

討14

神戸製鋼所 条鋼開発部 中村芳美, ○高橋栄治, 清水 勝
 隠岐保博, 石上 修

1. 緒言

ワイヤ, ばね, プレストレスト, コンクリート用ワイヤなどに使用される炭素鋼線材にはパテント処理が行なわれる。このパテント処理に流動層を冷却媒体として適用するために, その冷却能について調べた。本研究においては, 特に挿入物-粒子間の伝熱係数および伝熱係数を支配する諸因子について検討した。また, 流動層により熱処理された処理材の諸性質についても報告する。

2. 実験方法

実験に使用した流動槽の寸法は長さ500mm, 幅350mm, 高さ600mmであり, 整流板には耐熱性を考慮して, アスベスト帆布を用いた。流動層温度は電熱ヒーターで調節した。冷却状況を検出するために, 各試片の中央部表面にアルメル, クロメル熱電対の各測定端を10mm間隔にスポット溶接した。さらに試片冷却中, 層内の電熱ヒーターによる誘導起電力の影響を避けるため, アース線を試片端に取付けた。900℃に保ったエレマ炉に試片を入れ, この試片を900℃に加熱した後, 2分間保持してから, 所定の温度に保たれた流動層中に冷却しその冷却能を調べた。

3. 伝熱係数の算出方法

冷却媒体の冷却能力を把握する方法として, 挿入物-冷却媒体間の伝熱係数に着目し, この値により行った。この伝熱係数 α の解析方法について以下に述べる。

熱伝導の一般的方程式は次のように与えられる。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \nabla^2 T \quad a: \text{熱拡散率} \quad t: \text{時間} \quad T: \text{線温}$$

鋼線の冷却において, 無限円柱を仮定して上の方程式を変換すると,

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right)$$

一定温度 T_s に加熱された鋼線を温度 T_0 に保持された冷却媒体中で単一冷却したとして, t 時間後の鋼線表面温度 T は次の式で与えられる。

$$\frac{T - T_0}{T_s - T_0} = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{2 h R}{\mu_i^2 + (hR)^2} \exp(-\mu_i^2 \cdot a t / R^2) \quad (1)$$

ここで $h = \alpha / k_s$

α : 伝熱係数

k_s : 被冷却物の熱伝導度

R : 鋼線の半径

μ_i : 境界条件により決まる値

流動層のように, $\alpha \approx 200 \sim 800 \text{ Kcal/m}^2 \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{C}$, $R < 10^{-2} \text{ m}$ の場合には, $\pm 3\%$ の誤差範囲で方程式(1)は次のように書きかえられる。

$$\frac{T - T_0}{T_s - T_0} = \exp(-\mu_1^2 \cdot a t / R^2) \quad (2)$$

鋼においては, $a = 0.018 \text{ m}^2/\text{hr}$ (3)

一方, μ_1^2 と伝熱係数 α との間には, 各線径に対して次の関係が成立している。

$$\begin{aligned} \mu_1^2 &= 3.5 \times 10^{-4} \alpha && \text{線径: } 9.5 \text{ mm } \phi \\ \mu_1^2 &= 2.5 \times 10^{-4} \alpha && \text{線径: } 7.0 \text{ mm } \phi \\ \mu_1^2 &= 2.0 \times 10^{-4} \alpha && \text{線径: } 5.5 \text{ mm } \phi \end{aligned} \quad (4)$$

ここで α の単位は $[\text{Kcal/m}^2 \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{C}]$ である。

(2)(3)(4)式より, 伝熱係数 α をもとめる式は次のように与えられる。

$$\begin{aligned}
 a &= -3.0 \times 10^4 \log \left(\frac{T_s - T_0}{T_s - T_0} \right) / t && \text{線径: } 9.5 \text{ mm } \phi \\
 a &= -2.2 \times 10^4 \log \left(\frac{T_s - T_0}{T_s - T_0} \right) / t && \text{線径: } 7.0 \text{ mm } \phi \\
 a &= -1.7 \times 10^4 \log \left(\frac{T_s - T_0}{T_s - T_0} \right) / t && \text{線径: } 5.5 \text{ mm } \phi
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

ここで時間 t の単位は [sec] で与えられる。

しかし、(5)式はあくまでも、単一冷却を与える式であり、鋼線を 900°C から冷却する場合には、変態復熱があり、適用できない。従つて、鋼線の冷却曲線に(5)式を適用する場合には変態復熱の終了している線温 500°C を $t = 0$ 秒として、(5)式を適用した。

4. 伝熱係数におよぼす諸因子

4.1 流動層による鋼線の冷却曲線

図1はジルコサンド流動層中での $9.5 \text{ mm } \phi$ 、 $7.0 \text{ mm } \phi$ 、 $5.5 \text{ mm } \phi$ の各鋼線の冷却曲線を示したものである。参考のため、熔融鉛中での鋼線の冷却曲線も示している。

流動層中の冷却と熔融鉛中での冷却を比較した場合、流動層による冷却能力の方が熔融鉛の冷却能力に比べて小さい。したがつて、パテントイング処理で重要な

900°C から変態開始温度 ($550^\circ\text{C} \sim 650^\circ\text{C}$) までの冷却速度を熔融鉛による冷却速度と同一にするた

めには、流動層温度を線径に応じて 100°C から 300°C の間で変えなければならない。これらの冷却曲線に3.で示した算出方法を適用して伝熱係数をもとめると、ジルコサンド流動層では約 $670 \text{ Kcal/m}^2 \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{C}$ 、熔融鉛では約 $3000 \text{ Kcal/m}^2 \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{C}$ となる。なお空中放冷した場合には約 $60 \text{ Kcal/m}^2 \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{C}$ となり、流動層の冷却能力は熔融鉛と空中放冷の中間にある。

4.2 伝熱係数の流速依存性

図2は伝熱係数 α の流速依存性を示したものである。なお図2の試料はすべて 80 mesh のエメリーペーパーによって表面の圧延スケールが除去されている。最小流動化速度より約 12 cm/sec の流速まで、伝熱係数は約 300 より約 $670 \text{ Kcal/m}^2 \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{C}$ に急激に増加し、その後流速を増しても、伝熱係数に顕著な変化は見られず、ほぼ一定の値をとる。白井ら¹⁾の測定した実験結果によれば、伝熱係数は流速の増加とともに増加し、

最大値に達する。その後再び低下する傾向を示しているが、本実験の場合には、 18 cm/sec 以上の実験を行

わなかつたので、最大値をとるという現象は見い出されなかつた。また図2の実験結果は流動層温度、層高さ、鋼種、線径についても変化させ実験を行なっている。しかし、いずれの因子にも伝熱係数 α の大きな依存性は見い出されていない。

4.3 伝熱係数におよぼす表面スケールの影響

図3は圧延スケールをつけたまま実験した場合の流速に対する伝熱係数の変化について示したものである。参考のため、図2で示した圧延スケールをみがき落した場合についても図示している。圧延スケールのついたまま

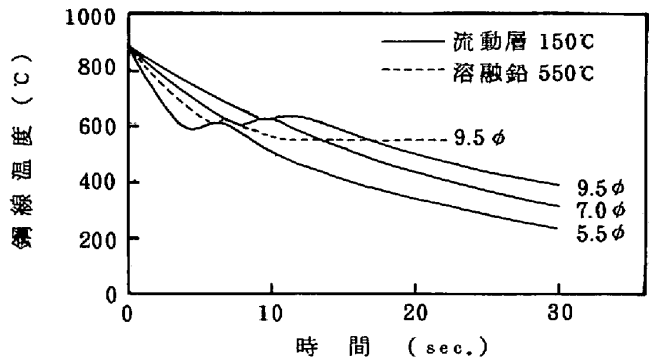


図1. 鋼線の冷却曲線

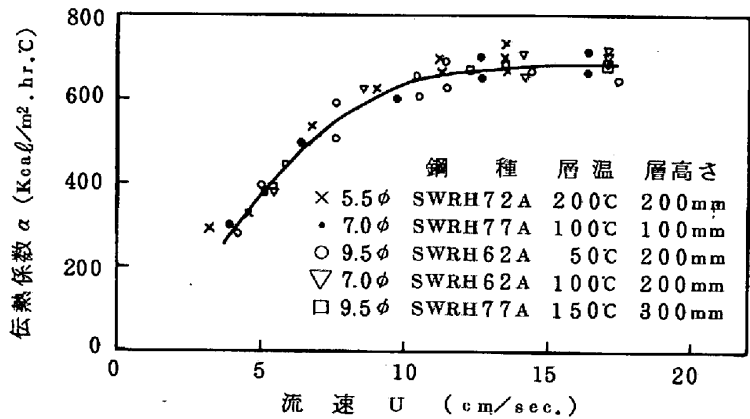


図2. 伝熱係数に及ぼす流速依存性

の伝熱係数はばらついているが、約 12 cm/sec. の流速で 500~600 Kcal/m².hr.°C の値を示しており、圧延スケールを除いた場合に比べて低下している。また伝熱係数の流速依存性については、スケールのない場合と同様、最小流動化速度より約 12 cm/sec. の流速までは急激に増加し、その後、流速を増しても一定の値をとっている。

このように表面スケールが伝熱係数に影響することについては次のように考えられる。即ち、鋼線を大気中で加熱した場合、表面スケールは粗で剝離性のよい状態を呈する。このようなスケールが生成された場合、スケールと鋼線表面間に薄い空気層が生じ、流動層によって鋼線表面が直接冷却されず、見かけ上、伝熱係数が低下すると思われる。しかし、この点に関しては実験が不十分なため今後十分検討する必要がある。

4.4 流動層高さ方向の伝熱係数の変化

図4は流動層高さ方向の伝熱係数の変化について示したものである。図より流動層底面より約 40 mm までの領域では層中心部に比べて伝熱係数が低くなっている。また、層表面部近傍においても伝熱係数低下域がみられ、その後、層外の空冷状態に遷移していく。図4は層高さ Lf = 230 mm の場合についての結果である。層高さ Lf = 330 mm と変えても伝熱係数低下域の広さに影響は見られなかった。このように層底面部で伝熱係数が低いのは、この領域では流体温度が低く、流動粒子の可動性が低下し流動粒子と鋼線表面間の熱交換量が少なくなるからであろう。また、層表面部近傍で伝熱係数低下域が見られるのは、流動層特有のバブリング現象のため、Lf 近傍では試片が層より露出したり、また Lf 以上でも砂が試片にあたるためである。伝熱係数低下域が流速依存性を示すのも以上のような理由によると思われる。

4.5 流動物質による伝熱係数の差異

伝熱係数におよぼす流動物質の影響については、Levenspiel and Walton²⁾, Dow and Jakob³⁾ 等によりまとめられている。彼等の報告から粒子径と比重が大きく作用すると予想される。本実験においてはジルコンサンド以外にアルミナ、ケイ砂、鉄粉について伝熱係数の測定を行った。表1は流動物質の物性ととも伝熱係数の値を示している。ジルコンサンドとアルミナの伝熱係数は比較的近い値を示し、またケイ砂と鉄粉とは近い値を示している。この結果より伝熱係数には粒子径が大きな因子として作用していることがわかる。一方、比重の作用については、ケイ砂と鉄粉の結果より、粒子

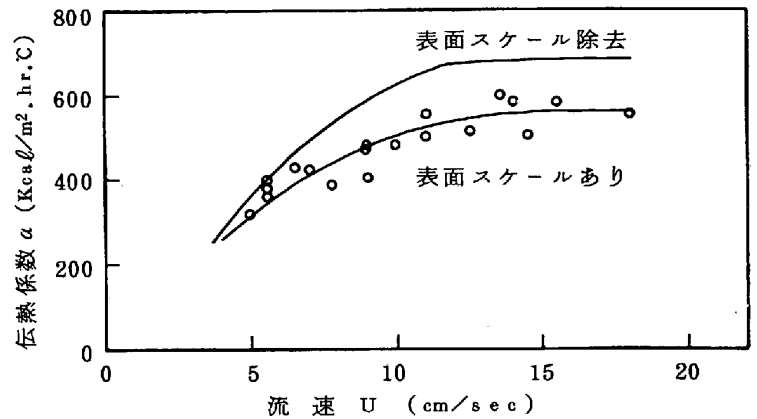


図3 伝熱係数に及ぼす表面スケールの影響

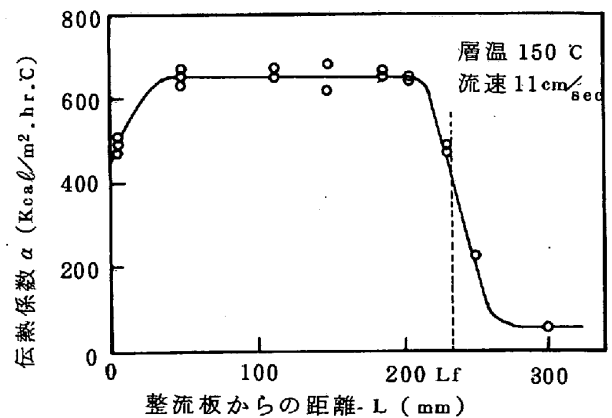


図4 伝熱係数に及ぼす層高さ方向の影響

表1. 流動物質による伝熱係数の差異

| 種類 | 性質 | 粒度 (メッシュ) | 比重 | 比熱 (Kcal/kgC) | 伝熱係数 (Kcal/m ² .hr.C) |
|--------------------------------|-----|-----------|-----|---------------|----------------------------------|
| ジルコン | サンド | 150 | 4.5 | 0.15 | 670 |
| Al ₂ O ₃ | | 150 | 4.0 | 0.17 | 620 |
| SiO ₂ | | 100 | 2.6 | 0.17 | 430 |
| Fe | 粉 | 100 | 7.9 | 0.11 | 500 |

径ほど大きな因子として作用していないが、比重が大きいほど伝熱係数は大きくなっている。ジルコンサンドとアルミナを比較した場合にも同様の現象が見い出せる。流動層をパテンティング処理に応用する場合、伝熱係数の大きい方が有利なため、これらの中ではジルコンサンドが最適である。

5. 流動層パテンティング材の性質

4で述べたように伝熱係数は流速、表面スケールによって変化する。したがって処理材の機械的性質もこれらの因子により変わることが予想される。しかし、機械的性質に直接影響する因子は冷却速度であり、流速、表面スケール以外に流動層温度も大きな因子である。

図5は引張強さにおよぼす流速の影響について、表面スケールを除去したものとそうでない場合について示している。伝熱係数が流速に依存した結果と対応して、引張強さも最小流動化速度より約12cm/sec.の流速まで増加し、その後一定の値を示している。一方表面スケールによっても伝熱係数の結果に対応して、引張強さは低下している。

図6は引張強さにおよぼす層温の影響について示したものである。層温100℃の増加に対して、引張強さが4~5 kg/mm²変化している。鉛パテンティングにおいて熔融鉛温度10℃の変化で、約2 kg/mm²引張強さが変化するのに対し、流動層の場合、温度感受性が小さく、流動層の温度均一性が良好なことから相まって処理材のばらつきが小さくなることが予想される。

図7は伝熱係数と引張強さの関係を示したものである。図よりわかるとおり、ほぼ直線関係を示し、伝熱係数100Kcal/m².hr.℃の変化に対して、引張強さで約2 kg/mm²の変化を示している。

6. 結言

以上述べたように鋼線の冷却速度を支配する因子として流動化流体の速度、表面スケール、層高さ方向の位置、流動層温度、流動粒子が上げられ、処理材の機械的性質を支配する因子として重要である。また、処理材の機械的性質については簡単に述べるにとどめたが、流動層パテンティング処理は鉛パテンティング処理に十分代り得るものであることが判明した。

7. 参考文献

- (1) T. Shirai, Kagaku Kogaku (Chem. Eng. Japan), 29, 928 (1965)
- (2) O. Levenspiel and J. S. Walton, Chem. Eng. Progr., Symp. Series, 50 (9), 1 (1954)
- (3) W. M. Dow and M. Jakob, Chem. Eng. Progr., 47, 637 (1951)

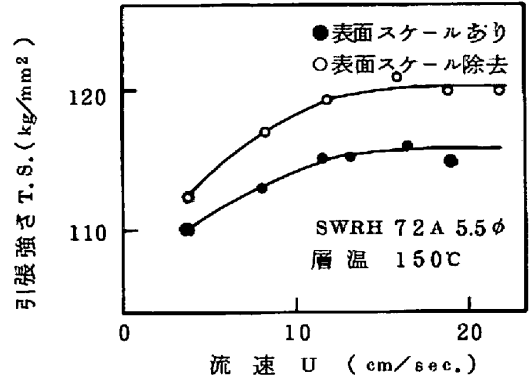


図5. 引張強さの流速依存性

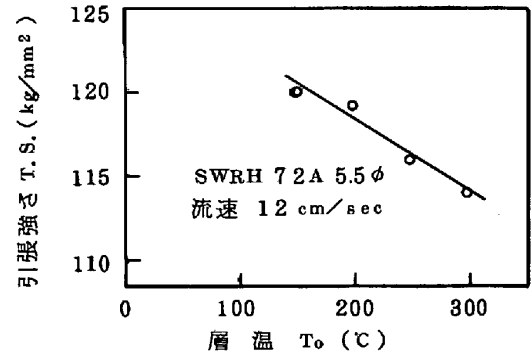


図6. 引張強さの層温依存性

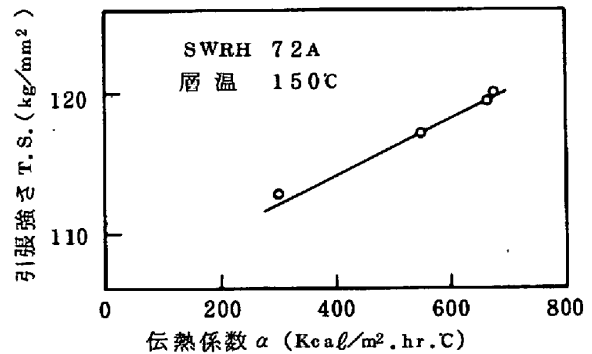


図7. 引張強さと伝熱係数の関係