

文章编号 1000-5013(2001)03-0292-06

LOM 中激光功率与扫描速度的匹配模型

唐明胜^① 曾颖^② 顾永华^① 江开勇^①

(^① 华侨大学机电工程系, ^② 华侨大学材料科学与工程学院, 泉州 362011)

摘要 经分析与实验,认为扫描速度与激光功率是影响原型成形质量的关键因素.从能量守恒原理出发,结合LOM原型制造工艺的具体要求,建立扫描速度与激光功率之间的正比模型.采用跟踪耦合式控制系统可以实现两者的良好匹配,并能保证LOM原型的成形质量.同时讨论跟踪耦合控制系统的适用性,它不仅适用于LOM原型制造工艺,还适用于FDM、SLS、SLA等多种快速原型制造工艺.

关键词 快速成形,激光叠层制造,激光功率,扫描速度,跟踪耦合

中图分类号 TF 124.36; TN 249

文献标识码 A

快速原型制造(Rapid Prototyping Manufacturing,简称RPM或RP)技术,是80年代末首先在美国出现的一种先进制造技术^[1].其成形速度之快,是该技术的突出优点.同时,它能大大缩短产品开发周期,降低开发成本.其中,激光叠层制造(Laminated Object Manufacturing,简称LOM)以成形速度快、原材料成本低、制件精度高等优点备受关注.近年来,它得到飞速发展,并在众多领域得到了应用.但与传统成形方法相比,LOM原型在成形质量上还存在较大差距,这是目前人们较为关心的问题.LOM原型的成形质量是多种因素共同作用的结果,对此文献^[1]已有论述.由RP技术的原理可知这些因素来源于两方面.一是来自CAD造型、STL文件的生成等上游软件方面,二是来自下游的工艺控制方面.在上游既定的情况下,对下游成形过程的优化就显得尤其重要,而建立一个具有理论指导意义和实用价值的过程控制模型是其中的关键一环.

1 影响因素分析

几何结构上,快速原型由一层一层有厚度的二维平面片(为方便起见,下文将之称为基元体)构成.由此可见,原型的成形质量由基元体的质量及其相互之间的连接关系决定.由于基元体之间的连接关系在不同的工艺中涉及到不同的物理作用(如LOM工艺中熔胶的粘结作用,FDM工艺中成型材料的扩散作用等),情况较为复杂,本文对此不作研究.成形工艺上,在去除成形(如切削、磨削)和受迫成形(如铸造、锻压)中,能量是被动供给的,一般无需对加工能量进行精确的预测与控制.在离散/堆积成形中,RP技术不使用一般意义上的模具或刀具,

而是利用光、热、电等物理手段实现材料的转移与堆积, 所以待成形件受到的约束较少. 因此, 为保证成形轮廓的正确性, 应对成形过程加强约束. 也就是说, 需要对成形中的能量进行精确预测和有效控制.

在 LOM 原型制造中, 激光头在水平面内的扫描运动是由 x, y 两轴的联动完成的. 激光头能以同一速度连续扫描的条件, 是该段轮廓为连续的. 但目前大多数快速成形系统都采用 STL 格式的文件为数据输入源, 其基元体的轮廓是由分段的折线段围成的; 即使经过光滑合并处理后, 也存在分段现象, 其轮廓不是连续的. 由此, 在成形基元体时, 激光头存在多次启停现象. 在开始切割每一条连续的曲线段(包括折线段)时, 激光头开始启动、加速最后达到匀速; 而在要切割完毕时, 扫描速度则存在相反的变化过程. 从恒定的扫描速度开始, 经过减速最后变为零. 即在切割每一条连续的曲线段时, 都存在过渡现象. 当连续曲线(包括折线段)的长度很短时, 则过渡现象在切割过程中所占的比例将很大. 当扫描速度变化时, 如果激光器输出功率不变, 则会出现下面两种非期望现象. (1) 当扫描速度变小时, 激光头在特定距离内的停留时间延长, 激光器输出能量增加, 从而成形纸吸收能量增加. 尽管成形纸的热导率较低, 但辅助燃烧作用仍会扩大激光热影响区而使切口宽度变宽, 降低原型的尺寸精度. 同时, 通过切口泄漏的激光束切割已成形的下层, 降低原型的表面质量, 也浪费了激光. (2) 当扫描速度变大时, 激光头在特定距离内的停留时间缩短, 激光器输出能量不足以将非零件部分与零件部分切离开, 也不足以切碎非零件部分. 这不利于切割完毕后废料的去除. 这就说明, 在 LOM 原型制造中, 激光功率与扫描速度的匹配至关重要.

2 数学建模

2.1 模型提出

评价原型质量好坏的主要指标有机械强度、轮廓尺寸精度以及表面质量等. 机械强度主要由材料本身的强度和 LOM 原型层间粘结强度表征, 而层间粘结强度除了受温度和压力影响外, 还受成形纸和热熔胶热学性质的影响, 情况较为复杂. 本文对此不作探讨. 切口宽度的变化会影响原型尺寸精度, 切割深度的变化会影响原型表面质量, 故可由之表征后两个指标. 于是, 本文拟建立的匹配模型为

$$f(H, W, v, p) = 0, \quad (1)$$

式中 H 为切割深度, W 为切口宽度, v 为扫描速度, p 为激光功率.

2.2 模型推导

激光切割运动中, 设激光头扫描无限小距离 dl 需要时间 dt . 由微元法知, 在无限小时时段 dt 内可认为扫描速度 v 不变, 则在 dt 内激光器输出能量为

$$E_o = p dt = p \frac{dl}{v}. \quad (2)$$

考虑到激光束在外光路系统传播中的能量损失, 可定义传播效率为

$$\eta = \frac{E_i}{E_o}, \quad (3)$$

式中 E_i 为入射到成形纸上的激光能量. LOM 原型制造中, 多采用 $10.6 \mu\text{m}$ CO_2 红外波激光器, 成形材料是单面涂有热熔胶的特制纸. 而非金属材料是 CO_2 红外波的良好吸收体, 其热

导率小,热量的传导损失很小,几乎能吸收全部入射光束的能量^[6].对于一定的外光路系统,可将传播效率当作常数.因此,成形纸吸收的能量等于入射到其上的能量,故有

$$E_a = E_i \quad (4)$$

成立. LOM 工艺中,可假设成形纸各处物理化学性质一致,则在即光头运动无限小距离 dl 内,切除成形纸所需能量为

$$E_n = Qsdl, \quad (5)$$

式中 Q 为去除单位体积的成形纸所需要的能量, s 为切槽横截面面积. 由能量守恒定律有

$$E_a = E_n \quad (6)$$

成立. 联立以上各式,得

$$p = \frac{Qsv}{\eta}. \quad (7)$$

激光切割加工中,激光束经过聚焦透镜后并非理想的几何点,而是汇聚为一定尺寸的圆形光斑. 光斑大小对制件轮廓的尺寸精度有很大影响. 为提高制件轮廓尺寸精度,

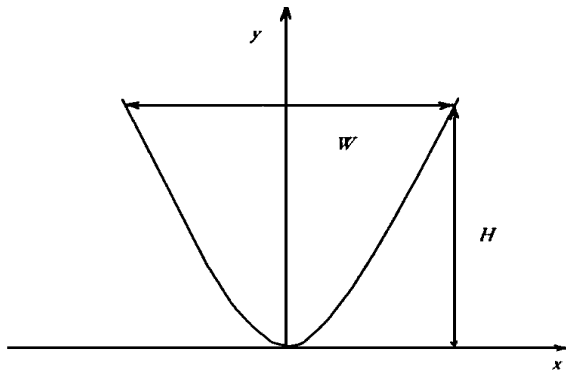


图1 切槽横截面形状

度,要求光斑越小越好. 因此,通常要求激光器的工作模式为基模输出或接近基模输出. 对于基模 TEM_{00} 模,聚焦透镜几乎能把激光光斑聚焦到理论上的最小尺寸,这是 LOM 原型制造工艺中最有利于成形的激光束模式. 这种情况下,激光能量在光斑内呈高斯分布,在去除成形纸处切槽横截面临界点构成抛物线形.^[8] 其开口宽度即切口宽度 W , 顶点为切槽底部端点,顶点距开口的距离即切割深度 H ,如图1所示. 由此解得抛物线方程为

$$y = \frac{4H}{W^2}x^2 \quad (8)$$

所以,切槽横截面面积为

$$s = \frac{2}{3}WH. \quad (9)$$

将式(9)代入式(7),得

$$p = \frac{2WHQ}{3\eta}v. \quad (10)$$

3 模型讨论

3.1 切口宽度

为保证 LOM 原型的尺寸精度,要求切口宽度 W 尽量小且恒定. 激光切割中,切口宽度受激光光斑的大小、材料的厚度以及材料的物理化学性质等因素的影响. 激光光斑可以通过选择合适的激光束模式、合理的外光路系统以及良好的聚焦透镜控制为常数,在一次 LOM 工艺中,成形纸厚度几乎恒定,不会对切口宽度产生影响. 同时,由于 LOM 工艺中激光头的扫描速度很高,高者可达 $600 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$,相当于一般加工机术的空载速度^[6]. 并且,成形纸热导

率低, 不易将吸收的热量向激光热影响区外传播, 所以激光热影响区很小. 在扫描速度较高的情况下, 尽管扫描速度在相当的一个区间里有所变化, 但切口宽度 W 基本恒定^[6]. 由此可见, LOM 快速原型制造中只需满足上术条件就可控制切口宽度 W 为常数, 并不需要工艺中扫描速度和激光功率的匹配.

3.2 切割深度

LOM 原型制造中, 为了不造成过切割或者不完全切割, 对切割深度 H 最理想的要求是让其等于成形纸的厚度. 实际成形中, 成形纸的厚度并非完全均匀, 所以切割深度 H 应当随成形纸厚度的变化而变化. 这要求在激光切割中对成形纸厚度进行实时测量, 并以该测量值为反馈量来控制扫描速度和激光功率. 但切割深度 H 是激光束与材料在某段时间内相互作用的结果, 激光功率的波动、材料热学性能的变化等都可能導致切割深度 H 的变化, 不可能预先精确地确定^[6]. 成形纸的厚度在 $0.10 \sim 0.13 \text{ mm}$ ^[7]之间, 其变化范围在目前的快速成形系统所能达到的精度允许范围之内. 因此, 对成形纸厚度进行实时测量是不现实的而且是不必要的. 基于此, 本文也不考虑成形纸厚度的变化, 而将其当作常数. 由此可知, 扫描速度与激光功率的匹配关系应当满足的条件, 是切割深度 H 为常数. 已知切除单位体积的成形纸所需要的能量 Q 和成形工艺中切口宽度 W 都是常数, 故只需令激光功率 p 与扫描速度 v 的比值 $\frac{p}{v} = \frac{2WHQ}{3\eta}$ 为常数, 就可保证切割深度 H 为常数. 与切口宽度 W 为常数的条件不同, 切割深度 H 为常数的实现有赖于成形中扫描速度与激光功率的匹配.

3.3 激光功率与扫描速度的匹配

由前述得到该匹配模型在 LOM 原型快速制造工艺中的应用. 有

$$\left. \begin{aligned} p &= Kv, \\ K &= \frac{2WHQ}{3\eta}. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

上式说明, 只要始终保证激光功率与扫描速度之间成正比关系就可保证 LOM 原型的良好切割, 比例系数 K 需要通过实验确定. 但实际上由于激光器的输出功率具有一定的范围, 而由该模型也就限制了正常切割时扫描速度的上下限, 只有在该上下限确定的范围内设定扫描速度才能满足 LOM 工艺的要求. 考虑到步进电机的工作特性, 扫描速度不能太小. 因为此时控制 x, y 轴的步进电机会出现丢步现象, 同时也不符合“快速原型制造”的原意. 并且由前述已知, 只有在扫描速度较高的情况下才能保证切口宽度为常数, 所以成形时扫描速度不能太低. 相反, 为提高成形效率, 应当在限定范围内将扫描速度尽量设高一些.

4 控制系统设计

4.1 跟踪耦合控制系统

只要保证扫描速度 v 和激光功率 p 的前级控制信号始终保持比例关系, 就可以保证两单元物理量输出始终成正比关系. 实现上述目的最简单的方法, 是将同一控制信号输入放大倍数之比为 K (K 也称为跟踪耦合系数) 的两个比例运算放大器进行处理, 让其输出信号分别控制扫描速度和激光功率的输出. 在这种耦合方式中, 由于跟踪耦合系数 K 固定不变, 所以可

认为一个单元的控制量完全取决于另一个单元的控制量,彼此之间形成一种主从式跟踪耦合关系,称为跟踪耦合.该控制系统最大的优点是对上位机来讲,对两个跟踪耦合单元的控制仅相当于对一个单元进行控制,控制比较简单.控制方框图如图2所示,图中两单元的控制信号的跟踪耦合系数为

$$K = \frac{K_p}{K_v} = \frac{2WHQ}{3\eta}. \quad (11)$$

4.2 跟踪耦合控制系统的限制

控制信号成比例,只是保证了扫描速度 v 和激光功率 p 成比例.但由于满足一定要求的激光束模式的建立需要一定的时间,其输出存在滞后现象,而扫描速度的输出几乎是瞬间完成的,所以跟踪耦合控制系统不能保证两单元的输出同步.当扫描速度不是太高时,激光功率对扫描速度的滞后不明显;当扫描速度提高到一定程度(如 $300 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上)时,滞后现象变得明显起来,激光功率与扫描速度的输出不再同步,增大了成形误差.因此,在对扫描速度要求很高的场合,不能将激光功率与扫描速度设计成主从式跟踪耦合控制系统.

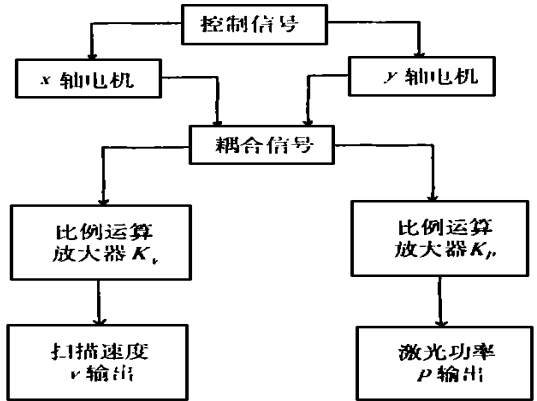


图2 扫描速度与激光功率匹配控制方框图

5 实验验证

5.1 定性试验

在固定激光功率的情况下,当提高扫描速度时发现,尽管成形纸很薄,也存在切不透的现象.当扫描速度很高时,激光束只是在成形纸上划下了有碳化现象的痕迹,而成形纸仍旧牢固的连接在一起,不能从划痕处将其分开,而且切口宽度明显变窄.当降低扫描速度时,情况正好相反,成形纸有燃烧现象,切口宽度明显变宽.在固定扫描速度时,改变激光功率,可以发现与上述变化现象正好相反的情况.这说明对切口宽度 W 和切割深度 H 的影响,激光功率 p 和扫描速度 v 是一对相反的因素,这在定性上与本模型是一致的.

5.2 定量试验

由于定量实验涉及到各参数的精确测定,这些将在以后的文章中谈到.图3^[6]是低碳钢激光切割中扫描速度受板厚和激光功率变化影响的典型曲线,切割(速度为 v)时选择的是 TEM_{00} 模激光束.图中的3条曲线,表示切割材料厚度(以 h 表示)的不同.图示表明,对于厚度确定的材料,激光的扫描速度与激光器输出功率成严格的正比关系,这在定量上验证了本模型.

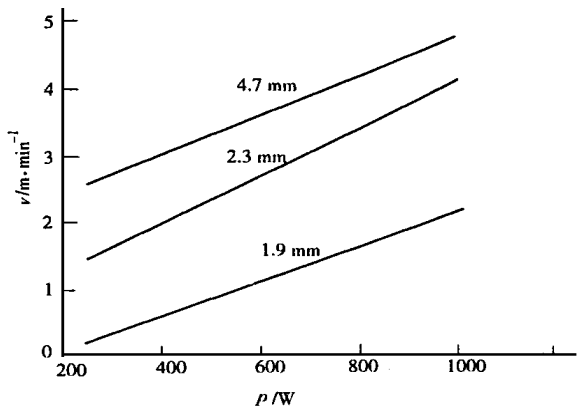


图3 低碳钢切速功率关系

6 结束语

尽管该正比匹配模型是从特定的工艺(LOM 工艺)中推导出来的,但其适用范围不限于 LOM 工艺,同时适用于其它多种快速成形工艺,例如 FDM, SLS, SLA 等. 而且在普通的激光切割中,对切口宽度和切割深度的要求与 LOM 原型制造中是一致的. 所以,该正比模型也适用于其它的激光切割. 不同之处在于同的工艺有不同的比例系数 K .

参 考 文 献

- 1 颜永年, 张人佶, 芦清萍等. 基于 RP 的早期多回路把反馈模具快速制造系统[J]. 中国机械工程, 1999, 9(10): 994 ~ 997
- 2 黄旗明, 王运赣. 快速成形 LOM 精度控制研究[J]. 机械与电子, 1998, (3): 34 ~ 35
- 3 王家金. 激光加工技术[M]. 北京: 中国计量出版社, 1992. 461 ~ 466, 468 ~ 469, 479 ~ 480
- 4 陈剑虹, 朱东波, 马 雷等. 光固化快速成形技术中的紫外光源[J]. 激光杂志, 1999, 6(20):
- 5 刘爱林, 肖跃加, 韩 明. 快速制造系统的轮廓精度控制[J]. 华中理工大学学报, 1998, 11(26): 41 ~ 42
- 6 殷苏民, 唐通明, 胡昌龄等. 激光加工中闭环控制技术的发展动态[J]. 激光技术, 1999, 5(23): 320 ~ 323
- 7 李 焰, 黄 瑾, 张祥林等. 物体分层制造中所用纸材的研究[J]. 华中理工大学学报, 1998, 5(26): 42 ~ 44

Matching Model of Laser Power and Scan Speed in Laminated Object Manufacturing

Tang Mingsheng^① Zeng Ying^②

Gu Yonghua^① Jiang Kaiyong^①

(^① Dept. of Electromech. Eng., Huaqiao Univ.,

^② College of Mater. Sci. & Eng., Huaqiao Univ., 362011, Quanzhou)

Abstract Through theoretical analysis and experimental study, the authors believe that sweep speed and laser power are two critical factors influencing quality of prototype shaping in laminated object manufacturing (LOM). Starting from principle of conservation of energy, a proportional model of sweep speed and laser power is set up by combining with the specific demand of LOM prototype manufacturing technology. Good match of them can be realized by adopting control system of tracking and coupling type; and quality of shaping of LOM prototype can be determined. A discussion on the usability of control system of tracking and coupling type is made simultaneously. It is not only suitable for the manufacturing technology of LOM prototype but also suitable for multiple technologies of rapid prototyping manufacturing such as FDM, SLS, SLA, etc.

Keywords rapid shaping, laminated object manufacturing, laser power, sweep speed, tracking and coupling