ひずみ時効処理された炭素鋼の疲労挙動について*

茶 谷 明 義**

On the Fatigue Behavior of a Strain Aged Carbon Steel

by

Akiyoshi CHATANI

(Faculty of Technology, Kanazawa University, Kanazawa)

The push-pull fatigue behavior of a carbon steel S45C was studied by using the annealed, prestrained and strain-aged specimens. The prestrain was 5% or 10%. The aging treatment after straining was done by heating the specimens at 100°C, 250°C or 300°C. Under these conditions, S-N curves, the temperature rise of specimens during cyclic stressing and the repeated plastic strain range were discussed. As a result, it was found that the fatigue strength of the strain-aged specimen increased by about 34% at maximum in comparison with the annealed, and that the temperature rise corresponded with the increase of the repeated plastic strain range. In addition, the sum of the repeated plastic strain range of the strain-aged specimen was smaller than that of the prestrained or the annealed.

(Received May 4, 1974)

1 緒 言

各種金属材料の機械的性質に及ぼすひずみ時効の影響については多くの研究がある。炭素鋼の場合は加工材^{1)~7)}の疲労強度とひずみ時効の関係も研究され、ひずみ時効処理によって疲労強度は増加することが知られている。^{8)~15)}

しかし、焼なましから加工と加熱に至る処理によって生ずる疲労挙動の相違は、単に S-N 曲線に基づいて研究されることが多く、繰返し応力下の変形挙動から研究されたことはきわめて少ない。ひずみ時効は溶質原子の拡散と析出によるとされているが、このような時効現象と疲労挙動との関係は巨視的にも微視的にも複雑で、必ずしも明らかではないのが現状である。すなわち時効処理によって生ずると考えられる Fe_3C 、 Fe_2C 、 Fe_4N などの微視的析出物の析出状態は加熱温度と時間によって異なり、再結晶温度の高温加熱の場合には光学顕微鏡によっても認められる程度に組織が変化する。析出物が疲労強度に及ぼす影響は充分明らかではないが、疲労過程では時効処理によって生じた析出物が繰返しすべりにより分解する可能性があるために、ひずみ時効処理条件が疲労挙動に及ぼす影響は複雑である。^{13) 22)}

そこでまず巨視的観点から、できるだけ単純な条件

のもとでひずみ時効処理のみの影響を明らかにするため、通常の光学顕微鏡による組織変化がほとんど認められない範囲の加熱処理を行なうこととした。本研究では、市販の機械構造用炭素鋼 S45C を用い、あらかじめひずみ時効処理条件と機械的性質の関係を調べ、焼なまし材、引張塑性ひずみを与えた加工材およびその加熱処理材の引張圧縮疲労試験を行なった。ついで S-N 曲線、温度上昇や繰返し塑性ひずみ幅などに基づき、疲労挙動に及ぼすひずみ時効処理の影響を考察した。

2 実験方法ならびに実験材料

2・1 ひずみ時効処理によるかたさ変化

本実験に用いた S45C の化学組成は Table I に示してあるように、5 元素の組成はいずれも規格値を満足するものである。まず、この材料の加熱温度と時間によるひずみ時効の程度を知るために、納入状態の引抜き丸棒材より直径 16 mm、高さ 16 mm 短円柱を作製した。これを 800°C 30 min 真空焼なましした後約 10% 圧縮してグリセリン中で所定の時間加熱し、ビッカースかたさ (荷重 20 kg) の増加量 ΔH_V を測定し

Table I. Chemical compositions (weight %).

C	Si	Mn	P	S
0.47	0.28	0.75	0.027	0.023

* 原稿受理 昭和49年5月4日

** 正会員 金沢大学工学部 金沢市小立野

た. 真空焼なまし後のかたさ H_V は160, 10%圧縮後のかたさは192である.

Fig. 1はその結果を示したもので, 圧縮変形後の加熱時間 t による組織上の変化は, 倍率約400倍の光学顕微鏡によってはほとんど認められなかった. このかたさ変化の測定結果より, 加熱温度が250℃で時間が10 min以上ではひずみ時効によるかたさの増大はほぼ飽和し, 100℃ではひずみ時効が進行中と考えられる. 300℃加熱の場合は, かたさ測定のみからみて過時効の状態にある. 以下の本実験では, 塑性変形によるひずみ時効を促進させるため, これら3種類の加熱温度を採用した.

Fig. 1. Change of Vickers hardness by aging.

Fig. 2. Microscopic structure (×400, nital etching).

参考までに, Fig. 2は800℃で30 min 焼なまししたときの顕微鏡組織を示したもので, 硝酸アルコールで軽く腐蝕してある.

2.2 試験片

定変位形の三精式繰返し引張圧縮疲労試験機を用い, Fig. 3に示すような試験片A, Bによって疲労試験を行なった. この試験機の繰返し速度は毎分1500回である. 試験片AはS-N曲線の作成と温度上昇の測定に用い, 平行部を有する試験片Bはひずみゲージによる繰返し塑性ひずみ幅の測定に用いた.

前項のかたさ変化の測定結果を参考として, 試験片を800℃で30 min 真空焼なましした後, 最小断面部

Fig. 3. Specimens.

の直径変化の測定によりあらかじめ設定した5%あるいは10%の引張塑性ひずみを与えたものを準備した. これらをただちにグリセリン中で所定の温度に10 minまたは20 min 加熱後空中放冷し, ひずみ時効処理を行なった. 実験に供した材料は合計7種類で, これらの機械的性質をTable IIに示してある. ただしこの表の結果はすべて試験片Aによるものである. 100℃で加熱処理したものの荷重と伸びの関係は予ひずみを与えたままのものとほとんど重なり明りょうな降伏点を示さないが, 250℃と300℃の場合は降伏荷重が増大して明りょうな上下降伏点を示した. しかし, この上下降伏点の差は焼なまししたものよりは小さい.

なお, 説明の都合上, 焼なましした試験片を焼なまし材, 引張塑性ひずみを与えたものを加工材, 加工材を加熱してひずみ時効処理したものを時効材と呼ぶことにする.

Table II. Mechanical properties.

	Yield strength σ_Y (kg/mm ²)	Tensile strength σ_B (kg/mm ²)	Vickers hardness H_V (20)	Fatigue strength (kg/mm ²) at $N_f = 5 \times 10^6$
Annealed mat.	35.6*	62.4	160	19.5
5% strained	51.3**	65.5	188	20.5
10% strained	61.6**	68.8	199	22.5
5% 100℃ 10min strain aged	51.2**	65.6	192	20.5
5% 250℃ 10min strain aged			195	23.0
10% 250℃ 20 min strain aged	68.7*	69.3	215	25.0
10% 300℃ 20 min strain aged	70.1*	72.1	220	26.5

* Lower yield point, ** 0.2% proof stress

3 実験結果ならびに考察

3.1 引張圧縮疲労強度

焼なまし材と加工材のS-N曲線を示したのがFig. 4である. 図中焼なまし材の黒丸印は試験片Bによるもので, 疲労限度と時間強度ともに, 試験片AとBとの間にほとんど差異が認められない.

Fig. 5は各種時効材のS-N曲線を示したものであ

Fig. 4. S-N curves (the annealed specimen and the strained).

Fig. 5. S-N curves (the strain aged specimen).

る。300℃で過時効処理をした時効材の場合が疲労強度は最も大きく、ついで10% 250℃ 20 min 時効材、5% 250℃ 10 min 時効材となり、これらは焼なまし材はもちろん加工材よりも明らかに上側にある。しかし、5% 100℃ 10 min 時効材の場合は、Fig. 4と比較すれば、焼なまし材よりわずかに疲労強度の増加があるが5%加工材の場合との区別はほとんどみられない。なお、加工ひずみが小さい場合には疲労強度が焼なまし材に比較してわずかに減少することがある¹⁶⁾。これは、加工による組織変化に原因して加工材が強化される効果と加工によるすべり帯の応力集中に原因して強度が低下する効果が相殺するものと考えられ、本実験の5%加工材の場合も同種の現象と考えられる。

以上の結果に基づいて、焼なまし材に対する加工材および時効材の疲労強度の増加割合 $\Delta\sigma/\sigma$ と破断繰返し数 N_f との関係を求めたのがFig. 6である。ほぼどの場合も $N_f < 10^6$ では疲労強度の増加割合は破断繰返し数とともに増加して $N_f \approx 10^6$ で最大となり、と

Fig. 6. Increase of fatigue strength of the strain aged specimen in comparison with that of the annealed.

くに10% 300℃ 20 min 時効材では約34%、10% 250℃ 20 min 時効材では約30%にも達する。なお、これら両時効材を加工材と比較すれば300℃加熱の場合には約17%、250℃の場合で約11%の疲労強度の増加があることになる。

X線の測定によれば、一軸の引張加工材では表面に圧縮残留応力が発生するが、疲労強度の増加に対するこの寄与量はきわめて小さい¹⁸⁾。また本実験に用いた試験片Aによる加工材と時効材では、軸方向に不均一変形するために、表面とその近傍には巨視的な意味でも圧縮残留応力の発生が考えられる。しかし、試験片A、Bによる結果にほとんど差異がないことや、後述の温度上昇などから考えて、初期に存在する残留応力の影響はきわめて小さいであろう。すなわち、時効材では、塑性変形と加熱処理による結晶組織の変化によって疲労強度が増加するものと考えられる。

3・2 疲労強度と機械的性質の関係

Table II に示したように、本実験材料は加工および加熱処理によって静引張試験による機械的性質が変化する。そこで、引張強度 σ_B 、かたさ H_V 、降伏強度 σ_Y のそれぞれの増加割合を $\Delta\sigma_B/\sigma_B$, $\Delta H_V/H_V$, $\Delta\sigma_Y/\sigma_Y$ としてこれらと疲労強度の増加割合 $\Delta\sigma/\sigma$ の関係を示せばFig. 7のようになる。時効材の場合、静的性質を示す σ_B , H_V , σ_Y が増加すれば疲労強度もほぼ対応して増加していることがわかる。しかしひず

Fig. 7. Relations between the increase of fatigue strength and that of static mechanical properties.

み時効処理によって、かたさは約15%、降伏強度は約40%増加しても、この疲労強度の増加に対する寄与はきわめて小さく、5%を超えないようである。この理由としては、前項で述べたように加工によるすべり帯の応力集中に原因した効果がひずみ時効処理による強化効果を減ずることが考えられ、この効果が静的性質よりも疲労強度に敏感に現われているためであろう。加工材の場合は2種類の結果であるが、時効材の場合に類似するようである。

3・3 応力繰返しによる温度上昇

Fig. 8は疲労試験中における試験片表面の温度上昇値 ΔT と繰返し数 N の関係を例示したものである。 ΔT は室温 (16~20)°C との差を示し、試験片の最小断面部に銅-コンスタンタン熱電対を固定して測定されたものである。焼なまし材、加工材、時効材ともに破断直前の温度変化の傾向は同様に急激になるが、この領域以外では各材料に明らかな相違が認められる。すなわち、焼なまし材では応力繰返しの初期で発熱が大きく温度上昇はほぼ飽和し、時効材では飽和することなく破断直前まで徐々に温度が上昇する。加工材の場合は両者の中間にあるようで、高応力側のものは焼なまし材の傾向に近く、低応力側のものは時効材の傾向に近い。 $N_f > 10^6$ における疲労限度近辺の応力繰返しによってもわずかに温度上昇が認められたが (2~3)°C の範囲であった。もちろん各材料とも応力が大きければ温度上昇値も大きい。

Fig. 8. Increase of temperature during cyclic stressing.

このような温度上昇が疲労強度に与える影響は未検討のため不明であるが、炭素鋼では 100°C 程度の温度における疲労強度は室温の場合に比較してほとんど低下しないので、温度上昇の影響を無視することにする。

Fig. 9は焼なまし材と各種時効材について、ほぼ同一の $N_f (= 2 \sim 2.5 \times 10^4)$ の場合の温度上昇の傾向を示したもので、前述の傾向はより明らかである。破断繰返し数に対する繰返し数比が約50%までは、ひずみ時効処理の程度が大きいものほど温度上昇は小さく、

Fig. 9. Increase of temperature (the strain aged specimen, $N_f = 2.0 \sim 2.5 \times 10^4$).

応力繰返しの後期では時効材の温度上昇は焼なまし材の場合より大きくなる。

各材料の温度上昇の傾向の相違は繰返し応力下のすべり量の相違に関係し、時効材では焼なまし材に比較して後期にすべりが増加するものと思われる。このことは後述する。

3・4 繰返し塑性ひずみ幅

試験片の温度上昇は繰返し応力下のすべりすなわち繰返し塑性ひずみと密接な関係にある。そこで、試験機のループ (荷重計) のひずみゲージと試験片に貼付したひずみゲージとからシンクロスコープを用いて Fig. 10のような応力とひずみの関係を測定し、これから繰返し塑性ひずみ幅 $\Delta \epsilon_p$ を求めた。この場合、試験片 A ではひずみゲージがはく離しやすいため試験片 B を用いた。測定にあたっては $(2 \sim 10) \times 10^3$ 回の応力繰返しによってひずみゲージがはく離するごとに試験機の運転を中止してひずみゲージを貼り換え、24hr 放置した後運転を再開した。このような測定によって得られる S-N 曲線は連続運転したものに比較してわずかに右寄りとなるが、塑性ひずみ幅の傾向を論ずるうえではさして支障にならないであろう。

Fig. 10. Schematic repeated stress-strain curve.

Fig. 11~13は $\Delta \epsilon_p$ と繰返し数 N の関係を示したもので、いずれの結果も Fig. 7の温度上昇の傾向にはほぼ一致している。しかし Fig. 11の焼なまし材では、応力繰返しの初期に繰返し塑性ひずみ幅が極大となり、破断直前までやや減少する傾向を示す。この傾向は温度上昇の場合に明らかに現われていない。測定温度が試験片塑性変形部分からの発熱と試験片自身から空中への放熱あるいはチャック部への放熱によるもので

Fig. 11. Repeated plastic strain range (the annealed specimen).

Fig. 12. Repeated plastic strain range (the strained specimen).

Fig. 13. Repeated plastic strain range (the strain aged specimen).

あることによる。このように繰返し塑性ひずみ幅が増加後減少するのは、応力繰返しによって軟化後硬化することを示し、硬化によって材料が強化されることを示すものと考えられる。

すべりが転位の運動によるものとするれば、焼なまし材に比較して一般に加工材では可動転位密度が大きく、そのため繰返し初期で生ずる微小な塑性変形は加工材のほうが焼なまし材より大きいであろう。このことは、ほぼ同一破断繰返し数の両材料の $\Delta\epsilon_p$ を比較すれば認められるようである。同様に加工材と時効材を比較すれば、時効材のほうが $\Delta\epsilon_p$ は小さい。これは加熱

処理によって時効材の可動転位密度が減少するためであろう。

なお、応力は試験機の構造上 $\Delta\epsilon_p$ が増加すればわずかに小さくなるが、その大きさは 1 kg/mm^2 以下であった。

つぎに、Manson-Coffin の式に基づき、 $\Delta\epsilon_p$ と N_f の関係を考察すれば次のようになる。

すなわち、 α を 0.5 に近い定数として

$$\Delta\epsilon_p N_f^\alpha = \text{Const} \quad (1)$$

を変形すれば、

$$\Delta\epsilon_p N_f^\alpha = \Delta\epsilon_p N_f \times N_f^{\alpha-1} = (\sum \Delta\epsilon_p) \times N_f^{\alpha-1} = \text{Const} \quad (2)$$

となる。本結果では $\Delta\epsilon_p$ は一定にならないから、上式の繰返し塑性ひずみ幅の総和 $\Delta\epsilon_p$ と N_f の関係を両対数方眼紙上に示せば Fig. 14 のようになる。測定結果が少ないため必ずしも明りょうではないが、大体の傾向としては、同一破断繰返し数に対する繰返し塑性ひずみ幅の総和は焼なまし材の場合が最も大きく、ついで加工材となり、時効材が最も小さいことになる。また(1)式の定数 α の値は、本実験の範囲では、焼なまし材、加工材、時効材の順に大きくなるようで、とくに時効材ではほぼ一定の約 1 になる。しかしこのような結果についてはなお検討が必要と思われる。

Fig. 14. Relation between $\sum \Delta\epsilon_p$ and N_f .

4 結 言

代表的な時効性材料 S45C の引張圧縮試験を行ない、焼なまし材、加工材およびその加熱処理による時効材の S-N 曲線、温度上昇、繰返し塑性ひずみ幅に関する諸結果を比較検討した。加工は 5% と 10% の引張塑性ひずみで、加熱温度は 100℃, 250℃, 300℃ の範囲についての実験である。そのおもな結果を要約すれば次のようになる。

(1) 加工と加熱のひずみ時効処理によって疲労強度は増加する。とくに 10% 加工後、250℃ および 300℃ で 20 min の時効処理を行なったものは疲労強度が大きく増加する。焼なまし材に対するその疲労強度の増加割合は繰返し数によって異なるが、最大は 250℃ およ

び 300℃でそれぞれ約30%および34%にも達する。

(2) 試験片の温度上昇の傾向は焼なまし材と時効材で相違する。前者では応力繰返しの初期に温度は大きく上昇してその後寿命の大部分ではほぼ一定となり、後者では温度は破断に至るまで徐々に上昇し、加工材では両者のほぼ中間にある。

(3) 焼なまし材では応力繰返しによって軟化後硬化するが、加工材と時効材では硬化しない。

(4) 試験片の温度上昇の傾向と繰返し塑性ひずみ幅の変動傾向はほぼ対応する。

(5) 焼なまし材に比較して、時効材では繰返し塑性ひずみ幅の総和は小さく、加工材はその中間にある。

なお、本研究の遂行にあたって実験に協力された森川 功、磯田繁雄、小原由幸の諸氏および田上繁技官に感謝する次第である。

(昭和48年11月22日 シンポジウム「疲労における最近の諸問題」にて講演)

参 考 文 献

- 1) Edwards, C. A., “軟鋼の組織と性質”, 渡辺, 高橋訳 p. 79 (1963) コロナ社
- 2) 川崎 正, 材料, **13**, 445 (1964).
- 3) 添野 浩, 塑性と加工, **11**, 367 (1970).
- 4) 桜井忠一, 川崎 正, 泉 久司, 金属学会誌, **23**, 219 (1959).
- 5) 西野知良, 金属学会誌, **26**, 420 (1962).
- 6) Cottrell, A. H., and B. A. Bilby, Proc. Phys. Soc. **62A**, 49 (1949).
- 7) Hundy, B. B., J. Iron and Steel Inst., **178**, 34 (1954).
- 8) 加藤容三, 広瀬素尚, 材料強度学会誌, **5**, 11 (1970).
- 9) 上田太郎, 田中政夫, 材料, **7**, 613 (1958).
- 10) 川田雄一, 中沢 一, 機械学会論文集, **23**, 190 (1957).
- 11) 桜井忠一, 川崎 正, 北 幸純, 機械学会論文集, **23**, 489 (1957).
- 12) Levy, J. C., and S. L. Kaniitkar, J. Iron and Steel Inst., **199**, 296 (1961).
- 13) Kettunen, P. O., J. Iron and Steel Inst., **202**, 209 (1964).
- 14) Levy, J. C., Metallurgia, **56**, 71 (1957).
- 15) Wilson, D. V., Phil. Mag., **22**, 643 (1970).
- 16) 佐藤四郎, 角田正蔵, 福井伸二, 清野次郎, 材料, **14**, 389 (1965).
- 17) 真武友一, 材料, **16**, 732 (1967).
- 18) 林 建吉, 土居俊一, 材料, **19**, 1075 (1970).
- 19) 石橋 正, “金属の疲労と破壊の防止”, p. 30 (1967) 養賢堂
- 20) 佐々木茂美, 松村 誠, 材料, **18**, 637 (1969).
- 21) Klesnil, M., and P. Lukáš, J. Iron and Steel Inst., **205**, 746 (1967).
- 22) Wilson, D. V., and B. Mintz, Acta Met., **20**, 985 (1972).