626 高炭素クロム軸受鋼の超長寿命疲労強度に及ぼす表面層の影響

富山大院 〇魯 連涛 富山大工 塩澤 和章 富山大工 西野 精一

1緒 言

超長寿命域における疲労挙動を明らかにする研究の一環として、著者らはこれまでに高炭素クロム軸受鋼 SUJ2 の砥石研削加工材の超長寿命疲労強度特性について検討を行ってきた¹⁾. その結果、表面き裂発生と内部き裂発生に起因する二重の S-N 曲線の存在を示唆した. この特異な疲労特性は供試材の表面層に依存して変化することが予想されることから、超長寿命疲労強度特性の把握にはそれら影響について検討しておく必要がある.

SUI2 鋼の研問加工層の疲労強度特性に及ぼす影響については後 藤ら²⁾ や越智ら³⁾ による報告がある.後藤らは加工による表面硬 度の上昇がなければき裂が試験片内部から発生する必然性は なく,常に表面から発生すると報告している.これに対して, 越智らは後藤らの結果と異なり,研問加工層を除去しても超長寿 命域で内部き裂発生型疲労破壊を生じ,*S-N* 曲線に二段折れ 曲がり現象を生じることを報告している.このように,研削 加工層の有無による疲労強度特性への影響については統一し た見解が得られていないのが現状である.本研究では,超長 寿命疲労強度特性に及ぼす表面層の影響を明らかにすること を目的とする.

2 供試材および試験方法

2.1 供試材 供試材は既報 ¹⁾と同様,高炭素クロム軸受鋼 (SUJ2)である. 試験片は最小断面部直径 3 mm の砂時計型試 験片であり,#100 砥石による研削加工によって仕上げた(以 後,砥石研削材と呼び,Grindと略記).砥石研削材の表面加 工層の影響を検討するため以下の二種類の研削加工層除去を 施した.

(1) エメリー紙研磨: 砥石研削後, #2000 エメリー紙研磨,表面層6µm除去,以後エメリー紙研磨材と呼び,Emeryと略記.
(2) 電解研磨: 無水酢酸,過塩素酸および蒸留水の混合液(体積比14:5:1)による電解研磨液を用い,液温273~275K,電圧34Vの条件でエメリー紙研磨材の表面層を20µm除去した.以後電解研磨材と呼び、EPと略記.

なお,エメリー紙研磨材および電解研磨材の表面最大粗さ は砥石研削材の2.88µmからそれぞれ0.67,0.32µmと小さく なった.また,電解研磨材の表面の硬さは砥石研削材のそれ (910HV)より小さくなり,砥石研削材の中心部の硬さ (750HV)と同程度となった.

X線法による本供試材の残留応力分布測定の結果,砥石研 削材の表面には約 500MPa の圧縮残留応力が存在し,表面か ら 13μm 程度の深さまで圧縮残留応力が存在する.エメリー 紙研磨材では,表面層の除去により表面圧縮残留応力が 280MPa まで低下し,電解研磨材の場合には,表面層の残留 応力がほぼ取り除かれていることを確認している.

2.2 試験方法 疲労試験は4連式片持回転曲げ疲労試験機 を用いて,室温,大気中の実験室雰囲気の下で繰返し速度 3150rpm で行った.

3 実験結果および考察

3.1 S-N曲線 図1に本実験で得られたエメリー紙研磨材 および電解研磨材の S-N 曲線を, 既報¹⁰の砥石研削材の結果 と併せて示す. 図より, エメリー紙研磨材の S-N 曲線は二段 折曲がりを示し, 表面き裂発生型破壊の時間強度は砥石研削 材のそれと比較して向上しているが, 内部き裂発生型破壊の 疲労寿命は砥石研削材のそれとほぼ同程度となっている. ま た, エメリー紙研磨材の表面き裂発生型破壊の疲労限度 σ_{*} は約 1500MPa であり, 砥石研削材のそれ(1255MPa)より高い値 を示した.

一方,電解研磨材の S-N 曲線においても二段の折曲がりが 観察された.電解研磨材の表面き裂発生型破壊の疲労寿命と 内部き裂発生型の疲労寿命は砥石研削材のそれらと有意な差 は見られないが,ステアケース法による実験で得られた表面き 裂発生型の疲労限度は1305±21.8MPaであり,砥石研削材のそ れ(1255±21.8MPa)より若干高い値を示した.電解研磨材の 表面き裂発生型破壊の時間強度がエメリー紙研磨材のそれと 比較して低下した原因は,電解研磨により表面層の圧縮残留 応力が取り除かれたためであると考えられる.また,電解研 磨材の疲労寿命が砥石研削材と同程度となったのは,表面粗 さの低下による寿命向上の効果と圧縮残留応力除去による寿 命低下の重畳によって生じたものと考えられる.

3.2 破面観察結果 疲労試験後の破面観察の結果,いずれ の材料も内部き裂の発生起点は内部に存在する非金属介在物 であったが,電解研磨材とエメリー紙研磨材では介在物を中 心とするフィッシュ・アイが認められるものと,介在物周囲 に粗さの大きい粒状領域のみがみられ,フィッシュ・アイが 観察されない破面(図中▼◆印)が認められた.

表面き裂発生起点は砥石研削材の場合、研削加工時の粗さ



Fig. 1 S-N curves for various surface-treated specimens of SUJ2.





(a) Emerized-specimen, σ_a =1500MPa, N_{f} =1.65 × 10⁴ cycles. σ_a =1350MPa, N_{f} =2.71 × 10⁴ cycles. Fig. 2 SEM observation of surface crack initiation site.

(b) Electropolished specimen





(a) EP specimen

(b) EP-a specimen

Fig. 3 SEM observation of specimen surface before fatigue test for EP and EP-a.

により誘起さらた表面すべりであり、き裂発生起点に介在物 は観察されなかった.一方、電解研磨材とエメリー紙研磨材 の場合、図2に示すように、表面き裂発生起点には介在物が 観察された. すなわち, 表面き裂の発生は表面層の粗さや残 留応力の影響が大きいと判断される.

3.3 電解研磨材の疲労強度特性 本実験で用いた電解研磨 材は表面に図 3(a)に示すように顕著な凹凸は認められない平 滑な試験片であった. しかしながら, 電解研磨条件によって は表面に欠陥(ピットまたは炭化物等が抜け落ちた跡)を生じ る場合がある. 前述の電解研磨条件に対して, 液温が約 3℃高 い 276~278K で電解研磨を行うと図 3(b)に示すように試験片 表面に多数のピット状の欠陥が観察された. このため、本実 験ではすべての電解研磨材の表面を調べ、表面欠陥の無い試 験片を選んだ. 図1の実験結果は注意深く電解研磨を施した 試験片の結果である.

本節では電解研磨で生じた微小な表面欠陥の疲労強度に及 ぼす影響を検討するために、電解研磨不良として選別した試 験片を用いて疲労試験を行った.表面欠陥を有する電解研磨 材(EP-aと略記)のS-N曲線を図4に示す. 図中には表面欠陥



Fig. 4 S-N curves for electropolished specimens (EP and EP-a).



(a) $\sigma_a = 1050$ MPa, $N_f = 4.85 \times 10^4$ cycle. (b) Subcrack on specimen surface Fig.5 Observation of fracture surface and surface after fatigue test for EP-a specimen.

の無い電解研磨材(EP)の結果を実線で示した. EP-a 材の 10⁶ 回以下で破壊した実験結果(▽)は EP 材の表面き裂発生型破 壊の S-N 曲線の延長線にプロットされるが、107回以上で破断 する結果も得られた. また、EP-a 材は EP 材の表面き裂型破 壊の疲労限度(1305MPa)以下の応力振幅でも表面き裂発生型 破壊を示し、内部き裂発生型破壊は観察されなかった.

図5にEP-a材の疲労破面及び疲労試験後の表面観察結果を 示す. EP-a 材のき裂発生起点はすべて表面であり、き裂発生 起点には、介在物は観察されなかった.図(b)は試験片表面で 観察された二次き裂の例を示す. EP-a材のき裂は電解研磨に より生じた多数のピット状欠陥が密集した個所から発生して いることがわかる. すなわち, EP-a 材のき裂は電解研磨によ り生じた欠陥に誘起された表面すべりによると判断される.

図4には、後藤ら²⁾および越智ら³⁾により報告されている 電解研磨材の S-N 線図を併せて示した.図より,越智らの実 験結果は約1200MPa以上では表面き裂発生型破壊を示し,そ れ以下の応力振幅では内部き裂発生型破壊を示し、本実験に おける EP 材と同様の傾向を示している.一方,後藤らの電 解研磨材の実験結果は応力振幅 800MPa まで表面き裂発生型 破壊を呈しており、本実験における EP-a 材の結果と類似して いる.また,越智らは表面き裂発生型破壊のき裂発生起点を 表面近傍の介在物であると報告しているのに対して、後藤ら は表面き裂発生起点を表面すべりとしている点も、本実験に おけるEP材とEP-a材の結果とそれぞれ対応する.すなわち, 越智らにより報告されている電解研磨材の S-N 曲線は電解研 磨による表面欠陥のない状態に対するものであり、後藤らに より報告されている S-N 曲線には電解研磨によって生じた表 面欠陥の影響がある場合に相当するものと推察される. した がって、電解研磨により表面の粗さや残留応力を取り除いた 状態での疲労強度特性としては EP 材の S-N 線図が妥当であ り、表面き裂発生型と内部き裂発生型の二重の S-N 曲線が存 在すると判断される.

4 結 言

(1) 電解研磨材およびエメリー研磨材は表面き裂発生型と 内部き裂発生型の二重 S-N 曲線が得られた. ただし, 電解研 磨条件により表面に欠陥が存在する場合、表面き裂発生型破 壊に対する疲労限度は著しく低下する.

(2) 内部き裂発生型の疲労破壊は材料固有の特性である.

参考文献

1) K. Shiozawa, et al., Fatigue Frac. Eng. Mater. Struct., 24,781(2001). 2) 後藤他, 材料, 49,786 (2000).

3) Y. Ochi, et al., Fatigue Frac. Eng. Mater. Struct., 25,823 (2002).