
文章编号 1004-924X(2008)10-1922-06

发动机连杆裂解槽激光加工机床的加减速控制

林宝君, 杨慎华, 郑祺峰, 寇淑清

(吉林大学 锻锻研究所, 吉林 长春 130025)

摘要:提出了一种对激光机床的加减速进行预处理的方法,并将处理的结果与程序相结合,编制出新的 NC 加工程序。对激光切槽后得到的连杆进行裂解,并用工具显微镜检测。检测结果表明,对于各种型号的连杆,切割出来的裂解槽在深度上基本保持一致(裂解槽上各个点的槽深度公差为 ± 0.02 mm),完全没有过切及残留,说明该方法的使用大大提高了该连杆裂解槽激光加工机床的稳定性及精度。

关键词:激光加工机床;连杆;裂解槽;加减速;速度预处理

中图分类号:TG665 **文献标识码:**A

Acceleration and deceleration controls of laser processing machine for connecting rod fracture splitting notch in engine

LIN Bao-jun, YANG Shen-hua, ZHENG Qi-feng, KOU Shu-qing

(Roll Forging Institute, Jilin University, Changchun 130025, China)

Abstract: The laser processing machine is used to cut the notch of big-end hole of connecting rod in engine at high speed. In this paper, a preprocessing method was proposed to study the acceleration and deceleration for a laser notching machine. In order to eliminate the overcut as well as the remains because of the importing M function, a look-ahead means was put forward to deal with the acceleration/ deceleration of this laser notching machine. Then, a new NC processing program combining the result from the former program was presented. Finally, the connecting rod was splitted after laser cutting notch. By checking over the connecting rod in a microscope, the results show that the splitting notch is almost the same in the depths (the depth tolerances of all points are ± 0.02 mm) for all types of connecting rods. Moreover, there are no overcut or remains at all. These conclusions illustrate that this means greatly improves the stability and precision of the laser notching machine.

Key words: laser processing machine; connecting rod; fracture splitting notch; acceleration/ deceleration; speed pretreatment

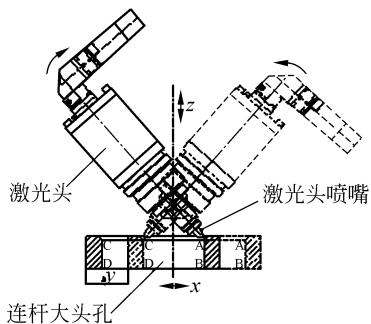
1 引言

发动机连杆裂解工艺是当今国际上最新的连杆加工技术^[1-2]。连杆裂解槽激光加工机床的作用是在连杆裂解(胀断)前,在连杆大头孔内表面两侧各切出一条裂解槽,产生一个裂解应力集中区域,以利于后续的裂解。在切槽加工过程中,既要保证加工的高速(激光头的切割速度可保证在 15~20 mm/s),同时,又要保证连杆裂解槽前后深度一致(裂解槽上各个点的槽深度公差为±0.02 mm)。在实际编程中,程序段之间需要加入 M 功能,M 功能的加入就会使得激光头瞬间从匀速减速到 0,再从 0 马上加速到切割速度,这样,会产生如下不利之处:对某些微小线段来说,实际的进给速度不能达到编程时设定的进给速度;加减速导致速度波动,造成加速度过大^[3]及轮廓误差^[4-5]。

为此,本文通过采用加减速控制以及速度预处理技术来很好地解决了这一问题。实验也验证了该算法的工程实用性。

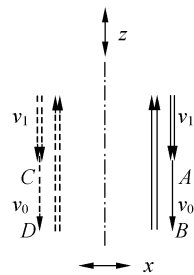
2 发动机连杆裂解槽激光加工机床的工作原理

如图 1 所示,该机床的激光头在工作中主要是做摆动和被 z 轴控制下的上下运动,同时配合 x 轴的平移运动,即可完成对连杆的激光切槽功能。具体工作流程如图 2 所示。



(a) 切割头摆动及 x 轴运动

(a) Cutting head swing and x axis moving



(b) z 轴运动位置及速度

(b) Position and speed of z axis motion

图 1 发动机连杆裂解槽激光加工机床上的激光头工作示意图

Fig. 1 Working sketch map of laser head on laser processing notching machine

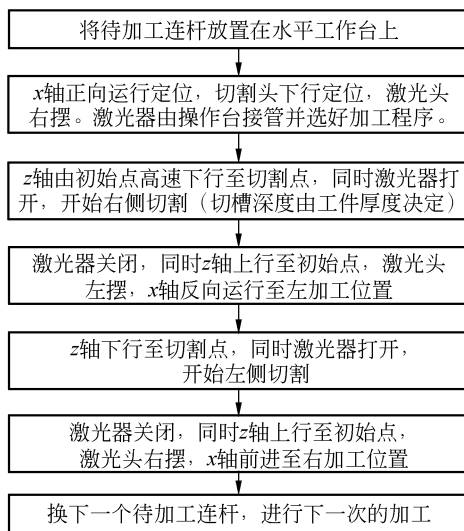


图 2 激光加工机床工作流程图

Fig. 2 Working flowchart of laser processing notching machine

在加工的过程中,为了保证切割质量,控制好各个程序段的进给速度尤为重要。

3 基本的加减速自动控制方法^[6]

加减速处理的方法有很多种,如直线、指数、S型等加减速规律。其中直线加减速算法是最基本的加减速处理方法。

如图 3 所示,当前指令进给速度大于前一指令进给速度时,处于加速阶段,瞬时速度计算如下:

$$v_{i+1} = v_i + aT, \tag{1}$$

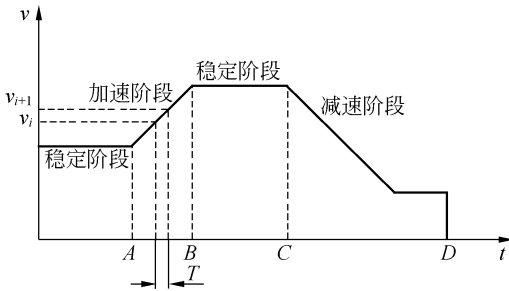


图 3 直线加减速规律

Fig. 3 Beeline acceleration/deceleration rule

式中: a 为加速度, T 为插补周期。此时系统以新的瞬时速度 v_{i+1} 进行插补计算, 得到该周期的进给量, 这是一个迭代过程, 这个过程一直进行 v_i 到为稳定速度为止。

同理, 处于减速阶段时: $v_{i+1} = v_i - aT$ 。此时系统以新的瞬时速度进行插补计算, 这个过程一直进行到新的稳定速度为零时为止。

这种算法用在该激光机床中存在如下缺点: 在加减速阶段的起点、终点处的加速度有突变, 机床运动存在柔性冲击; 另外速度的过渡不够平滑, 运动精度低。

故本文在此算法的基础上提出了一种具有前瞻功能的直线加减速与 S 型加减速相结合的加减速控制算法。

4 激光加工机床数控系统加减速的自动控制

4.1 速度预处理

当控制系统应用在高速加工时, 由于 M 功能的加入, 使得加工速度产生突变, 因此由于减速度、加速度产生的延迟和伺服产生的延迟引起的误差也大大增加。此时, 若伺服轴仍以指令速度进给, 加工区域就会发生过切或残留。因此, 数控系统在完成数控程序的编译处理后, 必须对数控数据进行预处理, 预先根据编程进给速度和加、减速度控制算法计算出程序段的进给速度和加、减速度, 进而计算出运动的几何轨迹。这就是“先行控制”(Advanced Preview Control), 有时也称为前瞻 (“Look-ahead”) 控制的原理^[7]。

利用该算法思想, 通过在 M 功能点处对直线

加减速规律进行适当的修改, 也就是将直线加减速规律与 S 型加减速规律有效地结合起来, 进行预处理, 从而实现目标。

4.2 依据 Look-ahead 要求设计规则

当机械高速运行时, 在程序中 M 功能点处, 进给轴的速度为 0, 执行完 M 功能后再加速到切割速度。为了保证精度, 防止过切, 必须要把进给轴的位置精确定位, 而这个位置和指令进给速度、加速度及加减速规律有很大的关系。

$$S = vt \pm \frac{1}{2}at^2, \quad (2)$$

式中, S 表示位移量。这也是一个迭代的过程, 首先计算进给轴由高速空行程减速到速度为 0 时的位移量, 再计算进给轴执行完 M 功能后由 0 加速到切割速度时所走的位移量。计算过程中实际上就是找到与所加入的 M 功能点对应的过渡位置点, 在该位置点处, 根据当前的加速度(减速度)和位移量确认加入 M 功能点的时机, 将这两组位移量与程序中的绝对坐标相比较后对程序进行修改, 最后即可使得进给曲线与待加工曲线完全重合。

在实际应用中, 过渡位置点不是固定的。由于连杆的型号不同, 要求的切割深度也不相同, 所以切割速度就不一样, 这样势必影响激光头从加入 M 功能处到初始切割点的距离, 故需要根据不同的切割速度来计算出这一距离。

为了保证速度的平滑性和运动精度, 本文在计算时对算法加入 S 型加减速控制方案。S 型加减速运行过程分为 7 段: 加加速段、匀加速段、减加速段、匀减速段、加减速段、匀减速段、减减速段。即 CNC 系统的加减速过程并不是匀加速或匀减速的过程, 需要在任一点的加速度都是连续变化的, 因此, 需要对公式(1)(2)进行进一步的修改。

这里设这 7 个运行过程完成后的总程序段的长度为 L 。当程序段的长度 L 大于加减速过程所需位移时, 便不会有过切或残留现象出现。当发生过切或残留时, 一定是程序段的长度 L 小于加减速过程的位移。本文提出的程序实际上是人为地使程序段的长度 L 大于加减速过程所需位移。这里将该过程分成两部分: (1) 减速阶段, 将匀速的空行程速度在过渡位置点减到 0; (2) 加速阶段, 从过渡位置点开始加速恰好到初始切割点时达到匀速切割速度。

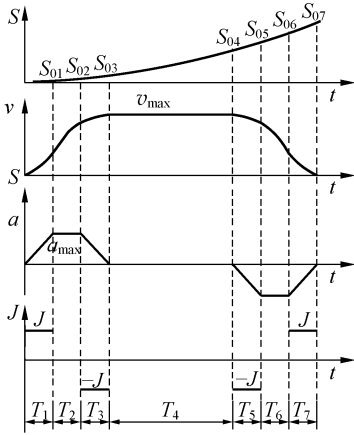


图 4 S 曲线加减速

Fig. 4 S curve acceleration/deceleration

4.2.1 加速阶段

图 4 中将加速度 a 、进给率 f 和沿刀具路径的位移 l 表示为:

$$a(t) = a(t_i) + \int_{t_i}^t J(\tau) d\tau, \quad (3)$$

$$f(t) = f(t_i) + \int_{t_i}^t a(\tau) d\tau, \quad (4)$$

$$l(t) = l(t_i) + \int_{t_i}^t f(\tau) d\tau, \quad (5)$$

式中: J 为加速度,也就是加速度的导数; t 为时间坐标; $t_i (i=0, 1, \dots, 7)$ 表示各个阶段的过渡点时刻; $t_i (i=0, 1, \dots, 7)$ 为局部时间坐标,表示以各个阶段的起始点作为时间零点的时间表示: $\tau_i = t - t_{i-1} (i=0, 1, \dots, 7)$; $T_i (i=0, 1, \dots, 7)$ 为各个阶段的持续运行时间。 v_{max} 为最大稳定速度; a_{max} 为最大加速度^[8]。

其中:

$$T_1 = T_3 = T_5 = T_7 = \frac{a_{max}}{J}, \quad (6)$$

$$T_2 = T_6 = \frac{v}{a_{max}} - \frac{a_{max}}{J}. \quad (7)$$

将式(6)(7)与式(1)(2)相结合就可以得到:

$$S_{01} = \frac{1}{6} J T_1^3, \quad (8)$$

$$S_{02} = S_{01} + \frac{1}{2} J T_1^2 T_2 + \frac{1}{2} J T_1 T_2^2, \quad (9)$$

$$S_{03} = S_{02} + \frac{5}{6} J T_1^3 + J T_1^2 T_2. \quad (10)$$

根据式(8)、(9)、(10)就可以计算出不同切割

速度下的位移,进而得到过渡位置点的绝对坐标。

4.2.2 减速阶段

因为 S 型曲线是对称的,又因为到 M 功能点之前的空行程速度是不变的,所以根据以上的加速阶段的公式,可以很容易得到减速过程的公式。

5 运行实例

以下给出一个实际例子验证本文的方法,在将速度预处理之后所得到的位移量与绝对坐标比较后,得到代码程序如下:

```

N10 G01 G90 X68.5 F3000
N20 M24 (激光头右偏)
N30 G01 G90 Z-15.53 F5000
N40 M27 (激光器发光)
N50 G01 G90 Z-33.63 F950
N60 G01 G90 X73.5 F3000
N70 M25 (激光头左偏)
    
```



图 5 激光切割机床的主要工作部分

Fig. 5 Main working parts of laser notching machine

图 5 显示激光加工机床正在对连杆进行切槽加工。当该机床工作时,若不采用任何处理方法,其运行轨迹如图 6(a)中箭头所示,连杆有一段没有被切到。图 6(b)为调整初始切割点之后的运行轨迹,但是没有考虑到速度的优化问题,所以可以看到胀断后的断面开始的一段加工轨迹与后面达到匀速后的加工轨迹不等宽。图 6(c)、(d)是采用了本文方法后得到的运行轨迹,没有过切,并且采用放大倍数为 50 的工具显微镜对胀断后的断面进行检测,各处的槽深是完全符合公差要求的。

图 7 是对连杆的槽深进行检测的示意图,裂解槽上选取的点是随机的,采用的检测样件是

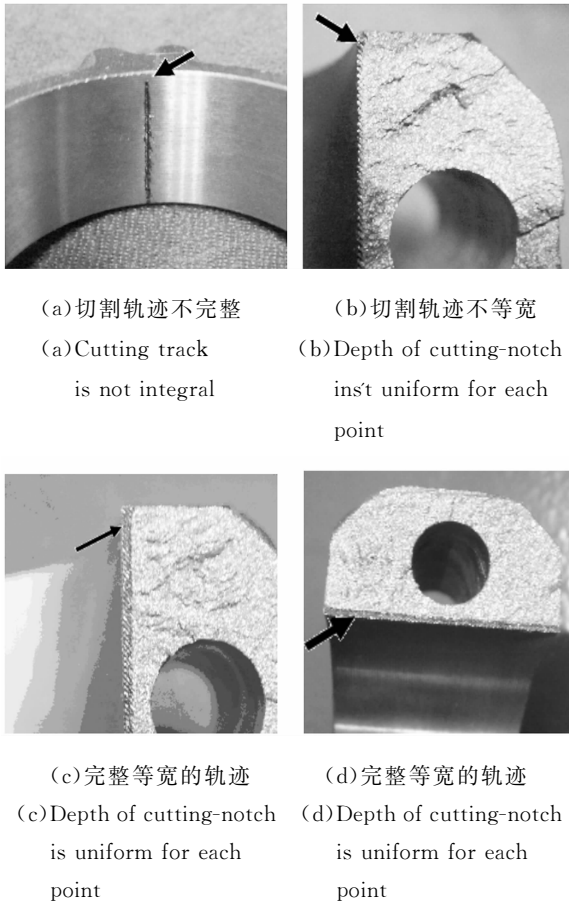


图 6 连杆切槽试验结果比较

Fig. 6 Comparison of results of connecting rod cutting-notch

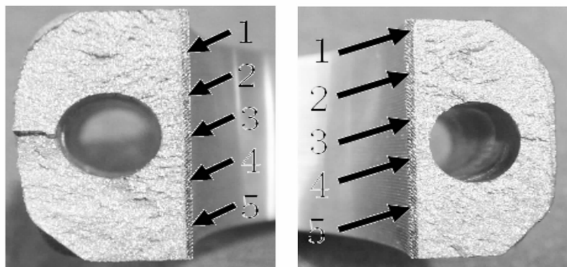


图 7 检测槽深示意图

Fig. 7 Diagram for detecting cutting-notch depths

52D 连杆,检测结果如表 1 所示。从检测结果可以看出,改进算法后激光加工机床切得的裂解槽槽深符合公差要求。

表 1 所切连杆的左右槽深的检测
Tab. 1 Detecting results of cutting-notch depths for connecting rod

随机检测点	左侧槽深(mm)	右侧槽深(mm)
1	0.591	0.593
2	0.602	0.598
3	0.601	0.604
4	0.592	0.599
5	0.600	0.596

6 结 论

本文对发动机连杆裂解槽激光加工机床在实际应用中,由于编制 NC 程序时 M 功能的引入而产生的过切及残留问题进行了探讨,提出了一种基于前瞻思想的速度预处理方法,即将直线加减速规律与 S 型加减速规律相结合的算法应用于激光加工机床中。给出了应用改进算法前后的切槽效果对比照片,最后,用工具显微镜对样件进行了实际检测。实验结果证明,对于各种型号的连杆,切割出来的裂解槽在深度上基本保持一致(裂解槽上各个点的槽深度之间的误差 <0.02 mm),完全没有过切及残留,说明该算法基本满足了连杆裂解槽激光加工机床在工作中的高速、高精度的要求。

参考文献:

- [1] 寇淑清,杨慎华,邓春萍,等. 裂解工艺——发动机连杆制造最新技术[J]. 中国机械工程,2001,12(7):839-841.
KOU SH Q, YANG SH H, DENG CH P, *et al.*. Fracture splitting process—the advanced method in manufacturing engine connecting rod [J]. *Chin. Mech. Eng.*, 2001,12(7):839-841. (in Chinese)
- [2] 寇淑清,杨慎华,赵勇,等. 发动机连杆裂解加工及其关键技术[J]. 吉林大学学报,2004,34(1):85-90.

- KOU SH Q, YANG SH H, ZHAO Y, *et al.*. Fracture splitting and process of engine connecting rod and its key techniques [J]. *Journal of Jilin University*, 2004,34(1):85-90. (in Chinese)
- [3] YONG T, NARAYANASWAMI R. A parametric interpolator with confined chord errors, acceleration and deceleration for NC machining[J]. *Computer-Aided Design*, 2003(35):1249-1259.
- [4] JEONG S Y, CHOI Y J, PARK P. Parametric interpolator using sampled data [J]. *Computer-Aided Design*, 2006(38):39-47.
- [5] 杨开明, 石川, 叶佩青, 等. 数控系统轨迹段光滑转接控制算法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2007, 47(8):1295-1299.
- YANG K M, SHI CH, YE P Q, *et al.*. Smooth transfer control algorithm for continuous segment trajectory in computer numerical control systems[J]. *Journal of Tsinghua University (Sci&Tech)*, 2007, 47(8):1295-1299. (in Chinese)
- [6] 曹文钢, 常秋香. 一种具有前瞻功能的速度平滑算法[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2005(9):56-57, 59.
- CAO W G, CHANG Q X. A kind of arithmetic having the function of "look ahead" in smoothly controlling[J]. *Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique*, 2005(9):56-57, 59. (in Chinese)
- [7] 许良元, 江庆, 刘微, 等. 激光雕刻机的加减速控制[J]. 机械工程师, 2007(6):94-96.
- XU L Y, JIANG Q, LIU W, *et al.* The acceleration and deceleration controlling of laser sculpting machine[J]. *Mechanical Engineer*, 2007(6):94-96. (in Chinese)
- [8] 黄艳, 李家霖, 于东, 等. CNC 系统 S 型曲线加减速算法的设计与实现[J]. 制造技术与机床, 2005(3):55-56.
- HUANG Y, LI J J, YU D, *et al.*. Design and implementation of S-shape acceleration and deceleration algorithm on CNC system[J]. *Manufacturing Technology & Machine Tool*, 2005(3):55-56. (in Chinese)

作者简介:林宝君(1974—),男,吉林长春人,博士研究生,主要从事精密加工设备中的自动控制技术方面的研究。E-mail: lbj123.student@sina.com

杨慎华(1949—),男,吉林长春人,教授,博士生导师,主要从事先进精密加工设备方面的研究。E-mail: shenhua@jlu.edu.cn

●下期预告

用于微镜制作的叠层光刻胶工艺及残余应力控制

李加东^{1,2}, 张平¹, 吴一辉¹, 宣明¹, 刘永顺¹, 王淑荣¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

对应用于微反射镜制作的叠层光刻胶牺牲层工艺及微反射镜表面残余应力控制进行了研究。讨论了光刻胶牺牲层在电镀时的污染问题, 提出电镀结束后重新制作光刻胶牺牲层的方法来保证牺牲层表面质量。同时提出蒸发-电镀相结合的工艺解决了上层光刻胶溶剂穿过中间结构层浸入底层光刻胶的问题, 并通过控制蒸发与电镀过程中应力状态不同的两层金属薄膜的厚度解决了微反射镜镜面存在残余应力问题。最后成功释放了长 620 μm 、宽 500 μm 、厚 2 μm 、悬空高为 12 μm 的微反射镜结构。