

文章编号 1004-924X(2011)02-0421-08

# 金属材料表面激光耦合系数的反演

刘峰<sup>1,2</sup>, 王立君<sup>1,2</sup>, 王玉恒<sup>1</sup>, 杜太焦<sup>1,2</sup>, 韦成华<sup>1,2</sup>

(1. 西北核技术研究所第五研究室, 陕西西安 710024;  
2. 激光与物质相互作用国家重点实验室, 陕西西安 710024)

**摘要:**为了能通过背光面温度测量获得材料激光耦合系数,从傅里叶热传导方程出发,在一定的近似条件下推导出了不透明金属材料的表面激光耦合系数与背光面温升的关系表达式,给出了工程反演算法。采用两种不同的方法对反演算法进行了验证:一是用反演算法计算30CrMnSiA材料的1.3 μm激光耦合系数,与文献报道的实验测量值进行比较;另外是实验测量4 mm-30CrMnSi钢板的背光面温升,反演得到1.3 μm激光耦合系数随辐照时间和温度的变化,然后数值计算背光面温升并与原始实验测量结果进行比较。验证结果表明,借助于背光面测温反演激光耦合系数的方法可行,精度可以满足激光辐照效应研究的要求。

**关键词:**激光技术;激光耦合系数;反演算法;金属板;温度分布

**中图分类号:** TG156.99 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111902.0421

## Inversion for laser coupling coefficient on metal material surfaces

LIU Feng<sup>1,2</sup>, WANG Li-jun<sup>1,2</sup>, WANG Yu-heng<sup>1</sup>, DU Tai-jiao<sup>1,2</sup>, WEI Cheng-hua<sup>1,2</sup>

(1. Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China;  
2. State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Xi'an 710024, China)

**Abstract:** In order to acquire the laser coupling coefficient of a metal plate, an inversion method was given based on measured temperature data on the rear surface of the plate. By introducing some approximate conditions, the inversion expressions of the laser coupling coefficient and the temperature on front surface were derived, and an engineering algorithm of laser coupling coefficient was obtained. The inversion algorithm was validated by using two methods. one is to calculate the 1.3 μm laser coupling coefficient of the 30CrMnSiA by reversal method and to compare it with the experiment result in references for the same material plate; the other is to measure the temperature rise on the rear surface of the plate and to obtain the changes of the coupling coefficient with the radiation time and temperature and compare it with the measured experiment result in our experiments for the same material plate. The verified result shows that the inversion engineering algorithm is feasible and meets the requirement of the study of laser irradiation effects.

**Key words:** laser technology; laser coupling coefficient; inversion algorithm; metal plate; temperature distribution

收稿日期: 2010-10-08; 修订日期: 2010-10-30.

基金项目: 国防预研基金资助项目(No. 51311020301); 激光与物质相互作用国家重点实验室基金资助项目(No. SKLLIM0906)

## 1 引言

激光与材料相互作用的第一个过程是材料对激光能量的耦合,因而激光耦合系数是研究激光辐照效应的一个极为重要的特性参数。对于耦合系数的测量,一般有间接测量和直接测量两种方法。间接测量法,主要是通过测量材料对激光的反射率和透射率(对于不透明材料只需测量反射率)得到耦合系数,R. Freeman 等人<sup>[1]</sup>利用椭球反射计详细研究了包括几种标号的双联不锈钢材料、铝合金材料和复合材料等对  $1.3 \mu\text{m}$  激光的反射率随材料温度变化的关系,对比了不同表面条件对材料反射率的影响。王贵兵等人采用积分球/功率计测量了两种复合材料在强激光辐照下反射系数随时间变化的曲线<sup>[2]</sup>和大气环境下重复频率激光辐照 45# 钢反射率的变化<sup>[3]</sup>。张可星等人<sup>[4]</sup>测量了 CW/COIL 照射 LF6M 铝合金板的热耦合系数。直接测量法,通常是利用各种方法直接测量耦合进入材料的激光能量进而得到耦合系数。对于直接测量法,美国空军实验室开展了相关研究<sup>[5-6]</sup>,其原理是通过测量激光辐照期间的迎光面或背光面温度分布,在线监测入射的激光束分布,进而借助于数值求解热传导逆问题,获得靶中的能量耦合率及靶面激光参数,该方法已展现出广阔的应用前景<sup>[7-10]</sup>。

作者早期的工作<sup>[11-13]</sup>探索了利用温度测量反演入射激光强度和能量的方法,对迎光面温度测量实现起来较困难的情况,探索了用背光面温度测量来确定目标激光强度耦合或能量耦合系数的方法,很具现实意义。本文通过求解非线性逆热传导问题,建立迎光面温度与背光面温度的关系,给出估计金属板表面激光能量耦合系数的工程算法,并进行数值实验验证,研究成果可应用于激光束/目标激光耦合系数的直接测量。

## 2 反演的理论分析

### 2.1 一维问题的反演

当引入以下近似条件时,热传导问题可以简化为沿厚度方向的一维问题处理:(1)忽略壳壁中的横向热传导;(2)忽略表面对流/辐射热损失;(3)不考虑材料热物理特性参数随温升的变化;

(4)加热温度不太高,表面氧化效应可以忽略不计。这样激光辐照加热过程描述为

$$\begin{cases} C_0 \frac{\partial T(z,t)}{\partial t} = k_0 \frac{\partial^2 T(z,t)}{\partial z^2} \\ k_0 \frac{\partial T(z,t)}{\partial z} \Big|_{z=0} = q_f(t), T(z,t) \Big|_{z=0} = T_f(t) \\ k_0 \frac{\partial T(z,t)}{\partial z} \Big|_{z=h} = 0, T(z,t) \Big|_{z=h} = T_b(t) \\ T(z,t) \Big|_{t=0} = 0 \\ q_f(t) = A(t)I(t) \end{cases} \quad (1)$$

利用拉普拉斯变换<sup>[14]</sup>求解得到

$$\begin{cases} T_f(t) = T_b(t) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n)!} \frac{1}{(F_0)^n} \frac{\partial^{(n)} T_b(t)}{\partial t^{(n)}} \\ q_f(t) = \alpha_0 h \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)!} \frac{1}{(F_0)^{n-1}} \frac{\partial^{(n)} T_b(t)}{\partial t^{(n)}} \right\}, \end{cases} \quad (2)$$

式中  $C_0, k_0$  分别为靶板材料在常温下的单位体积热容和导热系数; $h$  为靶板厚度; $F_0 = \alpha_0/h^2$ ,  $F_0 = F_0 t$  为傅里叶数(Fourier number); $q_f(t) = A(t)I(t)$ ,  $A(t)$  为靶面激光耦合系数,  $I(t)$  为靶面激光强度; $T_f(t), T_b(t), T_{\text{Avg}}(t)$  分别为靶板的迎光面温升、背光面温升、厚度上的平均温升。由式(2)得靶面激光能量耦合系数随温度的变化为

$$\begin{cases} T_f(t) = T_b(t) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n)!} \frac{1}{(F_0)^n} \frac{\partial^{(n)} T_b(t)}{\partial t^{(n)}} \\ A(t) = \frac{\alpha_0 h}{I(t)} \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)!} \frac{1}{(F_0)^{n-1}} \frac{\partial^{(n)} T_b(t)}{\partial t^{(n)}} \right\}. \end{cases} \quad (3)$$

### 2.2 近似条件的修正

考虑到激光加热金属板的温升问题不仅属于三维问题,而且靶板材料的热物理参数随温度变化,在给出工程反演算法时,需要进行几项修正。

#### 2.2.1 横向热传导的影响

若横向热传导的影响定义为考虑与不考虑横向热传导时板厚度最大平均温升的比值<sup>[15]</sup>  $\eta_1$ , 则

$$\begin{cases} \Delta T_{\text{Avg}} = \eta_1 \Delta T_{\text{Avg}}^0 \\ \eta_1 = \frac{1}{b} \ln [1+b] \end{cases}, \quad (4)$$

其中,  $b = 4\alpha t/r_0^2$ ,  $\alpha$  为材料热扩散系数,  $t$  为激光辐照时间,  $r_0$  为光斑半径。

#### 2.2.2 表面对流热损失的影响

迎光面对流热损失对光斑中心靶厚度上平均温升的影响为

$$\begin{cases} \Delta T_{\text{Avg}} = \frac{\Delta T_{\text{Avg}}^0}{(1+\eta_2)} \\ \eta_2 \approx \frac{h_c t}{\rho c h} \left[ \frac{1}{2} + \frac{h^2}{3\alpha t} \right] \end{cases} \quad (5)$$

式中  $h_c$  为对流换热系数,  $t$  为辐照时间。

### 2.2.3 材料热物理特性参数随温度变化的影响

导热系数随温度变化对光斑中心厚度上平均温度的影响,主要表现为横向热传导的影响和靶厚度方向上温升分布的影响。

不考虑横向热传导的条件下,导热系数随温度的变化并不影响壳壁厚度上的平均温度,而只影响厚度上的温度分布,即

$$\begin{cases} \Delta T_{\text{Avg}}(t) = \Delta T_{\text{Avg}}^0 \eta_3 \\ \eta_3 = \frac{k_0}{\bar{k}} \end{cases}, \quad (6)$$

式中  $c_0, k_0, \alpha_0 = \rho c_0 / k_0$  为初始时刻材料的比热、导热系数和热扩散系数,  $\bar{k}$  为温度区间  $[T_0, T_{\text{Avg}}]$  的平均比热,估计可用温度区间  $[T_0, T_{\text{Avg}}^0]$  的平均比热近似。

考虑材料热物理特性对横向热传导的影响,则  $\eta_1$  变为

$$\begin{cases} \Delta T_{\text{Avg}} = \eta_1 \Delta T_{\text{Avg}}^0 \\ \eta_1 = \frac{1}{b} \ln[1+\bar{b}], \bar{b} = 4\alpha t / r_0^2 \end{cases} \quad (7)$$

### 2.2.4 表面氧化效应的影响

大气环境中激光加热金属板的氧化效应:即形成的氧化膜导致了激光吸收率增大和氧化反应放热。氧化效应对激光加热的贡献描述为<sup>[16-17]</sup>

$$\begin{cases} q_{\text{Ox}} = \rho_0 Q_c \frac{d\delta}{dt} \\ \Delta A(t) \approx 2[1-A_0(t)]a(t)\delta \end{cases}, \quad (8)$$

式中  $A_0(t)$  为金属的吸收系数;  $a(t)$  为氧化物的吸收系数。  $\Delta A(t)$  为氧化引起的吸收系数增量,  $q_{\text{Ox}}$  为氧化放热量,  $T_c$  为氧化的活化温度,  $\delta$  为氧化层厚度。

当温度不太高(低于熔化温度)时,空气中的氧化过程用抛物线规律描述。

$$\frac{d\delta}{dt} = \frac{d_0}{\delta} \exp\left(-\frac{T_c}{T}\right), \quad (9)$$

当温度较高、达熔化温度时,空气中的氧化过程用线性规律描述。

$$\frac{d\delta}{dt} = B_0 u_a \exp\left(-\frac{T_c}{T}\right). \quad (10)$$

式中  $u_a$  为气流速度,  $d_0, B_0$  为氧化反应常数。由

于氧化效应的参数理论上计算十分困难,需要根据实验测量数据确定,本文中暂不考虑这一问题。

### 2.2.5 近似条件总的修正因子

根据前面的分析,考虑前3种影响因素的总修正量  $\eta$  为

$$\begin{cases} \Delta T_{\text{Avg}} = \eta \Delta T_{\text{Avg}}^0 \\ \eta = \frac{\eta_1 \eta_2 \eta_3}{1+\eta_2} \end{cases}. \quad (11)$$

## 3 反演的工程算法

设背光面测量温度的时间间隔为  $\Delta t$ , 测量温度  $T_b^*(t_i) = f_i (i=1, 2, \dots, M+1)$  常常受随机误差扰动,进而引起反演  $T_f$  和  $A(t)$  的振荡,测量数据通常需要利用基于局部多项式的数字滤波器来平滑。设测量的背光面温度的多项式拟合为  $T_b^*(t)$ , 则考虑修正量的反演表达式变为

$$\begin{cases} T_b(t) = T_b^*(t) / \eta \\ T_f(t) = T_b(t) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n)!} \frac{1}{(F_0)^n} \frac{\partial^{(n)} T_b(t)}{\partial t^{(n)}} \\ A(t) = \frac{k_0}{\eta h F_0 I} \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)!} \frac{1}{(F_0)^{n-1}} \frac{\partial^{(n)} T_b(t)}{\partial t^{(n)}} \right\} \end{cases} \quad (12)$$

## 4 耦合系数反演结果

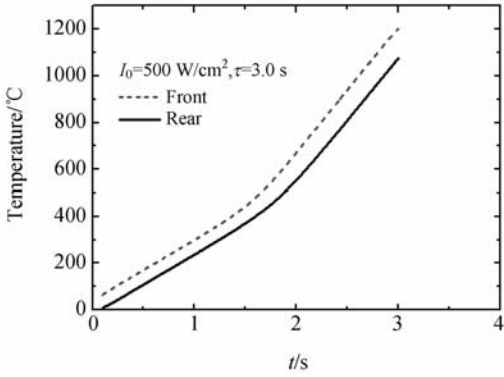
### 4.1 30CrMnSiA 材料耦合系数

30CrMnSiA 钢常温下的热物理参数为<sup>[18]</sup>: 密度  $\rho = 7.75$  (g/cm<sup>3</sup>), 比热  $c_{p0} = 0.437$  1 (J/g·°C), 导热系数  $\kappa_0 = 0.276$  3 (W/m·°C), 热扩散系数  $\alpha_0 = 0.081$  6 (cm<sup>2</sup>/s)。对4 mm板的  $F_0 = 0.509$  8 (1/s)。利用多项式拟合得到随温度变化的材料参数如下[密度(g/m<sup>3</sup>), 比热(J/g·°C), 导热系数(W/cm·°C)]:

$$\begin{cases} \rho = 7.75 \\ c_p(T) = 0.418 + 1.10 \times 10^{-3} T - 1.66 \times 10^{-6} T^2 \\ \quad + 1.67 \times 10^{-9} T^3 \\ \kappa(T) = 0.271 + 0.27 \times 10^{-3} T - 5.77 \times 10^{-7} T^2 + \\ \quad 2.69 \times 10^{-10} T^3. \end{cases} \quad (13)$$

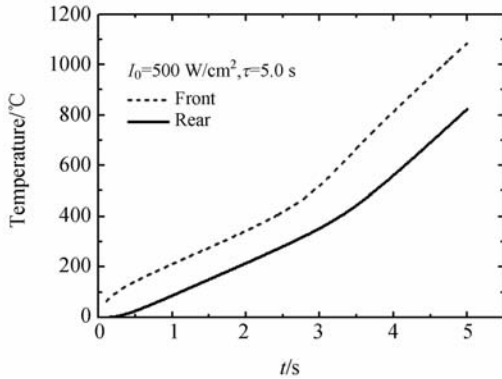
为了验证本文给出的算法,根据文献对30CrMnSiA材料反射系数的实验测量结果<sup>[18]</sup>,通过正向数值计算获得了背光面温度的时间演

化,然后利用本文给出的反演算法反演靶面激光耦合系数,验证结果见图 1。



(a) 2 mm 30CrMnSiA 板

(a) 2.0 mm-30CrMnSiA Plate



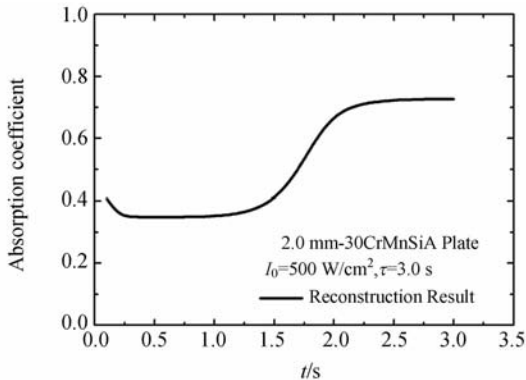
(b) 4.0 mm 30CrMnSiA 板

(b) 4.0 mm-30CrMnSiA Plate

图 1 迎光面和背光面温升随辐照时间的变化

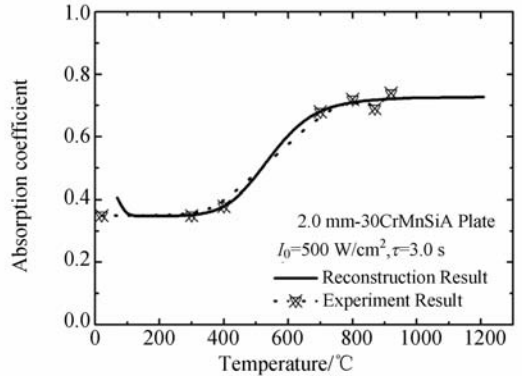
Fig. 1 Variety of temperature rises on front surface and rear surface vs. laser irradiating time

由图 2 可见,2 mm 板的反演结果明显优于 4 mm 板。在辐照开始后的一定时间范围内,反演结果出现振荡和明显的误差,这主要是由于热传



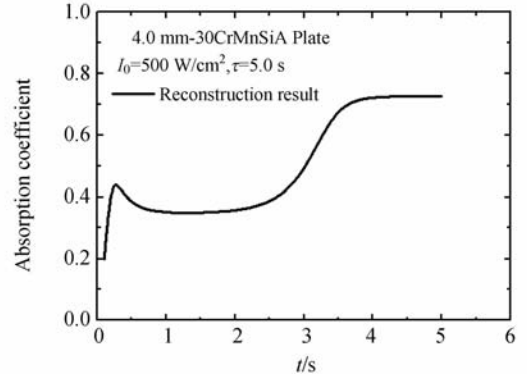
(a) 随时间变化图

(a) Varying with time



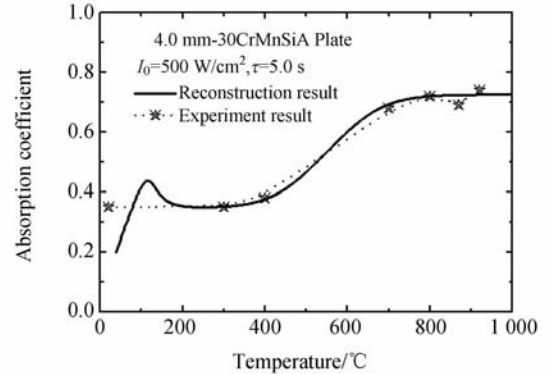
(b) 随温度变化图

(b) Varying with temperature



(c) 随时间变化图

(c) Varying with time



(d) 随温度变化图

(d) Varying with temperature

图 2 激光耦合系数反演结果与文献实验测量结果<sup>[11]</sup>比较

Fig. 2 Comparison between retrieved result and experiment result for laser coupling coefficient of 30CrMnSiA steel

导引起了背光面温升时间的延迟,根据文献[19]金属板后表面的热传导延迟时间,2 mm 板在辐照时间>0.25 s,4 mm 板在辐照时间>1 s后反

演结果与实验测量结果符合的较好,可以看出此时基本满足  $t \geq 3\tau_D$ 。对于  $t \leq 3\tau_D$  这一辐照初始时刻的反演问题,是值得关注的课题。

#### 4.2 30CrMnSi 材料的耦合系数

30CrMnSi 是一种合金结构钢,常温下的材料热物理参数为<sup>[20]</sup>:密度  $\rho=7.71(\text{g}/\text{cm}^3)$ ,比热  $c_{p0}=0.3334(\text{J}/\text{g} \cdot ^\circ\text{C})$ ,导热系数  $\kappa_0=0.21443(\text{W}/\text{cm} \cdot ^\circ\text{C})$ ,热扩散系数  $\alpha_0=0.0834(\text{cm}^2/\text{s})$ 。4 mm 板的  $F_0=0.5213(\text{s}^{-1})$ 。采用多项式拟合的到的随温度变化的热物理特性如下[密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ )、比热( $\text{J}/\text{g} \cdot ^\circ\text{C}$ )、导热率( $\text{W}/\text{cm} \cdot ^\circ\text{C}$ )、热扩散系数( $\text{cm}^2/\text{s}$ )]:

$$\rho=7.71$$

当  $15^\circ\text{C} \leq T \leq 600^\circ\text{C}$  时:

$$c_p(T)=0.3287+2.89 \times 10^{-4} T+3.10 \times 10^{-7} T^2-5.81 \times 10^{-10} T^3,$$

$$\kappa(T)=0.2107+2.51 \times 10^{-3} T-4.65 \times 10^{-7} T^2-3.66 \times 10^{-10} T^3.$$

当  $600^\circ\text{C} < T \leq 1200^\circ\text{C}$  :

$$c_p(T)=1.6436-3.4 \times 10^{-3} T+3.65 \times 10^{-6} T^2-1.18 \times 10^{-9} T^3,$$

$$\kappa(T)=0.448-0.58 \times 10^{-3} T+5.76 \times 10^{-7} T^2-1.91 \times 10^{-10} T^3.$$

为了获得 30CrMnSi 材料对  $1.3 \mu\text{m}$  激光的耦合系数,实验中所用的靶板厚度为 4 mm,靶面光斑为平顶高斯分布,平均功率密度为  $780 \text{ W}/\text{cm}^2$ ,辐照时间为 6.0 s,靶面为自然对流环境。

辐照结束时热电偶测量的背光面温度  $885.8^\circ\text{C}$ ,T13 测点的温度时间演化见图 3,辐照期间背光面温升拟合为

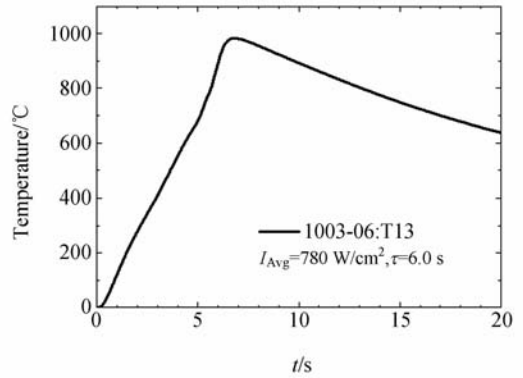
$$T_b(t)=B_0+B_1 T+B_2 t^2+B_3 t^3+B_4 t^4+B_5 t^5,$$

$$B_0=-20.12; B_1=121.95; B_2=30.65;$$

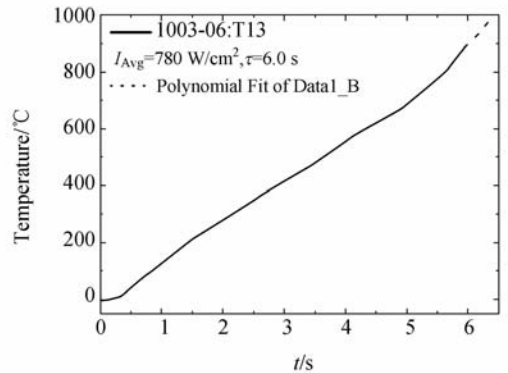
$$B_3=-11.30; B_4=1.33; B_5=-2.69 \times 10^{-2}.$$

利用上面给出的反演表达式(12),得到迎光面温度的时间演化见图 4,靶面激光耦合系数随温度和辐照时间的变化见图 5。

由上节得出的结论表明,激光辐照时由于存在背光面温升延迟,反演结果存在振荡和较大的误差。但从得到的实验测量结果来看,在温度小于  $400^\circ\text{C}$  时激光耦合系数基本不随温度变化,辐照时间  $t < 1.0 \text{ s}$  秒时的吸收系数可以通过外推得到。



(a) 测量值  
(a) Measurement



(b) 多项拟合值  
(b) Polynomial fit

图 3 背表面温度随辐照时间变化的测量值与多项式拟合  
Fig. 3 Measured temperature rise value and its polynomial fit at rear surface point

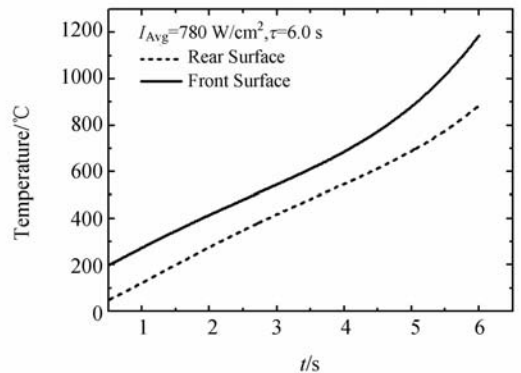
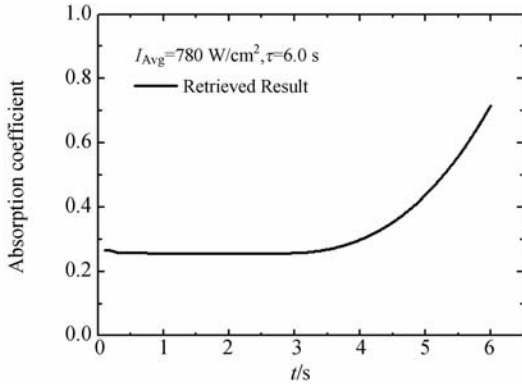
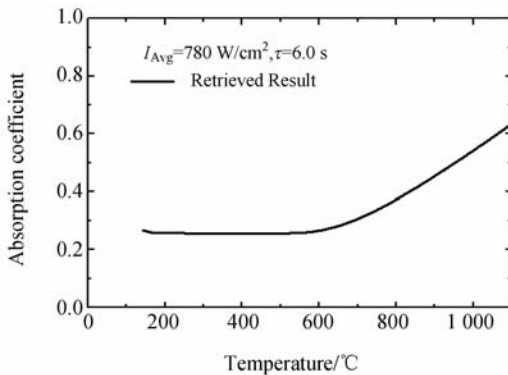


图 4 修正后的背光面和迎光面温度随辐照时间的变化  
Fig. 4 Changes of temperature rise at front surface and rear surface points vs. irradiated laser time



(a) 随时间变化图

(a) Varying with time



(b) 随温度变化图

(b) Varying with temperature

图 5 迎光面温度和激光吸收系数的反演

Fig. 5 Retrieved results of temperature rise and laser absorption at front surface point

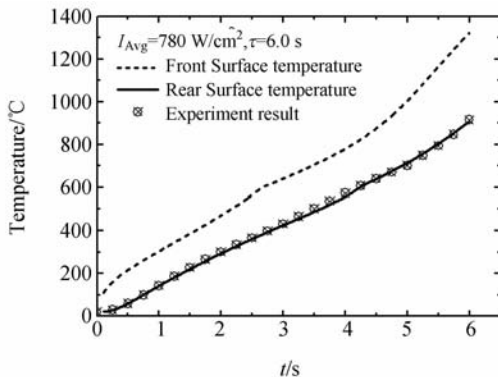


图 6 背光面温升的计算结果和实验测量结果比较

Fig. 6 Comparison of calculated result with experiment result at rear surface point

为了验证反演的耦合系数的正确性,利用耦合系数反演结果进行计算验证,比较了实验测量的背光面温升和数值计算结果,见图 6。可见,利用反演得到的耦合系数计算的背光面温度与实验测量结果符合较好,说明反演算法和反演结果是较为可靠的。

## 5 结 论

在一定的近似条件下,通过求解简化的一维傅里叶热传导逆问题,获得了反演迎光面温升和金属材料表面激光耦合系数的解析表达式。基于解析理论,分析了横向热传导、表面对流换热损失及随温度变化的材料热物理特性的影响,推导出了这些因素影响板中平均温升的修正因子,进而给出了修正后的金属材料表面激光耦合系数的反演式。利用实验测量结果和数值模拟结果,对获得的平板金属材料表面激光耦合系数反演关系进行了验证。验证结果表明,由于金属板中热传导存在时间延迟,激光耦合系数反演结果在  $t \leq 3\tau_D$  ( $\tau_D \approx h^2/6\alpha$ ) 为板厚度上的理论延迟时间) 辐照时间内,存在振荡和较大的误差,而在  $t \geq 3\tau_D$  辐照时间内反演结果与实验测量结果的一致性较好。根据实验结果分析,  $t \geq 3\tau_D$  辐照时间内的耦合系数也可以通过外推得到。因此,本文给出的反演表达式可以用于金属材料激光耦合系数直接测量方法中的回推计算。

但是,反演方法对较短时间激光辐照问题、特别是对较厚板情况存在局限性。下一步工作将研究对热传导时间延迟的补偿和数值反演方法问题,以便扩展反演方法的适用范围。

## 参考文献:

- [1] FREEMAN R, RIGBY F. temperature-dependent reflectance of plated metals and composite materials under laser irradiation[C]. 29<sup>th</sup> Plasmadynamics and lasers conference, 1998, Albuquerque, NM, AIAA-98-2482.
- [2] 张永强, 王伟平, 唐小松. 两种纤维增强复合材料与连续激光耦合规律[J]. 强激光与粒子束, 2007, 19(10):1599-1602.
- ZHANG Y Q, WANG W P, TANG X S. Coupling rules of two fiber reinforced composites with continuous wave laser[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, 19(10):1599-1602. (in Chinese)
- [3] 王贵兵, 罗飞, 刘仓理. 大气环境下重复频率激光辐照 45 # 钢反射率变化分析[J]. 强激光与粒子束, 2006, 18(2):181-183.
- WANG G B, LUO F, LIU C L. Reflectance change of 45 # steel irradiated by laser in atmosphere[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, 18(2):181-183. (in Chinese)
- [4] 张可星, 刘仓理, 张宁. CW/COIL 照射 LF6M 铝合金板热耦合效应研究[J]. 强激光与粒子束, 1994, 6(4):501-508.
- ZHANG K X, LIU C L, ZHANG N, *et al.*. The thermal coupling effects of CW/COIL radiation to LF6M aluminum alloy plates[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 1994, 6(4):501-508. (in Chinese)
- [5] MARRUJO A R, HENSEL E C. High energy laser beam diagnostics[J]. *SPIE*, 1993, 1871:265-276.
- [6] LAMAR C R. Laser diagnostics by heat conduction [C]. AIAA/ASME 4th Joint Thermophysics and Heat Transfer Conference, 1986, Boston, Massachusetts.
- [7] BRUNOTTE. Calorimetric measurements of total hemispherical emittance of selective surfaces at high temperatures[J]. *SPIE*, 1992, 1727:149-160.
- [8] DIJON J. Laser induced absorption at 355nm silica studied by calorimetry and photothermal deflection [J]. *SPIE*, 1996, 2714:61-70.
- [9] WILLAMOWSKI U, RISTAU D, WELSCH E. Measuring the absolute absorptance of optical laser components[J]. *Appl. Opt.*, 1998, 37(36):8362-8370.
- [10] WILLAMOWSKI U, GROSS T, RISTAU D, *et al.*. Calorimetric measurement of optical absorption and transmittivity with sub ppm sensitivity [J]. *SPIE*, 1996, 2775.
- [11] BERNAL E G. Heat flow analysis of Laser absorption calorimetry[J]. *Appl. Opt.*, 1975, 14(2):314-321.
- [12] 刘峰, 吴振森, 王立君. 热图法测量激光强度时空分布的重构理论研究[J]. 光学学报, 2007, 27(1):96-104.
- LIU F, WU ZH S, WANG L J. Theory of the laser beam intensity temporal and spatial distribution reconstructed from measurements of thermal image [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(1):96-104. (in Chinese)
- [13] 刘峰, 吴振森, 谢永杰. 量热阵列测量远场激光能量的重构方法[J]. 中国激光, 2006, 33(12):1615-1620.
- LIU F, WU ZH S, XIE Y J. Reconstruction method of far field laser energy measured with calorimetric array [J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, 33(12):1615-1620. (in Chinese)
- [14] 刘峰, 吴振森, 陈雨生. 基于靶面温度测量的激光强度时空分布重构方法[J]. 光学学报, 2007, 27(11):2013-2019.
- LIU F, WU ZH S, CHEN Y SH. Reconstruction algorithm for laser intensity temporal spatial distribution from measured temperature distribution on target surface [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(11):2013-2019. (in Chinese)
- [15] 《数学手册》编写组. 数学手册[M]. 北京: 高等教育出版社, 1979:909.
- 《Mathematics Handbook》Compile-Group. *Mathematics Handbook* [M]. Beijing: High Education Press, 1979:909. (in Chinese)
- [16] 刘峰, 吴振森, 王玉恒. 重复频率激光辐照圆柱壳体的加热效率[J]. 中国激光, 2006, 33(4):461-466.
- LIU F, WU ZH S, WANG Y H. Heating efficiency repetitive frequency intensity laser-irradiated cylinder [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, 33(4):461-466. (in Chinese)
- [17] ALIMOV D T, EDVABNYI I V. Effect of the heat of reaction on the development of thermochemical instability [J]. *Fizika Goreniyai Vzryva*, 1985, 21

- (5):57-60.
- [18] ANTONOV V, IORDANOVA I, GURKOVSKY S. Investigation of surface oxidation of low carbon sheet steel during its treatment with Nd: Glass pulsed laser[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2002, 160:44-53.
- [19] 袁红, 赵剑衡, 谭福利, 等. 激光辐照下旋转柱壳温度场的数值模拟[J]. *强激光与粒子束*, 2005, 17(5):681-684.
- YUAN H, ZHAO J H, TAN F L, *et al.*. Numerical simulation of the temperature distribution on a rotational cylindrical shell under laser irradiation [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, 17(5):681-684. (in Chinese)
- [20] BOLEY C D, RUBENCHIK A M. Modeling anti-mortar lethality by a solid-state heat-capacity laser [C]. Second Annual High Energy Laser Lethality Conference, Tampa, FL, United States, 2005:1-14.
- [21] 工程材料实用手册编辑委员会. 工程材料实用手册 结构钢 不锈钢[M]. 北京: 中国标准出版社, 1988:58.
- China Engineering Material Applied Handbooks Editor Committee. *Engineering Material Applied Handbooks: Framework-steel and Stainless-steel* [M]. Beijing: China Standard Press, 1988:58. (in Chinese)

#### 作者简介:

**刘 峰**(1962—), 男, 陕西榆林人, 博士, 研究员。1983 年于兰州大学获学士学位, 1991 年于西北核技术研究所获硕士学位, 2007 年于西安电子科技大学获博士学位, 主要从事强激光大气传输及目标效应的理论和数值模拟研究。E-mail: liufeng-laser@163.com

**王立君**(1967—), 男, 黑龙江海伦人, 研究员, 硕士生导师, 1988 年于兰州大学获学士学位, 1996 年于国防科技大学获得硕士学位, 主要从事激光辐照效应模拟实验技术的研究。E-mail: wanglijun0317@126.com

**韦成华**(1974—), 男, 辽宁海城人, 副研究员, 博士研究生, 1996 年于国防科学技术大学获学士学位, 1999 年于国防科学技术大学获硕士学位, 主要从事激光辐照效应模拟实验技术的研究。

**王玉恒**(1977—), 男, 河南方城人, 副研究员, 博士研究生, 1999 年于西北工业大学获学士学位, 2002 年于西北核技术研究所获硕士学位, 主要从事激光与物质相互作用的理论与数值模拟研究。

**杜太焦**(1972—), 男, 山西襄汾人, 博士, 副研究员, 1994 年于南开大学获学士学位, 2002 年于中国科技大学获博士学位。主要从事激光与物质相互作用的理论与数值模拟研究。

