

(722) セラミックスの評価

依頼講演

東京大学工学部

○ 岸 輝雄

1. はじめに

脆く、ばらつきの大きいセラミックスの開発にあつたては、材料、製造プロセス、品質保証の技術が併行的に進展されねばならない。それには、製品の各プロセスにおける標準的評価技術の確立が不可欠だが、本講では従来の材料学に加えて、それを支える“欠陥工学”ともいえる取り扱いの重要性について述べたい。

ここでいう欠陥工学とは、介在物、気孔、粒界、加工傷などの欠陥および接合、複合化界面欠陥の生成要因、成長・合体プロセス、分布とばらつき、強度、靱性とのかわり、検出技術、特に各々の欠陥の等価き裂寸法の評価などを含む広い意味での欠陥の取り扱いをいう。

2. 材料特性評価

熱応力、外部応力によるセラミックスの破損形態と、その評価パラメータをまとめると、旧来の材料力学に基づく評価法と破壊力学に基づくものに分けられるが、今後は理論的根拠のより確かな破壊力学パラメータの適用に対する努力が望まれる。この中で特に重要なのは、ワイブル係数 m 、破壊靱性 K_{Ic} (動的破壊靱性 K_{Icd})、および時間依存型のき裂進展速度を示す n 値などである。引張り試験法と共に早急に必要となるのは破壊靱性の評価手法の確立である。予き裂の導入方法、破壊抵抗曲線 (R カープ) の導出、 K_{Ic} 、 K_{IR} の定義についての研究、標準化が急がれる。また、簡便な手法としてインデンテーション手法は併用手法として用いるべきであり、用いる計算式の統一化と限界を明確にする必要がある。同時に、動的破壊靱性試験法、および静疲労、動疲労、特に高温の試験法確立が次の課題といえる。また、複合材、接合材などでは、靱性の定義とともに界面のせん断強度の評価が不可欠である。ここで重要なことは、試験法により、破壊の様態が異なることである。それゆえ、欠陥に基づいた微視割れ破壊機構の研究なしに試験法が一人歩きすることは危険といえる。

3. 信頼性評価

信頼性向上は m 値、 K_{Ic} 値の大きい高靱性材料の開発と欠陥材のスクリーニングを含めた品質評価技術の開発の両面からなさねばならない。品質評価は、保証試験、非破壊試験などにより寿命、安全係数、破壊確率を定量的に導出することにある。

3. 1. 保証試験

使用時最大応力より大きな平均破壊応力よりは、小さな保証試験応力を負荷することにより、たとえば、均一条件で破損確立を $10^{-6} \rightarrow 10^{-13}$ に、また同じ破損確立を得るのにワイブル係数を $m = 20 \rightarrow 10$ へと変化させうる。それゆえ、時間依存型の破壊を考慮しない範囲では非常に有効であり、簡便な手法確立が望まれている。ただし、試験片と実物の相違、試験中の材料劣化などの材料、および破壊に関する問題点を有する。

3. 2. 非破壊評価

$K_{Ic} = 5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{-1/2}$ 程度のセラミックスでは $50 \sim 100 \mu\text{m}$ の微視欠陥が急速破壊の要因となる。また、slow crack growth の生ずる場合にはより小さな欠陥が重要となる。それゆえ、微小欠陥の非破壊検出技術はセラミックスの開発において不可欠であるが、現状では難しい。早急に高周波超音波、マイクロフォーカス X 線、A E (原) 波形解析、S L A M などの発展が望まれる。非破壊評価の問題点は特性化できない欠陥の存在、検出欠陥と破壊起源寸法の関係、および各欠陥の破壊モデルの不明などにある。特に、複合、接合界面の検出手法開発が待たれる。

4. 微小欠陥の挙動と役割

現状では、ばらつきの小さい高靱性材料の開発を進める時期にある。高靱性材料を開発するには、相変

態、塑性変形、分散粒子の利用、また複合化によるクラックのピン止、湾曲、偏光、分枝の利用などが考えられるが、マイクロクラックタフニングも重要な手法である。図1に示すように主き裂に先行して微視割れが生ずるプロセスゾーン、およびその名残としてのウェイクが生じ、応力集中緩和、圧縮残留応力の寄与により見かけの靱性が向上するといわれている。もちろん、これらの欠陥はき裂進展の引き金にもなり、破壊機構の理解には不可欠となるが、欠陥には善、悪両面が存在することになる。プロセスゾーン、ウェイクの存在に関しても未だ不明であり、研究手法の遅れよりこの分野の基礎的研究があまり手がつけられていない、今後の課題である。

5. 微視割れの Eigen Strain Tensor の導出

セラミックスの評価において最も基本となる微視割れを理解するには各々の(1)発生時刻、(2)三次元位置、(3)破壊モード(引張り型、せん断型)、(4)大きさ、(5)割れ面の傾きなどを知ることが重要である。これらを表わすテンソルとして Eigen strain tensor (地震学で seismic moment) が次式で与えられる。

$$D_{ijk} = C_{imjk} \Phi_i(t) \Delta A_m(t)$$

ここで $\Delta A_m(t)$ 、 Φ_i はくいちがい面積と大きさを示し、 C_{imjk} は弾性定数である。マイクロメカニクスで重要なこの D_{ijk} を実験的に求めることは出来なかったが、近年、割れに伴う弾性波(AE)の解析により D_{ijk} の導出が可能となった。図2に示すように三次元位置はもとより、各々の微視割れの傾き、割れモード(混合モード)、大きさの分布が得られ、靱性に寄与する割れと、急速破壊につながる割れと区別可能となる。[T. Kishi and S. Wakayama, Fracture Mechanics of Ceramics, 8, pp. 85] このような新しい手法、および動的な破面解析手法などにより、セラミックスの破壊機構の機械を深める必要がある。

6. 今後の課題

微小欠陥にその特性を左右されるセラミックスにおいては、特性評価手法を標準・規格化すると同時に、また、その基礎を与える意味で欠陥検出技術を含めた欠陥工学の体系化が望まれる。その一例として、Eigen strain tensor の意義を述べたが、今後はそれに加えて、材料の劣化・損傷評価が必要となろう。

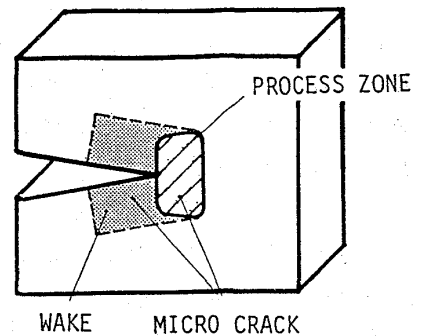


Fig. 1 Process zone and wake near crack tip.

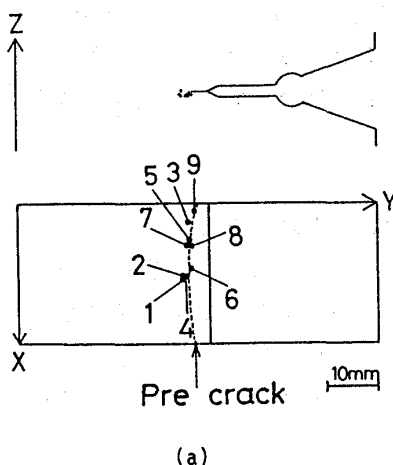


Fig. 2. Microcracks at the tip of alumina CT specimen.
(a) three dimensional location.
(b) distribution of microcracks size.

