研 究

レーザー局所加熱試験による傾斜機能材料の熱衝撃破壊
及び熱応力緩和特性評価に関する研究

東北大学 大学院〔(現) 旭硝子(株)〕 宮脇 和彦

東北大学 工学部

橋田 俊之, 高橋 秀明

Kazuhiko Miyawaki, Toshiyuki Hashida and Hideaki Takahashi: Study on Evaluation of Thermal Shock Fracture and Thermal Stress Relaxation Property of FGM by Laser Local Heating Technique.

This paper presents some results of transient thermal transfer and thermal stress analyses of thermal barrier coatings subject to rapid heating. The objective of this study is to develop a laser heating test for evaluating the thermal shock resistance of functionally gradient materials (FGMs). The numerical calculations are conducted on plasma-sprayed single-layer ZrO_2 (stabilized with 8% Y_2O_3), and FGM which consists of multilayer with varying mixture ratios of ZrO_2 and NiCrAlY deposited on a stainless steel substrate. The thermal barrier coatings with temperature dependent thermal and mechanical properties are heated by laser impingement. The transient thermal stress distribution is determined based on temperature profile using a finite element method. The intensity distribution within laser beam is taken into account. Based on the numerical results, the effect of the gradient composition in the FGM on the thermal shock resistance is examined. It is shown that the numerical analysis can provide a quantitative description of the enhanced thermal shock resistance of the FGM.

(Received August 23, 1990)

1 緒言

熱応力緩和型傾斜機能材料は、次世代の宇宙往還機の機体表面や推進システム等への適用を目的として開発が進められている、新しい複合材料である。現在の研究のターゲットは、セラミックスと金属などの異種材料を構成要素とし、それらの空間的組成分布を連続的に制御することにより発生する熱応力を緩和させる熱応力緩和型傾斜機能材料を開発することである⁽¹⁾。この型の傾斜機能材料の適用が期待される部位は、空気との摩擦あるいは燃焼ガス等により急速加熱されるため、まず過渡的熱衝撃に耐え得ることが第一要件となる。耐熱衝撃性評価の試験法は、実環境の高熱流束かつ高温度落差の熱負荷条件を模擬したものだけではなく、また傾斜機能材料の効率的な開発のためには小型試験片で対応できるものであることが必要となっている。この背景に基づき著者らは、熱衝撃加熱として、レーザー局所加熱を用いた試験を実施してきている。

本研究では、 ZrO_2 とNiCrAlYからなるプラズマ溶射コーティング材について既に実施されているレーザー局所加熱試験の非定常熱応力解析を実施する。均一材と傾斜材の実験結果を模擬することにより、傾斜化の熱応力緩和特性に及ぼす効果について検討する。

2 レーザー局所加熱試験法および結果の概説

本章では、非定常熱応力解析の対象であるレーザー局所加熱試験とその実験結果⁽²⁾について概説する。

Fig. 1にレーザー局所加熱試験法の概略図を示す。レーザービームは所定の寸法に集光されたのち試料表面に照射される。スリット法⁽³⁾により評価された本レーザービーム内のエネルギー分布は、ほぼガウス曲線で近似できることがわかっている。照射時間はチャッパにより制御される。照射条件は1秒照射その後空冷である。熱衝撃破壊過程をモニターするために、AE計測を行なう。AEセンサーは試料に直接装着されている。実験では、レーザー出力を段階的に増大させ、AE計測により熱衝撃き裂発生時のレーザー出力を決定し、さらに実験後試料表面および断面のSEM観察によってき裂形態を観察する。

解析の対象としたプラズマ溶射材は、均一コーティング材と傾斜材である。その試験片仕様をTable 1に示す。母材はすべてステンレス (SUS304) であり、試験片形状は $30 \times 30 \times 3.4$ mmの板状である。均一コーティング材は、8% Y_2O_3 で安定化された ZrO_2 である。傾斜材は ZrO_2 -8% Y_2O_3 とNiCrAlYを構成要素とし、その混合比を11段階に傾斜積層したものである。すなわち、試料表面は ZrO_2 で

あり、母材界面はNiCrAlYである。その間は厚み方向に対して線形的に混合比を変化させた層が1層積層されている⁽⁴⁾。

レーザー試験結果をTable 2にまとめて示す。レーザー出力を照射面積で除した値をレーザー出力密度として表わす。ここにレーザー照射直径は、ビーム中心強度の $1/e$ 強度点での直径を用いる。き裂発生時の出力を臨界レーザー出力密度と呼ぶ。均一コーティング材と傾斜材の実験結果を比較すると、傾斜化により臨界レーザー出力密度が増大していることがわかる。き裂の形態は、いずれもコーティング表面に垂直な縦割れであった。また、A/E信号の発生時は1秒照射後の空冷時である。

3 熱応力解析方法

均一コーティング材と傾斜材の2種材料について、汎

用有限要素プログラム解析COSMOS/Mによる非定常弾性熱応力解析を実施した。計算に用いた2次元軸対称モデルの概念図をFig.2に示す。レーザービーム内のエネルギー分布測定結果に基づき、レーザー源をガウス型エネルギー分布を有する熱照射により模擬した。予備計算によれば、Fig.2に示した直径以上のモデルを用いても、レーザー照射1秒後の温度分布及び応力分布は変化しない。そこで、6mm寸法のモデルを採用し、有限要素の適正なアスペクト比を得た。さらに、熱的境界条件に関する検討を行い、試料表面から大気への熱伝達と熱放射の影響は無視し得ることを確認した。この結果に基づき、境界条件は熱流束を与える面以外は断熱とした。初期温度は0℃である。

計算の対象とした試験片はTable 1の均一コーティング材と傾斜材である。同一のプラズマ溶射条件で製作され

Fig.1 Laser heating test method.

Table 1 Specification of specimens

Spec. No.	Composition	Arc Current for Ni Alloy (A)	Arc Current for ZrO ₂ (A)	Gas Flow Rate (l/min)	Spray Angle (deg.)	Coating Thickness (mm)
<u>Non-FGM</u> 8T16	ZrO ₂ (8Y ₂ O ₃)	800	1200	45	61	0.32
<u>FGM</u> 8T12	ZrO ₂ (8Y ₂ O ₃) + NiCrAlY	800	1200	45	61	0.35

Table 2 Results of laser thermal shock tests

Spec. No.	Spot Dia. D (mm)	Heating Time' (sec)	Critical Power Density Pc (W/mm ²)
<u>Non-FGM</u> 8T16	1.1	1.0	<6.3
<u>FGM</u> 8T12	1.05	1.0	9.2

ている。この2種材料に、それぞれTable 2に示した臨界レーザー出力密度（各々 6.3W/mm^2 および 9.2W/mm^2 ）に相当する熱負荷を与えた場合の非定常熱伝導、熱応力解析を実施した。均一材に関しては最小安定レーザー出力の制限により正確な臨界レーザー出力密度は得られていないが、破面の規模から判断するとTable 2に与えた数値が臨界レーザー出力密度にほぼ等しいものと考えてよい。さらに傾斜材に、均一材で観察されたき裂発生時の熱負荷を仮想的に与えた場合について解析した。

計算に用いた ZrO_2 、 NiCrAlY ならびにステンレス鋼の熱的および機械的物性値をTable 3に示す。表中の主な物性については、文献(5)、(6)を参考にしている。傾斜材における各層の物性値は、球状分散相を含む多相材料に関するケルナー則^{(7)・(8)}を用い、Table 3の数値を基に推定した。

4 解析結果および考察

均一材に 6.3W/mm^2 、傾斜材に 6.3 及び 9.2W/mm^2 の熱照射を与えた場合の温度解析結果を、照射1秒後の試料中心板厚方向分布についてFig.3に示す。以降図中では、均一材と傾斜材をそれぞれNon FGM、FGMと表記する。また、横軸が 0.32mm と 0.35mm の位置は、均一材と傾斜材の各下地との界面を示している。同一照射条件下（ 6.3W/mm^2 ）で均一材と傾斜材を比較した場合、傾斜材の表面到達温度は均一材と比較し約 250°C 程度低くなっており傾斜相の高い熱伝導性を示している。以下にこれらの温度に達するまでの熱応力状態を解析した結果に基づき、傾斜化による熱応力緩和特性についての検討を行う。

本レーザー局所加熱熱衝撃試験の破壊機構に関するこれまでの検討により、加熱時に試料中心部表面近傍で生じる面内応力の高い二軸圧縮応力状態がレーザー熱衝撃破壊の主因となるという知見が得られている⁽²⁾。そこで、本研究においても加熱中に生じている試料中心部の面内応力に着目する。試料中心部では半径方向応力と周方向応力は同じ値となっているので、ここでは半径方向応力（ σ_{rr} ）の板厚方向分布のみを示すこととする。同一照射条件での均一材、傾斜材それぞれの試料中心部半径方向応力の板厚方向分布をFig.4に示す。両者の場合とも照射開始後の早期に表面近傍の圧縮応力が最大値を示している。照射1秒後には表面圧縮応力は僅かに減少している。時間経過とともに試料の温度および勾配が上昇する。

Fig.2 Schematic of the model used for thermal stress analysis.

Table 3 Thermal and mechanical properties used for thermal stress analysis

	Thermal Conductivity ($\times 10^{-3}\text{W/mm}\cdot^\circ\text{C}$)	Specific Heat ($\text{J/g}\cdot^\circ\text{C}$)	Density ($\times 10^{-3}\text{g/mm}^3$)
ZrO_2	$10^\circ\text{C} - 0.721$ $1079^\circ\text{C} - 2.16$ $1497^\circ\text{C} - 2.73$	$10^\circ\text{C} - 0.491$ $1094^\circ\text{C} - 0.670$ $1497^\circ\text{C} - 0.737$	5.67
NiCrAlY	$10^\circ\text{C} - 5.77$ $1079^\circ\text{C} - 16.6$ $1497^\circ\text{C} - 20.8$	$10^\circ\text{C} - 0.410$ $1094^\circ\text{C} - 0.712$ $1497^\circ\text{C} - 0.794$	6.98
SUS	16.5	0.51	7.86
	Young's Modulus (GPa)	Thermal Expansion Co. ($\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$)	Poisson Ratio
ZrO_2	$E = 45.06 - 0.0248T$; T in $^\circ\text{C}$	$100^\circ\text{C} - 9.75$ $400^\circ\text{C} - 10.7$ $600^\circ\text{C} - 10.9$ $1000^\circ\text{C} - 10.7$	0.23
NiCrAlY	$E = 125.6 - 0.0149T$; T in $^\circ\text{C}$	$100^\circ\text{C} - 12.5$ $400^\circ\text{C} - 14.3$ $600^\circ\text{C} - 15.7$ $1000^\circ\text{C} - 16.5$	0.23
SUS	206.0	16.4	0.29

るにもかかわらず発生する熱応力が減少するのは弾性率の温度依存性が影響していると考えられる。ここで比較のため、両者の照射1秒後の結果をFig.5に併記する。傾斜材で生じている表面中心近傍での圧縮応力は均一材に比べ小さいものとなっている。この結果は、一秒照射中に発生する最大応力についても同様である。Fig.5の比較で、試験片表面近傍における応力勾配が著しく異なっていることが注目される。脆性材料の破壊に関する研究によれば、一般に、破壊は応力勾配の差に大きく支配され、最大応力が同等でも応力勾配が小さいほど、すなわち高応力を受ける材料の体積が大きいほど破壊荷重は小さい。従って、傾斜材で観察された臨界レーザー出力密度の増大すなわち耐熱衝撃特性の向上には、発生する最大応力が小さいことに加えて、応力勾配の大きいことも要因となっているものと判断される。事実、同一の条件でレー

Fig.3 Temperature distribution along axial direction; time is 1 sec.

(a) Non FGM (single-layer ZrO_2 coating)

(b) FGM

Fig.4 Radial stress distribution along axial direction ($6.3W/mm^2$).

Fig.5 Effect of gradient composition.

Fig.6 Radial stress distribution in FGM ($9.2W/mm^2$)

(a) Non FGM (single-layer ZrO_2 coating)

(b) FGM

Fig.7 Axial stress distribution ($6.3W/mm^2$).

レーザー照射された試験片の破面観察では、表面から進展した縦き裂は、傾斜材の方が小さいことが示されている⁽²⁾。傾斜材の臨界レーザー出力密度照射時の試料中心部の応力分布をFig.6に示す。表面の最大応力が、均一材のき裂初生時の最大応力と同程度になっていることが観察される。さらに、応力勾配はFig.4に比較して小さくなっている。

いま、均一材について算出された一秒照射後の温度ならびに面内応力分布に注目すると、その大きさおよび分布は、ロケットのスラストチャンバー熱防御壁を対象にした解析結果⁽⁵⁾とほぼ同程度となっている。従って、本レーザー局所加熱試験法が上述の実機部材などの耐熱衝撃性能評価に有効であることがわかる。

同一照射条件での均一材と傾斜材の軸方向応力の板厚方向分布をFig.7に示す。両者を比較するとコーティング層内では類似の挙動を示しており顕著な差はみられない。母材との界面近傍で比較的高い引張応力が発生しているが、傾斜材においてはその箇所に高い比率のNi基合金が配置されており、剥離の可能性を低減できているものといえる。また均一材においても、A/E信号が加熱中に検出されていないことや破面観察においても剥離き裂が認められなかったことより、その影響は小さかったものと考えられる。

5 結言

ZrO_2 均一コーティング材及び ZrO_2 と $NiCrAlY$ を構成要素とする傾斜材のレーザー局所加熱試験結果を対象に非定常熱応力解析を行い、以下の知見を得た。

(1) レーザー加熱により、傾斜材の表面に発生する面内圧縮応力は均一材におけるものより小さいことを示し、さらに応力勾配の差異が傾斜化による耐熱衝撃特性の向上に寄与していることを示した。

(2) 軸方向応力の分布は、均一材および傾斜材でほぼ

同じであり、かつその大きさは小さい。

(3) レーザー局所加熱試験により発生する温度ならびに応力分布は、ロケットのスラストチャンバー等の熱防御壁で予想されるものに近く、本レーザー局所加熱試験法を実機部材の耐熱衝撃性能の予測に適用可能であることを示した。

謝辞 本研究は科学技術庁科学技術振興調整費による「熱応力緩和のための傾斜機能材料開発の基盤技術に関する研究」の一環をなすものである。また、一部には文部省科学研究費試験研究(課題番号01850024)ならびに奨励研究(課題番号02855014)を用いたことを付記する。

文献

- (1) 複素化による機能発現と熱応力緩和のための基礎技術に関する調査報告書、昭和61年度科学技術振興調整費、科学技術広報財団、(1987)。
- (2) 橋田俊之、高橋秀明、宮脇和彦：粉体および粉末冶金、37-2、(1990)、127-132。
- (3) 丸尾大、宮本勇、荒田吉明：溶接学会論文集、3-1 (1985)、185-190。
- (4) 福島孟：第3回傾斜機能材料に関するシンポジウム予稿集、傾斜機能材料研究会、(1989)、1-5。
- (5) A.P.Batakis and J.W.Vogan: NASA CR-175022 (1985)。
- (6) B.T.F. Chung, M.M. Kermani, M.J. Braun, J. Padovan and R.C. Hendricks: J. Engineering for Gas Turbines and Power, 107 (1985), 135-141。
- (7) E.H. Kerner: Proc. Phys. Soc. B, 69 (1956), 802-807。
- (8) E.H. Kerner: Proc. Phys. Soc. B, 69 (1956), 808-813。