Mo系高速度工具鋼の衝撃特性におよ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 Cooling Rate in Quenching on the Charpy Impact Properties of Molybdenum High-Speed Steels

Kazuo Itoh, Yoshitomo Hitachi and Yukinori Matsuda

Synopsis

The toughness of quenched and tempered tool steels fluctuates with the cooling rates in quenching. The effect of cooling rates in quenching on Charpy impact values of two types of high-speed steel, AISI M2 and the matrix alloy version of it, is investigated. The results obtained are as follow.

(1) Charpy impact value of the matrix alloy is affected significantly by the cooling rate in quenching. As the cooling rate become lower, impact value decreases. This is caused by the carbide precipitation and bainitic transformation.

(2) In case of M2 type high-speed steel, Charpy impact value is not affected very much by the cooling rate in quenching. It is assumed that impact properties of M2 type high-speed steel is dominated mainly by the primary carbides.

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。

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るようになったが、それに伴って質量効果に関連した熱処理トラブルが発生するよ

うになってきた。しかし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¹⁻⁶⁾があるが靱性に関する報告は少なく⁶⁾、不明な点が多い。

そこで著者らは、先に、Mo系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検討し、炭化物析出が生じる上部温度領域の影響と下部温度領域の影響を明らかにした⁶⁾。引続いて、靱性におよぼす焼入冷却速度の影響を明らかにするため、JIS SKH 51 とそのマトリックス鋼を用いて衝撃特性におよぼす焼入冷却速度の影響を検討した。

昭和59年11月 9 日 受付

*大同特殊鋼(株)中央研究所

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 ($880^{\circ}\text{C} \times 1\text{h} \xrightarrow{15^{\circ}\text{C/h}} 600^{\circ}\text{C}$ 空冷) を行い、実験に供した。化学組成を Table 1 に示す。ここで、SKH 51 のマトリックス鋼を SKH 51-M とした。

2.2 熱処理および試験方法

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 SKH 51 は $1210^{\circ}\text{C} \times 2\text{min}$ 、SKH 51-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、SKH 51 は $1190^{\circ}\text{C} \times 30\text{min}$ 、SKH 51-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。その冷却曲線は次に示す方法で得た。

- (1) 油中に浸漬
- (2) $\phi 50$ ケースの中に埋込み空冷

- (3) $\phi 150$ 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) $\phi 50$ のケースの中に埋込み空冷
- (6) $\phi 150$ のケースの中に埋込み空冷
- (7) 小型管状炉の中で炉冷
- (8) 3°C/min の制御冷却

以降、上記(5)~(8)で焼入処理した供試材を U0, 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 3min 保持したのち 150°C まで次に示す冷却速度で制御冷却し焼入れを行った。

- (9) 6.7°C/min
- (10) 2.2°C/min
- (11) 0.8°C/min

以降、上記(9)~(11)で焼入処理した供試材を L1,

Table 1. Chemical composition

Steel	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	W	V
SKH 51	0.88	0.28	0.29	0.015	0.008	0.07	0.13	4.18	4.68	5.60	1.84
SKH 51-M	0.55	0.26	0.30	0.020	0.009	0.07	0.10	4.48	3.60	1.60	0.89

Fig. 1. Relation between quench cooling curves and CCT diagrams.

L2, L3 と略記する。

このようにして焼入処理した供試材を $560\sim 625^{\circ}\text{C} \times 1.5\text{h}$ 空冷の焼もどしを2回行い、実験に供した。

シャルピー衝撃試験は10R-C ノッチ試験片で行った。その形状を Fig. 2 に示す。

炭化物の同定は電解抽出-X線回折法で行った。電解抽出は0.2N HCl 水溶液中で電流密度を $10\text{mA}/\text{cm}^2$ とした定電流電解装置で行った。

炭化物の分布状態の調査は倍率が7500倍の電子顕微鏡写真(2段レプリカ)を日本レギュレー

Fig. 2. Dimension of specimen for Charpy impact test.

Fig. 3. Relation between hardness and Charpy impact values of the specimens quenched and double tempered at $560\sim 625^{\circ}\text{C}$ for 1.5h.

タ製イメージアナライザー“ルーゼックス500”で解析し、行った。走査面積は約 $5 \times 10^3 \mu\text{m}^2$ である。炭化物の粒径は円相当径で表示した。なお、解析するにあたって円相当径で $3 \mu\text{m}$ 以上の大きな炭化物は除外した。

3. 実験結果および考察

3.1 衝撃特性におよぼす焼入冷却速度の影響

Fig. 1-(a)で焼入処理した衝撃値を Fig. 3 に示す。SKH 51 の衝撃値は焼入冷却速度にほとんど影響されず、かつ、硬さ依存性も小さく、いずれの供試材(OQ~H3)とも硬さが HRC 55~66 ではほぼ一定の値(約 $2\text{kg} \cdot \text{m}/\text{cm}^2$)を示した。一方、SKH 51-M の衝撃値は焼入冷却速度の低下にともない著しく減少する。特にその低下傾向は OQ と H1 の間で顕著である。また、SKH 51 と同じように SKH 51-M の衝撃値も硬さ依存性はほとんど認められない。

衝撃破面の1例を Photo. 1 に示す。衝撃破面は両鋼とも同じような破面であったが、その中において焼入冷却速度が大きい OQ ではディンプル状の延性破面が多く認められるのに対し、焼入冷却速度が小さい H3 では擬へき開の破面が多く認められる。

Photo. 2 に焼入れ後 600°C で焼もどし処理したときのマイクロ組織を示す。旧オーステナイト粒界(以降、旧 γ 粒界と略記する)と粒内に分布する炭化物は SKH 51, SKH 51-M とも焼入冷却速度の低下にともない、数が多くなり、かつ、サイズも大きくなる。また、基地のマイクロ組織には、焼入冷却速度が比較的大きい場合、例えば SKH 51 では OQ と H1, SKH 51-M では OQ~H2 には針状組織が認められるが、焼入冷却速度がそれより小さくなると、針状組織は認められなくなる。

Fig. 4 に焼もどし状態における炭化物を同定した X線回折チャートの1例を示す。SKH 51, SKH 51-M とも焼入冷却速度ならびに焼もどし温度に関係なく焼入状態と同じ⁶⁾で、MC と M_6C しか検出されなかった。

以上の実験結果から、真空焼入れをした高速度工具鋼の衝撃特性は次のような要因に強く影響されていると推察される。

Photo. 1. Fracture surfaces of Charpy impact specimens quenched and double tempered at 560°C for 1.5h.

(1) 一次炭化物が比較的多く、焼入加熱時未溶解炭化物が多く残存する高速度工具鋼の衝撃特性は、一次炭化物の量、分布状態ならびに形態に強く影響され、焼入冷却速度の影響は小さい。また、基地の硬さの影響も小さい。

(2) 一次炭化物が少なく、焼入加熱時の未溶解炭化物が少ないマトリックスハイスのような高速度工具鋼の衝撃特性は Photo. 1 のマイクロ組織の差異から焼入冷却過程における炭化物の粒界析出に強く影響されていると推察される。また、衝撃値の硬さ依存性がほとんどないことから、基地の硬さ以外の要因、例えば、旧 γ 粒とその粒界の性状、針状組織などのミクロ的要因の影響も大きいと推察される。

以上を検討するため、Fig. 1—(b)(c)に示す焼入冷却曲線を用いて衝撃特性におよぼす上部温度領域の影響と下部温度領域の影響について解析実験

を行った。

3.2 衝撃特性におよぼす上部温度領域の影響

衝撃値におよぼす焼入冷却過程中的炭化物析出の影響を検証するため、Fig. 1—(b)の冷却曲線を用いて解析実験を行った。その結果を Fig. 5, 6 に示す。衝撃値におよぼす焼入冷却速度の影響は SKH 51 とそのマトリックス鋼である SKH 51—M では異なる。すなわち、一次炭化物が多い SKH 51 の衝撃値は、焼入冷却速度が小さくなるにしたがってわずかながら増加する傾向が認められる。その増加傾向は冷却速度が 8 °C/min より大きい場合は非常に小さい。冷却速度が 8 °C/min より小さくなると衝撃値の増加はより顕著になる。一方、SKH 51—M の衝撃値は、冷却速度が比較的大きい場合は冷却速度の低下にともない減少するが極端に冷却速度が小さくなると逆に増加し、その中

Photo. 2. Electron micrographs of the specimens quenched with various cooling modes and double tempered at 600°C for 1.5h.

Fig. 4. X-ray diffraction patterns of carbides extracted from the specimens quenched and double tempered at 650°C for 1.5h.

Fig. 5. Relation between hardness and Charpy impact value of the specimens quenched with U0—U3 and double tempered at 560~625°C for 1.5h.

Fig. 6. Effect of quench cooling rate from austenitizing temp. to 600°C on Charpy impact value.

間の冷却速度 (25°C/min, U1) で著しく低下するという複雑な現象が認められた。

Photo. 3 に衝撃破面の 1 例を示す。両鋼とも先に示した衝撃破面 (Photo. 1) に比べて延性破面が多く認められ、かつ、その割合は冷却速度の低下にともない増加する傾向が認められる。また、旧 γ 粒界と推察される破面が多く観察された。その傾向は SKH 51-M で顕著であった。

Photo. 4 にミクロ組織を示す。SKH 51, SKH 51-M とも冷却速度の低下にともなって旧 γ 粒界ならびに粒内に分布する炭化物は多くなり、かつ、大きくなる。特に、両鋼とも U1 では粒界に分布している細長い炭化物が多く認められ、SKH 51-M の衝撃値低下現象と密接に関連していることが容易に推察される。旧 γ 粒界と粒内に分布している炭化物の形状を **Photo. 5** に示す。旧 γ 粒界に分布している炭化物は主として板状であり、粒内の炭化物は主として等軸晶的な炭化物で

Photo. 3. Effect of quench cooling rate from austenitizing temperature to 600°C on fracture surfaces of Charpy impact specimens.

Photo. 4. Effect of quench cooling rate from austenitizing temp. to 600°C on microstructures of the as-quenched specimens.

Photo. 5. Morphology of carbides precipitated at grain boundary and within grain.
(Specimen No: U2)

ある。

Fig. 7, 8 に炭化物の分布状態を定量的に解析した結果を示す。炭化物の面積率は SKH 51, SKH

51-M も冷却速度の低下にともない増加する。その増加傾向は旧 γ 粒界の炭化物より粒内の炭化物の方が若干大きい。旧 γ 粒界ならびに粒内に

Fig. 7. Influence of quench cooling rate from austenitizing temp. to 600°C on carbide morphology—number and area fraction of carbide—.

Fig. 8. Influence of quench cooling rate from austenitizing temp. to 600°C on carbide morphology—mean diameter and ratio of length to width—.

分布する炭化物の数は、両鋼とも、冷却速度が比較的大きい場合はその低下にもなって増加する

が、冷却速度が小さくなると旧 γ 粒界上に分布する炭化物は逆に減少する。この現象は Photo. 4 示

されているように、炭化物がそれぞれ粗大化し、合体したことに起因すると考えられる。旧 γ 粒界上の炭化物の数が最大になるのはSKH 51が25°C/min (U1)であるのに対してSKH 51-Mが6°C/min (U2)と前者が後者より高冷却速度側である。これは、主として、未溶解炭化物の多少に起因していると判断される。炭化物サイズは、両鋼とも、冷却速度の低下にともないはじめは減少し、さらに低下すると逆に増加する傾向が認められた。その傾向はSKH 51-MよりSKH 51が大きい。未溶解炭化物が測定値に強く影響しているものと考えられる。炭化物の長短比は、旧 γ 粒界上の炭化物が1.5~2.0、粒内の炭化物が約1.2である。粒内に分布する炭化物の長短比が冷却速度の低下にともない増加する傾向が認められるが、これは炭化物が粗大化し、複数の炭化物が合体したことに起因する。旧 γ 粒界上に分布する炭化物の長短比は、比較的冷却速度が大きい場合にはその低下にともない増加するが、冷却速度が小さくなると逆に減少傾向を示す。その傾向はSKH 51よりSKH 51-Mの方が大きい。

560°C焼もどし硬さを冷却速度で整理した結果をFig. 9に示す。SKH 51の焼もどし硬さはOQとU0の間で急激に低下しているのに対してSKH 51-Mの焼もどし硬さはU1とU2の間で急激に低下する。

Fig. 9. Effect of quench cooling rate from austenitizing temp. to 600°C on tempered hardness.

以上の実験から、SKH 51-Mの衝撃値が25°C/min (U1)の冷却速度で急激に低下する原因は次のように考察される。すなわち、冷却過程で旧 γ 粒界に炭化物が板状に析出し、旧 γ 粒界が脆化する。基地に固溶しているW, Mo, Vなどの合金元素はさほど減少せず、焼もどし過程で微細な炭化物が析出し、基地を強化するため脆化した粒界が優先的に破壊し、その結果衝撃値が低下したと考察される。また、U1より早い冷却 (OQ, U0)で衝撃値が高いのは粒界脆化があまり進行していないことに起因し、U1より遅い冷却 (U2, U3)で衝撃値が高いのは、炭化物の粒界析出による粒界脆化は進行するが基地に固溶している合金元素が減少し基地の靱性が増加したことに主として起因していると考えられる。

3.3 衝撃特性におよぼす下部温度領域の影響

衝撃値におよぼすベイナイト変態の影響を検討するため、Fig. 1-(c)の冷却曲線を用いて解析実験を行った。その結果をFig. 10, 11に示す。衝撃

Fig. 10. Relation between hardness and Charpy impact values of the specimens quenched with L1~L3 and double tempered at 560~625°C for 1.5h.

Fig. 11. Effect of quench cooling rate from 550°C to 150°C on Charpy impact values.

値は冷却速度の低下にともない減少する。その減少傾向はSKH 51とSKH 51-Mとでは大きく異なる。すなわち、SKH 51の衝撃特性におよぼす焼入冷却速度の影響は小さいが、そのマトリックス鋼であるSKH 51-Mでは衝撃特性におよぼす焼入冷却速度の影響は大きく、冷却速度が低下すると衝撃値が大幅に減少する。

Photo. 6, 7にSKH 51-Mのミクロ組織と衝撃破面を示す。ミクロ組織は冷却速度の低下にともないベイナイト組織が顕著になり、衝撃破面は冷却速度の低下にともない擬へき開破面が多くなる。クラックはベイナイト組織を伝って伝播したものと推察される。

以上の実験結果から、真空焼入れをしたMo系

(a) L1 (b) L2 (c) L3

Photo. 6. Electron micrographs of SKH 51-M quenched with L1~3 and double tempered at 600°C for 1.5h.

(a) L1 (b) L3

Photo. 7. Fracture surface of Charpy impact specimens of SKH 51-M tempered at 560°C.

高速度工具鋼で一次炭化物が比較的多い高速度工具鋼では衝撃特性は、焼入冷却速度にほとんど影響されないが、一次炭化物が少ない高速度工具鋼、例えばマトリックスハイスでは焼入冷却速度に強く影響されることが認められた。特に、後者の場合は上部温度領域における旧 γ 粒界への炭化物の析出と下部温度領域におけるベイナイト変態の影響が大きい。

4. 結 言

Mo系高速度工具鋼の衝撃特性におよぼす焼入冷却速度の影響をJIS SKH 51とそのマトリックス鋼について調べた結果を得た。

(1) 一次炭化物が比較的多いSKH 51の衝撃特性は、上部温度領域での炭化物析出によって増加し、下部温度領域でのベイナイト変態によって減少するがその程度はいずれも小さく、焼入冷却速度の影響をほとんど受けない。

(2) 一次炭化物が少ないマトリックスハイスの衝撃特性は、上部温度領域での旧 γ 粒界上への炭化物の析出と下部温度領域でのベイナイト変態に強く影響され、焼入冷却速度の低下にともって大幅に低下する。

(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, S 250
- 4) 浅井, 山岸, 辻淵: 鉄と鋼, 59 (1973) 4, S 251
- 5) 清永: 特殊鋼, 29 (1980) 11, 28
- 6) 伊藤, 常陸, 松田: 電気製鋼, 53 (1982) 4, 248