

文章编号: 0258-7025(2001)01-0077-04

一种新的用于金刚石激光打孔的数控模型

宁光昌 李红兵

(北京市电加工研究所 北京 100083)

摘要 提出了一种新的称为“锥形剥离”的数控模型,并开发了适用的数控系统和 Nd:YAG 激光加工机床,用这种方法在天然金刚石上加工出了 $\phi \leq 0.005$ mm 的微孔。

关键词 激光打孔,在线集成显示,锥形剥离

中图分类号: TG 665 文献标识码: A

A New CNC Model Used for Laser Drilling on Diamond

NING Guang-chang LI Hong-bing

(Beijing Institute of Electric Machining, Beijing 100083)

Abstract In this paper, a new CNC model called “conical peeling” is proposed. An adaptive control system and a Nd-YAG laser processing-machine have been developed. With this way, a tapered millipore ($\phi \leq 0.005$ mm) has been made on natural diamond.

Key words laser drilling, in line integrated display, conical peeling

1 金刚石精微拉丝模具制造的特点, 现行数控模型的弱点

随着生产的发展,中小孔和微孔精密拉丝模具需求日增,从而对金刚石激光打孔的工艺和设备提出了更高的要求。

拉丝模的孔形纵剖面是连续光滑的多段变锥度孔,先在金刚石胚料上用激光加工出预孔,再用机械方法研磨抛光,达到亚微米级精度和镜面光洁度。由于很费工时,故激光打孔的精度和孔形好坏决定着给下工序留下的加工余量,大大影响了产品的质量和生产效率。

金刚石拉丝模的打孔,通常使用高频窄脉宽激光,每一个脉冲有较高的功率密度而总功率并不大,使得激光焦点处微量材料瞬间可靠气化,不求一个脉冲将孔打透,而是用数控扫描的方法,使无数个蚀坑联成线、面、体,形成所需的三维孔洞,不但扩大了可加工范围,提高了加工精度,而且激光器的功率无需很大,同时可减薄孔壁的变质层。

现行激光打孔机普遍采用一种可称为“半径扫描,逐层剥离”的数控模型来加工锥孔(图1):激光

束先聚焦在工件表面,工件以转速 n 绕主轴 Z 旋转,令激光焦点沿径向由中心向外扫描(离心扫描),其合成轨迹是一条向外的阿基米德螺线,就象揭去了一盘蚊香,然后令焦点下降一个层深 ΔZ ,再令半径由 R 回缩一个 $\Delta R = \Delta Z \times \tan\beta$,再作向心扫描剥离下面的一层,如此一层层剥下去,直到 Z 轴走完工件厚度 H 为止。

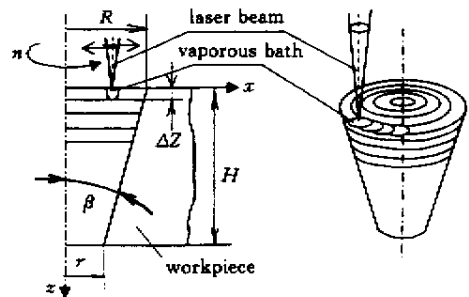


图1 “半径扫描,逐层剥离”示意图

Fig. 1 “Radius scanning, peeling layer by layer”

在生产应用中发现,逐层剥离时,并不是所设想的剥去了等厚的一薄层,而是每层越靠近中心剥去的越多,层层积累,发生了严重的“掏心”作用(图2(a)),往往程序尚未走完,工件心部已被穿透,而

一旦穿透,由于光束在很陡的孔壁上几乎被全反射(图 3(b)),其后的程序应该完成的剥离就很不充分。

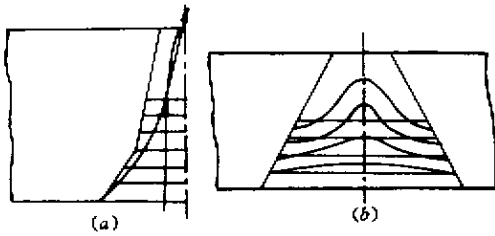


图 2 掏心作用及其后果

(a) 掏心的逐层发展;(b) 程序未完,孔已打透

Fig.2 Effect of center dig down

(a) center dig down layer by layer;(b) unformed penetrate

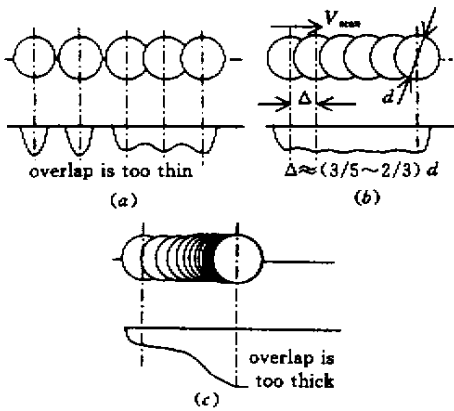


图 3 光坑重叠率对蚀除深度的影响

(a) 重叠率太稀 (b) 重叠率合适 (c) 重叠率太密

Fig.3 Effect of the overlap rate on the ablation depth

(a) overlap is too thin;(b) $\Delta \approx (3/5 \sim 2/3) d$;

(c) overlap is too thick

造成这种现象的原因,是在半径扫描时,工件转速不变,使得孔的边缘与心部扫描的线速度差异太大,心部过烧蚀。若光脉冲的能量和频率不变,扫描时相邻光斑之间存在着一个合理的间隔值 Δ ,使得蚀坑由点连成线时形成深度一致的连续沟槽(图 3(b)),若间隔过小或过大,打出的要么是断续浅坑串或凹凸不平的浅槽(图 3(a)),要么是过深且烧伤的“峡谷”(图 3(c))。

为了保证合适的重叠率,需使扫描的线速度 V 和激光频率 f 之间满足

$$V = f \times \Delta \quad (1)$$

然而,该数控程序中,主轴转速 n [r/min]是按孔口半径 R 来计算以满足(1)式的 $2\pi Rn/60 = f \times \Delta$,即

$$n = 30f\Delta / (\pi R) \quad (2)$$

打孔过程中 n 不变,当扫描半径 x 减小时,其线速度 $V = \pi x n / 30$ 也呈正比例减小,光坑重叠越来越密,趋近圆心时,线速度趋近于零,千百个光斑打在一个点上(图 4(a)),又因在激光焦点上下的一段焦深范围内,光能量密度仍以蚀除材料(图 4(b))^[1];这与机械切削“刀尖不到,材料不掉”是不同的,因此在圆心区欠聚焦的情况下,仍会继续下挖,形成严重的“掏心”。

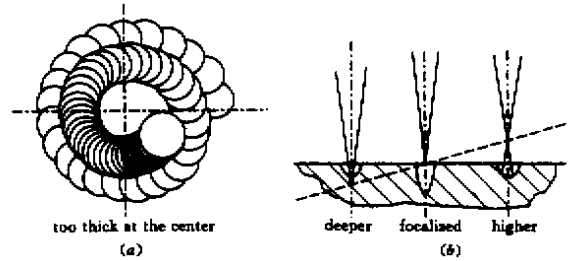


图 4 产生掏心的原因

Fig.4 Reasons of center dig down

一旦提前穿透(图 3(b)),激光在很陡的锥面上大部分被反射掉,再想把孔修大修准就很难,因此对心部的加工深度和孔径实际上是失控的,其加工精度难以满足打小孔和微孔的要求,这就是“半径扫描,逐层剥离”模型的弱点。

2 一种新的激光打锥孔数控模型

由(图 4(a))设想:若半径扫描过程中加减转速使线速度保持不变从而光坑重叠率不变,是否可避免掏心(即 $n = 30f\Delta / (\pi x)$),那么,当 $x \rightarrow 0$ 时, $n \rightarrow \infty$,即扫描到圆心处主轴转速无穷大。这是不可能的,曾经试用有级调节方法(图 5),交替变化转

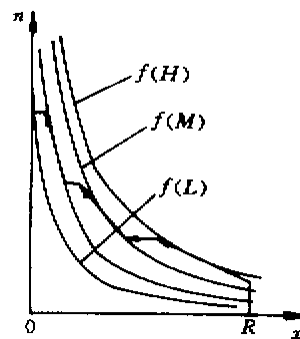


图 5 交替调节频率和转速

Fig.5 Stepped control of n and f

速 n 及频率 f 因控制复杂及激光脉冲峰值功率 P 与频率 f 的非线性关系(图 6)使控制蚀坑一致的设想未能实现。

可见,在半径扫描过程中,实现等厚剥离很困难,既然掏心不可避免,那么能否因势利导地对掏心加以限制和利用呢?

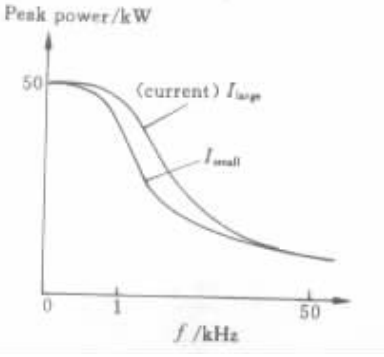


图 6 激光器脉冲峰功率与频率关系
Fig.6 Relationship of P vs f

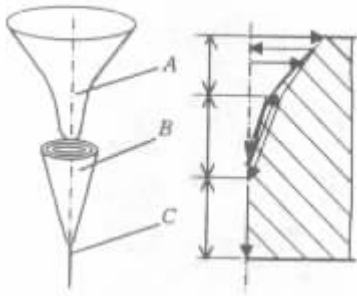


图 7 新的数控模型
Fig.7 New CNC model

在大量工艺实验的基础上,我们提出了一种称为剥笋式的“锥形剥离”数控模型,其原理如图 7 所示。程序分为 A、B、C 三段, A 为第一段,仍用“半径扫描,逐层剥离”方式开环控制,所选工艺参数使形成的漏斗形锥坑大小限于一定的范围内, B 段为锥形剥离,光斑按指定的锥角沿三维阿基米德螺旋线由大口缩向锥顶,还对转速进行了数控,这样可减弱继续发生严重掏心的倾向,把孔形修得更好,锥形剥离由心部向外一层层地好象是在剥笋壳一样。在打 C 段微孔时,若 $R < 0.02 \text{ mm}$, 则不再进行半径扫描,而令光斑沿着旋转轴心线以适当的进给速度 V_z 下行,形成最后的直孔。C 段微孔的直径究竟多大,取决于三个因素:一是激光的能量及频率,二是焦点下行的速度 V_z ,三是开始下行时应使激光焦点找准当前锥坑的坑底。前两个因素由工艺

经验保证,第三个因素需要借助于下一节介绍的在线集成显示系统。把以上 A、B、C 三段打法结合起来就组成了新的数控模型(图 7)。

3 激光打孔机的在线集成显示系统

采用计算机分级分布式数控系统,以 PC 机为主机,步进电机智能驱动器为二级 CPU,针对上述打孔工艺的需要和特点,开发了监控软件,与同类数控激光打孔机相比,提高了操作方便性和经济性,更重要的是开发了在线集成显示系统。以往的打孔机,数控主界面与 CCD 摄像机分别用两个显示器,操控时难免顾此失彼,另外加工时其主控显示屏上实时显示的各个坐标数值在跳变,很难监测各个变量间的协同关系并与当前加工进程相对照。新的主控界面显示有如下特点:

- 1)省去了 CCD 摄像机专用显示器,将经高倍光学放大后的摄像信号通过动态图像捕捉卡送到 PC 机屏幕的右半部,可清晰地看见工件的旋转、径向扫描运动和激光打在工件上发出的辉光,其强弱可显示当前聚焦深度是否合适。
- 2)在上述 CCD 图像区叠加了软件生成的可拖动和缩放定标的十字标线,便于加工时对孔径作在线实时测量。
- 3)在屏幕的左半部添加了“加工轨迹图形实时仿真器”,在加工时(开环地)显示按照扫描程序,光斑轨迹的进程及与规定孔形剖面图的关系,生动而直观。
- 4)屏幕最上部的一行,实时显示加工坐标值、主轴转速和激光电流及频率值。

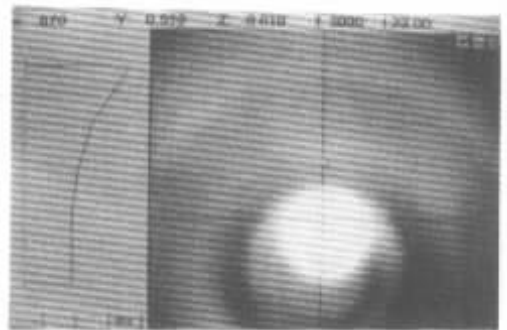


图 8 “在线集成显示系统”主界面
Fig.8 Screen of the “in line integrated display system”

将这四种功能集于一屏,组成了“在线集成显示系统”(图 8)。该显示系统提供了加工过程的几

乎全部动态信息,配合用耳辨识脉冲激光打在工件上发出的吱吱声,可以正确地监控加工过程,判断选用的工艺参数是否合适、如何改进。

用新的数控模型,在打 C 段微孔程序开始前(见图 7C)激光焦点悬于当时锥坑底部的上方,如何实时在线地测量锥底位置呢?我们借助该集成显示系统,用一种可称为“火力侦察”的方法,来实现这一要求:先用略小的激光能量以较低的 Z 向速度令焦点下降,一边看着左边仿真图上焦点下降的进程,一边监视着右边工件区,一旦发出弱辉光(表示坑底进入焦区)即令转入 C 段程序,这实际上是在开环控制过程中人为介入,进行了信息反馈,纠正偏差。

4 结 论

脉冲激光扫描打孔或雕刻时,保持激光脉冲能量及频率的稳定和扫描的线速度不变是保证精度的重要条件,若机械上难以保证线速度恒定(例如半径扫描)将会发生光坑重叠过密使蚀除量超差,这时企图调控激光能量来补救是困难的,可以采用不同的扫描模式来改善加工精度。

用“锥形剥离”数控模型和在线集成显示系统,可以提高加工微孔的精度,在金刚石上加工多段锥孔,其最小孔径可达到 $\phi 0.005$ mm,误差 ≤ 0.002 mm。为精微拉丝模具的生产提供了有效手段。图 9 是 $\phi 0.005$ mm 的两个样品在扫描电镜下的照片。

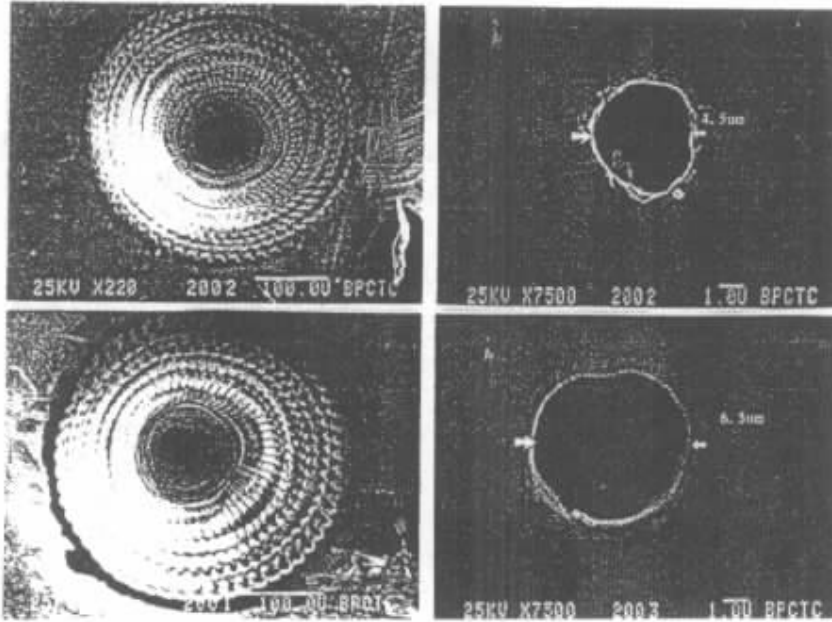


图 9 扫描电镜下微孔的入口(左)和出口(右)

Fig.9 Entrance (L) and exit (R) under scanning electron microscope

参 考 文 献

1 F. F. Vobvatof, V. P. Veaco, A. A. Chellnan. Application

of Laser in Processing. Machin. Industry Publisher, 1980. 108 (in Chinese)