塩浴室化処理鋼の疲労強度

Fatigue Strengths of Liquid-Nitrided Steels

浅 見 克 敏*

Katsutoshi Asami

塩浴室化処理として最も広く用いられているタフトライド処理について、その疲労強度に影響する種々の外的要因ならびに強化機構の解説を行う。

1. はじめに

窒化処理には多くの方法があるが、ここでは塩浴室化処理として最も広く用いられているタフトライド処理⁽¹⁾を取り上げ、その疲労特性について簡単に解説する。なお、タフトライド処理により鉄鋼の疲労強度が向上することはすでによく知られている^{(1),(2)}ので、本解説では、(1)疲労強度に影響する外的要因と、(2)タフトライド処理による強化機構と言った観点から述べる。

2. 疲労強度に影響する外的要因

2-1 処理後の冷却方法

570℃の塩浴で窒化処理後、一般に水、油あるいは大気中で冷却される。これら冷却方法による疲労強度への影響をみたのが図1である。材料はS15Cで、試験片は板厚4mmの平板平滑材である。タフトライド処理時間は90分で、処理していない素材（非処理）の結果も付記した。図1より水冷材の疲労強度が最も高く、次いで油冷材、空冷材の順に低くなるのがわかる。したがって、処理後

の冷却は水冷がよいと言える。なお、次章でくわしく述べるが、冷却方法の影響の程度は疲労破壊が生じる起点の位置によって若干異なり、水冷と油冷で差のない場合もある。しかし、実用上は水冷を用いておくのが疲労強度の面では妥当であろう。

2-2 処理時間⁽²⁾

塩浴中に保持される時間、いわゆる処理時間の影響を疲労限度（ 10^7 回繰返し後も破断しない50%確率の疲労強度）についてみたのが図2である。材料はS15C、試験片は直径6～18mmの丸棒平滑材、冷却はすべて水冷である。

処理時間が長くなるほど疲労限度は高くなり、特に短時間処理で効果が著しい。なお、試験片の直径によって効果の程度は異なり、直径が小さいほど効果は顕著である。しかし、ある程度以上処理時間を長くすると疲労限度の向上は止まり、一定値となってしまふ。

2-3 寸法⁽²⁾

試験片の寸法による影響をみるため、図2の結果を試験片の直径で整理し直したのが図3である。非処理材に比べ、タフトライド処理材の寸法効果は著しく、処理時間の長いもののほど顕著なことがわ

* 武蔵工業大学 助教授
〒158 東京都世田谷区玉堤 1-28-1
☎ 03-703-3111

* Musashi Institute of Technology.
28-1, Tamazutsumi, 1-chome, Setagaya-ku,
Tokyo 158

かる。したがって、処理時間の選定に際しては部品の大きさによる配慮が必要と言える。

2-4 切欠き^{(3), (4)}

機械部品は切欠き部を持つことが多く、そのため応力集中によって疲労強度は一般に低下する。そこで丸棒材に種々の環状切欠きを付け、疲労強度を検討したのが図4である。^{*} 図4は疲労限度と応力集中係数（この値が大きいほど切欠きが鋭い）の関係を示してある。非処理材では当然ながら応力集中係数が大きくなるほど疲労限度は低くなる。

しかし、タフトライド処理材では、応力集中係数が1.1~1.4の鈍い切欠材の疲労限度は平滑材（応力集中係数が1）よりも高く、その傾向は処理時間の長いほうが著しい。これはタフトライド処理をより有効に用いる面で非常に興味ある現象と言え、鈍い切欠きを付けるほうが平滑にするより有利なことを意味している。

しかし、切欠きの程度が鋭くなれば図4から明らかなような切欠材の疲労限度は平滑材より低下する。切欠きを付けることが有益であると言っても程度問題であることは注意しておきたい。なお、このような現象が生じた理由については次章で述べる。

2-5 平均応力⁽⁵⁾

平均応力を受ける場合の影響をみたのが図5である。材料はS15C、処理時間は90分、冷却は水冷である。^{**} 図5より引張平均応力は疲労限度を低下させるのがよくわかる。

特に、引張平均応力が20 kgf/mm²以

^{*} 材料はS15C、処理時間は10分および90分、冷却は水冷である。

^{**} 試験片は板厚5mmの平板平滑材である。

図1 冷却方法の影響（S-N曲線）

図2 疲労限度に及ぼす処理時間の影響

図3 疲労限度に及ぼす寸法の影響

上になると疲労限度の低下が著しくなることは実用上注意すべきである。浸炭材など他の表面硬化材でも引張平均応力による疲労強度の低下は著しく、これは表面硬化材の一般的な特徴と言える。

図4 疲労限度に及ぼす切欠きの影響

図5 疲労限度に及ぼす平均応力の影響
(疲労限度線図)

2-6 負荷様式^{(2), (6), (7)}

実際の機械部品において負荷される荷重の種類は様々である。ここでは回転曲げ、平面曲げおよびねじりの3種類を取り上げ、負荷様式の差が疲労強度に及ぼす影響を調べた。その結果を表1に示す。

材料はすべてS15C、処理時間は10分、90分および180分、冷却は水冷である。試験片は回転曲げが直径6mmの丸棒平滑材、平面曲げが板厚6mmの平板平滑材、そしてねじりが直径6mmの丸棒平滑材である。材料、処理条件、試験片寸法などがほぼ同一になるよう考慮して比較した。

表1より、回転曲げと平面曲げの疲労限度はほとんど同一とみなせる。また、ねじりではせん断応力となるため、回転曲げや平面曲げの半分の値になっている。このように三者の差は少なく、負荷様式の影響はほとんどないことがわかる。

2-7 炭素量^{(2), (8)}

2-1～2-6ではすべて低炭素鋼(S15C)の結果であった。そこで各種炭素鋼における疲労強度を調べ、炭素量の影響についてみる。S15C～S55Cにタフトライド処理した場合の疲労限度を表2に示す。各炭素鋼ともタフトライド処理前の熱処理はすべて焼なましである。処理時間は10分、90分および360分で、冷却は水冷とした。試験片は直径10mmの丸棒平滑材である。

表2より炭素量の相違は疲労限度にほとんど影響しないと言える。したがって、炭素鋼の焼なまし材をタフトライド処理して用いる場合、疲労強度の面からは鋼種にこだわる必要はないと考えられる。

2-8 窒化前の熱処理⁽⁹⁾

鋼種によってはタフトライド処理する前に熱処理をして用いる場合もある。ここでは一般的によく用いられているCr-Mo鋼・SCM435についてその点を調べてみた。タフトライド処理前の熱処理としては焼なまし、焼入れおよび焼入焼もどし(焼もどし温度600℃)の3種類とした。得られた結果を表3に示す。

処理時間は300分、冷却は油冷である。試験片は直径8mmの丸棒平滑材である。表3よりタフトライド処理前の熱処理の相違は疲労限度に大きな

差異をもたらすことがわかる。特に、焼入れのみにおいて効果は最も顕著であり、省エネルギーの面からもタフトライド処理を後でする場合には焼もどしは不必要と言える。

3. タフトライド処理による強化機構

タフトライド処理鋼の疲労強度は種々の因子に影響されるが、前章では実用上重要と考えられる外的要因の幾つかを取り上げて簡単に述べた。本章ではタフトライド処理により疲労強度が向上する強化機構ならびにこの強化機構に基づき前章の諸結果が生じた理由を説明したい。

タフトライド処理鋼の断面組織、硬さ分布および残留応力分布を模式化して示すと図6のようである。組織的には、窒化物からなる化合物層、その下の窒素が過飽和に固溶されたりあるいは窒化物として析出している拡散層およびタフトライド処理の影響を受けていない心部の三相から成り立っている⁽¹⁰⁾。

化合物層の硬さは表面付近はポーラスになるために見掛上やや低い⁽¹¹⁾が、全体的には鉄窒化物でHV700~800、クローム窒化物でHV1000~1200とかなり高い⁽¹¹⁾。拡散層では化合物層直下が最も硬く、心部にいくほど硬さは低下し、やがて素材の硬さに一致する。

拡散層の硬さ自体は鋼種や処理時間によって異なり、窒素が過飽和に固溶されている炭素鋼⁽²⁾(S55C以下)の化合物層直下でHV200~400である。窒素を固溶し、かつ窒化物としても析出している低合金鋼⁽⁹⁾ではHV400~600、高合金鋼⁽¹¹⁾ではHV800~1000になる。心部の硬さに一致するところ、すなわち硬化深さは処理時間が長くなるほど大となる。

一方、残留応力であるが、現在のと

ころ化合物層についてはその縦弾性係数が不明なため明らかでない。しかし、ひずみなどからみて残留応力値は非常に少ない⁽¹⁰⁾と考えられている。拡散層の残留応力は処理後の冷却方法によって異なり、一般的には水冷した場合に最も大きな圧縮残留応力を有する⁽¹⁰⁾。

たとえば、水冷の化合物層直下の拡散層は-30

表1 疲労限度に及ぼす負荷様式の影響

負 荷 様 式	疲 勞 限 度 (kgf/mm ²)		
	10 分 処 理	90 分 処 理	180 分 処 理
回 転 曲 げ	32.4	45.4	52.8
平 面 曲 げ	37.0	44.0	49.0
ね じ り	19.0	22.0	24.0

表2 疲労限度に及ぼす炭素量の影響

材 料	疲 勞 限 度 (kgf/mm ²)		
	10 分 処 理	90 分 処 理	360 分 処 理
S 15 C	29.4	35.1	43.9
S 25 C	33.5	39.2	45.1
S 45 C	31.5	37.5	41.0
S 55 C	33.2	39.2	41.3

表3 疲労限度に及ぼす窒化前の熱処理の影響

窒 化 前 の 熱 処 理	疲 勞 限 度 (kgf/mm ²)
焼 な ま し	44.8
焼 入 れ	77.1
焼 入 焼 も ど し	71.6

～45 kgf/mm²であり、油冷⁽¹²⁾や空冷⁽¹⁰⁾は－5～10 kgf/mm²と少ない。そして、心部にいくほど少なくなり、拡散層と心部の境界で圧縮残留応力から引張残留応力へと変わる。心部では中心に向かって引張残留応力が徐々に増大するが、その値自体はそれほど大きくない。なお、このような残留応力分布の傾向は処理時間や試験片寸法によりあまり変化しない。

以上の組織、硬さ、残留応力などがタフトライド処理による疲労強度の向上に関与し、向上因子としては、(1)化合物層^{(13),(14)}、(2)拡散層^{(15),(16)}、(3)圧縮残留応力の存在^{(10),(12)}が指摘される。さらにタフトライド処理鋼では図6の硬さ分布（疲労後）に示すように繰返し応力により試験片内部にかなりの加工硬化⁽²⁾が生じる。この、(4)繰返し応力による加工硬化、も疲労強度向上の因子⁽²⁾となる。

これら4因子を考慮し、曲げ応力あるいはねじり応力が負荷される場合の平滑材における疲労破壊の様相を模式化すると図7のように表わされる。このモデルは表面硬化材一般にも適用できるように簡略化してある。したがって、4因子をより詳細に考慮した場合には若干修正すべき箇所もあるが、大略このように考えて問題はない。

図7より、平滑材の場合には試験片寸法に対する硬化層の割合によって、破壊起点の位置ならば疲労限度は異なってくることがわかる。すなわ

図6 塩浴窒化材の組織、硬さ分布および残留応力分布のモデル図

図7 表面硬化剤の疲労破壊モデル（平滑材の場合）

ち、図2や図3に示したように処理時間を長くする、あるいは試験片の寸法を小さくすると疲労限度が高くなるのは、図7(a)から図7(b)や(c)に移行するためであり、処理時間や寸法が疲労限度に著しく影響する理由がこの図7からよく理解できる。そして、寸法の小さな試験片に長時間の処理をしても、それ以上疲労限度が向上しないことも図7(c)から理解される。

一方、切欠材の場合には負荷応力分布に応力集中の影響を考慮することで、図7の平滑材と同様その疲労破壊の様相は図8のように模式化できる。図8より、切欠材では破壊起点が一般的には試験片の表面になることがわかる。また、図7(a)と図8を比べれば、平滑材より切欠材の疲労限度のほうが高くなる場合のあることも理解できる。ただし、図8における切欠材の疲労限度は応力集中を考慮した真の疲労限度である。

一般に切欠材の疲労限度は応力集中がないものとした呼称応力で示す。そのため呼称応力で表わした前述の図4では、応力集中の程度の小さい鈍い切欠材においてのみ平滑材よりもその疲労限度が高くなった。なお、平滑材が図7(a)や(b)ではな

く、図7(c)の状況にあれば呼称応力で表わされる場合の疲労限度は当然平滑材より切欠材のほうが低くなる。

ここで図7と図8に再び注目すると、タフトライド処理による疲労強度向上を支配している前述の4因子は、破壊起点の位置によってその寄与の程度に差が生じることに気がつく。たとえば、図7(a)や(b)のように試験片内部が破壊の起点となる場合には、破壊起点付近に圧縮残留応力はほとんど存在せず、疲労強度向上に残留応力はほとんど寄与しない。また、試験片の表面にある化合物層も寄与しない。この場合には拡散層および繰返し応力による加工硬化が疲労強度向上に主に寄与する。

一方、図7(c)あるいは図8のように試験片表面が破壊の起点となる場合には、化合物層や表面付近の圧縮残留応力は疲労強度向上にある程度寄与する。そして、化合物層直下の拡散層の強度(硬さ)や圧縮残留応力の大小が疲労強度を強く支配し、寄与の程度にも影響する。その際、拡散層深さや繰返し応力による加工硬化は破壊起点を試験片内部から表面に移行させるといった副次的な寄与になる。

以上の諸点に関しては、図7や図8の各条件において表面の化合物層を除去した実験^(13, 14)や冷却方法を変えることにより圧縮残留応力の大小を異ならせた実験^(15, 17)によって確認されている。

そこで、この破壊起点に基づく観点から図1に示した冷却方法の影響の結果を見直してみたい。組織(化合物層、拡散層)や硬さの面で水冷と油冷による差はほとんどなく、図6に示すように圧縮残留応力のみが油冷で小さい。空冷の場合には組織面で窒素の析出があり、そのため硬さが低くなると共に圧縮残留応力も小さい。なお、化合物層は冷却方法により差はないと考えられる。

一方、図1の疲労試験では、破壊起点は試験片の板厚が薄いために冷却方法によらずすべて表面つまり図7(c)の状況にあった。したがって、表面付近の拡散層の強度(硬さ)と圧縮残留応力の大小が疲労強度を支配することになる。そのために水冷の疲労強度が最も高くなり、ついで油冷、空冷の順になるのが理解できよう。

図8 表面硬化材の疲労破壊モデル
(切欠材の場合)

なお、炭素量の影響(表2)や窒化前の熱処理の影響(表3)に関しては、前述の4因子のほか素材の疲労度も関与している。また、平均応力の影響(図5)や負荷様式の影響(表1)にはこれら以外の問題が関与してくるが、その詳細は紙面の関係で割愛する。

4. むすび

塩浴窒化処理の一例としてタフトライド処理を取り上げ、その疲労特性の一部と強化機構について解説した。なお、実用上重要な環境の影響⁽¹⁸⁾や他の機械的性質⁽¹⁹⁾との関連など多くの点が抜けている。また、説明を簡略化し過ぎたきらいがありお分かり難い点も多いと思われるが、その点については文献を参照願えれば幸いである。

ここで述べてきた強化機構の考え方は他の窒化法にも十分適用でき、また他の表面硬化法でも基本的には同様であると筆者は考えている。そして破壊起点に関する認識なくしては、表面硬化材の疲労特性の理解や有効な利用はし得ないことを強調しておきたい。最後に、本拙文に対して読者諸兄の御叱責をいただければ幸いである。

参 考 文 献

- (1) 日本パーカライジング株式会社熱処理事業部、カタログ
- (2) 浅見克敏、寺沢正男；材料、23-250(1974)564.

- (3) 浅見克敏；材料、26-288(1977)878.
- (4) 浅見克敏、寺沢正男；日本熱処理技術協会第5回學術講演大会予稿集、(昭52-11)15.
- (5) 寺沢正男、吉岡靖夫、浅見克敏；材料、18-195(1969)1081.
- (6) 浅見克敏；日本材料学会第27期學術講演会前刷、(昭53-5)5.
- (7) 浅見克敏、寺沢正男；日本熱処理技術協会第7回學術講演大会予稿集、(昭53-11)5.
- (8) 浅見克敏；日本材料学会第25期學術講演会前刷、(昭51-5)131.
- (9) 浅見克敏；日本熱処理技術協会第11回學術講演大会予稿集、(昭55-12)27.
- (10) 寺沢正男、吉岡靖夫、浅見克敏；材料、16-171(1967)991.
- (11) 中沢洋二、寺沢正男、浅見克敏；金属表面技術、31-2(1980)69.
- (12) 浅見克敏、寺沢正男、吉岡靖夫；日本機械学会論文集、42-356(1976)989.
- (13) 浅見克敏、寺沢正男、小賀正樹；日本材料学会第13回疲労シンポジウム前刷集、(昭54-11)60.
- (14) 小賀正樹、浅見克敏、寺沢正男；日本材料学会第12回疲労シンポジウム前刷集、(昭53-11)129.
- (15) Terasawa, M., Y. Yoshioka and K. Asami ; 15th Proc. Japan Cong. Mat. Res., (1972) 80.
- (16) 浅見克敏；材料、25-269(1976)138.
- (17) 浅見克敏；日本材料学会第15回疲労シンポジウム前刷集、(昭56-11)講演予定.
- (18) 小賀正樹、浅見克敏、寺沢正男、吉岡靖夫；材料、24-256(1975)79.
- (19) 杉山好弘ほか4名；日本材料学会第30期學術講演会前刷、(昭56-5)223.

電解式メッキ膜厚計

—モデルG—7—

一定面積を一定電流で溶解した時、溶解した厚さは時間に比例する事を利用した装置で、コークール電解液と標準板及び特許エア－攪拌方式により、電解効率が低下せず常に高い精度を保つので、JIS規格判定に使用され、各官庁、工業試験所、研究所、各産業界で定評ある名測定器。多層メッキの測定に最適で、各種金属被膜の他、金メッキを0.006ミクロン迄高感度で測定する機能を備えています。

※お問合せは直接当社にお願いします。

モデルG-7

膜厚計の総合メーカー販売輸出／英国エルコメーター社総輸入元

電測工業株式会社

ELEC FINE INSTRUMENTS CO.,LTD

東京都中野区中央2-47-1 電話(03)365-0861(代表)

テレックス 232-3131