

JAERI-M
8808

繰返し応力下における黒鉛中の
きれつ伝播特性

1980年4月

角井 日出雄*・奥 達雄

この報告書は、日本原子力研究所が JAERI-M レポートとして、不定期に刊行している研究報告書です。入手、複製などのお問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。

JAERI-M reports, issued irregularly, describe the results of research works carried out in JAERI. Inquiries about the availability of reports and their reproduction should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan.

繰返し応力下における黒鉛中のきれつ伝播特性

日本原子力研究所東海研究所高温工学室

角井日出雄^{*}・奥 達雄

(1980年3月4日受理)

本報告は、高温ガス炉炉心構造物用黒鉛材料の繰返し応力下におけるきれつ伝播特性試験の結果をまとめたものである。試験片として、或るきれつ長さ範囲において、その先端での応力拡大係数が一定となる double cantilever beam 試験片を黒鉛用として改良したものをを用いた。供試材として、それぞれのコークス粒径、および機械的性質の異なる JA (微粒等方性黒鉛)、FA (微粒等方性黒鉛) および FB (準等方性黒鉛) の国内外 3 銘柄を用いた。

実験結果は、それぞれの黒鉛の臨界応力拡大係数 K_{Ic} が $K_{Ic} (FA) < K_{Ic} (JA) < K_{Ic} (FB)$ であることを示した。また、荷重繰返し時の応力拡大係数範囲 ΔK ときれつ伝播速度 da/dN の関係は、 $da/dN = C \cdot \Delta K^n$ として表わせることがわかった。 ΔK の小さいところでのきれつ伝播速度は、 $da/dN (FA) > da/dN (JA) > da/dN (FB)$ であることが明らかとなった。きれつ付近の表面の顕微鏡観察によれば、きれつの伝播する経路は、それぞれの黒鉛のコークス粒径と直接関係があると考えられた。また、荷重繰返し時の平均応力拡大係数 K_m と最大応力拡大係数 K_{max} の伝播速度に対する影響についても検討した。

* 外来研究員 石川島播磨重工株式会社

Crack Propagation Behavior of Graphite Under Cyclic Loading Condition

Hideo KAKUI * , Tatsuo OKU

Division of High Temperature Engineering,

Tokai Research Establishment , JAERI

(Received March 4, 1980)

The results are described of crack propagation test under cyclic loading condition of graphites used in components of High Temperature Gas Cooled Reactor.

The remodelled double cantilever beam specimen of graphite, having a crack range of constant stress intensity factor at the crack edge was used.

Three kinds of graphites made in Japan and foreign countries were used; JA (fine grained, isotropic graphite) , FA (fine grained, isotropic graphite) and FB (near isotropic graphite). The three had different coke grain sizes and mechanical properties.

Following are the results. Critical stress intensity factor K_{IC} in the graphites are $FA < JA < FB$. There is a relationship $da/dN = C \cdot \Delta K^n$ between stress intensity factor range ΔK and crack propagation rate da/dN . Crack propagation rates da/dN for small value of ΔK in the graphites are $FA > JA > FB$.

The route of crack propagation appears to depend on coke grain size of the graphite. The effects of mean stress intensity factor K_m and maximum stress intensity factor K_{max} on the crack propagation rate are discussed.

Keywords; Graphite, Crack Propagation, Double Cantilever Beam Specimen
Stress Intensity Factor, Mechanical Properties, HTGR Core Components,
Cyclic Loading

* On leave from Ishikawajima-Harima Heavy Industries CO., Ltd.

目 次

1. はじめに	1
2. 実験方法	2
2.1 供試黒鉛材料	2
2.2 DCB試験片	2
2.3 試験法	3
3. 結果と討論	5
3.1 臨界応力拡大係数 (K_{Ic})	5
3.2 繰返し応力下のき裂伝播特性	5
3.3 走査型電子顕微鏡による破面観察	6
4. 結 論	7

Contents

1. Introduction	1
2. Experimental Procedure	2
2.1 Materials	2
2.2 DCB Specimen	2
2.3 Procedure	3
3. Results and Discussion	5
3.1 Critical Stress Intensity Factor (K_{Ic})	5
3.2 Crack Propagation Behavior under Cyclic Loading Condition	5
3.3 Observation of Fracture Surface by SEM	6
4. Conclusions	7
References	8

1. はじめに

高温ガス炉炉心構造物のほとんどは黒鉛から造られており、構造物によって、スリット状および切り欠状の構造を持つ場合がある。また、黒鉛構造物には、加工時および材料製造時に入ったと考えられるきれつが存在する場合もある。このような構造物が原子炉運転時、静荷重、衝撃荷重、繰返荷重を受けると、スリット、切り欠き、あるいは、きれつ先端など、応力集中を受ける部分からきれつが発生、または成長し、場合によっては、構造物の一部あるいは全体の破損に至る可能性がある。このうち、静的荷重を受ける場合のきれつ伝播挙動については、Double Torsion Technique⁽¹⁾を用いて、比較的多くの報告⁽²⁾⁽³⁾がある。しかし、繰返荷重を受けた場合のきれつ伝播挙動については、ただ1編の報告⁽⁴⁾があるにすぎず、まだ多くの問題が未解決のままである。

現在に至るまで、高温ガス炉用黒鉛材料の炉心構造物用としての特性の検討は、主として大気中および高温照射雰囲気中での引張、圧縮、曲げ強度および物理的性質について行なってきた。しかし黒鉛のような脆い材料では、上の機械的性質および物理的性質も必要であるが、きれつ発生応力および、その伝播特性を知ることが、構造設計および材料選定のために、不可欠な項目として要求される。

本研究では、繰返応力下における黒鉛中のきれつ伝播特性実験の第一歩として、コークス粒径、その他機械的性質の異なる国内外3銘柄、すなわち、微粒石油コークス系等方性黒鉛（静水加圧成型材）JA*、同FA**、石油コークス系準等方性黒鉛（型込成型材）FB*** について、きれつ進展中でも、その先端での応力拡大係数が一定となるDouble Cantilever Beam (DCB) 試験片を黒鉛用に改良したものをを用いて、きれつ伝播速度 da/dN と応力拡大係数範囲 ΔK の関係を Paris の式

$$da/dN = C \cdot \Delta K^n \dots\dots\dots (1)$$

で整理し、それぞれの黒鉛銘柄でのC、nを求め、比較した。また、それらを決定する影響因子と考えられる、コークス粒径、表面組織および荷重繰返時の平均応力拡大係数または、最大応力拡大係数等についても検討を加えた。

* IG-11 (東洋炭素)
 ** 7477 (ル・カーボン)
 *** SM1-24 (AGL)

2. 実験方法

2.1 供試黒鉛材料

試験材には、ラバープレス成型による石油コークス系微粒等方性黒鉛 JA, 同 FA, 型込成型による石油コークス系準等方性黒鉛 FB を用いた。それぞれの物性および機械的性質を、Table 1 に示す。これらの特徴は機械的強度および、コークス粒径がそれぞれ異なることである。JA, FA, FB のコークス粒径はそれぞれ 20, 70, 1500 μm である。試験片の切出しには、できるだけ試験片間のばらつきをなくすため、ブロック中で等価な位置になるよう注意を払った。

2.2 DCB 試験片

Fig.1 に本試験に用いた試験片の形状、寸法を示す。破壊靱性の研究のための試験片としては、Charpy 型試験片、Compact Tension 型試験片 (C・T)、円板状試験片 Double Torsion Cantilever 試験片等が良く知られているが、本実験のような応力繰返時のきれつ伝播を測定する場合、いずれも不相当であると考えられた。ここでは、金属の同研究等でよく用いられている試験片形状を黒鉛用として改良した Double Cantilever Beam (以下 DCB という) 試験片を用いた。本試験片は作用する荷重が一定のとき、きれつ長さにかかわらず、その先端での応力拡大係数 K_I が一定となる領域をもつように、試験片両側の曲線が決定されている。この関係を数式で表わすと、つぎのようになる。

応力拡大係数 K_I は次式で表わされる。

$$K_I = (GE)^{\frac{1}{2}} \dots \dots \dots (2)$$

- E : ヤング率
- G : きれつ拡大力

きれつ拡大力 G は (3) 式によって表わされる。

$$G = \frac{P^2}{2b_n} \cdot \frac{\partial C}{\partial a} \dots \dots \dots (3)$$

- C : コンプライアンス
- a : 荷重作用軸からきれつ先端までの距離
- P : 荷重
- b_n : きれつ幅

ここでコンプライアンス C は (4) 式で表わすことができる。

$$C = \frac{24}{Eb} \int_0^a \frac{x^2}{h^3} dx + \frac{6(1+\nu)}{Eb} \int_0^a \frac{1}{h} dx \dots \dots \dots (4)$$

(4)式を a について偏微分すると

$$\frac{\partial c}{\partial a} = \frac{24}{Eb} \cdot \frac{a^2}{h^3} + \frac{6(1+\nu)}{Eb} \cdot \frac{1}{h} \dots\dots\dots (5)$$

となる。ここで、 ν はポアソン比で、 h は試験片の中心軸から曲線部に至る距離である。また、 b は試験片の幅である。 ν は黒鉛銘柄により若干異なるが、JA黒鉛の値を用い、 $\nu=0.15$ とおき(5)式を整理し、(2)式、(1)式に代入し、 K_I を求めると、(6)式のようになる。

$$K_I = \left[\frac{P^2}{2b_n b} \left(\frac{24a^2}{h^3} + \frac{7}{h} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots (6)$$

(6)式において、 a 、 h を

$$\frac{24a^2}{h^3} + \frac{7}{h} = m = \text{一定} \dots\dots\dots (7)$$

となるように決定すれば、残りの b_n 、 b は試験片のディメンジョンであり、荷重が一定の場合 K_I は一定となる。以上のようにしてDCB試験片側部曲線を決定した。 m が0.4～1.6のときの側部曲線をFig.2に示す。本実験で用いた試験片では、 $m=1.2$ 、 1.6 の両者を考えたが、予備試験の結果、 $m=1.6$ では a に較べ h が相対的に小さくなり、成長するきれつが試験片中心軸のガイドから外れることが多いため、側部の剛性の強い $m=1.2$ を採用した。

一方、黒鉛材JA、FBについては、方向性も考慮して試験片を切り出した。その表示方向は、いずれも円筒型ブロックに対し、軸方向をAxial(またはA)、半径方向をRadial(またはR)とし区別した。

2.3 試験法

本実験に用いた試験機は、静的引張試験、荷重繰返試験とも、サーボパルス式疲労試験機(島津EHF-0.1形)を用いた。

DCB試験片による繰返応力下のきれつ伝播特性に関する研究の実験手順をFig.3に示す。本実験に用いた試験片は、JA、FA、FBでそのうち、JA、FBについては方向性も考慮し、合計41個、そのうち13個を臨界応力拡大係数 K_{Ic} を求めるための静的引張試験、残りをきれつ伝播速度を求めるために供した。

また、きれつの長さは、最小測定単位が $10 \mu m$ のコンパレータを用い、目視で測定すると同時に写真撮影を行なって、写真引き伸ばし後に測定した。

(i) 静的引張試験

K_I 値一定のDCB試験片を用い、定引張速度 $0.05 mm/min$ で試験を行なった。きれつ長さの測定には定速引張時、片面における成長きれつ長さをコンパレータで連続的に読むと同時に、その反対面から、1秒間隔で連続写真撮影を行ない、これらから成長きれつ

長さを求めた。

定速引張時、試験片にきれつが入るまでは、それぞれの材料の応力-ひずみ曲線に従うようにクロスヘッド変位量は増大するが、一度きれつが入ると荷重が緩和され、変位のみが増加する。そのとき飽和荷重を P_{Ic} とし、(6)式により臨界応力拡大係数 K_{Ic} を求めた。また、測定されたきれつ長さ と 荷重 と の関係から K_I 値が一定となる試験片領域を確認した。

(ii) 荷重繰返試験

静的引張試験から求めた臨界応力拡大係数 K_{Ic} から、荷重繰返時の平均応力拡大係数 K_m を $K_m = 1/2 \cdot K_{Ic}$ とし、 $0 \sim K_{Ic}$ の範囲内で振幅、すなわち応力拡大係数範囲 ΔK を設定し、荷重繰返試験を行なった。

まず、試験片の人工きれつ先端から、静的引張試験より求めた K_I 値一定の領域に到達するまで、低応力拡大係数範囲で荷重繰返しを行ない、プレクラックを作成した。試験は材料間のばらつきをできるだけ小さくするため、プレクラック以降の領域を5~6分割しそれぞれの領域に対し、異った ΔK で荷重繰返しを行ない、1個の試験片で一通りの $da/dn - \Delta K$ の関係を求め、最終的に他の試験片から求めたデータと平均した。この条件を Fig. 4 に示す。また、各銘柄の荷重繰返条件を Table 2 に示す。上の関係は、荷重繰返速度にも依存することも考えられるが、黒鉛構造物が最も受けやすい荷重サイクル 1~5 Hz の下限値 1 Hz を用いた。また、荷重波形は正弦波とした。

きれつ長さは、人工切り欠き先端から、きれつ先端までの中心軸に沿って平行な距離を測定した。測定方法はコンパレータによる直接測定と、それに取付けたカメラによる写真撮影法を併用させた。コンパレータではその測定精度を上げるため、荷重繰返時のきれつ進行過程において測定し、またカメラでは写真振れを防ぐため、荷重繰返動作を一時的にその平均荷重に静止させ、写真撮影を行ない、写真拡大後、その長さを測定した。

上の方法によるきれつ長さの測定値はいずれもきれつの一表面にすぎず、全断面を表わしているものではない。このため、荷重繰返数ときれつ成長長さの関係を求める際、測定値を直線または曲線により近似させ、その値でもって、任意の荷重繰返回数に対するきれつ成長長さとした。

以上のようにして得られた測定値から、各々の ΔK における荷重繰返回数ときれつ成長長さの関係を求めた。

つぎに、上で求めた荷重繰返回数ときれつ成長長さの関係から、それぞれの ΔK でのこの配を読み、 ΔK ときれつ伝播速度 da/dn の関係を求めた。上の荷重繰返回数ときれつ成長長さから得られるきれつ伝播速度の測定は、同一試験片で種々の ΔK について荷重繰返を与える関係上、前段階の ΔK の影響を考慮し、低繰返回数におけるきれつ長さよりも高繰返回数におけるそれを重視した。

つぎに、今までは荷重繰返時の平均応力拡大係数 K_m を $\frac{1}{2} K_{Ic}$ としたが、 K_m の影響を調べる実験の一部として、無負荷をベースとし、周期的に荷重のかかる条件を選び、この条件により得られたきれつ伝播速度と $K_m = 1/2 K_{Ic}$ とした場合のそれと比較した。ただし、今回の実験では試験機および治具の関係上、最小応力拡大係数 K_{min} を $0.32 \text{ Kg/mm}^{\frac{3}{2}}$

とした。

3. 結果と討論

3.1 臨界応力拡大係数 (K_{Ic})

Fig. 5 に静的引張試験の結果得られた各銘柄別のクロスヘッド変位量と荷重との関係を示す。また、コンパレータおよびインターパロメータを使用してのきれつ連続撮影により得られたきれつ長さとの関係を Fig. 6 に示す。この結果、本DCB試験片は、3銘柄とも、人工切り欠き先端から 5 - 20mmの間で K_I 値が一定であることが明らかとなった。この荷重一定領域における荷重を臨界荷重を P_{Ic} とし、この値から求めた臨界応力拡大係数 K_{Ic} をTable 3に示す。

以上の結果、つぎのことが言える。

- イ. JA, FBとも、 K_{Ic} に関して方向性はほとんどない。(FAについては方向性を考慮していない)
- ロ. K_{Ic} は $FB > JA > FA$ の順に大きく、方向性を無視した平均値では、それぞれ 3.89 , 3.36 , 2.77 $\text{Kg}/\text{mm}^{\frac{3}{2}}$ である。これはTable 1.に示した機械的強度とは無関係に、構造物が同形状、同寸法のきれつ、あるいはこれに準ずる構造をもつ場合、その耐荷重は、 $FB > JA > FA$ の順に大きい。

3.2 繰返応力下のきれつ伝播特性

Fig. 7 に繰返応力下におけるきれつ伝播形状を示す。Fig. 8 . a~e に各銘柄についての荷重繰返回数と伝播成長したきれつ長さの関係の代表例を示す。この関係は、ほぼ直線で表わすことができるが、銘柄により多少のばらつきがみられた。この原因として、次のことが考えられる。

- イ. 1個の試験片中に材料強度的なばらつきがある。
- ロ. きれつが不純物および大きな結晶粒に到達すると、その結晶方向により、それらを通過するため、あるいは、きれつの進行方向を変えるため、それに必要なエネルギーを必要とする。そのため、きれつはその位置で一時停止する。
- ハ. きれつ進行方向が試験片軸に平行でない場合、きれつ長さは試験片軸に平行に測定されるため、みかけのきれつ長さは小さくなる。
- ニ. きれつが試験片中心軸からずれた場合、試験片のきれつガイド溝がアール状となっているため、実質的な厚みが異ってくる。そのため K 値がわずかながら一定でなくなる。
- ホ. きれつが進行途中分枝する場合がある。

Fig. 9 . a~e にFig. 8 . a~e のこう配から求めたきれつ伝播速度 da/dN と応力拡大係数範囲 ΔK の関係を各銘柄別に示す。図中の直線は各々の試験片についての da/dN と ΔK の関

係を平均したものである。この結果、きれつの進行する応力拡大係数範囲はFAが最も小さくそれに次いでJA, FBと大きくなる。以上をまとめてFig.10に示す。これらは図で示されているように(7)式で表わすことができる。

$$\frac{da}{dN} = C \cdot \Delta K^n \dots\dots\dots (7)$$

ここで、C, nは定数であり、それぞれの銘柄について求めた値をTable 4に示す。Table 4中で、写真観察により得られた値は、一部を除いてほぼ一致しているが、コークス粒径の大きなFBでは、きれつが観察表面では不連続に見えることがあるため、瞬時観察のコンパレータによる観察では、きれつ先端を見落す場合もある。これらが両者の不一値の最も大きな原因と考えられる。

以上は荷重繰返時の平均応力拡大係数 K_m をそれぞれの材料の50% K_{Ic} とした場合であり、 K_{Ic} の大きな材料程、実験条件が過酷であるとはいえ、銘柄相互のきれつ伝播速度の比較結果は小さく出ていると言える。すなわち、絶対的な比較での本傾向はさらに顕著に出ることが予想される。

つぎに、上で述べた絶対的比較のため、黒鉛銘柄JA, FAを用いて実験を行なった。その実験条件をFig.11に示す。荷重繰返時の最小応力拡大係数 K_{min} は両銘柄とも、試験機および治具等の性能から考えて $0.32 \text{ Kg/mm}^{\frac{3}{2}}$ で一定とし、応力拡大係数範囲 ΔK を次第に増加させた。この結果、得られた荷重繰返回数Nに対するきれつ成長長さ a の関係の一例をFig.12に、また、その関係から求めた ΔK に対する da/dN をFig.13に示す。

以上の関係を(7)式で表わし、前回の $K_m = 50\% K_{Ic}$ とした場合との比較結果をFig.14およびTable 5に示す。

両条件の実験の結果、両者のきれつ伝播速度 da/dN にかなり大きな差が確認された。すなわち、同じ ΔK において $K_{min} = \text{一定}$ の方が $K_m = \text{一定}$ の場合より、きれつ伝播速度が大きい。この理由として、その最大応力拡大係数 K_{max} および K_m がきれつ成長に大きく寄与していることが考えられる。このようにきれつ伝播速度は ΔK の関数のみで表わすことができず、 ΔK と最小応力拡大係数 K_{min} 、最大応力拡大係数 K_{max} および平均応力拡大係数 K_m の関数として表わされると考えられる。しかし、 $K_{min} = 0$ とした条件におけるきれつ伝播速度 da/dN と ΔK の関係は他のどの条件より厳しいと言える。

3.3 走査型電子顕微鏡による破面観察

Fig.15 . a~cにJA, FA, FB各銘柄の走査電子顕微鏡による破面写真を示す。いずれの銘柄についても、コークス粒の粒界、粒内の境界が明確でないが、独得のパターンをもっている。このうち、JA, FAについては比較的似ているが、FBはこれらと破面形状がかなり異っている。すなわち、JA, FA黒鉛の破面はどの倍率においても丸みを帯びているが、FB黒鉛の破面は曲面状で、フレーク状である。これらの写真から、FB黒鉛が、JA黒鉛より靱性の高いのは、フレークの変形、破壊の過程が大きく寄与しているように思われる。

4. 結 論

本実験により得られた結果はつぎのとおりである。

- (1) 平均応力拡大係数 K_m = 一定の場合の da/dN の関係
 - イ. 荷重繰返時のきれつ伝播速度は金属材料と同様 $da/dN = C \cdot \Delta K^n$ で表わすことができる。
 - ロ. きれつ伝播速度 da/dN の大小の順序は $FA > JA > FB$ である。この原因として、コークス粒径の影響も考えられたが、本実験で用いた3銘柄は製造法も原料も異なることから直接比較することができなかった。結果のみからは粒子径に関係がないと言える。
 - ハ. きれつ伝播速度 da/dN の大小は、素材ブロックでのきれつ進行方向と一定の関係がある。
- (2) きれつ伝播速度 da/dN と ΔK の関係に対する平均応力拡大係数 K_m および最大応力拡大係数 K_{max} の影響
 - イ. K_{min} = 一定の場合の da/dN は、 K_m = 一定の場合の da/dN より大きい。 $(\Delta K = \text{一定のとき})$ これは K_{max} および K_m の影響が大きいことを示す。
- (3) きれつの観察結果
 - イ. 繰返応力下におけるきれつ進行経路は、JA, FAは直線的で、FBはジグザグである。
 - ロ. 走査型電子顕微鏡による破面の観察結果、JA, FAは小粒状であり、FBは曲面的である。この表面の相違がきれつ伝播速度 da/dN に影響があると考えられる。

今後の問題として次のことが考えられる。

K_{min} = 一定の実験から得られる $da/dN - \Delta K$ の関係は、設計への応用の立場からは安全側のデータとして用いることができよう。今後は、さらに平均応力拡大係数 K_m の効果を含んだ関係式 $da/dN = F(K_m, \Delta K)$ を明らかにする必要がある。

また、実験に用いた材料中、きれつが伝播成長を開始する ΔK が、他の試験片の平均値 $2/3$ を下廻る試験片もあった。すなわち、同一ブロック中で他の機械的強度以上のばらつきがあることが明確となった。今後、この点に十分注意を払った材料の製造および品質保証が肝心である。それだけに本研究にもデータの統計的処理法の導入が必要であろう。

参 考 文 献

- (1) A.G.Evans : A method for evaluating the time-dependent failure characteristics of brittle materials and its application to polycrystalline alumina, Journal of Materials Science 7 (1972) 1137—1146
- (2) P.H.Hodkinson, J.S.Nadeau : Slow crack growth in graphite, Journal of Materials Science 10 (1975) 846—856
- (3) S.W.Freiman, J.J.Mecholsky : Effect of temperature and environment on crack propagation in graphite, Journal of Materials Science 13 (1978) 1249—1260
- (4) P.Marshall, E.K.Priddle : Room temperature fatigue crack propagation in reactor graphite, Carbon 11 (1973) 541—546
- (5) P.B.Crosley, E.J.Ripling : Use of crack-line-loaded specimens for measuring plane-strain fracture toughness, Journal of Materials Vol. 2 No. 3 (1967) 661

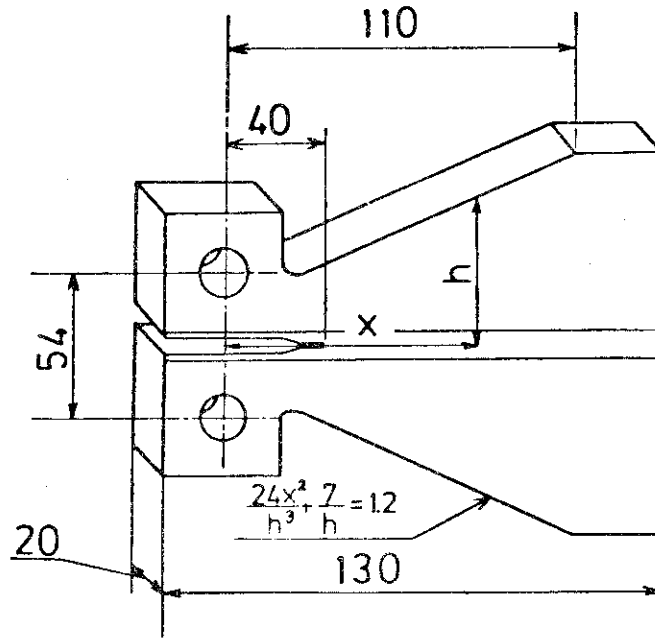


Fig. 1 Double Cantilever Beam (DCB) Specimen.

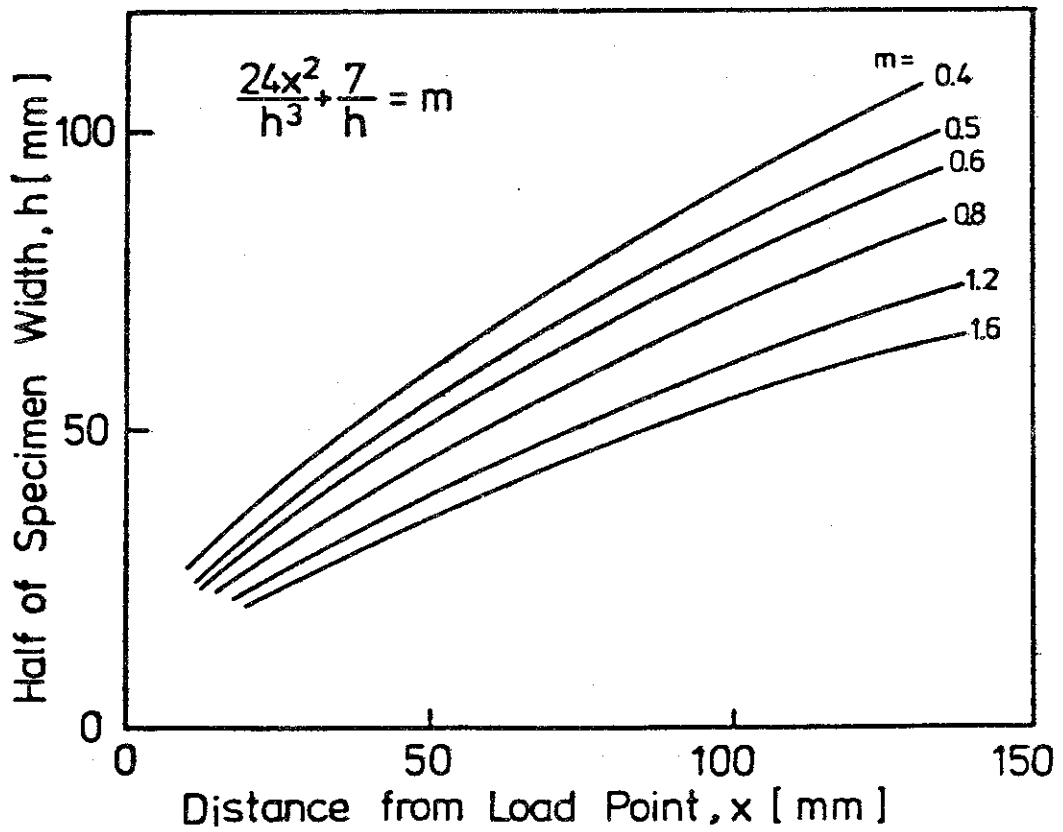


Fig. 2 Shape of the side curve of the DCB specimen.

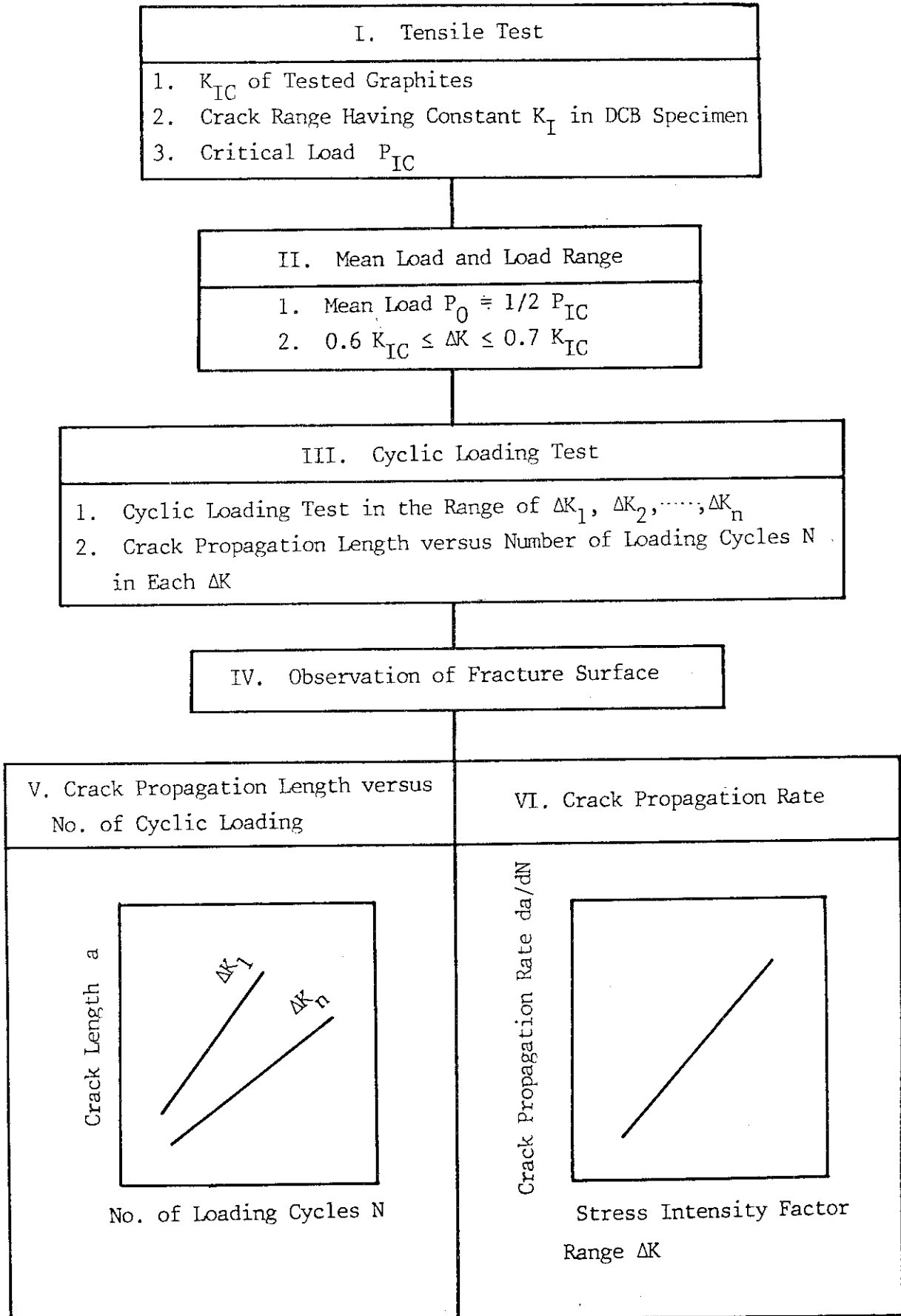


Fig. 3 Experimental Procedure

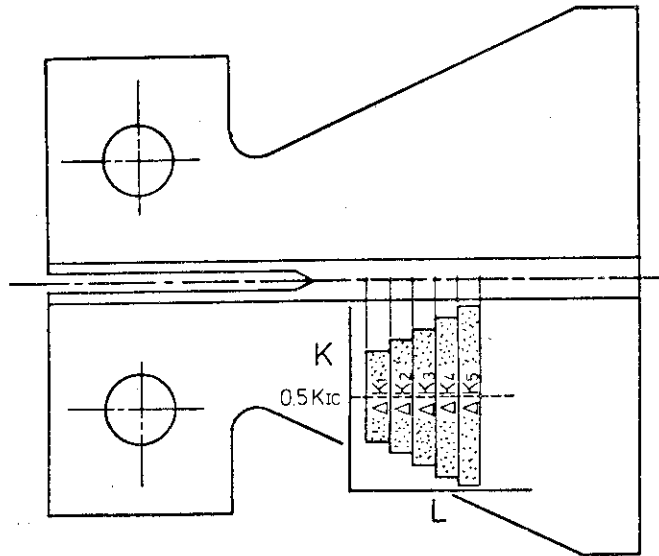


Fig. 4 Crack length and cyclic loading condition.

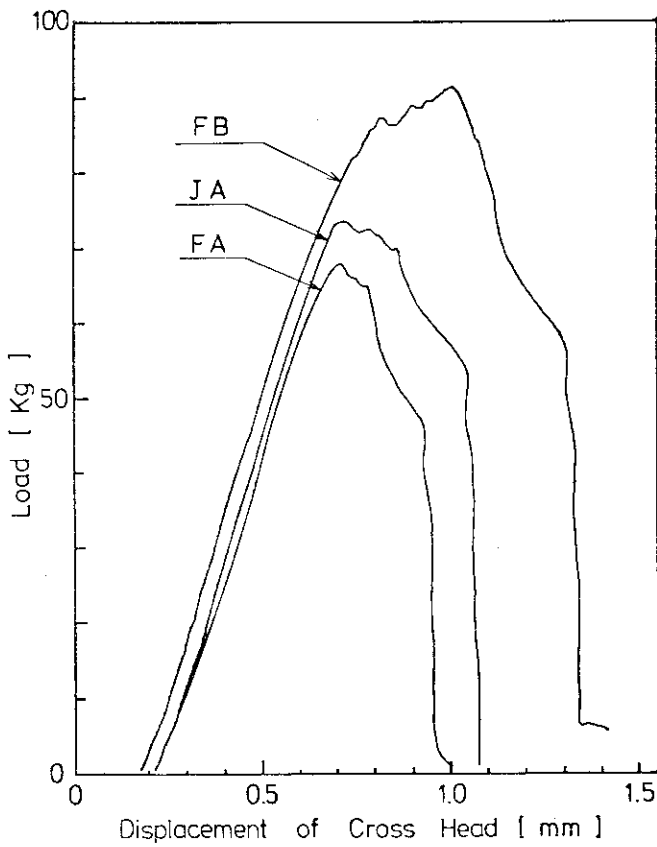


Fig. 5 The relationship between load and displacement of crosshead, obtained from the static tensile test.

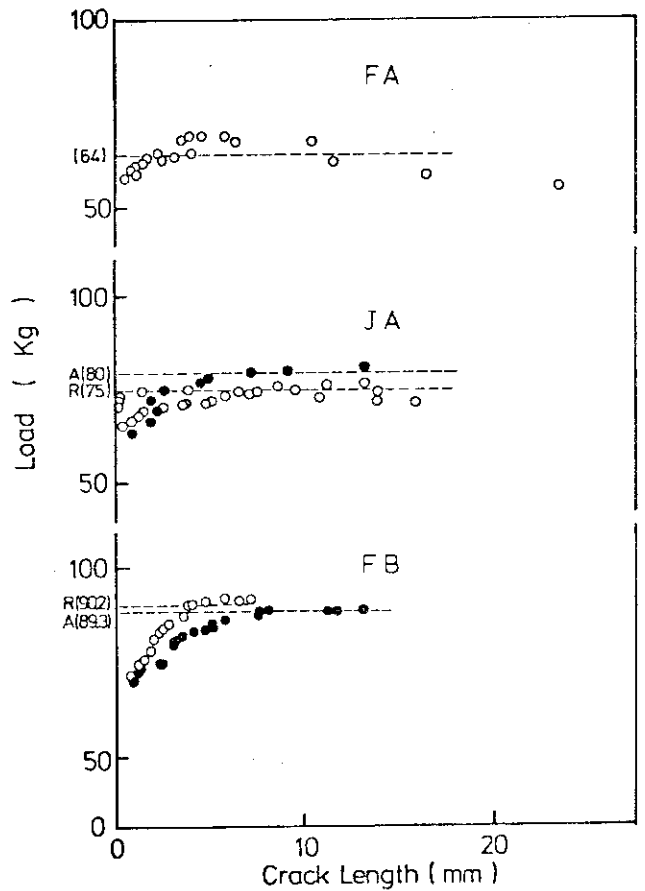
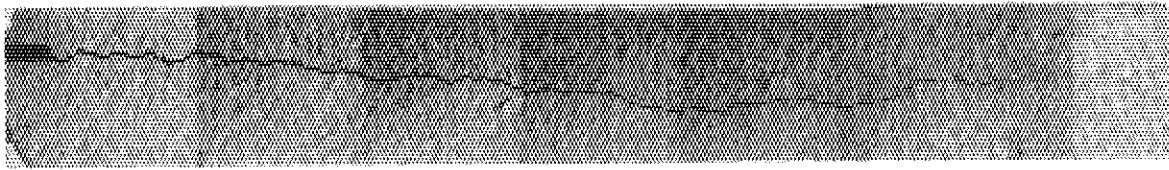
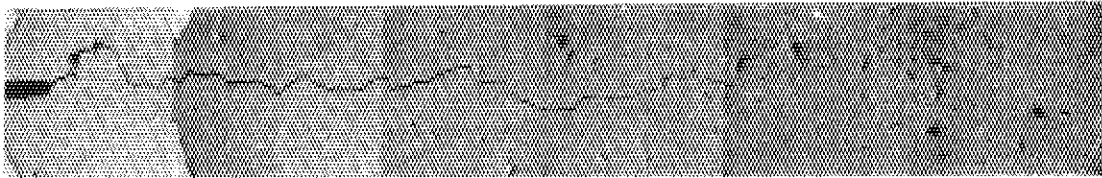


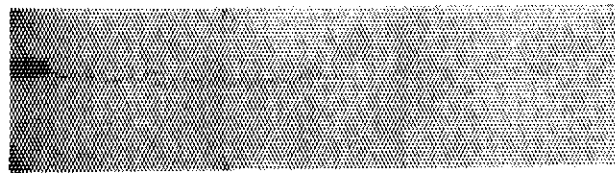
Fig. 6 The relationship between load and crack length for each graphite.



JA



FB



FA

2mm

Fig.7 Appearance of crack propagation for each graphite.

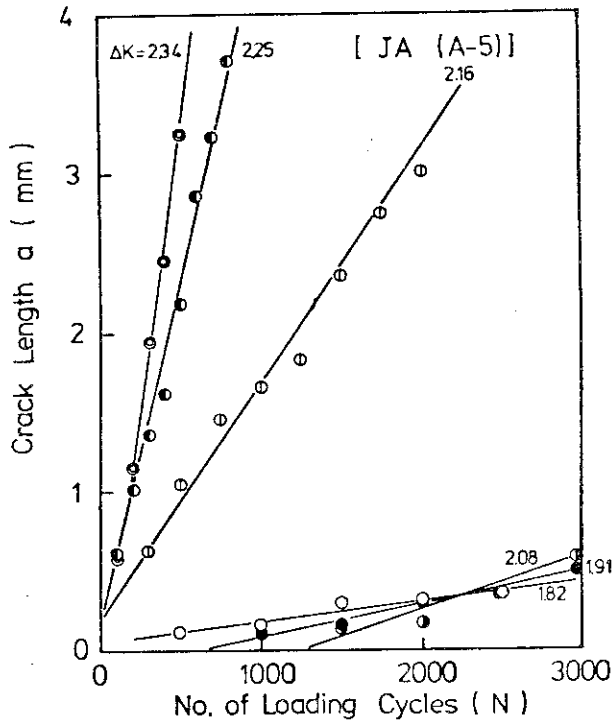


Fig. 8. a Number of loading cycles versus crack length relation for JA (A-5) graphite.

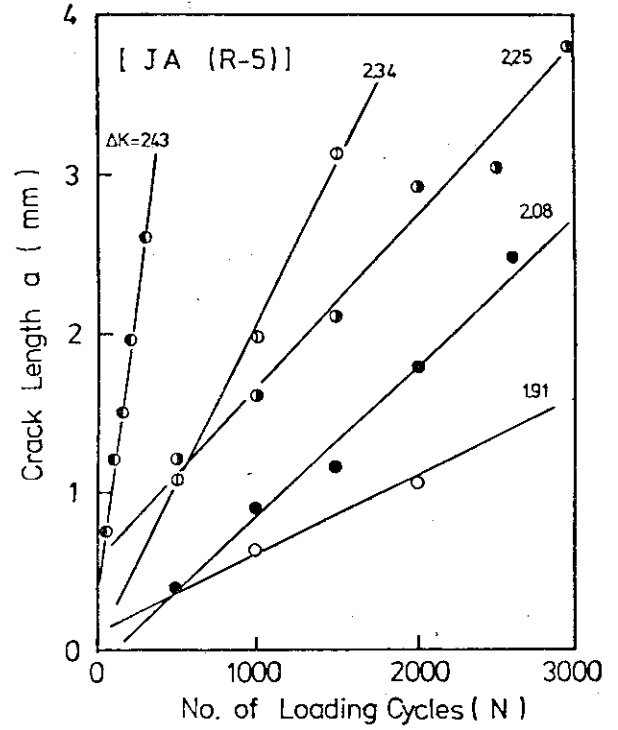


Fig. 8. b Number of loading cycles versus crack length relation for JA (R-5) graphite.

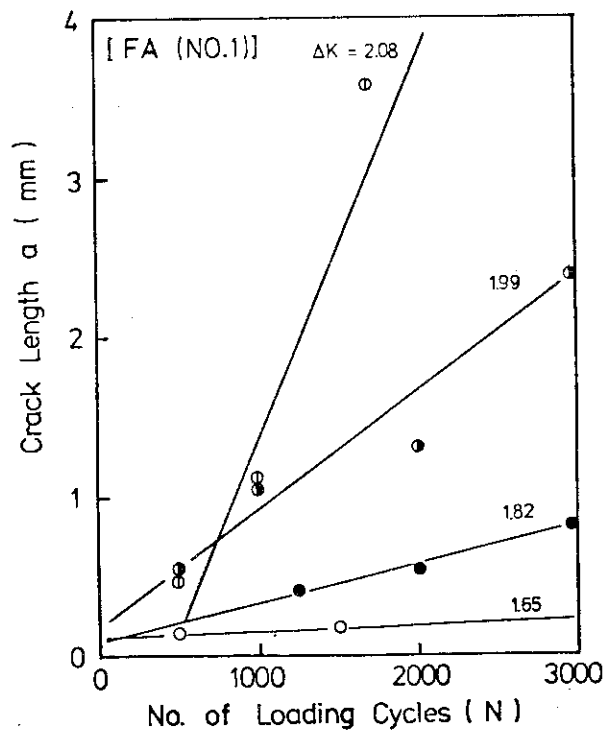


Fig. 8. c Number of loading cycles versus crack length relation for FA (No.1) graphite.

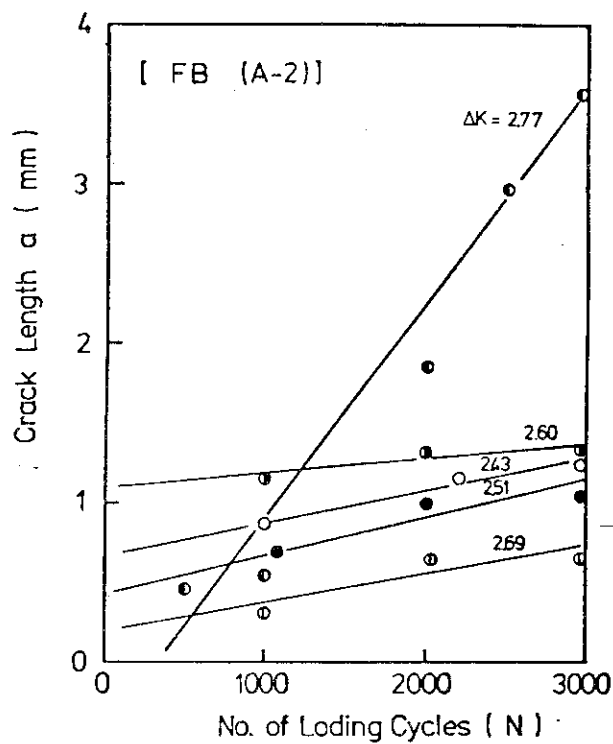


Fig. 8.d Number of loading cycles versus crack length relation for FB (A-2) graphite.

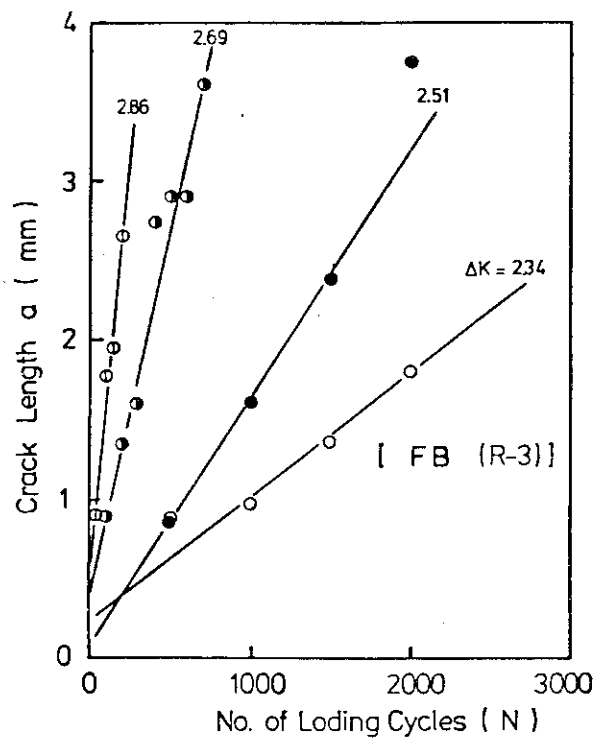


Fig. 8.e Number of loading cycles versus crack length relation for FB (R-3) graphite.

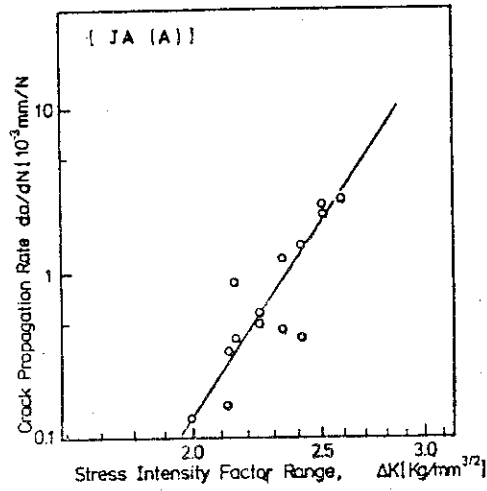


Fig. 9. a Crack propagation rate versus stress intensity factor range relation for JA (axial) graphite.

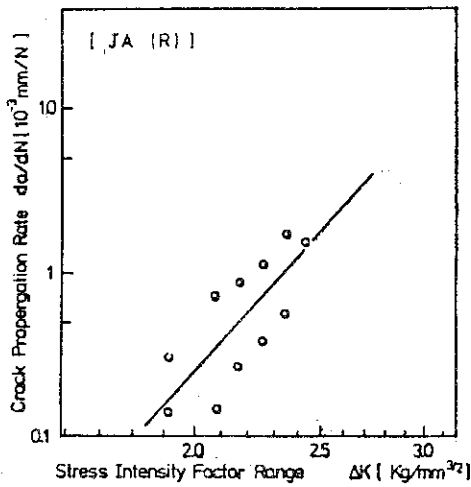


Fig. 9. b Crack propagation rate versus stress intensity factor range relation for JA (radial) graphite.

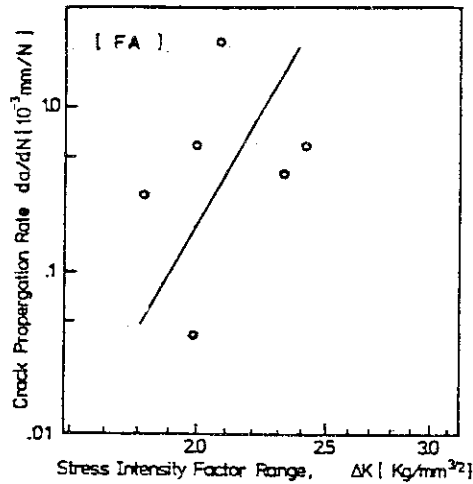


Fig. 9. c Crack propagation rate versus stress intensity factor range relation for FA graphite.

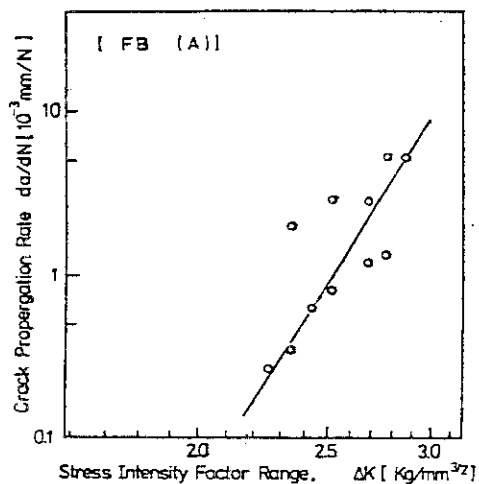


Fig. 9. d Crack propagation rate versus stress intensity factor range relation for FB (axial) graphite.

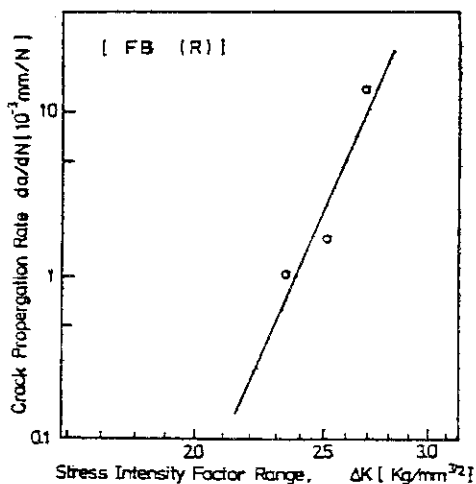


Fig. 9. e Crack propagation rate versus stress intensity factor range relation for FB (radial) graphite.

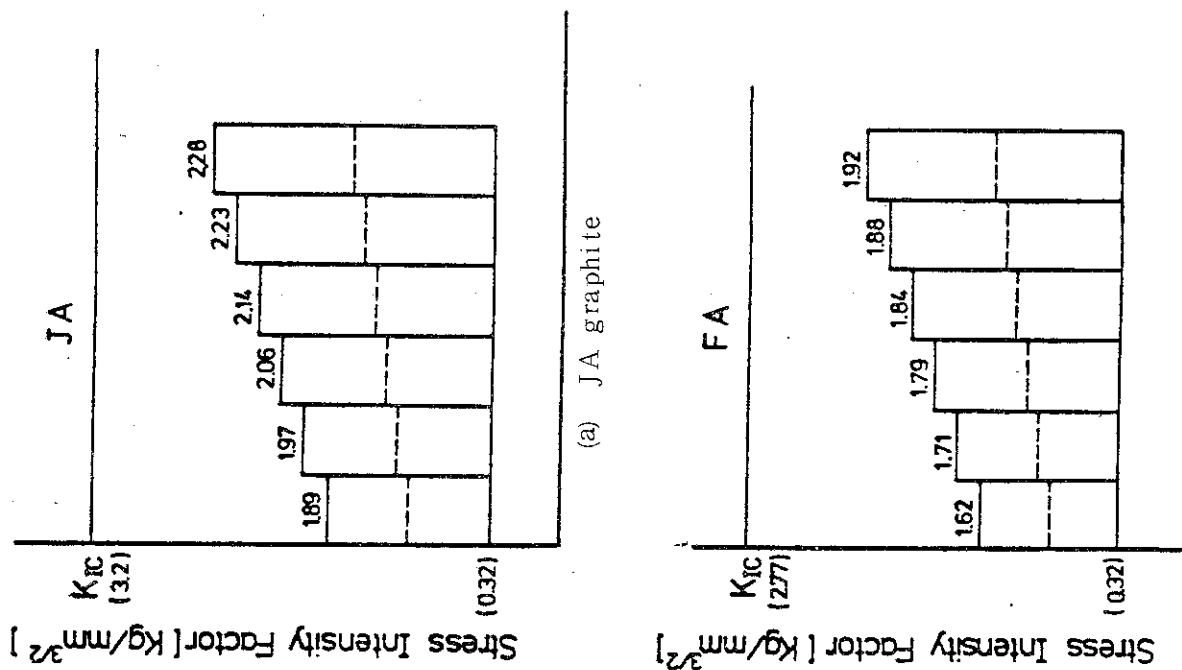


Fig. 11. The cyclic loading condition that the minimum stress intensity factor, K_{min} , is constant.

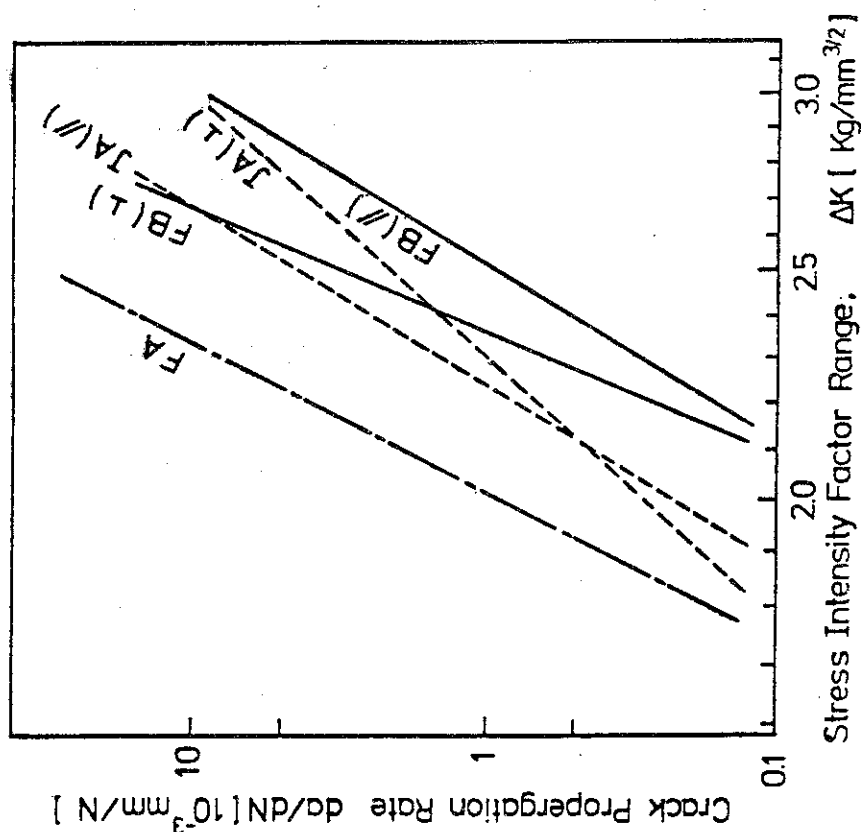


Fig. 10 Crack propagation rate versus stress intensity factor range relation for the tested graphites.

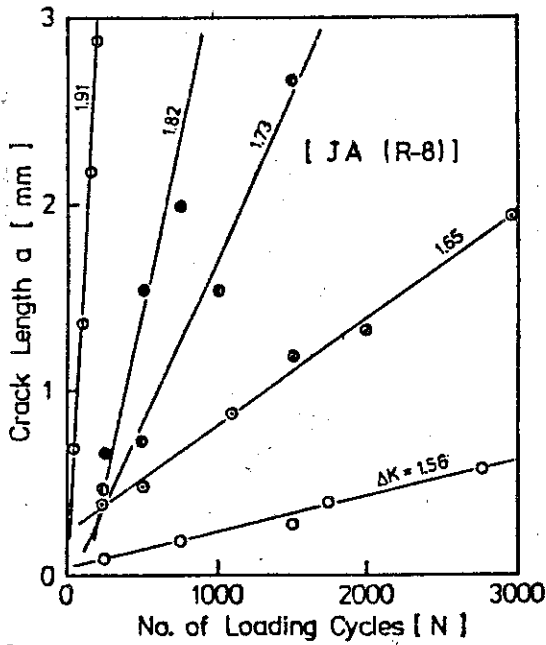


Fig. 12 Crack length versus number of loading cycles relation for JA (R-8) graphite under the condition that $K_{min} = \text{const.}$

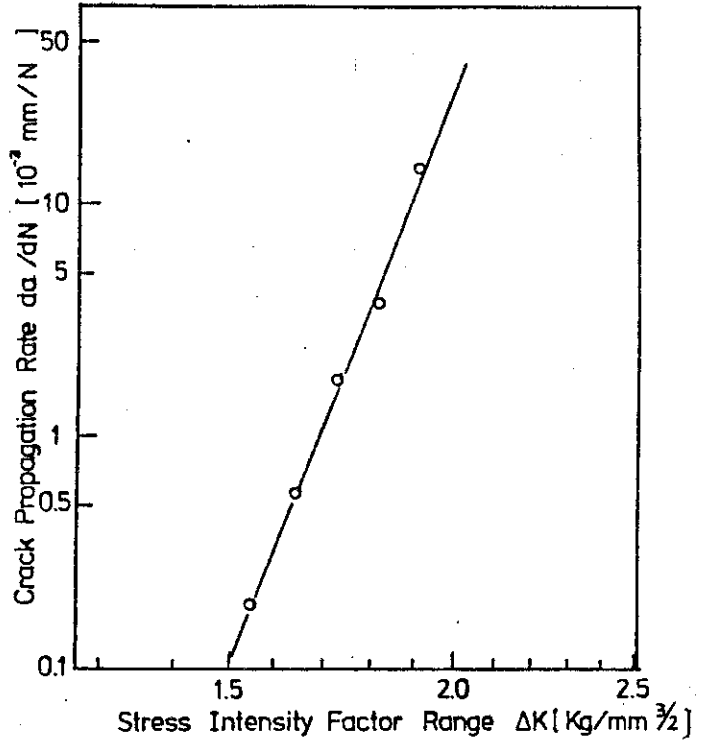


Fig. 13 Crack propagation rate versus stress intensity factor range relation for JA graphite under the condition that $K_{min} = \text{const.}$

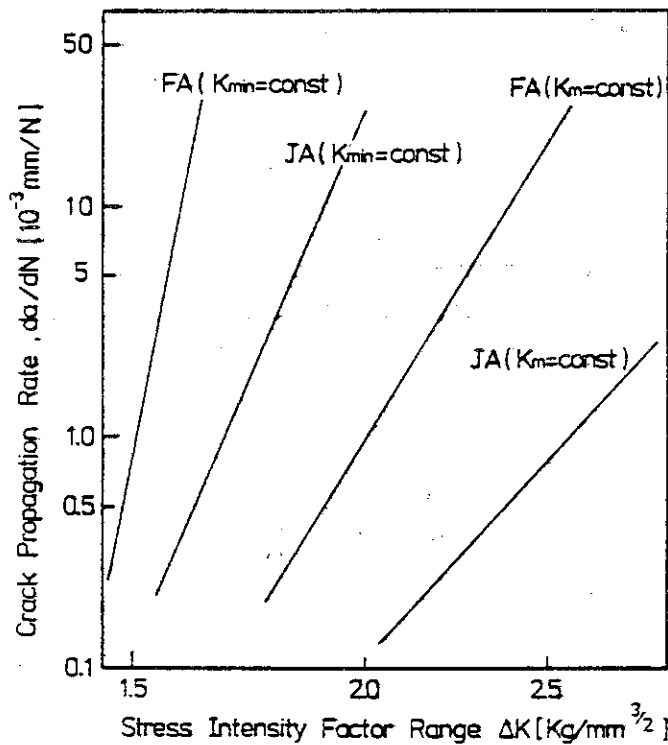
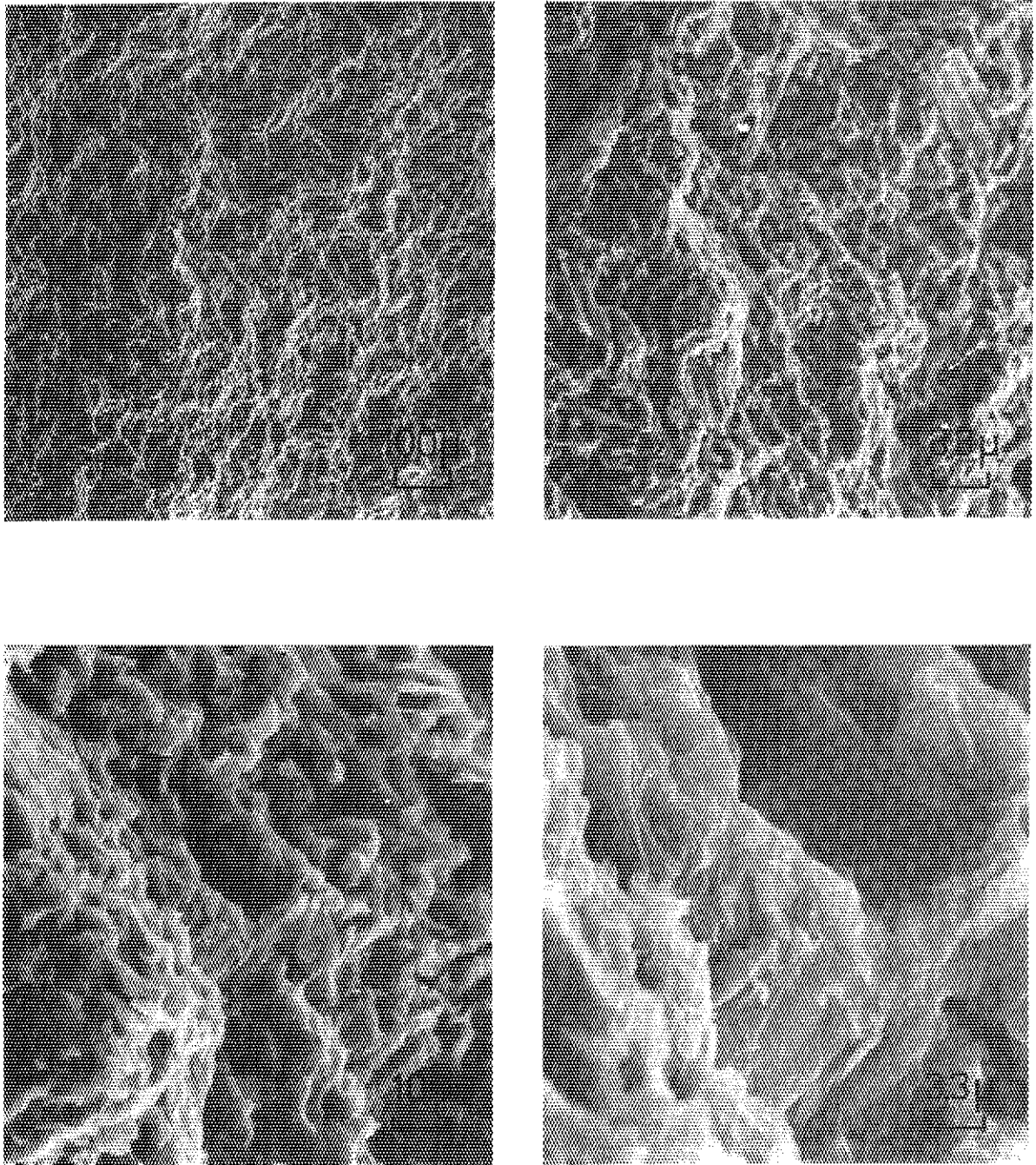
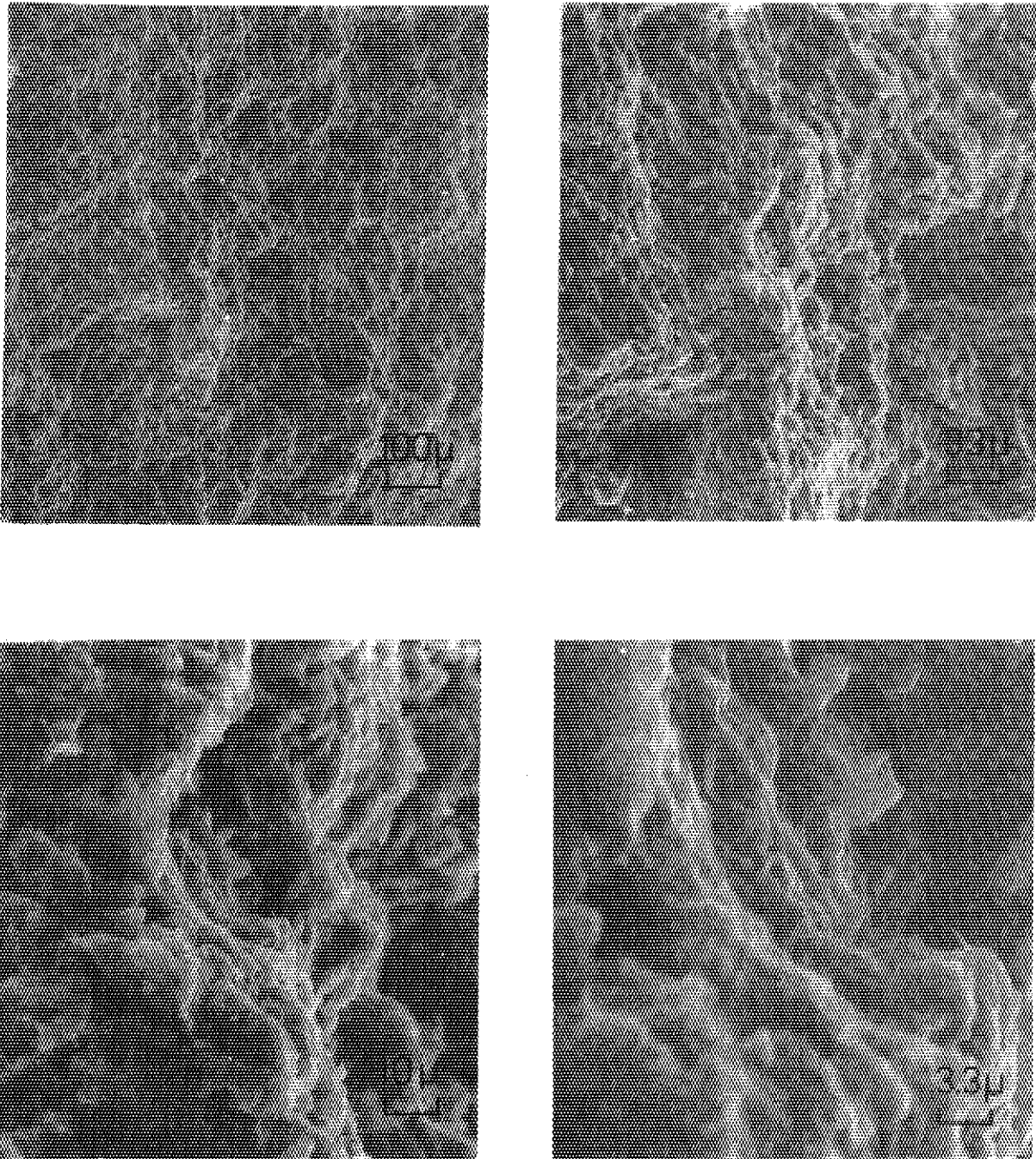


Fig. 14 The effect of cyclic loading conditions on the crack propagation rate versus stress intensity factor range relation.



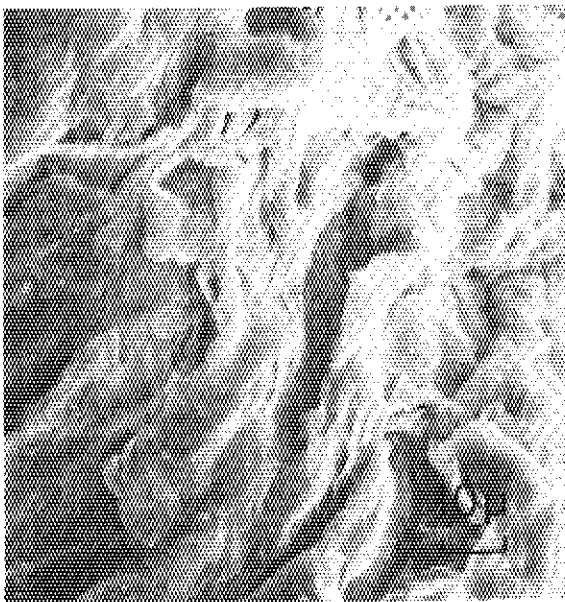
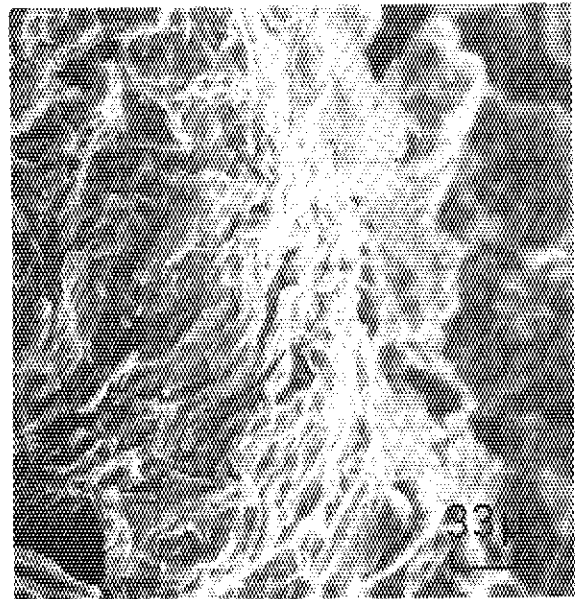
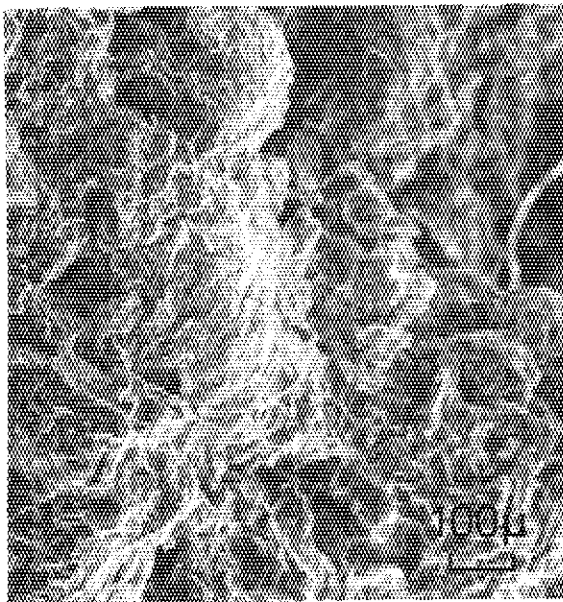
JA

Fig. 15. a Appearances of fracture surface of JA graphite by scanning electron microscope.



FA

Fig. 15. b Appearances of fracture surface of FA graphite by scanning electron microscope.



FB

Fig. 15.c Appearances of fracture surface of FB graphite by scanning electron microscope.

Table 1 Physical and mechanical properties of tested graphites.

		JA		FA		FB	
		A	R	A	R	A	R
Grain Size	μm	20		<70		<1700	
Density	g/cm^3	1.76		1.76		1.77	
Young's Modulus	Kg/mm^2	0.95×10^3	0.97×10^3	1.16×10^3	1.16×10^3	0.95×10^3	0.99×10^3
Poisson's Ratio		0.15					
Tensile Strength	Kg/mm^2	3.45	2.95	2.68	2.61	1.68	1.53
Compressive Strength	Kg/mm^2	8.90	8.94	9.75	9.58	5.44	5.23
Bending Strength	Kg/mm^2	4.40	3.92	3.34	3.46	2.80	2.55
Electrical Resistivity	$10^{-6} \Omega\text{m}$	9.99	9.60				
Thermal Conductivity	$\text{cal/cm}\cdot\text{s}\cdot^\circ\text{C}$	0.279	0.289			0.34	0.37
Coefficient of Thermal Expansion	$10^{-6}/^\circ\text{C}$	4.1	3.9			3.5	3.7
B A F		1.05		1.04		1.13	

Table 2 Cyclic loading condition

Item	Unit	Graphite		
		JA	FA	FB
Input load wave shape	—	Sine wave	Sine wave	Sine wave
Mean load	kg	35	30	45
Cyclic load range	"	44 ~ 62	38 ~ 58	50 ~ 66
Mean stress intensity factor	$\text{kg/mm}^{\frac{3}{2}}$	1.52	1.30	1.95
Stress intensity factor range	"	1.91 ~ 2.69	1.65 ~ 2.51	2.17 ~ 2.86
Cyclic rate	Hz	1	1	1

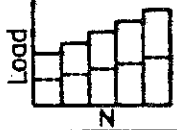
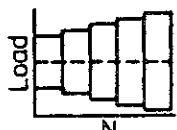
Table 3 Critical stress intensity factor, K_{IC} .

Graphite		P_{IC} (Kg)	K_{IC} (Kg/mm ^{3/2})
JA	A	80	3.46
	R	75	3.25
FB	A	89.3	3.87
	R	90.2	3.91
FA		64.0	2.77

Table 4 Material constants, C and n, in $da/dN = C \cdot \Delta K^n$ for three brands of graphite.

Graphite		$da/dN = C \cdot K^n$ (1)		$da/dN = C \cdot \Delta K^n$ (2)	
		n	C	n	C
JA	A	12.9	291×10^{-8}	14.2	1.03×10^{-8}
	R	8.7	7.14×10^{-7}	8.7	2.66×10^{-7}
FB	A	12.9	6.19×10^{-9}	28.5	2.18×10^{-13}
	R	18.9	8.40×10^{-11}	12.5	1.94×10^{-8}
FA		15.2	2.31×10^{-8}	13.5	8.56×10^{-8}

Table 5 The effect of cyclic loading conditions on $da/dN = C \cdot \Delta K^n$ for JA and FA graphites.

Condition	Graphite	$da/dN = C \cdot \Delta K^n$	
		n	C
	JA	19.3	4.5×10^{-8}
	FA	43.5	1.7×10^{-11}
	JA	8.7	2.7×10^{-7}
	FA	13.5	8.6×10^{-8}