FPB 処理による疲労特性の改善*

Improvement of Fatigue Properties by FPB Treatment

江上 登**

Noboru EGAMI

Key words FPB treatment, fatigue, S-N curve, crack initiation life, failure life

1. はじめに

機械・構造物を構成する要素設計の際に最も重要な点は、使用する材料の強度評価であり、現代における工業の発展は強度評価の多大なる成果によるとさえいえる。しかしながら、いまだに機械・構造物の破壊事故は頻繁に起こり、大きな社会問題を引き起こしていることも事実である。このことは、今日においてもなお材料の強度評価がいかに困難であるかを示唆している。

一方、機械を構成する要素材料の疲労強度は、材料の持つ固有な強さに依存することはもちろんであるが、材料の表面性状が疲労強度に及ぼす影響は大きい。影響因子としては、材料表面におけるき裂を含む欠陥、切欠きおよび仕上げ状態などが考えられる。これらのことは疲労き裂の大部分が表面から発生・進展することと関連する。

従って、材料表面において疲労に対する抵抗を増加させることができれば、機械・構造物を構成する要素の疲労強度や疲労寿命を向上させることが可能となる。

このような背景から、材料表面を改質する目的で種々の表面改質処理法が提案され、広範な分野で実用に供せられている。近年では、従来にもまして材料の高機能化、高寿命化、低コスト化などへの要求が高まり、材料表面における改質技術の重要性が指摘されている。

これらの表面改質処理法によって表面層のみを硬化させても、内部は材料本来の靱性が確保できるから、表面層は耐疲労性や耐摩耗性に優れた良好な性質を持たせることができる。

表面改質処理法にはタフトライド、高周波焼入れ、真空

浸炭処理など数多くの処理法がある¹⁾。この表面改質処理法をより有効に活用するために、複合表面改質²⁾（以後、ハイブリッド表面改質と呼ぶ）処理も行われている。例えば、浸炭処理後の高周波焼入れ³⁾、各種表面改質処理後のショットピーニング⁴⁾などである。

このうち、ショットピーニング⁵⁾は、材料表面近傍に比較的高い圧縮残留応力を発生させる一方、表面粗さの増加が疲労強度低下の要因になるとの指摘もある⁶⁾。

最近では $50\ \mu\text{m}$ ～ $100\ \mu\text{m}$ の微粒子を用いる微粒子衝突処理法（以後、FPB 処理法と呼ぶ）が活発に用いられている。この処理法の特徴は微粒子を用いていることから、ショットピーニングの欠点である表面粗さの増加を大幅に改善し、ショットピーニングよりもさらに高い圧縮残留応力が付与され、表面層近傍では大幅な硬度上昇とともに、疲労き裂の発生寿命が向上する。

そこで、著者が現在までに取組んできたハイブリッド表面改質材の疲労強度特性を中心に、FPB 処理法の有効性について概説するとともに、最近の研究成果として、FPB 処理を施した溶接継手や高周波焼入れ材の疲労強度特性についても紹介する。

2. FPB 処理に用いる粒子と粒子速度

ショットピーニングと FPB 処理に用いる粒子径は、平均的にはショットピーニングが $800\ \mu\text{m}$ に対して FPB 処理では $50\ \mu\text{m}$ であり、この場合、両者の体積比は約 $1/4\ 000$ になる。粒子材料は用途によりスチール、ハイス、セラミックスなど多くの種類が用意されている。

$50\ \mu\text{m}$ の微粒子が $0.4\ \text{MPa}$ の圧力を受けて直径 $5\ \text{mm}$ の直圧式ノズルからワーク表面に衝突する時の速度は、非圧縮性円筒乱噴流と仮定した場合、 $222\ \text{m/s}$ である⁷⁾。また、圧縮性流体と仮定した場合でも $169\ \text{m/s}$ であり、非圧縮性と仮定した場合の約 $75\ \%$ となる。なお、ショットピーニングにおける $800\ \mu\text{m}$ の粒子速度は約 $80\ \text{m/s}$ であるから、FPB 処理による微粒子の速度は、ショットピーニングとは異なり、高速度でワーク表面に衝突することになる。

*原稿受付 平成 18 年 7 月 11 日

**名城大学理工学部機械システム工学科（名古屋市天白区塩釜口 1-501）

江上 登

1966 年名城大学理工学部機械工学科卒業、名城大学理工学部機械システム工学科教授、博士（工学）名古屋大学、主に各種材料の疲労強度特性、破壊力学、ハイブリッド表面改質材の研究に取組む。微粒子衝突表面改質研究会、日本機械学会など 7 学・協会に所属。

図1 C材およびCP材の組織写真

微粒子が高速度でワーク表面に衝突したときの温度を運動エネルギーと熱エネルギーの観点から数値解析すると、衝突時における材料の極表面の極瞬間的な温度上昇は1000 K以上になる⁷⁾。

このように、高速度を有する微粒子が材料表面に衝突した場合、ショットピーニングでは考えられない種々の現象が起こりうることから、FPB処理による表面改質に関する種々の観点からの研究は、工業的あるいは工学的観点からも極めて重要であると考えられる。

3. ハイブリッド表面改質材の疲労強度

3.1 SCM415 真空浸炭材の疲労強度特性²⁾

本節ではSCM415材に真空浸炭処理(930℃浸炭・拡散, 880℃・10 min 保持後, 窒素ガス冷却, 浸炭硬化率36%)を施した後, FPB処理(二段ピーニング)を行ったものを対象とした。疲労試験は電気油圧サーボ疲労試験機を用い, 室温・大気中で行った。

3.1.1 硬度, 組織, 残留オーステナイト, 残留応力および表面粗さ

真空浸炭処理材(C材)と真空浸炭+FPB処理材(CP材)の硬度は, C材表面直下: 960 HV(表面硬度650 HV), CP材: 1250 HVであり, FPB処理を施すことによって大幅な硬度上昇が認められる。

図1にCおよびCP材の断面組織を示す。図示のごとく, C材はほぼ一様なマルテンサイト組織を呈し, CP材は表面から約10 μmにわたって腐食されにくい白層が認められる。この白層部分に対して強めの腐食を行った後, SEM観察した結果を図中(c)に示す。図示のごとく, 白層部分は極めて微細化したマルテンサイト組織が観察された。

これらの硬度上昇および組織変化については, 残留オー

図2 QT, QTP, CおよびCP材のS-N曲線

ステナイトが影響を及ぼしているものと考えられる。すなわち, 真空浸炭処理後, FPB処理を施すことにより残留オーステナイト量は21%から3%程度に大きく減少した。この減少は, FPB処理による加工誘起によるものと考えられる。

なお, FPB処理によるワーク表面の温度が前述のごとく, 極瞬間的に高温に上昇すると考えられるが, 複数回衝突により, 高温の状態が保持されることが, 図1(c)に示すような微細化したマルテンサイトに組織変化することと何らかの関係があるものと考えられる。

次に, 各処理材表面における圧縮残留応力値は, 調質材(QT材)で-30 MPa, C材で-320 MPa, CP材で-1850 MPaであり, ハイブリッド表面改質として, FPB処理を施すことにより表面には極めて大きな圧縮残留応力が付与される。これは塑性変形による影響および残留オーステナイトの加工誘起マルテンサイト化に起因する表面近傍の体積膨張に起因するものと考えられる。

一方, 各処理材の表面粗さ R_a (μm) は, QT材の0.08に対して, C材は0.39, CP材は0.40であった。この結果より, C材とCP材の表面粗さにほとんど変化が認められなかったのは, 二段目のFPB処理により表面の粗さが平均化されたことによるものと考えられる。

3.1.2 静的強度特性

QT材の引張強さ690 MPaに対して, CおよびCP材はC材: 930 MPa, CP材: 1000 MPaであり, FPB処理によりQT材よりも約45%の強度上昇が認められる。

3.1.3 S-N曲線およびき裂進展挙動

図2に各処理材の片振り引張り($R=0.1$)におけるS-N曲線を示した。図示のごとく, 各処理材の疲労限度は, QT材: 500 MPa, C材: 710 MPa, CP材: 830 MPaの順に高くなり, 最も高いCP材はQT材に対しては約65%, C材とでは約17%増加した。また, 破壊起点は, QTとC材が表面起点であるのに対し, CP材はフィッシュアイ型破壊であった。これはCP材表面に極めて高い

図3 QT, QTP, C および CP 材のき裂発生寿命および破損寿命

図5 QT, CN および CNP 材のき裂発生寿命および破損寿命

図4 QT, CN および CNP 材の深さ方向残留応力

圧縮残留応力が生じていることに起因して、表面からの破壊が抑制されたことによるものと考えられる。

図3に各処理材のき裂発生寿命 N_i と破損寿命 N_f の関係を示した。ここで、 N_i は切欠き底から 0.1 mm、 N_f は 8 mm に達したときの繰返し数で定義した。図から、C 材の N_i は高応力域においては QT 材よりも低下するが、一旦、生じたき裂は浸炭硬化層の影響を受けてその進展が抑制されるため N_f は著しく増加するものと考えられる。CP 材の N_i および N_f は、高応力領域においても顕著な向上が認められ、 $P_{max} = 8 \text{ kN}$ 以下では $N = 1 \times 10^6$ 回においてもき裂の発生は確認できない。周知のごとく、高サイクル疲労における疲労強度は硬度や降伏強さなどに支配されるが、低サイクル疲労、すなわち、高応力レベルにおいては、塑性ひずみが大きくなるために疲労強度は材料の延性や靱性に支配されることになる⁸⁾。従って、C 材のき裂発生寿命が、QT 材より低下するのは主に靱性の影響によるものと考えられる。

また、CP 材の N_i が他の処理材と比較して著しく向上したのは、FPB 処理により切欠き底近傍に極めて高い圧縮残留応力が付与されたことと、圧縮残留応力のピーク位置が極表面層（表面から約 10 μm ）に存在することにより、発生した微小き裂の進展が著しく抑制されたことによるものと考えられる。また、QT 材と QTP 材ではほとんど差異が認められなかった。このことは、引張荷重が作用した場合には、FPB 処理による単一処理ではそれほど効果は期待できないが、ハイブリッド表面改質によって顕著な効果が現れることを示唆している。

一方、加賀谷ら⁹⁾による、真空浸炭材 + FPB 処理を施した SCM415 切欠き材の S-N 曲線（回転曲げ）の結果では、真空浸炭材の疲労限度が 470 MPa に対して、ハイブリッド表面改質処理を施した場合には 710 MPa となり、約 1.5 倍の上昇が認められた。また、時間強度も同程度向上している。この結果から、応力集中部への FPB 処理の効果は、平滑部と比較してより顕著であると考えられる。

3.2 SCM415 浸炭窒化材の疲労強度特性¹⁰⁾

本節では SCM415 材にハイブリッド表面改質として浸炭窒化処理（920 $^{\circ}\text{C}$ 浸炭・拡散、850 $^{\circ}\text{C}$ 、30 min 保持後冷却）+ FPB 処理を行ったものを対象とした。

図4に深さ方向残留応力分布を示した。図中、QT：調質材、CN：浸炭窒化材、CNP：浸炭窒化 + FPB 処理材である。図示のごとく、CN 材は深さ方向にほぼ一様であるのに対して、CNP 材は表面から約 10 μm の位置で最大値（1420 MPa）を示している。通常のショットピーニングにおける残留応力のピーク位置が 100 μm 程度の深さであることを考えれば、FPB 処理によってピーク位置が極表面に移行するものと考えられる。また、表面近傍に移行することが疲労き裂の発生寿命に影響を及ぼしているものと考えられる。

図5に三点曲げにおける疲労き裂発生寿命 N_i および破損寿命 N_f を示した。それぞれの定義は前節と同じである。図示のごとく、CNP 材の N_i および N_f についても前述し

図6 FPB 処理を施した溶接継手の S-N 曲線

た CP 材と同様、顕著なハイブリッド表面改質効果のあることが確認できる。

3.3 溶接継手¹¹⁾ および高周波焼入れ材¹²⁾ への適用

図6にFPB処理を施した溶接継手のS-N曲線を示した。図中、BMは素材(SM50A)、WMは溶接継手、WMPは溶接後FPB処理を施したものである。

図7にFPB処理を施した高周波焼き入れ材のS-N曲線を示した。QTは調質材(S45C)、IHは高周波焼き入れ材、IHBは高周波処理後、FPB処理を施したものである。両図から、溶接継手に対しては約10%、高周波焼入れ材に対しては約35%の疲労強度の上昇が認められ、いずれについてもFPB処理による効果が認められる。

4. おわりに

真空浸炭処理および浸炭窒化処理後、FPB処理を施したハイブリッド表面改質材の引張、回転曲げおよび三点曲げに対する疲労強度特性を、S-N曲線および疲労き裂発生寿命などからハイブリッド表面改質効果について概説した。また、FPB処理を施した溶接継手や高周波焼入れ材のS-N曲線を紹介した。

FPB処理を施した材料の疲労強度特性についての研究報告はそれほど多くないが、最近、多くの研究者によって取組まれはじめた段階であり、今後、関係学・協会に順次報告がなされるものと期待している。いずれにしても、この種のハイブリッド表面改質材の疲労特性には、FPB処理による影響層が、主にき裂発生寿命に効果的であり、浸炭などの処理による硬化層はき裂進展速度の抑制に有効であるといえる。

図7 高周波焼入れ材にFPB処理を施した場合のS-N曲線

終りに、FPB処理は広範な分野に適用できる可能性がある。筆者はFPB処理には無限の可能性と魅力が秘められていると感じている。本稿が種々の表面改質材の信頼性評価に携わる技術者諸氏に少しでもお役に立てば幸いである。

参考文献

- 1) 例えば、日本熱処理技術協会編、熱処理ガイドブック、大河出版、(1997) 136.
- 2) 江上 登、加賀谷忠治、ほか3名：微粒子ピーニングを施したSCM415真空浸炭材のハイブリッド表面改質効果、機論、A編、66-650、(2000) 1936.
- 3) 砂野耕三、他3名：ガス軟窒化と高周波焼入れの複合熱処理をした球状黒鉛鋳鉄の組織と疲労強度、熱処理、42、1、(2002) 28.
- 4) 秦野敦臣、並木邦夫：浸炭鋼の疲れ強さに及ぼすショットピーニングの影響、電気製鋼、63、(1992) 22.
- 5) 例えば、広瀬正吉：ショットピーニング、誠文堂新光社、(1955) 1.
- 6) 相原賢治：鉄鋼材料技術からみた浸炭用鋼の現状と将来展望、熱処理、37、6、(1997) 303.
- 7) 前田 隼、江上 登、加賀谷忠治、他3名：微粒子ピーニングにおける粒子速度および材料表面温度分布の解析、機論、C編、67、660、(2001) 2700.
- 8) 塩澤和章：疲労の基礎と表面改質の基礎的考え方、日本材料学会第17回疲労講座、(1997) 1.
- 9) 加賀谷忠治、小笠原幸治、ほか3名：真空浸炭処理したSCM415鋼の疲労強度特性に及ぼす微粒子ピーニングの影響、日本機械学会2000年度年次大会講演論文集、No.00-1、(2000) 29.
- 10) 江上 登、加賀谷忠治、藤井賢二、竹下弘秋、天野智：微粒子ピーニングを施したSCM415浸炭窒化材のハイブリッド表面改質効果、日本熱処理技術協会、熱処理、42、4、(2002) 276.
- 11) 細井敬正、江上登、加賀谷忠治、伊藤聡：微粒子高速衝突によるHT540溶接継手の疲労き裂進展挙動、日本機械学会東海支部第51期総会・講演会講演論文集、No.023-1、(2002) 259.
- 12) 水野巨亮、江上登、片岡泰弘：微粒子高速衝突処理を施したS45C高周波焼入れ材のハイブリッド表面改質効果、日本機械学会東海支部第51期総会・講演会講演論文集、No.023-1、(2002) 261.