高じん性アルミナのき裂面架橋に及ぼす負荷応力拡大係数の影響

Effect of Applied Stress Intensity Factor on Crack Face Bridging in Toughened Alumina

○学 成田 康一郎 (静大院) 正 坂井田 喜久 (静大工)

Koichiro NARITA and Yoshihisa SAKAIDA, Shizuoka University, 3-5-1 Johoku Naka-ku, Hamamatsu 432-8561, Japan

Key Words: Toughened Alumina, Crack Face Bridging, Stress Intensity Factor, Fracture Toughness

1. 緒言

近年, セラミックスの微構造を積極的に制御することによって高じん化を達成する材料プロセスが開発¹⁾²⁾されている. 特にアルミナのような粒界破壊が支配的な材料は, き裂面の粒子架橋によって高じん化を達成している. 本研究は, 通常アルミナの約2倍のじん性値を持つ高じん性アルミナに注目し, き裂開口変位の測定とき裂モデルの有限要素法解析によって, き裂面架橋が架橋力分布や高じん化に及ぼす影響について検討した.

2. 実験および解析方法

2.1 供試材及び試験片 供試材は, ホットプレス焼結アルミナ (以下 TAL, 産総研製) で, 表 1 に主な機械的性質を示す. 実験には幅 3mm×厚さ 4mm×長さ 40mm の短冊試験片中央に Pop-in き裂を導入した片側き裂試験片を用いた. なお, 試験片のき裂先端には図 1 に示す直交座標系 xyz を定義した.

Table.1 Mechanical properties and initial crack lengths of sample.

Young's modulus E (MPa)	384
Poisson's ratio	0.24
Fracture toughness K_{IC} (MPa $m^{0.5}$)	8.0
Bending strength σ_B (MPa)	400
Crack length of side-1 (mm)	1.72
side-2 (mm)	1.83

Fig.1 Definition of coordinate system.

2.2 き裂側面の開口変位測定 片側き裂試験片に表 2 に示すような一定の曲げモーメントを負荷して走査型電子顕微鏡 (日本電子製) 内に挿入し, き裂側面の開口状態を写真撮影した. き裂開口変位 $\delta_{EXP}(x)$ は, き裂先端から 5 μ m 間隔で SEM 写真から計測し, 25 μ m 毎の平均値で整理した.

片側き裂試験片の負荷応力拡大係数 K_{app} は,

$$K_{app} = \frac{3P(S_1 - S_2)}{2BW^2} F(\alpha) \sqrt{\pi a} \quad (1)$$

より求めた³⁾. 上式で, P は四点曲げ荷重, S_1 は外スパンで 36mm, S_2 は内スパンで 20mm, B は試験片幅, W は試験片厚さである. なお, $F(\alpha)$ は次式より求まる形状係数である⁴⁾.

$$F(\alpha) = \sqrt{\frac{2}{\pi\alpha} \tan\left(\frac{\pi\alpha}{2}\right)} \frac{0.923 + 0.199 \left(1 - \sin\left(\frac{\pi\alpha}{2}\right)\right)^4}{\cos\left(\frac{\pi\alpha}{2}\right)} \quad (2)$$

Table.2 Loading conditions for in-situ measuring COD.

	1	2	3	4
K_{app} / K_{IC} (%)	60	65	55	70
K_{app} (MPa $m^{0.5}$)	4.8	5.2	4.4	5.6
Applied load P (N)	102	111	94	119

2.3 き裂モデルの作成と 3 次元有限要素法解析 図 2 に示すような片側き裂試験片の 1/2 モデルを有限要素法上に作成し, き裂開口変位の実測値と比較しながら架橋力分布やき裂

面架橋による応力遮へい効果を破壊力学的に見積もった⁵⁾⁶⁾. 詳細は次章で述べる. 解析には, 市販ソフト ANSYS を用い, き裂モデルは, 実験に用いた片側き裂試験片と同一形状, 同一き裂長さに設定した.

3. 結果及び考察

3.1 き裂開口変位の測定結果 図 3 は, 負荷条件 1 にて, SEM 観察により実測したき裂開口変位分布 $\delta_{EXP}(x)$ と, き裂面に相互作用のない場合に FEM 解析により求めた $\delta_0(x)$ を示す. 図より, $\delta_{EXP}(x)$ は, $\delta_0(x)$ に比べて明らかに開きが少なく, TAL のき裂面に, K_{app} に対してき裂先端の引張応力を遮へいする相互作用が働いていることがわかる.

Fig.2 Finite element model of SEPB specimen.

Fig.3 Comparison of crack opening displacements, $\delta_{EXP}(x)$ and $\delta_0(x)$.

3.2 き裂開口変位と応力拡大係数の関係 き裂先端近傍の開口変位 $\delta_{tip}(x)$ とき裂先端の応力拡大係数 K_{tip} の関係は, 線形破壊力学より次式で表わされる⁴⁾.

$$K_{tip} = E \delta_{tip}(x) \sqrt{2\pi / |x|} / 8 \quad (3)$$

ここで, き裂面に相互作用のないき裂モデルに $P=100N$ (K_{app} に換算すると 4.7MPa $m^{0.5}$) 負荷したときのき裂開口変位 $\delta(x)$ を FEM 解析より求めて上式に代入すると, 図 4(a) に示すように K_{app} と一致しない. そこで, 片側き裂試験片の開口変位 $\delta(x)$ から計算される K_{tip} が K_{app} と一致するような補正式を FEM 解析より求め⁶⁾, 次節の K_{tip} の算出に用いた.

$$K_{tip} = C(x) E \delta(x) \sqrt{2\pi / |x|} / 8 \quad (4)$$

ここで, $C(x)$ は補正係数で, 図 4(a) より $0 < |x|/a_0 < 0.2$ は 5 次, $|x|/a_0 > 0.2$ は 2 次の多項式で近似した. 図 4(b) は, 式(4)より計算した K_{tip} を示す. 図より, き裂全域の開口変位に対し, K_{tip} が算出できることがわかる.

Fig.4 Comparison of K_{tip} with K_{app} in FEM analysis.

3.2 き裂先端の応力拡大係数 K_{tip} の算出 図3より, Pop-in き裂は, き裂面の相互作用によって開口量は狭くなり, き裂先端の応力拡大係数 K_{tip} は K_{app} より小さい.

図5は, 図3のき裂開口変位の実測値を式(4)に代入し, き裂先端から距離に対して K_{tip} の累積平均を計算した結果を示す. 実際のき裂では, き裂面の架橋によって, $|x|/a_0 > 0.2$ で K_{tip} の累積平均が一定値から次第に単調増加する傾向があることがわかる. 本研究では, き裂先端近傍の一定値を図より求め, Pop-in き裂試験片の K_{tip} とした. ここで, き裂面の相互作用, すなわちき裂面の架橋力による応力拡大係数を K_{br} とすると, K_{br} は, $K_{br} = K_{tip} - K_{app}$ となる⁴⁾. よって, 図5より求めた K_{tip} から K_{br} が計算できる.

表5は, 表2の4条件で P を負荷したときの開口変位から求めた K_{tip} と K_{br} をそれぞれ示す. K_{br} 値は K_{app} の約73~87%と高く, K_{app} に対する応力遮へい効果が非常に高いことがわかる.

一方, 図6は, K_{app} に対する K_{br}/K_{app} の変化を示す. K_{br}/K_{app} 値は K_{app} の増加とともに低下する傾向があることがわかる. すなわち, K_{app} が増加すると, 後述するように, 架橋力は一部増加するが, 開口量の増加によってき裂面の架橋が一部外れることを示している.

Fig.5 K-values calculated by eq. (4)

Fig.6 Relation between K_{app} and K_{br}/K_{app}

Fig.7 Definition of bridging stress distribution, $\sigma_{br}(x)$.

Table.5 Experimentally-determined K_{tip} and K_{br} .

	1	2	3	4
K_{app}/K_{IC} (%)	60	65	55	70
K_{tip} (MPa $\sqrt{m}$)	0.9	1.1	0.6	1.5
K_{br} (MPa $\sqrt{m}$)	-3.9	-4.2	-3.8	-4.1
K_{br}/K_{app} (%)	81	80	87	73

3.3 架橋応分布 $\sigma_b(x)$ の推定 き裂側面の SEM 観察結果や, き裂先端の応力拡大係数の算出から, き裂面には粒子架橋による架橋力が発生していることは明らかである. そこで, 図7に示すような架橋力分布 $\sigma_{br}(\xi)$ を仮定すると, き裂面の架橋力による応力拡大係数 K_{br} は次式より破壊力学的に計算⁴⁾できる.

$$K_{br} = \frac{2F(\alpha)}{\sqrt{\pi a}} \int_0^a \sigma_{br}(\xi) \sqrt{\frac{a+\xi}{a-\xi}} d\xi \quad (5)$$

本研究では, 図7の架橋力分布 $\sigma_{br}(\xi)$ を任意に変化させ, 式(5)で計算される K_{br} と表5の実験結果が一致する架橋力分布を求めた (推定手順1). 次に, 求めた架橋力分布をき裂モデルのき裂面に荷重条件として与え, 四点曲げ荷重 P を負荷したときのき裂開口変位 $\delta_{FEM}(x)$ を FEM 解析より求め, 図3のような開口変位の実測値 $\delta_{EXP}(x)$ と比較し, 式(6)よりき裂全域の2乗偏差の平均値 μ を求めた (推定手順2). 推定手順1と2を繰返し, 平均値 μ が最小値を示すときの架橋力分布 $\sigma_{br}(x)$ を最適値とした.

$$\mu = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\delta_{FEM}(x) - \delta_{EXP}(x))^2} \quad (6)$$

図8は負荷条件1の開口変位の FEM 解析値と実験値の比較を示す. 式(6)より得た μ は $0.058\mu m$ と十分に小さく, 両者はよく一致しているといえる. これより, き裂面に架橋力を与えることによって開口量の変化を FEM 解析で予測できることがわかる.

Fig.8 Crack opening displacements, $\delta_{FEM}(x)$, $\delta_{EXP}(x)$.

図9は, 表2の4条件における架橋力分布の最適値を, それぞれ比較した. 図より, き裂先端からき裂端にわたるき裂面の全域に架橋力が分布し, その最大値はき裂先端に発生することがわかった.

また, K_{IC} に対する K_{app} が 55%から 60%に増加すると, き裂端の広い領域で架橋応力が増加する傾向がみられた. 一方, 60 から 65%では, 開口量の増加によってき裂面の架橋がき裂端から次第に外れ, き裂端に近い領域の架橋力は低下するが, き裂先端の架橋力が増加して再分布した. 続けて 70%へと増加させると, き裂端よりも前方の領域でも架橋が外れ, き裂先端近傍の架橋力がさらに増加する傾向があることがわかった.

Fig.9 Bridging stress distributions estimated by FEM analysis.

5. 結言 省略

参考文献

- 1) シナジーセラミックス研究体編 “機能共生の指針と材料創成”, p.3 (2000), 技報堂出版.
- 2) 平野真一, 新原皓一, 島田晶彦, 神埼修三, 拓殖章彦, 工業と製品, vol.27,34 (1999).
- 3) Y. Murakami *et al.* Stress Intensity Factors Handbook vol.1, Pergamon Press, p.16 (1987).
- 4) 岡村弘之, 破壊力学と材料強度講座 線形破壊力学入門, p.22, p.40, p.213, p.218 (1980), 倍風館.
- 5) 森祥太郎, 坂井田喜久, 日本材料学会第43回X線材料強度に関するシンポジウム講演論文集, pp.86-91 (2008).
- 6) 成田康一郎, 坂井田喜久, 日本材料学会第45回X線材料強度に関するシンポジウム講演論文集, pp.61-66 (2011).