

鋼材加工熱処理におけるクエンチ点の制御

Control of Quench Point in Thermo-Mechanical Control of Steel

大久保 英 敏*・西 尾 茂 文*
Hidetoshi OHKUBO and Shigefumi NISHIO

1. はじめに

微粒化した液滴群を噴霧二相流の状態で高温面に衝突させ、顕熱および潜熱移動によりこれを冷却する方法を噴霧冷却と呼んでいる。

液滴の飽和温度以上の高温面を噴霧冷却した場合の熱伝達特性は、図1の上図に示すような（沸騰曲線と同様の）N字曲線となる。筆者らは、この場合の噴霧冷却をミスト冷却と呼んでいるが、ミスト冷却は、主として（冷却面に衝突する液滴の量を表す尺度である）液滴流量密度を制御することによって、冷却速度を変化させることが可能な冷却方法であることから、材料の熱処理の分野で広く利用されている。材料を高温から室温まで冷却する際の材料表面の温度履歴は、図1の下図に示す冷却曲線と呼ばれる曲線で表され、ミスト冷却の場合も沸騰冷却と同様に急冷段階が存在する。この急冷段階の開始点である「クエンチ点」は、沸騰曲線の膜沸騰域に相当する高温域の下限界温度（極小熱流束点温度）と密接な関係がある。このクエンチ点は、鋼材加工熱処理で問題とされている冷却不安定現象に深くかかわっており、冷却安定化のためには、クエンチ点あるいは高温域下限界温度の制御が重要課題であることが指摘されている¹⁾。

近年、金属材料の品質改善や低コスト化の要求が高まったことに伴い、液滴流量密度以外の因子によって冷却速度の促進および制御を行う必要性が生じてきた。また、高液滴流量密度の領域では、液滴流量密度の増加とともに高温域下限界温度も高温化することから、単に液滴流量密度の制御だけでは冷却速度の自在制御はできないものと思われる。このような現状と関連して、西尾^{2),3)}は、冷却面側因子を操作因子とした冷却制御法の開発を提案している。

本研究では、以上のような背景から、この冷却速度の促進および制御技術として、冷却面上に付着する酸化膜の膜厚、ぬれ性および分布を任意にコントロールするこ

*東京大学生産技術研究所 第2部

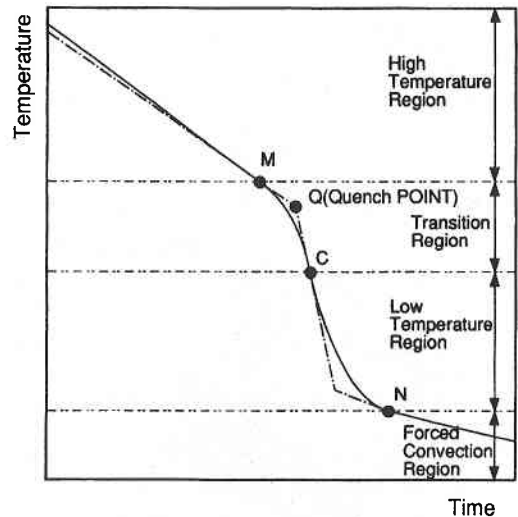
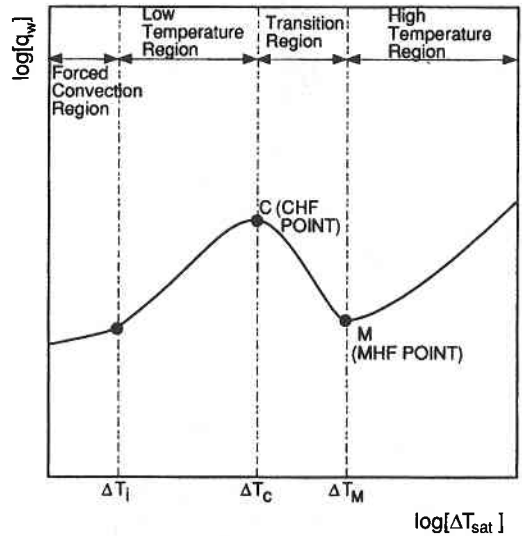


図1 ミスト冷却熱伝達特性および冷却曲線の概要

とによってクエンチ点を制御し、冷却速度の促進および制御を行う方法を提案し、この方法の有効性を実験的に検討することを目的とする。本報告は、その第 1 段階として、熱伝導性のよい冷却表面にぬれ性の異なる 2 つの領域を作り、ぬれ性の分布が高温度下限界温度に及ぼす影響を検討したものである。

2. 高温域下限界温度

前述したように、クエンチ点および高温域下限界温度を制御することは、ミスト冷却の冷却速度を制御するための重要課題であるが、これらに関するミスト冷却の研究は筆者らの研究を除くと以外に少ないのが現状である。

ミスト冷却熱伝達特性における高温域下限界温度 T_M は、冷却媒体側因子および被冷却物体側因子の双方の影響によって変化する。これまでの研究で、 T_M に及ぼす諸因子の影響に関して以下のことが明らかになっている。

- (1). T_M は液滴流量密度 D の影響を受け、 $D > 0.001\text{m}^3/(\text{m}^2\text{s})$ 程度の高液滴流量密度領域では、 D の増加とともに高温化する。ただし、 $D < 0.001\text{m}^3/(\text{m}^2\text{s})$ 程度の低液滴流量密度領域では、液滴流量密度の影響は小さくほぼ一定とみなすことができる^{4), 8)}。
- (2). T_M は、冷却面表面粗さの影響は受け難く、突起高さが蒸気膜厚さよりも大きい場合でも変化しない⁵⁾。
- (3). T_M は、冷却面材料の熱伝導性および冷却面表面熱抵抗層の影響を顕著に受け、冷却面材料の熱伝導性の低下および冷却面表面熱抵抗層厚さの増大とともに高温化する¹⁾。
- (4). T_M は、冷却面表面のぬれ性の影響を顕著に受け、ぬれ性の増大とともに高温化する¹⁾。

以上の結果を考慮して、筆者らは高温域下限界温度の評価法を提案している⁶⁾。すなわち、高温域下限界温度は、液滴流量密度、表面のぬれ性および冷却面材料の熱伝導性の影響を考慮することによって以下の式で整理ができる。この場合、液滴流量密度の代表値としては、液滴流量密度分布の最大値 D_{max} を使用している。

$$\begin{aligned}
 & D_{max} > D_c (=9 \times 10^{-4} \text{m}^3/(\text{m}^2\text{s})) \text{ の場合,} \\
 & \Delta T_{M'ex} = E(\beta) \cdot (1.63 \times 10^6 D_{max}^{0.21}) \theta_s^{-2} \quad : \theta_s \leq \theta_c \\
 & \Delta T_{M'ex} = E(\beta) \cdot (5.16 \times 10^3 D_{max}^{0.16}) \theta_s^{-0.6} \quad : \theta_s > \theta_c
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

ただし、 $\theta_c = 61.9 \times D_{max}^{0.0364}$ であり、 $E(\beta)$ は熱慣性比 β の関数として次のように表される。

$$\begin{aligned}
 & E(\beta) = 1 \quad : \beta \leq 0.065 \\
 & E(\beta) = 0.4 \times \ln \beta + 2.1 \quad : \beta > 0.065
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

ここで、 $\beta = [(\rho C_p k)_1 / (\rho C_p k)_{\infty}]^{1/2}$ は熱慣性比である。

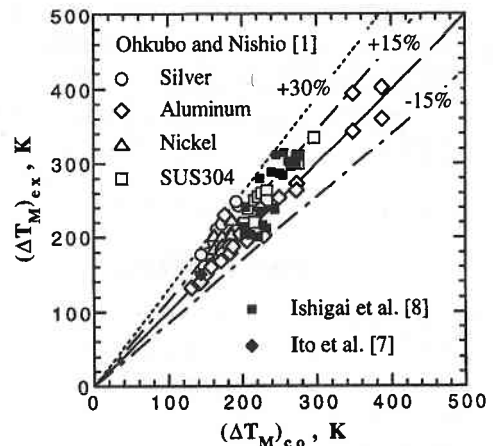


図 2 高温域下限界温度の測定値と計算値との対応

また、 $D \leq D_c$ の場合、 ΔT_M は、(1)式において $D_{max} = D_c$ として求められる。この場合、 $\theta_c = 48^\circ$ となる。

図 2 に、以上の式と金属面を冷却面としている場合の測定値との対応を示した。図より、筆者らの提案した整理式は、酸化の影響のない条件で測定された金属伝熱面での既存結果^{1), 4), 7), 8)} を +30%, -15% 程度の分散で予測できることがわかる。

しかし、従来のミスト冷却の研究では、 T_M の測定例は多くないうえに酸化膜の影響が無視できない研究例も多いことから、実用に適する評価法を得るためには、不明な点も残されている。今後の課題としては、以下の事項が挙げられる。

- (a). 沸騰現象の研究成果から考えた場合、 T_M はサブクール度の影響を受けると思われるが、ミスト冷却の研究では実際の測定例が見受けられない。
- (b). 液滴速度が T_M に及ぼす影響は小さいものと思われるが、定量的評価については明らかではない。なお、Hoogendoorn and Hond⁹⁾ は、気流流速の高い場合の方が T_M が高温化するという測定結果を得ているが、彼らの測定結果には酸化の影響が無視できないことから再検討する必要があると思われる。
- (c). 筆者らが提案した整理式は、金属面には適用できるが、石英ガラスなどのようにぬれ性がよく、熱伝導性の悪い材料には適用できない。適用範囲を広げるためには、ぬれ性がよく、熱伝導性の悪い材料を伝熱面とした実験の集積が必要である。
- (d). 従来の研究では酸化膜の付着した金属面を伝熱面として使用している場合が多いことから、冷却面表面熱抵抗層の影響を定量的に評価すること等の酸化膜が付着することによる T_M の変化を系統的に評価する必要がある。酸化膜が付着することによる表面性状の変化につい

研 究 速 報

てはすでに検討した¹⁾が、実際の酸化膜は金属面表面に一様に付着するのではなく、性状の異なる酸化膜が不均一に付着しているはずである。したがって、このような酸化膜の不均一性が T_M に及ぼす影響を検討する必要があると思われる。

本研究では、これらの課題の中の(d)に関する問題の解明を主目的としている。

3. 実験装置および実験方法

実験装置および方法は、冷却面を除けば既報¹⁾とほぼ同様である。したがって、ここでは本実験に使用した冷却面について説明する。実験に使用した冷却面は、直径 $d=15\text{mm}$ 、厚さ $l=2\text{mm}$ のアルミニウム製冷却面である。実験は非定常法で行った。

図 3(a), (b)に今回の実験に使用した冷却面を示す。図に示すように、あらかじめ冷却面表面にぬれ性の異なる2つの領域を作り、これらの領域の分布と面積率を変化させた。表 1 に冷却面として用いる試料の表面処理方法を示す。ぬれ性のよい部分は、陽極酸化膜(リン酸アルマイト、膜厚さ $0.56\mu\text{m}$) 処理によって実現し、表面処理を施さない部分(エッチング面)をぬれ難い面とみなすことにする。これらの面のぬれ性を既報¹⁾で示した接触角 θ_c で評価した場合、前者は $\theta_c = 37^\circ$ であり後者は $\theta_c = 62^\circ$ である¹⁾。陽極酸化膜の被覆率は、10%~90%の間で変化させた。伝熱特性は、冷却中の冷却面裏面の温度履歴を用いて集中熱定数系近似で求めた。したがって、本報告で提示するのは冷却面全体の平均熱伝達特性であることをあらかじめ断っておく。液滴流量密度は、2章で示した低液滴流量密度域の代表値として $D(=D_{max})=0.000571\text{m}^3/(\text{m}^2\text{s})$ を、高液滴流量密度域の代表値として $D(=D_{max})=0.00286\text{m}^3/(\text{m}^2\text{s})$ をそれぞれ採用した。

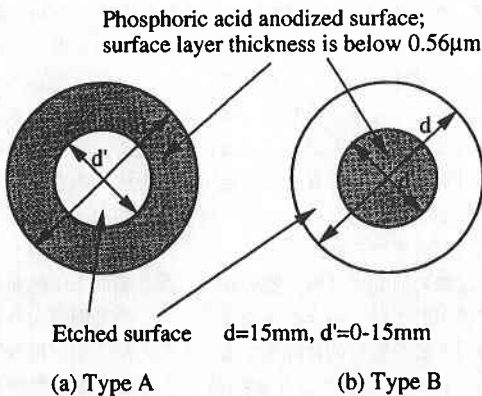


図 3 冷却面概略図

表 1. 表面処理方法

1. アセトン脱脂
↓
2. 苛性洗浄($\text{NaOH} \cdot 15\text{g}/\text{l}$, 60°C , 2min → 水洗 → 30% HNO_3 , 室温, 30sec → 水洗 → 乾燥)
(エッチング)
↓
3. マスキング塗料塗布 → 塗布された面はアルマイト処理されない。
↓
4. 乾燥(100°C , 1hr)
↓
5. リン酸アルマイト処理($\text{H}_3\text{PO}_4 \cdot 100\text{g}/\text{l}$, 30°C , $10\text{V} \times 20\text{min}$, 膜厚 $0.56\mu\text{m}$)
↓
6. 水洗(イオン交換水)
↓
7. 乾燥

4. 実験結果および考察

図 4 に熱伝達特性の一例を示すが、陽極酸化膜の被覆率の増加とともに、全面が陽極酸化膜で覆われた面 ($\theta_c = 37^\circ$) での熱伝達特性に近づいていく傾向を示す。図中には、(次報¹⁰⁾に示されている) 筆者らが提案した整理式による予測値を併記した。高温域での熱流束の予測値は、測定値よりもやや低い値を示すが、冷却面表面全面が均一の場合、予測値と実験値との対応は良好である。また、図から明らかなように、陽極酸化膜の被覆率(すなわち、ぬれ性のよい面の面積率)の変化は高温域熱伝達率にはほとんど影響を及ぼさず、高温域下限界過熱度の変化となって熱伝達特性に影響を及ぼす。そこで、図 5 に高温域下限界過熱度と陽極酸化膜の被覆率の関係を示す。図中には、冷却面表面全面が均一の場合の予測値とこれらの予測値を結んだ線を併記したが、図から明らかなように、いずれの液滴流量密度域においても両者の関係はほぼ直線関係にある。この関係は、非常に単純なものであることから冷却制御に関しては有力な結果になるものと思われる。図 4 には、被覆率をパラメータとした熱伝達特性の予測値として、図 5 中の直線から予測される高温域下限界温度を用いて筆者らが提案した整理式から予測される計算値も併記した。高温域下限界温度近傍で測定値が予測値よりも高い値を示すことを除けば、この場合も両者の対応は良好である。

以上の結果から、本研究で検討したぬれ性およびぬれ性の分布を制御することに基づくクエンチ点の制御法は、

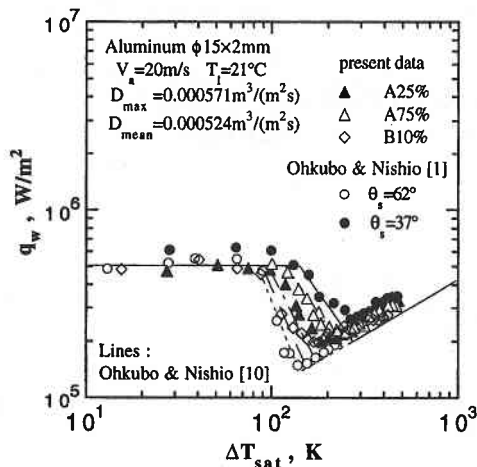


図 4 高温域熱伝達特性に及ぼす被覆率の影響

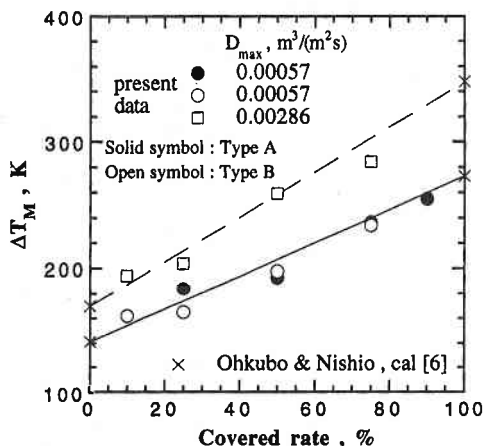


図 5 高温域下限界温度に及ぼす被覆率の影響

非常に簡便な方法であり、また本研究の条件内では高温域下限界温度の予測が簡単にできることから、新しい冷却制御技術として有効であると思われる。

5. おわりに

鋼材加工熱処理における新しい冷却制御技術として、冷却面上に付着する酸化膜の膜厚、ぬれ性および分布を任意にコントロールすることによってクエンチ点を制御し、冷却速度の促進および制御を行う方法を提案し、ぬれ性に関するこの方法の有効性を実験的に検討した。

おわりに、本研究を行うにあたり、昭和アルミニウム(株)より実験に使用した冷却面試料を提供していただいたことを記し、謝意を表す。(1993年3月10日受理)

参 考 文 献

- 1) 大久保・西尾, 機論, 55-517, B(1989), 2846.
- 2) 西尾, バウンダリー, 5-11(1989), 26.
- 3) 西尾, 機械学会誌, 93-864(1990), 922.
- 4) 大久保・西尾, 機論, 54-501, B(1988), 1163.
- 5) 大久保・西尾, 機論, 54-500, B(1988), 934.
- 6) 大久保・西尾, 機講論, 890-63(1989), 93.
- 7) 伊藤猛宏ほか2名, 機論, 55-511, B(1989), 805.
- 8) 石谷清幹ほか2名, 第16回日本伝熱シンポジウム講演論文集, (1979), 316.
- 9) C. J. Hoogendoorn and R. den Hond, Proc. 5th Intern. Heat Transf. Conf., Tokyo, (1974), 135.
- 10) 大久保・西尾, 生産研究, 45-6(1993), 掲載予定.