

利用集总参数法测量材料对激光的吸收率^{*}

蔺秀川 邵天敏[†]

(清华大学摩擦学国家重点实验室, 北京 100084)

(2000 年 7 月 29 日收到)

材料对激光吸收的研究工作对激光加工的发展有着非常重要的意义. 而吸收率测量方法的研究是材料对激光吸收研究工作的基础. 从量热的角度出发, 利用传热学中的集总参数法建立了测量吸收率的方法, 设计了相应的试验装置, 并测量了几种常用工程材料对激光的吸收率.

关键词: 集总参数法, 吸收率, 激光

PACC: 0760H, 4262A

1 引 言

在激光与材料的相互作用过程中, 照射到材料上的激光一部分被材料吸收, 另一部分则被材料反射. 而激光加工的本质是利用材料吸收的激光能量来改变材料的物理化学结构从而实现一定的加工目的^[1]. 材料对激光吸收的问题是激光加工中的一个非常重要的问题. 表征材料对激光吸收能力大小的参数是吸收率, 定义为材料吸收的激光能量与激光器输出能量的比值. 吸收率测量是材料对激光吸收研究的基础.

目前, 吸收率的测量方法主要有三类. 第一类是通过测量反射率, 再由 1 减去反射率求出吸收率. 这方面代表性的工作包括: 用量热计测量反射率^[2]、利用线偏振光在材料表面反射后会被调制为椭圆偏振光的原理来测量反射率^[3]和利用积分球法^[4]测量反射率. 量热计法主要用于测量材料对小功率激光的反射率^[2]. 后两种方法的测量装置都比较复杂. 利用偏振原理的方法需要专门的偏振计量装置, 积分球法需要积分球和能够快速测量激光能量的装置, 当激光功率较大且被测材料对激光的反射率较高时, 由于容易造成积分球内表面的损伤, 因此积分球法有一定的局限性^[4]. 第二类是从量热的角度出发, 通过测量材料的温度变化并进行相应的热力学计算而得到吸收率. 这方面的主要工作有: 利用集总参数法进行吸收率计算^[5]、利用有限差分法的一维和二维

的非稳态传热学模型计算吸收率^[6]. 第三类方法则是根据激光作用区材料状态发生变化的情况来间接研究吸收情况. 这方面的工作主要是通过测量激光热作用区的几何尺寸来对吸收率进行间接评定^[2,7]. 这类方法一般只能用于对吸收率进行定性的评价. 在上述几种方法中, 由于集总参数法具有简单、有效的优点, 而且可以实现吸收率的定量测量, 因此在实验传热学中有广泛的应用. 集总参数法用于材料对激光吸收率测量有一些研究工作发表^[5], 但这些研究工作尚缺乏系统性, 在试验模型设计上也有需要改进之处.

2 集总参数法的物理模型

吸收率是指材料吸收的激光功率与激光器输出功率之比. 在激光加工中一般认为材料吸收的光能将转化为热能^[8], 即材料吸收的光能与一定的热流注入等效, 因此可以将吸收率(A)进一步定义为材料吸收的热功率 P_{abs} 与激光器输出功率 P 之比.

$$A = P_{\text{abs}} / P. \quad (1)$$

激光器输出功率用激光功率计可以方便地测量. 因此测量吸收率的核心就是测量材料吸收的热功率值. 当热量传入有一定体积的固体时, 固体内各个点的温度一般互不相同, 固体内的温度场通常应按照三维的传热模型进行计算. 当固体内部的导热

^{*} 国家自然科学基金(批准号: 50075042)资助的课题.

[†] 联系人 E-mail: Shaotm@pim.tsinghua.edu.cn

热阻很小且远小于固体表面与周围环境的换热热阻时,固体内部的温度趋于一致,以致可以认为整个固体在同一瞬间均处于同一温度,忽略固体内部的温度梯度将三维的传热问题简化为质点传热问题,这种方法就称为集总参数法^[9,10]。集总参数法的应用需要满足一定的前提条件,一般将这个条件称为集总参数条件。工程上一般将固体内部的导热热阻与固体表面的换热热阻之比小于 0.1 称为集总参数条件。当固体的导热系数相当大、几何尺寸很小且固体的表面换热系数极低,则传热计算可以采用集总参数法处理。

设试件初态时有均匀的初始温度 t_0 ,然后接收一连续热流输入 P_{abs} 。根据传热学理论^[9]可得

$$P_{\text{abs}} = mC_p \left(\frac{dt}{d\tau} \right)_{\text{heating}} + hA_1(t - t_0) + \lambda A_2(t - t_0)\delta, \quad (2)$$

其中 m 为试件的质量(kg), C_p 为试件的比热容($\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$), h 为对流换热系数($\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$), λ 为周围介质的导热系数($\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$), A_1 为对流换热面积(m^2), A_2 为热传导的换热面积(m^2), δ 为周围介质的厚度(m), t 为试件的温度($^\circ\text{C}$), τ 为时间(s), t_0 为初始温度($^\circ\text{C}$)。右边的第一项代表试件的内能增加,第二项代表由于试件与气体接触而引起的对流热损,第三项代表由于试件与周围介质接触而引起的热传导热损。激光加工中的辐射热损通常可以忽略^[11],故模型中忽略辐射热损。在有激光照射时,(2)式称为加热段方程。为了简化起见,令

$$S = hA_1 + \lambda A_2/\delta, \quad (3)$$

则(2)式可以写为

$$P_{\text{abs}} = mC_p \left(\frac{dt}{d\tau} \right)_{\text{heating}} + S(t - t_0). \quad (4)$$

通常材料对激光的吸收率、对流换热系数 h 和周围介质的导热系数 λ 是随温度的变化而变化的。但如果考虑时间间隔充分小时,温度变化不大,可以认为在此时间间隔内吸收率、对流换热系数 h 和周围介质的导热系数 λ 保持不变。假设有一充分小的时间间隔 $[\tau_1, \tau_2]$,对应的温度分别为 $[t_1, t_2]$,在此时间间隔内 P_{abs} , h 和 λ 为常数,则(4)式可以整理为

$$\left(\frac{dt}{d\tau} \right)_{\text{heating}} + \frac{S}{mC_p}t = \frac{St_0 + P_{\text{abs}}}{mC_p}. \quad (5)$$

令

$$\frac{St_0 + P_{\text{abs}}}{mC_p} = N, \quad (6)$$

微分方程(5)的解为

$$t = \frac{NmC_p}{S} + D e^{-\frac{S\tau}{mC_p}}, \quad (7)$$

其中 D 为积分常数,取($\tau = \tau_1, t = t_1$)作为边界条件代入(7)式即可确定积分常数

$$D = \left(t_1 - \frac{NmC_p}{S} \right) e^{\frac{S\tau_1}{mC_p}},$$

则有

$$P_{\text{abs}} = S \left(\frac{\frac{S\tau_1 - \tau}{1 - e^{-\frac{S\tau_1 - \tau}{mC_p}}} - t_0}{1 - e^{-\frac{S\tau_1 - \tau}{mC_p}}} - t_0 \right), \quad (8)$$

其中(τ, t)为加热曲线上的点且 $\tau_1 \leq \tau \leq \tau_2$ 。

由(8)式可知 S 仍为未知量,这个未知量可以通过激光停止照射后,试件的冷却曲线求得。在(4)式中令 $P_{\text{abs}} = 0$ 可得试件冷却时的微分方程为

$$mC_p \left(\frac{dt}{d\tau} \right)_{\text{cooling}} = -S(t - t_0). \quad (9)$$

微分方程(9)的解为

$$t - t_0 = C e^{-\frac{S\tau}{mC_p}}, \quad (10)$$

其中 C 为积分常数,两边取对数得

$$\ln(t - t_0) = -\frac{S\tau}{mC_p} + \ln C. \quad (11)$$

对测量得到的冷却段曲线,取 $[t_1, t_2]$ 段进行曲线拟合,即可求得 S 和 $\ln C$ 。将 S 代入(8)式即可求得 P_{abs} 。

最后根据吸收率定义 $A = P_{\text{abs}}/P$ 即可求得吸收率。

3 实验方案设计

材料对激光的吸收一般只取决于材料的表面性质^[11],为此将待测材料做成薄片并不会影响吸收率的测量。实验中选用量热中常用的铜热沉技术^[12],将待测材料做成薄片镶嵌于铜热沉上,利用待测薄片材料吸收激光的能量,而从铜热沉上测量温度。外部绝热体选用硅藻土材料。图 1 为试验方案图。

在薄片与铜热沉之间会存在接触热阻,而较大的接触热阻会对集总参数条件的满足产生影响。为此采用添加导热脂的方法降低接触热阻。在大气环境下粗糙度为 $R_a = 6.3\mu\text{m}$ 的钢之间的换热系数典型值为 $3000\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$,而添加导热脂后换热系数可提高到 $20000\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ 。

测温元件选用镍铬镍硅铠装热电偶,直径为

1mm. 采用带差分放大器的模数转换器和计算机记录温度变化曲线. 利用多轴运动控制器(PMAC 卡)实现规定的运动并控制光闸的通断. 图 2 为集总参数法测量吸收率的实验测量装置图.

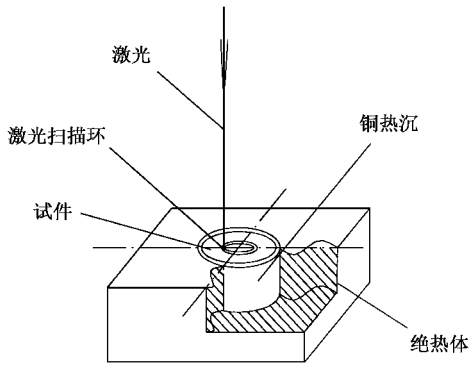


图 1 集总参数法测量吸收率的实验方案图

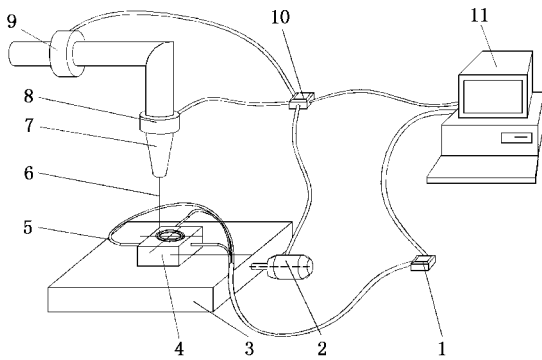


图 2 集总参数法测量吸收率的实验装置示意图

1. A/D 板 2. 步进电机 3. 工作台 4. 绝热盒 5. 热电偶 6. 激光束 7. 激光器 8. 电磁阀 9. 光闸 10. PMAC 卡 11. 计算机

4 集总参数条件判定

集总参数法的应用前提是表面换热热阻远大于工件的内部热阻,下面对上述的试验方案进行集总参数条件判定.

4.1 表面换热热阻

表面换热热阻由两部分组成,一部分是表面的强迫对流换热热阻,在计算中采用外掠平板的对流换热模型^[9],另一部分为绝热体的传导热阻.则表面换热热阻 $R_{表}$ 表示为

$$R_{表} = \frac{1}{hA_1 + \lambda A_2 / \delta}, \quad (12)$$

$$h = \lambda_{空} Nu / l, \quad (13)$$

$$\lambda = 0.039 + 0.00019t, \quad (14)$$

$$Nu = 0.664 Re^{\frac{1}{2}} \times (Pr)^{\frac{1}{3}}, \quad (15)$$

$$Re = ul/\nu, \quad (16)$$

其中 Re 为雷诺数, u 为空气流速(m/s), l 为特征长度即铜热沉的直径(m), ν 为空气的运动黏度(m^2/s), Nu 为层流平均换热努塞尔数, Pr 为普朗特数, $\lambda_{空}$ 为空气的导热系数($W/(m \cdot ^\circ C)$), t 为温度($^\circ C$).

4.2 内部热阻分析

总内部热阻为试片内阻、铜热沉内阻和接触热阻之和,其计算式为

$$R_{内} = \frac{\delta_{试}}{\lambda_{试} A_{试}} + \frac{\delta_{铜}}{\lambda_{铜} A_{铜}} + \frac{1}{A_{接} H}, \quad (17)$$

式中右边的第一项为试片内阻,第二项为铜热沉内阻,第三项为接触热阻.其中 $\delta_{试}$ 为试片厚度(m), $\lambda_{试}$ 为试片的导热系数($W/(m \cdot ^\circ C)$), $A_{试}$ 为试片面积(m^2), $\delta_{铜}$ 为铜热沉的高度(m), $\lambda_{铜}$ 为铜热沉的导热系数($W/(m \cdot ^\circ C)$), $A_{铜}$ 为铜热沉的面积(m^2), $A_{接}$ 为铜热沉与试片的接触面积(m^2), H 为铜热沉与试片之间的换热系数($W/m^2 \cdot ^\circ C$).

4.3 计算参数

初始温度 $t_0 = 20^\circ C$. 铜热沉的尺寸为 $\phi 14mm \times 10mm$. 试片的尺寸为 $\phi 12mm \times 1mm$. 空气流速取为 $3m/s$.

4.4 集总参数条件判定

分别取不同的铜热沉温度,然后利用上述公式计算表面换热热阻 $R_{表}$ 、内部热阻 $R_{内}$ 以及 $R_{内}$ 与 $R_{表}$ 的比值.结果如表 1 所示.

表 1 集总参数条件判定

$t/^\circ C$	200	400	600	800	1000
$R_{内}/(^\circ C/W)$	0.804	0.804	0.804	0.804	0.804
$R_{表}/(^\circ C/W)$	102.09	97.87	94.17	90.63	87.36
$R_{内}/R_{表}$	0.0079	0.0082	0.0085	0.0089	0.0092

从表 1 可知热沉温度在 $0^\circ C$ 到 $1000^\circ C$ 范围内时,内部热阻 $R_{内}$ 与表面换热热阻 $R_{表}$ 的比值均远小于 0.1. 所建立的实验装置是充分满足集总参数条件的.

5 吸收率测量示例

选用四种常用工程材料 45 钢、2Cr13 不锈钢、

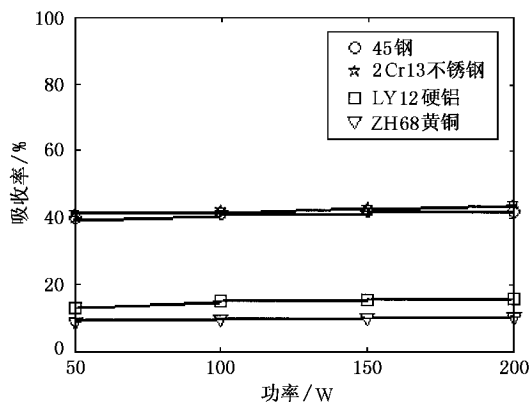


图3 吸收率实验结果图

ZH68 黄铜、LY12 硬铝. 试片的表面粗糙度为 $R_a = 6.3\mu\text{m}$. 选用 YAG 固体连续激光器, 透镜焦距为 120mm, 激光束聚焦于试片表面. 采用半径为 4mm 的环形扫描, 扫描速度为 $v = 5\text{mm/s}$. 激光功率分别选为 50W, 100W, 150W, 200W. 在大气环境下, 测量了四种材料的吸收率. 实验结果如图 3 所示.

6 总 结

从量热的角度出发, 利用集总参数模型建立了测量材料对激光吸收率的方法. 在实验装置设计上, 采用铜热沉技术, 并将待测材料做成薄片. 通过计算证实实验装置充分满足集总参数条件.

[1] Zheng-zhong Guan, Handbook of Laser Material Processing (Measurement Press, Beijing, 1998) [in Chinese] 关振中, 激光加工工艺手册(中国计量出版社, 北京, 1998).

[2] Bao-rong Su, *laser*, **9**(1981), 533 (in Chinese) [苏宝蓉, 激光, **9**(1981) 533].

[3] H. G. Dreehsen *et al.*, *J. Appl. Phys.*, **56**(1984) 238.

[4] Z. Zhang *et al.*, *J. heat transfer*, **120**(1998) 323.

[5] M. Haag, *J. Appl. Phys.*, **79**(1996) 3835.

[6] T. H. Kim *et al.*, *J. Mater. Sci.*, **30**(1995) 784.

[7] Wen-jin Liu, Ph. D. Thesis, Tsinghua University, Beijing, 1989 (in Chinese) [刘文今, 清华大学博士论文, 北京, 1989].

[8] M. Von Allmen, Laser-beam interaction with materials physical principles and applications (Science Press, Beijing, 1994) [in Chinese] [马丁·冯·奥尔曼, 激光束与材料相互作用的物理原理及应用, 科学出版社, 北京, 1994].

[9] J. P. Holman, Heat Transfer (McGraw-Hill, New York, 1976).

[10] Yu-zhang Cao, Experimental Heat Transfer (National Defence Industry Press, Beijing, 1998) [in Chinese] [曹玉璋, 实验传热学, 国防工业出版社, 北京, 1998].

[11] W. M. Steen, Laser material processing (Spinger, London, 1998).

[12] Ze-shao Chen, Experimental Heat Transfer (Press of University of Sciences and Technology of China, Hefei, 1988) [in Chinese] [陈则韶, 传热学实验分析(中国科技大学出版社, 合肥, 1988)].

LUMPED METHOD FOR THE MEASUREMENT OF LASER ABSORPTANCE OF MATERIALS*

LIN XIU-CHUAN SHAO TIAN-MIN†

(State Key Laboratory of Tribology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

(Received 29 July 2000)

ABSTRACT

The research for the absorptance of materials is significant to the development of laser material processing. The measurement method is the foundation of the absorptance research. In this paper the lumped method based on heat transfer is established for the absorptance of laser, and the measuring apparatus is also built up. As examples, the absorptance of laser is measured for several ordinary engineering materials.

Keywords: lumped method, absorptance, laser

PACC: 0760H, 4262A

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 50075042).

† correspondence: Shaotm@pim.tsinghua.edu.cn