微粒子衝突処理を施した純チタンの表面組織および疲労特性

○野田 翔 (京工繊大) 森田 辰郎 (京工繊大)
 中口 英真 (元京工繊大) 加賀谷忠治 (中部大)
 宮坂四志男 (株式会社不二機販)

Microstructure near Surface and Fatigue Properties of FPB-treated Pure Titanium

Sho NODA^{*1}, Tatsuro MORITA, Hidemasa NAKAGUTI,
 Chuji KAGAYA and Yoshio MIYASAKA

^{*1} Dept. Mechanical Engineering, Kyoto Institute of Technology
 Hashigami-cho 1, Sakyou-ku, Kyoto 606-8585, Japan

This study was conducted to investigate influence of Fine-Particle Bombarding (FPB) on the microstructure near the surface and fatigue properties of pure titanium. For comparison, a shot-peened material was used. The results showed that surface hardness and compressive residual stress of the FPB material were higher than those of the shot-peened material. Furthermore, its microstructure near the surface was greatly fined through dynamic recrystallization and nano-crystallized. As a result, the fatigue strength of the FPB material was improved more than that of the shot-peened material because propagation of internal cracks to the surface was effectively suppressed by the formed layer.

Key Words : Titanium, Fine-Particle Bombarding, Nano-crystallization, Residual stress, Fatigue

1. 緒 言

ショットピーニングから派生した新たな表面改質法として、近年、微粒子を衝突させる微粒子衝突処理 (FPB⁽¹⁾ 処理) が注目されている。FPB 処理は被処理材の極表面に集中して塑性変形を生じさせることができるため、その表面には動的再結晶による著しい組織の微細化、加工硬化および高い圧縮残留応力が生じ、ショットピーニングよりも顕著な疲労強度の改善効果が認められる⁽²⁾。しかしながら、FPB 処理が表面組織に及ぼす影響や、特に同処理を施した材料における疲労き裂の発生形態については、必ずしも系統的なデータの蓄積が十分ではない。

そこで本研究では、FPB 処理およびショットピーニングを施した純チタンに関し、透過型電子顕微鏡 (以後、TEM) を用いた表面組織の観察および疲労試験等を行い、衝突粒子径の相違が表面性状やそれに強く依存する疲労特性に及ぼす影響について系統的かつ詳細に検討した。なお、本研究では上記のように被処理材として純チタンを選択したが、これは他材と比較してピーニング処理にともなう疲労強度の改善効果が顕著なためである。

2. 供試材および実験方法

元材である純チタン圧延丸棒を、表面性状を調べるためのボタン型試験片 ($\phi 15 \times 10$ mm) および疲労試験片 (JIS Z2274) に機械加工した後、試験部をエメリ研磨およびバフ研磨により鏡面状に仕上げた。その後、FPB 処理では最大直径 50 μ m、またショットピーニング (以後、SP) では最大直径 800 μ m の衝突粒子を用いて試験部に各処理を施した。その際、衝突粒子は高速度鋼製 (硬さ 1000 Hv) とし、また

噴射圧は 0.5 MPa とした。なお、上記の処理材以外に、比較のため未処理材を併せて準備した。

本研究では、まず各処理材の硬さ分布を調べるため、ボタン型試験片の縦断面上で表面から内部に向かってマイクロビッカース硬さを試験力 98 mN の下で測定した。残留応力測定には X 線残留応力測定装置を用い、また TEM を用いて最表面の組織観察を行うとともに、電子線回折により表面組織の微細化の程度を調べた。疲労試験は平面曲げとし、室温・大気中において応力比 $R=-1$ 、繰返し速度 25 Hz の条件で行った。また、破面観察の結果、処理材のき裂発生起点が材料内部であったことから、FPB 材については代表例として未破断の試験片の断面観察を行い、き裂発生直後の状態を詳細に調べた。

3. 実験結果および考察

3・1 衝突粒子径と表面組織の関係 図 1 に、FPB 材および SP 材の硬さ分布をまとめて示す。同図から明らかなように、FPB 材では SP 材と比べて硬化層厚さは小さいが、表面近傍の硬さは著しく上昇していた。このような FPB 材における表面硬さの上昇は、同処理の場合に塑性変形が極表面に集中するため、加工硬化の程度が SP 材よりも大となった結果である。さらに、上記の事柄は残留応力値にも反映されており、FPB 材で 337 ± 99 MPa、SP 材で 151 ± 38 MPa と、前者において著しく高い圧縮残留応力が付与されていた。

図 2 に、各処理材における最表面の組織観察の結果およびそれらの電子線回折結果をまとめて示す。同図に示すように、各処理材の組織はナノ結晶化し

Fig.1 Hardness distributions measured on the cross-section.

Fig.2 Nano-structure observed near the surface and diffraction pattern of each material : (a)FPBed material, (b)Shot-peened material.

Fig.3 S-N curves.

Fig.4 Internal crack observed on the cross-section of the FPBed material before its final fracture ($\sigma_a=510$ MPa).

ていた。しかしながら、FPB 材の組織は SP 材の場合に比べてより微細かつ一様であった。このことは、FPB 材の回折図形では SP 材の場合よりも明瞭なリング状となっていたことから理解される。

3・2 表面層性状と疲労強度の関係 図3に、各材の S-N 曲線をまとめて示す。同図から理解されるように、未処理材の疲労強度に対して FPB 材で 47%、また SP 材では 40%と疲労強度は大幅に改善された。そのような疲労強度の改善は、硬化層の形成により表面からのき裂発生が抑制されたためである。しかしながら、この考察では FPB 材と SP 材との疲労強度の差異を十分に説明されていない。

そこで上記の点を明確にするため、FPB 材および SP 材について疲労試験後に破面観察を行った。その結果、き裂の発生起点は明らかに表面層下であった。実際、FPB 材について未破断の試験片の断面を詳細に観察したところ、図4に示すように表面層の直下まで進展した微小な内部き裂が観察された。これらの観察結果から、ピーニング材 (FPB 材、SP 材) においてはまず表面層下でき裂が発生した後、そのき裂が表面層を突破することで破断に至ったといえる。

以上より、ピーニング材の疲労寿命および疲労強度は表面層が内部き裂の進展を抑制する効果の程度によって決定されると考えられる。同観点からすれば、硬化層厚さが小さいにもかかわらず FPB 材において疲労強度の改善率が高かったのは、前節で説明したように表面近傍の硬さが高いだけでなく表面組織の微細化の程度が著しく、さらに高い圧縮残留応力が付与されたため、内部き裂が表面へ進展することがより強く抑制されたためであるといえる。

4. 結 言

- (1) FPB 材では SP 材の場合と比べて硬化層厚さは小さかったが、表面近傍の硬さは著しく上昇し、また圧縮残留応力値も高かった。さらに、FPB 材では SP 材の場合よりもナノ結晶化の程度が顕著であった。
- (2) FPB および SP 処理にともない純チタンの疲労強度は大幅に改善された。また、両材では表面層下でき裂が発生した後、そのき裂が表面層を突破することで破断に至ることが明らかとなった。このことから、ピーニング材の疲労寿命および疲労強度は表面層が内部き裂の進展を抑制する効果の程度によって決定されると考えられた。
- (3) SP 材よりも硬化層厚さが小さい FPB 材において疲労強度の改善率が高かった。これは、FPB 材において表面近傍の硬さが高いだけでなく表面組織の微細化の程度が著しく、さらに高い圧縮残留応力が付与されたため、内部き裂の表面への進展がより強く抑制されたためと考えられた。

文 献

- (1) C.Kagaya, Journal of the Japan Society of Precision Engineering, 72(9), 1067-1070, (2006).
- (2) K.Takao, M.Sogoh and K.Matsumoto, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers A, 52(484), 2574-2578, (1986).