

UDC 621.785.47 : 669.14-426 : 536.242

論 文

温水を用いる線材のパテンチング法における熱伝達率*

岩田 齊**・里見 祥明**・小北 英夫**

中田 秀一**・水原 誠**

Heat Transfer Coefficient in Patenting Process with Hot Water

Hitoshi IWATA, Yoshiaki SATOMI, Hideo OGITA

Hidekazu NAKATA, and Makoto MIZUHARA

Synopsis:

Heat transfer coefficients were investigated in hot water patenting process in which austenitized steel wire rods are immersed in hot water containing 0.5% polyvinyl alcohol and subjected to cooling by film boiling, and following results are obtained. (temperature in the center of steel wire rods; 900~650°C, rod diameter; $d=5\sim15\text{ mm}\phi$)

- (1) Heat transfer coefficient α is a function of rod diameter d , and following relation is obtained.

$$\alpha = kd^{-0.25} \quad (k : \text{constant})$$
- (2) α values for eutectoid steel rods having 5, 10, and 15 mm diameters are 300, 260, and 230 kcal/m²·h·deg respectively when water temperature is boiling point.
- (3) α increases greatly under sub-cool condition, i. e. by about 50% at 80°C in comparison with that at boiling temperature.

1. 緒 言

高炭素鋼線材を熱間圧延に引き続き、沸騰水中で巻き取り、膜沸騰冷却の期間中にパーライト変態を行わせるダイレクト・パテンチング法について、著者らは既にその方式の冷却挙動の概要、及びその実操業について、主として実際のデータを中心に報告¹⁾した。本報では本方式における膜沸騰冷却の冷却能、すなわち熱伝達率や急冷度に及ぼす線径や水温の影響、ならびに鋼組成による冷却挙動の相違について述べることにする。

2. 実験方法

2.1 冷却速度の測定

実験方法は前報¹⁾に準じた方法であつて、JIS G 3502における SWRS 80B の共析鋼の線材から、伸線によって各種線径のサンプルを作製した。その後このサンプルの端面より中心軸に沿つて直径の 10 倍以上の深さを有する 1.6 mm ϕ 孔をあけ、この中に Brazepaste を塗布した CA シース熱電対を圧入した。鋼線の表面は酸洗後 #60 の研磨紙で仕上げた。そしてこの鋼線をアルゴンガス雰囲気中の 900°C の電気炉に 1 min/mm の割合

で滯留させて加熱した後、沸騰点あるいはそれ以下の温度の、特に攪拌しない温水槽中に水平の姿勢で浸漬処理して、鋼線の中心部の冷却曲線をレコーダーで記録した。温水中には前報¹⁾にならう、膜沸騰を安定化させるために、ポリビニルアルコールを 0.5% 添加したが、この場合、パーライト変態の起こる温度範囲での膜沸騰段階の冷却速度は、純水の場合と比べてほとんど変化しないことが判明している。なお、鋼組成による冷却曲線の相違を求めるために、10 mm ϕ については、軟鋼 (0.08%C キルド鋼) サンプルを加え、沸騰水中での冷却曲線を求めて、共析鋼のものと比較した。

2.2 熱伝達率の算出法

対象とする温度範囲において、熱伝達率が一定であると仮定し、また冷却が Newton の冷却法則に従うとすると、条件が明らかであれば既に知られている物性値を用い、線の中心部、表面部などの冷却曲線を作図することができる²⁾。パテンチングで重要視する 900°C から約 650°C の間での冷却曲線は、比較的直線に近いものであつて、熱伝達率を一定とする仮定は抵抗なく受け入れられよう。したがつて鋼線の比熱、密度、熱伝導率が既知であるから、線径、冷却開始温度、温水温度、及び

* 昭和 55 年 4 月本会講演大会にて発表 昭和 54 年 10 月 3 日受付 (Received Oct. 3, 1979)

** 住友電気工業(株) (Sumitomo Electric Industries, Ltd. 1 Aza-Miyahigashi Koya Itami 664)

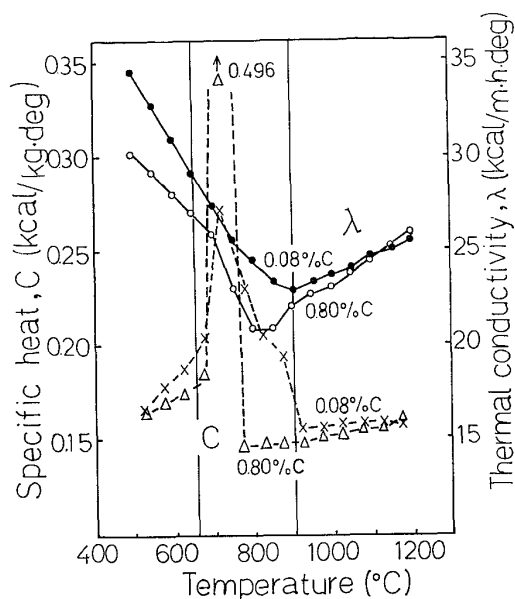


Fig. 1. Specific heat and thermal conductivity as a function of temperature³⁾.

熱伝達率の条件を与えれば鋼線の中心部の冷却曲線が作図できる。ここで、鋼線の比熱 C (kcal/kg·deg) は温度によつて変化するので、Fig. 1 に示す値³⁾を参考にして、共析鋼の場合は 750°C から 700°C の間の変態による特異値を除いた値として $0.15 \text{ kcal/kg}\cdot\text{deg}$ とし、また熱伝導率 λ (kcal/m·h·deg) は 900°C から 650°C の平均値として、同じく Fig. 1 から $23.3 \text{ kcal/m}\cdot\text{h}\cdot\text{deg}$ とした。密度 ρ は 7800 kg/m^3 とする。熱伝達率 α (kcal/m²·h·deg) を適当な範囲の値に取つて、計算により冷却曲線群を作図し、これらの中で実測冷却曲線に最も一致する傾斜を有するものを選び出すと、逆に熱伝達率 α を求めうる。

3. 実験結果

得られた冷却曲線の例として、沸騰水の場合を Fig. 2 に示す。そして、パテンチングに、直接関係する 900°C から約 650°C までの平均的な冷却速度と、線径との関係を、前報¹⁾と同じように両対数グラフとして Fig. 3 に示した。また、得られた熱伝達率 α と線径との関係を Fig. 4 に示す。(Fig. 4 における Bromley の式、及び西川、伊藤の式による計算値については 4.1.1 で詳述する。) 熱伝達率 α は線径に多少関係し、細くなると大きくなる。そして沸騰点以下の温度の場合の α は、そのサブクール度にしたがつて著しく大きくなることわかる。さらに沸騰水の α の値は前報¹⁾で示した値、約 $350 \text{ kcal/m}^2\cdot\text{h}\cdot\text{deg}$ より大幅に下回っており、また線径に対する関係も逆になつている。前者については前報では λ , C の値として $28 \text{ kcal/m}\cdot\text{h}\cdot\text{deg}$, $0.2 \text{ kcal/kg}\cdot\text{deg}$

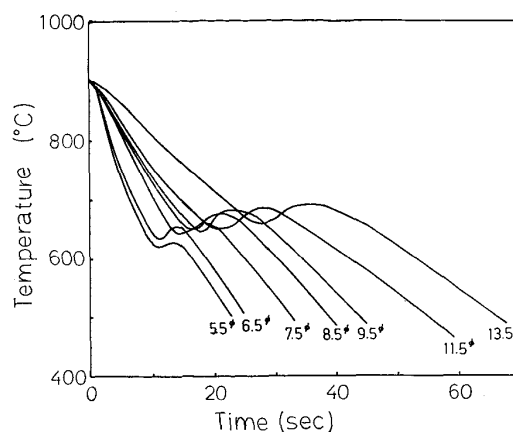


Fig. 2. Cooling curves of the center of rod. ($0.80\% \text{C}$, water temperature; $T_s = 100^{\circ}\text{C}$)

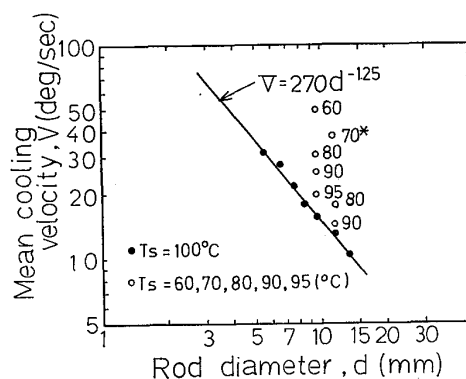


Fig. 3. Rod diameter vs. mean cooling velocity at temperature range from 900°C to 650°C . (*water temperature, $^{\circ}\text{C}$)

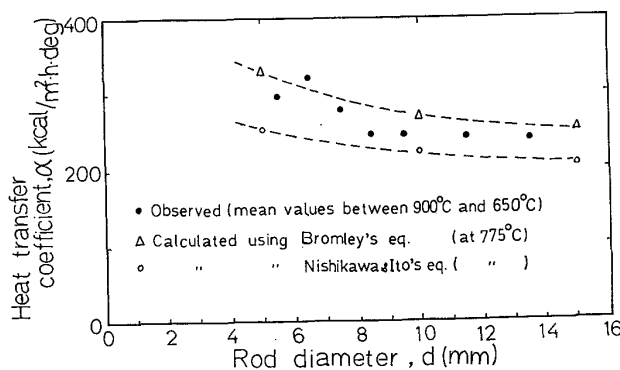


Fig. 4. Heat transfer coefficient for various rod diameters.

を採用したが、高炭素鋼に対しては、これが必ずしも適切でなかつたこと、また後者に関しては、実測曲線と計算曲線との一致のさせ方も必ずしも妥当でなかつたことが原因であり、訂正したい。さらに、共析鋼と軟鋼との冷却曲線を比較して Fig. 5 に示す。軟鋼は冷却曲線が、共析鋼のものに比較して単純であるが、 900°C から

Table 1. Values used for calculation of heat transfer coefficient and results.

			①	②	③
T_w	°C		900	775	650
T_s	°C		100	100	100
ΔT_{sat}	°C		800	675	550
T_m	°C		500	438	375
λ_v (at T_m)	kcal/m·h·deg		0.0580	0.0511	0.0447
γ_v (at T_m)	kg/m ³		0.275	0.296	0.329
γ_l (at T_s)	kg/m ³		958	598	958
L (at T_s)	kcal/kg		540	540	540
C_{pv} (at T_m)	kcal/kg·deg		0.509	0.499	0.490
η_v (at T_m)	kg·h/m ²		7.90×10^{-10}	7.17×10^{-10}	6.48×10^{-10}
α_r ($\epsilon=0.8$)	kcal/m ² ·h·deg		92	69	48
$d = 0.005 \phi$ (m)	BROMLEY's eq.				
	α_c	kcal/m ² ·h·deg	206	201	199
	α	kcal/m ² ·h·deg	275	253	235
	NISHIKAWA & ITO's eq.				
$d = 0.01 \phi$ (m)	α_c	kcal/m ² ·h·deg	281	274	270
	α	kcal/m ² ·h·deg	350	326	306
	BROMLEY's eq.				
	α_c	kcal/m ² ·h·deg	173	170	168
$d = 0.015 \phi$ (m)	α	kcal/m ² ·h·deg	242	222	204
	NISHIKAWA & Ito's eq.				
	α_c	kcal/m ² ·h·deg	224	221	219
	α	kcal/m ² ·h·deg	293	273	255
$d = 0.015 \phi$ (m)	BROMLEY's eq.				
	α_c	kcal/m ² ·h·deg	156	153	151
	α	kcal/m ² ·h·deg	225	205	187
	NISHIKAWA & ITO's eq.				
$d = 0.015 \phi$ (m)	α_c	kcal/m ² ·h·deg	200	197	196
	α	kcal/m ² ·h·deg	269	249	232

650°Cの間での冷却速度が少し低くなることがわかる。

4. 考 察

4.1 膜沸騰熱伝達率について

ダイレクト・パテンチングでは、湯温として沸騰点を用いているが、これは処理される線材から単位時間に投入される熱量が極めて大きいので、湯を沸騰点以下の一定温度に保つことが、實際上、非常に困難なことによる。したがって、ダイレクト・パテンチングのみを考えるならば、100°Cのみを考慮すればよいが、通常のパテンチングにおいて、環境上の問題から再加熱鉛パテンチングに代わる新しい無公害パテンチングの対象として考える場合には、沸騰点以下の90°C、80°Cという湯温での冷却は非常に興味のある現象である。次に、沸騰点の場合のいわゆる飽和プール膜沸騰、及び沸騰点以下のいわゆるサブクール膜沸騰における冷却について、区別して考察を行うことにする。

4.1.1 沸騰水中での膜沸騰熱伝達

湯温が100°C、すなわち沸騰点での飽和プール膜沸騰

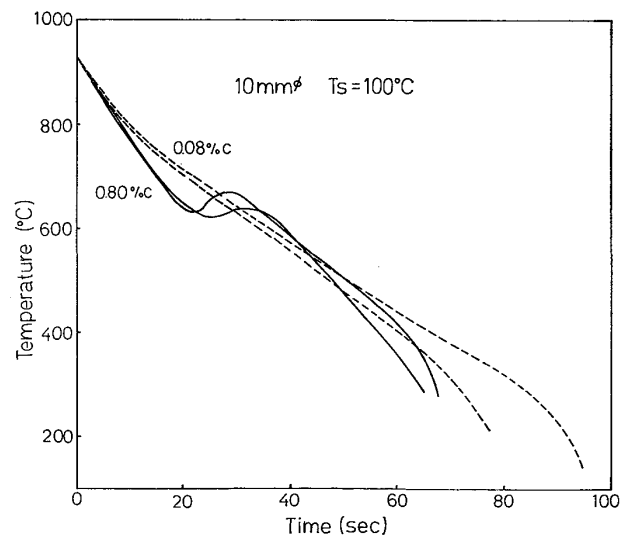


Fig. 5. Cooling curves of 0.08%C and 0.80%C steels.

熱伝達において、高温の長尺円柱（線材）を液中で水平につるして冷却させる場合に、一般的な式として、Bromleyの式、及び西川、伊藤の式が知られている⁴⁾。

Bromley の式は次のとおりである.

$$\alpha = \alpha_c + 3/4\alpha_r \quad (\text{ただし } \alpha_c > \alpha_r) \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\alpha_c \cdot d}{\lambda_v} = 0.62 \left[\frac{\gamma_v (\gamma_1 - \gamma_v) L' d^3}{\eta_v \lambda_v \Delta T_{\text{sat}}} \right]^{1/4} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$L' = L \left(1 + \frac{1}{2} \frac{C_{pv} \Delta T_{\text{sat}}}{L} \right) \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\alpha_r = \frac{\varepsilon \cdot \sigma [(T_w + 273)^4 - (T_s + 273)^4]}{\Delta T_{\text{sat}}} \quad \dots\dots\dots (4)$$

α_c : 対流による熱伝達率 (kcal/m²·h·deg)

α_r : 放射による熱伝達率 (kcal/m²·h·deg)

d : 線径 (mm)

λ_v : 蒸気の熱伝導率 (kcal/m·h·deg)

γ_v : 蒸気の密度 (kg/m³)

γ_1 : 水の密度 (kg/m³)

L : 蒸発潜熱 (kcal/kg)

η_v : 蒸気の粘性係数 (kg·h/m²)

C_{pv} : 蒸気の定圧比熱 (kcal/kg·deg)

$\Delta T_{\text{sat}}: T_w - T_s$ (°C)

T_w : 線材の表面温度 (°C)

T_s : 湯温 (=100°C) (°C)

ε : 線材表面の放射率

σ : ステファン・ボルツマン定数

$$(\sigma = 4.88 \times 10^{-8} \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{deg})$$

また、西川・伊藤の式は(1)式における α_c を、次の式で求めるものである.

$$Y \equiv \log_{10} \frac{\alpha_c \cdot d}{\lambda_v} \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$Y \equiv 0.22 + 0.15X + 0.0058X^2 \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$X \equiv \log_{10} \frac{G_r}{3/10 S_p(1+2/5 S_p)} \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$S_p = \frac{\Delta T_{\text{sat}} \cdot \lambda_v}{L' \eta_v \cdot g} \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$G_r = \frac{\gamma_v (\gamma_1 - \gamma_v) \cdot d^3}{g \cdot \eta_v^2} \quad \dots\dots\dots (9)$$

g : 重力の加速度 (m/h²)

これらの式を用いれば、熱伝達率 α が計算で求められる。ここで、蒸気についての諸数値としては、($T_w + T_s$)/2 = T_m の時の物性値⁵⁾を採用するものとする。

そこで、対象とする 900°C、650°C 及びその中間の 775°C における① 5 mmφ、② 10 mmφ、③ 15 mmφ の共析鋼線材の α を求めた。放射率 $\varepsilon = 0.8$ とし、その他の数値は計算結果とともに Table 1 に掲げ、また 775°C における値を Fig. 4 の実測値にあわせプロットした。

α としては、Bromley の式よりも西川・伊藤の式の方が高い値を与えている。実測データから求めた α の値は、これら 2 つの計算値の中間を示し、まずはすべてが妥当な値であろうと思われる。Fig. 4 に見られるように、熱

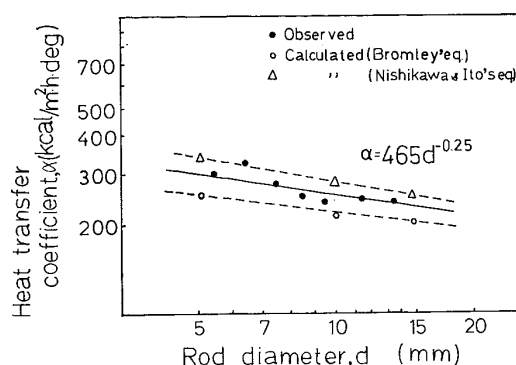


Fig. 6. Heat transfer coefficient vs. rod diameter.

伝達率 α は線径 d によつて変化すると見られ、線径の増加とともに低下する。Bromley の式からわかるように、熱伝達率 α の主体である対流熱伝達 α_c が $d^{-0.25}$ に比例しているからであり、 $\alpha \propto d^{-0.25}$ と近似できる。したがつて、実測の α と d とを両対数グラフにプロットし直し (Fig. 6), -0.25 の傾斜線を入れたところ、極めてよい一致を見た。これらのことを考慮して共析鋼の場合の沸騰水中での膜沸騰による熱伝達率は、5, 10, 15 mm φ について、それぞれ 300, 260 及び 230 kcal/m²·h·deg と見ればよいであろう。これを急冷度 (焼入強力度) H (cm⁻¹) に(10)式を用いて換算すると、それぞれ 0.064, 0.056 及び 0.049 cm⁻¹ となる。

$$H = \alpha / 2 \lambda \quad \dots\dots\dots (10)$$

熱伝達率 α が、直径 d の -0.25 乗に比例するとした時、冷却速度と線径との関係について考えてみる。一般に線径とその冷却速度との間には、次式⁶⁾が成り立つとされている。

$$t/d^n = k_1 \quad \dots\dots\dots (11)$$

t : 冷却に要する時間

k_1 : 比例常数

n : 定数 (≈ 1.25)

このような関係式は、沸騰水を用いる本方式の場合にも成り立ち¹⁾,

$$V = k_2 \frac{\alpha \cdot S}{C} = k_2 \frac{k_3 d^{-0.25} \cdot k_4 d}{k_5 d^2} = k_6 d^{-1.25} \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$t = k_7 V^{-1} = \frac{k_7}{k_6} d^{1.25} = k_8 d^{1.25} \quad \dots\dots\dots (13)$$

$$\therefore t/d^{1.25} = k_8 \quad (k_8 = k_1) \quad \dots\dots\dots (14)$$

V : 冷却速度

S : 表面積

C : 熱容量

$k_2, k_3, k_4, k_5, k_6, k_7, k_8$: 比例常数

(11)式と(14)式から $n = 1.25$ となる。

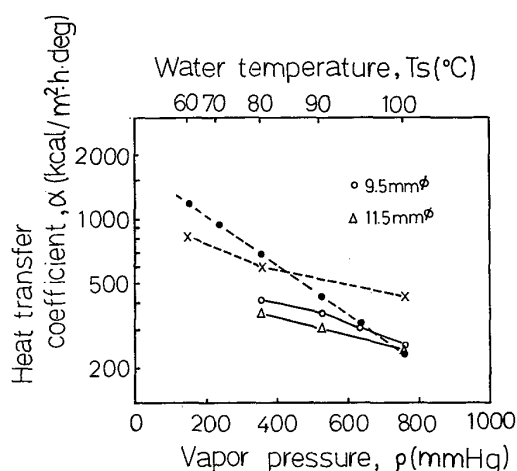


Fig. 7. Heat transfer coefficient α at various temperature of water.

(● GROSSMANN⁷⁾
(× TACHIBANA & FUKUI⁸⁾
Values are converted into α .)

Fig. 3 に示された直線の傾斜が -1.25 であつて、このことは(13)式で説明され、同様に(11)式の n の値もその根拠が明らかになった。これらのことから、熱伝達率が直径に関係し、しかもその -0.25 乗にはほぼ比例していることが、過去の実測データ¹⁾からも確認できる。

4.1.2 湯温が沸騰点以下の場合の膜沸騰熱伝達

湯温がサブクール（不飽和）状態の時の膜沸騰においては、蒸気膜を離脱した気泡が上昇中に、液に熱を奪われて消滅したり、また気液界面で液中の温度差による対流や、熱伝導による熱伝達の存在などによつて、飽和溶液での膜沸騰のように簡単な理論式は導き出せないとされているが、GROSSMANN⁷⁾は急冷度 H がサブクールの蒸気圧に関係するとして次式を示している。

$$\log_{10} H = -1.1543 \times 10^{-3} \cdot p - 0.4207 \quad \dots (15)$$

p : 蒸気圧 (mm Hg)

(10)式とあわせれば、 $\log_{10} \alpha$ と p は比例関係となることが導かれる。したがつて、Fig. 3 の水温が 100°C 未満の場合について水温のかわりに蒸気圧を用いて、 $\log_{10} \alpha$ との関係性を求め、Fig. 7 にプロットした。水温が下がると熱伝達率は急激に大きくなり、 80°C で約 1.5 倍となることがわかる。サブクール膜沸騰における蒸気膜は沸騰点、すなわち飽和膜沸騰の蒸気膜とほとんど変わらないとみなせるから、 100°C の熱伝達率との差、すなわち増加分が気液界面での対流などによるサブクール特有の熱伝達増加分である。このことから、サブクールの場合には液の攪拌が大きな影響を持つことが予想されよう。

4.2 鋼組成と熱伝達率の関係について

次に、鋼組成と熱伝達率との関係について考えてみ

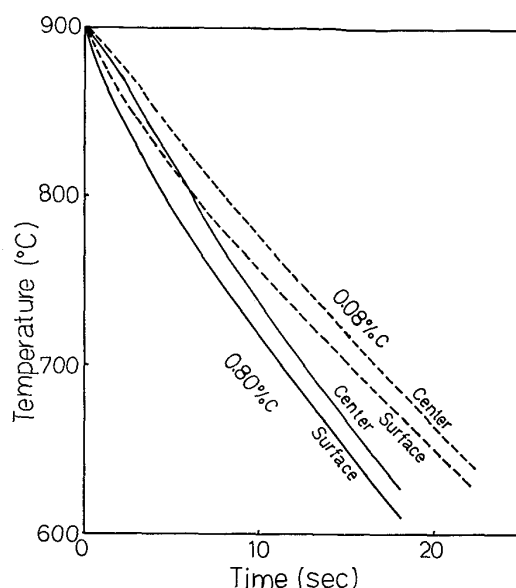


Fig. 8. Calculated cooling curves assuming α has same value, $260 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{deg}$, for two kinds of steel.

($d=10 \text{ mm}$, $T_s=100^\circ\text{C}$, $T_w=900^\circ\text{C}$, $\lambda=25.5 \text{ kcal/m} \cdot \text{h} \cdot \text{deg}$, $C=0.20 \text{ kcal/kg}$)

る。Bromley や西川・伊藤の式では、熱伝達率は材質にはほぼ無関係 (ϵ を介し間接的には効いてくるが) であつて、実測データから求めた値と比較的良好一致を示している。しかし、実際には Fig. 5 のように軟鋼は共析鋼よりも冷却速度が少し低いことが認められ、同様のことは三塚⁹⁾も示している。これらの鋼の熱伝達率 λ と比熱 C の温度による変化を比較して示した Fig. 1 から軟鋼の λ を 900°C から 650°C の平均として、 $\lambda=25.5 \text{ kcal/m} \cdot \text{h} \cdot \text{deg}$ とし、また $C=0.20 \text{ kcal/kg} \cdot \text{deg}$ とし、 $10 \text{ mm} \phi$ の線材について熱伝達率 $\alpha=260 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{deg}$ を同一として、冷却曲線を計算で求めたものが Fig. 8 である。軟鋼の冷却速度は共析鋼よりも約 20% 遅くなつており、Fig. 5 の実測した 650°C 以上での冷却挙動と同じとみなせる。したがつて炭素鋼の場合には熱伝達率は、ほぼ同じとしてもよいが、冷却速度は炭素量によつて異なつてくることになる。軟鋼の場合には冷却時に 900°C 付近からオーステナイトがフェライトに変態しはじめ、温度降下とともにしだいにその量を増してくるので、変態熱が放出される温度範囲が広く、Fig. 1 に見られるように対象とする 900°C から 650°C の温度範囲において λ , C が共析鋼の場合と異なつた挙動を示している。このことが冷却速度の差として現れていると解釈できる。

以上のように軟鋼は冷却曲線が滑らかであり、比熱や熱伝達率も共析鋼に近似し、しかも急冷実験において焼

割れが起こらないため繰り返し使用にたえるという長所があるので、冷却挙動の測定に用いることができる。しかし、上述のごとく、その冷却速度が若干異なることに注意せねばならない。

5. 結 言

温水を用いた高炭素鋼線材のパテンチング法における膜沸騰熱伝達について次の結果を得た。

(1) 熱伝達率は線径の -0.25 乗に比例し、また冷却速度は同じく線径の -1.25 乗にほぼ比例する。このことは、理論式からも導き出せる。

(2) パテンチングで重要な 900°C から 650°C 付近までの温度範囲における沸騰水中での熱伝達率は、線径 5, 10, 15 mm ϕ で、それぞれ 300, 260, 230 kcal/m² h $\cdot$ deg であり、急冷度 H で示すと、それぞれ 0.064, 0.056, 0.049 cm⁻¹ となる。

(3) 沸騰点以下の温水中での熱伝達率は、水温低下とともに著しく増大し、 80°C でほぼ 1.5 倍になる。

(4) 共析鋼のかわりに軟鋼を用いる実験において

は、変態にともなう発熱が少なく、冷却挙動の解析には適するが、冷却速度が多少低めになることに注意する必要がある。

文 献

- 1) 武尾敬之助, 前田閑一, 上瀬忠興, 岩田 斉, 里見祥明, 中田秀一: 鉄と鋼, 60 (1974) 14, p. 2135
- 2) 佐藤忠雄: 鋼の熱処理 (日本鉄鋼協会編), (1970), p. 15 [丸善]
- 3) 日本鉄鋼協会, 熱経済技術部会加熱炉小委員会報告, 特別報告書 No. 11 (1971)
- 4) 日本機械学会: 伝熱工学資料, (1976), p. 59 [日本機械学会]
- 5) 同上, 巻末物性表
- 6) 多賀谷正義, 田村今男: 日本金属学会誌, 20 (1956) 2, p. 124
- 7) M. A. GROSSMANN: Elements of Hardenability, (1952), [ASM]
- 8) 橘 藤雄, 福井資夫: Int. Heat Transfer Conf., Boulder, (1961), p. 219
- 9) 三塚正志: 第 35 回西山記念技術講座, 鋼材の冷却 (日本鉄鋼協会編), (1975), p. 117