热障涂层在机械载荷与激光联合作用下的变形与破坏研究* STUDIES ON THE DEFORMATION AND FAILURE OF THERMALBARRIER COATING UNDER THERMAL-MECHANICAL LOADING

席 军**1 段祝平2

(1. 北京石油化工学院 机械工程系,北京 102617)

(2. 中国科学院力学研究所 非线性力学国家重点实验室,北京 100080)

XI J un 1 DUAN Zhu Ping 2

(1. Department of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Petrochemical Technology, Beijing 102617, China)

(2. State Key Laboratory of Nonlinear Mechanics, Institute of Mechanics, Chinese Academy

of Sciences, Beijing 100080, China)

摘要 在以激光器为热源和机械加载的工作环境中对热—力联合作用下含有梯度层的热障涂层的变形和破坏行为进行研究。通过实验,分析讨论热障涂层破坏形式以及涂层厚度和梯度层的影响。在有限元分析中,考虑材料的塑性变形以及物理性质随温度变化的情况,模拟实验过程中应力和应变的时空分布,模拟结果与实验观察现象和结果吻合良好。

关键词 热障涂层 有限元法 热力加载 破坏

中图分类号 O343.6 TB131

Abstract The objective of this research was to study the deformation and failure of ceramic thermal barrier coating (TBC), with and without functionally graded material (FGM) under thermal-mechanical loading. The behavior of TBC failure and the effect of thickness of coating and FGM were investigated experimentally. Plasticity and temperature dependent character of material properties were employed, the deformation and stresses of the specimens were analyzed using the finite element method (FEM).

 $\begin{tabular}{ll} \textbf{Key words} & \textbf{Thermal barrier coating (TBC) ; Finite element method(FEM) ; Thermal mechanical loading; Failure and the following of t$

Corresponding auther: XI Jun, E-mail: xijun @bipt. edu. cn, Fax: +86-10-81292134

The project supported by Major Research Plan(19891189-04) of National Natural Science Foundation of China and laser project of the National High Technology Research and Development Program of China(863 Program).

Manuscript received 20040209, in revised form 20040607.

1 引言

热障涂层是一种在高温环境中广泛使用的结构。 在航天、核反应堆、燃气轮机和航空发动机等领域,热 障涂层的运用能有效提高零部件的工作温度,保护涂 层下面的金属基底,从而提高发动机等机械的工作效 率,延长工作寿命。在实际使用过程中,涂层与基底因 为热失配而发生界面断裂,导致热障涂层剥落而失效。 为提高涂层与基底的结合强度,改善界面条件,在涂层 与基底之间采用一种成分连续变化的过渡层,以期缓 和界面应力,该过渡层被称为功能梯度层。目前研究 者们在认识热障涂层的失效形式和机理,并据此改善 材料性能方面已开展了大量的工作^[1,2]。

激光作为一种热源,具有能量集中、升温快等特

点,已成为模拟高温热冲击环境^[3,4]的一种有力手段。通过调节激光器的功率,可以获得从常温到 1 400 的温度环境,这正是发动机、燃气轮机的启动阶段或航天器高速进入大气层的工作环境。

在单纯的热冲击下,热障涂层的破坏形式表现为表面断裂、涂层从基底剥落和涂层中间层裂。已有的研究表明,材料所承受的热载荷、涂层的加工工艺、涂层中的孔隙率、长时间高温环境下的蠕变、反复热循环的疲劳、涂层中微裂纹引起的断裂、高温下粘接层与涂层之间氧化层的生长以及热障涂层的几何形貌等等都对涂层寿命产生影响^[5,6]。热障涂层的热破坏形式各种各样,破坏机理视具体工作环境而异。目前,已有的工作主要对单纯热冲击载荷下涂层的破坏进行研究。但在实际工程中,构件不仅要受到各种高温热流载荷,

^{* 20040209} 收到初稿,20040607 收到修改稿。国家 863 高技术激光技术领域项目和国家自然科学基金重大项目(19891189-04)资助。

^{**} 席 军 ,男 ,1970 年 3 月生 ,四川省遂宁人 ,汉族。北京石油化工学院机械系 ,博士。从事材料在热力联合作用下破坏机理的实验和理论分析研究。

同时还承受复杂的机械载荷。在这种情况下,结构内 部受力情况更加复杂,其破坏的形式和主导因素也不 清楚。本文采用以激光为热冲击加载源和机械加载共 同作用手段,对热一力联合作用下热障涂层的破坏进 行研究。通过实验,了解、分析破坏的具体形式以及涂 层厚度和梯度层的影响,并通过有限元分析,考虑材料 的塑性变形以及物理性质随温度变化的情况,模拟实 验过程中应力和应变的时空分布,结果与实验结果进 行比较分析。

实验研究

2.1 实验装置

实验系统主要由三部分组成,激光器、加载台和测 试系统。图 1 为整个实验装置示意图。激光采用输出 功率 400 W 的连续固体激光器,光强为高斯分布,光斑 直径可以调节到最小 5.5 mm;由专门设计的单向加载 装置提供恒定机械载荷,可以加载到 1 000 N (牛顿 力);测试系统采用热电偶测量试件背面的表面温度, 用高温应变计测试试件背面的横向应变,温度和应变 信号经电路放大分析由计算机实时记录、具有反应快、 测量范围大的特点:其中应变测试属于小应变范围:温 度不超过500。

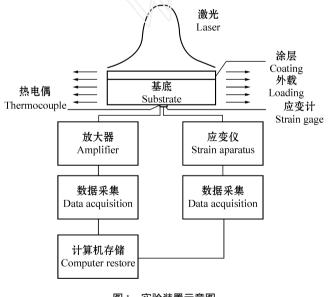


图 1 实验装置示意图

涂层(ZrO₂)

Coating

0.3

0.5

0.2

Fig. 1 Schematic figure of experiment system

75 % ZrO₂ + 25 % NiCrAl

0.1

2.2 实验过程

试件设计成长方形,分含过渡层和不含过渡层两 种,不含过渡层的试件涂层包括 0.3 mm 和 0.5 mm 两 种厚度。表1列出不同试件的结构和层厚数据。试件 两端用胶与螺栓固定,通过砝码对试件加载。试件表 面抹胶水,然后涂上碳黑,以保证激光在涂层表面的 有效吸收。

在试件背面光斑中心处焊热电偶(镍铬 -镍铝, K 型).并与工控机相联,可自动采集与存储实验数据。 同时在电偶附近沿试件长度方向贴高温应变计测量变 形历史。应变计由高温胶粘贴,在200 高温下保温3 小时以防止蠕变。整个实验过程中试件背面的温度和 应变历史均可测量并记录,以作为分析计算的边界条

陶瓷涂层喷涂工艺参数见表 2。陶瓷成分为 20 % 钇稳定的氧化锆,基底材料为不锈钢1189,中间为陶瓷 与粘接层的混合物,由粘接层到涂层有三层,材料分别 是 75/25(75%的粘接层和 25%的陶瓷)、50/50、25/75。 这使材料性能在厚度方向有了梯度变化。

实验分两批次,第一批主要考察外载对试件变形 破坏行为的影响。第二批在固定外载条件下,考察试 件破坏时对应的激光能量。

2.3 实验结果和初步分析

2.3.1 热载过程中温度和变形的变化

没有外载条件下,用激光器的最大功率辐照试件, 试件有明显的屈曲变形,但不发生破坏。在热一力联 合作用下,试件都会发生破坏。较小的预载对材料破 坏影响较小,随着外载增加,结构中预应力增大,在较 小的功率密度下激光也可使结构破坏。

试件背面温度历史如图 2.这是光斑中心背后的 温度。实验结果显示,当激光加热时间达 60 秒时,试 件温度达到最高值,以后不再明显增加。由于不同试 件总的有效热传导系数不同,在相同激光功率和辐照 时间下试件背面温度呈现不同状态,陶瓷层最厚的试 件背面温度最低,陶瓷层最薄的试件背面温度最高。 实验数据表明,氧化锆陶瓷的热导率低,隔热效果好, 是决定试件温度分布的关键因素之一。

图3展示在激光辐照过程中试件背面应变的变化

表1 试件结构

Tab. 1 Structure of specimens

50 %ZrO2 + 50 %NiCrAl

0.1

| 25 %ZrO ₂ + 75 %NiCrAl | 粘接层(NiCrAl) Bond layer | 基底(1Cr18Ni9Ti) Substrate |
|-----------------------------------|---------------------------|-----------------------------|
| _ | 0.1 | 1 |
| 0.1 | 0.1 | 1 |

mm

单层

Single layer

多层

Multiple layers

表 2 等离子涂层喷涂工艺参数

Tab. 2 Produce parameters of specimens

| 输入功率 Power input | 600 A ×80 V |
|-------------------------------|--------------------------------------|
| 喷涂距离 Spraying distance/mm | 110 ~ 120 |
| 工作气体 Work gas | $Ar(80 \%) + H_2(15 \%) + N_2(5 \%)$ |
| 气流压力 Gas flow pressure/MPa | 0.75 |
| 送粉速率 Powder feed rate/(g/min) | 150 ~ 250 |
| 横移速度 Traverse speed/(m/s) | 3~5 |
| 喷嘴直径 Diameter of nozzle/mm | 7 |
| 粉末尺寸 Size of powder/ µm | 140 |
| 烘干温度 Drying temperature/ | 85 |

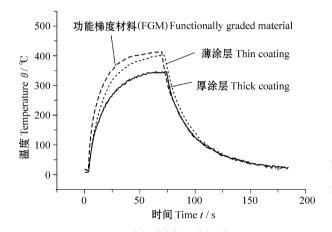


图 2 不同厚度涂层试件背面中心温度历史 Fig. 2 Temperature history of the center on the back of specimen vs different thickness

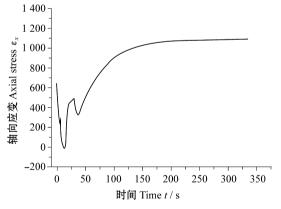


图 3 试件背面中心沿板轴方向 x 变化历史 Fig. 3 Strain x history of the center on the back of specimen along the direction of loading

历程,由图可知,激光开始辐照涂层表面时,陶瓷膨胀给金属以压力,随着热扩散,热失配开始发生作用,金属的膨胀超过陶瓷,试件背面压缩到达一峰值后反向拉伸,激光关闭后小幅回弹,接下来继续拉伸至最终稳定下来,这时应变已经超过初始值,发生了塑性应变。试件冷却至室温后为一个曲率中心指向热源的弓形(如图 4)。

2.3.2 热载过程中的破坏情况

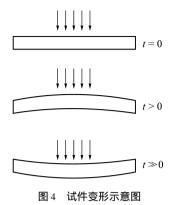
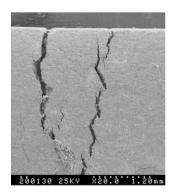


Fig. 4 Schematic process of structure deformation

通过扫描电镜和高倍光学显微镜观察发现,裂纹垂直于载荷方向,为横向拉伸断裂,从侧面观察可见,裂纹只发生在陶瓷层厚度方向,陶瓷与基底界面并无裂纹发现(如图 5)。这些现象表明热载过程中的破坏主要表现为陶瓷表面的横向拉伸断裂,陶瓷层的断裂及破坏最终会导致涂层结构的失效,使得金属基底承担全部载荷,金属产生塑性拉伸变形,最后断裂。这主要是因为陶瓷为脆性材料,变形比较小,而且抗拉伸能力较弱,所以在拉伸和热载荷下首先发生脆性断裂。



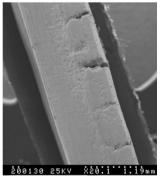


图 5 陶瓷表面宏观裂纹

Fig. 5 Macroscopic cracks in ceramic

2.3.3 厚度对试件破坏的影响

由于激光功率和加载能力有限,试样中破坏的不是太多,但是从已有的破坏情况看,厚度的影响还是存在的。图 6 给出在不同的载荷和激光功率下,不同厚度试件破坏图谱,其中是厚板,是含梯度层板,是较薄板,x表示试件已经破坏。如图所示,在较低的外载和激光功率作用下,厚涂层发生破坏而且数量相对较多,薄涂层和有过渡层的试件破坏所需要的外载和激光功率都较大、数量也较少。从图中可以大致将厚涂层的破坏点用曲线连接成破坏所对应的外载和激光功率图谱,曲线以外的区域为破坏区,位于曲线下的区域,试件将不会破坏。实验结果表明,厚涂层最容易失效,薄涂层和功能梯度材料(functionally graded material,FGM)抗破坏能力强一些,

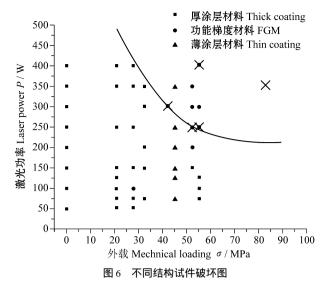


Fig. 6 Schematic figure of specimens destroyed

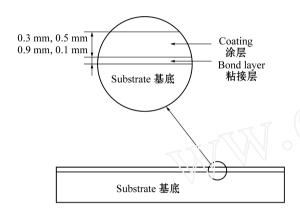


图 7 数值模拟中的双层结构

Fig. 7 Schematic description of the duplex layer geometry used in FEA (finite element analysis)

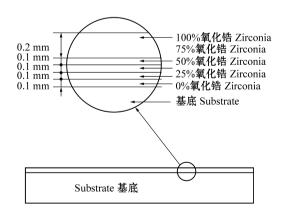


图 8 数值模拟中的含梯度层结构

Fig. 8 Schematic description of the FCM geometry used in FEA 至于后两种材料的抗破坏性能比较,有待以后分析。

3 数值分析

3.1 数值模型

针对本文所涉及的热力现象,采用 ANSYS 软件提供的数值平台,对实验情况进行有限元数值模拟。在

高温环境中材料变形不仅仅限于弹性范围,特别是对金属材料而言,塑性变形是很容易发生的。金属的延性较好,在发生塑性变形的情况下还有很大的承载能力,对结构的使用并不影响,所以一定程度的塑性存在也是允许的。另一方面,对在高温环境中工作的热障涂层材料来说,物理性能随温度的变化十分明显,不能不加以考虑。高温不仅改变材料物理性质,从而改变温度分布和应力分布,高温也使材料承载能力降低,改变材料的弹性极限、塑性极限和破坏准则。温度对材料性能的影响应该考虑。因此,在数值分析过程中,主要考虑金属的塑性变形和材料物理性质随温度变化的情况。

模型基本假设如下

- 1) 在连续激光长时间的辐照下,惯性效应可以忽略,这样问题可以作为准静态情况。
- 2) 由于准静态情况下变形率比较低,塑性应变所产生的热可以忽略不计。这样在热传导方程中只需考虑激光热源引起的热扩散。
- 3) 材料性质仅随 z 轴变化,双层材料在界面不连续,含梯度层的材料在梯度层性质连续变化;其他方向上,材料性质是均匀的。
- 4) 基底材料采用双线性弹塑性本构,粘接层和涂层用线弹性本构。

在这个问题中,几何结构和边界条件都是对称的, 所以取四分之一进行建模计算。模型的几何尺寸为, 长 30 mm、宽 8 mm,与实验一致,涂层分双层与含过渡 层两种结构(见表 3、4),双层的厚度分别为 0.3 mm、 0.5 mm、0.9 mm。图 7、图 8 分别为有限元计算模型示 意和 FGM 模型示意。

表 3 双层模型几何尺寸

Tab. 3 Geometric sizes of duplex layer model

| | 薄 Thin specimen | 中等 Middle specimen | 厚 Thick specimen |
|------------------------------------|--------------------|-----------------------|---------------------|
| 基底厚/ mm Thickness of substrate | 1 | 1 | 1 |
| 粘接层厚/mm Thickness of bond layer | 0.1 | 0.1 | 0.1 |
| 涂层厚/mm Thickness of coating | 0.3 | 0.5 | 0.9 |

3.2 初始条件和边界条件

为了准确地分析问题,选取与实验一致的初始条件和边界条件。初始材料温度为常温,纵向受固定拉伸载荷,材料只能纵向移动,其他两方向受约束。在 t=0时刻,在热障涂层表面中心加连续激光辐照,在分析中作为第二类热边界条件处理,激光空间上为高斯

mm

表 4 多层模型几何尺寸

Tab. 4 Geometric sizes of FGM

| | 涂层(ZrO ₂) Coating | 75 % ZrO ₂ + 25 % NiCrAl | 50 % ZrO ₂ + 50 % NiCrAl | 25 %ZrO ₂ + 75 %NiCrAl | 粘接层(NiCrAl) Bond layer | 基底(1Cr18Ni9Ti) Substrate |
|-----------------------|----------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------|-----------------------------|
| 多层 Multiple layers | 0.2 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 1 |

表 5 不同温度下不锈钢的物理参数

Tab. 5 Physical parameters of 1Cr18 Ni9 Ti vs different temperature

| | | | P | | | | | | | |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| 温度 / Temperature | 20 | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 | 900 |
| 弹性模量 E/ GPa Bastic modulus | 184 | _ | _ | 159 | _ | _ | 137 | 120 | 88 | _ |
| 导热系数 / (W(m·) - 1) Heat transfer coefficient | _ | 16.3 | 17.6 | 18.8 | 20. 5 | 21.8 | 23.5 | 24.7 | 26.4 | 28.5 |
| 热膨胀系数 ×10 ⁶ / Thermal expansion coefficient | 16.6 | _ | 17.0 | 17.2 | 17.5 | 17.9 | 18. 2 | 18.6 | _ | _ |
| 密度 /(g cm ⁻³) Density | 7.9 | 7.9 | 7.9 | 7.9 | 7.9 | 7.9 | 7.9 | 7.9 | 7.9 | 7.9 |
| 比容 C/(J(kg·) ⁻¹) Thermal capacity | 502 | 502 | 502 | 502 | 502 | 502 | 502 | 502 | 502 | 502 |
| 泊松比 Poisson 's ratio | 0. 24 | 0. 24 | 0. 24 | 0. 24 | 0.24 | 0. 24 | 0. 24 | 0. 24 | 0. 24 | 0.24 |

表 6 不同温度下粘接层的物理参数

Tab. 6 Physical parameters of NiCrAl vs different temperature

温度 500 600 700 800 900 1 000 Temperature 弹性模量 E/ GPa 184 179 171 164 156 144 Elastic modulus 导热系数 Heat transfer coefficient 20.1 23.024.7 26.8 27.0 $/[W(m \cdot)^{-1}]$ 热膨胀系数 ×10⁶/ 19.2 25.6 25.4 25.3 25.2 Thermal expansion coefficient 密度 / (g cm⁻³) 7.9 Density 比容 C/(J(kg·)-1) 370 370 370 370 370 Thermal capacity 泊松比 0.25 0.25 0.25 0.25 0.25 0.25 Poisson 's ratio

分布。激光表面吸收系数按经验取 15 %,光斑直径为 5.5 mm。辐照时间为 30 秒,然后冷却。在材料的背面 和涂层未受激光辐照的地方与空气有热交换,空气换热系数取 30 W/(m²·)。材料侧面由于面积较小作绝热边界处理。

3.3 材料参数

基底、涂层和粘接层材料的物理参数考虑随温度 变化的情况。这些变化曲线从材料手册^[7]或者相关文 献^[6]中可以获得,见表5、6、7。对于中间过渡层的材

表 7 不同温度下陶瓷的物理参数

Tab. 7 Physical parameters of $ZrO_2 + Y_2O_3$ vs different temperature

| 温度 / Temperature | 500 | 600 | 700 | 800 | 900 | 1 000 |
|---|-------|-------|------|-------|-------|-------|
| 弹性模量 E/ GPa Elastic modulus | 44 | 41 | 38 | 37 | 36 | 34 |
| 导热系数 $ / (W(m \cdot)^{-1}) $ Heat transfer coefficient | 1.8 | 1.8 | 2.05 | 2.05 | 0.92 | 0. 92 |
| 热膨胀系数 ×10 ⁶ / Thermal expansion coefficient | 13.9 | 19. 4 | 17.7 | 14.7 | 12.3 | 9.6 |
| 密度 /(g cm ⁻³) Density | 5.6 | 5.6 | 5.6 | 5.6 | 5.6 | 5.6 |
| 比容 C/(J(kg·)-1) Thermal capacity | 450 | 450 | 450 | 450 | 450 | 450 |
| 泊松比 Poisson 's ratio | 0. 26 | 0.26 | 0.26 | 0. 26 | 0. 26 | 0. 26 |

料参数,按照目前各种文献所普遍采用的方法,即根据不同材料的体积比率混合折算。

3.4 计算结果和分析

试件在激光辐照下,温度迅速上升,随着温度升高,试件与外界热交换加快,温度上升变缓,所以升温经历了先急后缓的过程。当激光关闭失去热源之后,试件通过向外界散热,温度迅速下降。图9为计算机模拟的试件金属表面中心温度的变化历史与实验结果的比较。图中计算结果在最高温度和降温阶段稍微高

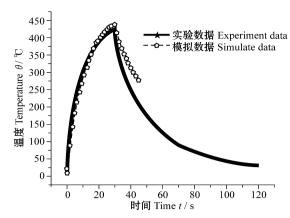


图 9 试件背面温度历史的实验和计算结果

Fig. 9 Experiment results vs computering one of temperature history on the back of specimen

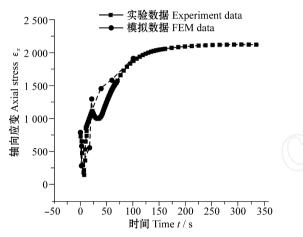


图 10 0.3 mm 涂层结构金属背面应变历史的实验和模拟曲线 Fig. 10 Experiments results vs computering one of strain history on the back of specimen with 0.3 mm coating

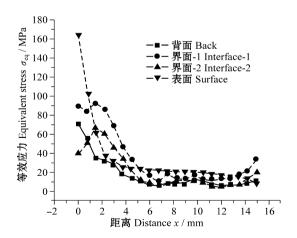


图 11 0.5 mm 涂层试件不同界面在激光辐照最后 时刻的等效应力分布情况

Fig. 11 Equivalent stress distribution in different interface ${\rm of} \ 0.5 \ {\rm mm} \ {\rm coating} \ {\rm at} \ 59.5 \ {\rm second}$

出实验结果一点,可能是实验中试件散热效果比计算所取值要大一些,不过在误差范围内,实验和计算的结果还是吻合得比较好的。图 10 显示的是 0.3 mm 涂层结构金属背面应变历史的实验和模拟曲线,虽然模拟

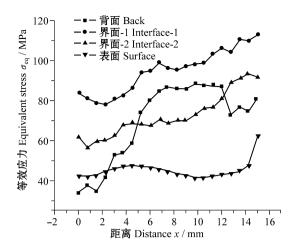


图 12 激光刚关掉时刻 0.5 mm 涂层试件中不同界面的等效应力分布情况

Fig. 12 Equivalent stress distribution in different interface of $0.5~\mathrm{mm}$ coating at $60.5~\mathrm{second}$

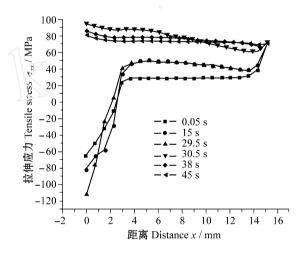
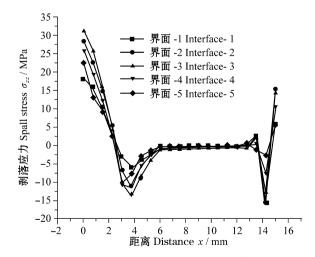


图 13 0.3 mm 涂层表面拉伸应力在不同时刻的分布 Fig. 13 Tensile stress distribution of surface at different time of thin coating



曲线只选取了有代表性的几个时刻,但结果与实验所 显示的趋势基本一致。

由于温度随时间变化,温度梯度导致的热应力分 布在不同时刻是不同的。图 11、图 12 反映0.5 mm涂层 试件在激光关闭前后试件中的等效应力分布情况。当 温度达到最高时,结构中光斑中心的等效应力有最大 值。这是因为在激光加热的最后阶段,温度达到最大 值,在结构内形成较大的温度梯度,从而产生最大的应 力。由于结构的不同,最大等效应力值出现的位置不 尽相同。0.3 mm 涂层出现在金属基底内靠近过渡层, 0.5 mm 出现在陶瓷表面,0.9 mm 出现在金属基底表 面,而多层结构出现在第二个界面上。所有的分析数 据表明,温度最高时刻陶瓷表面的等效应力最大。而 在降温过程中,表面与背面对应于光斑中心的地方与 外界热交换比较迅速,所以等效应力降低较多。激光 辐照时涂层温度比基底高,温度差使背面受压,降温过 程温差减小,在背面中部拉伸效应凸现出来,成为主导 力量,使得等效应力比表面明显大。

图 13 展示不同加热阶段陶瓷表面拉伸应力沿 x 轴的分布。在升温阶段 (0.05 s < t < 30 s),光斑内 (0 < x < 3 mm) 受热膨胀但是受到周围材料的限制,故 x_x 为压应力,其幅值为 20 MPa。而在光斑外,由于外载荷的作用, x_x 为拉伸应力。在降温阶段 (t=30 s),热源已经关掉,光斑内从受热膨胀变为冷却收缩,周围材料限制它的收缩,故在光斑内 x_x 为拉伸应力,其幅值大小在 $80 \text{ MPa} \sim 100 \text{ MPa}$ 。远离光斑处的 x_x 较光斑处低。

沿 z 轴的正应力 s_{zz} 将引起各层在厚度方向分裂,从而导致涂层直接从基底上剥落,所以考察 s_{zz} 十分重要。图 14 是各层间正应力 s_{zz} 沿 x 轴的分布。从分布来看,除了在光斑内和结构端面,剥落应力 s_{zz} 几乎为零。在光斑内(x < 3 mm) s_{zz} 为拉应力,幅值 > 16 MPa,是具有破坏性的。作为补偿,在光斑外(3 mm < x < 6 mm) s_{zz} 为压缩应力,显然它对结构的破坏没有影响。端面情况与光斑内一样,自由面的 s_{zz} 为拉应力具有破坏性,但随着位置向里逐渐演化为负值。而远离端面的地方 s_{zz} 为零。将各方向的正应力进行比较表明,应力中沿外载方向的正应力 s_{xx} 大于其他应力,成为导致结构失效的主要因素,这一点与实验结果吻合。

通过有限元分析,还可以了解涂层厚度与结构中等效应力的关系以及含功能梯度层对结构应力的影响。图 15 表明,涂层越厚,涂层中的等效应力越大,说明厚涂层更容易破坏。图 16 表明,采用多层结构的涂层中应力较双层结构有所缓和,其中最大应力减少了9 MPa,说明梯度层对降低结构中的应力、提高结构品质有一定的作用。

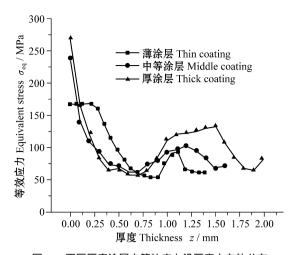


图 15 不同厚度涂层中等效应力沿厚度方向的分布 Fig. 15 Equivalent stress distribution in different thickness along thick direction

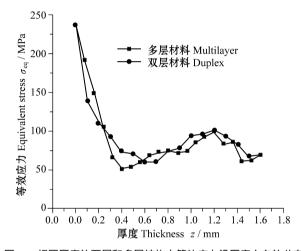


图 16 相同厚度的两层和多层结构中等效应力沿厚度方向的分布 Fig. 16 Equivalent stress distribution of specimens with same thickness and different structure along thick direction

4 结论

热障涂层材料在力与激光联合作用下的破坏行为十分复杂,涉及载荷大小、材料的结构、几何尺寸、激光强度与分布、光斑大小等多种因素,深入理解需要从各个方面全面研究。本文主要针对涂层结构的因素,以不锈钢和氧化锆构成的热障涂层材料为基础,通过实验对涂层厚度和功能梯度层的影响进行研究,并对考虑塑性和材料性质随温度变化的情况用数值模拟手段进行分析,模拟结论与实验结果基本吻合。主要结论有:

- 1) 在各层的应力分布中,拉伸应力占主导地位, 特别是外载方向的应力最大。剪切应力和界面剥落应 力很小,说明破坏为陶瓷层的拉伸断裂。
- 2) 涂层厚度影响应力分布,涂层越厚,涂层中的最大应力越大,越容易破坏。
 - 3) 在相同厚度的结构中,有梯度层的结构缓解了

涂层和界面的应力状态,有助于提高试件的抗破坏能 力。

4) 由于受热最多,温度最高,光斑中心的应力最 大,是最危险的区域。升温过程中,光斑区受压缩应 力,降温过程变为拉伸应力。由于陶瓷抗拉能力较弱, 所以降温过程最危险,涂层破坏就发生在这一过 程。

致谢

承蒙中国科学院力学研究所凌中副研究员对初稿 的认真审阅,并提出了详细的修改意见。此外,柳春图 研究员对初稿也提出了建设性意见。在此, 谨对他们 的热情帮助和支持表示衷心感谢!

References

1 Noda N, Tsuji T. Steady thermal stresses in a plate of functionally gradient material. Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers (Series

- A) ,1991 ,57 (533) :98 ~ 103.
- 2 Choules B D, Kokini K, Taylor T A. Thermal fracture of thermal barrier coatings in a high heat flux environment. Surface and Coatings Technology, 1998,106:23 ~ 29.
- 3 Pomper W, Bahr HA. Laser induced creep and fracture in ceramics. Materials Science and Engineering (A), 1997,233:167 ~ 175.
- 4 Jian C Y, Hashida T, Takahashi H,et al. Thermal shock and fatigue resistance evaluation of functionally graded coating for gas turbine blades by laser heating method. Composites Engng, 1995,5(7):879 ~ 889.
- 5 Tawancy HM, Sridhar N, Abbas NM. Failure mechanics of a thermal barrier coating system on a Nickel-base superalloy. Journal of Materials Science, 1998 33.681 ~ 686.
- 6 Khor KA, Gu YW. Effects of residual stress on the performance of plasma sprayed functionally graded ZrO2/NiCoCrAlY coatings. Materials Science and Engineering (A) ,2000 ,277 :64 ~ 76.
- 7 LI Hao. The manual of engineering materials (1). Beijing: Standards Press of China, 1988 (In Chinese) (李 灏. 工程材料实用手册(1). 北京:中国 www.cmki.met 标准出版社,1988).