

討12

ミストジェットによる圧延材の冷却

日本鋼管株式会社 技術研究所
 " " "
 " 京浜製鉄所
 " " "
 " 福山製鉄所

岡 計 夫
 ○野 口 孝 男
 宅 見 正 雄
 八 子 一 了
 菅 克 之

I 諸 言

熱鋼片を冷却する方法としては従来空冷（自然方冷，強制空冷）および水冷（シャワー，浸漬，高圧ジェット水流，ラミナフロー等）などによる方法が採用されて来ており，現在も各所で使用されている。しかし空冷の場合は，その冷却能力において，また水冷では冷却均一性においてそれぞれ問題がある。

この論文は，以上を解決すべき方法として，圧縮ガスと水との混合によるミストジェット冷却に着目し，この冷却特性の基礎的検討と，実規模への応用の可能性の検討を行なった事に関するものである。

II 原 理

熱鋼片を水で冷却する場合，鋼片面からの奪熱熱流束に影響する主要な因子には，①冷却媒体流速の増大，②サブクール増大，③圧力の増加，等がある。①又伝熱面の均一冷却には，①水滴径，②単位面積流量の均一化，等がある。これらのうち工業的に簡単に伝熱面熱流束を増大させることの出来るのは，①の流速の増大であろう。この効果によって膜沸騰域，核沸騰域，そして対流域の熱伝達率 h を向上させるのである。水単相流での流速は $(P_0 - P = \rho V^2 / 2g)$ で与えられ流速を増大するための水圧増加は設備的に限界があろう。それに対して，空気等の圧縮性ガスは理論的に超音速の達成が容易であり，この圧縮性ガスの性質を用いて，水をガスと混合し，超音速ガス流で加速すると容易に数十～百 m/sec のミスト流を達成出来る。又水滴径も高圧ガスによる「剪断力」によって粉碎され水量の少ないときは微細高速流となり，均一冷却に貢献する。この様な高速微細流を達成するためにfig1のようなスリット形ノズルを使用し圧縮空気と水とで混合流を作り出すことが出来る。このように，ガスと水の二相流により冷却すると，冷却特性を左右する因子としては，次のようなものがあげられる。①ガス量（ガス圧力），②水量，③ノズル角度，④スリット幅，⑤噴射距離，などである。

従って上記因子を適当に選ぶと，吐出流速は空気の場合，スリット幅1mm，空気圧力0.5 kg/cm^2G で100 m/sec が得られ（水スプレーでは，100 m/sec の流速を得る場合，80 kg/cm^2 の圧力を必要とする。），更に均一度については，フラットスプレーノズルと本方式ノズルとの噴流水の壁面到達密度分布をみるとfigs 2, 3となり本方式のノズル幅方向の均一性が，かなりすぐれていることがうかがえる。

III 試験方法

まず，高温域の沸騰を伴う非定常試験時の試料としてfig4の如く，

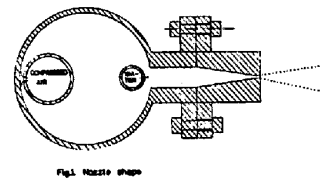


Fig. 1. Nozzle shape.

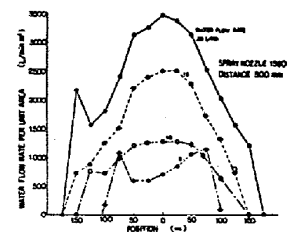


Fig. 2. Profile of water density in the case of a spray nozzle.



Fig. 3. Profile of water density in the case of a mist-jet nozzle.

0.23% C, 25×300×500 の鋼片を 970℃ に加熱し、この鋼片の厚み方向に数点 C A 1.6 φ インテグラルソース熱電対を埋込んだものを使用した。

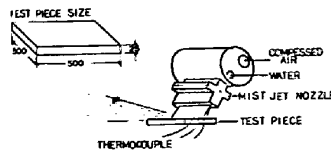


Fig. 4. Hot model experiment.

又、低温域の沸騰を伴わない定常試験として fig 5 の如く、0.2×5×10 mm の Pt 発熱板に直接通電による方法で壁温 50℃ で試験した。

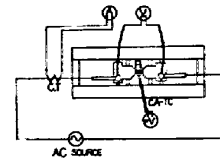


Fig. 5. Cold model experiment.

IV 試験結果

試験は、まず定常状態で再現性のある直接通電法により、よどみ点及びその近傍の特性を測定した。その結果の 1 例を fig 6 ~ 10 に示した。非定常のものについては加熱鋼片による実験で測定した。

試験結果 その 1 : ガス圧力の影響

fig 6 はガス圧力の影響をみたものであり、これによると圧力が、1.0 kg/cm²G 前後で熱流束が不安定となり、かつ熱流束の飽和または、極大値を示す、この現象については、空気の流速が音速以上となる条件、 $0.528 < P_0 / P$ によって、ノズル内圧力が 0.9 kg/cm²G となると亜音速から音速への変遷で流れが非常に不安定となるものと思われ、又後者については、定水量のもとでは流速増大によって水滴の壁面付着時間が短縮され、伝熱面熱流束が制限を受けることや、このノズルの流速の限界に達したためと思われる。

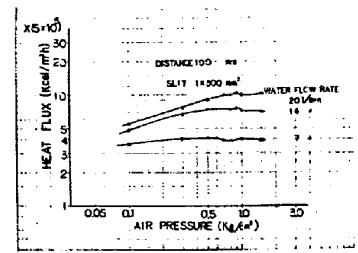


Fig. 6. Relationship between heat flux and air pressure.

試験結果 その 2 : 水量の影響

fig 7 の吐出水量の影響をみると空気圧力が 0.3 kg/cm²G のとき、水量が約 8 l/min 以上で、0.3 kg/cm²G のときは約 15 l/min で、0.5 kg/cm²G のときは約 20 l/min で h が飽和し、ガス圧力の増大で h の飽和値は多少上昇する。しかし前のガス圧力の影響結果から、ガス圧力が 1 kg/cm²G 以上となると h は上昇を止めてしまうので、1 kg/cm²G 以下で冷却能力の制御が可能であろう。

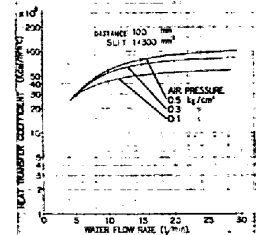


Fig. 7. Relationship between heat transfer coefficient and water flow rate.

試験結果 その 3 : (水量 w / 空気重量 A) 比の影響

その 1, その 2 で述べたように空気圧力 1 kg/cm²G 以下では冷却能力が、空気圧力 (又は空気流量) と水量との関係によって変化する、つまり主として、流速と水量によって冷却能力は左右される。

ここで、流速を決めるのはガス圧力 (減衰を考えるとガス量) によるわけであるから、水量と、この速度の 2 つが含まれた (水量 / ガス重量) 比 (W/A 比) を関数とすることを考えて、まとめると fig 8 の結果が得られた。この図から、わかるように、どのような場合でも、W/A 比が 1 以上で h は飽和傾向を示し、4 以上になると、W/A の変化に対して比較的安定した冷却能力をもつことがわかる。

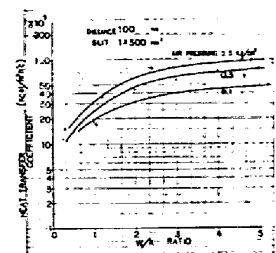


Fig. 8. Relationship between heat transfer coefficient and the flow ratio of water and air.

試験結果 その 4 : ノズルスリットギャップの影響

いま、空気圧力を一定、つまり近似的に吐出流速一定の場合、空気のみによる冷却能力は非常に小さいので、スリットギャップの変化したことによる吐出空気流の冷却能力の変化を無視すると、fig 9 から、ギャ

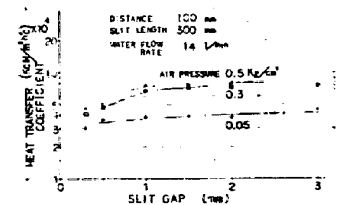


Fig. 9. Relationship between heat transfer coefficient and slit gap

ツブの狭いときは、吐出空気量も少ないので、水及び空気の伝熱面到達迄の流速減衰が大きく、冷却能力が低下するが、ギャップが広がると、その減衰も小さなものになることを示していると思われる。

試験結果 その5：ノズル角度の影響

以上、今迄述べて来たのは全てノズル角度が伝熱面に対して90°の場合についてであったが、次にノズル角度を変えた場合のよどみ点及びその近傍の特性を測定してみた。その結果fig10の如くとなり、ノズルから伝熱面上のよどみ点迄の距離が一定であると、角度をつけるほどhは大きくなること、うかがえる。しかし、hは 2.5×10^5 Kcal/m²h^oC程度で頭打ちとなり、そのときの角度は、45°近辺である。

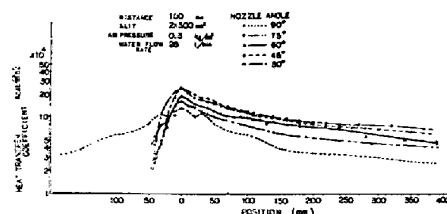


Fig.10 Profile of heat transfer coefficient for nozzle angle

従って、強冷の場合の角度は、45°近辺が、又加速冷却の場合は、広い冷却面のとれる90°が望ましいことがわかった。又、これらの冷却分布は、平板上単独、单相流による分布特性結果と同様なパターンを示し、第2の峰を有する分布となる。²⁾

試験結果 その6：高温域熱伝達率h

基礎的検討の最後として、非定常ではあるが伝熱面が、高温域で沸騰を伴う場合の冷却特性をfig4の方法で加熱鋼板の高温(約900°C)からの冷却によってhを求めた。その結果、よどみ点でのhはfig11のようになり最大達成hは、伝熱面上壁温が200°C付近で、約 2×10^4 Kcal/m²h^oCであった。この値は、現在の冷却設備では達成しうる最大であろう。

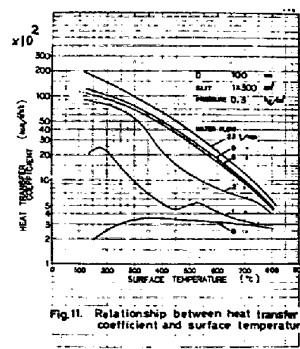


Fig.11. Relationship between heat transfer coefficient and surface temperature.

又、壁温150°C以下のhの算出は、この試験方法では困難であり定かでないので破線で示すことにした。しかし、fig5の直接通電法による壁温50°Cでのhの値との結びつきが、うまく出来ないのは、主に直接通電法の温度境界層の問題や、試験方法上の誤差が原因であると思われる。

V 基礎試験のまとめ

以上のように、ミストジェット冷却の上限は現有優秀冷却方式の限界値と同等であり、下限は強制空冷及び放冷迄、自在なhの選択が可能であることがわかり、かつ、冷却均一性についても、秀れていることが判明した。従って、水量及び空気量の可変によって、冷却限界内で、いかなる鋼板厚みのものでも一定冷却速度を得る事が可能となり、又複数ノズルによる干渉や、ノズル角度についても、実用上fig10を組合せれば、それほど問題ないこともわかった。

VI 冷却シミュレーション

これ迄の試験結果をもとにして、いかなる冷却設備においても冷却パターン及び冷却速度のシミュレーションが可能となるような冷却設備全体の熱伝達率h_{ts}パターンの一般化を試みた。それを以下に述べる。

- h_{s0}:fig11の壁温50°Cでの熱伝達率
 - H_{s0}:fig10のよどみ点 (POSITION = 0)での熱伝達率,
 - H_{s0p}:fig10のノズル角度によるパターンを複数組合せた場合の各位置における熱伝達率,
 - h_s:fig11の各壁温T_s°Cでの熱伝達率,
- とし、また計算においては、以下の仮定を設けた。

$$h_{so} \equiv H_{so}$$

その結果冷却設備の各位置Pにおける伝熱面温度 T_s での熱伝達率 h_{ts} は、

$$h_{ts} = h_s \times H_{sop} / H_{so}$$

となる。この手法で、これから述べる、実規模試験で使用了設備であるfig 12の場合について試算し、この設備の冷却能力を予測した。

Ⅵ 実規模試験

ここで、本方式が調質型高張力鋼の焼入又は、低成分系鋼の加速冷却手段として使用出来るかどうかを調査するためにfig 12の如く、ノズルが上下、前後する試験設備を用いて、試料サイズ、max 40 t × 1829 w × 3000 l の試験材を用いて試験した。

その結果、焼入時の冷却速度はfig 13の如く、ローラクエンチと同等という結果が得られ、又板長手方向の冷却歪については、fig 14に示す如く加速冷却及び焼入冷却についても全水量を上面5、下面7の配分にすれば上下面冷却能が等しくなり、冷却歪が最少となることが判明した。

更に、前記計算手法でのシミュレーション結果と試験値の値は、fig 15のようになり、かなり精度良くシミュレート出来ることが確認出来た。

Ⅶ 結 言

以上、ミストジェット方式による冷却特性についての各種試験の結果、鋼材を焼入するに十分な能力をもち、またこの方式で、W/Aの可変により冷却能力を均一でかつ、容易に制御出来るということがわかった。

更に、この冷却方式及び他の冷却方式における冷却設備の冷却シミュレーションが可能な計算手法も開発することができた。

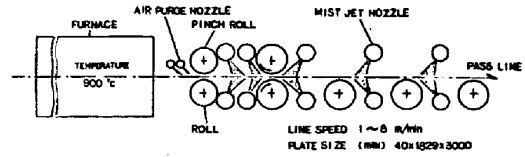


Fig.12. Outline of mist-jet cooling equipment for full size experiment.

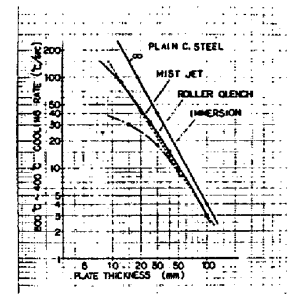


Fig.13 Relationship between cooling rate and plate thickness by several quenching processes.

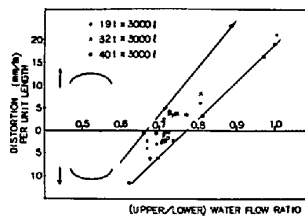


Fig.14. Relationship between distortion and the water flow rate of upper and lower

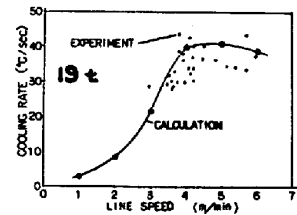


Fig.15. Influence of line speed on the cooling rate

参考資料

- 1) 日本機械学会, 沸騰熱伝達, 1-14 (昭40)
- 2) 熊田雅彌, 他2名, 日本機械学会誌第76巻第655号, 822-830,