

PSZ-SUS304 傾斜機能材料の破壊靱性分布に 及ぼす微視組織の影響と残留応力の推定

静岡大学 ○東郷敬一郎 静岡大学[院] 飯塚 充久
静岡大学 荒木 弘安 静岡大学 島村 佳伸

Influence of Microstructure on Fracture Toughness Distribution and Estimation of Residual Stress in PSZ-SUS 304 Functionally Graded Material

Keiichiro TOHGO, Mitsuhsa IIZUKA, Hiroyasu ARAKI and Yoshinobu SHIMAMURA

1 緒 言

高い耐熱性を有するセラミックスと高靱性を有する金属からなり、材料組成が連続的に変化する傾斜機能材料 (FGM) は、セラミックスと金属の長所を活かし、かつ、熱応力を緩和できることから、耐熱性、耐摩耗性、耐食性材料として期待されている。この種の材料を構造材料として用いるには、熱的、機械的負荷に対する破壊過程を明らかにするとともに、適切な強度評価を行うことが必要である。

本研究では、部分安定化ジルコニア (PSZ) 粉末と 2 種類の粒径のオーステナイト系ステンレス鋼 (SUS304) 粉末を用いて粉末冶金法により作成した FGM および非傾斜複合材料 (Non-FGM) について破壊靱性試験を行い、破壊靱性分布に及ぼす微視組織の影響を調べ、FGM に生じていると思われる残留応力を推定した。

2 供試材料および実験方法

2.1 供試材料 供試材料は、PSZ 粉末 (平均粒径: $0.32\mu\text{m}$) と 2 種類の SUS304 粉末 (平均粒径: $45\mu\text{m}$, $10\mu\text{m}$) を用いて粉末冶金法により作製した。PSZ 粉末と SUS304 粉末を 10:0, 8:2, 6:4, 4:6, 2:8, 0:10 の体積割合で配合し、ホットプレス焼結により、非傾斜複合材料および傾斜機能材料を作製した。粒径 $45\mu\text{m}$ と $10\mu\text{m}$ の SUS304 粉末を用いて作成した材料をそれぞれ Non-FGM($45\mu\text{m}$), FGM($45\mu\text{m}$), Non-FGM($10\mu\text{m}$), FGM($10\mu\text{m}$) と標記する。また、画像解析により、PSZ と SUS304 の面積率を測定し、体積率の実効値とした。Fig.1 に Non-FGM($45\mu\text{m}$) と Non-FGM($10\mu\text{m}$) の組織写真を示す。原料粉末の粒径の影響により、Non-FGM($10\mu\text{m}$) の方がより細かく分散していることがわかる。

2.2 実験方法 Non-FGM の破壊靱性試験は Fig.2(a) に示すように、切欠き開口角 20° 、切欠き長さ 2mm、切欠き底半径 $15\mu\text{m}$ の片側切欠きを加工した試験片について、三点曲げ試験を行った。また、FGM の破壊靱性試験は、Fig.2(b) に示すように、セラミックス表面に連結した微小き裂

をピッカース圧痕により導入した試験片について、三点曲げ試験による安定き裂成長試験を行った。各試験ともに、室温大気中でクロスヘッドスピード 0.05mm/min の変位制御で行い、荷重-変位関係を記録するとともに、試験片側面を CCD カメラにより録画し、試験後、き裂発生・進展の様子を観察できるようにした。なお、Non-FGM($45\mu\text{m}$), FGM($45\mu\text{m}$) の結果は既に報告したものである。

3 実験結果および考察

3.1 Non-FGM による破壊靱性評価 Non-FGM の破壊靱性試験中の試験片側面の観察によると、最大荷重にいたる直前に切欠き先端からき裂が発生・進展し、最大荷重点を過ぎると急速なき裂進展とともに荷重は低下する。そこで、最大荷重と最大荷重時のき裂長さより各材料の破壊靱性値を求めた。Fig.3 は破壊靱性値と SUS304 体積率の実効値との関係を Non-FGM($45\mu\text{m}$), Non-FGM($10\mu\text{m}$) に対して示したものである。図より、両種の材料において、破壊靱性値は SUS304 体積率の増加とともに上昇し、ほぼ同様な傾向を示し、微視組織の影響は小さいようである。

3.2 FGM による破壊靱性評価 セラミックス表面に微小き裂を導入した FGM 試験片に三点曲げ負荷を与えると、材料組成の分布、試験片の寸法などの条件により、傾斜層内の安定き裂成長が実現できる。

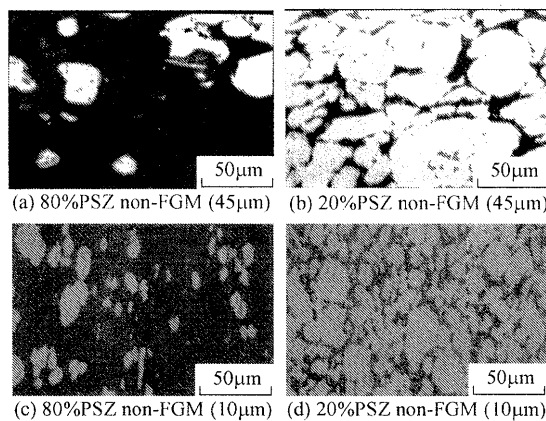


Fig. 1 Microstructures of the materials.

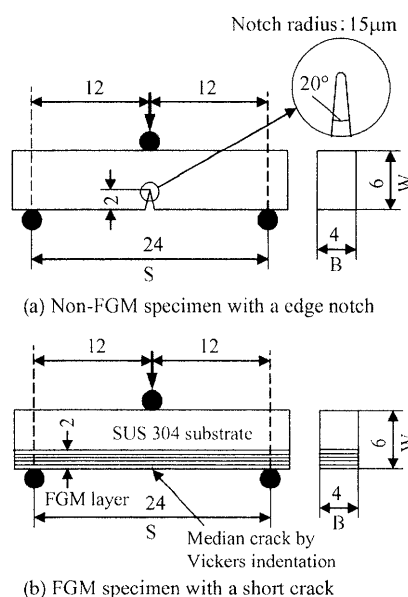


Fig. 2 Specimen configurations.
(dimensions in mm)

安定成長中の応力拡大係数は各き裂先端位置での破壊靱性値を意味するので、傾斜層の破壊靱性分布が得られることになる。

Fig.4 は、FGM(10 μ m)の三点曲げ試験により得られた荷重と荷重点変位およびき裂長さとの関係を示したものである。図に示すように、変位の増加とともに荷重は増加し、A 点で予き裂からき裂の安定成長を開始する。き裂は 1.4mm まで安定に成長し、荷重が B 点に達した瞬間に 1.9mm まで不安定成長し、C 点まで荷重は低下する。その後、さらにき裂は傾斜層を安定に成長した後、傾斜層-基材境界で停止し大きな塑性変形に至った。この材料では、不安定き裂成長しやすく、数本の試験を試みたが、安定成長は認められたのはこの試験片のみであった。一方、FGM(45 μ m)では、既に報告しているように、全ての試験片で安定き裂成長が得られている。

Fig.4 の試験片に対して、破壊靱性値 K_R を求め、き裂長さすなわち FGM セラミックス表面からの距離に対して示したのが Fig.5 である。き裂長さが 1.4mm~1.9mm の間はき裂が不安定成長をしたため、破壊靱性値は得られていない。図に示されるように、破壊靱性値の勾配が小さく、そのためき裂の安定成長が得られにくかったものと思われる。このようなデータより、破壊靱性値と傾斜層の各組成すなわち SUS304 体積率との関係に再整理したのが Fig.6 である。図には FGM(45 μ m)および Non-FGM の結果も示してある。図より、破壊靱性値と

SUS304 体積率の関係は両 FGM とともに SUS304 体積率の増加とともに上昇するものの、FGM(10mm)の方が FGM(45mm)よりもかなり高くなっており、微視組織の影響が認められる。これは、Fig.3 の Non-FGM の破壊靱性値では、SUS304 粉末粒径の影響が見られなかったことと対照的である。さらに、Non-FGM による破壊靱性値と比較すると、特に 10 μ m の場合において、セラミックス側で FGM の方が Non-FGM よりも高くなっている。

3.3 破壊靱性値分布の比較 FGM においてはその製造過程で金属とセラミックスの熱膨張係数の差によりセラミックスリッチ側に圧縮の残留応力が生じるが、FGM の破壊靱性値はこの残留応力の影響を含んでおり、そのために高い値になっているものと思われる。そこで、FGM と Non-FGM の破壊靱性値の差は、残留応力によるものとして次式により表示し、

$$K_{Res}(x) = K_R^{Non-FGM}(x) - K_R^{FGM}(x) \quad (1)$$

$K_{Res}(x)$ に対応する残留応力分布 $\sigma_{Res}(x)$ の推定を行った。

Fig.7 は本実験により得られた各 FGM の $K_{Res}(x)$ で、Fig.8 は各 FGM の残留応力分布 $\sigma_{Res}(x)$ の推定結果である。図より、FGM においてはセラミックスリッチ側に圧縮残留応力が生じており、表面近傍では、FGM(45mm)で約 100MPa、FGM(10mm)で約 200MPa と微細組織ほど高く推定されている。

(結言および参考文献：省略)

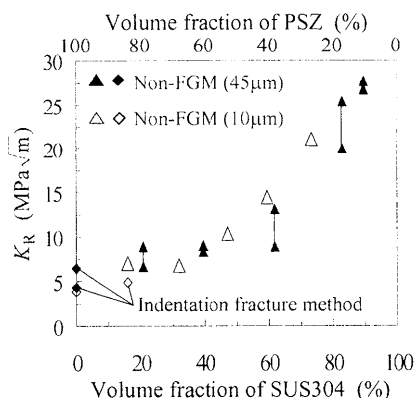


Fig. 3 Fracture toughness as a function of material composition in Non-FGMs.

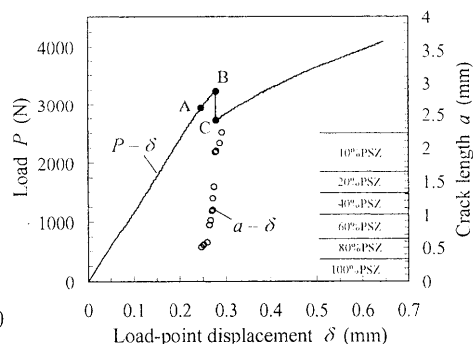


Fig. 4 Load and crack length vs. load-point displacement in FGM (10 μ m).

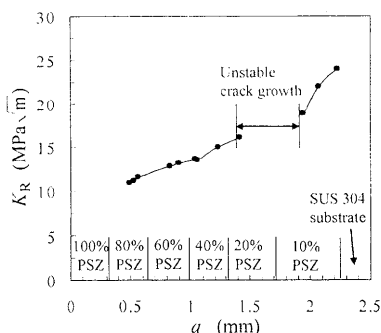


Fig. 5 Distribution of fracture toughness in FGM (10 μ m).

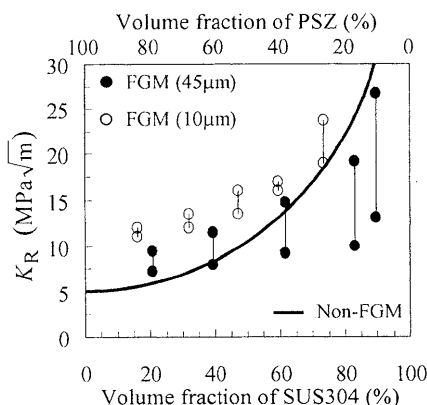


Fig. 6 Fracture toughness as a function of material composition in FGMs.

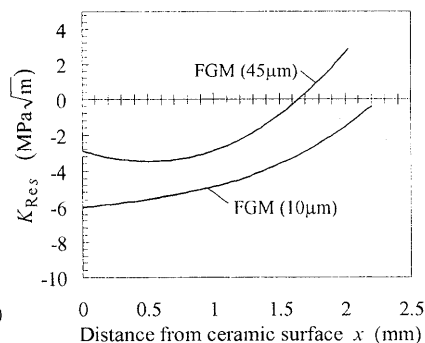


Fig. 7 Difference of fracture toughness between FGM and Non-FGM.

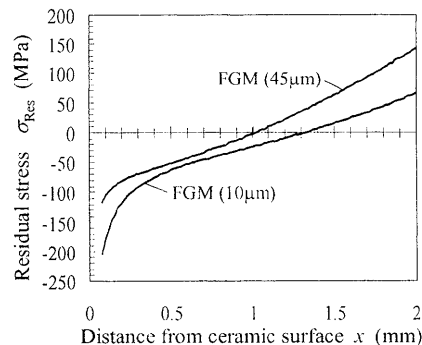


Fig. 8 Distributions of residual stress in FGMs.