

包装材料激光切割数学建模与实验研究

陈 华¹ 薛守龙^{1,2} 胡 泓²

¹东莞铭丰包装品制造有限公司, 广东 东莞 523059

²哈尔滨工业大学深圳研究生院机械工程与自动化学院, 广东 深圳 518055

摘要 根据CO₂激光束加热材料的实际情况,建立了连续激光辐照材料的数学模型,并进行实验验证。结合实际的边界条件,采用微积分的数学处理方法推导出切割深度与激光参数的解析表达式,讨论了激光参数等因素对切割深度的影响。并且设计实验以验证理论模型,用Matlab软件绘制各参数的关系图。结果表明:材料的切割深度受激光两个参数影响最大,激光功率与激光束移动速度。理论分析和试验结果表明切割深度随着切割速度的减小而增加,随着激光功率的增加而增大,并根据实验数据小幅修改了理论模型,该模型可对激光切割包装材料时在参数选择方面做指导。

关键词 激光技术;切割深度;数学建模;包装材料

中图分类号 O436 文献标识码 A

Experimental and Theoretical Analysis of Cutting Packaging Materials by Laser

Chen Hua¹ Xue Shoulong^{1,2} Hu Hong²

¹Dongguan Ming Feng Packaging Manufacture CO.LTD., Dongguan, Guangdong 523059, China

²School of Mechanical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology Shenzhen Graduate School, Shenzhen, Guangdong 518055, China

Abstract Based on the actual situation of CO₂ laser beam heating packaging material, a mathematical model of CO₂ laser irradiating packaging materials is established. Combining with the actual boundary conditions, the analytical expression of relationship between cutting depth and laser beam parameter is built up by calculus. Experiments are designed to examine the mathematical model. Diagrams of each parameter are drawn using Matlab software. Theoretical analysis and experimental results indicate that the lower speed of laser beam moves and higher power of laser, the deeper the hole will be, and the model has been revised to be in accord with experimental results. The model can be used to predict the capability of low-power laser cutting.

Key words laser technology; cutting depth; mathematical modeling; packaging materials

OCIS codes 140.3570; 350.3390; 120.6810

doi: 10.3788/LOP52.011404

1 引言

近年来,随着人力成本的增加,企业对机械化的要求越来越迫切,特别在像包装这种传统的劳动密集型领域,对自动化的模切设备更是有极大的需求。对激光模切设备来说,最重要的指标就应该是激光与材料相互做用的各种结果,对这方面的研究可以指导调节切割时的各种参数。激光与材料的相互作用,国外研究较多,Coherent研究了切割功率为500 W的CO₂激光器切割尼龙安全带^[1]。Butting等^[2]做了激光入射功率密度与切割速度之间关系的研究。Pietro^[3]做了CO₂激光器切割前向流动的数值研究。在国内,王昆林^[4]从求解激光加热的热传导微分方程入手,分析了材料表面加热、熔化和汽化时温度分布的特点。辜建辉等^[5]描述了高能激光与固体材料相互作用的动力学过程,并进行了激光推力的实验。张英聪等^[6]根据连续激光

收稿日期: 2014-06-17; 收到修改稿日期: 2014-08-04; 网络出版日期: 2014-11-08

基金项目: 广东省科技计划项目(2012B011300014)、深圳市科技计划项目(JCY2014041717241709)

作者简介: 陈 华(1964—),男,硕士,高级工程师,主要从事激光切割、激光与材料关系等方面的研究。

E-mail: rd@mingfengdg.com

加热靶材的实际情况,建立了连续激光辐照材料的三维物理模型。朱凯等^[7]对激光辐照复合材料应力应变进行模拟分析,获得了应力应变场分布及其变化规律。高士友等^[8]研究了激光切割厚板切割状态的监控方法。王星罡等^[9]做了CO₂激光切割电子强化玻璃过程的有限元模拟与实验。

由以上可知,这些研究大多只是理论分析,没有量化实验,同时也没有进行切割深度与切割参数的建模。为此本文建立CO₂激光器汽化切割非金属板材的理论模型,并将计算结果与实验数据对照,对模型进行调整并得出该模型的适用范围。

2 激光切割数学建模

非金属材料如绒布、聚氨酯(PU)皮等一般热导率及热扩散系统较低,它们对CO₂激光器发出的10.6 μm波长的激光具有很好的吸收率。所以,在下面的分析中,假定激光发出的所有能量都完全被非金属材料所吸收,并且所有吸收的能量都转化为气化材料的热量。在分析中使用能量守恒定律,并且忽略这个过程中的能量损失。假设当半径为 R 的激光束辐射到加工材料的表面时,切割的最大深度发生在激光束圆的中心,同时也假设当激光束在材料表面移动时,切割的最大深度点出现在激光束移动轨迹的中心线上。这样,只要考虑激光能量在中心线上分布就可以了。如图1所示,在激光轨迹行走的中心线上取一面积为 ΔS 小区域,然后计算激光束通过时 ΔS 区域吸收的能量 E 。用吸收的总能量来计算在 ΔS 区域内蒸发掉的材料总体积,在切割过程中激光束的能量采用高斯分布。

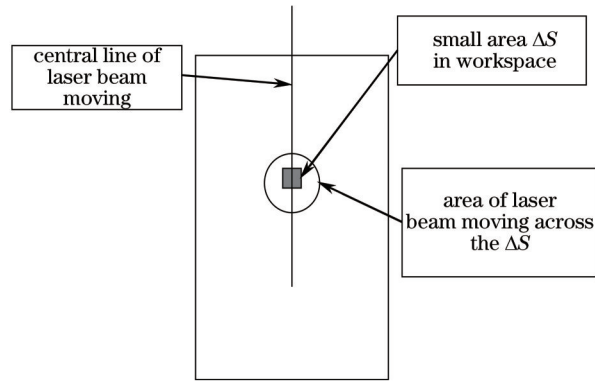


图1 激光束辐照加工表面示意图

Fig.1 Laser beam moving on the workspace

在实际生产中,用于切割作业的激光器基本工作在基模(TEM_{00}),激光的模式是指激光束的空间形态,它和激光作用媒介有关,激光模式还分单环模(TEM_{00}^*)、多模等,但其他模式比较难以聚焦,模式符号的下标代表垂直激光束传播方向上的节点数, TEM_{00} 在空间为高斯分布,此模式通常被认为是最适合切割的激光模式。它的波阵面是唯一的,并且从激光束中心到边缘能量平缓地下降,这可以降低激光聚焦过程中的衍射效应。能量聚集在一个小区域内并且激光束能量服从高斯分布。由高斯分布的解析式可知,激光能量分布为

$$I(x,y) = I_0 \exp[-(X^2 + Y^2)/R^2], \quad (1)$$

式中 I_0 为激光束中心的峰值强度, R 为激光束的半径(半径定义为从激光束的中心点到激光能量衰减至 I_0/e^2 的点的距离),一个输出功率为 P 的激光束,照射在材料表面时激光吸收率为 α ,则它的峰值功率可表示为

$$I_0 = \frac{\alpha P}{\pi R^2}. \quad (2)$$

由于只关注沿激光束运动的中心线上的能量分布,这里取 $Y=0$,则(1)式变为

$$I(x) = I_0 \exp[-(X/R)^2]. \quad (3)$$

如前所述,在加工表面激光束运动轨迹中心线上取一面积为 ΔS 的小区域。此区域在 x 、 y 轴上的尺寸分别为 Δx 、 Δy ,则有

$$\Delta S = \Delta x \cdot \Delta y. \quad (4)$$

由(4)式可知,作用在 ΔS 上的激光功率为

$$\Delta P = \Delta S \cdot I_0 \exp[-(X/P)^2]. \quad (5)$$

在激光切割过程中,切口的宽度是恒定的,这主要是由激光束的直径决定的。切割轨迹应该是看作激光束移动轨迹的中心线。而切割的最深点出现在激光束的极值点也就是激光束中心。如果工作台在激光束照射下以一个速度 $V(\text{mm/s})$ 匀速运动,那么激光束通过小区域的时间为

$$\Delta t = \frac{\Delta x}{V}. \quad (6)$$

将(6)式代入(4)式消去 Δx 然后将结果代入(5)式,就可得出面积为 ΔS 的区域所吸收的总能量为

$$E = \sum_{i=-n}^n \Delta P \cdot \Delta t = \sum_{i=-n}^n I_0 \frac{\Delta S}{V} \Delta x_i \exp[-(X/R)^2]. \quad (7)$$

对于一种给定的材料,在吸收的总能量 E 作用下蒸发掉的材料的质量为

$$W = \frac{E}{Q} = L_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=-n}^n I_0 \exp[-(X/R)^2] \frac{\Delta S}{VQ} \Delta x_i, \quad (8)$$

式中 $Q(\text{J/g})$ 代表材料的比能,表示蒸发掉 1g 材料所消耗的能量,表达式为

$$Q = C(T_m - T_e) + L_v, \quad (9)$$

式中 C 为材料的比热容, T_m 代表材料熔点, T_e 为环境温度, L_v 为材料从熔化到气化的潜热。忽略(8)式中的导热系数,则可知在面积为 ΔS 的材料上激光切割的深度为

$$D = \frac{W}{\Delta S \rho}, \quad (10)$$

式中 ρ 为被切割材料的密度。

将之前 W 和 ΔS 的表达式代入(10)式中,可知切割深度 D 的表达式为

$$D = L_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=-n}^n I_0 \exp[-(X/R)^2] \frac{\Delta S}{VQ\Delta S\rho} \Delta x_i. \quad (11)$$

整理可得

$$D = \frac{1}{Q\rho} L_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=-n}^n I_0 \exp[-(X/R)^2] \frac{\Delta x_i}{V}. \quad (12)$$

当 $n \rightarrow \infty$, 区域面积 $\Delta S \rightarrow 0$ 或者 $\Delta X \rightarrow 0$, 则(12)式的求和形式转化为积分形式:

$$D = \frac{1}{Q\rho} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{V} I_0 \exp[-(X/R)^2] dX = \frac{2I_0 R}{VQ\rho} \int_0^{\infty} \exp[-(X/R)^2] d\left(\frac{X}{R}\right). \quad (13)$$

对(13)式进行积分运算,并将(2)式代入(12)式消去 I_0 , 并且考虑能量吸收率,则切割深度为

$$D = \frac{\alpha PR \sqrt{\pi}}{\pi R^2 V Q \rho} = \frac{\alpha}{QR\rho\sqrt{\pi}} \left(\frac{P}{V}\right). \quad (14)$$

由(14)式可知,激光切割材料的深度与激光能量呈正比,与激光束在材料表面的行进速度呈反比,图2为切割深度 D 与切割速度 V 的关系图,所切割材料为聚丙烯塑料,材料密度为 $\rho = 1.18 \times 10^{-3} \text{ g/mm}^3$ 、比热容为 $Q = 1.4 \text{ kJ/g}$,假设激光发出的能量完全被材料所吸收,也就是 $\alpha = 1$ 。激光束直径为 $R = 0.25 \text{ mm}$,输出功率分别为 12 、 24 和 60 W 。

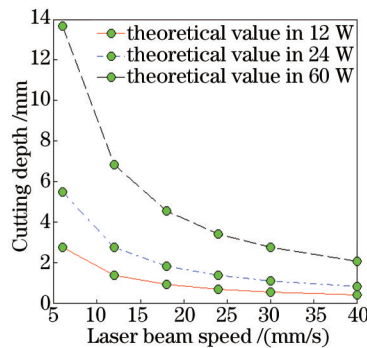


图2 不同能量下切割深度与激光速度的理论关系

Fig.2 Relationship of cutting depth in different energy and the speed of the laser

3 实验设置

3.1 实验装置

为了验证上述所建数学模型的合理性,切割了多种材料并记录比较参数。实验所用激光器为数字化激光模切机,由于此激光设备带有振镜系统,如果直接实验会因激光束的偏离影响实验结果,所以实验中关闭振镜系统,使激光束垂直照射到工作台表面,以保持激光参数的稳定。工作台由 x 、 y 轴上的两台伺服电机带动,经运动控制卡由工控机控制,激光头为 CO_2 气体激光器,由德国罗芬(ROFIN)公司生产,实际工作功率范围为 5~120 W,激光束运行速度范围为 0~300 mm/s,整个实验装置如图 3 所示。

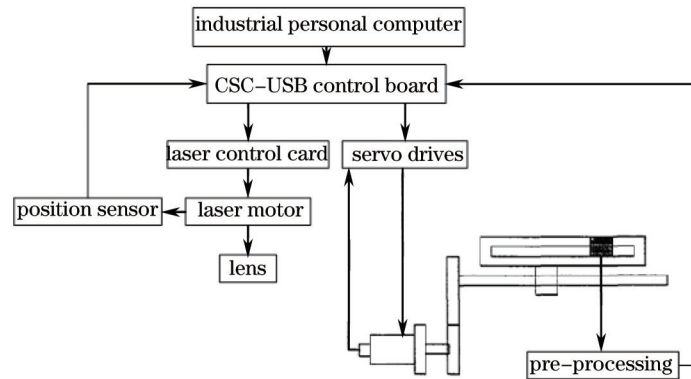


图3 实验装置

Fig.3 Experimental setup

3.2 实验结果

为验证所得到的数学模型,用不同能量的激光切割了许多种材料,如色丁、绒布、无纺布、冲皮纸、亚克力等。以下将详细介绍激光切割不同材料,并取得实验数据,与理论值比较,以修正推导出的数学模型。

此处需注意获取数据的方式,因为切割材料的厚度对切割深度也有影响,同样的激光能量,同样的切割速度下,材料越厚则切割深度越浅,经分析并多次实验得知,出现此情况的原因主要是激光焦点固定在加工表面,并且以之为中心向上偏移越大则焦点越分散,会导致激光能量越低,从而导致实际误差跳动较大。这就需要在获取数据时,需要一点一点增加切割材料的厚度,以使此误差尽量缩小。

3.2.1 激光切割亚克力板

此实验中使用的是 6 mm 厚的亚克力板(PMMA),密度为 $\rho = 1.18 \text{ g/cm}^3$,比能为 $Q = 1.4 \text{ kJ/g}$ 。分别在 12、24、60 W 三个激光功率下测量切割深度与激光速度之间的关系,反复切割实验材料以得到精准值,得到的实验数据如表 1 所示。

表 1 激光切割亚克力板实验数据

Table 1 Experimental results of cutting PMMA

Power P / W	D / mm					
	$V=6 \text{ mm/s}$	$V=12 \text{ mm/s}$	$V=18 \text{ mm/s}$	$V=24 \text{ mm/s}$	$V=30 \text{ mm/s}$	$V=40 \text{ mm/s}$
12	1.50	0.78	0.53	0.43	0.40	0.385
24	4.15	2.06	1.39	1.24	0.98	0.68
60	8.95	4.91	3.94	2.91	2.51	1.95

以切割速度为 x 轴,以切割深度为 y 轴建立坐标系,则二者关系如图 4 所示。

由图 4 的实验结果可知,切割深度与激光速度并不呈完全的反比关系。当激光速度超过 20 mm/s 时,速度对切割深度的影响变得极小。不过任何情况下只要提高激光能量就可以增大切割深度。在切割过程中,融化或烧焦的材料必须立即移出极窄的切口,否则就会阻挡激光束,使激光能量大幅降低,影响数据的准确性。切口越深,这种阻挡作用就会越明显。同时,不同材料的性质不同那么这种阻挡的影响程度也会不同。

同时,受激光束空间形态与实验条件所限,材料厚度对切割深度的影响不可避免,并且可以确定的是切割越深此参数的影响越大。此误差将在调整数学模型时进行适当修正。

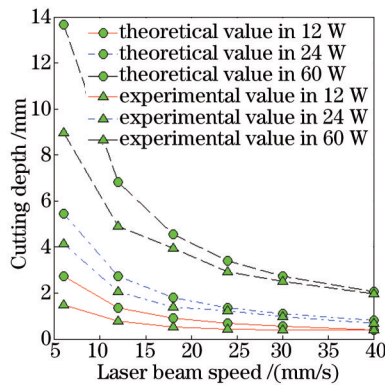


图4 激光切割亚克力板深度理论与实际值对比

Fig.4 Theoretical and experimental results of depth for cutting PMMA

3.2.2 激光切割色丁、卡纸

用相同的处理方法我对其他非金属材料做了更进一步的研究,发现不同的材料的切割深度与激光速度的关系与亚克力板是基本一致的,表2为激光切割色丁的实验数据。

表2 激光切割色丁实验数据

Table 2 Experimental results of cutting satin

Power P /W	D /mm									
	6 mm/s	12 mm/s	18 mm/s	24 mm/s	30 mm/s	60 mm/s	80 mm/s	100 mm/s	120 mm/s	140 mm/s
60	16.2	8.95	7.54	5.4	3.03	1.99	1.24	1.13	1.00	0.84

表3 激光切割卡纸实验数据

Table 3 Experimental results of cutting cardboard

Power P /W	D /mm									
	6 mm/s	12 mm/s	18 mm/s	24 mm/s	30 mm/s	60 mm/s	80 mm/s	100 mm/s	120 mm/s	140 mm/s
60	7.98	5.37	4.44	3.02	2.60	1.50	1.13	0.72	0.69	0.69

表4 激光切割松木实验数据

Table 4 Experimental results of cutting pinewood

Power P /W	D /mm									
	6 mm/s	12 mm/s	18 mm/s	24 mm/s	30 mm/s	60 mm/s	80 mm/s	100 mm/s	120 mm/s	140 mm/s
60	19.56	12.01	8.21	6.84	4.08	2.99	2.33	1.71	1.53	0.95

木料中水的含量会影响激光切割的效果,这里选择干燥的松木作为测试对象,以减少水对测试结果的影响。从图5中可看出当切割速度超过100 mm/s时,切割深度就基本保持不变了。

色丁(Satin)手感柔软光滑,为包装工业常用表层包装材料,由图5可知当激光速度小于20 mm/s时,松木的切割深度是最大的,由于色丁材料较薄,为得出实验结果将多片材料叠在一起进行实验,但这样表层

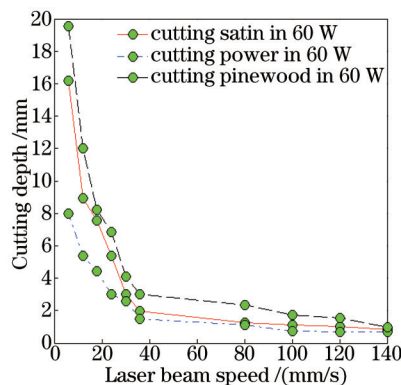


图5 以60 W切割色丁、卡纸、松木的实验结果

Fig.5 Experimental results of cutting satin, cardboard and pinewood

材料被切割后会融化阻塞激光束光路,所以对于厚度较大的材料,需要功率较大的激光器来切割。

4 实验结果的对比与分析

对上面的实验结果分析可知,在激光速度较低时,切割深度的理论与实验结果差距较大,这是因为忽略了一些参数,比如材料的热传导系数、去除的材料对激光束的阻塞效应以及材料的能量吸收率。同时同前面的分析可知,待切割材料的厚度也会使测试结果产生误差,所以接下来会对这些情况分别进行分析,并添加参数进行调整。

对比(14)式及所得的实验结果发现,激光能量对切割深度的影响被高估了。考虑能量损失以及激光阻塞等的影响,同时考虑材料厚度对切割深度的影响,向(14)式中加入两个常参量: a, b, x 用来表示考虑热传导等耗散后能量的使用率,而参数 y 则用来降低激光能量对切割深度的影响。修改后的公式如(15)式所示:

$$D = a \frac{\alpha}{QR\rho\sqrt{\pi}} \left(\frac{P}{V}\right)^b \quad (15)$$

然后再考虑到切割厚度对切割深度的影响,由于切割深度越深影响越大,而越浅则影响越小,所以此处考虑在(15)式分母上增加一厚度系数 c 。这样当以上结果越大,则减小幅度越大,即可以一定程度上减小误差的影响,则(15)式变为

$$D = a \frac{\alpha}{QR\rho c\sqrt{\pi}} \left(\frac{P}{V}\right)^b, \quad (16)$$

式中虽然 a 与 c 同为常量,但二者意义不同,所以不可合并。式中 a 和 b 的值都和材料的特性有关,并且由实验确定,而 c 的值与所切材料厚度有关。一些材料的 a, b 与 c 的值如表4所示。

表4 几种材料的 a, b 和 c 值

Table 4 Values of a and b for several materials

Materials	Density $/(g/cm^3)$	a	b	c
PMMA	1.18	0.415	0.7	1.22
Pinewood	0.524	0.58	0.82	1.22
Satin	0.67	0.59	0.8	1.41
Cardboard	0.9	0.791	0.82	1.31

5 结 论

使用CO₂激光器切割各种包装材料,得出切割深度与激光速度、激光功率之间关系的数学模型,并通过实验进行验证。对比切割结果可以发现,切割深度与激光能量并不呈标准的线性关系,切割越深,需要的能量就越多,在理论模型中加入两个参数后实验结果与理论模型基本符合,一些材料的两个参数也已经测出,此模型现在已可用于实际加工,并为将来的理论分析的发展打下基础。

参 考 文 献

- 1 Coherent Inc. Laser-Operation, Equipment, Application and Design[M]. New York: McGraw-Hill, 1980. 137-196.
- 2 K A Butting, G Cornfield. Towards a general theory of cutting relationship between the incident power density and the cut speed[J]. ASME J Heat Transf, 1975, 97(1):116-122.
- 3 P D Pietro. A numerical investigation into cutting front mobility in CO₂ laser cutting[J]. Int J Mach Tools Manuf, 1995, 35(5): 673-688.
- 4 Wang Kunlin. Mathematical models of laser material processing[J]. Laser Journal, 1996, 17(3): 105-108.
王昆林. 激光材料加工的数学模型[J]. 激光杂志, 1996, 17(3): 105-108.
- 5 Gu Jianhui, Li Zaiguang, Chen Shushu. Study on the interaction and dynamic process of high-power laser beams with material[J]. Laser Journal, 1992, 13(2): 57-61.
辜建辉, 李再光, 陈殊殊. 高能激光与材料相互作用及其动力学过程研究[J]. 激光杂志, 1992, 13(2): 57-61.
- 6 Zhang Yingcong, Shen Hua, Zhu Rihong. Three-dimensional temperature field of material irradiated by continuous wave laser[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(8): 0806002.

- 张英聪, 沈 华, 朱日宏. 连续激光辐照材料的三维温度场[J]. 中国激光, 2013, 40(8): 0806002.
- 7 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实验对比[J]. 中国激光, 2012, 39(1): 0103004.
- 8 Gao Shiyu, Ma Lei, Zhang Runsheng. Method of monitoring cutting point state in laser cutting plank process based on vision[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(2): 0203007.
- 高士友, 马 雷, 张润生. 基于视觉激光切割厚板切割状态监控方法[J]. 中国激光, 2012, 39(2): 0203007.
- 9 Wang Xinggang, Zhou Ming, Di Jianke, *et al.*. Numerical simulation and experiment of CO₂ laser cutting electronic strengthened glass[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(9): 091402.
- 王星罡, 周 明, 狄建科, 等. CO₂激光切割电子强化玻璃过程的有限元模拟与实验[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(9): 091402.