

名古屋大学工学部 正 ○田中啓介

新潟大学教育学部 正 鈴木賢治

名古屋大学工学部 正 田中拓

1. 緒言

セラミックスの破壊じん性値は金属材料に比して1/10～1/100であるため、限界欠陥寸法も0.1mm以下と小さく長いき裂の破壊力学をそのまま適用できない場合が多い。微視的組織あるいはき裂後方のウェイクの発達によりき裂進展抵抗 K_R が上昇する場合が多く、このため限界欠陥寸法の評価にも、R曲線の特性を考慮することが必要である。従来、工学的手法として欠陥先端よりある点の応力が重要であるとする点応力モデル (Point stress model)、欠陥先端よりある領域の平均の応力が重要であるとする平均応力モデル (Mean stress model)、あるいは実際のき裂より少し長いき裂を考える仮想き裂モデル (Fictitious crack model) の3種がよく用いられる。しかし、破壊の物理的過程とは直接結びついていない。さらに、微視的残留応力の効果や急激な巨視的残留応力効果を取り扱うのに十分ではない。本研究では、R曲線法を用いた方法について検討する。

2. R曲線法

2.1 R曲線の形状

き裂進展による抵抗の増大の原因として種々のものが提案されているが、次のように表される。

$$K_R = K_0 + K_m + K_s \quad (1)$$

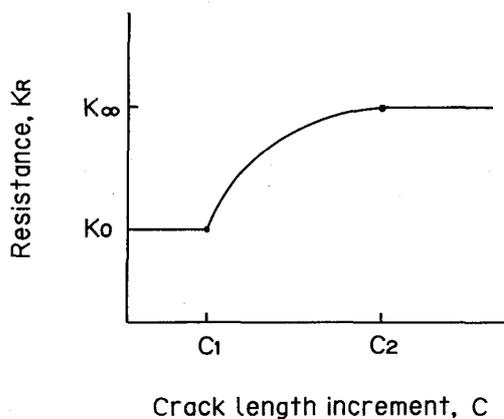


Fig. 1. Resistance curve.

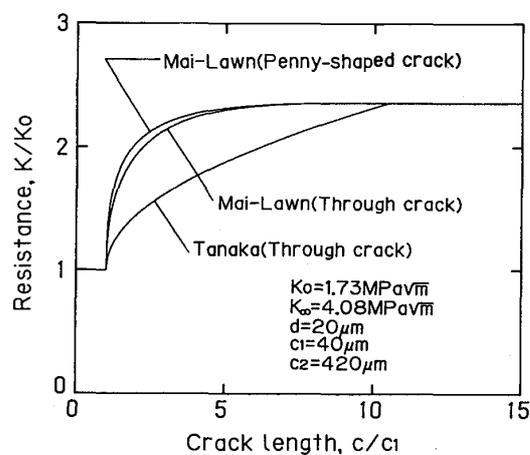
ここで、 K_0 が材料の真の抵抗で、 K_m はRice, Evansらの材料の微視的組織あるいは微視的応力 (Microstress) の効果であり、 K_s はき裂の応力しゃへい (Crack-tip shielding) の効果で、Lawnらのウェイクでの結晶粒橋渡し (Grain bridging)、Evansらの微視的割れ (Microcracking) や、変態 (Transformation) などがその原因となる。いま K_m を考えないとき、R曲線は一般に Fig. 1 のように示される。き裂伝ば量 c が c_1 より小さいとき K_R は一定値 K_0 であり、 c_1 を越えると上昇し、 $c \leq c_2$ において長いき裂の抵抗値 K_∞ となる。これらの代表的な式を次に示す。

$$K_R = K_0 + (K_\infty - K_0) \left\{ 1 - \left[1 - \left(\frac{c_2(c^2 - c_1^2)}{c(c_2^2 - c_1^2)} \right)^{1/2} \right]^3 \right\} \quad (2)$$

$$K_R = K_0 + (K_\infty - K_0) \left\{ 1 - \left[1 - \left(\frac{c - c_1}{c - c_2} \right)^{1/2} \right]^3 \right\} \quad (3)$$

$$K_R = K_0 + (K_\infty - K_0) \left[\frac{c - c_1}{c_2 - c_1} \right]^{1/2} \quad (4)$$

上式 (2), (3) は Mai-Lawn によって Grain bridging を説明するのに提案された式で、式 (2) が3次元き裂である、式 (3) が2次元き裂である。式 (4) は田中らによる式である。Cookらによる多結晶アルミナの例からの粒径 $d=20\mu\text{m}$, $c_1 = 40\mu\text{m}$, $c_2 = 420\mu\text{m}$, $K_0 = 1.73\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$, $K_\infty = 4.08\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ を代入したときの K_R の変化を Fig. 2 に示す。

Fig. 2. Resistance curve (Al_2O_3).

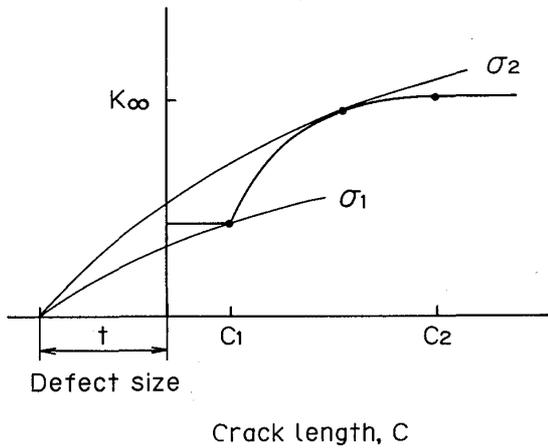


Fig. 3. R curve method.

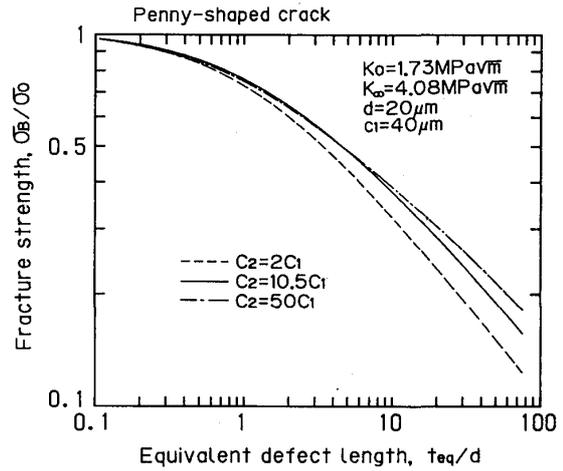


Fig. 5. Effect of c_2 on σ_B vs. t_{eq} .

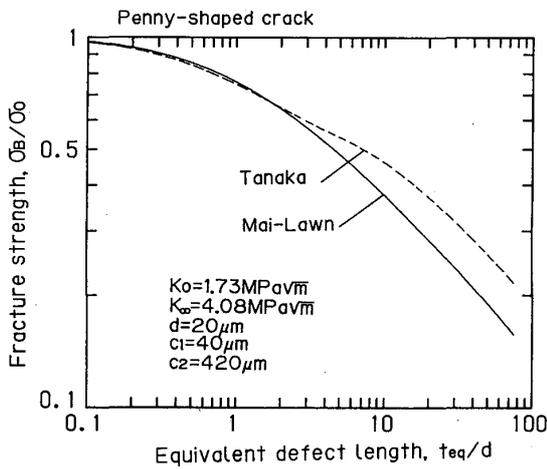


Fig. 4. Effect of R-curve model on σ_B vs. t_{eq} .

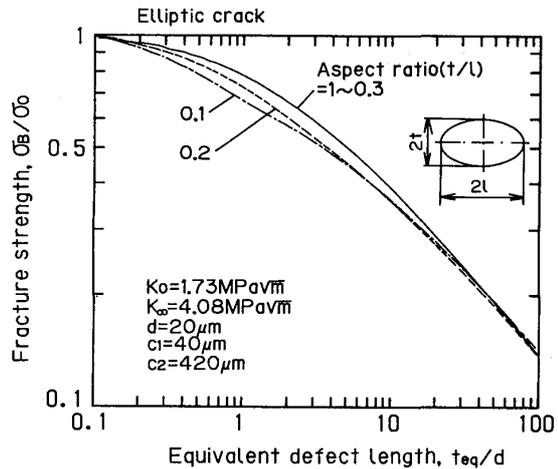


Fig. 6. Effect of aspect ratio on σ_B vs. t_{eq} .

2.2 き裂進展力と進展条件

き裂はき裂進展力が K_R を越えたとき進展する。進展に寄与する応力拡大係数は一般に負荷応力による値 K_a と巨視的残留応力による値 K_r の和となる。

$$K_A = K_a + K_r \quad (5)$$

き裂発生条件は Fig. 1 の R 曲線中には含まれていず、別の条件が必要であるが、Fig. 1 中の $c = c_1$, $K = K_0$ を通る場合がき裂がすでに存在するときのき裂進展可能な最小の応力 σ_1 である。欠陥がき裂状であるとき、Fig. 3 に示すように σ_1 でき裂発生となり、 σ_2 で不安定き裂の成長となり破壊強度に対応する。

3. 限界応力と欠陥寸法の関係

Cook らの多結晶アルミナのデータを式 (2), (4) の R 曲線に用いて、ペニー状き裂欠陥について計算した破壊応力 σ_B と等価欠陥長さ t_{eq} との関係を図 4 に示す。ここで、 t_{eq} は、貫通き裂とペニーき裂の等式より

$$K = \sigma \sqrt{\pi t_{eq}} = \sigma \sqrt{\pi t} F \quad (6)$$

$$t_{eq} = t F^2 \quad (7)$$

で求めた。 $F = 2/\pi$ 。 Fig. 4 の σ_B と t_{eq} の関係は、通常セラミックスで報告されているように、欠陥の大きい時には K 一定の破壊力学が適用できるが、欠陥が小さくなると

それよりずれる。また式(4)の方が式(2)より、この遷移欠陥寸法は長くなるが傾向がある。以下ではMai-Lawnモデルを用いて検討を行う。Fig. 5は、 c_2 の影響を示すが c_2 が大きい方が、遷移欠陥長さも長かつ σ_B も大きくなる。

Fig. 6は半長軸 l 、半短軸 t のだ円状き裂でアスペクト比($=t/l$)が種々異なった場合の、 σ_B と t_{eq} の関係を示す。ここで注目すべき点はアスペクト比が1から0.3の広範囲に変わったのだ円状き裂では σ_B と t_{eq} の関係は同一となる。このことは、微小欠陥からの破壊データの整理に等価欠陥寸法の概念をしようすることの物理的根拠を与える。

球状欠陥(気孔)からの破壊応力を同様のR曲線法で求めた結果をFig. 7に示す。環状き裂を与えたBarrattaの K の式と、半円き裂を考えたEvansの K の式では異なる。

実際は寸法が小さいとき前者で、大きいときには後者に近いと考えられる。気孔の寸法が小さいとき、ペニーき裂の場合と異ならないが、寸法が大きくなると σ_B は弾性応力集中率の逆数に等しくなり最大応力で破壊が決って行くことに対応する。

貫通だ円孔をもつ2次元平板(だ円孔の寸法全長10mm)の破壊時の応力拡大係数

$$K_p = \sigma_B \sqrt{\pi t} \quad (8)$$

の、先端曲率半径 ρ に対する変化をFig. 8に示す。 ρ がある値以下では K_p は、き裂の場合と同一の一定値である。この値 ρ_0 は、 c_2 が長くなるほど長くなる。

4 討論

以上のようにR曲線法を用いた強度解析は、従来の微小欠陥や有限半径をもつ切欠きからの破壊実験結果の傾向をよく表現している。かつ従来の工学的な観点からの平均応力モデル、点応力モデルおよび仮想き裂長さモデルよりも物理的意味が明確であり、今後発展が期待できる。

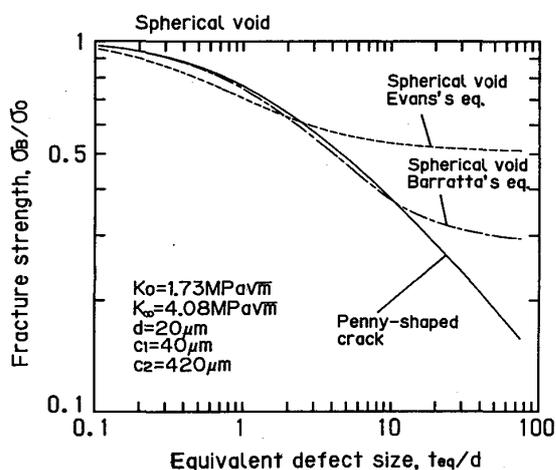


Fig. 7. σ_B vs. t_{eq} for spherical void.

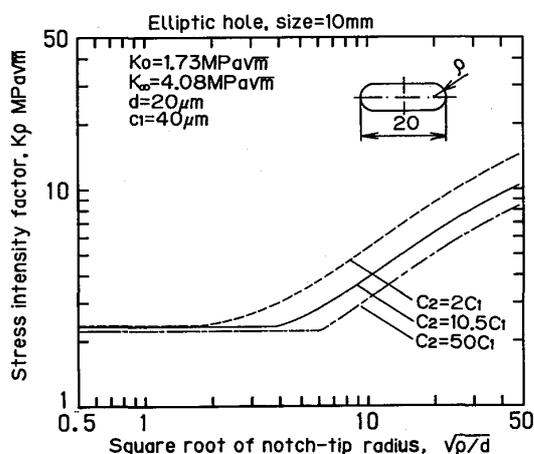


Fig. 8. Effect of notch-tip radius on K_p .