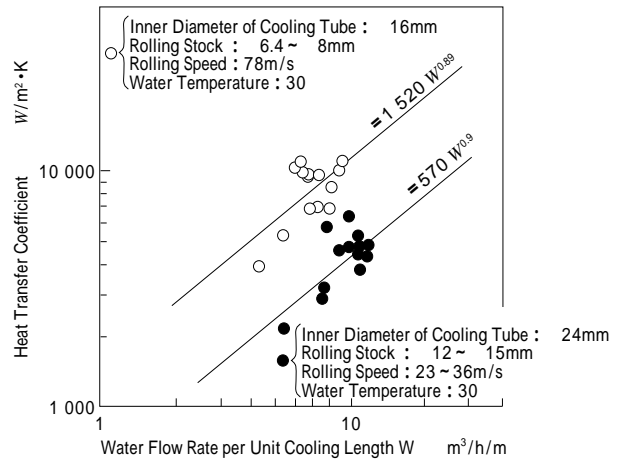
b_0 ：基礎実験により求めた $T_s = 700$ における熱伝達率(第8図)

$b(T_s)$ ：基礎実験により求めた任意の冷却面温度 T_s での熱伝達率(第8図)

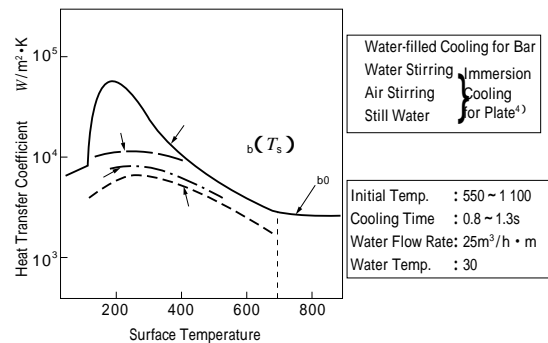
式(1)で示した冷却能力の一般式を圧延材に関する熱伝導式の強制水冷時の境界条件として圧延ラインの温度モデル⁵⁾に代入することにより、強制水冷をともなう断面内温度分布を考慮した圧延材の温度解析が可能となる。なお、ブロックミル用冷却管についても、第4図に示した熱伝達率をもちいて同様に温度解析が可能である。

3. 水冷技術の実機への適用

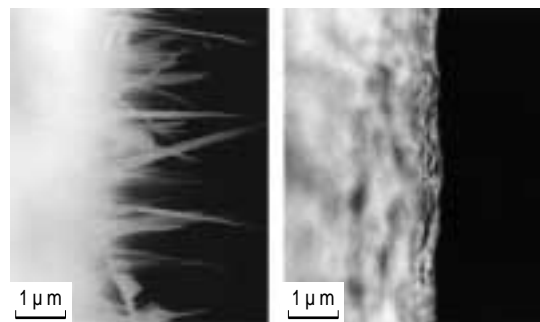
仕上げ圧延された線材を成品冷却帯で強制水冷し、巻取った後の線材表面には、巻取り温度が適正でないと、火膨れ状やひび割れ状のスケールが生成する場合がある。これらは、通常、巻取り温度を下げてもスケール厚みを薄くすれば防止されるが、いっぽうでは巻取り温度が低くなるほど、赤スケールが生成しやすくなる傾向にある。この赤スケールは材質には悪影響を及ぼさないが、外観および環境上の制約から好ましくない。そこで赤スケールの生成原因について、上述の強制水冷をともなう温度解析法をもちいて検討した。



第7図 熱伝達率に及ぼす冷却水流量の影響
Fig. 7 Effect of water flow rate on heat transfer coefficient



第8図 熱伝達率に及ぼす冷却面温度の影響(浸漬冷却管)
Fig. 8 Effect of surface temperature on heat transfer coefficient (Water-filled cooling tube)



(a) Oxide Whisker Formed (b) Oxide Whisker not Formed

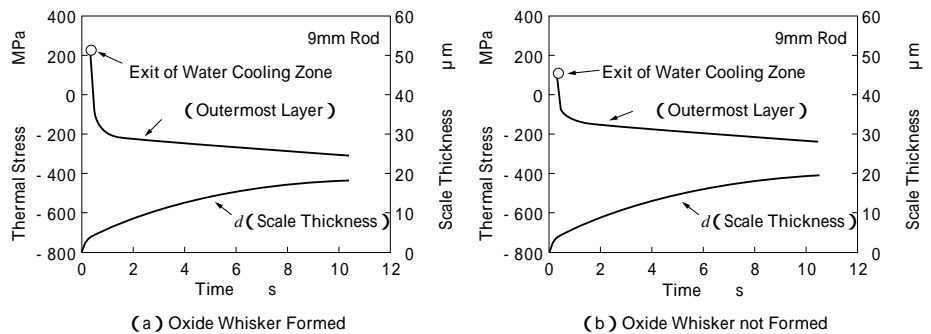
写真1 スケール最外層

Photo.1 Outermost Layer of scale

3.1 赤スケールの実体

赤スケールは熱延鋼板表面にも認められるが、この赤スケールは平均粒径が $1\sim 2\mu\text{m}$ のヘマタイト(Fe_2O_3)であり⁶⁾、一定温度以下の圧延によって粉状に破壊されたスケール(FeO および Fe_3O_4)が、圧延後の冷却時の酸化の進行によってヘマタイトとなることが明らかにされている⁷⁾。これに対し、赤スケールが付着している線材をSEM観察した結果、写真1に示すように、最外層にウイスカが明瞭に認められた。これは、スケール最外層のヘマタイトがウイスカ状に成長したものであり⁸⁾、このウイスカ状ヘマタイトは非常に微細なため可視光を透過し、その透過光の波長は赤色に偏ったスペクトルであるため、熱延鋼板の場合のヘマタイト粉末と同様に、スケールが赤く見える。

第9図 冷却過程での圧延材最表層の熱応力およびスケール厚さの推移
 Fig. 9 Transition of thermal stress in outermost layer of rod and scale thickness during cooling process



3.2 生成原因の究明

スケールのウスカ状成長にはヘマタイト層生成中の発生応力によって生じるらせん転位が関連していること⁸⁾、また、他の金属および金属酸化物についても、応力とくに圧縮応力の作用下でウスカ状成長が認められている^{9),10)}。これらのことから、スケールのウスカ状成長には、強制水冷過程で線材断面内に生じる温度分布に起因する熱応力が関連していると推定される。

1) 熱応力の算出方法

圧延材断面内温度分布にもとづく熱応力は、以下の式により算出される¹¹⁾。

$$r = \frac{E}{1-\nu} \left\{ -\frac{1}{r^2} \int_0^r r dr + \frac{1}{b^2} \int_0^b r dr \right\} \dots\dots\dots (2)$$

$$= \frac{E}{1-\nu} \left\{ \frac{1}{r^2} \int_0^r r dr + \frac{1}{b^2} \int_0^b r dr - \right\} \dots\dots\dots (3)$$

$$z = \frac{E}{1-\nu} \left\{ \frac{2}{b^2} \int_0^b r dr - \right\} \dots\dots\dots (4)$$

ここに r, θ, z : 線材半径方向, 円周方向, 軸方向の熱応力, T : 線材断面内半径方向の温度分布, r : 線材中心からの半径方向の距離, b : 線材の半径, ν : 線膨張係数, μ : ポアソン比, E : ヤング率

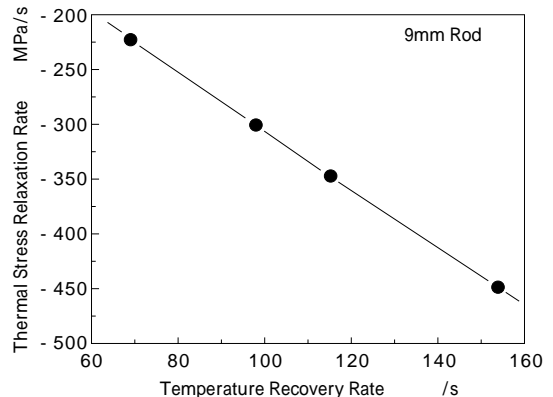
上述の温度解析により、水冷過程での圧延材断面内の温度分布を求めれば、式(2)～式(4)により線材断面内各部の熱応力が算出できる。

2) 実機実験データの解析

冷却開始温度および成品冷却帯の冷却水流量を変化させたときの同出側からの線材最表層の円周方向の熱応力、および放物線則によるスケール厚さ d の推移を第9図に示す。同図(a)はウスカ状スケールが発生した場合(b)は発生しなかった場合の結果である。同図からいずれの冷却条件でも水冷帯出側からの復熱過程において、線材最表層の引張応力が圧縮方向に急激に緩和されるが、その程度はウスカ状スケールが生成した冷却条件(a)のほうが大きい。また、いずれの場合でも、復熱後は地鉄と最表層スケールの熱膨張の差により、線材最表層には圧縮応力が作用している。このことから、線材圧延の場合は、水冷後復熱過程での線材最表層部への急激な応力変化が生成スケール最外層のヘマタイトのウスカ状成長を促進するのではないかと推定され、熱延鋼板の場合とは生成機構が異なるものと思われる。

3.3 赤スケール発生有無の基準

第9図で示した復熱過程での線材最表層部での急激な応力変化の割合(熱応力緩和速度)は、第10図に示す



第10図 復熱速度と応力緩和速度との関係
 Fig. 10 Temperature recovery rate vs thermal stress relaxation after water cooling

ように線材表面温度の復熱速度とよく対応する。このことから、ウスカ状スケール発生の有無を判定する基準として、応力緩和速度とともに復熱速度ももちいることが可能と思われる。

むすび = 高速線材圧延における仕上げ温度および巻取り温度制御のため、ブロックミル内および成品冷却帯の各冷却管の冷却特性を把握して、線材強制水冷時の温度シミュレーションを可能とし、主にスケール性状の改善について検討した。その結果、薄スケール化によるスケール管理性の向上や、従来明らかにされていなかった赤スケールの発生メカニズムについての知見がえられた。

今後、本水冷技術をより広範囲の制御圧延・制御冷却を可能とするミルレイアウトの設計などに活用し、線材の材質造り込み技術の向上に寄与したいと考えている。

参考文献

- 1) 石井英成ほか：産業機械，No.378(1982)，p.33.
- 2) 実公昭 52-18998.
- 3) 高塚公郎ほか：R&D 神戸製鋼技報，Vol.37，No.4(1987)，p.19.
- 4) 三塚正志ほか：鉄と鋼，Vol.63，No.6(1977)，p.1008.
- 5) 山口喜弘ほか：R&D 神戸製鋼技報，Vol.35，No.2(1985)，p.32.
- 6) 浅井達也ほか：材料とプロセス，Vol.6(1993)，p.357.
- 7) 岡田 光ほか：鉄と鋼，Vol.80，No.11(1994)，p.43.
- 8) R. Takagi : J. Phys. Soc. JPN, Vol.12, No.11(1957), p.1212.
- 9) J. A. Sartell et al. : Trans. Metall. Soc. AIME, Vol.215(1959), p.420.
- 10) R. M. Fisher et al. : Acta Metall., Vol.2(1957), p.368.
- 11) 竹内洋一郎：熱応力(1981)，p.79. 日新出版.