F213 高温鋼板スプレー冷却時の沸騰熱伝達特性(表面酸化膜の影響)

Boiling Heat Transfer Characteristics during Spray Cooling of High Temperature Steel Plate
-Effect of Surface Oxide Film-

○落合 良太 (福井大)

正 永井 二郎 (福井大)

Ryota OCHIAI and Niro NAGAI, University of Fukui, 3-9-1Bunkyo, Fukui-shi, Fukui

In the process of producing steels, TMCP (thermo-mechanical-control-process) is widely used. This process is a technique combining controlled rolling and cooling which enables us to produce high quality steels such as high tension steels without heat treatment and alloying. But on the other hand, there is a problem of the deformation of steels by cooling instability phenomenon. So heat transfer characteristics were measured at different flow densities and at different cooling water temperatures by spray cooling of high temperature iron plate. The experimental results show that flow rates and cooling water temperatures have no effect to heat transfer characteristics. It seems to be related to oxide film. So it is necessary to conduct additional experiments.

Key Words: Boiling, MHF point, Oxide Film, TMCP

1. 緒言

1-1 研究背景

沸騰は、相変化を伴う伝熱形態であり、顕熱に比べて非常に大きな潜熱により熱輸送が行われるため、小さな温度差で多量の熱を運ぶことができる。そのため、空調機やヒートパイプ、電子機器の冷却など、様々な分野で沸騰冷却が利用されている。その中でも、鉄鋼材料製造過程において沸騰冷却を応用した TMCP (thermo-mechanical control process) 技術は、省エネルギーの必要性を背景として発達し、実用化されてきた。

TMCP 技術とは制御圧延と圧延後の制御冷却を組み合わせオンライン化した組織制御技術である。制御圧延での加熱温度を調整することにより、多数の凸凹ができ結晶数が増加する。また、制御圧延直後に制御冷却を行うことにより、一つ一つの結晶の成長を防ぐことが可能である。この一連のプロセスにより、結晶の微細化が実現される。これまで合金添加と熱処理により製造されていた高張力鋼などの高品位の鋼材が、省合金、省工程で製造することが可能となった。しかしその一方で、冷却不安定現象による材質のバラつきや形状不良が発生していることや、より高品質鋼を生産するために厳しい温度制御を実現する必要性から、冷却制御プロセスの安定化および高度化が要請されている。

1-2 沸騰現象と表面酸化膜について

沸騰現象は熱流速および伝熱面の過熱度に応じて核沸騰 (nucleate boiling)、遷移沸騰 (transition boiling)、膜沸騰 (film boiling) と、その様式を変え、そのために熱伝達特性が大きく変わる。核沸騰は、伝熱面上の小さなキズを核として気泡を発生する沸騰様式であり、熱伝達率が大きい。膜沸騰は、伝熱面と液体の間に蒸気膜を形成し、蒸気膜を介して熱輸送を行う沸騰様式である。蒸気の熱伝導率は液体に比べて非常に小さいので、膜沸騰の熱伝達率は小さい。遷移沸騰に関しては、核沸騰と膜沸騰が時間的・空間的に混在し非常に複雑な現象が起きていると考えられているが、いまだ未解決の部分が多い。また、沸騰現象には熱流速が極小を取る過熱度が存在し、極小熱流速 (Minimum Heat Flux, MHF) 点と呼ばれている。

通常、制御冷却では、鋼材で所望の金属組織を得るために、指定された温度で瞬時に止める必要がある。この温度は遷

移域に存在する場合が多く、そのため、冷却は高温域での熱伝達特性、つまり、膜沸騰領域での熱伝達特性及び MHF 点 (minimum heat flux point, MHF point) 温度の影響を強く受ける。噴霧冷却時の膜沸騰領域での熱伝達特性や MHF 点温度に影響を及ぼす因子としては、冷却水温度、冷却水流量、冷却面表面酸化膜、冷却面表面粗さ、冷却面表面ぬれ性など、数多く挙げられる。その中でも特に表面酸化膜は表面粗さ、表面ぬれ性、多孔質の要素を含んでおり、非常に重要な因子である。その形状は様々であり、まばらに鋼材表面に存在しており、それに応じて冷却水の沸騰状態は刻々と変化し、鋼材の冷え方は変わる。これまで表面酸化膜は実験的に把握することは難しいと言われているため、その影響を整理しきれていないのが現状である。

1-3 研究目的

本研究では、以下の二点を目的とする。

- ① 鋼板の表面酸化膜がスプレー冷却時の非定常沸騰熱伝達特性に及ぼす影響を、実験的に把握する。
- ② 冷却前後の表面酸化膜の厚みや特徴についてレーザー顕微鏡を用いて定量的に把握し熱伝達特性 (膜沸騰熱伝達と MHF 点条件) との関連性を調べる。

2. 試料と実験装置及び方法

Fig.1 に試料を示す。試験片には、直径 22mm、厚さ 3mm、純度 99.5% の純鉄を使用した。試験片表面は #40, 120, 320 番の順に紙やすりで研磨し、実験直前には再度 #320 番の紙やすりで研磨を必ず行った。試験片の内部の温度を計測するために、試験片の裏面の中心にエンドミルによって、直径 1mm 深さ 0.5mm の溝を開け、そこに熱電対を取り付けた。冷却面以外の熱伝達を避けるために、セラミックボードに試験片を埋め込み、アロンセラミックで固定した。また、赤外線で試験片だけを加熱をするためと試験片周囲をアルゴン雰囲気中にするために石英ガラスの箱を作成した。

実験は二種類を行う。一つ目は酸化膜の厚さ制御の実験である。アルゴンガス雰囲気中で試験片を赤外線放射加熱器によって、3 分かけて 700℃ まで加熱する。700℃ に到達後、アルゴンガスの噴霧を止め、石英ガラスを試験物から外す。700℃ を保持した状態で、試験片の周囲を空気にするこ

Fig.1 Examination thing

とで、故意に試験片を酸化させる。この空气中時間を変化させ、酸化膜の厚さを制御する。指定した時間に達したとき、もう一度試験物に石英ガラスを差し込み、アルゴン雰囲気中で冷却する。得られた試験片の表面は樹脂で固定し、断面をレーザー顕微鏡を用いて観察する。その際、レーザー顕微鏡では一つの試験片に対して、中心、左端、右端、左中間、右中間の5か所を撮影する。それらを Photoshop で酸化膜の部分に色を付けることで、酸化膜の厚さを調べる。さらに、その値を用いて標準偏差を算出し、酸化膜厚さのグラフを作成する。

二つ目は冷却水噴霧実験である。実験の手順は加熱までは酸化膜厚さの実験と同じであるが、加熱後、スプレー下まで移動させた後、水槽からポンプでくみ上げられた冷却水を噴霧する。この実験では冷却水温度、および平均流量密度を変化させ、試験片の温度履歴を記録する。試験片の温度履歴は、試験片裏に取り付けた熱電対によりデータロガーに記録する。データロガーの記録間隔は 50ms とする。冷却水温度は、水槽に取り付けてあるヒーターにより変化させ、スプレー手前の熱電対により冷却水温度を測定する。また平均流量密度は、配水管途中に取り付けてあるバルブにより変化させる。

Fig.2 Experimental device

得られた温度履歴は、全時刻において 5 個の温度データの平均を求め平滑化し、それを実験結果とした。ある試験片温度 T における冷却熱流束 q は、試験片が十分小さいことから集中熱容量モデルを採用し、また、冷却面以外を断熱していることから冷却面以外の熱伝達がないと仮定し、Eq.1 により求めた。

$$q = \rho c V (T - T') / (A \cdot \Delta t) \quad (1)$$

ここで、 A は冷却面面積、 ΔT はデータロガーの記録間隔、 ρ は試験片密度、 c は定圧比熱、 V は試験片体積、 T' は Δt 秒後の

試験片温度である。本研究では、この熱流束より沸騰曲線を描き、熱伝達特性を評価した。

3. 実験条件

酸化膜の厚さ制御の実験では試験片の空气中時間を 1, 3, 5, 7, 9, 10, 20, 30, 60, 90 分と変化させ、10 パターンの実験を行う。

噴霧冷却実験では二つの実験条件で実験を行う。一つ目は冷却水サブクール度を 10K, 45K, 70K と変化させ、平均流量密度は $0.41 \sim 0.961 / (\text{mm}^2 \cdot \text{s})$ の間とする。二つ目は平均流量密度を $0.961 / \text{mm}^2 \cdot \text{s}$, $1.071 / \text{mm}^2 \cdot \text{s}$, $1.451 / \text{mm}^2 \cdot \text{s}$ と変化させ、冷却水サブクール度を 30K に固定する

4. 実験結果

4-1 酸化膜の厚さ制御

図3は空气中時間0分の場合の試験片の画像を示す。図3から試験片に酸化膜が付着していないことが確認できた。よって本研究の実験装置では試験片に酸化膜が付着していない状態を作ることができる。なお、試験片の溝にわずかに酸化膜が付着している。原因としては、加熱時は試験片の周りはアルゴン雰囲気中としたが、溝の部分にわずかに空気が残ったためである。オーダーとしては、 $1 \mu\text{m}$ 以下であるため、実験には大きな影響を及ぼさない。

Fig 3 Oxide film (0 min)

Fig 4 Oxide film (1 min)

Fig 5 Oxide film (3 min)

Fig 6 Oxide film (5 min)

Fig 7 Oxide film (7 min)

Fig 8 Oxide film (9 min)

Fig 9 Oxide film (10 min)

Fig 10 Oxide film (20 min)

Fig 11 Oxide film (30 min)

Fig 12 Oxide film (60 min)

Fig 13 Oxide film (90 min)

図4から13に空气中時間を変化させて実験を行った酸化膜の画像を示す。画像を見る限り、空气中時間が長くなるにつれて、酸化膜の厚さが厚くなり、多孔性が顕著に現れていることが分かる。しかし、この画像は試験片の一部分でしかない。試験片の全体を見てみると、空气中時間が9分以下の場合には試験片の表面に酸化膜がまばらに付着している。空气中時間が10分以上の場合には酸化膜が全体的に付着しているが、付着していない場所も確認できた。

図14に酸化膜厚さのグラフを示す。縦軸は酸化膜厚さ、横軸は空气中放置時間を示す。グラフの近似曲線を見ると、空气中放置時間が長くなるにつれて、傾きが減少している。よって、酸化膜厚みが一定の値に収束することが予測できる。

Fig.14 Graph of thickness of oxide film

4-2 冷却水スプレー冷却実験（サブクール度変化）

図15に冷却曲線を、図16に沸騰曲線を示す。図15の縦軸は試験片の温度、横軸は冷却時間、図16の縦軸は熱流束、横軸は過熱度を示す。過熱度とは試験片の温度から水の飽和温度を引いた値である。なお沸騰曲線においては、過熱度200K以上の領域ではすべてにおいてビオ数は0.1以下であった。そのため、高温域において集中熱容量モデルはある程度成り立っていると考えられる。図15からサブクール度が高いほど、冷却時間が短いことが確認できた。図6からサブクール度10K、45Kの沸騰曲線での明確なMHF点が確認できた。サブクール度10Kのとき、過熱度220K付近、サブクール度45Kのとき、過熱度280K付近であった。なお各条件で過熱度450K以上では、傾きが右下がりとなっているが、これは集中熱容量モデルを使用しているためである。また、サブクール度が高くなるにつれて、MHF点が高温化し、高音域での熱伝達率が高くなっていることが確認できた。これは、図5から分かるようにサブクール度が高いほど試験片と冷却水の温度差が大きいため、試験片がより速く冷却される。よって、熱流束が大きくなり、早く遷移沸騰をむかえるため、MHF点が高温化する。

Fig.15 Cooling curve at different subcooling

Fig.16 Boiling curve at different subcooling

Fig.18 Cooling curve at different subcooling

4-3 冷却水スプレー冷却実験（平均流量密度変化）

図 17 に冷却曲線を、図 18 に沸騰曲線を示す。図 17 の縦軸は試験片の温度、横軸は冷却時間、図 18 の縦軸は熱流束、横軸は過熱度を示す。なお沸騰曲線においては、過熱度 200K 以上の領域ではすべてにおいてビオ数は 0.1 以下であった。そのため、高温域において集中熱容量モデルはある程度成り立っていると考えられる。図 17 から試験片の冷却時間は 1.45l/mm²・s の場合が一番短い。冷却時間はそれぞれで異なるが、各条件のグラフの変曲点が 380℃ 付近に存在することが確認できた。図 18 から各条件で明確な MHF 点を確認することができなかった。また高温域での熱伝達率は各条件で大きな差が見られなかった。

5. 結言

- (1) 本研究の実験装置によって、試験片に酸化膜が付着していない状態を作ることが出来た。しかし、同じ空気中放置時間で得た酸化膜の厚さが違うことがあった。よって、更なる実験が必要である。
- (2) 冷却水スプレー実験のサブクール度を変化させた場合の実験結果の図から明確な MHF 点を確認できた。また、サブクール度変化による影響を確認することができた。
- (3) 冷却水スプレー実験の平均流量密度を変化させた場合の実験結果の図から平均流量密度による影響を確認することができなかった。今後、平均流量密度の範囲をさらに広げて実験をする必要がある。

Fig.17 Cooling curve at different subcool

参考文献

- (1) 大久保英敏, 西尾茂文, 生産研究 42(6), (1990), pp.45-50
- (2) 三塚正志, 鉄と鋼 79(6), (1993), N405-N416