

# 討12 水焼入連続焼鈍法による焼付け硬化性を有する高張力冷延鋼板の製法と特性

669.14.018.295-418.5-156: 621.785.796

日本鋼管 技術研究所 ○中岡一秀 荒木健治 金原理

## 1. 緒言

自動車業界では、安全性および軽量化による燃費軽減の観点から、高強度薄鋼板使用の気運が高まっている。使用に際しての問題点は種々あるが、その中でも大きいのが、強度が高いことからくる加工性、形状性、型かじり上の諸問題である。この諸問題の解決には、基本的には、部品の設計およびプレス技術の向上、型材、潤滑剤の改良の貢献が大きい。材料上も、もしプレス加工後、例えば塗装工程で強度が上昇する鋼板（焼付硬化性を有する鋼板）が開発されれば、これの寄与も大いに期待できる。著者らは日本鋼管、福山製鉄所で昭和46年に稼動した水焼入連続焼鈍設備の高張力冷延鋼板製造への適用に関し調査を進めてきたが、この設備を用いれば、焼付硬化性を有する高張力冷延鋼板を容易に製造できることがわかったので報告する。

## 2. 焼付硬化性を付与するための基本的考え方

焼付硬化 (Bake-Hardening, BH) は降伏点の回復をとまなう降伏応力の上昇、すなわち一種の時効現象である。したがって、焼付硬化性 (Bake-Hardenability, BH性) を付与するための基本的考え方は次のとおりである。① as annealed 状態でも降伏点が認められないか、認められたとしても軽度の調質圧延で消えるように、鋼の組織を軟質フェライト地 (相) 中に適量の硬質相 (例えばマルテンサイト) が混在する、いわゆる (2相) 混合組織にする。<sup>(1)</sup> また、この混合組織は良好な強度-延性関係をうるにも有利である。<sup>(2)</sup> ② 混合組織の場合でも大きなBH量が確実に得られるように、フェライト中に炭素を多量に固溶させる。固溶窒素の場合でもBH性が得られるが、この場合には、BH量は硬質相の体積率の影響を受けやすい。強度をうるため、硬質相の量を多くするとBH量は小さくなる。したがって、固溶元素としては窒素より炭素の方が望ましい。<sup>(3)</sup>

## 3. 水焼入連続焼鈍法による上記の考え方の具体化

水焼入連続焼鈍設備は再結晶加熱帯の後に、2000℃/sec程度の冷却速度で鋼帯を冷却できる水焼入設備を内蔵しているので、高価な元素を添加しなくても、上記の考え方を容易に具体化できる。図1に熱サイクルの一例を示す。冷圧された鋼帯は約800℃(A<sub>1</sub>~A<sub>3</sub>点間)に加熱された後、噴流水中に焼入れられる。この処理により、加熱時にオーステナイトであった部分は、添加元素なしでも、マルテンサイトへと変態し、またフェライト中には多量の炭素が固溶する。すなわち得られた鋼板の組織は、固溶炭素を多量に含むフェライト地とマルテンサイト (硬質相) よりなる所望の混合組織である。(写真1)

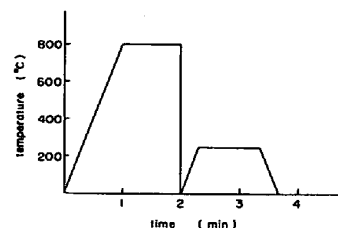


図1 高張力鋼板用の連続焼鈍熱サイクルの一例

このマルテンサイトは降伏点伸びを消し易くすることに対してだけでなく、強度付与の点でも極めて効果的である。この焼入ままの状態 (as Q材) では、調質なしでも降伏点伸びが認められず、降伏比が0.6以下と低いのが特徴である。したがって引張さが高いわりにはプレス部品に良好な形状を与えることができると考えられる。その他、as Q材は5~10 kg/mm<sup>2</sup>のBH性を有する、低歪域での加工硬化率が大きい等の特徴を有する。しかし、製品の汎用性を考えた場合、次の点が問題となる。① 出荷時点での降伏比が余りにも低い場合、BHによるその上昇分を考慮に入れても、降伏応力 (YS) - 伸び (El) 関係がバッチ焼鈍材 (BA材) よりも悪い (これについては後で改めて議論する)。② 強化元素をまったく添加せず焼入れのみで強度を付与した場合には、焼付処理により強度が低下する傾向がある。これら二つの問題点はプレスに

よる加工歪が期待できる部分では解消する。しかし、汎用性を考えた場合、これらはやはり問題であろう。

この問題点を解決するため、焼入れられた鋼帯は引続き 200℃～300℃の低温で、ごく短時間(1 min 程度)の焼戻処理を受ける。この処理によりフェライト中に固溶している炭素のかなりの部分は析出する。しかし、BHに必要な量の炭素は意識的に固溶のまま残される。転位への析出は可動転位の不動化を計る。これにより、焼鈍ままの状態でのYSが適量だけ上昇し、①の問題点は解決される。また、余剰の固溶炭素を析出させることは材質の熱的安定化、すなわち②の問題点を解決するのに役立つ。焼戻処理の作用は、一言でいえば、炭素の固溶量、析出状態を適正に制御し、BH性を確保しながら良好なYS-E $\ell$ 関係と熱的安定性を得ることである。

添加元素なしでも所望の組織を得ることはできるが、組織制御のみで良好な強度-延性関係をうることは、保証引張強さ 50 kg/mm<sup>2</sup> 以上材では困難となる。この問題を解決するため、保証強度 50 kg/mm<sup>2</sup> 以上材では要求強度に応じ適量の Si and/or P が添加される。Si, P の添加により延性が改善されるのは、混合組織鋼の強度-延性関係はフェライト地のそれに支配され<sup>(2)</sup>かつ、固溶硬化元素である Si, P の添加が、析出硬化元素の添加より、フェライト地の強度-延性関係の改善に対し好ましいからである<sup>(4)</sup>。

表1に焼入焼戻材(QT材)の材質の一例を示す。各特性のバランスがとれているうえで、10 kg/mm<sup>2</sup> 程度のBH性を有する。as Q材の材質も参考までに示す。前述のようにこの材料は降伏比が低く 0.6 以下である。

表1 QT材およびas Q材の材質の一例

処理	保証引張強さ kg/mm <sup>2</sup>	降伏応力 kg/mm <sup>2</sup>	引張強さ kg/mm <sup>2</sup>	伸び %	降伏比	BH量 kg/mm <sup>2</sup>
QT材	40	27.7	41.3	37.9	0.67	8.8
	50	37.6	52.7	30.8	0.71	10.2
	60	47.1	62.9	28.0	0.75	11.2
	70	55.1	72.5	21.8	0.76	10.5
as Q材	40	22.8	43.7	36.2	0.52	9.1
	50	29.1	53.6	29.2	0.54	9.2
	60	34.3	64.3	27.8	0.53	8.6
	70	40.2	76.8	20.4	0.52	10.9

BH条件 170℃ × 20 min

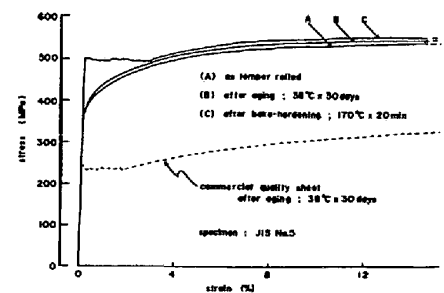


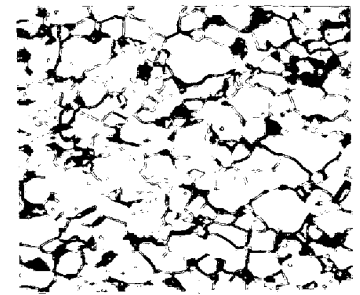
図2 QT材の促進時効処理後、および焼付処理後のσ-ε曲線

#### 4. 品質上の特徴

##### 4.1 焼付硬化性と遅時効性の共存

図2にQT材に室温時効を模擬した38℃ × 30日の促進時効処理および塗装焼付工程での熱履歴を模擬した170℃ × 20minの焼付処理を施した場合のσ-ε曲線を示す。曲線AとCの比較からわかるとおり、焼付処理により降伏応力は約10 kg/mm<sup>2</sup>も上昇する。この上昇は意図的にフェライト中に残された固溶炭素が可動転位上に析出し、可動転位を不動化することに起因する。しかし、38℃ × 30日の時効処理後でもσ-ε曲線に変化がみとめられないことから明らかなように、この材料は遅時効性を有する。

多量の固溶炭素の存在にもかかわらず歪時効が起りにくいということは興味ある現象である。高張力鋼板は外板にも用いられる可能性が大きいので、遅時効性を有するということは汎用性を考えた場合、きわめて有意義である。このBH性と遅時効性の共存が連続焼鈍により製造された混合組織を有する高張力鋼板の材質上の大きな特徴の一つである。



(×400 × 2/3)

写真1 フェライト-マルテンサイト混合組織を有する高張力冷延鋼板の組織

#### 4.2 強度-延性関係

プレス部品は必ず焼付処理を受けると考えてもよいこと、また、絞り込み部等前歪を与えられた後焼付処理を受ける部分が多くあることを考慮すれば、焼付後のYS、あるいは前歪-焼付後のYSと製品(焼付あるいは前歪-焼付前)のE $\ell$ の関係で、YS-E $\ell$ 関係を評価するのが実用的観点からは妥当であろう。図3はこのよ

うな観点で整理したYS-E $\ell$ 関係である。QT材のYS-E $\ell$ 関係は製品(前歪0, 焼付前)ではBA材と同等であるが、BH分を勘定に入れば前歪量に関係なくそれより優れたものとなる。前歪5%でBH分を考慮しなくてもQT材のYS-E $\ell$ 関係がBA材より優れているのは、この歪域では加工硬化によるYSの増加がQT材の方がBA材より大きいことが寄与したのである。as Q材との比較では全ての場合にQT材の方が優れたYS-E $\ell$ 関係を有する。as Q材のYS-E $\ell$ 関係は前歪0%では、BH分を考慮してもBA材よりやや劣る。しかし、前歪1%では両者は同等となり、前歪5%では逆にas Q材の方がBA材より

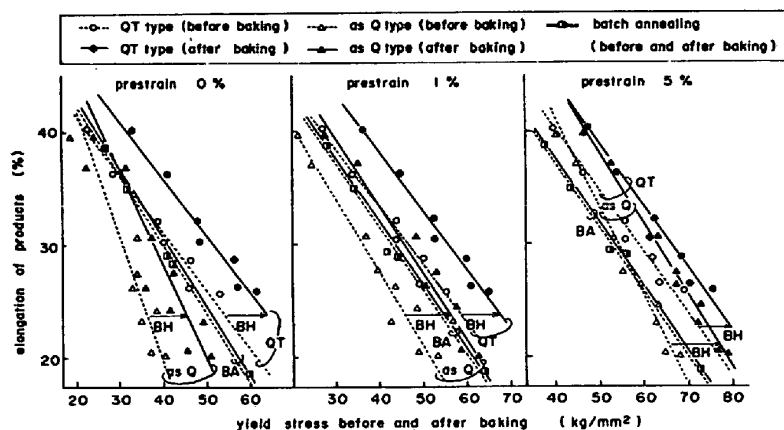


図3 QT材, as Q材, BA材のYS-E $\ell$ 関係におよぼすBH処理の有無, 前歪量の影響

優れる。このようにas Q材のYS-E $\ell$ 関係が前歪量の増加とともに向上するのは、as Q材の加工硬化率が低歪域でBA材よりはるかに大きいことに起因する。as Q材で1%以下の歪の場合には、YS-E $\ell$ 関係があまり良くないということは、実的には問題となることが多いと思われる。というのは、大ざっぱな議論ではプレス部品の強度は最も弱い部分すなわち種々の制約により加工歪が入りにくい部分の座屈に支配されるとしても大きな間違いではないと思われるからである。パネル関係では外面や内面となるほぼ平坦面の部分が、また箱型断面を有する構造部品ではlocal bucklingやcripplingを起す部材の両端から離れた側面部がこの部分に対応しよう。as Q材がその特徴を最大限に発揮するのは、部品の強度がかなりの変形を受けた部分の座屈で決定され、かつ高い形状凍結性が要求される部品に対してであろう。以上の議論より、全般的にみて、加工歪を与えられない場合でも高い降伏比が得られるQT材の方が、as Q材より使い易い材料であると結論できる。

#### 5. 焼付硬化性(BH)の効果

BHの効果、外板パネルを模擬した大きなRの円筒底を有する部品の座屈試験、および車体構造部品を模擬した角筒部品の軸方向の圧壊試験で調査した。

##### 5.1 円筒底部品の座屈

1600mm Rの円筒底を有する350mm中の部品の底部に重さ4kgの鋼球を所定の高さより落下させ、焼付前後における変形量の差、あるいは同一変形量となるための鋼球高さの差でBHの効果の評価した。座屈モードは落下高さが低い場合には鋼球をプリントした凹み(dent)であるが、ある高さ以上では底部全体が大きく凹む。このある高さのことを臨界高さ(H<sub>0</sub>)と称し、座屈強度を評価する尺度のひとつとした。他の尺度は落下高さが低い場合のdentの深さである。図4④にdentの深さで、図4⑤にH<sub>0</sub>で評価した場合のBHの効果を示す。両図は両座屈モードとも強度はだいたい(YS) × (板厚)<sup>2</sup>で整理され、BHによるYSの上昇はそのまま座屈強度の上昇に反映されることを示す。

5.2 角筒部品の軸方向の圧壊

板厚 0.8 mm, 40 mm 中の角筒部品の軸方向に静的荷重を加え、最大圧壊荷重 (Pc), 平均圧壊荷重 (Pm) の BH による変化を調査した (図 4c)。Pc はだいたい  $(YS)^{0.66} \times (\text{板厚})^2$  で整理され、円筒底部品の座屈の場合と同様、BH による YS の上昇はそのまま座屈強度の上昇に反映される。Pm については、BH の効果が明らかではないが、この理由は Pm はもともと YS ではなく、引張強さで評価されるべきものであるからである。

6. 結 言

焼付硬化性を有する高張力冷延鋼板を製造するに際しての基本的考え方は、鋼板の組織を軟質な地と硬質相からなる 2 相混合組織とし、かつ、軟質な地であるフェライト中に炭素を適量固溶させることであるが、水焼入連続焼鈍法を用いれば、これらのことは容易に実現される。高張力鋼板用の熱サイクルは変態点間温度からの噴流水中焼入、およびこれに引続く 200℃~300℃での低温短時間焼戻しで構成される。材質上の特徴は 10 kg/mm<sup>2</sup> 程度の焼付硬化性を有していること、遅時効であること、および、良好な降伏応力-伸び関係を有していることである。座屈強度が降伏応力で整理される部品に対しては、焼付硬化による降伏応力の上昇は、そのまま部品の強度上昇に反映される。

参考文献

- (1) 中岡, 荒木, 栗原: 鉄と鋼, 61 (1975) S 571
- (2) 荒木, 高田, 中岡: 鉄と鋼, 62 (1976) S 170
- (3) 栗原, 岩瀬, 荒木, 中岡: 鉄と鋼, 62 (1976) S 169
- (4) 増井, 武智: 鉄と鋼, 60 (1974) P 284

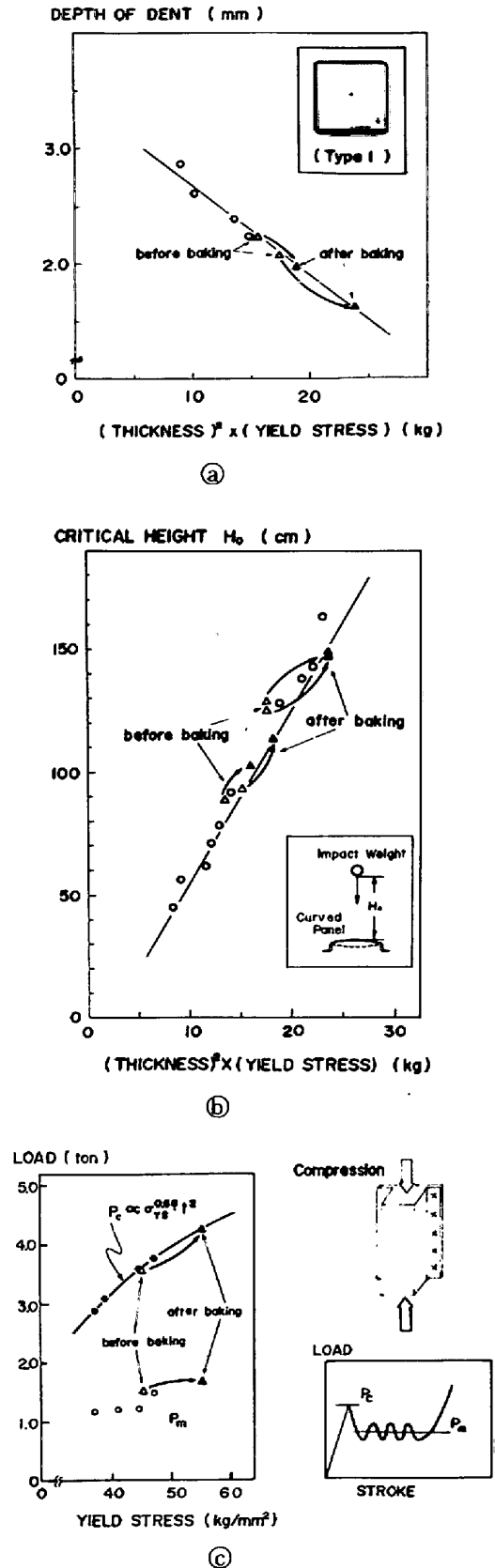


図4 各種座屈強度の増加に対するBHの寄与  
 (a) パネルのdent (b) パネルの大きな凹み (c) 角筒の圧壊