

富山県立大学[院]

○保江隼士

富山県立大学

堀川教世

富山県立大学

春山義夫

明石工業高等専門学校

境田彰芳

滋賀県東北部工業技術センター

今道高志

Fatigue Behavior of UV Irradiated PBO Fiber

Hayato YASUE, Noriyo HORIKAWA, Yoshio HARUYAMA

Akiyoshi SAKAIDA and Takashi IMAMICHI

1 緒 言

高分子繊維材料は分子鎖を繊維軸方向に高度に配向することによって高強度・高弾性率化を実現してきた。中でも、PBO (Poly-*p*-Phenylene Benzobisoxazole) 繊維は引張強度・引張弾性率がアラミド繊維の約2倍高く、さらに耐熱性や耐摩耗性といった多くの利点を有していることから、今後様々な分野での使用が期待されている。

そのようなことから我々はこれまでに PBO 繊維に関する研究を行ってきており、現在のところ疲労強度特性¹⁾について明らかにしてきた。一方、高分子材料は紫外線によって劣化することから、紫外線と引張強度の関係についても研究を行っており、その結果、PBO 繊維に一定以上の紫外線エネルギーを与えることによって、引張強度が低下することを明らかにした²⁾。しかしながら、疲労強度については、紫外線を照射することによって、どの程度低下するかについては明らかではない。

そこで本研究では、紫外線を照射した PBO 繊維の疲労強度を明らかにすることを試みた。実験では、8 W/m²の放射照度で100時間照射した繊維に対して、異なる応力比のもと単繊維の疲労試験を行った。その後、SEMを用いて疲労破面を観察し、強度低下の原因について検討を行った。

2 実験方法

2.1 供試材料および試験片 本研究では供試材料として高弾性率タイプ PBO 繊維 (ザイロン[®]HM, 東洋紡製) を使用した。繊維は繊維束 (300 本) の状態で供給される。試験片は旧 JIS R 7601 を参考にしてゲージ長さ 12.5 mm の紙製タブを用意し、紫外線照射後、繊維を繊維束より1本取り出し、繊維の両端部をエポキシ製の接着剤で固定し作製した。また、試験片作製および保管は、紫外線を遮断した部屋で温度を一定にして行った。

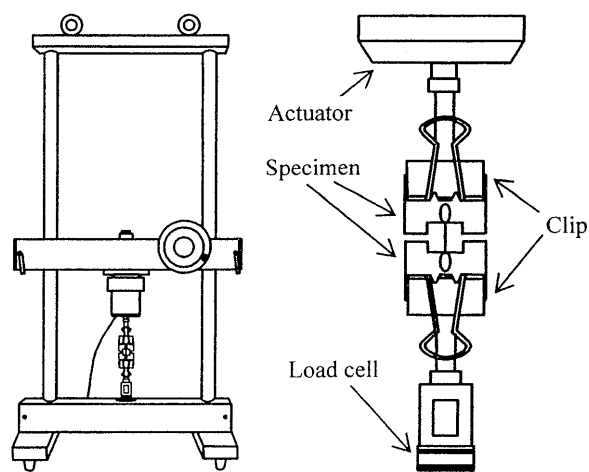
2.2 紫外線照射方法 紫外線照射には紫外線ランプ型照射装置 (紫外線波長: 365 nm) を使用した。紫外線照射は繊維束の状態で行い、放射照度 8 W/m² で100時間照射した。なお、均一に紫外線が照射できるように繊維束を帯状に広げ、さらに繊維束上下面の照射時間が等しくなるように、一定時間経過後、繊維束の上下面を裏返す操作を行った。

2.3 単繊維疲労試験 疲労試験機には Fig. 1 (a) に示す電磁力式疲労試験機 (MMT-11N, 島津製作所製) を使用

した。Fig. 1 (b) は試験片のつかみ部を示したものであり、上部のアクチュエーターと下部のロードセルに取り付けられたクリップで試験片を保持することができる。疲労試験は正弦波荷重下で荷重制御、周波数 10 Hz、応力比 $R = 0.1, 0.5, 0.7$ の3条件で行い、繰返し数 10^7 回で試験を打ち切った。また、紫外線および可視光による強度低下を避けるために、疲労試験中は試験機全体を黒いシートで覆い、光が入らないようにした。なお、接着端部で破壊した繊維については、破壊メカニズムがゲージ間内で切れたものと異なるためデータとして採用しなかった。疲労試験後、SEMを用いて繊維直径を測定し、破断応力を算出した。

3 実験結果および考察

3.1 単繊維疲労試験結果 Fig. 2 に単繊維疲労試験より得られた S-N 線図を示す。縦軸は最大応力 σ_{max} 、横軸は破断繰返し数 N_f である。紫外線を100時間照射した繊維の応力比 $R = 0.1, 0.5, 0.7$ の試験結果は●, ▲, ■のプロットで、未照射の繊維の応力比 $R = 0.1, 0.5, 0.7$ の試験結果を○, △, □のプロットで示す。また、100時間照射のデータ、未照射のデータを直線近似したものを実線、細実線にて示し、参考のため引張強度を破線、



(a) View of fatigue testing machine (b) Gripping device

Fig. 1 Fatigue testing machine.

験片に対し、引張試験を 40 回行うことで得られた破断応力の平均値を用いている。Fig. 2 より、紫外線を 100 時間照射した PBO 繊維の疲労寿命は若干のばらつきがあるものの、最大応力で整理することによって一義的に統制可能であることが分かる。また未照射の繊維と比較すると、近似直線は同様の傾きで、引張強度と同程度の強度低下が見受けられた。

3.2 破面観察 紫外線照射による疲労強度低下の原因を解明するために、SEM を用いて疲労破面の観察を行った。Fig. 3 に紫外線未照射と 100 時間照射の疲労破面のマッチング写真を示す。Fig. 3 (a) に示す紫外線未照射の場合、繊維は繊維軸方向に割けるように破断しているのに対し、Fig. 3 (b) の 100 時間照射の場合、表層数 μm では繊維直径方向に、それ以降は繊維軸方向に割けるように破断していることが分かる。このように、疲労破面には、繊維表層に明確な違いが見受けられた。

ここで、高分子材料は紫外線照射により自動酸化反応が連鎖的に進行することで、分子鎖が切断されると言われている。自動酸化反応は大気中の酸素が原因となるため、分子鎖の切断は材料表面から内部へと進行し、紫外線照射終了後、徐々に反応は停止する。よって、分子鎖の切断は繊維表層で起こっており、Fig. 3 (b) で観察された表層数 μm は自動酸化反応により分子鎖が切断された層であると考えられる。

また、PBO 繊維の内部構造はマイクロフィブリルと呼ばれる微小径繊維が束になり繊維軸方向に配向しており、マイクロフィブリル同士は完全に結合しているのではなく、繊維軸方向に細長いマイクロボイドが内部に多数存在していることが明らかにされている。ゆえに PBO 繊維は、繊維軸方向には非常に強いが、繊維直径方向の結合力はそれほど強くないため、分子鎖が切断された表層は荷重支持能力がほとんど無くなっていると考えられる。つまり Fig. 4 に示すように、紫外線を照射することによって、PBO 繊維は見かけ上、断面積が減少したため、疲労強度が低下したものと考えられる。

なお、これを証明するために Fig. 3 (b) と同様の破面が観察された全ての繊維に対し、酸化していると考えられる層を画像解析で測定したところ、約 $0.75 \mu\text{m}$ であった。そこで、破断応力を算出した際の繊維直径から $1.5 \mu\text{m}$ を差し引いて再度、最大応力を計算したところ、紫外線未照射の S-N 線図に重なることが確認できた。今後、ラマン分光分析で化学的に検討を行う予定である。

4 結言

- 1) 紫外線を照射した PBO 繊維の疲労寿命は最大応力で整理することによって、一義的に統制することができる。また、未照射の繊維と比較すると、近似直線は同様の傾きで、引張強度と同程度の強度低下が示す。
- 2) 紫外線未照射の繊維の疲労破面は、き裂が繊維長さ方向に割けるように進展しているのに対し、100 時間照射の場合、き裂は表層数 μm では繊維直径方向に進展し、それ以降は繊維軸方向に進行する。

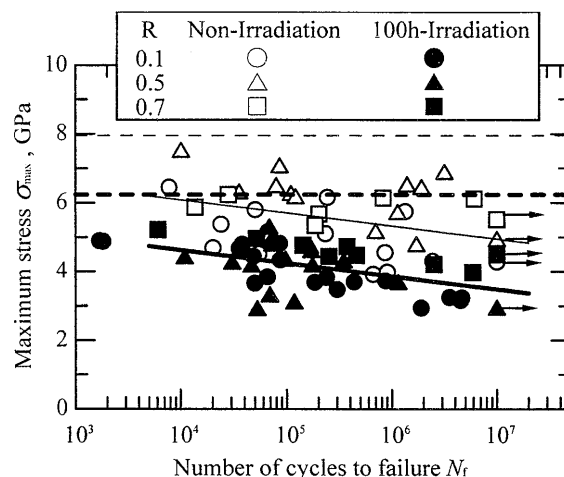


Fig. 2 S-N curves plotted maximum stress in ordinate for Non-Irradiation and 100h-Irradiation fibers.

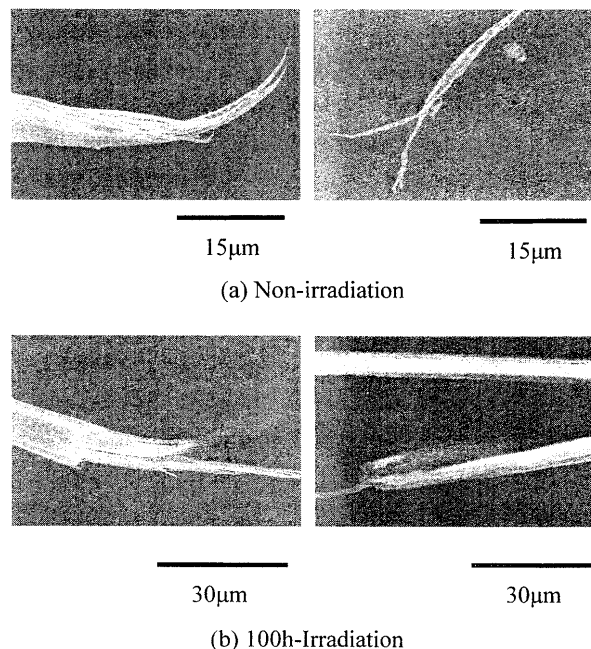


Fig. 3 SEM photographs of fatigue fracture surface of PBO fiber.

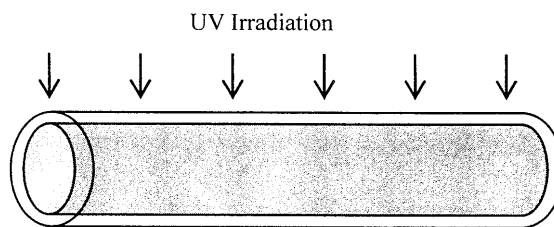


Fig. 4 Schematic diagram of UV damaged PBO fiber.

参考文献

- 1) 堀川教世 他 7 名, 材料, Vol. 57, pp. 732-738, (2008).
- 2) 堀川教世 他 8 名, Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering, Vol. 3, No. 1, pp. 4-6 (2009).