

# 窒化けい素の2段繰返し変動荷重下における疲労き裂進展挙動に及ぼす荷重振幅比の影響

大阪大学  
大阪大学[院]  
大阪大学

菅田 淳  
○田中克幸  
城野政弘

大阪大学  
大阪大学[院]  
植松美彦  
有本好孝

## 1 緒言

セラミックスは、従来の金属材料に比べて軽量で、耐熱性に優れている。特に窒化けい素( $\text{Si}_3\text{N}_4$ )は、他のセラミックスよりも強度、破壊じん性値が高く、耐熱性や耐熱衝撃性にも優れるため、構造用材料として期待されており、様々な研究がなされてきている。その中で繰返し疲労き裂進展に関する研究も行われているが、多くは一定振幅荷重試験であり、変動荷重下における検討は少ない。また窒化けい素では荷重変動によりき裂進展速度の加速現象が生じ、実用の際には危険側へと働くことが報告されており<sup>1)</sup>、変動荷重試験が重要となる。そこで本研究では、低レベル荷重下での応力比および頻度比を一定とした条件下で、 $K_{\min}$  値一定の2段繰返し変動荷重試験を行い、変動荷重下でのき裂進展挙動に及ぼす荷重振幅比の影響について検討した。

## 2 供試材料および試験方法

供試材料としては、(株)日本特殊陶業製のガス圧焼結窒化けい素(EC-141)を用いた。また試験片にはシェブロンノッチを設けた CT 試験片を利用し、き裂長さおよび開口点は背面ひずみゲージによる除荷弾性コンプライアンス法により測定した。試験には容量 1960N の小型電気油圧サーボ疲労試験機を用い、繰返し速度を 1.6Hz として温度 25°C、湿度 60% に保った一定環境槽中で試験を行った。

## 3 試験結果および考察

### 3.1 一定振幅荷重試験

2 段繰返し変動荷重下でのき裂進展速度を評価するため、まず  $K_{\max}$  漸増の一定振幅荷重試験を行った。 $da/dn$ - $K_{\max}$  関係を Fig. 1 に示す。3 本の試験片(TP1~3)を用いて同一条件下の試験を行っているが、いずれの試験結果もほぼ一致している。しかし、TP2 のみ他の 2 つの結果より若干低速側に位置している。これは各試験片間で、結晶粒の配向性や大きさにわずかに差異があるためであると考えられる。本試験ではそのよ

うな試験片間のわずかな差異の影響を取り除くため、以降の 2 段繰返し変動荷重試験は、一定振幅荷重試験に引き続いて実施し、例えば TP1 の変動荷重試験の結果は、同一の TP1 における一定振幅荷重試験の結果と比較している。

### 3.2 $K_{\min}$ 値一定の 2 段繰返し変動荷重試験

試験条件を Table 1 に示す。低レベル応力比  $R_L = 0.1$ 、頻度比を 1:100 に固定し、荷重振幅比 1.125 と 1.2 の二通りについて、 $K_{L\max}$  を変化させた試験を行った。

Table 1 Test condition under variable amplitude loading.

Test number	Test number	$K_{L\max}(\text{MPam}^{1/2})$	$\frac{\Delta K_H}{\Delta K_L}$	$R_L$	$N_H : N_L$
TP1	Test 1	4.0, 4.1, 4.2, 4.3	1.125	0.1	1 : 100
TP2	Test 2	3.9, 4.2, 4.4, 4.7			
	Test 3	3.9, 4.2, 4.4	1.2		
TP3	Test 4	4.0, 4.1, 4.2, 4.3			

低レベル荷重下でのき裂進展速度 $(da/dn)_L$ とき裂長さとの関係の例として、Test 3 の結果を Fig. 2 に示す。なお、 $(da/dn)_L$  は次式により求めた。

$$(da/dn)_L = \{da/dn \times (N_H + N_L) - (da/dn)_H \times N_H\} / N_L \quad (1)$$

ここで  $da/dn$  は 2 段繰返し変動荷重試験における平均き裂進展速度であり、 $(da/dn)_H$  は一定振幅荷重試験の結果から、高レベル荷重と同じ条件の進展速度として求めたものである。また、図中の破線は、低レベル荷重と同条件における一定振幅荷重試験の結果である。2 段繰返し変動荷重下では、 $(da/dn)_L$  が一定振幅荷重試験に比べて加速していることがわかる。Fig. 3 は Test 3 での 1 ブロック中の開口点の変化を表しているが、高レベル荷重負荷により  $K_{op}$  は一旦低下し、その後徐々に増加して定常となっている。すなわち高レベル荷重負荷により、

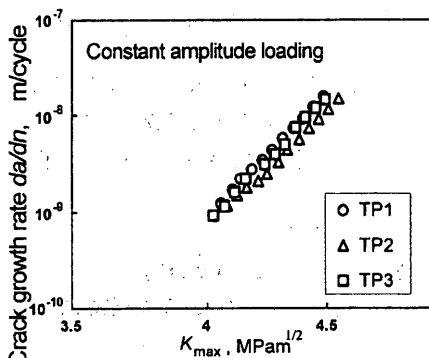


Fig. 1 Relationship between  $da/dn$  and  $K_{\max}$ .

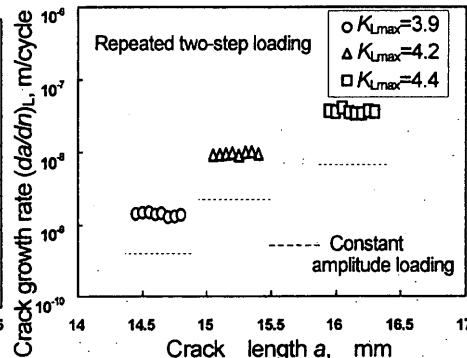


Fig. 2 Relationship between  $(da/dn)_L$  and  $a$  (Test 3).

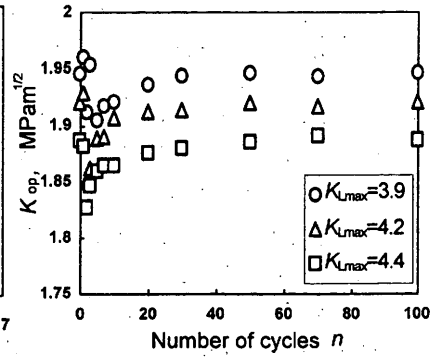


Fig. 3 Variation of  $K_{op}$  in one block (Test 3).

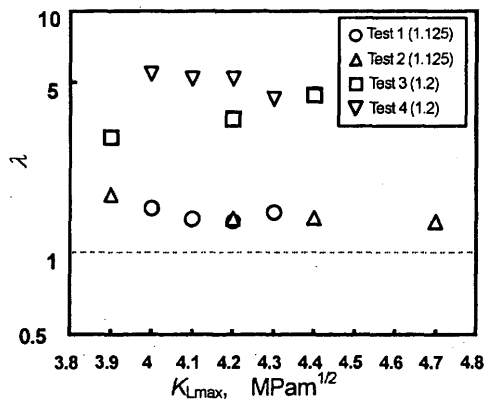


Fig. 4 Relationship between  $\lambda$  and  $K_{Lmax}$ .

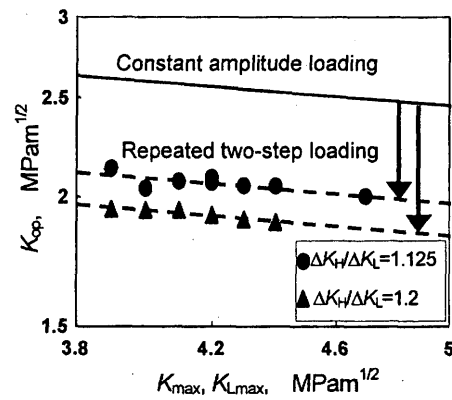


Fig. 5  $K_{op}$  in variable amplitude loading

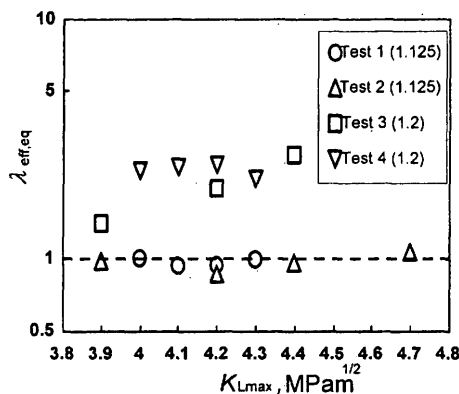


Fig. 6 Relationship between  $\lambda_{eff,eq}$  and  $K_{Lmax}$ .

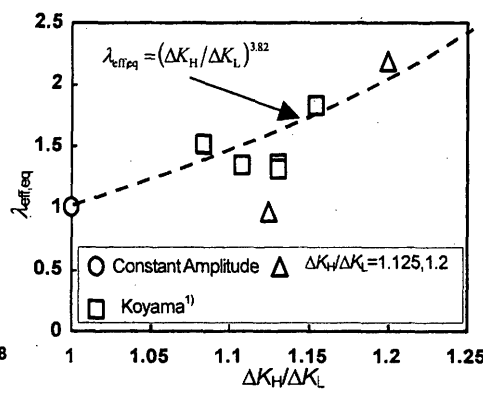


Fig. 7 Relationship between  $\lambda_{eff,eq}$  and  $\Delta K_H/\Delta K_L$ .

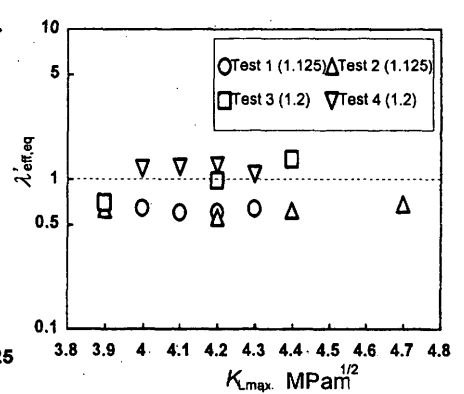


Fig. 8 Relationship between  $\lambda'_{eff,eq}$  and  $K_{Lmax}$ .

インターロッキングと呼ばれるき裂上下面の結晶粒のかみ合い部分の破砕が促進されるために、変動荷重下では加速が生じていると考えられる。

加速の程度を表すパラメータとして、き裂進展速度比 $\lambda$ について考える。 $\lambda$ は次式で与えられる。

$$\lambda = v/v^* \quad (2)$$

ここで $v$ は実際のき裂進展速度、 $v^*$ は一定振幅荷重試験の結果から推定したき裂進展速度を表す。 $\lambda$ と $K_{Lmax}$ の関係をFig. 4に示す。荷重振幅比が大きいほうが $\lambda$ の値は大きく、より加速していることがわかる。また同じ荷重振幅比であれば、 $\lambda$ はほぼ一定の幅に収まっており、 $K_{Lmax}$ に依存していないと考えられる。ここで、Fig. 5に各試験での $K_{op}$ - $K_{max}$ 関係を示す。図中の実線および破線はそれぞれ一定および変動荷重下の $K_{op}$ の変化を表している。まず荷重振幅比が大きくなると、一定振幅荷重試験の結果に比べて $K_{op}$ の低下量が大きくなっている。これは、高レベル荷重負荷によるインターロッキング部分の破砕が大きいためであり、そのために荷重振幅比が大きい方が $\lambda$ 値も大きい。一方荷重振幅比が同一であれば、一定振幅荷重試験結果からの $K_{op}$ の低下量は $K_{Lmax}$ に依存せずにほぼ一定となっている。したがって、荷重振幅比が等しい場合、 $\lambda$ は $K_{Lmax}$ によらずほぼ一定となると考えられる。

しかしFig. 4における $\lambda$ の値はすべて1以上となっており、eq. (2)は危険側の予測を与えている。そこで実際のき裂進展速度と、等価有効応力拡大係数範囲 $\Delta K_{eff,eq}$ を用いて推定したき裂進展速度との比 $\lambda_{eff,eq}$ を求めた。ここで $\Delta K_{eff,eq}$ は、き裂進展速度に及ぼす $\Delta K_{eff}$ と $K_{max}$ の両方の影響を考慮したパラメータである<sup>1)</sup>。本材の場合、 $\Delta K_{eff,eq}$ は次式で表される<sup>2)</sup>。

$$\Delta K_{eff,eq} = K_{max}^{\gamma} \Delta K_{eff}^{(1-\gamma)}, \gamma = 0.89 \quad (3)$$

$\lambda_{eff,eq}$ と $K_{Lmax}$ の関係をFig. 6に示す。 $\Delta K_H/\Delta K_L = 1.125$ のときは $\lambda_{eff,eq} \approx 1$ となっており、適当な速度予測ができていたが、 $\Delta K_H/\Delta K_L = 1.2$ のときは $\lambda_{eff,eq}$ が1.5~2.5程の値となっており、危険側の予測となっている。したがって $K_{op}$ を用いた整理でも進展速度の予測は難しい。

そこで、荷重振幅比を用いた進展速度予測方法について検討した。Fig. 7に $\lambda_{eff,eq}$ と荷重振幅比の関係を示す。荷重振幅比が増加すると $\lambda_{eff,eq}$ も増加する傾向が見られる。したがってこの増加傾向を表す近似式を求めると、以下のような経験式が得られる。

$$\lambda_{eff,eq} = (\Delta K_H/\Delta K_L)^{3.82} \quad (4)$$

この経験式を用いて次式のように $\lambda_{eff,eq}$ を補正したものをFig. 8に示す。

$$\lambda'_{eff,eq} = \frac{\lambda_{eff,eq}}{(\Delta K_H/\Delta K_L)^{3.82}} \quad (5)$$

この補正により全体として $\lambda'_{eff,eq}$ は1に近づくが、この式の物理的意味は明確でない。また、例えば応力比や頻度比などを変えた場合にeq. (5)が適用できるかなども不明であり、今後の検討が必要である。

#### 参考文献

- 1) 小山, 菅田, 植松, 城野, 材料, 46-12, 1409(1997).
- 2) 城野, 菅田, 植松, 小山, 本間, 田中. 第46回材研連講演論文集, 177(2002).

結言省略