超急速短時間焼戻鋼の炭化物微細分散効果とその引張特性

都田亮典^{*1}, 山本雄紀^{*2}, 福田忠生^{*3}, 小武内清貴^{*3}, 尾崎公一^{*3}

Tensile Properties and Effect for dispersed finely cementite of QT steel using Super Rapid Induction Tempering.

Ryosuke MIYAKODA^{*1}, Yuki YAMAMOTO,
Tadao FUKUTA, Kiyotaka OBUNAI and Koichi OZAKI

^{*1} Graduate School of Okayama Prefectural University
111 Kuboki, Soja, Okayama, 719-1197 Japan

The purpose of this study is to investigate the tensile properties of super rapid tempering steel treated by high frequency induction heating method. In order to discuss the effect of tempering time on tensile properties, two types of specimens in which tempering time was different were prepared. Super rapid tempering specimen (IHT steel) was tempered for 0.35 sec by induction heating, and conventional tempering specimen (FT steel) was tempered for 3.6 Ksec by furnace tempering. While both of specimens were quenched by induction heating. These specimens were evaluated at room temperature. As a result, the both steel had almost same tensile strength. However the true stress of fracture of IHT steel was higher than that of FT steel. This result was explained by the reduction of area of IHT steel was higher than that of FT steel. The toughness of both specimens was also evaluated by the measuring area of nominal stress-nominal strain diagram. The toughness of IHT steel was 30% higher than that of FT steel. SEM observation suggested that the cementite particle of IHT steel was smaller and more finely dispersed compared to FT steel.

Key Words : Tensile Properties, Heat Treatment, Material Testing, Iron and Steel, Induction Heating

1. 緒 言

鉄鋼は安価かつ機械的性質に優れることから、幅広く用いられている工業材料である。社会の成熟に伴い、鉄本来の特性を損なうことなく、リサイクル性、環境面にも優れた高性能な材料開発が行われている。近年、希少な合金元素をなるべく添加せず、リサイクル性を考慮した鉄鋼の強化法として、高周波誘導加熱を用いた短時間熱処理が注目されている⁽¹⁾。高周波誘導加熱を用いた、加熱時間 10 sec 程度の急速短時間加熱処理による

組織制御において、焼入れでは旧 γ 結晶粒の微細化⁽²⁾、焼戻しでは析出炭化物の微細分散化が報告されている^{(3)~(4)}。一般に焼戻しは、焼入れにより高強度化した鋼のじん性を高める重要な熱処理であり、焼戻効果は加熱時間と密接な関係がある。加熱時間をより短くすることにより、鉄鋼材料のさらなる特性向上が期待される。著者らは鉄鋼材料の高強度化、高じん化を目指し、焼戻時間を 0.35 s という極めて短時間とした焼戻鋼の引張特性を検討し、炉加熱材と比べ、高い延性と高い真破断応力を示すなど強度と延性のバランスに優れていることを見出した⁽⁵⁾。本研究では、この超急速短時間焼戻鋼の引張特性について、より詳細に検討したので報告する。

^{*1} 学生員, 岡山県立大学大学院情報系工学研究科
(〒719-1197 岡山県総社市窪木 111)

^{*2} 岡山県立大学大学院情報系工学研究科

^{*3} 正員, 岡山県立大学情報工学部

E-mail: cb24026h@cse.oka-pu.ac.jp

2. 試験方法

2・1 供試材および試験片形状 供試材として表 1 に示す化学成分を有する S45C 圧延丸棒を用いた。適切な熱処理を施し調質組織とした後、図 1 に示す試験片形状に旋盤にて加工した。試験片は熱処理時における制約から、JIS 規格に準拠していない形状になっている。

2・2 熱処理条件 本研究では超急速短時間焼戻処理が鋼の引張特性に及ぼす影響を検討するため、図 2(a) に示す条件で処理した焼戻材を準備した。この材料に 0.35 s の超急速短時間焼戻しを施した。また、比較材として雰囲気炉を用いて処理した 3.6 ks の緩速長時間焼戻鋼を準備した。図 2 (b), (c) に焼戻サイクル図を示す。焼戻し後の両材の硬さが共に 550 Hv となるよう、焼戻し温度 T を決定した。試験片横断面の半径方向に、0.5 mm 間隔で硬さ測定を行い、熱処理が内部まで均一に施されていることを確認している。以下、超急速短時間焼戻材を IHT 材、緩速長時間焼戻材を FT 材とする。

2・3 引張試験 引張試験は油圧サーボ式疲労試験機（島津製、EHF-EB50KN-10L）を用い、室温環境下、引張速度 0.5 mm/min にて試験を行った。その際、定点カメラにより、試験片最小径部を 1 sec 間隔で撮影を行った。その画像をもとに、各時点の伸びおよび直径を計測してひずみおよび真応力を算出した。カメラのシャッタータイミングと荷重データの収録タイミングは同期させた。

3. 実験結果および考察

3・1 組織観察 光学顕微鏡によるナイトール腐食組織の観察により、IHT 材、FT 材とも焼戻マルテンサイト組織を示した（図省略）。図 3 に、より詳細に炭化物の析出状態を確認するため SEM にて観察した IHT 材、FT 材の金属組織を示す。両材とも主にラスマルテンサイト組織を示している。図中でも明らかなように、FT 材では粒状の炭化物が確認できるのに対し、IHT 材では炭化物がはっきりと確認できないほどに微細析出している。

3・2 引張試験 図 4 に SS 線図の代表例を示す。主軸に公称応力、第 2 軸に真応力をそれぞれ示す。既報でも報告しているとおり、IHT 材と FT 材の硬さは同一としているため、図中破線の丸で示す引張強さはほぼ同等の値を示した。一方、破断応力（公称応力）では IHT 材は FT 材より低くなったが、実線の丸で示す真破断応力で検

Table 1 Chemical composition of material. (wt%)

C	Si	Mn	P	S
0.46	0.27	0.74	0.015	0.02

Fig. 1 Configuration of specimen.

(a) quenching.

(b) IH tempering.

(c) furnace tempering.

Fig. 2 Temperature - time diagram for heat treatment.

Fig. 3 Comparison of micro structure.

Fig. 4 Stress - Strain Curves.

討すると IHT 材が FT 材に比べ高い値を示した。そこで、図 5 に引張強さ以降の真応力-真ひずみ線図を示す。ひずみ硬化曲線が重なることから、両材にひずみ硬化の傾向には差がないことが示唆される。また、図 6 に破断時の試験片プロフィールを示す。横軸は破断時最小径部（破断点）を 0 としている。破断時直径は IHT 材の方が小さく、結果、絞り値は平均で IHT 材 56.3%，FT 材 46.0%と IHT 材が高い。さらに、図示している破断部の曲率半径も IHT 材の方が小さい。これらのことから、同じ硬さであっても IHT 材の方がより高じん化しているといえる。そこで公称応力-公称ひずみ線図の面積より、簡易的にじん性を評価したところ、図 7 に示すように IHT 材は FT 材に比べ 30% 程度向上していた。

Fig. 5 True Stress – True Strain Curves.

Fig. 6 Profile of specimens.

Fig. 7 Fracture Toughness.

超急速短時間焼戻しにおいては、炭化物が成長する十分な時間がないため、図 3 に示した通り微細に分散する。言い換えると、炭化物は粗大にならず、粒界に存在する粗大炭化物が IHT 材は FT 材と比べ少なくなる。じん性には粒界に存在する粗大炭化物が影響していることが知られており⁽⁶⁾、このことが、IHT 材が強度と延性のバランスに優れ、高いじん性を示す要因であると考えられる。

4. 結 言

高周波誘導加熱による超急速短時間焼戻鋼 (IHT 材) 普通炉加熱による緩速焼戻鋼 (FT 材) について、引張試験および組織観察を行い、以下の結論を得た。

- (1) 両材ともに組織は主にラスマルテンサイト組織を示し、炭化物は FT 材に比べ IHT 材のほうが微細析出していた。
- (2) IHT 材と FT 材はひずみ硬化の傾向は同様であるが、炭化物微細分散効果により IHT 材の方が 30% 程度高いじん性を示した。

文 献

- (1) Kawasaki, K., et al., Properties of Induction Heat-treated High Strength Spring Wire, *Tetsu-to-Hagane*, Vol.71, (1985), pp.100.
- (2) Kawasaki, K., et al., Effect of Austenite Grain Size on Mechanical Properties in Spring Steel, *Tetsu-to-Hagane*, Vol.73, (1987), pp.2298-2305.
- (3) Kawasaki, K., et al., Effect of Induction Heating Tempering for Strengthening and Toughening of Spring Steel, *Tetsu-to-Hagane*, Vol.74, (1988), pp.334-341.
- (4) Kawasaki, K., et al., Characteristics of Micro-structure of Induction Heating Tempered Spring Steel, *Tetsu-to-Hagane*, Vol.73, (1987), pp.2298-2305.
- (5) Fukuta, T., et al., Tensile Properties of S45C Steel Using Super Rapid Induction Tempering, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*, Vol. 78, No. 789 (2012), pp. 632-636.
- (6) Higashiyama, H., et al., Effect of Short-time Tempering Treatment on the Resistivity to Sulfide Stress Corrosion Cracking of Steels with 70 kgf/mm² Yield Strength, *Tetsu-to-Hagane*, Vol.76, (1990), pp.167-168