

doi:10.3788/gzxb20144309.0914006

飞秒激光倒锥微孔加工的反射式扫描装置设计

赵华龙, 周仁魁, 赵卫, 杨小君, 李明, 贾海妮

(中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710119)

摘 要: 基于道威棱镜扫描原理, 设计了由高速旋转电机驱动三片 K 字形排布反射镜组成的反射式扫描装置, 并分析了扫描钻孔准确度. 结果表明: 该扫描装置可用于飞秒激光高精度环切钻孔系统, 钻孔准确度不受光束质量影响, 钻孔扫描速度二倍于电机转速且钻孔效率高、兼容多光谱波段; 与道威棱镜系统相比, 该系统装调准确度要求低, 能避免透射系统中色散引起的飞秒激光脉宽展宽现象. 测试结果显示该装置可以实现直径 0.05~0.2 mm、加工准确度小于 $\pm 2 \mu\text{m}$ 倒锥孔的高效率加工.

关键词: 激光加工; 超短脉冲; 钻孔装置; 喷油嘴; 微细加工; 倒锥孔; 道威棱镜

中图分类号: TG665

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)09-0914006-6

The Design of Reflective Scanning Device for Drilling the Inverted Cone Micro-hole with Femtosecond Laser Pulses

ZHAO Hua-long, ZHOU Ren-kui, ZHAO Wei, YANG Xiao-jun, LI Ming, JIA Hai-ni
(Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS, Xi'an 710119, China)

Abstract: Based on the Dove Prism scanning principle, a reflective scanning device was designed which was driven by high speed rotating motor and composed of three reflectors in K glyph configuration. The scanning device can be used for the femtosecond laser high-precision spiral drilling system and the accuracy is insensitive to the laser beam quality. The drilling scanning speed is twice as the motor speed with high drilling efficiency. Compared with Dove Prism System, the scanning device is easy to assemble and can avoid the pulse width broadening phenomenon of femtosecond laser. The tests show that it can accomplish high effective drilling the inverted cone micro holes whose diameters are between 0.05 mm and 0.2 mm with the machining accuracy less than $\pm 2 \mu\text{m}$.

Key words: Laser beam machining; Ultrashort pulse laser; Drilling-equipment; Nozzles; Microfabrication; Inverted cone; Dove prism

OCIS Codes: 140.3538; 320.2250; 320.7090

0 引言

随着工业技术的高速发展, 高精度度微小孔应用在各行业中, 其发展趋势是孔径小、深度大、准确度高、应用材料广泛(如高强度、高硬度、高韧性、高熔点的金属、陶瓷、玻璃、高分子材料、晶体等物质)^[1]. 其典型应用如汽车柴油发动机喷油嘴喷孔, 其欧 4 排放标准的喷孔孔径在 $\Phi 0.10 \sim \Phi 0.15 \text{ mm}$, 欧 5 排放标准的喷孔孔径在 $\Phi 0.09 \sim \Phi 0.12 \text{ mm}$, 欧 6 排放标准的喷孔孔径在 $\Phi 0.08 \sim \Phi 0.09 \text{ mm}$, 孔径准确度要求 $\pm 2 \mu\text{m}$, 并且

带有 0.01~0.15 mm 的 K 系数倒锥^[2].

目前喷油孔的加工大多采用电火花工艺, 部分采用长脉冲激光加工方式. 这两种加工方式都属于热熔加工, 加工过程中会在孔边缘和孔壁上形成毛刺、残渣等缺陷, 加工准确度也很难满足欧 6 排放标准要求. 国内外很多机构对相关加工工艺和设备进行了大量的开发研究工作^[2-3], 但要实现这种高精度倒锥喷孔加工的工程应用还有待进一步研究.

传统的微孔加工技术主要包括机械加工、电火花、化学腐蚀、超声波打孔等技术, 这些技术各有特点, 但

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(通讯作者): 赵华龙(1976—), 男, 博士, 主要研究方向为超快激光微纳加工技术. Email: zhl.76@163.com

导师: 周仁魁(1944—), 男, 研究员, 博导, 主要研究方向为光学工程、高速光电探测技术的应用研究. Email: rkzhou@opt.ac.cn

收稿日期: 2013-11-14; 录用日期: 2014-03-28

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

已经无法满足更高的微孔加工需求. 比如, 机械加工对高硬度、高脆性的材料效率很低, 很难加工小于 0.2 mm 的孔; 电火花只能加工金属材料. 激光打孔具有效率高、极限孔径小、准确度高、成本低、几乎无材料选择性等优点, 现已成为微孔加工的主流技术之一^[3-4]. 随着超短脉冲激光技术的快速发展, 其高精细、无热熔、材料选择性更小的优点被越来越多的应用于高准确度微结构成型中. 为了适应多种高准确度微孔加工的需求, 长春理工大学、北京工业大学和德国夫琅禾费研究所等^[6-12]机构展开了高准确度激光钻孔方式的研究. 这些钻孔方式各有特点, 但由于工程化等问题的限制, 大部分仅处于研究状态, 很少有真正用于工业生产中.

本文通过分析不同激光钻孔扫描方式的优缺点, 设计了一种基于道威棱镜原理的三反射镜激光束旋转扫描装置. 并针对高标准倒锥喷油孔的加工需求, 对其扫描准确度进行了深入分析.

1 激光钻孔技术分析

1.1 激光钻孔机理

激光去除材料的机理主要是基于 S. I. Anisimov 等提出的双温模型^[5], 即激光与金属材料相互作用时, 激光能量首先传递给自由电子, 进行电子的子系统加热, 然后自由电子再将热量传递给晶格, 进行晶格系统的加热. 在这个过程中, 自由电子对光子的吸收需要 10^{-15} s, 而电子的平均冷却时间以及电子把能量传输给晶格的时间需要 10^{-12} s. 当脉宽大于 10 ps 时, 自由电子和晶格发生热能交换, 热能向周围物质扩散, 最后导致材料熔化、蒸发; 当脉宽小于 10 ps 时, 自由电子与晶格没有足够的时间进行能量平衡, 被吸收的激光能量来不及向材料内部传导, 绝大部分能量沉积在材料表面一定厚度的薄层之内, 材料表面薄层形成正负电荷分离的强静电场, 这个强静电场加速金属离子使其脱离靶材表面最终形成刻蚀^[5].

从材料作用过程看, 激光钻孔技术可分为热加工和冷加工两种. 长脉冲热熔钻孔主要是通过聚集高能量密度脉冲激光短时间内将材料表面熔化、蒸发或升华, 从而移除表面物质. 此工艺方法在加工过程中会在局部范围内产生很高的热量, 导致出现诸如重铸层、微裂纹、毛刺等表面缺陷, 其加工准确度虽然高于电火花等工艺, 但还不足以满足喷油孔等高准确度微孔的加工需求. 超短脉冲激光冷加工钻孔主要是直接打断分子键、破坏表层物质实现去除材料目的, 作用过程中基本不产生热能, 具有加工准确度高、热影响区域小等优点, 是高质量加工方法的最佳选择之一. 但其对激光光源要求高, 加工效率较低. 研究表明^[5-7], 相对于其他打孔方式, 超短脉冲激光钻孔可以实现更高准确度微孔

的加工.

1.2 激光钻孔方式

要实现高质量激光钻孔, 不仅要选用合适的激光光源, 还要根据加工要求选择合适的钻孔方式. 目前常用于激光钻孔的扫描方式主要有:

1) 激光脉冲冲击钻孔

如图 1(a), 冲击钻孔依靠单个或多个激光脉冲冲击成孔, 主要配合长脉冲激光热熔加工机理进行微孔烧蚀加工, 可钻孔深度受限于脉冲长度和能量, 孔径与形状准确度依赖于聚焦后光斑直径、孔径光束锥度、光束质量与单脉冲能量分布等因素, 多脉冲叠加冲击的加工效果好于单脉冲. 此方式主要用于加工质量要求比较低的场合.

2) 激光脉冲旋转套钻

如图 1(b), 脉冲旋转套钻方式指激光脉冲在冲击成形同时绕光轴旋转. 同样, 该方式主要配合长脉冲激光热熔加工机理进行微孔烧蚀, 可钻孔深度受限于脉冲长度和能量, 孔径与聚焦后光斑大小相关. 相比于直接冲孔方式, 其优点是旋转的光斑使孔圆度提高, 可以得到更高的孔径准确度.

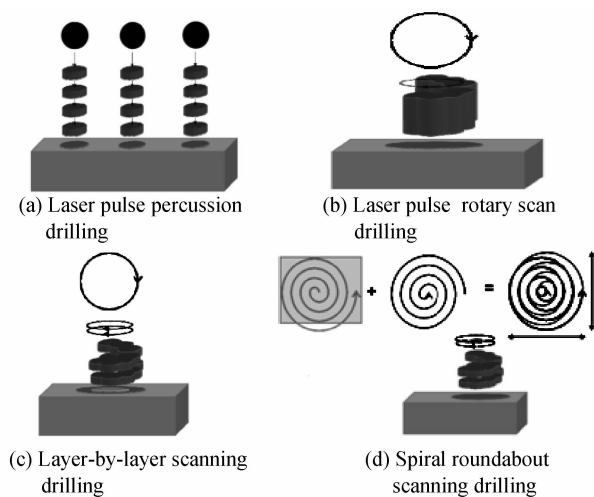


图 1 激光加工光束扫描方式

Fig. 1 Beam scanning methods of laser drilling

3) 逐层环切扫描钻孔

如图 1(c), 逐层环切扫描方式是应用光束扫描装置使激光束沿孔圆周逐层扫描去除材料的一种方法, 该方式可以匹配长脉冲和超短脉冲加工机理, 其钻孔孔径可以随意调节, 而不需要依赖聚焦光斑的大小, 孔径准确度受光斑质量影响较小, 主要由光束扫描装置准确度决定; 其优点是加工质量更好(圆度、锥度表面和粗糙度), 不需全部扫描去除材料, 效率较高; 缺点是加工深度较小.

4) 螺旋迂回扫描钻孔

如图 1(d), 由可变半径的扫描装置在要加工孔径范围内由小到大再到小迂回作螺旋线或同心圆扫描,

然后轴向进给,逐层剥离孔径内部的全部材料.此方式可加工最大孔径同样不受聚焦光斑大小和能量分布影响,仅由扫描装置决定,最小孔径由材料厚度、光束锥角和扫描系统误差决定.由于扫描过程中去除了内部全部材料,在深度进给方向不会产生拦光现象,其加工准确度和深径比可以更高,应用范围更广,其缺点是加工效率较低.

1.3 激光钻孔扫描装置

为了提高加工孔径、深度的适应范围,目前工业应用中通常采用多脉冲迂回螺旋打孔或逐层环切方式实现高准确度钻孔.要实现逐层环切扫描或螺旋扫描必须要高准确度的扫描装置驱动.最常规的扫描装置是扫描振镜,高准确度双光楔扫描器和道威棱镜扫描系统等.其中德国夫琅和费研究所研制的道威棱镜扫描系统可以实现 0.03~0.1 mm 倒锥微孔的加工;国内关于扫描装置的研究开发^[6-12],主要集中于三光楔扫描装置,同时于旬、张晓等^[13]研究了四光楔微孔加工倒锥孔的算法控制.

1) 扫描振镜

扫描振镜是通过两个伺服电机驱动反射镜在二维方向摆动扫描实现光束的控制,因其较为精确的定位、加工范围大和简单的控制方式等特点在很多领域都有广泛的应用,技术也最成熟.但是在加工微孔时,由于机械分辨率的限制很难对小于 0.2 mm 范围的小孔进行精密加工.

2) 光楔旋转扫描系统

光楔旋转系统通过驱动两片或更多的微角度楔形镜旋转来实现光束角度的偏摆控制,其扫描范围可以通过楔角设计,由于其旋转扫描的特性,更有利于圆孔的加工,可以实现微米级微小孔的加工.采用光楔旋转实现圆孔扫描的研究,有双光楔^[13]、三光楔^[6-8]、四光楔等,其中三光楔和四光楔可以实现不同孔锥度的控制.

图 2 为典型的四光楔扫描装置光路图,图中左侧两个大角度光楔可以实现入射光束的平移,改变二者间距可以调整加工孔锥度;右侧两个小角度光楔组合实现入射光束的角度偏转,使聚焦后的光斑偏离聚焦镜光轴.工作时,四个光楔依靠伺服电机同步旋转,实现焦斑绕聚焦镜光轴旋转扫描去除该圆周上的材料,同时沿光轴方向微量进给,最终实现不同孔径、锥度和深度的圆孔加工.为了实现四个光楔的同步旋转和左侧两光楔的间距调整,该装置一般采用复杂的鼠笼式

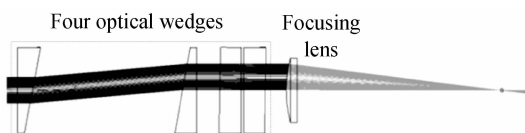


图 2 四光楔扫描装置光路图

Fig. 2 Light way of Four wedge scanning device

结构.受结构强度与装配准确度的限制,扫描准确度只能达到 0.01 mm.同时其同步控制准确度也会影响孔圆度和准确度.

3) 道威棱镜旋转扫描系统

道威棱镜旋转扫描方式是由夫琅和费研究所开发的^[12],其结构组成如图 3,系统采用光束旋转棱镜(道威棱镜)实现激光光束的旋转,道威棱镜安装到一个高速旋转的空心力矩电机上,棱镜旋转一次可使激光旋转扫描两次.准直后的激光束经过前端的角度偏转和横向平移后进入道威棱镜和调整光楔,最后通过聚焦镜聚焦到工作平面,实现环切扫描钻孔.类似于四光楔扫描装置,其角度偏转用于改变焦斑扫描半径,横向平移用于调整孔锥度,三个光楔通过偏摆和旋转补偿道威棱镜的加工、装配误差.工作时,力矩电机驱动道威棱镜实现光束的旋转扫描.相对于光楔扫描方式,这种装置可以实现二倍于电机转速的扫描速度,其光斑的自转可以避免光斑质量对孔径准确度的影响,实现更小、准确度更高的微孔扫描.但这种方式对于道威棱镜的加工准确度和装配准确度要求很高,制造成本较高,后续的光楔补偿调整结构也相对复杂,对于批量生产的工程应用具有一定的局限性.

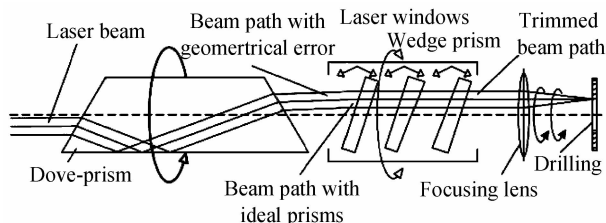


图 3 道威棱镜扫描装置

Fig. 3 Scanning device of dove prime

2 三反射镜扫描装置设计

要实现孔径为 0.08~0.15 mm 倒锥喷油孔的高准确度加工,应该采用超短脉冲激光逐层环切扫描的钻孔方式.其依据主要是:超短脉冲激光具有极短的脉冲宽度和极高的峰值功率,可以避免热熔方式造成的加工准确度不足,实现超细微聚焦和更精细的冷加工,加工质量最佳;另外,可以采用先长脉冲激光直接冲孔粗加工,然后利用飞秒激光逐层环切扫描精修的复合加工工艺,这样可以避免螺旋扫描方式效率低和扫描机构复杂、稳定性不足的缺点.从扫描准确度和倒锥孔的要求来看可以选用道威棱镜系统,但是由于道威系统属于折射系统,其 45° 角的角度误差很难控制、工程应用稳定性不足,而且色散会导致飞秒激光的脉宽展宽;同时折射系统也不能适用不同波长的激光^[16].为了解决这些问题,本文基于道威棱镜光学原理,设计了一种反射式扫描装置,利用 tracepro 模拟该装置的光路图如图 4.

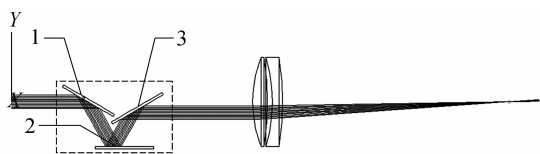


图4 三反射镜扫描装置光路图

Fig. 4 Light way of Three-mirror scanning device

扫描系统由三片成K字形排布的反射镜和一组聚焦透镜组成,初始状态时三反射镜互成 60° 集成固联安装在空心力矩电机空心轴内.系统装调时使入射光轴、聚焦透镜光轴和力矩电机旋转轴重合,调整反射镜3的角度使出射光束与系统光轴产生微小偏角,偏角大小根据待加工孔径确定;调整反射镜3与光轴在径向的距离,改变出射光束与系统光轴的横向偏移量,以满足孔锥度的要求.工作时,按照所加工孔参量调节反射镜3,使扫描孔径和锥度满足待加工孔指标,形成参量固定的激光钻.然后,由力矩电机驱动固联集成的三个反射镜绕聚焦透镜光轴高速旋转扫描,同时由精密运动平台驱动工件沿光轴按照孔深度进给.在钻孔过程中,聚焦后的激光光斑将以二倍于力矩电机的转速绕光轴旋转,同时光斑本身也将绕着自身中心自转,见图5.

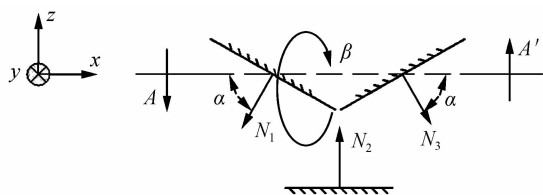


图5 反射光坐标系

Fig. 5 Coordinate of the reflection light

由图5所示坐标系可以看出,入射光矢量A经过三次反射后的出射矢量产生 180° 旋转.由反射原理可得:当反射式扫描镜绕光轴旋转 β 时,出射光矢量A将绕光轴旋转 2β 的角度,也就是入射激光束在经过反射后的光束将以2倍于扫描镜的速度绕光轴旋转^[14,16],其光束扫描转换原理与道威棱镜一致.当入射光束与聚焦透镜光轴产生偏角 θ 时,激光束通过聚焦透镜后的光斑将偏离焦点位置,此时光斑将随扫描镜以二倍的速度绕聚焦透镜光轴旋转,同时光斑也将以二倍的速度绕自身中心旋转.光斑在工件上扫描示意图见图6,为了清晰描述光斑的自转情况,图6中用“F”表示光斑,角度值代表扫描镜的旋转角度.其中左图为力矩电机驱动反射镜旋转 $0\sim 180^\circ$ 时光斑轨迹,期间光斑绕光轴完成了一整周扫描,同时光斑也完成了 360° 自转;图6右部分为扫描镜的下半周期时光斑扫描情况,可以看出其情况与上半周期一样,也就是扫描镜旋转一个周期,光斑将对工件完成两个周期的扫描加工.显然,该扫描装置的特点是聚焦光斑的自转,使与材料作用的总是光斑的同一位置,可以消除光斑能量分布不均匀导致的孔径椭圆现象,同时也可以使加工扫描速度加倍,这

样就可以大幅提高加工效率和准确度.

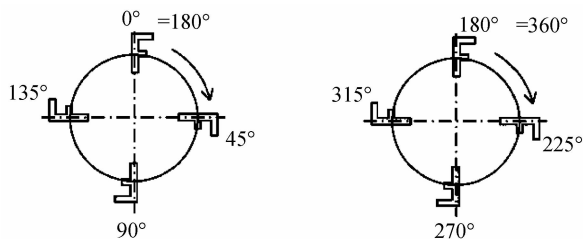


图6 一个旋转周期内光斑轨迹

Fig. 6 Trace of the facula in a period of rotation

扫描钻孔时的孔直径由入射光束的偏角 θ 和聚焦透镜焦距 f 决定,对应关系为

$$D = d + D_0 = 2f \cdot \tan \theta + D_0 \quad (1)$$

式中 D 为加工孔径, d 为光斑扫描直径, f 为聚焦透镜焦距, θ 为入射到聚焦透镜的光束与聚焦透镜光轴的偏角, D_0 为可作用光斑直径.

系统中初步设定聚焦透镜焦距为50 mm,假设可做用光斑半径为0.01 mm(应用中需要根据激光器参量实验确定),则可计算要实现0.1 mm喷嘴孔加工时,反射镜1相对于初始位置的偏角应为 0.052° .

钻孔的锥度由光束相对于旋转轴的平移量决定,根据入射光束直径调整相应的平移量就可以实现圆柱孔、倒锥孔和正锥孔的加工,如图7.

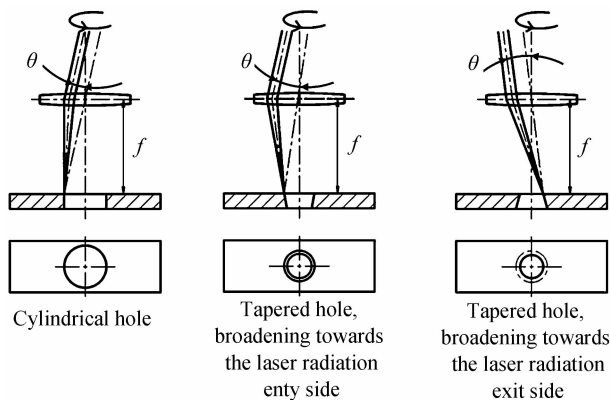


图7 锥孔实现方式

Fig. 7 The method of realizing the shape of cone

当可作用入射光束直径为10 mm时,可计算要实现 -1° 的倒锥孔,需要调节反射镜2使进入聚焦透镜的光束与光轴产生5.87 mm的偏移量.

3 准确度分析

该系统对加工准确度的影响因素主要包括以下几个方面(均以系统设定50 mm焦距为计算基准).

3.1 激光光束的指向稳定性

如式(1),孔直径由激光束与聚焦透镜光轴夹角决定,当入射光束产生随机变化时,孔径也将相应改变.目前激光器随时间和温度变化引起的光束指向稳定性一般控制为 $20 \mu\text{rad}$,但其短时间(一个孔加工周期约

10 s)稳定性完全可以控制在 $10 \mu\text{rad}$ 范围内. 长时间稳定性影响孔的定位准确度, 短时间稳定性影响孔径准确度, 焦距为 50 mm 时, 指向稳定性对孔径准确度影响值为 $0.5 \mu\text{m}$, 孔定位准确度影响值为 $1 \mu\text{m}$.

3.2 旋转轴与入射光轴的平行度

旋转轴与入射光轴的平行度分为装调过程中产生的固定偏差和旋转工作过程中的随机偏差.

固定偏差导致孔中心定位误差, 二者之间的夹角在聚焦镜入射前将放大到二倍, 即每 $10 \mu\text{rad}$ 的夹角将造成孔中心偏离聚焦镜光轴 $1 \mu\text{m}$. 此项误差可以通过后期标定进行运动补偿, 如果偏差过大将会导致焦斑能量分布不均匀, 间接影响到孔径准确度, 根据 0.02 mm 的定位准确度要求, 只要在装调过程中保证偏角小于 $100 \mu\text{rad}$ 即可.

随机偏差影响孔径加工准确度, 此项误差是由旋转轴上下两个轴承间隙和跳动量造成的, 影响度同样为 $1 \mu\text{m}/10 \mu\text{rad}$. 为了降低此项误差对准确度的影响, 需要选择高准确度轴承并尽量加长旋转轴的作用长度, 当作用长度为 200 mm , 轴承间隙为 $2 \mu\text{m}$ 时, 对孔径准确度的影响为 $0.5 \mu\text{m}$.

3.3 旋转轴与聚焦镜光轴重合度

旋转轴与聚焦镜光轴的平行度也分为两种, 一是装调过程中产生的固定偏差, 二是高速旋转工作过程中的随机偏差. 其各自的影响度和旋转轴与入射光轴的影响度一致.

固定偏差将导致孔中心定位误差, 此项偏差可以在装配时通过对心装配仪得到控制, 要求在装调过程中使二者夹角控制在 $50 \mu\text{rad}$, 同时要求在调整旋转轴与入射光轴时使两项偏离方向相反, 即可进一步减小定位准确度误差到 $5 \mu\text{m}$ 以内.

随机偏差将影响孔径准确度, 影响度为 $1 \mu\text{m}/10 \mu\text{rad}$, 此项误差控制方式同样是加长旋转轴作用长度和轴承跳动量, 当作用长度为 200 mm , 轴承间隙为 $2 \mu\text{m}$ 时, 对孔径准确度的影响为 $0.5 \mu\text{m}$.

3.4 反射镜装调准确度

扫描装置中要求三个反射镜的夹角互成 60° , 实际上并不需要严格保证他们之间的相互关系, 只要偏差不会导致通光口径失效即可, 通过光线追击可得相互夹角保证在 1° 以内即可满足要求. 反射镜的装调准确度对系统误差最大的影响在于通过三个反射镜后的出射光束与入射光束的平行度.

出射光束与入射光束的夹角会造成孔定位误差, 影响度为 $1 \mu\text{m}/10 \mu\text{rad}$. 根据定位准确度要求, 该角度偏差只要控制在 $50 \mu\text{rad}$ 即可. 为了保证装调准确度, 系统将此反射镜安装在一个三角架结构组件上, 其中第 1、2 反射镜固定安装, 其夹角准确度由机械加工准确度保证, 第 3 片反射镜设计为微调机构, 装调过程中

可以利用高准确度自准直平行光管监测调整^[15-17], 此方法可以实现 $20 \mu\text{rad}$ 的对准准确度.

3.5 反射镜定位准确度

反射镜在水平或垂直位置上的定位准确度将会影响钻孔的锥度 β , 即

$$\beta = \arctan\left(\frac{s-l \cdot \tan \theta}{f}\right) - \arctan\left(\frac{d}{2f}\right) \quad (2)$$

式(2)中 θ 为光束偏转角(孔径 0.1 mm 时对应 0.052°), l 为聚焦镜前工作距(系统设计为 100 mm), s 为光束平移量, d 为孔直径(以 0.1 mm 为例), f 为焦距(50 mm).

可以得出每 0.1 mm 的偏移量可以导致锥度变化 0.11° , 满足 0.2° 的系统准确度要求.

3.6 系统总误差

系统定位准确度影响因素主要包括激光器长时间稳定性、旋转轴与聚焦镜光轴的平行和反射镜的装调准确度. 加工装置的孔定位总准确度为

$$\Delta x = \sqrt{\frac{1^2 + 5^2 + 2^2}{3}} = 3.2 \mu\text{m} \quad (3)$$

孔径准确度主要影响因素包括激光器短时间稳定性、旋转轴、入射光轴、聚焦镜光轴相互平行度. 加工装置的孔径总准确度为

$$\Delta d = \sqrt{\frac{0.5^2 + 0.5^2 + 0.5^2}{3}} = 0.5 \mu\text{m} \quad (4)$$

孔锥度准确度可以控制到 0.11° .

工程应用中喷孔的加工准确度还将受到机床振动、定位准确度等方面的影响, 本文不再分析.

4 结论

基于高准确度微小倒锥孔的加工需求, 通过对比分析不同加工方式优缺点, 设计了一种用于飞秒激光微小倒锥孔加工用的反射式高准确度环切钻孔扫描装置, 并进行了详细的误差分析, 为结构和电气设计提供了理论支撑和依据. 设计的反射式光束扫描装置可以实现 $0.05 \sim 0.2 \text{ mm}$ 倒锥孔的高准确度加工, 避免了棱镜系统的折射作用带来的问题, 降低了道威棱镜系统的装调难度, 更适合多光谱波段飞秒激光系统的应用.

参考文献

- [1] 谢云辉. 激光打孔光栅扫描光学系统的设计和研究[D]. 武汉, 华中科技大学, 2011: 6-23.
- [2] ZHANG Jie, TANG Wei-ping, DU Yan. Technical research of nozzle spray hole[J]. *Modern Vehicle Power*, 2010, **137**(1): 43-46.
张婕, 唐维平, 杜严. 喷嘴喷孔加工工艺技术[J]. *现代车用动力*, 2010, **137**(1): 43-46.
- [3] 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, (6): 12-16.
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, (6): 12-16.
- [4] WANG Zhi-tong. Experimental study of fine trepanning drilling hole by Nd : YAG laser[J]. *Modern Vehicle Power*, 2005, **8**(3): 15-17.
王之桐. Nd : YAG 激光精密环切喷嘴喷孔实验研究[J]. 现代车用动力, 2005, **8**(3): 15-17.
- [5] 王晓东. 短脉冲及超短脉冲激光对金属的烧蚀及微加工研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2009: 1-9.
- [6] BREITLING D, RUF A, DAUSINGER F. Fundamental aspects in machining of metals with short and ultrashort laser pulses[C]. SPIE, 2004, **5339**: 49-63.
- [7] 田瑞生. 高速激光打孔加工的技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2008.
- [8] 王砚丽. 激光旋转打孔技术的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012: 7-9.
- [9] SHEN Yi-yu, PAN Yong, LUO Gong-xu, *et al.* The application of rotary wedge scanner in laser micro processing [J]. *Applied Laser*, 2012, **32**(5): 408-411.
沈一愚, 潘涌, 骆公序, 等. 楔形扫描器在激光微加工中的应用[J]. 应用激光, 2012, **32**(5): 408-411.
- [10] GARCIA-TORALES G, FLORES J L, MUNOZ R X. High precision prism scanning system[C]. SPIE, 2007, **6422**: 64220X.
- [11] WAWERS W, GILLNER A. Device for drilling and for removing material using a laser beam; US, 0045176 [P]. 2009-02-19.
- [12] 潘涌, 姜兆华, 张伟, 等. 旋转双光楔激光微孔加工装置: 中国, 200920209948.2 [P]. 2010-11-17.
- [13] YU Xun, ZHANG Xiao, CHENG Guang-hua. Study on algorithms of adjusting the taper in laser micro-processing [J]. *Laser & Infrared*, 2012, **42**(3): 263-267.
于洵, 张晓, 程光华. 激光微孔加工中调节孔锥度的算法研究[J]. 激光与红外, 2012, **42**(3): 263-267.
- [14] GUAN Min, GUO Qiang. Offsetting image rotation system in FY-3 MERSI's geolocation [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2008, **18**(4): 420-427.
关敏, 郭强. 光学像消旋系统在 FY-3 MERSI 图像定位中的应用[J]. 应用气象学报, 2008, **18**(4): 420-427.
- [15] NIJHAWAN O P, GUPTA S K, HRADAYNATH R. Polychromatic MTF of electrostatic point symmetric electron lenses[J]. *Applied Optics*, 1983, **22**(16): 2453-2455.
- [16] WANG Zhi-chen, ZHAO Yong-zhi, ZHOU Chao. Design of K mirror for Alt-az telescope [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(7): 762-765.
王志臣, 赵勇志, 周超. 地平式望远镜消旋 K 镜的设计[J]. 光子学报, 2012, **41**(7): 762-765.
- [17] ZHANG Xue-min, WEI Ru-yi, HOU Xiao-hua, *et al.* Method of dove assembling and adjustment based on optical alignment machining [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2011, **38**(4): 142-144.
张学敏, 魏儒义, 侯晓华, 等. 基于光学定心加工的道威棱镜装配方法[J]. 光电工程, 2011, **38**(4): 142-144.