

査を予備的に行つた。次に、B および H の板状素材より曲げ試験片 (4×10×60mm) を圧延方向 (L) とそれに直角方向 (T) より切出し、750~780°C, 30mn 予熱後、900~980°C (カタログの指定に準じた) に 20mn 加熱、油焼入した。加熱はすべて木炭粒中で脱炭を防止して行つた。次にこれを各温度 (油浴および塩浴) で 2 hrs 焼戻後空冷、両面を研磨して脱炭層を取除き試験に供した。曲げ試験は支点間距離 48mm とし中央集中荷重で行つた。支点および荷重点には 12φ の焼入硬化せるピンを使用した。また同時にダイヤルインジケータにより試験機の移動を測定して撓みとした。

III. 実験結果とその検討

Fig. 2 および 3 は H および B についての曲げ試験の結果である。荷重と撓みの関係は殆んど直線的であり、著しい塑性変形は認められなかつた。

950°C 焼入の場合に、H では 250°C 附近に極大が、350°C 附近に極小がある。B では 220°C 附近に極大が 300°C 附近に極小が認められる。但し、この極小は H の場合程顕著でない。但しこの極大極小の位置は焼入温度および方向により幾分異なるようである。極大までの上昇はマルテンサイトの焼戻と残留応力の減少に基くものと考えられ、極小発生の原因は山田氏等³⁾ および小柴氏等⁶⁾ のごとく、残留オーステナイトの分解と炭化物の析出によるものであろう。これに対応して硬度における変化が少いが、山田氏等³⁾ の場合のごとき 2 次硬化は殆んど認められない。

H と B を比較すれば B が若干優れていることが認められる。

また方向性の影響は明瞭であつて、L は T より 20~30% 優れている。

IV. 結 論

以上若干の熱処理条件に対する曲げ試験の結果について述べたが、抜型刃物としてこれがそのまま適用できるか否かは疑問であり、更に実用試験を行つて確める予定であるが、今迄得られた結果から次の事が結論される。

1. 材料取りの際はその方向性を充分考慮する必要がある。

2. 通常指定されている焼戻温度範囲はかなり広いがこの間に靱性の極大、極小がある。今仮りに靱性および耐磨耗性を兼ね備えた条件として (曲げ破断荷重) > 400 kg, (硬度) > HRC 62 をとれば、H に対しては 950°C 焼入、180~230°C 焼戻となり、B に対しては 920°C

焼入、150~220°C 焼戻; 950°C 焼入、155~270°C 焼戻; 980°C 焼入、150~220°C 焼戻となる。

3. B は H に較べて幾分優れている。

文 献

- 1) 市原: 日本金属学会誌 5 (昭 16), 188; 2 (昭 13), 552
- 2) G. V. Luerssen 他: Proc. ASTM 33(1933), Part II, 315.
- 3) 山田他: 日本金属学会誌 14 (1950), B, 42
- 4) 出口他: 鉄と鋼 37 (1951), No. 12, 27
- 5) 小柴他: " 38 (1952), No. 7, 37
- 6) " : " 38 (1952), No. 9, 61

(75) 鋼材の靱性と水素の挙動について (II)

(鋼中水素の拡散逸出に関する理論的考察及び靱性との関係)

Toughness of Steel and Behavior of Hydrogen in Steel (II)

(Numerical Consideration of Hydrogen Diffusion from Steel and Its Toughness)

Shuji Murayama, et alii

八幡製鉄株式会社技術研究所 工〇村 山 周 治
" 工 松 倉 亀 雄

緒 言

第 1 報において製品軌条徐冷、鋼片再熱、冷却後製品軌条再加熱等の鋼中水素を強制放出せしめる種々の手段により或いは常温放置により含有水素を自然放出せしめて鋼材の靱性、特に伸び、絞りを向上せしめ得る事を述べ種々の実験結果を報告した。本報ではこの等の実験結果および再び行つた詳細な徐冷実験で鋼材表面よりの放出ガスを測定して界面拡散係数を求め鋼材に水素拡散理論を適用して鋼材の残留水素量を計算し、上記軌条条件の真空加熱抽出法 (学振法) による測定値と Fick のガス拡散式を基礎として求めた理論計算値が一致する事を確めた。

I. 鋼材の水素拡散理論及び計算

鋼材よりのガス拡散を定量的に取扱う場合 Fick の拡散方程式を用いる現在迄発表された各報告によると境界条件の界面拡散係数を $h=\infty$ に取つた計算を行つている。しかし乍ら実験上 $h=\infty$ に取る事は適当でない

考えられるので h を実験結果より計算して厳密に解いた。更に拡散恒数と徐冷時の時間との関係を求めて拡散恒数が変化する場合の方程式を解いた。

1) 厚さ一定の平板よりのガス拡散

厚さ $2l$ の平板があり初期ガス濃度を v_0 とし両面 $x=-l$ および $x=l$ においてガス濃度 0 の外囲媒質にガス放散がある場合の平板内部のガス濃度変化を求めると、Fick の第 2 方程式より

$$\frac{\partial v}{\partial t} = D \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \quad \text{但し} \quad \begin{cases} v: \text{ガス濃度} & t: \text{時間} \\ x: \text{位置} & D: \text{拡散恒数} \end{cases}$$

境界条件 $x=l$ において $\frac{\partial v}{\partial x} = -hv_{x=l}$

$x=-l$ において $\frac{\partial v}{\partial x} = hv_{x=-l}$

初期条件 $t=0$ のとき $v=v_0$ 但し h : 界面拡散係数で解くと

$$v = v_0 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \sin \delta_n}{\delta_n + \sin \delta_n \cos \delta_n} \cdot e^{-\delta_n^2 \frac{Dt}{l^2}} \cdot \cos\left(\delta_n \frac{x}{l}\right) \quad \dots\dots\dots(1)$$

但し δ_n は $hl = \delta \tan \delta$ の n 番目の根
表面よりの放出ガス量は、

$$v_D = v_0 l \left[1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin^2 \delta_n}{\delta_n^2 + \delta_n \sin \delta_n \cos \delta_n} e^{-\delta_n^2 \frac{Dt}{l^2}} \right] \quad \dots\dots\dots(2)$$

2) 鋼材の徐冷および常温放置の際のガス放出

半径 a の無限円筒の表面よりのガス放出は

$$\frac{\partial v}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 v}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial r} \right) \quad (0 < r < a)$$

$r=a$ において $\frac{\partial v}{\partial r} = -hv$

$t=0$ のとき $v=v_0$ 但し $D=D(t)$

を解いて

$$v = v_0 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{\lambda_n} \cdot \frac{J_1(\lambda_n)}{J_0^2(\lambda_n) + J_1^2(\lambda_n)} \cdot e^{-\lambda_n^2 \frac{\int D dt}{a^2}} \cdot J_0\left(\frac{\lambda_n r}{a}\right) \quad \dots\dots\dots(3)$$

但し λ_n は $haJ_0(x) - xJ_1(x) = 0$ の n 番目の根である。 $J_0(x)$ は第 1 種零階のベッセル函数である。放出ガス量は単位長さ当り

$$v_D = \pi v_0 a^2 - 4\pi v_0 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{a^2}{\lambda_n^2} \cdot \frac{J_1^2(\lambda_n)}{J_0^2(\lambda_n) + J_1^2(\lambda_n)} \cdot e^{-\lambda_n^2 \frac{\int D dt}{a^2}} \quad \dots\dots\dots(4)$$

3) 界面拡散係数 h の決定

界面拡散係数の意義は $h=0$ の時は表面よりガスが全

然拡散しなく $h=\infty$ なる場合は表面よりガスは自由に拡散し表面濃度が常に 0 の場合である。軌条材の圧延ままの黒皮表面および切断研削表面より流動パラフィン中に捕えたガス量 (分析結果約 80% H_2) と時間との関係より (2) 式を用いて計算すると次の如くなる。

即ち $\begin{cases} \text{研削表面に対して} & h=25 \\ \text{黒皮表面に対して} & h=2.5 \end{cases}$

4) 拡散恒数

Robinson の理論より温度に対する拡散恒数は

$$D = D_0 e^{-\frac{T_2}{T}} \quad D, D_0: [\text{cm}^2/\text{sec}]$$

$T: [^\circ\text{K}]$

で表わあれ河合氏によると α 相に対して $D_0 = 3.2 \times 10^{-3}$ $T_2 = 2500$ で表わされる。従つて徐冷の際の材料の温度降下状態と関連せしめる事により時間 t に関する拡散恒数が求められる。即ち $T_0^\circ\text{C}$ の初期温度のものが冷却される場合ニュートンの冷却法則を用いて時間 t の後には $T_R = T_0 e^{-\alpha t}$ の温度となる。軌条徐冷の際の温度降下状態より係数 α を求め徐冷箱へ軌条の装入から t 秒後の拡散恒数は

$$D = 3.2 \times 10^{-3} \cdot \exp\left[-\frac{2500}{273 + T_0 e^{-3.756 \cdot 10^{-5} t}}\right] \quad [\text{cm}^2/\text{sec}]$$

で表わされる。

II. 鋼塊、鋼片、製品よりの水素放出

1) 軌条の徐冷効果

残留水素 R は

$$R = 4\pi v_0 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{a^2}{\lambda_n^2} \cdot \frac{J_1^2(\lambda_n)}{J_0^2(\lambda_n) + J_1^2(\lambda_n)} \cdot e^{-\lambda_n^2 \frac{D dt}{a^2}}$$

であり実測により $v_0 = 0.284$ [cc H_2 /cc steel] $a = 2.4$ cm で計算すると $\eta = \frac{R}{\pi a^2 v_0}$

2) 製品を常温放置の際の水素残留率

軌条のまま常温に放置する際に放出する H_2 は $D = 6.2 \times 10^{-7}$ cm^2/sec を用いて計算できる:

3) 均熱炉中で鋼塊を均熱する事に基づく水素放出
均熱温度を 1250°C とすると $D = 0.75 \text{cm}^2/\text{h}$. $a = 30$ cm

4) 鋼片を加熱炉で再加熱する事に基づく水素放出
加熱温度 1250°C $D = 0.75 \text{cm}^2/\text{sec}$ $a = 10$ cm

即ち鋼片を再加熱する事は Table 4 と徐冷の際の残留水素を比較すれば容易に了解される如く高温部で短時間式は低温部で長時間の徐冷より少し悪い位であり第 1 報での実験結果の如く再熱の効果は徐冷の如くならない事が残留水素の面より数値的に裏付けられる。

Table 1. Residual hydrogen in the rail after controlled cooling. η [%]

Initial temperature of controlled cooling	Controlled cooling period (h)									
	2	3	4	5	6	7	8	10	12	
550°C	46.2	37.6	32.4	29.1	26.8	25.3	24.3	22.9	22.2	
500°C	51.7	43.7	38.8	35.4	33.3	31.6	30.5	29.2	28.4	
450°C	58.1	50.8	46.1	43.0	40.8	40.0	38.0	36.5	35.7	
400°C	64.6	57.0	53.5	50.6	48.7	47.2	46.2	44.8	44.0	
350°C	70.8	65.1	61.2	57.8	55.4	53.8	52.4	51.6	50.4	
300°C	77.0	72.2	69.3	67.1	65.5	64.3	63.5	62.2	61.4	

Table 2. Residual hydrogen in the air-cooled rail after rolling η [%]

Number of days after rolling	1	3	7	30	90	180
Residual hydrogen in rail	91.5	81.3	66.5	25.7	2.4	0.07

Table 3. Residual hydrogen in the ingot after soaking η [%]

Soaking period (h)	2	3	4	5	6	7	8	10	12
Residual hydrogen in ingot	97.2	96.6	95.9	95.1	94.6	94.0	93.3	92.3	87.0

Table 4. Residual hydrogen in the bloom after reheating η [%]

Reheating period (h)	2	4	5	6	8	10	20
Residual hydrogen in bloom	88.1	80.5	76.7	73.6	68.2	63.1	44.7

Table 5. Hydrogen analysis of the rail head

Treatment after rolling	Number of days after rolling				
	1	3	7	30	90
Air cooling	28.4	25.9	22.0	12.2	9.0
Controlled cooling	12.0	13.2	10.6	8.9	7.0

Unit: 0.00001 weight % H₂Table 6. Numerical coincidence between measured and calculated residual diffusible hydrogen
.....For the air-cooled rail..... [weight % H]

Number of days after rolling	1	3	7	30	90
Actually measured residual diffusible hydrogen [JSPS analysis value—0.00006]	0.000224	0.000199	0.000160	0.000062	0.000030
Calculated residual hydrogen, % η	91.5	81.3	66.5	25.7	2.4
Calculated residual diffusible hydrogen when initial diffusible hydrogen $v_0=0.000245$, $v_0\eta$	0.0002241	0.0001991	0.0001628	0.000063	0.0000059

5) 学振法に基づいて行つた水素分析結果の考察
学振法に基づいて行つた水素分析法 (900°C×1.5h) に
よつて鋼塊底部の軌条頭部より切出した試料を分析した

結果は 10 チャージ平均して Table 5 次表の如くである。

試験材は次表の範囲内の中マンガ軌条である。

Element	C	Si	Mn	S	P
%	0.48~ 0.53	0.09~ 0.24	1.23~ 1.36	0.018~ 0.034	0.014~ 0.033

また一方これ等試料の圧延時よりの残留水素を理論的に計算すれば Table 2 に示した如くである。180 日或いはそれ以上経過した試料を分析した結果でも平均 $0.00006 \sim 0.00007$ 重量 % H_2 が存在しており常温においては鋼材中の空隙内に固定されているか或いは水素化合物として存在しておりそれ以上減少しないと考えられる。さすれば放出し得る水素の圧延後の各日数経過後の重量 % は空冷材について Table 6 の如くなり実測値を理論計算値とよく一致する。この関係を Fig. 1 に示す。(図省略会場で提示)

含有水素量と伸び、絞りの関係を Fig. 2, 3 に示す。(図省略会場で提示) 含有水素量と伸びおよび絞りの間には一定の函数関係がある事がうかがわれる。但し徐冷材にあつては空冷材と同一の含有水素量より定まる伸び或いは絞りよりも幾分高い値を示しているがこれは徐冷により残留応力或いは変数応力の減少が伸び、絞りの増加として影響しているものと考えられ徐冷の効果は水素の強制放出のみでない事を示している。即ち靱性に影響を与える主要因子として含有水素量が考えられ副因子として僅かであるが変態応力、残留応力が考えられる。

(76) 高周波焼入の研究 (I)

(A Study on Induction Hardening (I))

Kingo Nagaoka.

北海道立工業試験場 長岡金吾

I. 前 言

高周波焼入については多くの貴重な研究の発表があるが、最近大容量の焼入装置にも真空管方式が実用化され、その周波数が高いことと、発振方式が従来我国で主として用いられていた高周波発電機、または火花式発振機と異なるために生ずる焼入効果の相違についての研究もなされるようになった。既に、焼入組織、硬度分布、磨耗現象等については石田博士¹⁾ 小川博士²⁾ 等によつて報告されている。一方、焼入装置の加熱性能も発振方式によつてかなり影響されるものであるが、公にされた資料に乏しいので出力 75KW 真空管管式焼入装置により得た結果について報告する。

II. 装置及び試験方法

焼入装置は発振管に 8T-21 (日電製) 1 本を使用する日本電子光学研究所製 (JEH 701 型) で周波数 430K.C 主変圧器の容量 130K.V.A である。高周波発振回路は陽極同調型自働発振方式である。

加熱の条件は多くの回路素子の調整によつて変化せしむることができるが、簡単のために主として陽極電圧を必要に応じてグリッド偏倚抵抗とフィードバックコイルの結合度を変化せしめて出力を調整した。

入力装置の計器から求め、一方出力は熱量計を用いその中に加熱した試料を投下し、水温の上昇から計算によつて求めた。

III. 試験結果

加熱時間を変化し、その各々の場合にもつ試料の熱量をとると、熱量の時間的変化は Fig. 1 に示すように、

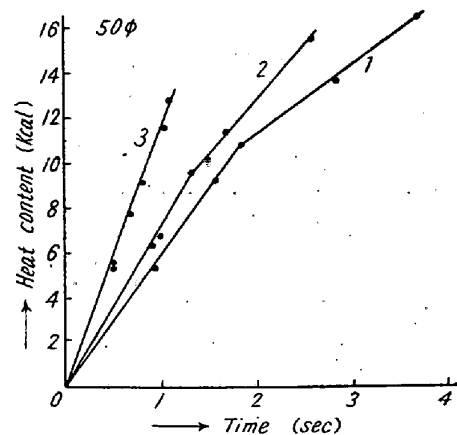


Fig. 1. Change of heat content during heating.

焼入のための加熱時間の範囲では、略々異なる傾斜の 2 直線を以て示すことができる。しかしてその折点を越えると熱量の時間的増加率即ち出力は急激に減少する。その上、下では出力を概ね一定値を以て代表させることができる。この出力の変化する点は所謂 Curie point に相当するものと考えられている点である。焼入の場合には勿論 Curie point 以下の出力が重要であるが、材料によつて焼入温度の高い場合にはその上で出力の大なることが特に必要になる。加熱条件の異なる場合には熱量曲線も変化する。図に示した如く陽極電圧を高めると、出力は増加し、これに伴つて出力が低下するに至る迄の時間も短縮される。従つて高周波焼入の出力または加熱力を考えるには、加熱条件の異なる場合に対して一定時間を以て平均を出して比較することは、その時間が各々の焼入条件においてもつ意義が異なるために適当でない。これに対しては Curie point の上、下の出力を区別して表示