

文章编号: 1001-3806(2002)05-0330-04

## 水松纸激光打孔技术研究

韩要轩 陈培锋 周卓尤 陈泽民 张向明 邓国华  
(华中科技大学激光工程研究院, 武汉, 430074)

摘要: 讨论了用连续 CO<sub>2</sub> 激光器对水松纸打孔的原理和实现方案, 就其中一种方案的打孔结果进行分析, 指出激光打孔时影响打孔水松纸透气度的一些因素。

关键词: 打孔; 水松纸; 透气度

中图分类号: TG665 文献标识码: A

### Laser perforating technology of tipping paper

Han Yaouxuan, Chen Peifeng, Zhou Zhuoyou, Chen Zemin, Zhang Xiangming, Deng Guohua  
(Institute of Laser Technology Engineering, HUST, Wuhan, 430074)

**Abstract:** The principle and implements of laser perforating tipping paper technology were discussed in this paper. The results of perforating tipping paper with one of the implements are presented. The factors that influence the permeability of the perforated tipping paper are discussed.

**Key words:** perforating; tipping paper; permeability

### 引 言

吸烟有害健康已被世人公认。烟草中危害人们健康的成分主要是其中的有害物质如焦油、尼古丁和 CO 等。如能有效降低吸烟时有害物质的摄入量, 就能大大减轻烟草对人体的危害。在减轻吸烟对人体的危害方面, 烟草行业投入了大量人力物力进行深入研究, 水松纸打孔技术正是这方面的重要研究成果。

水松纸打孔技术源于滤嘴通风技术, 其原理是通过在水松纸上打孔、使用高透气度滤棒成型纸或在滤棒上制成凹槽等方式, 从而在抽吸卷烟时使外部空气进入滤嘴内并对主流烟气进行稀释, 使吸入人体的焦油量相对减少。有研究表明, 通过空气稀释作用可减少有害物质如焦油、尼古丁、CO 等的摄入量。

目前, 开发和利用的水松纸打孔方式主要有机械打孔、静电打孔、激光打孔 3 种, 而其中激光打孔由于质量上具有稳定性和准确性高的特点, 成为目前国际上广泛采用的方式。

### 1 激光打孔工作原理

当激光入射到材料表面时, 激光能量被激光照射区域的材料表面吸收, 并瞬时转换为热能, 使表面温度升高直至材料表面熔化和汽化。激光作用于材料表面的热转换主要是通过 3 种途径进行, 即电子热传导、声子热传导和辐射热传导。材料在激光作用下的传热遵守热力学基本规律, 包含传导、对流、辐射 3 种传热形式。当忽略对流和辐射损耗时, 入射激光能量对材料的作用分为对材料的整体加热和使材料蒸发两种情况。当激光用于打孔且入射激光功率密度相当低时, 需要较长的辐照时间, 这时入射能量的一部分要用来加热整体材料; 当采用短脉冲高功率密度激光打孔时, 大部分能量使材料蒸发, 用于打孔。

在用高功率密度、窄脉冲激光打孔时, 假设激光束为不随时间变化的均匀圆形面热源, 照射半无穷大物体, 则在物体表面产生的温度  $T_0$  为<sup>[1,2]</sup>:

$$T_0 = 2P_0 \varepsilon(kt)^{1/2} / (\pi^{3/2} a^2 K) \quad (1)$$

式中,  $P_0$  为表面吸收的激光辐射功率 (W),  $k$  为材料热扩散率 ( $\text{cm}^2/\text{s}$ ),  $K$  为材料热导率 ( $\text{W}/\text{cm} \cdot ^\circ\text{C}$ ),  $a$  为表面光斑的半径,  $t$  为激光脉冲的持续时间。

对发散角为  $\theta_0$  的单模高斯光束, 经过一个焦距

作者简介: 韩要轩, 男, 1979 年出生。硕士研究生。从事激光应用方面的研究。

收稿日期: 2001-08-30; 收到修改稿日期: 2001-09-25

为  $f$  的透镜后, 其焦斑半径  $a$  为:  $a = f \cdot \theta_0$  (2)

代入(1)式得:  $T_0 = \frac{2P_0 \epsilon (kt)^{1/2}}{\pi^{3/2} (f\theta_0)^2 K}$  (3)

从(3)式可以得出, 对一定材料, 为了达到材料蒸发汽化温度, 必须提高激光辐射功率密度。而从(2)式可知, 加工的孔径与激光束的发散角  $\theta_0$  及透镜的焦距有关。

### 2 实现方案

水松纸激光打孔技术的实现主要包括光路变换系统实现和控制系统实现两部分。

#### 2.1 光路变换系统

激光打孔水松纸的速度可以达到每秒钟数万个孔或更多, 而现有的脉冲激光器调制频率还不能达到如此之高, 故目前用于打孔的激光器一般仍采用连续 CO<sub>2</sub> 激光器。光路变换系统的基本任务就是将连续激光器发出的连续波激光束变换为脉冲激光序列。

光路变换系统按其实现的不同方案可分为两种: 通过机械斩光盘斩光变换和通过多棱镜扫描变换。

2.1.1 通过机械斩光盘斩光变换 该方案的基本思路是将高功率连续激光器发出的连续波激光束用高速旋转的机械斩光盘斩光, 变换成为高功率脉冲激光序列, 然后用半透半反透镜组进行光学分光, 将高功率脉冲激光序列分成等幅度的多路小脉冲激光序列, 最终用这多路小脉冲激光打孔。其工作原理简图如图 1 所示。

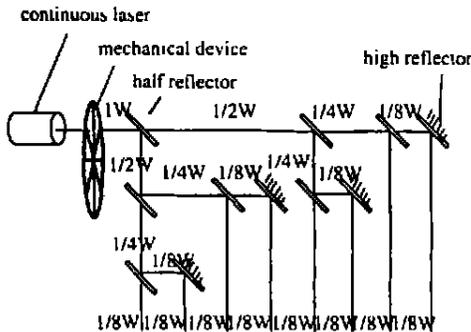


Fig. 1 Schematic diagram of using mechanical device to transform continuous laser beam to pulse laser

2.1.2 通过多棱镜扫描变换 该方案的基本思路是采用高速旋转的多棱镜, 将较低功率连续激光器的输出光束依次重复扫入数个独立的光学系统(如聚焦头)。连续激光束每次扫入聚焦头就在这个光学系统中形成一个小激光脉冲, 重复扫入就在每一个光学聚焦头中独立的形成了一系列小激光脉冲,

这一系列小激光脉冲用于打孔。工作原理简图如图 2 所示。

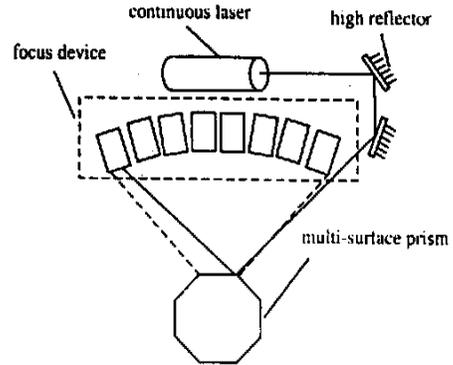


Fig. 2 Schematic diagram of using multi-surface prism to transform continuous laser beam to pulse laser beam

显然, 第 1 种光路变换系统中由于机械斩光盘的挡光部分挡住了大量的激光功率, 而这些功率并不能用于打孔, 所以造成很大的浪费, 从而需要更高功率的激光器。而在第 2 种方案中激光功率的绝大部分得到了很好的利用, 因此, 可以采用较低功率的激光器。一般倾向于使用第 2 种光路变换系统。

#### 2.2 控制系统

水松纸激光打孔技术的控制系统的实现应该保证整个打孔机能够良好运转, 具体地说, 应该具有激光器控制、走纸线速度控制、断纸自动停机、故障自诊断等功能。其基本工作原理框图如图 3 示。工作

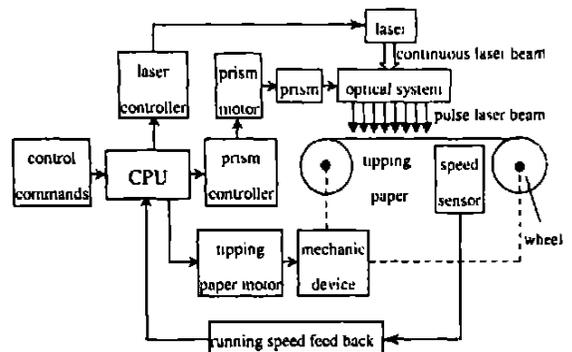


Fig. 3 Schematic diagram of control system

过程为: 控制指令通过 I/O 接口输入中央控制单元, 中央控制单元将接收到的控制指令经过运算, 产生 3 路控制信号: 一路送给激光控制器, 并通过激光控制器控制激光器的工作状态, 包括激光器的启动与停止、输出激光功率大小等; 一路送给多棱镜控制电路, 由多棱镜控制电路产生相应的棱镜电机控制信号, 以控制多棱镜的旋转速度, 从而改变最后用于打孔的脉冲激光序列的频率; 第 3 路控制信号交给走纸电机, 通过机械传动装置控制水松纸走纸线速

度,速度传感器将水松纸走纸线速度反馈回中央控制单元,中央控制单元根据反馈信号调节走纸电机的转速,从而使水松纸走纸线速度相对稳定,保证了打孔后水松纸透气度的一致性。通过调节激光器输出功率、多棱镜的转速和水松纸的走纸线速度,就可以打出具有不同透气度的水松纸。

### 3 实验结果及分析

实验采用上面所述的第2种光学变换系统即多棱镜扫描变换系统,分光8路;控制部分采用上面所述的控制系统;激光器采用额定输出功率为100W的CO<sub>2</sub>激光器。

打孔对象为普通香烟过滤嘴包装用水松纸,该水松纸在未打孔时透气度为5.5C。

水松纸被打孔后,随机取其中一段作为样品。对每一个样品,取其中5个不同部位分别测量透气度。表1列出了每一样品测量结果的平均值。

从表1中的数据可以看出,对于目前大部分的实用透气度要求来说,设定系统的走纸线速度在120m/min和180m/min之间,已经可以满足实际应用要求了。

Table 1 Permeability of perforated tipping paper at different running speed when the multi-surface prism rotates at a settled speed

TPRS /(m·min <sup>-1</sup> )	permeability lity/C	C. OF. V /%	TPRS /(m·min <sup>-1</sup> )	permeability lity/C	C. OF. V /%
50	723.48	2.18	130	284.76	3.04
60	619.64	0.66	140	263.6	4.78
70	526.74	2.84	150	240.56	3.09
80	450.96	1.27	160	220.2	2.07
90	405.94	1.55	170	216.08	1.67
100	375.8	1.71	180	201.62	2.27
110	334.52	1.24	190	190.96	5.20
120	303.96	2.03	200	176.64	4.52

note 1: TPRS- tipping paper running speed

note 2: The permeability data in table 1 is the mean of 5 data measured at different area of a same sample

#### 3.1 水松纸走纸线速度对打孔结果的影响

水松纸走纸线速度是影响打孔结果的重要因素。为保证打孔后水松纸透气度的一致性,必须保证水松纸走纸线速度稳定。实验装置采用编码器进行线速度反馈,使水松纸走纸线速度不稳定性小于1%。从表1可以看出,在多棱镜转速稳定不变的情况下,打孔水松纸样品透气度随走纸线速度增加而减小,但不成线性关系。经分析,其原因为:当激光器功率不变和多棱镜转速不变时,CO<sub>2</sub>激光器发出

的连续激光束经多棱镜扫描分光后形成的各路脉冲激光序列频率稳定不变,各激光脉冲的占空比保持恒定,从而每一个激光脉冲作用于水松纸上的时间相同。作用于水松纸上的激光脉冲能量可分为两部分,其中一部分用于使激光聚焦光斑处的水松纸蒸发,另一部分通过热传导作用向水松纸四周传播,用于打孔的激光能量主要集中在第一部分。当水松纸走纸线速度加快,一方面,在相同的激光脉冲作用时间内,水松纸上被激光聚焦光斑作用的区域加大,打孔后所得孔径相应增加;另一方面,由于水松纸走纸线速度的加快,相邻孔的间距增加,单位面积水松纸内打孔的密度相对降低。两者共同作用的结果是单位面积内水松纸总的打孔面积减小,从而打孔水松纸的透气度减小。水松纸走纸线速度降低时所得结果和以上讨论相反。

#### 3.2 多棱镜转速对打孔结果的影响

当走纸线速度固定不变时,由于多棱镜转速不同对打孔结果的影响相当复杂。分析如下:在激光器功率恒定情况下,多棱镜转速改变,CO<sub>2</sub>激光器发出的连续激光束经多棱镜扫描分光后形成的各路脉冲激光序列频率相应变化,各激光脉冲的占空比发生变化,从而每一个激光脉冲作用于水松纸上的时间与多棱镜转速变化前不同。具体的说,当多棱镜转速升高时,各激光脉冲作用于水松纸上的时间减小;当多棱镜转速降低时,各激光脉冲作用于水松纸上的时间增加。在相同的走纸线速度下,激光脉冲作用的时间越长,则在水松纸上由于蒸发作用打出的孔越大;反之打出的孔越小。另外,在相同走纸线速度下,多棱镜的转速对水松纸上打孔的孔间距也有重要影响。随多棱镜转速升高,水松纸上相邻孔的间距减小;多棱镜转速降低,相邻孔间距增加。两者共同作用造成单位面积水松纸内总的打孔面积变化,从而打孔所得样品透气度变化。

#### 3.3 激光器输出功率波动对打孔结果的影响

激光器输出激光功率的不稳定对打孔结果也有不可忽略的影响。实验所用激光器为射频激励CO<sub>2</sub>激光器,功率不稳定性小于±5%。表2是在长度为0.5m的打孔水松纸样品上每间隔6cm测量所得的透气度数据。

由表2可以看出,即使是相隔很近一段距离,测量所得的透气度数据也有明显不同,最大透气度值和最小透气度值相差达39.2C之多;对同一段样品。这么短距离内的透气度波动,和激光器功率的不稳定是有密切关系的。

Table 2 Permeability of a sample at different area

measuring points	1	2	3	4	5	max	min	mean	S. D	C. OF. V
permeability/ C	655. 6	688. 6	652. 5	691. 7	664. 8	691. 7	652. 5	670. 64	16. 465	2. 46%

### 3.4 聚焦透镜焦距及激光束聚焦后焦点位置的影响

聚焦透镜焦距对打孔水松纸透气度的影响主要通过影响投射到水松纸上的激光焦斑大小来影响打孔结果。在激光束发散角一定的情况下, 聚焦透镜焦距越大, 聚焦后的焦斑半径越大, 投射到水松纸上后打孔半径越大, 从而打孔后水松纸透气度越大。当聚焦透镜焦距确定后, 聚焦焦点位置对打孔结果也有较大影响。离焦量不同, 作用于水松纸上的光斑大小不同, 打出的孔孔径不同, 从而打孔水松纸的透气度不同。由于实验装置中聚焦透镜已经选定, 聚焦透镜和水松纸的相对位置固定, 这里不再列举数据来进行说明。

除了以上讨论的各种影响因素外, 还有其它的因素, 如电源波动, 透镜污染等, 这些因素对打孔结果的影响相对较弱, 这里就不一一讨论。

### 4 激光打孔水松纸技术的特点

除了激光打孔技术外, 目前, 市场上存在的对水松纸打孔的技术还有静电打孔、机械打孔等, 和这些技术相比, 激光打孔水松纸具有其它工艺打孔水松纸无法比拟的优点, 主要表现在: (1) 打孔过程产生纸屑被汽化, 孔眼非常清洁和规范, 而且不会产生任

何异味; 而静电打孔会发生焦化现象, 难免会有焦味; 采用机械打孔对水松纸(对基纸)采用原料配比和涂料有更苛刻的要求, 激光打孔技术则没有很严格要求; (2) 透气度和孔眼密度范围比静电打孔、机械打孔范围大得多, 可以满足不同客户最大需求; (3) 在低透气情况下, 所打孔眼几乎不为肉眼所见; (4) 透气度偏差系数极低, 最大公差低于 5%, 而机械、静电打孔工艺偏差则要大得多; (5) 较窄孔带能减少粘合剂渗漏, 使卷烟机运作更为顺畅; (6) 与其它打孔方式相比, 盘纸接头大为减少, 也给生产带来便利。

### 5 结 论

水松纸激光打孔技术是一种先进、可靠的技术, 是生产优质稳定打孔水松纸的有力保证, 激光打孔水松纸的优点决定了其有良好的发展前景, 势必要代替其它打孔方法, 成为水松纸打孔技术的主流发展方向。

#### 参 考 文 献

- [1] 郑启光, 辜建辉. 激光与物质相互作用. 武汉: 华中理工大学出版社, 1996.
- [2] 水金城, 陈武军. 应用激光, 1994, 6(3): 124~ 126.
- [3] 陈可心, 廖健宏, 陈 强 *et al.* 应用激光, 1995, 2(1): 36~ 38.

(上接第 323 页)

热基体材料的能量减小<sup>[7]</sup>。表现在熔覆层的厚度增加, 宽度变窄, 接触角变大, 基体熔化量减小。同理, 扫描速度也同样存在着临界值。超过该临界值, 则不能形成成型性良好的熔覆层。

### 5 结 论

(1) 在激光参数和扫描速度一定的条件下, 单位质量熔覆材料的比能随送粉速率的增加而减小, 其减小的程度随着扫描速度的增加而更加明显; 当超过一定的扫描速度( $v_s = 8.33\text{mm/s}$ ), 单位质量熔覆材料的比能反而上升。

(2) 当送粉速率和激光参数一定的条件下, 实际输入比能随扫描速度的增加而减小, 其减小的程度

随送粉速率的增加而增大。

(3) 单位质量熔覆材料的比能和单位时间实际输入比能随工艺参数的变化规律为进一步解释熔覆层质量随工艺参数的变化奠定了理论基础。

#### 参 考 文 献

- [1] Pelletier J M, Sahour M C. J Mater Sci, 1993, 28: 5184~ 5188.
- [2] 李 强, 欧阳加虎, 雷廷权. 材料科学与工艺, 1996, 4(4): 22~ 36.
- [3] Zeng X Y, Tao Z Y, Zhu B D. Elsevier Surface and Coatings Technology, 1996, 79(2): 209~ 217.
- [4] 张庆茂, 刘喜明, 关振中. 应用激光, 2000, 20(5): 209~ 212.
- [5] 刘喜明, 关振中. 中国激光, 1999, A26(5): 470~ 476.
- [6] 张庆茂, 刘喜明, 关振中. 金属热处理, 2000, 8: 1~ 3.
- [7] Lim L C, Ming Q, Chen Z D. Elsevier Surface and Coatings Technology, 1998, 106(6): 183~ 192.