

論文の内容の要旨

論文題目 熱遮蔽コーティングの界面力学特性及び
内部力学場の有限要素法解析

氏名 曹 寧源

本論文は、実使用環境下のセラミックス熱遮蔽コーティングの剥離損傷を評価するために、有限要素法解析を用いて熱遮蔽コーティングの界面剥離の解析評価手法を確立することを目的としたものである。このために、(1)せん断負荷モードでの界面力学特性を測定するために開発された Barb 試験に用いる試験片中の応力分布状態、(2) 界面剥離時の試験片の剥離エネルギー解放率および剥離先端モードの求め方、(3)実使用環境に近い状態でのコーティングの非線形力学挙動と剥離要因になる実用環境で生じる酸化物層の応力状態を明らかにした。得られた知見をもとに、界面剥離の条件を組み込んだ熱遮蔽コーティングと基材とが一体となったコーティングシステムの損傷を解析する手法を提案した。

第一章では、解析対象とするセラミックス熱遮蔽コーティングの現状について述べた。ガスタービンなどに用いられている高温構造部材には、より高温化での燃焼を可能とし、タービン全体の熱効率向上のためにセラミックス熱遮蔽コーティング (TBC: Thermal Barrier Coatings) が用いられている。コーティングは、使用環境温度と超合金基材間に温度差を発生させることで超合金基材が安全に使える温度を保持するために必要不可欠である。しかし、実使用環境下でコーティング層 (TBC 層) の基材からの剥離が生じると、基材の劣化を引き起こすことが大きな問題点となっている。

TBC 層の基材からの界面剥離と剥離による寿命予測に関しては、実験手法と解析手法に大別される。TBC 層の剥離に対する解析を用いる場合には、界面力学特性及び界面力学特性を組み込んだ手法が必要になる。しかし、解析手法についての研究は十分に行われていない。したがって、実使用環境下での TBC 層の剥離に対して、破壊モードと界面剥離の条件を求める手法、界面剥離の条件を用いた実部材での剥離の状態を解析的に求めることは重要であると考えられる。

第一章では、以上のような実使用環境下での TBC システムの問題点を整理し、TBC 層の剥離に対する従来の解析手法と存在する問題点を示した。ついで、TBC システムの界面せ

ん断力学特性の測定手法の Barb 試験法について検討すべき課題を整理し、本研究の目的を明確にした。

第二章では、Barb 法試験による試験片の応力状態を明確するために、有限要素法を用いて試験片中および界面の応力解析を行った。

まず、試験片の応力分布を詳細に調べた。試験前の試験片中には、TBC 層と基材の熱膨張係数のミスマッチにより熱応力が発生し、界面端部に集中していることが明らかになった。試験片に負荷を加えると、コーティングした部分の基材中は引張りの応力が弱まる一方、TBC 層側の圧縮傾向が大きくなることが明らかになった。なお、熱応力により生じたせん断応力が負荷により相殺され反対方向に増加した。界面上の応力分布を求めた結果から、界面に垂直方向の剥離応力は負荷を増加するに伴って圧縮の状態が続く状態にあることを示した。一方、界面上のせん断応力は負荷により再分布され、熱応力の方向と反対する分布を示した。この力学状態から、TBC 層の剥離は TBC 層の下端部から発生すると考えられた。

また、界面端部の応力特異性を計算し、応力特異性と試験片の材料組合せとの関係を調べた。界面端部での界面せん断応力成分 τ_{xy} は端部からの距離を r とすると、 $r^{-\lambda}$ のみの特異性による分布を示した。ここで、特異性オーダーの λ はコーティング層と基材間のヤング率の差の絶対値が大きくなるに従って値が大きくなった。

以上の結果から、試験片のせん断応力分布および剥離の発生する位置を明らかにし、第 3 章の破壊解析のための力学条件を確立した。

第三章では、第二章の試験片応力解析の結果をもとにして、試験片界面の下端部からの TBC 層の剥離き裂を想定し、界面剥離を含む場合の TBC 層の基材からの剥離の解析を行った。解析では、試験片の異なる幾何形状、構成素材間の組合せの影響を考慮した。剥離エネルギー解放率と剥離長さ、試験片の幾何条件および材料組合せとの関係を整理して界面剥離を評価するための形状関数を解析的に求めた。この関数を用いて、Barb 試験法を用いて界面剥離エネルギー解放率を求める方法を明らかにした。

次に、剥離先端でのモードについて検討した。界面剥離長さを a 、TBC 層の長さを L_{tbc} とし、 $a/L_{tbc} < 0.2$ の範囲では、FEM 解析から得られたフェーズアングル ψ はすべての材料組合せに対して 90° (純粋モード II) であり、 $a/L_{tbc} > 0.2$ の範囲でのフェーズアングル ψ は、コーティング層と基材間のヤング率比 Ω が大きくなるにしたがって増加することを明らかにした。また、上述の解析結果を Liu らの Steady-state 解析結果と比較し、実際の試験片の

幾何形状($L_{tbc}/h_s=1$ 、ここで h_s は基材の厚さ)において、試験片のエッジ効果のため Steady-state 剥離条件とは異なることを実証するとともに、本章で求めたフェーズアングルと Steady-state との関係を明らかにした。

以上の結果から、Barb 法試験から得られた力学特性値から界面剥離時のエネルギー解放率および剥離先端モードを求める手法を決定し、実験結果を解析にも役立つ形で整理し、せん断モード負荷条件下の TBC システムの界面剥離の評価方法を確立した。

第四章では、第三章で得られた界面剥離の評価方法を実使用環境での TBC システムの損傷評価に適用するために、熱機械疲労(TMf: Thermo-Mechanical Fatigue)試験時の TBC システムの内部力学場を詳細に調べた。

解析では、まず、温度勾配の存在する多層構造に対する熱応力の解析解を求め、温度勾配下の TBC システムの基本的な力学挙動を明らかにした。ついで、3次元の単位セル有限要素法モデルを用いて TMf サイクル下での TBC システムの非線形解析を行った。各層材料の応力の TMf サイクルによる変化は試験片のクリープ挙動により支配され、異方性を示していることが明らかになった。試験片の全歪みは TMf サイクル数の増加に従い、一定の歪み速度で増加しており、また負荷応力を増やすことにより歪み速度が大きくなる傾向にあることが明らかになった。

さらに、TMf サイクル中に TBC 層とボンドコート層間に酸化によって生じる酸化物層(TGO 層)の応力状態について検討した。その結果、TGO 層の負荷方向に沿う応力成分はサイクル依存性を示しており、サイクル数の増加にしたがって減少した。また、このような TGO 層応力の変化は負荷応力および界面形状により大きく影響されることを明らかにした。

以上の結果から、TBC システムの熱機械疲労試験を有限要素法でシミュレーションする手法を確立した。この計算手法では、システムの構成材料特性のみを用いており、さらに界面剥離の条件を組み込むことも可能であり、TBC システムの損傷を解析する手法として利用可能であると考えられた。

第五章では、本研究を要約し、得られた研究結果をまとめた。

以上のように、本論文はセラミックス熱遮蔽コーティングシステムでの界面力学特性及び熱機械疲労試験時の内部力学場を有限要素法を用いて解析し、熱遮蔽コーティングの信頼性向上を図るための手法を解析的に明らかにしたものである。