セラミックス/金属接合部材のせん断破壊挙動

Fracture mechanism on sliding mode of ceramics and metal joints

○重本 丈治・愛媛大学大学院理工学研究科, 愛媛県松山市文京町 3 番

Takeharu SHIGEMOTO, Graduate Student, Ehime University, Bunkyo-cho, Matsuyama, Ehime

高橋 学・愛媛大学大学院理工学研究科

Mnabu TAKAHASHI, Graduate School of Science and Engineering,
Ehime University

松田 伸也・愛媛大学大学院理工学研究科

Shinya MATSUDA, Graduate Student, Ehime University

井川 貴史

愛媛大学工学部機械工学科
Takafumi IGAWA, Graduate Student,
Ehime UniversityKey Words: *Ceramic/metal joints, Shear stress, Shear fracture, Delayed fracture*

セラミックス/金属接合部材の接合部近傍に一定負荷速度にてせん断応力を負荷した。接合部材は接合界面ではなくセラミックス側からき裂が発生しており、せん断破壊はセラミックス側での破壊が支配的であった。そこで、従来のき裂進展特性式がモードⅡでも成立つと仮定してセラミックスのせん断遅れ破壊モデルを提案した。その結果、両対数グラフに整理されたせん断破壊応力とせん断応力速度は直線関係にあり、ゆえにこのモデルの妥当性が示された。また破壊モードに関わらずき裂進展に対する抵抗値は同等であることが明らかとなった。

1. 結 言

セラミックスは、耐熱性・耐摩耗性・耐食性・高比強度などの優れた特性を有するが低じん性である。近年では、低じん性を改善するために、じん性の高い金属と接合して構造材料や熱電モジュールのような電子部品として有効に利用されている。しかしながら、接合部材の評価法が十分でないために、高温での長期使用による破壊や製造中の破壊などの事例が多数報告されている。評価法として、主に曲げ試験による引張応力破壊が議論されているが、接合部材の破壊は、使用中の熱膨張差によるせん断応力が主に支配的となる。ゆえに接合部材のせん断破壊特性を把握し、寿命予測することは極めて重要な課題である。そこで本研究では、第一段階として接合部材のせん断破壊試験を行った。その結果、せん断破壊は、セラミックス側からの破壊が支配的であり、著者らが提案するせん断遅れ破壊モデルによく適合したので報告する。

2. 実験方法

2-1 供試材 接合時に発生する残留応力を緩和するために無酸素銅(Cu)を中間層とした常圧焼結窒化ケイ素(Si_3N_4)とオーステナイト系ステンレス鋼(SUS304)を接合した試験片($6\text{mm}\times6\text{mm}\times6\text{mm}$)である。接合用ろう材として SUS304/Cu 界面に

Fig.1 Optimal configuration of specimen

Fig.2 Contour map of shear stress

Table 1 Mechanical properties of specimen.

Materials	Young's modulus E [GPa]	Poisson's ratio ν	Coefficient of expansion α [×10 ⁻⁶ /K]
Si_3N_4	304	0.27	3.0
SUS304	193	0.30	16.5
Cu	108	0.33	17.7

Table2 Conditions of brazing.

Brazing metal	Ti-Ag-Cu ($50\mu\text{m}$)
Joining temperature	800~850°C
Atmosphere	Vacuum, 1.33 (MPa)
Interlayer	Cu (0.5mm)

B-Ag-8(Ag:59.6, Cu:40.4[atm%]), Si₃N₄/Cu 界面には活性金属ろうである Ti-Ag-Cu 系(Ag:67.8, Cu:30.6, Ti:1.6[atm%])を用いた。ろう材厚さはそれぞれ 50μm である。それぞれの機械的特性を表 1 に示すとともに接合条件を表 2 に示す。

2-2 セン断破壊試験 接合近傍のせん断破壊を調査するために、図 1 に示すように四角柱状の試験片にダイヤモンドカッター(厚さ 0.3mm)を取り付けた横フライス盤で回転速度 2400rpm・切り込み深さ 1mm・送り速度 0.5mm/min の条件下にて目違いの切欠きを入れ、一定負荷速度にて圧縮した。FEM 解析から得られた圧縮時のせん断応力分布の概略を図 2 に示す。このことから、せん断応力が接合近傍に発生していることがわかる。

せん断破壊試験条件は大気中室温とシクロスヘッド速度は 0.1[mm/min], 0.05[mm/min], 0.005[mm/min]と変化させて行った。そしてチッピング音を確認後、すぐに徐荷した。

3. 実験結果および考察

3-1 破面観察 試験後の破壊形態を図 3 に示す。(a) に示すように、接合界面ではなく完全にセラミックス側からき裂が発生している。また (b) に示すようにき裂は矢印の方向に斜めに進展しており、この原因は、せん断応力が支配的な混合モードで進展しているためと推察される。ゆえに接合部材のせん断破壊もまたセラミックス側での破壊が支配的であると結論付けられる。以後、セラミックスのせん断破壊について議論する。

Fig.3 Observation of crack initiation.

3-2 セン断遅れ破壊モデル セラミックスの遅れ破壊モデルは、き裂進展特性式と応力拡大係数の関係より示されている。しかしながら、これまでのモデルはすべてモード I での破壊が支配的であるとされてきた。ゆえにモード II での破壊に関する遅れ破壊モデルは著者の知る限り存在しないと考えられる。そこで本研究では、従来のき裂進展特性式がモード II でも成立つと仮定した。ゆえに長さ a を有する初期欠陥まわりのモード II での応力拡大係数をき裂進展特性式に考慮することにより、

$$\frac{da}{dt} = C \{ Y \tau \sqrt{\pi a} \}^N \quad (1)$$

として表した。ここで、 t は負荷時間、 Y は形状補正係数、 τ はせん断負荷応力、 C は材料定数、 N はせん断破壊時のき裂伝ば指数である。ここで、長さ a_i の初期き裂が不安定破壊する臨界き裂長さ a_f まで成長する時間を t_f とし、 a_i で破壊するせん断強度 T_i とモード II での破壊じん性値 K_{IIc} を考慮することによって、

$$T_i^{N-2} = \frac{N-2}{2} C Y^2 K_{IIc}^{-2} \int_0^{t_f} \tau(t)^N dt \quad (2)$$

として与えられる。ここで N は十分大きいとし、 a_f の項は近似している。本研究で発生するせん断応力は、ノッチ間の寸法誤差により、せん断応力は大きく変化する。そのため、実

Fig.4 Error of processing.

験から得られるせん断応力 τ_{vf} は、

$$\tau_{vf} = P / wht \quad (3)$$

として破壊荷重 P を図 4 に示すような各寸法によって基準化して整理した。言い換えると、単位体積あたりに作用する荷重とした。また、一定負荷速度試験であるため、そのせん断応力速度 $\dot{\tau}_v$ とすると、任意の t におけるせん断応力 $\tau_v(t)$ は、

$$\tau_v(t) = \dot{\tau}_v t \quad (4)$$

として与えた。よって、破壊する強度は

$$\tau_{vf} = \dot{\tau}_v t_f \quad (5)$$

として表される。ゆえに、これらを式 (3) に考慮することによって、

$$\tau_{vf} = B \dot{\tau}_v^{1/(N+1)}, \quad B = \frac{2(N+1)T_i^{N-2}K_{IIc}^2}{AY^2(N-2)} \quad (6)$$

として最終的に得られ、両辺の対数を取ることによって、

$$\ln \tau_{vf} = \frac{1}{N+1} \ln B + \frac{1}{N+1} \ln \dot{\tau}_v \quad (7)$$

となる。これより、 $\ln \tau_{vf}$ と $\ln \dot{\tau}_v$ の関係は、勾配 $1/(N+1)$ の直線となる。

3-3 実験結果とせん断遅れ破壊モデル 図 5 にせん断応力速度 $\dot{\tau}_v$ とせん断応力 τ_{vf} との関係を示す。このように両対数グラフ上にプロットすると、よく直線近似できていることがわかる。ゆえに、せん断破壊の遅れ破壊は本研究で提案するモデルに準ずると結論付けられ、せん断破壊におけるき裂進展特性式として式 (1) の妥当性が検証された。また得られた N はおよそ 31 であり、一般的に知られている Si₃N₄ のき裂伝ば指数とほぼ同等である。このことから、破壊のモードに関わらずき裂進展に対する抵抗値は同等であると考えられる。

Fig.5 Relationship between stress rate and shear stress