

# 热障涂层用于激光防护面板理论与实验研究

张磊<sup>1</sup> 马壮<sup>2</sup> 杨鹏翎<sup>1</sup> 吴勇<sup>1</sup> 严振宇<sup>2</sup> 卢林<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>西北核技术研究所激光与物质相互作用国家重点实验室, 陕西 西安 710024)  
<sup>2</sup>北京理工大学, 北京 100081)

**摘要** 为了适应激光器的迅速发展,需要改进现有激光测量技术,设计能够满足功率密度 1000 W/cm<sup>2</sup>、时长 10 s 激光辐照的新型激光防护面板,金属铝板表面采用等离子喷涂的方法制备了氧化锆(ZrO<sub>2</sub>)热障涂层作为激光防护面板。利用不同波长的激光光源开展了涂层表面反射特性的实验研究,测量了涂层表面反射率及漫反射特性。利用数值模拟计算了激光辐照下铝面板 ZrO<sub>2</sub> 涂层的热响应。最后,利用光纤激光器开展了热障涂层防护面板激光辐照实验,验证了带有热障涂层的防护面板较未加涂层的防护面板具有一定的隔热效果,为激光测量技术的发展提供了技术储备。

**关键词** 材料;热障涂层;激光防护;反射特性;隔热性能

**中图分类号** TN256 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.s106005

## Theoretical and Experimental Investigation of Thermal Barrier Coatings for Laser Proof

Zhang Lei<sup>1</sup> Ma Zhuang<sup>2</sup> Yang Pengling<sup>1</sup> Wu Yong<sup>1</sup> Yan Zhenyu<sup>2</sup> Lu Lin<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an, Shaanxi 710024, China  
<sup>2</sup> Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract** Along with the fast development of high power lasers, the corresponding measuring techniques should be improved to withstand the long time irradiation of high power density laser beams. An aluminum panel is coated with ZrO<sub>2</sub> thermal barrier coatings (TBCs) using plasma spraying method as the high power laser proof. Diffuse reflection characteristics of the coating are investigated at different wavelengths. Finite element analysis is conducted to analyze the thermal response of the ZrO<sub>2</sub> TBCs under the high power laser irradiation. Moreover, related experiments are carried out with high power fiber lasers, which demonstrat that the TBCs is an effective method for heat insulation.

**Key words** materials; thermal barrier coating; laser proof; reflection characteristic; heat insulation performance

**OCIS codes** 120.1880; 140.3330; 140.3360

## 1 引 言

热障涂层(TBCs)作为一种功能陶瓷材料,具有高熔点、高温隔热、耐磨及抗氧化等性能,已在航空航天发动机、机车发动机及蒸汽轮机等领域得到了广泛的应用<sup>[1]</sup>。在激光测量技术领域,激光器的迅速发展迫切需要激光测量技术的改进。目前,通常采用金属材料或石墨作为激光测量设备的防护面板。随着激

光器出光功率的不断提高以及出光时长的不断增加,激光测量设备对防护面板抗激光辐照能力提出了更高要求<sup>[2-3]</sup>。防护面板接受激光辐照时,表面的反射特性决定了面板吸收的热量多少,面板材料的熔点决定了激光测量设备耐高温的能力,因此寻找并设计新型的激光防护面板对激光测量技术的提高具有重要意义。本文采用等离子喷涂方法在硬铝面板上制备

收稿日期: 2013-09-01; 收到修改稿日期: 2013-10-01

基金项目: 国家 863 计划(DAA8063039)

作者简介: 张磊(1982—),男,硕士,工程师,主要从事激光参数测试方面的研究。E-mail: zhanglei@nint.ac.cn

了一种典型的热障涂层材料  $ZrO_2$ , 开展了热障涂层技术用于激光防护面板的实验研究<sup>[4-5]</sup>。

## 2 实验材料及方法

等离子喷涂技术是利用高温等离子焰流将粉体瞬间融化并喷涂到基材上形成涂层的一种方法。利用等离子喷涂技术在铝基底表面制备了  $ZrO_2$  涂层。选择  $ZrO_2$  作为激光防护面板的涂层材料, 是由以下几个特点决定的<sup>[6-7]</sup>: 1)  $ZrO_2$  涂层是良好的隔热材料, 热导率在一个很大的温度范围内变化很小, 几乎为一常数, 且热导率的值也较小 $[1 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$ , 尤其在高温  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$  时, 它的热导率值在所有致密陶瓷材料中最低 $[\sim 2.3 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$ 。在气孔和裂纹存在的情况下,  $Y_2O_3$  稳定  $ZrO_2$  材料的热导率值在  $0.8 \sim 1.7 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$  之间。2) 弹性模量为  $50 \text{ GPa}$ , 保证了它在激光加载过程中具有很高的缓解应力。

3)  $Y_2O_3$  稳定  $ZrO_2$  材料有相对较低的密度, 约为  $6.4 \text{ kg}/\text{m}^3$ , 不会引起基底甚至整个测量系统重量的较大变化。4)  $Y_2O_3$  稳定  $ZrO_2$  材料的硬度达  $14 \text{ GPa}$ , 具有良好的抗腐蚀性。5)  $Y_2O_3$  稳定  $ZrO_2$  材料熔点高达  $2700 \text{ }^\circ\text{C}$ , 在激光辐射过程中具有良好的耐高温特性。

实验研究所选取的试样是  $\Phi 8 \text{ cm}$ 、厚度  $1 \text{ cm}$  的硬铝面板的表面, 采用等离子喷涂的方法制备了  $ZrO_2$  热障涂层。涂层厚度  $40 \text{ } \mu\text{m}$ , 喷涂时表面颗粒粗糙度  $7.2 \text{ Ra}/\mu\text{m}$ 。

## 3 涂层材料反射特性研究

### 3.1 涂层表面反射率

为研究激光防护面板表面涂层在不同波长下的反射率, 搭建了反射率测量系统。反射率测量光路示意图如图 1 所示。

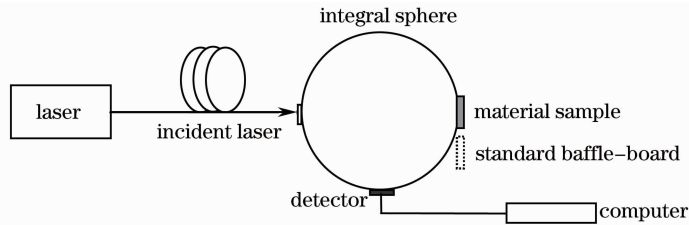


图 1 反射率测量系统

Fig. 1 System of reflectivity measurement

图 1 中, 入射激光通过积分球入口辐照在被测面板表面, 由于面板表面反射特性为漫反射, 因此激光在积分球内经过多次反射, 再由积分球出口射出。在积分球出口位置放置功率测量探头测量积分球的输出功率。测量时, 首先测量在被测面板处放置标准反射板(反射率接近  $100\%$ )时积分球的输出功率  $P_0$ , 再测量放置被测面板时积分球输出功率  $P_1$ , 由

于积分球的衰减系统固定, 即可计算得到被测面板表面涂层的反射率。

实验中进行反射率测量所使用的光源有  $0.532 \text{ } \mu\text{m}$  脉冲激光、 $1.064 \text{ } \mu\text{m}$  连续激光、 $1.31 \text{ } \mu\text{m}$  连续激光和  $3.8 \text{ } \mu\text{m}$  连续激光。

$ZrO_2$  热障涂层对不同波长激光的反射率测量实验数据如表 1 所示。

表 1  $ZrO_2$  热障涂层对不同波长激光反射率测量结果

Table 1 Reflectivity measurement of  $ZrO_2$  TBC at different wavelengths

Wavelength / $\mu\text{m}$	1 / %	2 / %	3 / %	4 / %	5 / %	Average / %
0.532	65.94	63.85	64.52	62.56	62.18	63.81
1.064	69.12	68.96	69.63	68.80	69.24	69.15
1.310	71.53	71.45	71.53	71.19	71.40	71.42
3.80	78.35	78.21	78.35	78.32	78.02	78.25

对实验中测得的不同波长激光辐照下涂层反射率进行数值模拟, 模拟函数为  $y = A_0 \exp(-x/t_1) + y_0$ , 模拟结果如图 2 所示。

由实验数据的模拟结果来看,  $ZrO_2$  热障涂层的表面反射率随着辐照光波长的增加呈指数上升。

### 3.2 涂层表面漫反射性能

为了避免激光可能产生的镜面反射带来安全隐患, 激光防护面板表面通常采用漫反射处理方式。漫反射可以用来描述材料表面激光散射强度。对面板表面热障涂层开展了漫反射特性的实验研究, 原理图如图 3 所示。

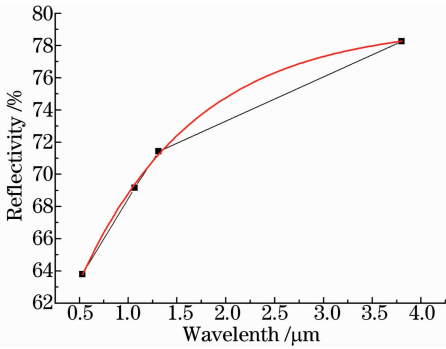


图 2 不同波长下反射率数据模拟

Fig. 2 Data simulation of reflectivity at different wavelengths

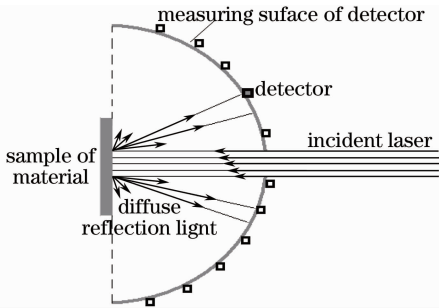


图 3 面板表面漫反射测量原理图

Fig. 3 Principle of diffuse reflection measurement of the panel surface

图 3 所示,激光垂直入射到激光防护面板表面,

以激光入射点为圆心,同一半径的圆周上等间隔分布了相同的探测器来测量不同角度的反射光强度,从而得到了热障涂层的漫反射特性。图 4 为涂层表面漫反射测量结果归一化数据。

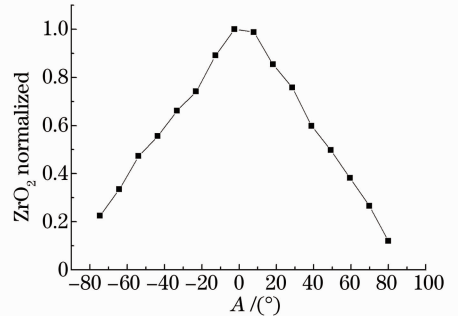
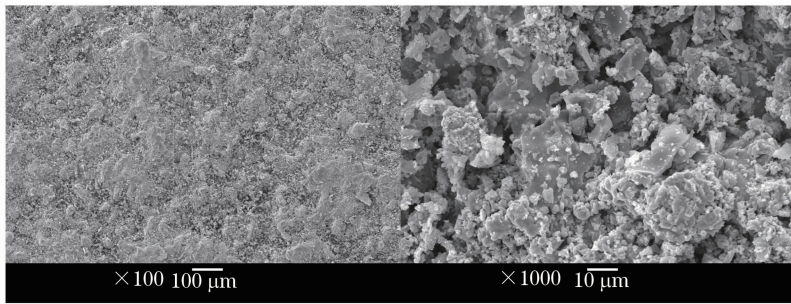


图 4 漫反射测量结果归一化数据

Fig. 4 Normalized data measured of the diffuse reflection

在涂层材料选定的条件下,材料表面粗糙度是影响漫反射特性的主要因素。根据贝克曼理论,当材料表面粗糙度小于一定值时,激光辐射产生的散射强度是随着表面颗粒粗糙度的增加而增大的。因此在喷涂热障涂层时,可以根据面板激光防护的需求,确定涂层表面漫反射的要求,再通过调整喷涂颗粒的粗糙度来进行涂层的喷涂。本实验所用的热障涂层在喷涂时表面颗粒粗糙度为  $7.2 \text{ Ra}/\mu\text{m}$ ,涂层表面形貌如图 5。

图 5  $\text{ZrO}_2$  热障涂层表面形貌Fig. 5 Surfaceromorphology of  $\text{ZrO}_2$  TBC

另外,热障涂层的热导率与涂层喷涂时形成的结构空隙率有关。空心球涂层具有较高的空隙率,为了降低热导率,通常采用空心球涂层提高空隙率。涂层制作时,要合理兼顾涂层表面漫反射与涂层热导率。

## 4 激光辐射下材料热响应

### 4.1 热响应模型理论计算

开展了激光辐照铝面板  $\text{ZrO}_2$  涂层热响应的理论及实验研究。通过在特定条件下求解三维固体中的热传导微分方程<sup>[8]</sup>,计算激光辐照材料的温度场。方程为

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( K \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K \frac{\partial T}{\partial z} \right) + A(x, y, z, t), \quad (1)$$

式中  $K(\text{W}/\text{cm} \cdot ^\circ\text{C})$  是热导系数,  $c(\text{J}/\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$  是比热容,  $\rho(\text{g}/\text{cm}^3)$  是密度,  $A(x, y, z, t)$  是单位时间、单位体积输入的热量。通常,  $K, c, \rho$  是温度的函数,因此(1)式的解很复杂。

为了简化数学处理,根据连续激光辐照金属涂层材料靶的实际情况,假设:

1) 激光能量分布均匀,整个激光光范围内的表面受热均匀;

- 2) 靶材料为各向同性的均匀介质,热物理特性为常数;
- 3) 激光是柱形波,被吸收的功率密度不随时间变化;
- 4) 整个激光辐照过程看作是绝热过程。

设激光束沿  $Z$  方向垂直辐照在靶面上,靶面的半径为  $a$ ,厚度为  $L$ ,靶吸收的功率密度为  $F(t)$ ,激光作面吸收处理。不考虑相变影响,则(1)式可简化为一维热传导方程

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{k} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2)$$

相应的边界条件为

$$-K \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = F(t), \quad (3)$$

$$-K \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=L} = 0, \quad (4)$$

式中  $K, k$  分别是涂层材料的热导系数和热扩散系数。对强度恒定的入射激光,有  $F(t) = F_0 = (1 - R)I_0$ ,  $R$  和  $I_0$  分别是涂层表面反射系数和辐照的激光功率密度。则(2)式的解为

$$T(z, t) = \frac{F_0 k}{KL} \cdot t + \frac{F_0 L}{K} \left\{ \frac{3(L-z)^2 - L^2}{6L^2} - \frac{2}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n^2} \exp(-kn^2 \pi^2 t/L^2) \cos \left[ \frac{n\pi(L-z)}{L} \right] \right\}. \quad (5)$$

图 6 为激光辐照涂层表面温度场分布。

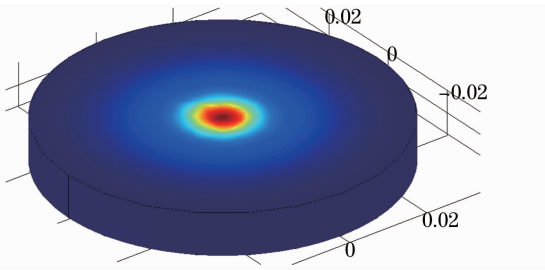


图 6 激光辐照下涂层表面温度场

Fig. 6 Temperature fields of the coating surface irradiated by laser

#### 4.2 激光加载涂层实验研究

利用  $1.064 \mu\text{m}$  连续激光开展了激光辐照实验。为了研究防护面板热响应,分别对未加涂层的铝面板及带有  $\text{ZrO}_2$  热障涂层的铝面板进行了激光辐照。实验中,为了实时监测激光辐射过程中面板温度变化,在面板背表面的边缘及中心埋入温度测量探头。

实验所用激光为  $\Phi 1 \text{ cm}$ 、功率密度  $1000 \text{ W/cm}^2$  的高斯光斑,辐照时长  $10 \text{ s}$ 。图 7(a)、(b)分别为带有热障涂层的铝面板及未加涂层的铝面板背表面中心点温度变化情况的数值模拟与实验结果。

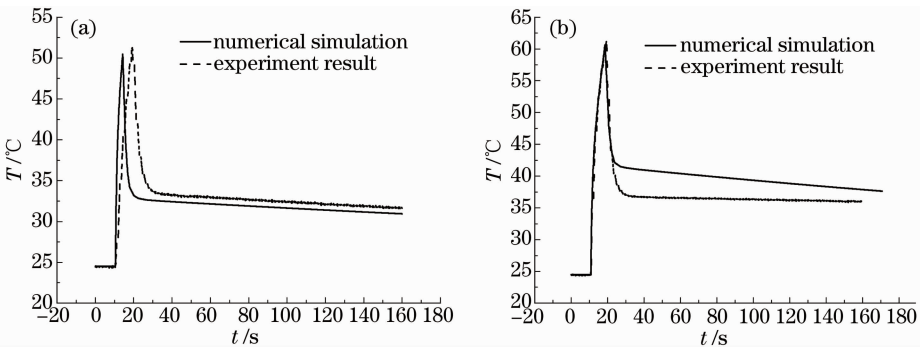


图 7 铝板背面温升模拟与实验结果比较。(a) 带有涂层的铝面板;(b) 未加涂层的铝面板

Fig. 7 Numerical result versus experimental result of the temperature rise at the back surface.

(a) Aluminum panel with coating; (b) aluminum panel without coating

对比图 7 中数值模拟与实验测量的结果,温度上升的最大值吻合较好,说明计算时选择的理论模型合理。对于带有涂层的面板,其上升沿的计算结果与实验测量存在一定差异,经分析是由于  $\text{ZrO}_2$  热障涂层的热导率在不同温度下变化较大引起的。对比未加涂层的铝板的计算结果与实验结果,其温度下降沿存在差异,分析认为是计算时忽略空气的

对流散热引起的。

图 8 给出了实验过程中带有涂层的面板及未加涂层面板的温度变化比较。由实验结果看出,带有热障涂层热铝面板温升最大值明显小于未加涂层的铝面板温升最大值,喷涂的  $\text{ZrO}_2$  热障涂层具有显著的隔热效果。

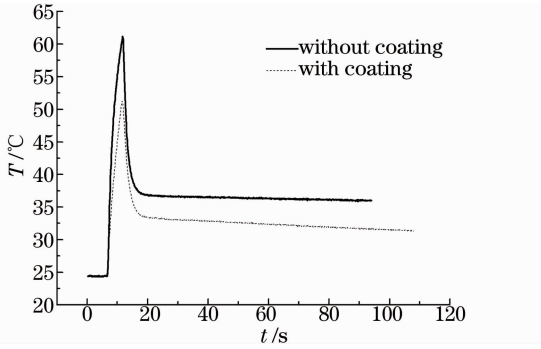


图8 激光辐照下带有涂层与未加涂层铝面板温度变化  
Fig. 8 Temperature of panel with coating and without coating irradiated by laser

## 5 结 论

提出了一种将热障涂层用于激光防护面板进行隔热的方法。利用等离子喷涂的方法在铝面板表面制备了 $ZrO_2$ 热障涂层,实验研究了 $ZrO_2$ 热障涂层表面的反射特性。利用有限元模拟计算了激光辐照下铝面板温度分布,给出了激光加载过程中面板温度最大值及变化过程。开展了激光辐照实验,实验结果与数值模拟结果吻合较好。实验结果验证了 $ZrO_2$ 热障涂层对铝面板具有显著的隔热效果。

## 参 考 文 献

- 1 Sun Chengwei. Laser Irradiation Effects[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002.  
孙承伟. 激光辐照效应[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
- 2 Yang Pengling, Feng Guobin, Wang Zhenbao, *et al.*. Mid-infrared high energy laser beam detector array[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(7): 0708008.  
杨鹏翎, 冯国斌, 王振宝, 等. 中红外激光光斑探测阵列[J]. 中国激光, 2011, 38(7): 0708008.
- 3 Zhang Lei, Shao Bibo, Yang Pengling, *et al.*. Near-infrared detecting array for high-energy laser measurement[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(s1): s100517.  
张磊, 邵碧波, 杨鹏翎, 等. 高能激光测量的近红外探测阵列[J]. 光学学报, 2011, 31(s1): s100517.
- 4 J V Gilse, S Koczera, D Greby. Direct laser beam diagnostics [C]. SPIE, 1991, 1414: 45-54.
- 5 Li Yadi, Wu Ping, Ma Ximei, *et al.*. Study on application of zirconia coating in laser protection [J]. Surface Technology, 2008, 37(3): 71-74.  
李雅娣, 吴平, 马喜梅, 等. 氧化锆涂层在激光防护中的应用研究[J]. 表面技术, 2008, 37(3): 71-74.
- 6 Shen Lina, Ma Zhuang, Liu Yanbo, *et al.*. Structure design and optimize of anti-laser irradiation coating [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2009, 28(s): 24-28.  
沈立娜, 马壮, 柳彦博, 等. 抗激光辐照涂层的结构设计 with 优化[J]. 硅酸盐通报, 2009, 28(s): 24-28.
- 7 Zhou Hong, Li Fei, He Bo, *et al.*. Analyses on thermal barrier effects of zirconia based thermal barrier coatings [J]. Chinese J Nonferrous Metals. 2007, 17(10): 1609-1615.  
周洪, 李飞, 何博, 等. 等离子喷涂热障涂层的隔热性分析[J]. 中国有色金属学报, 2007, 17(10): 1609-1615.
- 8 Zhu Kai, Long Lianchun. Numerical simulation and experiment contrast about laminated plate under laser irradiation [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(1): 0103004.  
朱凯, 龙连春. 激光辐照层合板的数值模拟与试验对比 [J]. 中国激光, 2012, 39(1): 0103004.

栏目编辑: 韩峰