

審査の結果の要旨

氏名 井上 遼

不連続炭素繊維分散 SiC マトリックス複合材料(以後、DCF/SiC 複合材料と記述)は低密度で耐摩耗特性が制御できることから、軽量・耐摩耗用材料として自動車のブレーキディスクなどへの用途が期待されている。DCF/SiC 複合材料を構成する材料は全てが脆性的な破壊挙動を示す材料で構成されているとともに、製造時に材料中に構成素材間の熱膨張係数の差により多数のクラックが複合材料中に導入される。このような状況にもかかわらず、DCF/SiC 複合材料は大きな破損許容性を持つことができる。

本論文は、DCF/SiC 複合材料の持つ大きな損傷許容性発現機構を明らかにすることを目的として行われたものであり、全5章からなる。

第1章は「序論」であり、DCF/SiC 複合材料の応用例、歴史及び従来の研究を整理し、本研究の目的を明らかにした。DCF/SiC 複合材料を構成する材料は全てが脆性的な破壊挙動を示す材料で構成されているとともに、製造時に材料中に構成素材間の熱膨張係数の差により多数のクラックが導入される。このような状況にもかかわらず、DCF/SiC 複合材料は大きな破損許容性を持つことができる材料であることを述べた。実用化が進んでいるにもかかわらず、DCF/SiC 複合材料が持つ破損抵抗の発現機構は明らかでないという問題点を指摘し、本研究の意義と目的を明確にした。

第2章では、複合材料の組織及び組織とクラックの相互作用について調べた。DCF/SiC 複合材料中の微細組織は Si、SiC、炭素繊維と未反応炭素の複合体(以下、ミニコンポジットと記述する)からなり、各相の特徴を観察結果に基づいて説明した。さらに、これらの相毎にクラックの発生状況を詳細に観察し、クラックの発生要因について検討を行った。複合材料中のクラックは、不連続炭素繊維束と炭化後の未反応炭素から構成されるミニコンポジット相の繊維軸に対して垂直方向に生じる傾向が観察された。ラマン分光法による Si 及び SiC 相中の残留応力測定の結果、反応により生成した SiC と炭素繊維の熱膨張係数の差によって製造時の冷却過程で生じる引張の熱応力がクラックの発生要因であることを明らかにした。

ミニコンポジット相で囲まれた SiC 相と Si 相に対して新たに開発した6つの角を持つ圧子を用いたインデンテーション試験を行った。人工的に発生させたクラックとミニコンポジット相の相互作用は、クラックの進展方向とミニコンポジット相の繊維軸のなす角によって大きく異なることを明らかにした。クラックの進展方向がミニコンポジット相中の炭素繊維軸方向となす角度が臨界角度以上では、ミニコンポジット相が材料中で生じたクラックの進展を停止させる役割を果たしていることを実験的に示した。

第3章では、モード I 負荷下での破壊靱性と破壊条件を調べた。DCF/SiC 複合材料の平面応力下でのモード I 破壊靱性をノッチ付きの円盤状試験片を用いて評価し、応力集中源下における破壊条件を明らかにした。試験時にノッチ先端の損傷挙動を観察し、ノッチから生じるクラックの不安定進展に先立ち、ノッチ先端部の~2.3 mm の領域でクラックがミニコンポジット相間の SiC 相に生じるが、ミニコンポジット相によって進展が停止する挙動が存在することを示した。

クラックが不安定に進展した荷重を用いて、破壊靱性 K_{Ic} を求めた結果、DCF/SiC 複合材料の K_{Ic} は $3.5\sim 4.1 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ の範囲であった。ノッチ先端からの特定の距離が複合材料の引張強度に達した場合にクラックが不安定に進展する破壊の条件と仮定すると、破壊靱性は、複合材料の引張強度と特性距離を用いて記述することができ、実験結果をうまく説明できることを示した。

第4章では、モード I 及びモード II の混合モード負荷下での破壊靱性と破壊条件及び総合考察について調べた。モード I とモード II の混合モード負荷時における平面ひずみ破壊靱性を第3章と同様の試験片と不安定破壊が開始するときの荷重を用いて求めた。モード II 破壊靱性は $K_{IIc}=4.7\sim 5.7 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ であり、第3章で求めた K_{Ic} の値を用いると、 $K_{IIc}/K_{Ic}=1.2\sim 1.5$ の値を示すことが明らかとなった。モード I とモード II の混合モード破壊靱性を有効破壊靱性 K_{eff}^c とすると、荷重モード比によらず $K_{eff}^c/K_{Ic}>1$ であった。一方、主応力、エネルギー解放率、及びひずみエネルギー密度による破壊条件から求められた K_{eff}^c/K_{Ic} は、実験値よりも常に小さな値を示した。この差異に関して、試験片形状に依存する T 応力の影響を考慮した破壊条件について検討を行い、混合モード下で $K_{eff}^c/K_{Ic}>1$ 、モード II 下で $K_{eff}^c/K_{Ic}=1.2\sim 1.5$ を示す現象を説明した。また、T 応力を考慮した破壊条件を用いると、混合モード下での破壊靱性の荷重モード依存性を説明できた。さらに、 K_{Ic} に対して混合モード及びモード II 負荷下での破壊靱性が大きくなるという破壊を定性的に説明することができることが明らかとした。

さらに、第2章及び第3章の結果に加え、本章で得られた結果を総合的に考察し、DCF/SiC 複合材料では破壊靱性が小さいにも関わらず大きな破損抵抗が得られる原因について、実験結果をもとに考察した。その結果、製造時及び負荷荷重により生じたミニコンポジット相と同程度の寸法を持つマイクロクラックの安定性が大きな破損抵抗の発現には重要であることを明らかにした。この際、マイクロクラックの安定性には DCF/SiC 複合材料の持つ不均一マイクロ組織とクラック間の相互作用が重要であると考えられるという結論を得た。また、定量的な取り扱いは今後の課題であることを指摘した。

第5章では本論文の内容を要約し、得られた結果を総括した。

以上のように、本論文は DCF/SiC 複合材料の応力集中下での破壊挙動、破壊条件を実験的に検討し、DCF/SiC 複合材料が実使用環境下でも破壊に至らず使用可能である要因について検討したものであり、セラミックス材料工学の分野への寄与は大きい。

よって、本論文は博士(工学)の学位請求論文として合格と認められる。