Cr-Mo マルテンサイト鋼の破壊靱性におよぼす 熱処理および加工焼入の影響*

武井 英雄** 中 佐 啓治郎**

Hideo Takei and Keijiro Nakasa: The Effects of Heat Treatments and Deform-Quenching on the Fracture Toughness of Cr-Mo Martensitic Steel. The effects of conventional quenching, roll-quenching and repeat-quenching on the tensile properties and the pop-in plane-strain fracture toughness K_{IC} were investigated with Cr-Mo Martensitic steel. The results obtained are as follows:

- (1) The fracture toughness K_{IC} is increased without loss of the strength by the conventional quenching from 1150°C rather than 850°C, when the tempering temperature is lower than 400°C.
- (2) The fracture toughness K_{IC} and the tensile strength are improved by the roll-quenching from 850°C, but this effect decreases with the increase in roll-quenching temperature.
- (3) The repeat-quenching has little effect on raising K_{IC} .
- (4) The larger K_{IC} resulted from conventional quenching from 1150°C or roll-quenching from 850°C may be explained by the presence of retained austenite.

(Received August 7, 1971)

I. 緒 言

高強度材料は、微小なクラックや鋭い切欠によって脆性破壊を生じやすいので、その使用にあたっては通常の材料試験結果のほかに脆性クラック伝播抵抗の大小を表わす破壊靱性値を考慮することが必要である。したがって鋼に適切な加工および熱処理を施して、これを高強度鋼として用いる場合にも、できれば破壊靱性値を改善するような処理条件を採用することが望ましい。本研究の目的はCr-Moマルテンサイト鋼について焼入温度および焼戻温度の変化が、その破壊靱性値にどのような影響を与えるかを調べ、さらに加工焼入および繰返し焼入が、破壊靱性値の改善に役立つかどうかを明らかにすることである。

II. 試料および実験方法

1. 試料および試験片

実験に供した材料は市販のCr-Mo鋼5種(SCM 5)で、

直径32 mmの圧延材である。その化学組成をTable 1に示す。

この供試材から、鍛造によって幅32 mm、厚さ7 mm、長さ160 mmの短冊状の板を作り、それに均質化のための焼なまし(850°C, 1 hr)をしたのち、さらにFig. 1(a)に示すような3種類の処理を施した。すなわちFig. 1(a)に示すように普通の焼入および焼戻をしたもの(普通焼入材とよぶ)、Fig. 1(b)に示すようにオーステナイト状態で圧延加工したのち焼入焼戻したもの(圧延焼入材とよぶ)およびFig. 1(c)に示すように焼入を数回繰返したのち焼戻したものの(繰返し焼入材とよぶ)の3種類の試料を作った。なお、普通焼入材は試料を850°, 950°, 1050°, および1150°Cで20分間加熱してオーステナイト化したのち油焼入したものであり、圧延焼入材は試料を850°, 950°, 1050°および

** 広島大学工学部(Faculty of Engineering, Hiroshima University, Hiroshima)

* 1971年4月本会東京大会に発表

Table 1 Chemical composition of specimen (wt%)

Mark	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Fe
SCM 5	0.44	0.29	0.73	0.012	0.018	0.08	1.01	0.19	0.15	Bal.

Fig.1 Schematic diagram of three treatments: (a) conventional quenching, (b) roll-quenching, (c) repeat-quenching

1150°Cで20分間加熱オーステナイト化したのち圧延加工し、加工後直ちに油焼入して作った。そのときの圧延加工度は60%としたが1回の圧延では60%にならないので4回に分けて圧延した。その場合、加工中の温度低下を防ぐために1パス毎に炉に入れ1分間保持したのち、次の圧延を行なった。繰返し焼入材は試料を850°Cに保った塩浴中に入れて急速加熱し、3~10分間保ってから油焼入するという操作を5回または10回繰返して作った。Fig.1(a),

(b), (c)いずれの場合も焼入後は特別の場合以外はすべて200°Cで1時間焼戻した。

かくして得られた、普通焼入材、圧延焼入材および繰返し焼入材から機械加工によってFig.2(a)に示すような破壊靱性値測定用試験片とFig.2(b)に示すような引張試験片を製作した。なお破壊靱性値測定用試験片には図の如き寸法のU切欠と疲労クラックが付けてある。

2. 破壊靱性値の測定

破壊靱性値は、クラック先端の線型弾性応力場解析によって求められた、クラック伝播抵抗の大小を表わす材料定数である^{(1)~(3)}。本実験で用いた破壊靱性値の測定法は前報⁽⁴⁾で述べた方法と同じであるので、詳細は省略するが、つぎの式を用いて pop-in 平面ひずみ破壊靱性値 K_{IC} (以下 K_{IC} と呼ぶ) を求めた⁽⁵⁾。

$$(1-\nu^2)K_{IC}^2 = \sigma_{\text{pop-in}}^2 \cdot W \cdot [7.59(a_0/W)^2 - 32(a_0/W)^2 + 117(a_0/W)^3]$$

ここで $\sigma_{\text{pop-in}}$ は、pop-in が生じたときの荷重を切欠部を含む試験片の全断面積(本実験では $30 \times 5 \text{ mm}^2$)で割った公称応力、 a_0 はあらかじめつけておいたクラック長さ(U切欠長さおよび疲労クラック長さの和)、 W は試験片の幅、 ν はポアソン比である。pop-in が生ずるときの荷重は、電気ポテンシャル法によって求めた。

III. 実験結果とその考察

1. 普通焼入材と圧延焼入材の引張諸性質、硬度および K_{IC} におよぼす焼入温度の影響

SCM 5 焼鈍材を 850°, 950°, 1050° および 1150°C で 20 分間加熱してオーステナイト化したのち油焼入し 200°C で 1 時間焼戻した普通焼入材と、同様にオーステナイト化したのち同じ温度で 60% 圧延加工して直ちに油焼入し 200°C で 1 時間焼戻した圧延焼入材について、引張強さ・降伏強さ・伸びおよび硬度を求め、これらの諸性質が焼入温度の相違によってどのように変化するかを調べた。その結果を Fig. 3 (普通焼入材) および Fig. 4 (圧延焼入材) に示す。これらによると普通焼入材の引張強さ・降伏強さおよび伸びは焼入温度が 850°C から 1150°C まで変化して

Fig.2 Test pieces for (a) fracture toughness test and (b) tensile test

- (1) ASTM: *Fracture Toughness Testing and its Application*, ASTM STP 381, (1965).
- (2) ASTM: *Plane Strain Crack Toughness Testing of High Strength Metallic Materials*, ASTM STP 410, (1967).
- (3) 小林, 高井, 間庭: 金属学会会報, 8(1969), 28.
- (4) 武井, 中佐, 岡本: 金属学会誌, 35(1971), 599.
- (5) ASTM: *Fracture Toughness Testing and its Application*, ASTM STP 381, (1965), 190.

Fig.3 Effect of quenching temperature on hardness, tensile strength, yield strength and elongation of conventionally quenched steel (tempered at 200°C)

Fig.4 Effect of quenching temperature on hardness, tensile strength, yield strength and elongation of roll-quenched steel (tempered at 200°C)

もほとんど変化しないが、硬度は焼入温度が1050°Cよりも高くなると著しく減少する。また、圧延焼入材の引張強さ・降伏強さ・伸びおよび硬度は焼入温度が850°Cから1150°Cに変化してもほとんど変化しない。またこれらの値を普通焼入材のそれらと比較すると、降伏強さおよび伸びはほとんど同じであるが、引張強さは圧延焼入材の方が若干大きく、硬度は焼入温度が850°Cおよび950°Cのときには普通焼入材とほぼ同じであるが950°C以上では圧延焼入材の方が大きい。

つぎに、両材の破壊靱性値 K_{IC} が焼入温度によってどのように変化するかを調べた。その結果を Fig.5 に示す。な

Fig.5 Effect of quenching temperature on pop-in plane-strain fracture toughness of conventionally quenched and roll-quenched steels (both steels are tempered at 200°C)

お同図には参考のために、両材の引張強さもあわせて記入してある。この図によると、普通焼入材の K_{IC} は、焼入温度が高いほど大きくなっているのに対して、圧延焼入材の K_{IC} は圧延焼入温度が850°Cのときに最大であり、1050°Cで最小値を示したのち1150°Cで再び僅かに増加している。このように、普通焼入材では焼入温度を高くすると引張強さの低下なしに K_{IC} を大きくすることができるのは大変興味深い。また850°Cで圧延焼入した材料は、850°Cから普通焼入したもの比べて、引張強さはわずかに大きく、 K_{IC} は著しく大きいことがわかる。なおこのときの K_{IC} は1150°Cから普通焼入したものの K_{IC} と同程度の値である。このような圧延焼入法(一般的には加工焼入法)は成形加工と熱処理を同時に行なうことができて便利なおよそその機械的性質が優れているので有利な加工熱処理法の一つであるといわれているが⁽⁶⁾⁽⁷⁾、本実験で用いたような鋼種を焼入後200°C前後で焼戻して超強靱鋼として用いる場合にも、加工温度を適当に選べば破壊靱性値 K_{IC} を高めるための有効な手段となることがわかる。

2. 普通焼入材の引張諸性質および破壊靱性値におよぼす焼戻温度の影響

焼入温度850°Cおよび1150°Cの普通焼入材について、焼入のままのもの、200°C(1hr)焼戻したものおよび400°C(1hr)焼戻したものについて引張諸性質および K_{IC} を調べた。その結果を Fig.6 および Fig.7 に示す。Fig.6 は引張諸性質と焼戻温度の関係、Fig.7 は K_{IC} および引張強さと焼戻温度の関係をそれぞれ示したものである。これらによ

(6) 前田：鍛造焼入，日刊工業新聞社，(1967)。

(7) 塩谷，山田，樽谷：金属学会誌，31(1967)，126。

ると焼戻温度 $20^{\circ}\sim 400^{\circ}\text{C}$ では、焼戻温度が 1150°C の場合と 850°C の場合とで、降伏強さおよび伸びはほとんど差がないが、 K_{IC} は 1150°C 焼戻の試料の方がかなり大きいことがわかる。また引張強さは 200° および 400°C で焼戻した試料では焼戻温度が 850°C でも 1150°C でもほぼ同じ強さであるが焼戻しをしない 850°C から焼戻したままの試料の引張強さは 1150°C から焼戻したままの試料のそれに比べて異常に低いことがわかる。

Fig. 6 Effect of tempering temperature on tensile strength, yield strength and elongation of steels conventionally quenched from 850°C and 1150°C

Fig. 7 Effect of tempering temperature on pop-in plane-strain fracture toughness of steels conventionally quenched from 850°C and 1150°C

3. 圧延焼入材の破壊靱性値 K_{IC} におよぼす 圧延後の炉中保持時間の影響

850°C から圧延焼入したのち 200°C で焼戻した試料の引張諸性質および K_{IC} は、同じ温度で焼入および焼戻し

た試料のそれより優れているが (Fig. 5), その原因は圧延加工の影響以外には考えられない。そこで 850°C で 60% 圧延したのち (すぐに焼入しないで) 同温度に試料を 5, 10 および 30 分間保持してから油焼入すると、その室温での引張諸性質と K_{IC} が保持時間とともにどのように変化するかを調べた。その結果を Fig. 8 に示す。これによると圧延加工後炉中に 10 分間も保持すると引張強さ、降伏強さ、伸び、および K_{IC} はかなり低下することがわかる。このこと

Fig. 8 Effect of keeping time at 850°C after 60% rolling at the same temperature on tensile strength, yield strength, pop-in plane-strain fracture toughness and elongation of roll-quenched steel (tempered at 200°C)

は圧延焼入する場合には、圧延後直ちに焼入しないと圧延焼入の効果がなくなること示している。

4. 繰返し焼入材の引張諸性質と K_{IC}

鋼をオーステナイト化するに十分な温度に急熱急冷する操作を何回も繰返すと、その鋼のマartenサイト葉が非常に細かくなることが知られているが⁽⁸⁾、結晶粒界が脆性クラック伝播を妨げるように作用するのなら、このような処理は材料の K_{IC} を高めるのに効果があると考えられるので、SCM 5 について繰返し焼入を行ない、それが K_{IC} におよぼす影響を調べた。すなわち塩浴中で加熱する時間と繰返し焼入回数の組み合わせを 3 分-5 回、3 分-10 回、5 分-5 回、10 分-10 回の 4 種類とし、引張強さ・降伏強さ・伸びおよび K_{IC} を求めた。その結果によるとこのような繰返し焼入を施した材料は 850°C から普通焼入した材料と比較して前 3 者の組み合わせの場合には強度は僅かに増加するが、 K_{IC} はむしろ低下した。また 10 分-10 回の場合には強度は僅かに低下し、 K_{IC} は 850°C 普通焼入材と同程度であった。すなわち上述の如き繰返し焼入によっては、SCM 5 の K_{IC} を改善することはできなかった。

(8) R.A. Grange : Trans. ASM, 59(1966), 26.

Fig.9 は以上述べた種々の処理材のうちの代表的なものの性質を比較しやすいようにまとめて示したものである。この図から、1150°C 焼入の普通焼入材および 850°C 焼入の圧延焼入材は、850°C 焼入の普通焼入材および 850°C・3 分・10 回の繰返し焼入材に比べて強度と伸びが同程度でしかも K_{IC} が非常に大きいことがわかる。

以上のことから Cr-Mo 鋼(SCM 5)を焼入後 200°C 程度

Fig.9 Comparison of effect of various treatments on pop-in plane-strain fracture toughness, tensile strength and elongation: (a) conventionally quenched from 850°C, (b) conventionally quenched from 1150°C, (c) roll-quenched from 850°C, (d) 3 min 10 times repeat-quenched from 850°C

で焼戻しして超強靱鋼として用いるときには、1000°C 以上の高温から焼入するか、あるいは普通の焼入温度 850°C で圧延焼入すれば高強度でかつ K_{IC} の大きいものが得られることがわかる。

5. 各処理材の K_{IC} におよぼす組織、炭化物および残留オーステナイトの影響

上に述べたように、焼入温度 1150°C のときおよび 850°C で圧延焼入したとき (いずれも 200°C 焼戻し)、この材料の K_{IC} が大きくなったが、その理由を明らかにするために若干の実験と考察を行なった。

まずマルテンサイト組織の微細化の影響について調べるために種々の処理材の顕微鏡組織を観察した。その主なものを **Photo.1** に示す。同図(a)~(f)はそれぞれ、850°C から普通焼入し 200°C で 1 時間焼戻した試料(a)、1150°C から普通焼入し 200°C で 1 時間焼戻した試料(b)、850°C から圧延焼入し 200°C で 1 時間焼戻した試料(c)、1150°C から圧延焼入したのち 200°C で 1 時間焼戻した試料(d)、850°C で 10 分・5 回繰返し焼入し 200°C で 1 時間焼戻した試料(e)、850°C で圧延後炉中に 10 分間保ってから焼入した試料(f)の、それぞれ顕微鏡組織であるが、これによるとマルテンサイト葉の大きさは(e)が最も微細で、(e) (a) (c) (d) (f) (b)の順に次第に粗くなっている。一般に鋼を熱処理する場合にあまり

Photo.1 Microstructure of variously treated steels (each steel was tempered 1 hr at 200°C) (a) conventionally quenched from 850°C, (b) conventionally quenched from 1150°C, (c) roll-quenched from 850°C, (d) roll-quenched from 1150°C, (e) repeat quenched from 850°C: 10 min-5 times, (f) roll-quenched from 850°C and kept for 10 min at the same temperature ($\times 280 \times 5/6$)

高温から焼入するとオーステナイト結晶粒の粗大化をきたし、焼入性はよくなっても焼入後焼戻したときに脆くなるので、オーステナイト化温度としては炭化物が十分オーステナイト中に溶解込み、かつオーステナイト結晶粒のあまり大きくならない温度がとられる。そこでこの種の鋼の焼入温度としては普通 850°C 付近が推奨されている。しかし本実験の結果によると、焼戻温度 200°C のときには、850°C から普通焼入した試料 (a) および繰返し焼入した試料 (e) では、マルテンサイト葉が微細であるにもかかわらず K_{IC} が小さい。また 850°C から圧延焼入した試料 (c) では、マルテンサイト葉は前 2 者のそれよりも粗いが K_{IC} は大きい。さらに 1150°C から普通焼入した試料 (b) ではマルテンサイト葉が最も粗大であって、しかも K_{IC} が大きい。そして後 2 者の K_{IC} はほぼ同じ値を示している。ただ、圧延焼入温度を上昇させた場合と、圧延後炉中に保持してから焼入した場合には、いずれもマルテンサイト葉が大きくなるにつれて K_{IC} が小さくなっている。以上のように、マルテンサイト葉の大きさの変化と K_{IC} の変化との間には直接にはあまり明瞭な相関が認められないので、1150°C から焼入した場合および 850°C から圧延焼入した場合に K_{IC} が大きくなることをマルテンサイト組織の粗細のみから説明することは無理のように思われる。

つぎに炭化物の影響について考えると、850°C から普通焼入した場合 (a) と、850°C で繰返し焼入した場合 (e) には、炭化物がまだ十分にオーステナイトに溶解込んでおらず、焼入後組織中に未溶解炭化物が存在しているが、850°C から圧延焼入した場合 (b) にはこのような炭化物は見られなかった。このように処理法が異なると、炭化物の固溶の程度に差があるので、これが K_{IC} に影響していることが考えられる。この点を明らかにするために、つぎのような実験を行なった。まず試料を焼鈍後あらかじめ 1150°C に 20 分間保ち、完全に炭化物を溶解込ませてから焼入し、その後再び 850°, 950°, 1050° および 1150°C に加熱して 20 分間保ったのち油焼入した。このときには、850°C から普通焼入した場合にも、もはや未溶解炭化物はなかった。そしてこれら再焼入した試料の K_{IC} を測定し、焼鈍後そのまま各温度から焼入した試料の K_{IC} (Fig. 5) と比較した。その結果を Fig. 10 に示す。これによると両材の K_{IC} にはほとんど差がない。また圧延焼入材についても同様な実験を行なったが、やはりほとんど差がなかった。このことから 850°C から普通焼入したときおよび 850°C で繰返し焼入したときに K_{IC} が低く、1150°C から普通焼入したときおよび 850°C から圧延焼入したときに K_{IC} が大きいことを炭化物の固溶程度の差によって説明することはむづかしい。

つぎに残留オーステナイトの影響について考える。すなわちこの実験に用いた Cr-Mo 鋼は、残留オーステナイトの生成を促進する C, Cr および Mo をかなり含んでおり、とくに 1150°C 程度の高温から焼入したときには、試料に残留オーステナイトが含まれ、これが K_{IC} に影響をおよぼすことが考えられる。そこで種々の処理材について、磁気分析装置と、X 線ディフラクトメーターを用いて、残留オ

Fig. 10 Effect of prequenching on fracture toughness : one is prequenched from 1150°C before conventional quenching, another is not prequenched. The purpose of prequenching is to dissolve carbide in austenite

ーステナイト量を測定した。X 線回折で比較した反射面は $\alpha(200)$ と $\gamma(220)$ である。これらの結果によると、1150°C から普通焼入した試料および 850°C から圧延焼入した試料には、残留オーステナイトが約 10% 含まれているが、850°C から普通焼入した試料および 850°C で繰返し焼入した試料には、残留オーステナイトが 5% 程度しか含まれていない。また 1150°C から普通焼入した試料が、850°C から普通焼入した試料に比べて硬度がかなり低いこと、および圧延焼入したものの硬度がさほど大きくないことは、これらの処理材で残留オーステナイト量が多いこととよく合致している。さらに 900°C と 1000°C で鍛造焼入した 0.8% C 鋼は普通焼入材よりも多くの残留オーステナイトを含んでいること⁽⁹⁾、および AFC 77 鋼について、残留オーステナイト量が 10% 程度異なっても K_{IC} が大きく異なること⁽¹⁰⁾ が報告されている。したがって本実験のような場合には各種処理材の K_{IC} は主として残留オーステナイト量によって大きく左右されるものと考えられ、マルテンサイト葉を微細化することが K_{IC} の上昇に寄与するとしても、それは 2 次的なものではないかと思われる。

IV. 結 言

Cr-Mo マルテンサイト鋼 (SCM 5) に種々の熱処理 (普通焼入・圧延焼入・繰返し焼入; 焼戻し) を施したとき、その引張諸性質および pop-in 平面ひずみ破壊靱性値 K_{IC} がどのように変化するかを調べつぎの結果を得た。

(1) 普通焼入材については、焼戻温度が 400°C 以下のときには、焼入温度を 1150°C とすると強度を低下させないで K_{IC} を上昇させることができる。

(2) 850°C から圧延焼入することにより、引張強さおよび K_{IC} を大きくすることができる。圧延焼入温度が高くなるとその効果は少なくなる。

(3) 繰返し焼入は K_{IC} の改善にはあまり効果がない。

(4) 1150°C から普通焼入したときおよび 850°C から圧延焼入したときに K_{IC} が大きいのは、それらが残留オーステナイトを含んでいるためと思われる。

(9) 中村, 山中: 金属学会第 67 回秋期大会講演概要集, (1970), p. 211.

(10) D. Webster: Trans. ASM, 61 (1968), 816.