

超快激光加工 喷油器喷孔应用技术研究

□ 无锡油泵油嘴研究所/张丽敏 周峰 吴广领 侯晓晶 杜严

本文简述了国内外喷油器喷孔加工的现状，介绍了超快激光在长型多孔式喷油器喷孔的应用技术研究情况，给出试验验证结论，对喷孔新型加工装备的选择提供了参考意见。

随着电控高压共轨技术的应用与发展，喷油压力要求越来越高，对喷油器的要求也越来越苛刻，喷油器喷孔尺寸要求越来越小，喷孔数要求越来越多，喷孔孔径向更小孔径方向发展。而喷孔的加工质量直接影响喷油器的雾化特性、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。

国内用于喷油器喷孔的主要加工方法有三种：一是在变频或风动高速台钻上采用手工钻削喷孔；二是采用数控三轴钻床钻喷孔；三是采用电火花喷孔机床加工喷孔。另外，为了达到喷孔的流量一致性，用于喷孔后续加工的还有喷孔挤压研磨工艺和电解去压力室喷孔毛刺工艺。

目前，国内外的喷孔加工主要采用电火花喷孔机床加工，由于此

种加工方式对电极丝有极高的要求（电极丝圆柱度 $<0.005\text{mm}$ 、圆度 $<0.003\text{mm}$ 、直径 $\geq 0.05\text{mm}$ ），机床能加工电极丝的最小加工孔径为 0.07mm 。在喷油器喷孔加工领域，对于孔径 $<0.1\text{mm}$ 的微孔加工还未被广泛应用，在实际应用中，对于高品质的微孔加工，传统方法具有一定的局限性。常见的微孔加工方法中，电子束加工和聚焦离子束使用条件苛刻、效率低、设备昂贵；电火花腐蚀只能加工导电材料；电化学打孔效率低、材料局限；机械钻孔加工较硬的材料困难，长径比小。

与传统的加工方法相比，超快激光精密加工技术具有以下优点：

（1）极高的峰值功率，极短的作用时间，对材料无选择性，可加工金属非金属材料。

（2）热影响区域极小甚至可忽略，切面整齐、无重铸层。

（3）无裂纹和冶金缺陷。

（4）钻孔角度可自由调节（锥形、倒锥形或垂直）。

（5）最小加工孔径可达 $30\mu\text{m}$ ，最大径深比可达 $1:20$ 。

（6）突破光学衍射极限。

（7）可实现异型孔的加工。

基于超快激光的优点，我们进行了超快激光加工喷油器喷孔的工艺技术研究。

加工设备介绍

采用的设备是中科院西安光机所研制的超快激光加工设备（见图1）。该设备由飞秒激光器、校准系统和螺旋光学加工系统、工件定位系统组成，是基于最先进的超快激光技术和复合光束扫描技术。



图1 设备外形

激光加工系统通过旋转或预定轨迹运动的聚焦激光束以高密度等离子体和库伦爆炸的方式去除材料。相比于其他制孔工艺，如电火花，该系统提供了较短的制孔时间（可通过提升激光器输出功率进一步提升制孔效率），并能够高效率的在更小直径区间制孔（ $< 100\text{ }\mu\text{m}$ ），能够对金属或非金属等多种材料加工圆孔或椭圆孔。同时可以方便地加工截面形状为柱形、正锥或倒锥孔产品，加工喷孔直径大小可调，最小可达 0.05mm ，其径深比可达 $1:20$ ，加工所产生的热效应小，喷孔边缘光滑，内壁无毛刺，可以大大提高喷孔加工精度与质量。表1为设备技术指标。

表1 设备技术指标

激光波长/ μm	1.04 ± 0.01
输出功率/W	≥ 20
重复频率/fs	≤ 500
最小加工线宽/kHz	$200\sim 500$
最小钻孔直径/ μm	8
最大钻孔径深比	20
光束直径/mm	3

超快脉冲激光加工原理

长脉冲激光，如纳秒激光微加工，其原理是基于材料中的电子共振线性吸收获得的能量，将材料逐步熔化、蒸发移除。由于激光脉冲持续时间较长，远大于材料热扩散的时间，电子传递给离子的能量很高，热扩散涉及比焦点更大的区域，激光聚焦点周围一个较大的体积会被熔化，使得加工区域边缘不清晰，加工精度有限。而超快激光在极短的时间和极小的空间内与物质相互作用，作用区域内的温度在瞬间内急剧上升，并以等离子体向外喷发的形式得到去除。严格避免了热融化的存在，大大减弱和消除了传统加工中热效应带来的诸多负面影响，

超快激光微加工和材料相互作用的时间很短，使得能量以等离子体的形式被迅速带走，热量来不及在材料内部扩散，热影响区非常小，不会产生重铸层，属于冷加工，呈现锐利的加工边缘，加工精度高。图2为加工效果对比。

以金属对激光脉冲的吸收为例，其从根本上说是能量从激光脉冲到金属材料电子的转移过程。对于持续时间为ns级的脉冲而言，电子与所处晶格之间会发生一个温度平衡过程，并且最终开始融化材

料，直到部分蒸发。在这个过程中，脉冲越短，能量转移到电子的速度越快。在理想条件下，如果脉冲足够短，那么在电子与晶格之间便没有足够的时间产生温度平衡。接下来，“热电子”（相对于冷晶格而言）与晶格的作用方式：在一个特征时间后，来自电子的热量开始向周围的晶格扩散。这种电子-声子弛豫时间是物质的一种属性，其典型值为 $1\sim 10\text{ps}$ 。在大致相同的时间范围内，稍有些延迟，热电子和晶格之间就会发生突然的能量转移，从而导致相位爆炸，即激活体的蒸发。

从上述解释可以得出以下两个基本结论：

（1）激光脉冲的持续时间必须足够短，以防止电子与晶格之间发生温度平衡过程。对于金属和大多数其他材料而言，均要求脉冲持续时间 $1\sim 10\text{ps}$ 甚至更短。

（2）由于在热扩散和消融之间有一个时间延迟，因此始终会存在残余热量，即使是在脉冲最短的情况下。因此，冷加工必须定义为在最小的热扩散情况下进行加工，这要求脉冲持续时间 $1\sim 10\text{ps}$ 甚至更短。虽然超短激光脉冲较短的持续时间是冷加工的一个必要条件，但是光有足够短的脉冲还远远不够。

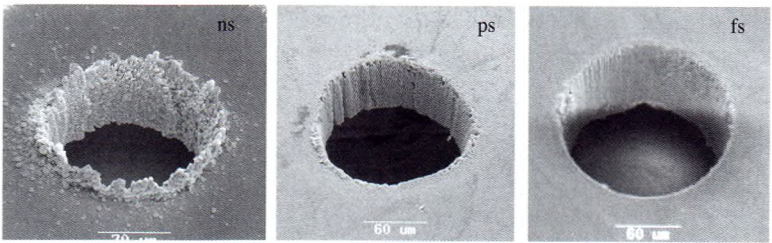


图2 长脉冲激光（纳秒ns激光）和窄脉冲激光（皮秒ps、飞秒fs激光）加工效果对比

够，如果热电子因为过高的激光能量密度而被“过度加热”，那么热扩散效应将较为明显，整个加工过程则会转变为热过程。一般来讲，大约1J/cm²的能量密度，是用皮秒激光脉冲进行消融加工、而不会产生能够测量得到的热效应的最佳能量临界点，即此时具有更佳的低热穿透深度。表2为飞秒脉冲、皮秒脉冲和纳秒脉冲比较，可以看到，飞秒激光脉冲的效果更好。

超快激光加工喷油器喷孔工艺技术研究

1. 工艺方案设计

由于喷油器喷孔是在球面上打微孔，打孔精度影响因素比较多，同时检测的准确性也非常重要。为了保证喷孔的加工精度，掌握各个参数的影响规律，首先在平板上进行小孔加工试验，找出加工规律及相应的工艺参数，验证夹具的准确性，然后再在针阀体的球头上进行工艺试验，以找出喷油器喷油孔加工的合理工艺参数。

2. 飞秒激光加工平板调试关键技术

采用材料18CrNi8喷油器毛坯材料，厚度0.75mm，平行度<5μm，热处理硬度57HRC，进行微孔加工试验。通过平板工艺试验，掌握了焦点位置精度对孔径精度的影响，辅助气体气压对加工孔径的影响，孔锥度的影响因素，扫描时间对锥度的影响，以及孔壁质量影响因素，最后对平稳微孔加工稳定性进行了验证。

连续加工60个微孔，检测后30个微孔，检测正、反面孔径数据显示，正面孔径散差±0.0035mm，反面孔径散差±0.0045mm，锥度K系数2.8~3.6。微孔正、反面形貌图显示，孔口形貌较好，无残渣，加工状况稳定，孔径一致性好，效果理想。

3. 工装夹具设计

为了确定喷油器喷孔在三维空间的位置，使喷孔的对中度控制在0.02mm以下，从而保证喷油器油束的落点，喷孔加工采用了如图3

所示的空间定位方式。Z轴是激光加工进给轴向，C轴为控制各喷孔之间的夹角，是喷油器喷孔空间角度在机床上的定位设置，回转角度0~360°。B为控制喷油器的安装夹角，工作范围0~105°，定位分辨率0.001°，定位分辨率0.018°，W轴向可调整喷孔相交的位置。W轴行程50mm，AC伺服驱动，分辨率0.001mm。

喷油器的夹紧定位方式采用中孔心轴导向、以油嘴密封座面量规尺寸轴向定位，外圆卡爪夹紧，保证喷孔交角中心落在轴线位置上。图4为定位夹紧方式示意图。

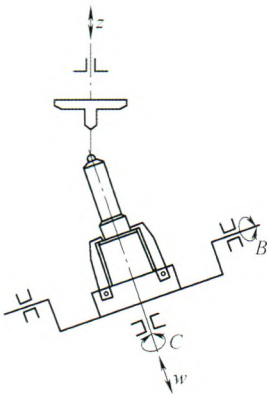


图3 加工示意图

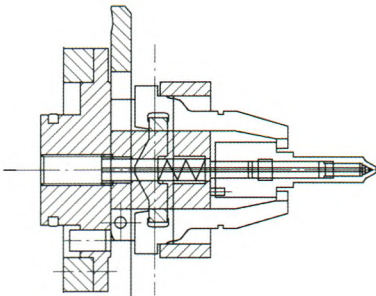


图4 定位夹紧方式示意图

4. 超快激光加工喷油器喷孔

通过在平板上的工艺试验，掌握了关键参数的影响规律，初步定了满足喷孔加工的主要工艺参数。通过大量喷油器喷孔加工工艺

表2 飞秒、皮秒和纳秒脉冲比较

激光类型	飞秒脉冲	皮秒脉冲激光	纳秒脉冲激光
脉冲周期量级/s	10~15	10~12	10~9
能量传导	电子态吸收	电子态吸收	加热效应
加工品质	精度高、热影响区极小	平滑、热影响区小	粗糙、热影响区域大
效率及普及程度	效率高、普及率低	效率高、普及率低	效率高、普及率高
重铸层/μm	无	无	10~100
微裂纹	无	无	严重
表面粗糙度(PP值)/μm	±0.2	±0.5	±0.6
尺寸精度/μm	±2	±5	±25
切割精度	99%	99%	不可控
效率及普及程度	效率高、普及率低	效率高、普及率低	效率高、普及率高

试验，最终确定并优化了适合喷油器喷孔加工的激光频率、扫描头转速、进给量和每层扫描时间等主要参数，使得加工出的油嘴喷孔符合产品的要求。从检测结果来看，孔形、孔径精度、位置精度、内壁粗糙度、流量系数和流量散差等方面都满足喷油器喷孔的要求。目前的对壁保护方法有待加强。

超快激光加工喷孔能力分析

通过工艺试验的结果进一步分析超快激光加工喷油器喷孔的工艺能力。

(1) 孔形分析。超快激光加工的内外喷孔的内外圆的圆度（短轴与长轴的比值）均≥95%。通过与电火花加工的喷孔对比可以发现，飞秒激光加工的喷孔孔型质量与电火花的加工质量非常相近，满足油嘴对喷孔孔型的要求。

(2) 孔径精度和锥度分析。加工的5个油嘴的40个喷孔外径如图5所示，从图中可以发现，外孔孔径散差为0.008mm，满足±0.005mm的加工要求；K系数的定义如图6所示，D₁为喷孔入口直径（μm），D₂为喷孔出口直径（μm），从检测结果可以看出K系数为0~3。

(3) 位置精度分析。喷孔的轴向和周向角度主要由机床旋转轴

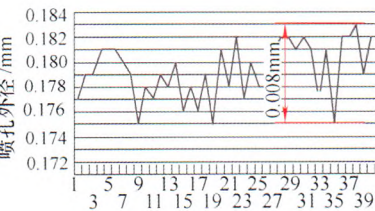


图5 油嘴喷孔外径检测结果

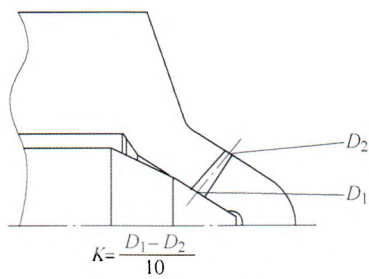


图6 K系数计算示意图

的机械精度保证。机床两旋转轴均带编码器反馈，定位精度为±40 arc sec，重复定位精度为±20 arc sec。轴向和周向角度偏差如图7、图8所示，从结果可以看出，加工结果满足加工要求。

(4) 流量系数和流量散差分析。喷油器的流量系数对燃油系统的喷射过程、喷射特性和柴油机的燃烧过程等有很大的影响，通过在专用流量试验台上进行流量检测，其流量系数均满足≥0.6的要求，流量散差≤±5%。

(5) 内壁表面粗糙度分析。目前电火花加工的油嘴喷孔内壁表面粗糙度值较大，毛刺多，需要通过磨粒流加工达到较好的内壁质量，这将消耗一定的加工时间和生产成本。飞秒激光属于超精冷加

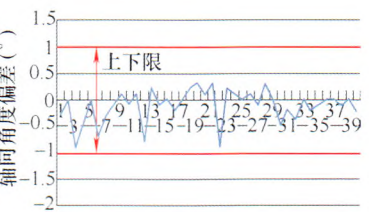


图7 轴向角度偏差

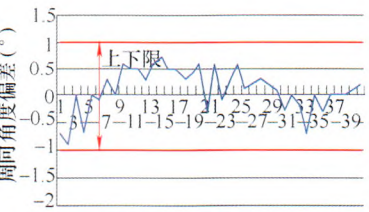
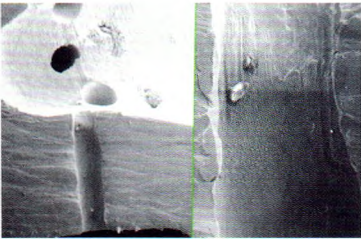
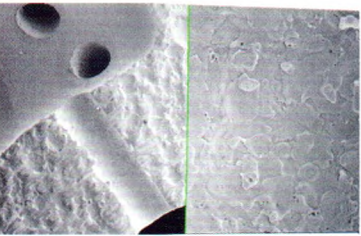


图8 周向角度偏差

工，属于纳米级加工，同时在加工过程中无热效应，能够获得较高的表面质量。二者对比结果如图9所示，超快激光加工的孔壁比电火花加工的更光滑，表面质量更高，这也进一步体现了超快激光加工的优势。



(a) 飞秒激光加工的孔壁



(b) 电火花加工的孔壁

图 9

检测方法

喷油器喷孔是在很小的球面上加工微孔，普通的仪器很难准确检测，需要有专门的检测仪器检测，目前喷油器喷孔的质量检测主要分为两种检测。

1.几何尺寸检测

喷孔加工目前已在技术上采用了诸多先进手段，孔径达0.07~0.22mm，精度±0.003mm，并且带有倒锥形状设计，内外口尺寸不同，对于这样高精度要求的喷孔加工成形后的检查测量也存在很多的困难，需测量喷油器喷孔的内口直径、外口直径，喷孔的锥度、圆度、垂直角度、水平角度和各位置尺寸等重要特征参数。

目前国内外主要油嘴制造厂家都采用德国werth或德国Mycrona的喷孔测量设备。图10是Mycrona喷孔测量仪，这是一台高精度的三坐标测量仪加上油嘴体专用夹具，可检测以上几何尺寸要求。

2.性能检测

性能检测主要是对几何尺寸测量结果的间接反映，对于在实际工况下的油嘴性能，具有重要的作

用。性能检测的项目主要有：空间喷射夹角测量、油雾雾化状态测量、油雾贯穿长度测量，采用EFS高速摄影测量仪器检测以上参数；高压流量测量，按照国标要求对喷油器高压喷射流量分别进行10MPa、60MPa压力流量测试，测试油温在压力10MPa条件下要求40℃，在60MPa条件下30℃。

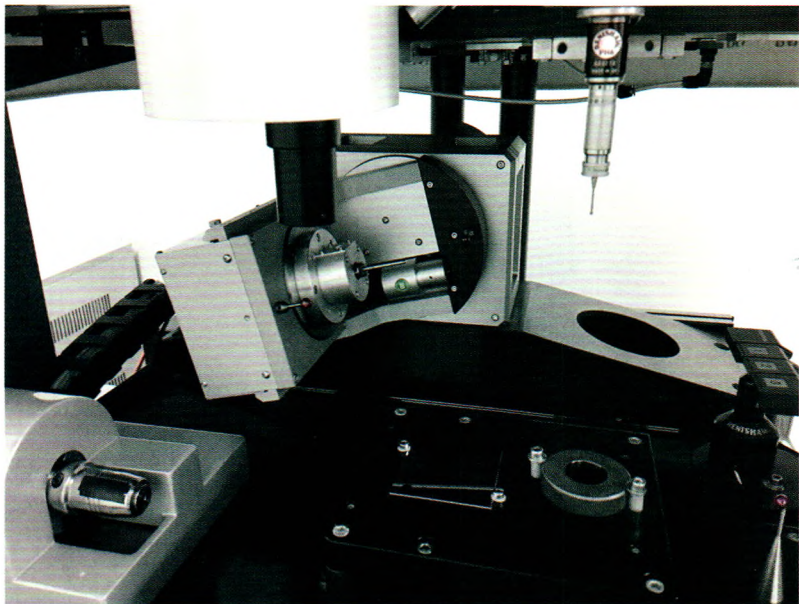


图10 Mycrona 喷孔测量仪

结语

超快（皮秒、飞秒）激光微加工技术作为一种极具潜力的新型材料精细加工手段，目前已经应用于汽车发动机、船舶发动机的喷油器喷孔的加工制造。独特的冷加工、高精度、高效率为柴油机油泵油嘴行业带来了全新的加工思路。通过工艺试验可以看出，超快激光加工喷油器喷孔的精度能够达到产品的要求，大批量生产的关键是要做好喷油器压力室的对壁保护，超快激光对喷孔的新型加工装备的选择提供了指导意义。AUTO1950



张丽敏
中国第一汽车股份有限公司
无锡油泵油嘴研究所
制造技术部

(上接第58页)

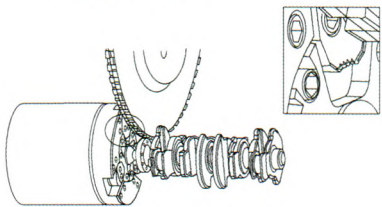


图14 改善前的法兰加工状态

施后，安装法兰卡爪挡屑模块，加工法兰时切屑无法飞溅至卡爪处，卡盘卡爪能正常工作，并在回缩过程中对卡爪有清洁作用，如图15所示。

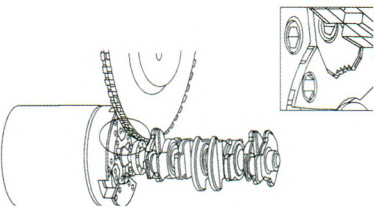


图15 改善后的法兰加工状态

结语

曲轴主轴颈及法兰粗加工工艺按轴头端、法兰端和主轴颈分别加工的工序布置，虽然降低了单台

设备的技术要求，但存在工件定位偏差大、切削效率低和线体布置长的问题。随着切削加工技术和数控车床制造技术的不断发展，曲轴主轴颈及法兰粗加工使用的复合高效车削工艺代表曲轴加工工艺的发展趋势，具有加工效率高、加工工序少、投资成本低和避免重复定位误差的优点，新工艺伴随的质量和设备停机风险可以通过技术手段逐步被克服。AUTO1950