論 説

UDC.669.14.018.252.3:621.785.6

高速度工具鋼の焼もどし硬さに及ぼす焼入冷却速度の影響

伊藤一夫*, 常陸美朝*, 松田幸紀*

The Effect of the Cooling Rate in Quenching on the Hardness of Tempered High-Speed Tool Steels

Kazuo Itoh, Yoshitomo Hitachi and Yukinori Matsuda

Synopsis

The hardness of quenched and tempered tool steels fluctuates with the cooling rates in quenching. Hereunder are the effect of the cooling rate on two types of high-speed tool steel, AISI M2 and the matrix alloy version of it.

(1) At lower cooling rates above 600°C the coarse carbides precipitate during quenching, so that they suppress the precipitation hardening by fine ones on tempering and reduce the hardness of tempered materials.

(2) As the cooling rate becomes lower below 550°C, the quenched matrix contains more retained austenite, whose decomposition on tempering enhances the secondary hardening and raises slightly the hardness of tempered steels. And the increment of hardness on tempering, H in Rockwell C scale, is directly proportional to the amount of retained austenite in materials as quenched, $V\gamma$ in beyond 12%, as follows: $H = 0.5V\gamma + \text{Const.}$

1. 緒 言

真空熱処理は、表面状態、熱処理変形などが他の熱処理方法に比べて格段にすぐれ、かつ、後加工の省略、操業の自動化、作業環境の良さなどのメリットがあり、広い分野で急速に普及しつつある。

最近、高速度工具鋼の熱処理についても、真空焼入れが盛んに行われ、それに伴って質量効果に関連した熱処理トラブルが多い。高速度工具鋼の質量効果については、焼もどし硬さに関して比較

的多くの報告^{1)~5)}があるがいずれも炭化物の析出が生じる比較的高温領域で検討がなされている。

著者らは、先に、熱間ダイス鋼SKD61についてベイナイト変態が生じる比較的低温度領域における冷却速度が焼もどし後の硬さに大きな影響を与えることを明らかにした。高速度工具鋼においてもこのようなベイナイト生成領域での冷却速度の影響を受けるものと考えられる。そこで、高速度工具鋼の焼もどし硬さに及ぼす焼入冷却速度の影響に関して、炭化物析出が生じる上部温度領域の影響とベイナイト変態が生じる下部温度領域の影響を明らかにするため、SKH51とそのマトリックス鋼を用いて検討を行った。

昭和57年11月25日 受付

*大同特殊鋼(株)研究開発本部中央研究所茨川研究部

Table 1. Chemical composition.

Steel	(wt%)										
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	W
SKH51	0.88	0.28	0.29	0.015	0.008	0.07	0.13	4.18	4.68	1.84	5.60
SKH51-M	0.55	0.26	0.30	0.020	0.009	0.07	0.10	4.48	3.60	0.89	1.60

2. 実験方法

2.1 供試材

供試材は、ESR 炉で 300kg 鋼塊を溶製し、圧延で $\phi 22$ に延伸したのち球状化焼なまし ($880^{\circ}\text{C} \times 1\text{hr}$ 15°C/hr 600°C 空冷) を行い、実験に供した。その化学組成を Table 1 に示す。ここで、SKH51 のマトリックス鋼を SKH51-M とした。

2.2 熱処理

熱処理はすべて電気炉（大気）で行った。焼入加熱条件は真空焼入れを想定し、塩浴炉での標準条件に対応する熱処理条件を予備実験で求め、設定した。すなわち、塩浴炉での標準条件を SKH51 は $1210^{\circ}\text{C} \times 2\text{min}$ 、SKH51-M は $1140^{\circ}\text{C} \times 2\text{min}$ とし、旧オーステナイト結晶粒の大きさと 560°C 焼もどし硬さが等価になるような熱処理条件をもとめ、SKH51 は $1190^{\circ}\text{C} \times 30\text{min}$ 、SKH51-M は $1120^{\circ}\text{C} \times 30\text{min}$ を設定した。

焼入れは Fig. 1-(a) (b) (c) に示す冷却曲線で行った。Fig. 1-(a) は真空焼入れを想定した冷却曲線を示す。その冷却速度は次に示す方法によって得た。

- (1) 油中に浸漬
- (2) $\phi 50$ のケースの中に埋込み空冷
- (3) $\phi 150$ のケースの中に埋込み空冷
- (4) 小型管状炉の中で炉冷

以降、上記(1)~(4)で焼入処理をした供試材を OQ, H1, H2, H3 と略記する。

Fig. 1-(b) は上部温度領域の影響に関する実験に用いた焼入冷却曲線を示す。焼入加熱温度から 600°C まで次に示す方法で冷却したのち油中に浸漬し焼入れを行った。

- (5) $\phi 150$ のケースの中に埋込み空冷
- (6) 小型管状炉の中で炉冷
- (7) 3°C/min の制御冷却

以降、上記(5)~(7)で焼入処理をした供試材を U1, U2, U3 と略記する。

Fig. 1-(c) は下部温度領域の影響に関する実験に用いた焼入冷却曲線を示す。焼入加熱温度から 550°C に保持した塩浴炉に浸漬し 3 分間保持したのち 150°C まで (8) 6.7°C/min , (9) 2.2°C/min , (10) 0.8°C/min で制御冷却し、焼入れを行った。以降、上記(8)~(10)で焼入処理した供試材を L1, L2, L3 と略記する。

Fig. 1. CCT diagram for various cooling curves.

このようにして焼入処理した供試材を300～700℃×1.5hr 空冷の焼もどしを2回行い実験に供した。

2.3 炭化物、残留オーステナイト

炭化物の同定は電解抽出-X線回折法によった。電解抽出は0.2NHCl水溶液中で電流密度を10mA/cm²とした定電流電解装置で行った。抽出残渣の同定と残留オーステナイト量の測定はMoK α_1 を用いたX線回折装置で行った(電圧:32.5kV, 管電流:16mA, フィルター:Zr)。なお残留オーステナイト量は次式から求めた⁷⁾。

$$V_\gamma = \frac{1}{1 + 0.78 (I_{\alpha-211}/I_{\gamma-311})} \times 100$$

ここで, V_γ : 残留オーステナイトの体積率

$I_{\alpha-211}$: α 相の(211)回折強度

$I_{\gamma-311}$: γ 相の(311)回折強度

3. 実験結果および考察

3.1 焼もどし硬さに及ぼす連続焼入冷却速度の影響

Fig. 1-(a)の冷却曲線で焼入処理した焼入焼もどし硬さをFig. 2に示す。焼入硬さはSKH51, SKH51-Mとも焼入冷却速度の低下に伴い低下する。低温焼もどし硬さは両鋼ともH1>OQ>

H2>H3であり, OQとH1で逆転する。2次硬化は450℃以上の焼もどしで生じ, 520～560℃で最高硬さを示す。最高硬さは, SKH51が焼入冷却速度の低下に伴って低くなるのに対して, SKH51-MはH1≥OQ>H2>H3でH1がOQより僅かながら高い値を示す。最高硬さが得られる焼もどし温度は, 焼入冷却速度の低下に伴って, 一旦, 低温側にずれるがその後再び高温側にずれ, 焼入冷却速度に対して逆転現象を示す。600℃以上の高温焼もどし硬さは焼入硬さと同じように, 焼入冷却速度の低下に伴って低下する。

P. Leckie-Ewingらは1000℃前後に恒温保持したのち, 551℃(1025°F)での焼もどし硬さを報告¹⁾している。この結果と本実験結果を比較すると, 恒温保持と連続冷却という熱処理方法の違いを考慮したとしても前者の方が硬さの低下は大きい。この相違は下部温度領域の影響が大きいことを示唆している。

Fig. 3に焼入状態の残留オーステナイト量を示す。残留オーステナイト量はSKH51がSKH51-Mより全体的に多いが, 焼入冷却速度に対しては同じ傾向を示す。すなわち, 焼入冷却速度が比較的大きい場合(>H1)は冷却速度の低下に伴い残留オーステナイト量は減少傾向を示し, 比較的小

Fig. 2. Effect of quench cooling rate from austenitizing temperature to 150℃ on quenched and tempered hardness.

Fig. 3. Effect of quench cooling time from austenitizing temperature to 200°C on volume fraction of retained austenite.

さい場合(<H1)は逆に増加傾向を示す。新井⁸⁾は焼入冷却速度が大きいほど残留オーステナイト量は減少するとしているが、本実験結果から焼入冷却速度に対するその生成傾向は一律に規定できないことが明かになった。

最高硬さが得られる焼もどし温度は、前に述べたように、焼入冷却速度の低下に伴い、一旦、低温側にずれ、その後再び高温側にずれるという逆転現象を示すが、この現象と Fig. 3 の残留オース

テナイトの挙動とはよく対応しており、それらは密接に関連していると考えられる。

Photo. 1 に焼入状態のミクロ組織を示す。SKH51, SKH51-M とともに焼入冷却速度に対して同様な傾向が認められる。両者とも比較的焼入冷却速度が大きい H1 には針状組織が顕著にあらわれ、かつ、旧オーステナイト粒界と粒内に分布する炭化物が多くなる。焼入冷却速度がさらに低下すると、基底は上部ベイナイト主体の組織となり、分布している炭化物も数が多く、かつ、大きくなる。H1 で針状組織が顕著にあらわれる現象は炭化物の増加と残留オーステナイトの減少に関連し、上部温度領域での炭化物の析出とそれに伴って生じるマトリックス中の合金元素の濃度低下⁹⁾に起因し、マルテンサイト変態がしやすくなった結果であると判断される。これは Fig. 1 の CCT 図において、長時間側の Ms 点が上昇していることから裏付けられる。

Fig. 4 に炭化物を同定した X 線回折チャートの一例を示す。焼入状態では SKH51, SKH51-M とともに、焼入冷却速度に関係なく、MC と M_6C しか検出されなかった。上部温度領域で析出する炭化物は、 MoC と Mo_2C で、炭化物の成長に伴って Mo_2C は MoC に変化するとされている⁹⁾が、本実験では M_2C は検出されなかった。

以上の実験結果で明らかにされたように、真空

Photo. 1. Electron micrographs of the as-quenched specimens.

Fig. 4. X-ray diffraction patterns of carbides extracted from the as-quenched specimens.

焼入れを想定した焼もどし硬さには、焼入冷却速度の大小では一律に説明できない様々な逆転現象がみられる。このような逆転現象は上部温度領域での炭化物析出の影響と下部温度領域での残留オーステナイト生成の影響が総合された結果生じたものと判断される。焼もどし硬さに及ぼすそれらの影響を明らかにするため、Fig. 1- (b) (c) に示す焼入冷却曲線を用いて解析実験を行い、上部温度領域と下部温度領域の影響について検討した。

3.2 焼もどし硬さに及ぼす上部温度領域の影響

Fig. 1- (b) の冷却曲線で焼入処理をした焼入焼もどし硬さを Fig. 5 に示す。焼入焼もどし硬さは、SKH51, SKH51-M とも焼入冷却速度の低下に伴って低くなる。その傾向は、SKH51 が OQ と U1 との間で急激に低下するのに対して SKH51-M は U1 と U2 の間で急激に低下する。この実験事実から、SKH51-M の炭化物析出は SKH51 に比べて長時間側で生じ、上部温度領域での質量効果は SKH51 より小さいと判断される。2 次硬化量も焼入冷却速度の低下に伴い小さくなり、U3 では両鋼とも 2 次硬化を示さなくなる。また、最高硬さが得られる焼もどし温度は、焼入冷却速度

Fig. 5. Effect of quench cooling rate from austenitizing temperature to 600°C on quenched and tempered hardness.

の低下に伴い低温側に移行する。

Fig. 6 に焼入状態での炭化物の面積率と残留オーステナイト量を示す。炭化物の面積率は、SKH51 が OQ と U1 の間で急増するのに対して、SKH51-M は U1 より遅い冷却で急増する。この傾向は焼入冷却速度に対する焼入焼もどし硬さの低下傾向とよく対応する。残留オーステナイト量は焼入冷却速度の低下に伴い減少する。これは、炭化物の析出とそれに伴う基地の合金元素量の減少¹⁾に起因すると考えられる。

Fig. 7 は 2 次硬化によって得られる最高硬さと焼入状態での炭化物の面積率との関係を示す。比較として OQ, H1~H3 も示す。SKH51, SKH51-M とも、最高硬さは炭化物の面積率の増加、換言すれば、焼入過程での炭化物析出の進行に伴って低下するが、その依存性は焼入方法によって異なる。すなわち、H1~H3 は U1~U3 に比べて高い値を示し、その差は焼入冷却速度の低下に伴い大きくなる。これは、焼入状態での残留オーステナイト量の多少に起因し、下部温度領域での焼入冷却速度の影響も大きいことを示唆している。

3.1 節の Fig. 2 において、最高硬さが得られる

Fig. 6. Effect of quench cooling rate from austenitizing temperature to 600°C on area fraction of carbide and volume fraction of retained austenite.

焼もどし温度は焼入冷却速度の低下に伴って低温側にずれることを述べた。これは、上記実験結果から、上部温度領域での焼入冷却速度の影響によるもので炭化物の析出とそれに伴う残留オーステナイト量の減少に起因すると判断される。

3.3 焼もどし硬さに及ぼす下部温度領域の影響

Fig. 1-(c) の冷却曲線で焼入処理した焼入焼もどし硬さを Fig. 8 に示す。焼入硬さは SKH51, SKH51-M とも焼入冷却速度の低下に伴い低下するが、焼もどし硬さは両鋼とも焼入冷却速度の順に変化しない。すなわち、2 次硬化する前の比較的低い焼もどし温度では両鋼とも $L1 \approx L2 > OQ > L3$ であるが、2 次硬化によって得られる最高硬さは SKH51 が $L1 \approx L2 > OQ > L3$ で低温焼もどし硬さと同じ傾向を示すのに対して SKH51-M は $L1 \approx L2 > L3 > OQ$ であり、OQ と L3 が逆転する。2 次硬化による硬さの増加は、両鋼とも、 $L3 > OQ \approx L1 \approx L2$ で焼入冷却速度が極端に小さい L3 が最も大きい。また、最高硬さが得られる焼もどし温度は、焼入冷却速度の低下に伴い高温側にずれる。その傾向は SKH51 より SKH51-M が大きい。600°C 以上の高温焼もどし硬さは焼入冷却速度が小さい方が、むしろ高い値を示す。

Fig. 9 に焼入冷却速度と焼入状態の残留オーステナイト量の関係を示す。残留オーステナイト量は SKH51 が SKH51-M より全体的に多いが、両鋼とも、 $OQ \approx L1 \approx L2 < L3$ であり、L2~L3 の間で著しい増加傾向を示す。

Fig. 7. Effect of area fraction of carbide as-quenched on maximum tempered hardness.

Fig. 8. Effect of quench cooling rate from 550°C to 150°C on quenched and tempered hardness.

Fig. 9. Effect of quench cooling rate from 550°C to 150°C on volume fraction of retained austenite.

Fig. 10. Relation between volume fraction of retained austenite and amount of secondary hardness.

Fig. 10 は焼入状態での残留オーステナイト量と2次硬化量の関係を示す(ここで、2次硬化量は2次硬化によって得られる最高硬さと2次硬化する前の最低焼もどし硬さとの差で標記した)。比較として、OQ, H1~H3, U1~U3 も示す。SKH51, SKH51-M も残留オーステナイト量の増加に伴い2次硬化量は増加する。その依存性は残留オーステナイト量によって異なる。すなわち、残留オーステナイト量が比較的多い場合は2次硬化に大きな影響を与える。2次硬化量の残留オーステナイト量依存性は、SKH51, SKH51-M ともほぼ

同じで、その間の関係は次式で表せる。

$$H = 0.5V_{\gamma} + C$$

ここで、H : 2次硬化量 (HRC)

V_{γ} : 焼入状態での残留オーステナイト量 (%)

C : 定数

残留オーステナイト量が比較的小さい場合は2次硬化量への影響は少ない。その分岐点は、SKH51

が約18%, SKH51-M が約13%であった。

前出の Fig. 2 において, 比較的焼入冷却速度が大きい場合に低温焼もどし硬さは逆転すること, 比較的焼入冷却速度が小さい場合に最高硬さが得られる焼もどし温度は高温側にずれることを述べた。これらの現象は明らかに下部温度領域での焼入冷却速度の影響である。とくに, 後者は残留オーステナイトに起因する⁹⁾。

以上の実験結果から真空焼入れをした高速度工具鋼の焼もどし硬さは, 上部温度領域での焼入冷却速度だけではなく, 下部温度領域での焼入冷却速度の影響も強くうけることが明らかになった。また, 焼入冷却速度に依存して, 様々な逆転現象を示す場合があるが, それは, 上部温度領域と下部温度領域での影響が総合された結果生じた現象であることが明かとなった。

4. 結 言

高速度工具鋼の焼もどし硬さに及ぼす焼入冷却速度の影響を, JIS SKH51 とそのマトリックス鋼について調べ, 次の結果を得た。

(1) 焼もどし硬さは, 上部温度領域での焼入冷却速度と下部温度領域での焼入冷却速度に強く影響される。

(2) 上部温度領域での焼入冷却速度は炭化物の析出に影響し, その低下に伴って, 焼もどし硬さ, 2次硬化量, 残留オーステナイト量は低下する。

(3) 下部温度領域での焼入冷却速度は, 主として, 残留オーステナイトの生成と安定化に影響し, その低下に伴って2次硬化温度は高温側にずれ, かつ, 2次硬化量は増加する。

(4) 2次硬化量の残留オーステナイト依存性は, 比較的残留オーステナイト量が多い場合に大

きく, それは次式で表わせる。

$$H = 0.5V\gamma + C$$

ここで, H : 2次硬化量 (HRC)

$V\gamma$: 焼入状態での残留オーステナイト量 (%)

C : 定数

以上の結果から, 高速度工具鋼の焼もどし硬さに及ぼす焼入冷却速度の影響は, 上部温度領域と下部温度領域では異なることが明らかにされた。また, 上部温度領域での焼入冷却速度の低下は焼もどし硬さに悪影響を及ぼすのに対して, 下部温度領域ではむしろ良い影響を及ぼすことが明らかにされた。したがって, 高速度工具鋼の真空焼入れにおいて, 硬さが問題となる場合は, 上部温度領域を出来るだけ早く冷却し, 下部温度領域はむしろゆっくりと冷却した方が良い結果が得られると判断される。

(文 献)

- 1) P. Leckie-Ewing and W. A. Jacobsen : Met. Trans., 1 (1970) 5, 1427
- 2) P. H. Leckie - Ewing : Metal Prog., 100 (1971) 8, 86
- 3) 浅井, 山岸, 辻淵 : 鉄と鋼, 59(1973)4, S250
- 4) 浅井, 山岸, 辻淵 : 鉄と鋼, 59(1973)4, S251
- 5) 清水 : 特殊鋼, 29 (1980) 11, 28
- 6) 小畑, 伊藤, 常陸, 松田 : 鉄と鋼, 65(1979) 4, S271
- 7) J. Durmin and K. A. Ridal : JISI, 206 (1968) 1, 60
- 8) 新井 : 熱処理, 9 (1969) 3, 71
- 9) G. A. Roberts and R. A. Gray : Tool Steels, (1980), 669, ASM