

## 半透明材料红外热像检测的光谱特性和光源选择

郭兴旺<sup>1</sup>, 管和清<sup>1</sup>, 刘颖韬<sup>2</sup>, 唐佳<sup>2</sup>

(1. 北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100191;

2. 中国航空工业集团公司 北京航空材料研究院, 北京 100095)

**摘要:** 对半透明材料的光激励红外检测, 其热激励机理与不透明材料不同, 试件的吸热依赖于材料的光学特性和光源的辐射光谱。基于半透明材料的光谱特性, 提出了体加热的物理机制和建模方法。为了获得材料的光谱吸收率, 测试了不同厚度下玻璃纤维复合材料在一定波长范围内光的反射率和透射率。以色温模型来描述加热灯的光谱特性, 用有限单元法分析了闪光灯色温对缺陷检测效果的影响, 给出了可检信息参数(最大温差和最大对比度)与闪光灯色温的关系。结果表明, 最大温差和最大对比度与色温呈非线性关系, 它们随色温升高先减小后增大, 因此低色温和高色温闪光灯对半透明复合材料检测更有利。所得结论为半透明复合材料的闪光灯激励红外检测提供了理论参考。

**关键词:** 红外无损检测; 半透明材料; 光谱; 色温; 脉冲热像法; 数值模拟

**中图分类号:** TN213 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0104001

## Spectrum characteristics and light source selection for infrared thermal imaging testing of semitransparent materials

Guo Xingwang<sup>1</sup>, Guan Heqing<sup>1</sup>, Liu Yingtao<sup>2</sup>, Tang Jia<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191, China;

2. Beijing Institute of Aeronautical Materials, Aviation Industry Corporation of China, Beijing 100095, China)

**Abstract:** In the case of infrared thermography of semitransparent materials, the heat stimulation mechanism differs from that of opaque materials, and the heat absorption of a specimen depends on its optical properties and the radiation spectrum of a light source used. Based on the spectrum characteristics of semitransparent materials, a body heating mechanism and modelling were proposed. To obtain the spectrum absorptivity of the materials, the reflectivity and transmittance of the glass fiber reinforced plastics with different thicknesses were measured in a certain wavelength range. The spectrum characteristics of heating lamps were described by a color temperature model, the effect of the color temperature of a flash on the flaw detection was analyzed by using finite element method, and the relationships between the detectable information parameters (the maximum temperature difference and maximum contrast) and the flash color temperature were presented. The results show that the maximum temperature difference and maximum contrast are a nonlinear function of the color temperature, and they

收稿日期: 2016-05-05; 修订日期: 2016-06-03

基金项目: 国家自然科学基金(U1433122, 61571028)

作者简介: 郭兴旺(1964-), 男, 副教授, 主要从事红外热像检测理论和技术方面的研究。Email: xingwangguo@buaa.edu.cn

decrease first and then increase when the color temperature increases, so a low or high color temperature is more favorable for the inspection of semitransparent composite materials. The conclusions provide a theoretical reference for the flash infrared thermography of semitransparent composite materials.

**Key words:** infrared non-destructive testing; semitransparent materials; spectrum; color temperature; pulsed thermography; numerical simulation

## 0 引言

半透明材料是指对光的传输性质介于透明材料和不透明材料之间的材料。当某个波段的光可穿过材料表面在材料内部传输,但材料对光有一定的衰减,那么这样的材料称为该段光谱下的半透明材料。而透明材料是指光可在基本不衰减的情况下透过的材料;不透明材料则是指光进入不到材料内部的材料。日常生活中最常见的半透明材料有玻璃、塑料、镜片(聚酯树脂);工业工程中常用的半透明材料有玻璃纤维复合材料、热障涂层、陶瓷等。半透明材料在能源动力、航空航天等高新技术领域有广泛应用。汽车发动机的陶瓷零件<sup>[1]</sup>,航天器极端环境下的陶瓷隔热防护层<sup>[2-3]</sup>,涡轮发动机以及飞行器发动机的耐高温组件<sup>[4]</sup>,其材料都具有半透明性。半透明材料的光学和红外特性的研究也受到了国内外学者的广泛关注<sup>[5]</sup>。

在复合材料的热无损检测方面,光激励红外热像法是一项发展成熟且应用广泛的无损检测技术<sup>[6]</sup>,然而在半透明复合材料的实际检测中,却很少考虑材料的半透明性。有关热障涂层(TBC)红外热像检测<sup>[7]</sup>的研究发现,TBC脱粘缺陷的检测存在漏检,分析其原因,主要是TBC的光谱特性<sup>[8]</sup>导致的。Steven M. Shepard指出,TBC对可见光、近红外线和中波红外线具有半透明性,当对TBC检测时,TBC涂层吸收热量较少,极端情况下甚至没有被闪光灯加热<sup>[9]</sup>,从而造成漏检。对半透明涂层可采用喷涂黑漆的方法消除半透明性的影响,从而提高了检测效果<sup>[10]</sup>,但黑漆对材料的腐蚀性等负面影响尚未评估。

近些年,ASTM制订了闪光灯激励红外热像检测标准<sup>[11]</sup>和航空航天复合材料导则<sup>[12]</sup>,该导则中含有大量有关红外热像检测的内容,包括该方法适用的产品生命周期、可检缺陷类型、检测效率和局限性等。然而,目前关于半透明材料的红外热像无损检测

却鲜有报道。

在红外热像检测的实际应用中,对光激励设备的选择主要凭经验,缺少相应理论参考和选择标准。为了给闪光灯光源的选择提供理论指导,采用数值模拟法研究色温对脉冲热像检测效果的影响。研究半透明复合材料的光学特性,建立半透明复合材料分层缺陷红外热像检测的物理模型,利用有限元分析软件ANSYS对闪光灯激励红外热像检测的传热过程进行数值模拟,研究可检信息参数(最大温差和最大对比度)与闪光灯色温的关系。

## 1 半透明材料光加热的理论

### 1.1 闪光灯的辐射光谱

色温 $T_c$ 是描述光源的一个基本参数。如果一个光源发射光的颜色(即光色,又称色品)与某一温度下的黑体发射光的颜色相同,那么,此时黑体的绝对温度就叫做光源的色温<sup>[13]</sup>。根据普朗克黑体辐射定律<sup>[14]</sup>,在热力学温度 $T$ 时,黑体的光谱辐射出射度为:

$$M(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1} \quad (1)$$

式中:第一辐射常数 $C_1=3.7418 \times 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^2$ ;第二辐射常数 $C_2=1.4388 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$ ;  $M(\lambda, T)$ 的单位是 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \mu\text{m})$ 。

由于黑体是朗伯辐射体,可得黑体的光谱辐射亮度:

$$L(\lambda, T) = M(\lambda, T) / \pi = \frac{C_1}{\pi \lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1} \quad (2)$$

式中: $L(\lambda, T)$ 的单位是 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})$ 。

当光源发射光的颜色和黑体不不同时,通常采用“相关色温”的概念来描述光源的颜色。相关色温的定义:当光源的光色与某一温度下的黑体光色最接近,或者说在均匀色品图上的色差距离最小,此时黑体的绝对温度叫做光源的相关色温<sup>[13]</sup>。

实验测试闪光灯光谱操作复杂、成本较高且偶然性误差较大,故采用绝对温度为 $T$ 的黑体辐射光

谱近似代替闪光灯光源光谱。不同色温的光谱功率分布如图 1 所示。

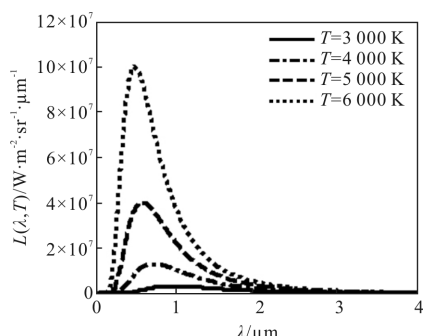


图 1 黑体辐射的光谱功率分布

Fig.1 Spectral power distribution of black body radiation

为了说明光谱能量在波长范围的分布情况,通常采用相对光谱功率分布即光谱功率的相对值与波长之间的关系来描述。面积归一化的相对光谱功率:

$$S(\lambda) = \frac{L(\lambda, T) \cdot \Delta}{\int L(\lambda, T) d\lambda} \quad (3)$$

式中:  $\Delta$  为单位波长频带宽度,  $\Delta = 1 \mu\text{m}$ 。由图 1 可知,  $\lambda \geq 4 \mu\text{m}$  时,  $L(\lambda, T) \approx 0$ 。  $\lambda$  取  $0 \sim 4 \mu\text{m}$ , 求出面积归一化的相对光谱功率分布如图 2 所示。

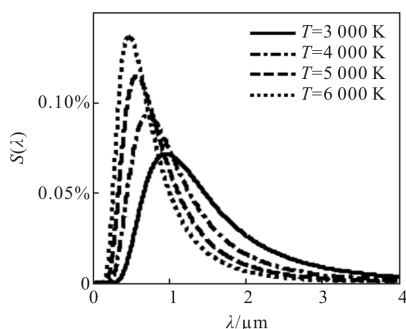


图 2 面积归一化的相对光谱功率分布

Fig.2 Relative spectral power distribution of area normalization

从图 2 可以看出: 功率相同的闪光灯, 色温越高, 其光谱能量越集中在较短的波长范围。

### 1.2 半透明介质光的吸收

光在介质中传播时光的强度会随着传播距离(穿透深度)的增加而衰减的现象为光的吸收<sup>[15]</sup>。假设半透明复合材料是均匀介质, 各向同性, 根据布格-朗伯定律, 单色光(波长一定)通过均匀介质的出射光强为:

$$I = I_i \cdot e^{-\alpha H} \quad (4)$$

式中:  $I_i$  为入射光强, 单位是坎德拉(cd);  $H$  为介质厚度;  $\alpha$  为介质对单色光的吸收系数, 它的量纲是厚度单位的倒数, 与介质和波长有关, 其值可由实验测定。

半透明复合材料介质的光加热物理模型如图 3 所示。从光源辐射出的光(波长为  $\lambda$ )垂直入射到试件上, 入射光产生折射光和反射光, 折射光穿过试件表面进入材料内部, 经过沿程的衰减吸收后, 剩下的部分透过了试件, 成为透射光。设入射光、反射光、折射光、吸收光、透射光的光强分别为  $I_0(\lambda)$ 、 $I_r(\lambda)$ 、 $I_i(\lambda)$ 、 $I_a(\lambda)$  和  $I_t(\lambda)$ , 半透明复合材料的反射率、透射率和吸收率分别为  $\beta_r(\lambda)$ 、 $\beta_t(\lambda)$ 、 $\beta_a(\lambda)$ , 根据能量守恒定律有:

$$\beta_r(\lambda) + \beta_t(\lambda) + \beta_a(\lambda) = 1 \quad (5)$$

反射率  $\beta_r(\lambda)$  和透射率  $\beta_t(\lambda)$  与材料介质有关, 随波长变化, 可通过光学实验测得。

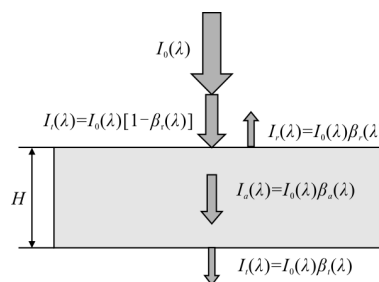


图 3 半透明复合材料的光加热物理模型

Fig.3 Physical model for the optical heating of semitransparent composites

闪光灯是光谱连续的复色光源, 照射到半透明复合材料的总光强  $I_0(\lambda) = \int I_0'(\lambda) d\lambda$ , 单位是坎德拉(cd), 其中  $I_0'(\lambda)$  为单位波长上的光强。光度量和辐射度量的定义及定义方程是一一对应的, 光强(发光强度)与辐射强度对应, 光强的单位是 cd, 辐射强度的单位是 W/sr。从能量角度出发, 闪光灯照射到试件的单位面积上的总功率  $P_0(\lambda) = \int L(\lambda, T) d\lambda$ , 单位是  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$ 。

根据图 3 和公式(4), 光通过厚度为  $H$  的半透明复合材料, 其透射光强为:

$$I_t(\lambda) = I_0(\lambda) \beta_t(\lambda) = I_i(\lambda) e^{-\alpha(\lambda) \cdot H} = I_0(\lambda) (1 - \beta_r(\lambda)) e^{-\alpha(\lambda) \cdot H} \quad (6)$$

由公式(6)可得, 半透明材料的随波长变化的光吸收系数:

$$\alpha(\lambda) = \frac{\ln[\beta_t(\lambda)/(1 - \beta_r(\lambda))]}{-H} \quad (7)$$

$\alpha(\lambda)$ 表征了半透明复合材料的光谱特性,而闪光灯光源的光谱功率分布与色温相关,不同色温的闪光灯对半透明材料的加热效果不同,导致半透明材料缺陷的红外热像检测效果也不同。因此,研究闪光灯色温对半透明复合材料缺陷检测的影响有实际价值。

## 2 半透明材料的光谱特性

### 2.1 吸收系数的确定

用玻璃纤维 SW280F-90a 制备材料厚度  $H$  分别为 0.25、0.5、1、1.5 和 2 mm 的层压板试件。采用积分球光学测试仪测定其在一定波长范围内的反射率  $\beta_r(\lambda)$ 和透射率  $\beta_t(\lambda)$ ,由公式(5)可求吸收率  $\beta_a(\lambda)$ ,实验测得的材料光学特性如图 4 所示。

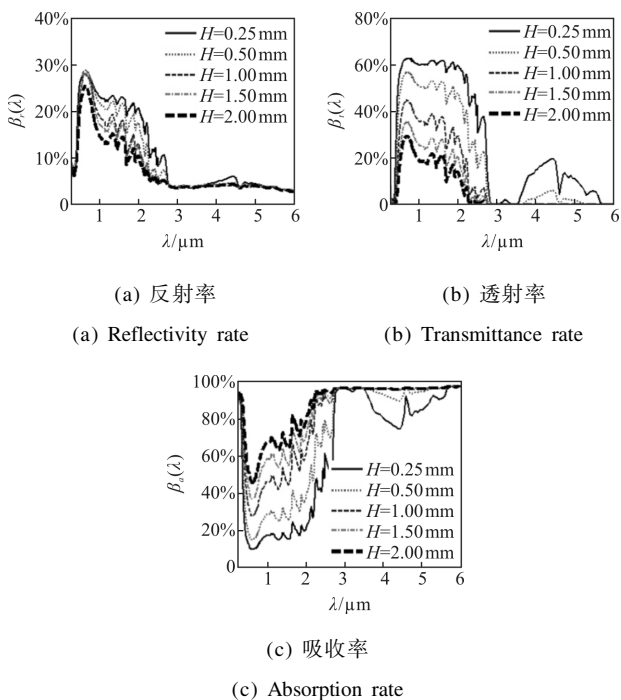


图 4 材料的光学特性

Fig.4 Optical properties of material

根据公式(7)分别求出  $H=0.25、0.5、1、1.5、2$  mm 的  $\alpha(\lambda)$ ,如图 5 所示。由理论可知  $\alpha(\lambda)$ 与材料厚度  $H$  无关,取它们的平均值作为半透明材料的吸收系数  $\alpha(\lambda)$ ,如图 6 所示。

由光源的相对光谱功率分布可知,能量主要集中在中波段(0.25~3  $\mu\text{m}$ )。从图 4 发现,光的反射、透射也主要发生在中波段,半透明材料在中波段吸收的光热能量少。随着材料厚度  $H$  的增大,半透明材料反射率  $\beta_r(\lambda)$ 和透射率  $\beta_t(\lambda)$ 减小,吸收率  $\beta_a(\lambda)$ 增

大,吸收系数  $\alpha(\lambda)$ 增大。

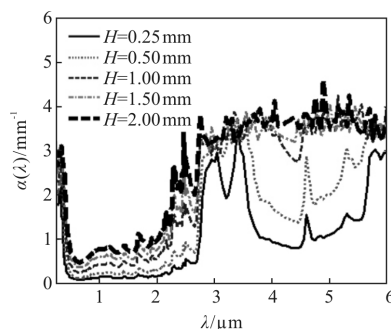


图 5 半透明材料的吸收系数

Fig.5 Absorption coefficient of semitransparent materials

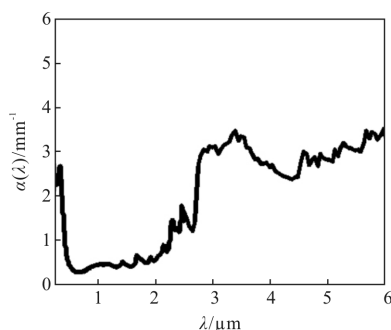


图 6 半透明材料的吸收系数(平均值)

Fig.6 Absorption coefficient of semitransparent materials (average value)

在理论上,反射率  $\beta_r(\lambda)$ 和吸收系数  $\alpha(\lambda)$ 均与材料厚度  $H$  无关,试验结果与理论存在偏差。分析试验误差的原因,认为试验结果中反射率  $\beta_r(\lambda)$ 随厚度  $H$  变化的原因是由介质的二次反射造成的,试件越薄,二次反射的效果越明显,则  $\beta_r(\lambda)$ 越大。由公式(7)可知吸收系数  $\alpha(\lambda)$ 与  $\beta_r(\lambda)$ 有关,即  $\alpha(\lambda)$ 也随  $H$  变化。利用多次测试求平均值的办法确定半透明材料的吸收系数  $\alpha(\lambda)$ , $\alpha(\lambda)$ 表征了半透明材料受光照时的光热转换特性。

### 2.2 光能吸收率与材料厚度的关系

因材料的半透明性,光加热时,材料内部发生的是瞬时的体加热过程,而非不透明材料的面加热过程。假设材料厚度是变量  $x$ ,计算光能吸收率  $\beta$ 与材料厚度  $x$  的关系曲线,可求材料在各个厚度的加热量,从而为有限元仿真的体加热方案的确定提供依据。

为了排除反射光的干扰,假设不同色温闪光灯照射半透明材料实际进入材料的能量是相同的。只考虑实际进入半透明材料的光能,即透射光和吸收光。闪光灯光源照射半透明材料实际进入的光能功

率为  $P_0(\lambda) = \int L(\lambda, T) d\lambda$ , 已求半透明材料的吸收系数  $\alpha(\lambda)$ , 则透射光功率  $P_t(\lambda) = \int L(\lambda, T) \cdot e^{-\alpha(\lambda) \cdot x} d\lambda$ , 材料的吸收光功率  $P_a(\lambda) = P_0(\lambda) - P_t(\lambda)$ 。

定义光能吸收率: 光源照射材料时吸收的光能与进入材料的总光能的比值。即:

$$\beta(x) = \frac{P_a(\lambda)}{P_0(\lambda)} = \frac{P_0(\lambda) - P_t(\lambda)}{P_0(\lambda)} = 1 - \frac{\int L(\lambda, T) \cdot e^{-\alpha(\lambda) \cdot x} d\lambda}{\int L(\lambda, T) d\lambda} \quad (8)$$

介质材料一定,  $\beta$  仅与光源的光谱  $L(\lambda, T)$  和介质材料的厚度  $x$  有关。利用公式(8)计算色温分别是 2 000、4 000、6 000 K 的闪光灯照射半透明材料光能吸收率  $\beta$  与材料厚度  $x$  的关系曲线, 如图 7 所示。

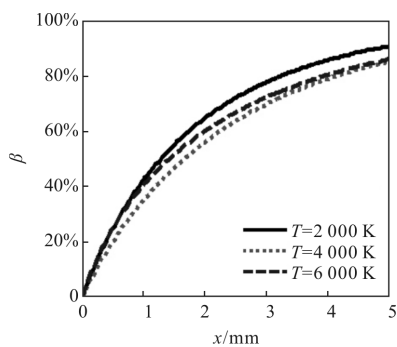


图 7 光能吸收率与材料厚度的关系

Fig.7 Relationship between absorption rate of light energy and thickness of material

当材料厚度  $x=0$  时,  $\beta=0$ , 即光能无吸收; 当材料厚度  $x$  足够大时,  $\beta=1$ , 光能被材料全部吸收。对  $\beta$  求导  $d\beta/dx$ , 可求光能在任意深度位置的光能吸收率的变化率, 为有限元仿真模型热加载提供理论指导。

### 2.3 生热率与材料深度的关系

由于半透明材料光加热是瞬时体加热过程, 因此采用内生热率载荷模拟材料受热过程, 将半透明模型沿厚度方向分为  $N$  层, 则每层的厚度  $dx=x/N$ , 在每一层施加相应的内生热率, 模拟瞬时体加热过程。

生热率的定义是单位体积单位时间内产生的热量。假设光源照射半透明材料, 不考虑反射, 实际进入材料的热流是  $q_0$ , 则材料实际吸收的热流  $q_a = q_0 \cdot \beta$ , 计算在二维有限元仿真模型中深度为  $x$  处单元内部施加的生热率:

$$q_x = q_0 \cdot \frac{d\beta}{dx} \quad (9)$$

半透明材料试件厚度 2 mm, 沿厚度方向分层数目  $N=80$ , 则每层厚度  $dx=0.025$  mm, 假设光加热进入材料热流  $q_0=2 \times 10^6$  W/m<sup>2</sup>, 根据公式(9)可求在二维有限元仿真模型中每层单元内部施加的生热率与深度的关系曲线如图 8 所示。

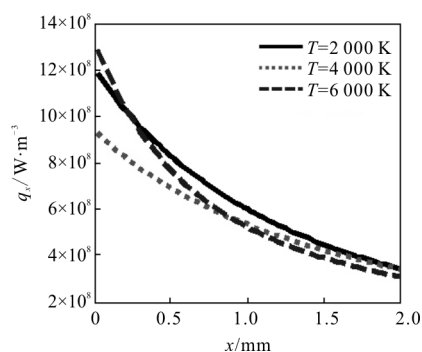


图 8 生热率与材料深度的关系

Fig.8 Relationship between heat rate and depth of material

## 3 有限元仿真分析

### 3.1 分层缺陷仿真模型的建立

以半透明材料玻璃纤维层压板为研究对象, 它由玻璃纤维铺层压结而成。为了简化分析, 文中不考虑材料各向异性的情况, 根据轴对称性, 把三维传热问题简化为二维传热问题, 在柱坐标系下建立玻璃纤维层压板分层缺陷红外热像无损检测的物理模型, 如图 9 所示。图中①为玻璃纤维, ②为干空

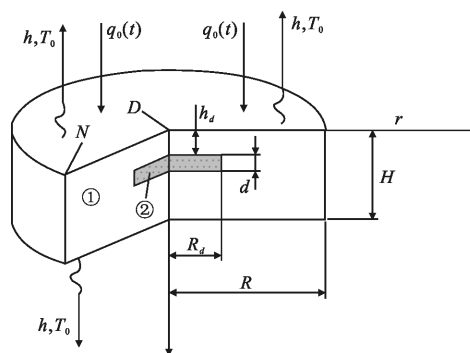


图 9 有限元仿真模型

Fig.9 Finite element simulation model

气(分层造成的空气隙)。试件的总厚度为  $H$ , 半径为  $R$ 。在材料内部中心部位有一圆盘状分层缺陷, 缺陷半径为  $R_d$ , 缺陷深度为  $h_d$ , 缺陷厚度为  $d$ 。光源照射半透明材料实际进入材料的热流为  $q_0(t)$ , 模型上下

表面与周围空气的换热系数是  $h$ , 模型侧面边界  $r=R$  处绝热, 初始温度场均匀且等于环境温度  $T_0$ 。表面中心点  $D$  为缺陷区中心, 边界点  $N$  为无缺陷区的典型代表。

### 3.2 有限元仿真分析

在 ANSYS 热分析中, 根据问题的轴对称性, 选择圆柱体纵剖面的一半建立平面有限元模型, 选择 PLANE55 作为热分析单元, 采用映射网格划分方式划分网格。加热时间为 0.01 s, 仿真总时间设为 20 s, 为保证解的准确性, 选择合理的仿真步长, 加热阶段选择步长 0.001 s, 散热阶段选择步长 0.1 s。

设置模型结构参数。材料厚度  $H=2$  mm, 半径  $R=15$  mm, 缺陷半径  $R_d=3$  mm, 缺陷深度  $h_d=0.5$  mm, 缺陷厚度  $d=0.05$  mm。对流换热系数  $h=10$  W/(m<sup>2</sup>·K), 环境温度  $T_0=0$  °C。

为了排除加热能量的影响, 从而能单独考虑色温的影响, 假设所有光源(功率相同、色温不同的闪光灯)照射半透明材料实际进入材料的热流都为  $q_0=2 \times 10^6$  W/m<sup>2</sup>, 它包括材料吸收的热流  $q_a$  和透射的热流  $q_t$ 。仿真时保证只有色温一个变量, 闪光灯功率相同, 进入材料的光热能量相同, 其他计算条件维持不变。沿厚度方向分层数目  $N=80$ , 每层厚度为 0.025 mm, 每层施加的相应生热率由图 9 曲线给出, 模拟半透明材料体加热过程。

有关材料的热物性参数如表 1 所列。

表 1 材料的热物性参数

Tab.1 Thermal properties of materials

Material	Density/kg · m <sup>-3</sup>	Specific heat /J · (kg · K) <sup>-1</sup>	Thermal conductivity /W · (m · K) <sup>-1</sup>
Glass fiber composite	1 900	1 200	0.3
Dry air	1.205	1 005	0.025 9

为了描述缺陷的可检测性, 需定义一些可检信号特征参数, 即缺陷信息参数。

(1) 过剩温度: 试件温度与周围环境(空气)温度的差值, 记为  $T$ 。

(2) 温差: 缺陷区与无缺陷区表面温度的差。设  $T_D$  为缺陷区表面中心点  $D$  点的过剩温度,  $T_N$  是无缺陷区表面典型点  $N$  点的过剩温度, 则两者的温差为:

$$\Delta T = T_D - T_N \quad (10)$$

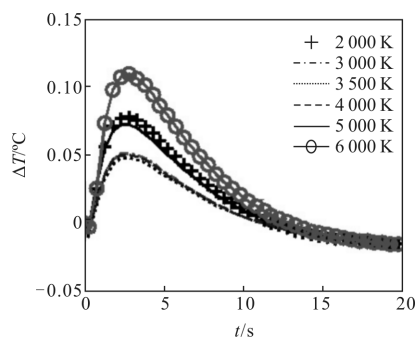
(3) 对比度: 缺陷区和无缺陷区温度信号的相对差别, 记为  $C$ 。

$$C = \Delta T / T_N \quad (11)$$

此外, 设  $\Delta T_m$  为  $\Delta T$  的最大值, 称为最大温差, 其出现的时间  $t_m$  为最大温差时间; 设  $C_m$  为  $C$  的最大值, 称为最大对比度。  $\Delta T_m$  能说明红外检测的可行性,  $C_m$  能说明缺陷在热像中的清晰程度。

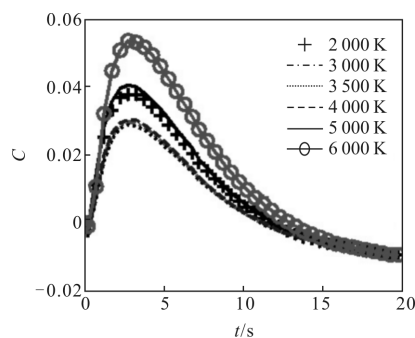
### 3.3 色温对检测结果的影响

设闪光灯色温  $T_c=2\ 000$ 、 $3\ 000$ 、 $3\ 500$ 、 $4\ 000$ 、 $5\ 000$ 、 $6\ 000$  K, 从 ANSYS 仿真结果中提取温差数据, 信息参数的时间历程曲线如图 10 所示。



(a) 温差的时间历程

(a) Time history of temperature difference



(b) 对比度的时间历程

(b) Time history of contrast

图 10 信息参数的时间历程曲线

Fig.10 Time history of information parameter

从图 10 还可以看出: 最大温差和最大对比度与闪光灯色温有关, 最大温差时间和最大对比度时间均与闪光灯色温无关。

提取最大温差和最大对比度数据, 画出散点图和曲线, 最大温差和最大对比度与闪光灯色温的关系分别如图 11、12 所示。

从图 11 和图 12 看出：最大温差和最大对比度与闪光灯色温呈非线性关系，最大温差和最大对比度随着色温的增加先减小后增大，说明低色温和高色温闪光灯对半透明复合材料的检测更有利，推荐使用 5 000 K 以上的高色温闪光灯。

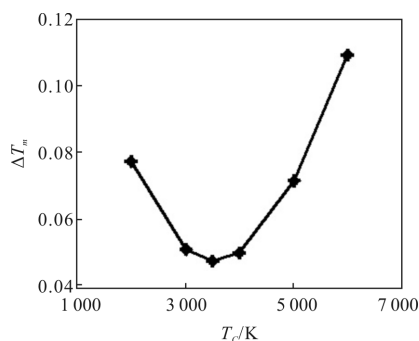


图 11 半透明材料最大温差与闪光灯色温的关系

Fig.11 Relationship between maximum temperature difference of semitransparent materials and flash color temperature

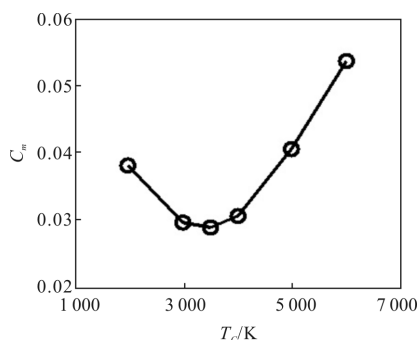


图 12 半透明材料最大对比度与闪光灯色温的关系

Fig.12 Relationship between maximum contrast of translucent material and flash color temperature

### 3.4 色温影响检测结果的原因分析

闪光灯色温之所以会影响半透明材料缺陷的检测结果,主要是由于材料的半透明性质导致。由实验测得的材料光学特性可知,光的反射、透射主要发生在中波段(0.25~3 μm),而 3 500 K 附近的中等色温闪光灯光谱能量主要集中在该波段,光照射半透明复合材料,实际吸收的能量较少,因此检测效果不好。

为了说明材料半透明性对检测结果的影响,利用 ANSYS 有限单元法分析闪光灯色温对不透明材料检测结果的影响。半透明材料和不透明材料的光加热过程,在本质上的区别有两点:第一是体加热和面加热的区别,半透明材料是体加热,不透明材料是

面加热;第二是有无透射光的区别,半透明材料有透射光,不透明材料没有透射光。

将半透明材料体加热过程实际吸收的热流  $q_a=q_0 \cdot \beta$  和穿过半透明材料的透射热流  $q_t$  施加到材料表面,其他条件保持不变,模拟不透明材料光加热红外热像无损检测过程。

闪光灯照射半透明材料实际吸收的热流  $q_a$  和穿过半透明材料的透射光热流  $q_t$  与闪光灯色温的关系如图 13 所示。将这些热量施加到表面就相当于不透明材料的检测过程,从而可分析色温对不透明材料检测结果的影响,仿真得到的不透明材料的最大温差和最大对比度与色温的关系分别如图 14 和图 15 所示,其中  $q_a$  造成的最大温差分量一为  $\Delta T_{m1}$ ,  $q_t$  造成的最大温差分量二为  $\Delta T_{m2}$ ,则  $\Delta T_m = \Delta T_{m1} + \Delta T_{m2}$ 。

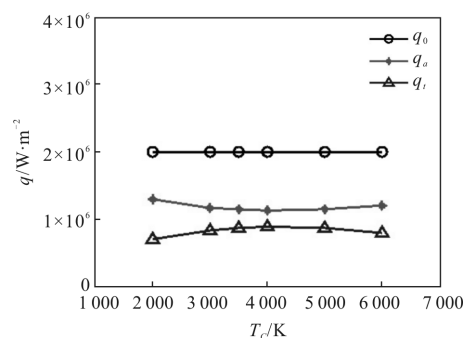


图 13 进入半透明材料的热流与闪光灯色温的关系

Fig.13 Relationship between heat flux into translucent material and flash color temperature

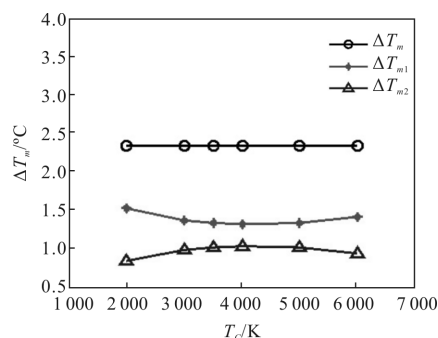


图 14 不透明材料最大温差与闪光灯色温的关系

Fig.14 Relationship between maximum temperature difference of opaque material and flash color temperature

由图 14 看出:对于不透明材料,当表面施加的热流一定时,最大温差是一个恒量(与表面施加的热流成正比),不随色温而变化。由图 15 看出,最大对

比度保持不变。理论上,色温不同、功率相同的闪光灯照射不透明材料,其表面吸收的能量是相同的,则最大温差也保持不变。以上说明,闪光灯色温对不透明材料的缺陷检测效果没有影响。

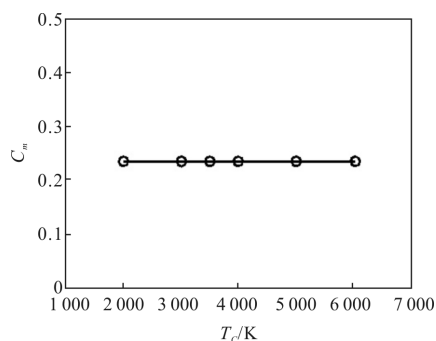


图 15 不透明材料最大对比度与闪光灯色温的关系

Fig.15 Relationship between maximum contrast of opaque material and flash color temperature

比较图 11 和图 14、图 12 和图 15 可以看出:在光源相同时,不透明材料的最大温差和最大对比度远远大于半透明材料的相应值。因此,检测半透明材料时,在表面涂黑漆有 3 个作用:一是大家熟知的提高物体的表面红外发射率,二是可把体加热强制转变为面加热,三是可把透射光也转变为有效的加热能量,从而提高缺陷检测能力,其中第二个因素的作用占主导,而且被检材料越厚,透射光因素影响越小,体加热因素影响越明显。

## 4 结论

通过建立半透明复合材料分层缺陷闪光灯激励的热像检测的仿真模型,利用有限元分析软件 ANSYS 对温差时间历程、最大温差、最大对比度和最大温差时间等缺陷信息参数与闪光灯色温的关系进行了数值模拟,获得了多组定量关系曲线,主要结论有:

(1) 最大温差和最大对比度与闪光灯色温都呈非线性关系,它们都随着色温的增加先减小后增大,说明低色温和高色温闪光灯对半透明复合材料的检测更有利,而 3 500 K 附近的中等色温闪光灯不应该使用,推荐使用 5 000 K 以上的高色温。

(2) 最大温差时间和最大对比度时间均与闪光灯色温无关。

(3) 闪光灯色温之所以影响半透明材料的缺陷检测效果是因为半透明材料具有光谱特性。在功率

相同的前提下,用不同色温的闪光灯激励,对不透明材料的缺陷检测效果相同,即闪光灯的色温参数对不透明材料的检测效果没有直接的影响。

(4) 检测半透明材料时,在物体表面涂黑漆不仅能提高表面红外发射率,还能把体加热强制转变为面加热,并把透射光也转变为有效的加热能量,从而提高缺陷检测能力。

数值模拟得到的缺陷可检信息参数与闪光灯色温的关系曲线,描述了闪光灯色温对光激励红外热像检测的影响,为红外无损检测光激励设备的选择提供了有益的理论参考。

## 参考文献:

- [1] Mandler W F, Yonushonis T M. Commercial applications for advanced ceramics in diesel engines[J]. *Ceramic Engineering and Science Proceedings*, 2009, 22(3): 3-10.
- [2] Siegel R. Transient effects of radiative transfer in semitransparent materials [J]. *International Journal of Engineering Science*, 1998, 36: 1701-1739.
- [3] Myers D E, Martin C J, Blosser M L. Parametric Weight Comparison of Advanced Metallic, Ceramic Tile, and Ceramic Blanket Thermal Protection Systems [R]. NASA Langley Technical Report, 2000: 1-44.
- [4] Heinrich J G, Aldinger F. Ceramic Materials and Components for Engineers [M]. Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH, 2007: 653-656.
- [5] Tan Heping, Xia Xinlin, Liu Linhua, et al. Numerical Calculation of Infrared Radiation Characteristics and Transmission: Computational Thermal Radiation[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2006: 1-14. (in Chinese)
- [6] 谈和平,夏新林,刘林华,等. 红外辐射特性与传输的数值计算:计算热辐射学[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社, 2006: 1-14.
- [7] Siddiqui J A, Arora V, Mulaveesala R, et al. Infrared thermal wave imaging for nondestructive testing of fibre reinforced polymers [J]. *Experimental Mechanics*, 2015, 55 (430): 1-7.
- [7] Tan Q J, Dai J M, Bu C W, et al. Experimental study on debonding defects detection in thermal barrier coating structure using infrared lock-in thermographic technique [J] *Applied Thermal Engineering*, 2016, 107(8): 463-468.
- [8] Wang L, Eldridge J I, Guo S M. Comparison of different



- models for the determination of the absorption and scattering coefficients of thermal barrier coatings [J]. *Acta Materialia*, 2014, 64(64): 402–410.
- [9] Shepard S M, Hou Y L, Lhota J R, et al. Thermographic measurement of thermal barrier coating thickness [C]// Proceedings of SPIE, 2005, 5782: 407–410.
- [10] Li Yanhong, Zhao Yujing, Zhang Cunling. Infrared testing for translucent material coating [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(7): 1502–1506. (in Chinese)  
李艳红, 赵跃进, 张存林. 半透明材料涂层的红外检测[J]. *光学 精密工程*, 2009, 17(7): 1502–1506.
- [11] ASTM Committee. E 2582–07, Standard practice for infrared flash thermography of composite panels and repair patches used in aerospace applications[S]. USA: ASTM international, 2007.
- [12] Astm E 2533–09 Standard guide for nondestructive testing of polymer matrix composites used in aero-space applications [S], 2009.
- [13] Dai Caihong, Yu Jialin. Discussion on the calculating methods for color temperature of the Source [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2000, 21(3): 183–188. (in Chinese)  
代彩红, 于家琳. 光源相关色温计算方法的讨论 [J]. *计量学报*, 2000, 21(3): 183–188.
- [14] Li Jingzhen. Handbook of Optics[M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 2010: 501–502. (in Chinese)  
李景镇. 光学手册[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2010: 501–502.
- [15] Cai Lvzhong. Optics [M]. 3rd ed. Beijing: Science Press, 2007: 354–355. (in Chinese)  
蔡履中. 光学[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 354–355.