

doi: 10.3788/gzxb20144304.0414003

飞秒激光高精度加工柴油机喷油嘴倒锥孔法

王锋^{1,2}, 罗建军¹, 李明²

(1 西北工业大学 航天学院, 西安 710072)

(2 中国科学院西安光学精密机械研究所 瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 西安 710119)

摘要:利用飞秒激光加工热效应小、高精度、对材料无选择性等特点,针对柴油发动机高压共轨系统中关键零件——喷油嘴偶件喷油孔的加工需求,设计了一种利用三光楔扫描的飞秒激光加工装置,并进行了喷油嘴倒锥孔加工工艺研究.采用微孔三坐标测量机(测量准确度 $1.2\ \mu\text{m}$)对倒锥孔尺寸准确度进行检测,通过喷油嘴高压液体流量试验台(测量准确度 $\pm 0.1\%$)对批量制孔后的油嘴进行了流量测试,结果表明:所设计装置加工的油嘴性能可以满足欧 V 排放法规的应用要求,对提升汽车制造业水平及柴油车排放标准具有重要意义.

关键词:飞秒激光;微加工;倒锥孔;喷油嘴;高压共轨

中图分类号:O437

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2014)04-0414003-5

High-precision Method of Machining Taper Holes of Diesel Engine Nozzle with Femtosecond Laser

WANG Feng^{1,2}, LUO Jian-jun¹, LI Ming²

(1 School of Astronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

(2 State key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

Abstract: Femtosecond laser processing has little-thermal effects, high precision, and is not particular about materials. Aiming at the machining requirement for nozzle's spray holes, as a key part of the high pressure common rail injection system for diesel engine, a femtosecond laser processing apparatus with three-wedge scanning system was designed for technical research of taper holes' machining. Then tests of the taper holes' physical dimensions and the flow rate of the fuel jet nozzles were carried out with three coordinates measuring machine (measurement accuracy $1.2\ \mu\text{m}$) and high-pressure liquid flow test bench for the injector (measurement accuracy $\pm 0.1\%$). The experimental results show that the designed apparatus can machine nozzles, and the performance is able to meet the application requirement of Euro V emission regulations. The technique has important significance for improving the level of automobile industry and domestic emission standard of diesel engine car.

Key words: Femtosecond laser; Micromachining; Taper holes; Nozzles; High pressure common rail

OCIS Codes: 140.7090; 220.4830; 320.2250; 320.7090

0 引言

90 年代以来,由于制造水平的提高,特别是排放控制技术的发展,柴油机在车用动力中占据着越来越重要的地位.为了满足日益严格的排放和噪音法规要求^[1],柴油机正在向高速、高喷射压力、低排放等高性能

方向发展^[2-3],其中柴油机的喷油嘴喷油孔(每个喷油嘴根据型号有 4~12 个微孔不等)的加工质量直接影响喷油嘴的雾化特性、油线贯穿度及流量系数,最终影响柴油机的经济性、动力性和排放指标,因此喷油嘴微细喷孔加工成型技术作为制约柴油机发展的关键技术而备受国内外专家的关注.目前满足欧 III、欧 V 排放

基金项目:国家重大科学仪器设备开发专项(No. 2011YQ120075)资助

第一作者:王锋(1975—),男,副研究员,博士研究生,主要研究方向为飞行器设计. Email: wangf@opt.ac.cn

收稿日期:2013-07-25;录用日期:2013-09-23

<http://www.photon.ac.cn>

标准的喷油器喷孔加工方式主要为电火花机床加工,并辅助液体挤压研磨技术^[4-5]。但是随着国内外排放标准的逐步升级,电火花加工方式越来越难以满足加工要求。飞秒激光由于其加工准确度高、加工表面质量好等因素成为国际研究热点。

飞秒激光脉冲宽度极短、峰值功率极高,足以使任何材料发生电离。与物质作用时,材料内部的束缚力不能遏止高密度离子电子气的膨胀,最终使作用区的材料以等离子体向外喷发的形式去除。这种去除材料的机理具有加工区域周围没有熔融区、突破衍射极限等特性,可以做到切面整齐,热效应小^[6],无微裂纹和冶金缺陷,且加工速度快,效率高,对材料无选择性,有着传统的机械加工和电火花加工所无法比拟的优越性^[7-8]。

国外已经采用激光钻孔系统来加工满足欧Ⅳ、欧Ⅴ排放标准的喷油器喷孔,并且正研究适用于欧Ⅵ排放标准的喷油器喷孔的激光加工技术^[9-12]。对比电火花加工方式和激光加工方式可知:电火花加工效率约为40 s/孔,可以并行加工;激光加工效率最快约为5 s/孔,但是不能并行加工^[2]。所以在打孔效率方面,两种方式基本相当,但是电火花加工需要用液体挤压研磨法对喷油嘴进行后续加工,且在喷孔的一致性、孔壁表面的粗糙度和喷孔孔径的进一步减小方面都存在着局限性,所以飞秒激光制孔技术具有重要意义。

本文设计了一种三光楔扫描的飞秒激光加工装置,通过激光光束螺旋扫描,实现“点-线-面-体”的飞秒激光去除材料,进行柴油机喷油嘴倒锥孔的加工,测试结果表明该方法加工的喷油嘴能满足欧Ⅴ排放法规的要求。

1 实验装置

三光楔扫描的飞秒激光加工装置实验系统如图1,主要包括飞秒激光器、扩束器、四分之一波片、三光楔光路控制模块(高速激光扫描控制装置)、五轴平台

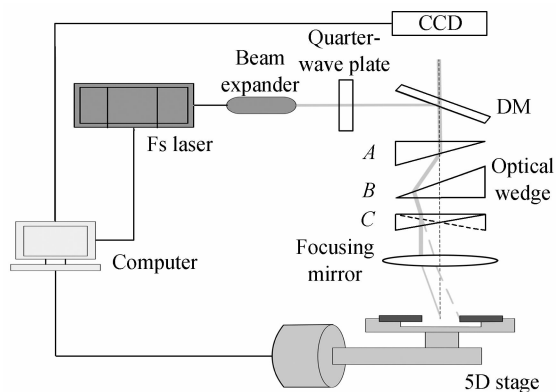


图1 三光楔飞秒激光加工系统结构

Fig. 1 Three-wedge femtosecond laser processing system structure diagram

和实时监测系统。激光器采用美国光谱物理公司的MAITAI自锁模钛宝石激光器,脉冲宽度为800 fs,重复频率1 kHz~1 MHz可调,最高单脉冲能量100 μ J,波长800 μ m,扩束器和四分之一波片可进一步提高激光的光束质量。三光楔光路控制模块主要由图1中的A、B和C三块光楔构成,用于控制激光光束的扫描半径和出射光束相对于光轴的角度。五轴运动平台选用德国PI平台,其运动准确度为1 μ m,旋转轴A轴运动范围为360°,旋转轴C轴的运动范围为 $\pm 90^\circ$ 。实时监测系统采用CCD探测器同轴监视。所有实验均在洁净(万级)空气且恒温条件下进行。

系统工作时,激光器出射的激光经过扩束器进行准直和扩束,然后经过四分之一波片,一个反射镜,将垂直向下的光束引入三光楔模块,通过旋转控制电机控制光楔的运动,配合由计算机控制的五轴运动平台实现对喷油嘴倒锥孔的加工。

图1中A与B构成的双光楔绕旋转主轴(上下表面中心的连线)旋转,系统工作时,入射光束垂直向下,A与B两个光楔组成双楔扫描,当两光楔的旋转角速度相等且出射光束的方向均垂直向下时,光束轨迹为圆周。C光楔与A、B光楔旋转的角速度相同,起光束偏向的作用。A、B、C光楔配合运动,经过聚焦镜聚焦,即可加工出不同锥度、不同半径的圆孔。

待加工微孔参量主要取决于出射光线与工件表面法线的夹角和扫描半径这两个因素。出射光线与工件表面法线的夹角主要由第一、第二楔镜的楔角和间距的纵向调整决定,所以,作为双楔扫描的两楔镜的楔角不能太小,否则需要设定很大的纵向间距才能使出射光线相对轴向的倾角有比较大的调整范围,这样会增大系统的长度和空间。

扫描半径的大小主要与第三楔镜的楔角有关。改变第二楔镜和第三楔镜相对于第一楔镜的初始相位,也可以改变扫描半径,这时候通过前两个楔镜出射的光束不再垂直向下,光束空间方向的计算比较复杂。

实验选取具有相同楔角(20°)的光楔A和B,但是A、B之间在水平方向具有一定错位 δ (可控制调整)(即A、B斜面的法线与光轴不在同一个平面)时,会对光束产生一定偏转,相当于一个单光楔的作用。 δ 不同,偏转角度就会不同,与C配合,可以实现对光束不同偏转角度。光束经聚焦镜后,打出不同孔径的孔。另一方面,A、B还能对光束产生一定横向位移,具有平行平板的功能,A、B间距不同,则位移量不同,通过控制A、B的间距,经过聚焦镜可以打出不同锥度的倒锥孔。

2 加工准确度工艺参量的优化

高压共轨系统中最急需解决的问题是喷油孔尺寸准确度和毛刺程度,当然耐压能力也是一个重要因素

(由喷油嘴材料和壁厚决定). 喷油嘴上多个喷油孔的一致性取决于喷油孔加工的尺寸准确度, 只有一致性良好, 才能获得良好的雾化效果, 从而产生高效率的动力转化能力. 为使加工出孔的尺寸及准确度满足一致性要求, 设计了喷油嘴专用的夹具, 如图 2.

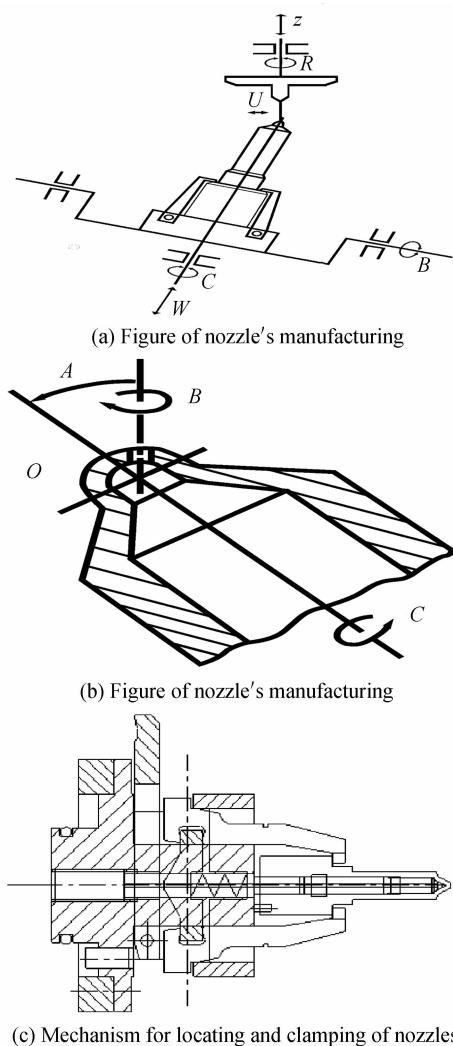


图 2 喷油嘴夹具结构及加工示意

Fig. 2 Diagrams of nozzles' clamp structure and manufacturing

在欧 V 的排放要求下, 欧美国家油嘴加工标准为: 尺寸准确度 $\pm 2 \mu\text{m}$, K 系数 $0 \sim 3$ 可控. 飞秒激光的加工准确度主要与加工参量的优化组合有关, 实验中采用“螺旋扫描-步步层进”的方式进行扫描, 即将需要加工的微结构一层一层的去除, 最后实现微结构的加工^[13-14].

设计中通过控制光束运动的轨迹和速度, 以飞秒激光作为超精细加工的工具, 将高功率飞秒激光脉冲聚焦到材料表面, 利用软件控制飞秒激光光束的运动轨迹以及激光脉冲的写入时间, 在具有复杂型面材料中进行 3D 微结构加工, 通过控制激光参量、激光写入速度和轨迹类控制微结构的形态、粗糙度、热影响、加工准确度. 分析可知, 影响飞秒激光加工质量的主要参

量有激光重复频率、脉冲序列数、单脉冲能量和扫描速度, 当重复频率为 5 k、脉冲序列数为 20、单脉冲能量为 $80 \mu\text{J}$ 、扫描速度为 3 000 rpm 时, 加工尺寸准确度和表面粗糙度可以满足喷油嘴喷油孔的加工要求, 提高加工效率.

图 3 为喷油嘴加工实物剖面图. 图中剖开的油嘴是做孔径测试的喷油嘴之一.



图 3 喷油嘴加工实物剖面

Fig. 3 Profile of a processing nozzle

3 实验结果及分析

用实验得到的最优化加工参量对 1 000 个喷油嘴进行加工, 每个油嘴加工 6 个喷油孔, 随机抽取 100 个进行剖检, 尺寸准确度 $\leq \pm 2 \mu\text{m}$, K 系数在 $0 \sim 3$ 内可控, 全部满足喷油嘴喷孔加工的设计要求.

实验后, 选取 1 个较为理想的喷油嘴, 采用了德国 MYCRONA 厂生产的微孔三坐标测量机(测量准确度为 $1.2 \mu\text{m}$) 对其 6 个喷孔的入口和出口孔径进行测量, 结果如表 1.

表 1 实验喷油嘴的孔径数据

Table 1 The aperture data of experimental nozzles

Hole Num.	In diameter/mm	Out diameter/mm	K factor
1	0.120	0.123	0.3
2	0.120	0.123	0.3
3	0.121	0.124	0.3
4	0.119	0.122	0.3
5	0.120	0.123	0.3
6	0.121	0.124	0.3

表中的 K 系数为

$$K = (D_1 - D_2) / 10 \quad (1)$$

式中: D_1 和 D_2 分别为喷孔入口直径和出口直径, 单位为 μm . K 系数的定义示意如图 4.

另外, 采用无锡宏申油泵油嘴设备有限公司的喷油嘴高压液体流量试验台 ZGL 型设备对油嘴中随机抽取的 23 个喷油嘴进行流量测试, 测试压力为 $10 \sim 60 \text{ MPa}$, 测试温度为 $40 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$, 测试范围为 $0.2 \sim 12 \text{ L/min}$, 测量准确度为 $\pm 0.1\%$. 3 次测量后的平均测试值

见表 2.

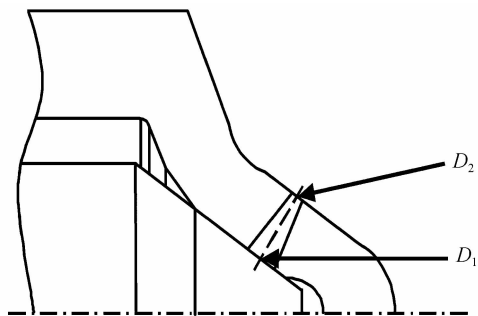


图 4 K 系数定义示意

Fig. 4 Definition profile of K factor

表 2 喷油嘴流量测试结果

Table 2 The test results of nozzles' flow

Num of nozzles	Flow/ (L · min ⁻¹)	Flow scattered difference	Num of nozzles	Flow/ (L · min ⁻¹)	Flow scattered difference
1	1.706	-2.23%	13	1.75	0.29%
2	1.708	-2.12%	14	1.752	0.40%
3	1.712	-1.89%	15	1.758	0.74%
4	1.712	-1.89%	16	1.761	0.92%
5	1.714	-1.78%	17	1.763	1.03%
6	1.714	-1.78%	18	1.764	1.09%
7	1.718	-1.55%	19	1.773	1.60%
8	1.727	-1.03%	20	1.778	1.89%
9	1.728	-0.97%	21	1.781	2.06%
10	1.741	-0.23%	22	1.781	2.06%
11	1.746	0.06%	23	1.797	2.98%
12	1.75	0.29%			

表中流量散差的计算方法为:(每个零件的流量—每批流量的平均值)/每批流量的平均值。

图 5 为随机抽取的两个油嘴的剖开图。图 5(b)是图 5(a)的局部放大图,图 5(d)是图 5(c)的局部放大图。样件的详细尺寸见表 1。

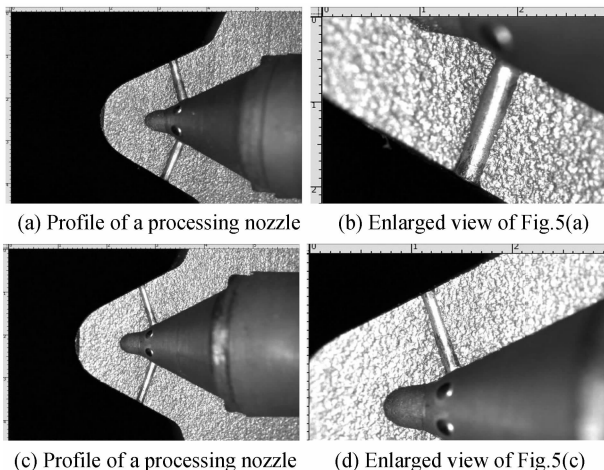


图 5 打孔后的喷油嘴样件

Fig. 5 Nozzles after drilling holes

用于欧 V 排放法规的喷孔孔径为 0.09~0.12 mm;对于喷油孔的孔径准确度要求为:入口孔径准确度 $\pm 2 \mu\text{m}$,出口孔径准确度 $\pm 3 \mu\text{m}$;流量散差 $\leq \pm 5\%$ 。由表 1、表 2 数据与欧 V 要求对照可知:本方法加工的喷油嘴质量完全可以达到欧 V 的排放要求。

4 结论

针对目前汽车喷油嘴喷油孔加工存在的技术瓶颈,利用飞秒激光和材料作用的机理,通过电机控制三光楔相对运动实现激光光束的高速扫描,并对微圆孔加工工艺参量进行优化,解决了汽车喷油嘴加工中存在的准确度低、锥度不可控的难题。该装置结构简单,适合于产业化生产,在汽车发动机领域有极大的市场前景。

参考文献

- [1] ZHANG Jie, TANG Wei-ping, DU Yan. Technical research of nozzle spray hole[J]. *Modern Vehicle Power*, 2010, **137**(2): 43-46.
张婕,唐维平,杜严. 喷油嘴喷孔加工工艺技术[J]. 现代车用动力, 2010, **137**(2): 43-46.
- [2] TONG Hao, LI Yong, LIU Mei-ling, et al. Research on drilling taper holes of fuel jet nozzles by micro EDM[J]. *Electromachining & Mould*, 2011, **294**(6): 12-15.
佟浩,李勇,刘美玲,等. 倒锥形微细喷孔电火花加工研究[J]. 电加工与模具, 2011, **294**(6): 12-20.
- [3] ZHANG Fu-hong, ZHANG Si-ze, CHEN Xi-ying, et al. Effect of nozzle parameters on diesel engine for meeting stage III emission regulation[J]. *Modern Vehicle Power*, 2009, **134**(5): 6-9.
张富红,张思泽,陈希颖,等. 喷油嘴偶件结构参量对国 III 柴油排放的影响[J]. 现代车用动力, 2009, **134**(5): 6-9.
- [4] 马洪驹. 微细倒锥孔电火花加工机构设计及其实验研究[D]. 北京:清华大学精密仪器与机械学系, 2010.
- [5] 周毅. 满足欧 III 以上排放喷油嘴的喷孔加工技术研究[D]. 上海:上海交通大学机械与动力工程学院, 2009.
- [6] DACHRAOUI H, HUSINSKY W. Fast electronic and thermal processes in femtosecond laser ablation of Au[J]. *Applied Physics Letters*, 2006, **89**(10): 104102. 1- 104102. 3.
- [7] 杨海峰. 飞秒激光微纳加工技术与应用研究[D]. 镇江:江苏大学机械工程学院, 2007.
- [8] 倪晓昌. 飞秒激光微精细加工理论与实验研究[D]. 天津:天津大学精密仪器与光电子工程学院, 2003.
- [9] WU Ming-yi, LI Ming, CHENG Guang-hua. Fabricating micro fiber fabry-perot sensor with femtosecond laser pulses[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(4): 584-587.
吴易明,李明,程光华. 飞秒激光制造微型光纤法布里-珀罗干涉传感器[J]. 光子学报, 2010, **39**(4): 584-587.
- [10] LIU Qing, CHENG Guang-hua, WANG Yi-shan, et al. Three-dimensional optical storage inside silica glass using femtosecond pulse and mechanism study[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(3): 276-279.
刘青,程光华,王屹山,等. 飞秒脉冲在透明材料中的三维光存储及其机理[J]. 光子学报, 2003, **32**(3): 276-279.
- [11] LI Ming, CHENG Guang-hua, ZHAO Wei, et al. Concave microlens arrays produced by femtosecond laser with HF acid etching[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(3): 547-550.

- 李明,程光华,赵卫,等. 飞秒激光和酸刻蚀方法制作凹面微透镜阵列[J]. 光子学报, 2009, **38**(3): 547-550.
- [12] HE Fei, CHENG Ya. Femtosecond laser micromachining: frontier in laser precision micromachining [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2007, **34**(5): 595-622.
- 何飞,程亚. 飞秒激光微加工: 激光精密加工领域的新前沿[J]. 中国激光, 2007, **34**(5): 595-622.
- [13] WANG Ai-min. Fabrication and measuring of orifices for fuel injectors[J]. *Modern Manufacturing Engineering*, 2011, **373**(10): 104-108.
- 王爱民. 喷油器喷孔加工及测量技术[J]. 现代制造工程, 2011, **373**(10): 104-108.
- [14] CHEN Y, NAESSENS K, BAETSETAL R, *et al.* Ablation of transparent materials using excimer lasers for photonic applications[J]. *Optical Review*, 2005, **12**(6): 427-441.
- [15] XIA Xing-lan, XU Zhe, GUO Li-xin, *et al.* The study of key parameters affecting flow coefficient of the nozzle hole[J]. *Modern Vehicle Power*, 2010, **140**(4):7-10.
- 夏兴兰,许喆,郭立新,等. 影响喷油嘴喷孔流量系数关键参量的研究[J]. 现代车用动力, 2010, **140**(4):7-10.