



激光光束多维空间调控加工技术与系统研究进展

尹泽坤¹, 梅雪松^{1*}, 康浩哲¹, 郑庆振², 张建伟², 孙铮¹, 陆洋³, 崔健磊^{1*}

1. 西安交通大学精密微纳制造技术全国重点实验室, 西安 710054

2. 延安大学物理与电子信息学院, 延安 716000

3. 香港大学机械工程系, 香港 999077

* E-mail: xsmei@mail.xjtu.edu.cn; cjlxjtu@mail.xjtu.edu.cn

收稿日期: 2025-12-31; 接受日期: 2026-02-11; 网络版发表日期: 2026-03-10

国家重点研发计划(编号: 2023YFB4605100, 2024YFE0215500)、国家自然科学基金(批准号: 52525509, U25A20310)和陕西省自然科学基金研究计划项目(编号: 2025JC-QYCX-044, 2024JC-YBQN-0436)资助项目

摘要 电子、航空航天、汽车等行业的不断发展促使对精密设备零部件的高精度加工需求也日益旺盛, 精密微孔、微槽等结构是零部件的重要结构单元. 直接使用激光加工结构的传统方式存在侧壁锥度问题, 即使采用二维、三维振镜等加工设备也难以根除锥度, 极大制约了激光加工的更广泛应用. 激光光束多维空间调控加工系统通过特定的光学元件组合与运动, 赋予了焦点在空间中位置和姿态的多维自由度, 适用于高效高精度的复杂微结构加工场景. 本文系统综述了激光光束空间多维调控加工技术的演进脉络与研究现状, 基于目前实现激光多维调控的透射式与反射式两大技术流派, 系统介绍了两个流派已公布的加工系统技术原理、实现结构, 结合国内外最新实验进展, 总结了使用相关系统进行实际加工的结果. 根据实验结果对比分析了加工系统对加工质量的提升效果, 以此对比探讨国内外多种产品的优劣, 为多维激光加工系统的更新升级以及工业化应用提供参考和指导.

关键词 激光加工, 光束调控, 光学结构, 多维空间调控, 旋切打孔

1 引言

激光加工技术凭借其非接触、高精度及材料适应性广等显著优势, 已成为航空航天、微电子及汽车制造等高端装备制造领域不可或缺的核心技术手段^[1,2]. 随着现代工业对微纳结构功能部件的要求日益严苛, 加工对象逐渐从简单的二维平面图形演变为具有复杂三维特征的结构, 如航空发动机叶片气膜冷却孔、内燃机燃油喷嘴以及微机电系统(micro-electromechanical systems, MEMS)器件基板通孔和芯片探针卡等^[3~5]. 这

些微孔或微槽等微结构需要在满足极高的几何尺寸精度的同时, 保证侧壁的锥度为零锥度甚至负锥度^[6].

早期的激光加工主要依赖冲击钻孔和环切钻孔技术^[7~10], 如图1所示, 激光束与工件之间通常保持相对静止或仅进行简单的二维平面扫描. 然而, 常规激光加工系统多采用高斯光束加工, 光束能量呈中间高边缘低的分布, 激光在向下钻进的过程中能量会被倾斜的孔壁反射, 加之聚焦后的瑞利长度限制, 孔底处光束的有效通量密度逐渐衰减, 加之等离子体屏蔽与熔渣排出阻碍, 导致加工深孔时不可避免地产生孔口扩大

引用格式: 尹泽坤, 梅雪松, 康浩哲, 等. 激光光束多维空间调控加工技术与系统研究进展. 中国科学: 技术科学, 2026, 56: 862–886

Yin Z K, Mei X S, Kang H Z, et al. Research progress on multidimensional spatial manipulation technology and systems for laser beams (in Chinese). Sci Sin Tech, 2026, 56: 862–886, doi: 10.1360/SST-2025-0462

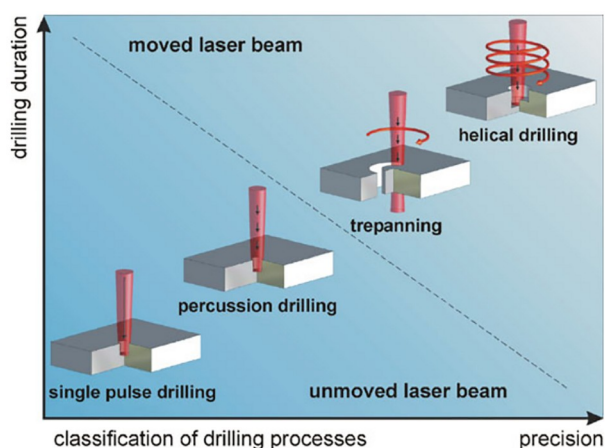


图 1 (网络版彩图)四种不同激光钻孔技术示意图^[9]

Figure 1 (Color online) Schematic diagrams of four different laser drilling techniques [9].

与孔底明显收缩现象, 形成正锥度^[11~14]. 为了解决这一问题, Sun等人^[15]、周熙杰等人^[16]、张书愿等人^[17,18]和Fan等人^[19]尝试通过倾斜并旋转工件台来改变入射角, 成功实现5×5阵列高质量无锥微圆孔的加工. 这种依赖工件宏观运动的方式虽然成本较低, 但是受限于机械轴的大惯量与低动态响应特性, 极难解决复杂曲面上的高密度群孔或非轴对称结构的加工问题, 难以满足大规模工业生产的需求. 因此, 通过光学系统直接对激光光束进行多维空间调控成为了解决上述问题的关键路径^[20]. 激光光束多维空间调控技术的核心在于不仅控制光束焦点的空间位置即 X 、 Y 、 Z 位置, 还能独立调控光束与待加工工件间的角度即 α 和 β , 加工系统配合使用光学元件或设备对激光能量、激光脉冲(如线光斑、平顶光斑^[21]、激光光丝^[22,23]和贝塞尔光束^[24~27]等)和激光偏振态(如线、圆、椭圆的标准偏振光和角向偏振光、径向偏振光、风车状偏振光等矢量偏振光^[28])进行调节和改变, 从而形成了由基础的光束位置和角度五维以及能量、脉冲形态与偏振态等其他数维组成的“5+N”维的加工能力^[29]. 这种多维度的自由度使得激光束能够在工件内部执行复杂的扫描, 通过精确控制光束的扫描轨迹与角度调整光束姿态, 来补偿加工过程中产生的锥度误差, 甚至能够实现倒锥孔(负锥度)和异形截面微孔的精密制造^[30,31], 这种加工方式又被称为旋切加工. 旋切加工可以实现对微孔孔径和锥度的精准控制, 也因此成为高端微孔加工的主流方式.

激光钻孔工艺大多要求激光束能够相对工件旋转, 旋转激光束最常见的几种系统有基于偏心旋转透镜系统、振镜扫描系统、旋转楔形棱镜和图像旋转系统(道威棱镜), 如图2所示. 从实现原理上看, 根据调控光束所使用的光学元件的不同, 主流的光束空间调控系统主要分为透射式和反射式两大类, 透射式系统多基于光楔、棱镜和平行平板的旋转折射原理, 利用双光楔组(Risley棱镜)、三光楔、四光楔或道威棱镜的组合运动来改变光束的传播路径与姿态, 这类系统结构紧凑, 能够实现光束绕光轴的高速旋转. 反射式系统则主要依赖多轴振镜的协同偏转, 通过多片反射镜的联动控制实现光束在空间中的矢量扫描, 具有极高的动态响应速度和扫描灵活性.

尽管已有的产品和实验装置在特定场景下取得了显著成效, 但在系统设计的理论建模、光束轨迹的精确预测以及多参数协同优化方面还存在诸多挑战. 本文将围绕多维空间调控加工系统对激光束相对于工件的位置、方向的调控维度展开, 重点阐述透射式与反射式两类主流系统的光学原理、实现结构及演变, 分析不同构型对光束空间姿态的调控机制, 并探讨当前研究中存在的局限与未来的发展趋势, 旨在为高精多激光加工系统的更新升级与应用提供理论参考与技术支持.

2 透射式光束调控加工系统

目前光束调控加工系统主要应用的加工结构对象还是各类孔, 且无锥孔加工工艺大多采用旋切加工, 因此透射式激光光束空间调控系统又称为“旋切头”, 透射式主要采用机械轴带动光学元件旋转和平移, 利用光束通过透明介质时发生的折射、全反射等光学现象, 对光束的传播方向(偏折角度)和空间位置(偏离光轴距离)进行调制. 透射式方案通常沿光轴同轴布置, 虽然透射式的原理决定光束需要经过光学元件内部, 产生一定的能量损失, 但是具有更紧凑的机械结构和由于机械部件旋转而带来的更高的回转对称性, 易于实现高速旋转扫描, 因此在旋切加工高圆度、高深径比微孔方面展现出独特的工艺优势.

多维光束空间调控加工系统可以改变所加工结构的宽度或直径和加工的光束倾斜角度. 图3所示即为不同加工工况下的加工系统光束示意图. 当光束只偏置

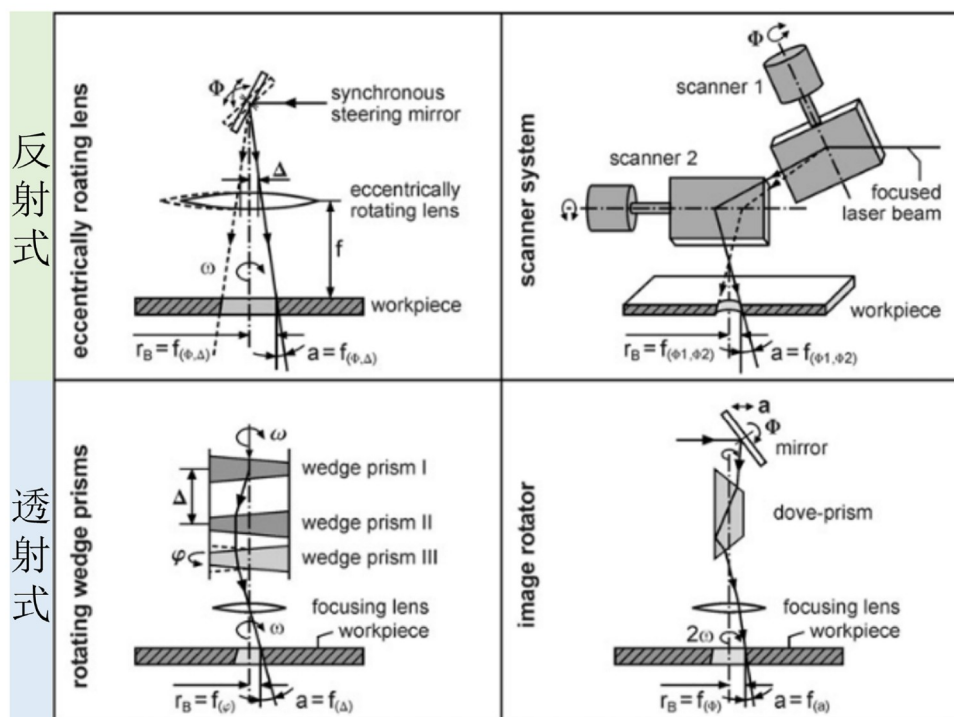


图2 (网络版彩图)激光光束空间调控系统实现激光画圆旋转的四种基本原理示意图^[9]

Figure 2 (Color online) Schematic diagram of four basic principles for laser circular rotation in a laser beam spatial manipulation system [9].

于光轴而垂直于聚焦模块表面入射时, 出射光束会根据入射高度 y 和透镜的焦距 f 倾斜于光轴出射, 出射角 β 即为激光“攻角”, 入射高度不同则攻角不同, 如图3(a)和(b)所示. 当光束在偏置的基础上倾斜于光轴 α 入射在聚焦模块上, 则会根据倾斜方向和偏置距离方向的相对关系, 产生如图3(c)~(e)所示三种加工情况. 当倾斜角度与偏置距离相对关系相反时, 光束聚焦点则会向反向进一步挪动, 远离光轴, 产生加工半径 r , 这时则会产生负锥度结构, 如图3(c)所示. 相反如果倾斜方向与偏置距离方向同向, 则会产生正锥度结构, 如图3(d)所示. 由于激光加工结构自身会带有一个正锥度, 为了加工出无锥孔, 则需要光束倾斜的角度与入射高度位置聚焦模块对光束的聚焦偏折能力综合作用的结果可以平衡掉激光垂直加工结构的正锥度. 这时加工出的结构即为无锥结构. 将聚焦模块简化为薄透镜, 光束聚焦后的“攻角” β 和焦平面上的加工旋转半径 r 可以表示为

$$\tan\beta = \tan\alpha - \frac{y}{f}, \quad (1)$$

$$r = f \tan\alpha, \quad (2)$$

其中 β 为光束聚焦后的倾斜角, α 为入射到聚焦模块前的光束倾斜角, f 为聚焦模块的焦距, y 为光束打在聚焦模块上的高度, r 为加工焦点的旋转半径. 光束在聚焦模块上的高度是由偏置距离和倾斜角度共同决定的, 光束入射高度 y 与光束偏置距离 y_1 的关系为

$$y_1 = y \cos\alpha. \quad (3)$$

由上述公式和激光打孔主要加工孔大小可以得知入射角 α 较小, 因此攻角 β 主要还是由光束入射高度决定的, 而加工半径仅由光束的倾斜角决定. 因此多维激光光束空间调控加工系统需要通过控制光学元件运动改变光束偏置距离 y_1 和入射角 α .

2.1 基于光楔与平行平板的加工系统

基于光楔或平行平板的光束调控系统是实现光束空间调控的经典且有效方案. 其核心原理是斯涅尔折射定律: 当激光束穿过具有一定楔角的光楔时, 出射光束会向光楔厚端偏折; 而穿过平行平板时, 光束方向不变但会向平行平板倾斜方向侧向位移.

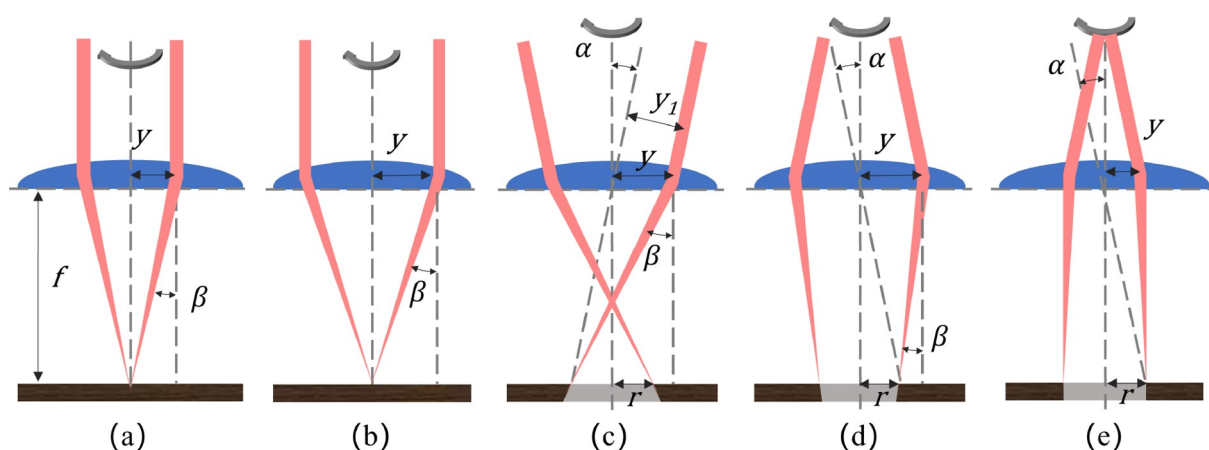


图3 (网络版彩图)调控光束产生位置与姿态改变原理示意图. (a), (b) 攻角改变原理; (c) 负锥孔加工示意图; (d) 正锥孔加工示意图; (e) 无锥孔加工示意图

Figure 3 (Color online) Schematic diagram of the principle of controlling the position and attitude change of the beam generation. (a), (b) Principle of angle of attack change; (c) schematic diagram of negative cone hole machining; (d) schematic diagram of positive cone hole machining; (e) schematic diagram of non-conical hole machining.

二维空间激光调控通常是指调节激光指向在 XY 平面内运动, 目前二维激光调控技术已经十分成熟. 最基础的构型是旋转双光楔系统. 该系统由两个独立旋转的光楔组成, 通过控制两个光楔的相对相位差, 可以在以光轴为中心的锥形视场内实现光束的任意指向偏转, 如图4(c)~(e)所示. 美国东北大学^[32]、上海光学精密机械研究所^[33]、同济大学^[34]、西安邮电大学^[35]等多家单位均有研究与开发, 如图4(a)和(b)所示. 旋转双光楔激光微孔装置可以在轴向非常短的配置下执行扫描. 然而, 在旋切钻孔应用中, 传统双光楔系统存在严重的参数耦合问题, 即难以在保证光束垂直入射的同时仅产生侧向位移, 或在产生位移时独立调节入射角, 这极大限制了其对微孔锥度与孔径的解耦控制能力.

为解决耦合难题, 多光楔组合或“平板+光楔”的光学结构应运而生. 一些研究人员在双光楔的基础上加了第三个光楔增加调控的自由度, 华中科技大学的谢云辉^[36]和王砚丽^[37]在前双光楔控制偏置光轴距离的基础上增加了第三个光楔, 它可以让光束相对光轴有一定偏转以控制小孔半径, 如图5所示. 但这种方式的缺陷在于单光楔对于光束的偏折能力有限且固定, 造成加工的孔径范围有限且难以随意改变.

为能够有充分自由度控制打孔的攻角和半径, 研究人员开始将目光放在四片及以上光楔或“平板+光

楔”结构. 在这个领域国外起步与发展较早, 2002~2003年德国的超短脉冲束源精密材料加工项目中, 斯图加特大学的Foehl等人^[38,39]和Dausinger^[40]率先系统性地提出了螺旋钻孔策略, 旨在解决传统冲击打孔中存在的重铸层堆积与锥度不可控问题. 为此他们开发了一种激光开孔装置, 这个装置由4片光楔组成, 光楔两两一组, 每组具有相同的楔角, 分别调整开孔孔径和光束的倾斜角, 具体示意图如图6(a)所示. 通过改变前两个光楔之间的距离改变光束偏离光轴的距离, 相同的楔角又可以保证光束从两片光楔入射和出射的光束平行, 后两个光楔按照与图4(c)~(e)双光楔扫描类似的方式实现给予光束不同方向的倾斜角度. 其中光束偏离光轴的距离决定聚焦后光束在工件表面的倾斜角度; 光束的倾斜角度改变光束在工件表面的聚焦位置, 焦点与光轴的距离即开孔半径.

在此基础上, 德国LMTB公司的Ashkenasi等人^[41~45]和Jahns等人^[46]系统地迭代开发了一种由一片平行平板和一对光楔组成的开孔旋切头, 最初的1.0型号只能手动更换光学器件, 且不具备使光倾斜能力, 因此有固定直径和倾斜角度; 2.1型号在1.0基础上可以手动改变使用的聚焦模块, 因此也可以改变光束的攻角, 但是仍需要手动更改直径和倾角; 2.2型使用独立的步进电机可以做到运动中更改直径与倾斜角度; 最后3.0型将光学测量系统也集合到系统, 实现较高的集成度

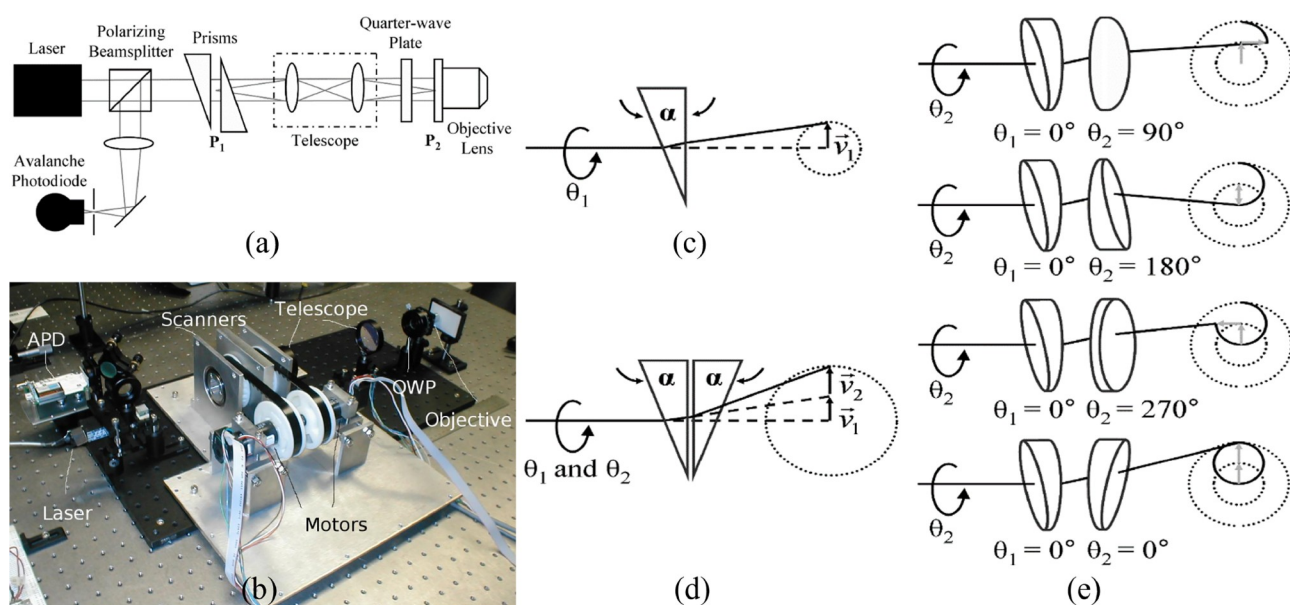


图4 (网络版彩图)双光楔光路图及实现原理^[32]. (a) 光路示意图; (b) 实验实物图; (c)~(e) 双光楔扫描技术原理图

Figure 4 (Color online) Optical path diagram and implementation principle of dual optical wedge [32]. (a) Schematic diagram of optical path; (b) experimental physical diagram; (c)~(e) schematic diagram of dual optical wedge scanning technology.

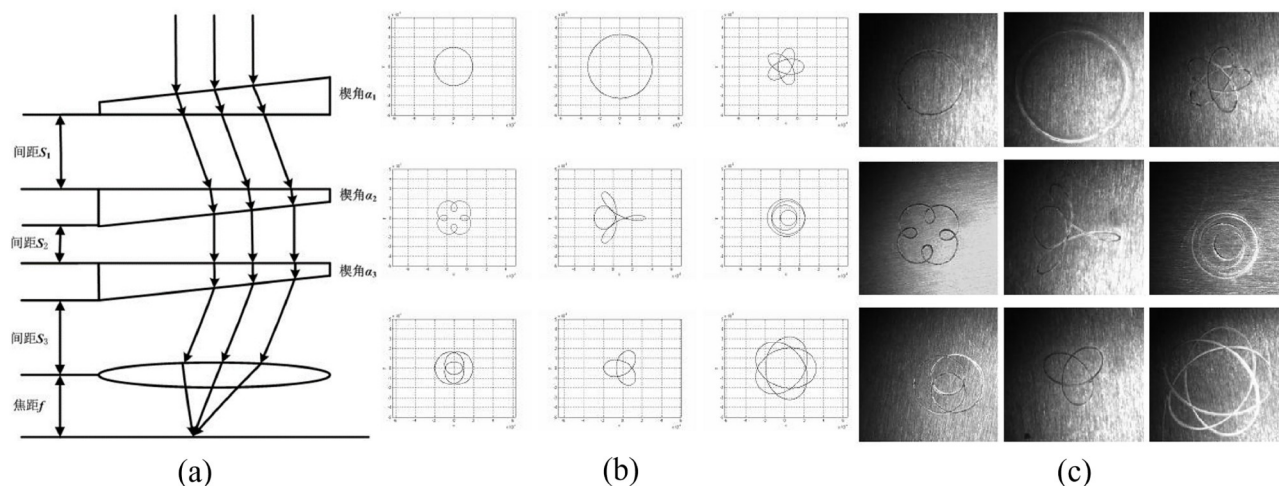


图5 三光楔光路图及模拟与实验结果^[36]. (a) 光路示意图; (b) 模拟结果图; (c) 实验结果图

Figure 5 Optical path diagram, simulation, and experimental results of the three-prism wedge [36]. (a) Schematic diagram of the optical path; (b) simulation results; (c) experimental results.

和自动化程度。该装置的核心原理与斯图加特大学的开孔头相近,但他们将原由一对相对光楔间距离控制的偏离光轴距离变为一块平行平板倾斜实现。不同型号的设计图以及光路图如图7所示。LMTB的旋切头能够在光束以最高20000 r/min高速旋转的同时,实时动态调节内部元件,实现加工攻角在 $-5^{\circ}\sim+3^{\circ}$ 之间的连

续变化。该技术是透射式系统工程化应用的里程碑。

近些年国内在透过式光束调控加工系统领域发展较快,同样开发设计了类似的四光楔或“光楔+平板”方案结构的系统。诺丁汉大学宁波创新研究院的Ye等人^[47]同样采用四光楔钻孔方案,光学与实物结构示意图如图8所示。他们将物理构型上的解耦提升到了数

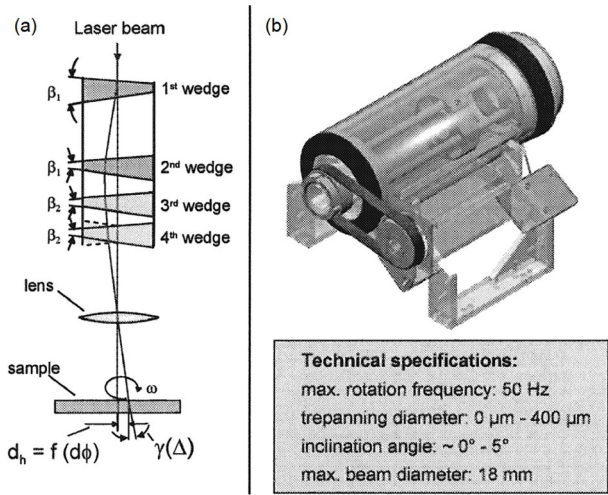


图 6 (a) 四光楔旋切头光束原理图; (b) 设计图与技术参数^[38]
 Figure 6 (a) Schematic diagram of the four-wedge rotary cutting head beam principle; (b) design diagram and technical parameters^[38].

学解析层面, 推导出了完整的逆运动学方程组, 证明了可在数学上精确解算出任意时刻光束焦点的位置和姿态矢量。实验与计算的激光束轨迹之间有良好的 consistency, 相对误差小于 8.7%, 孔径和锥度的相对误差分别为 2.4% 和 13.1%。

西安光学精密研究所的 Wang 等人^[48]和西安中科微光子制造科技有限公司的康伟等人^[49]提出了一种采用“双光楔+双平行平板”的旋切钻孔系统, 双平行平板组极大提升了光束偏置于光轴的距离大小, 光楔组与平板组同步高速转动, 使光束在焦平面上形成圆形轨迹, 该装置可以在线改变光楔之间和平板间的相对偏转角度进而实现大深径比及锥度可控的微孔加工。华中科技大学邓磊敏等人^[50]开发了五片主要工作光楔和两片用于解决激光聚焦光斑偏离光轴倾斜后因慧差而引起的光楔。五片主要工

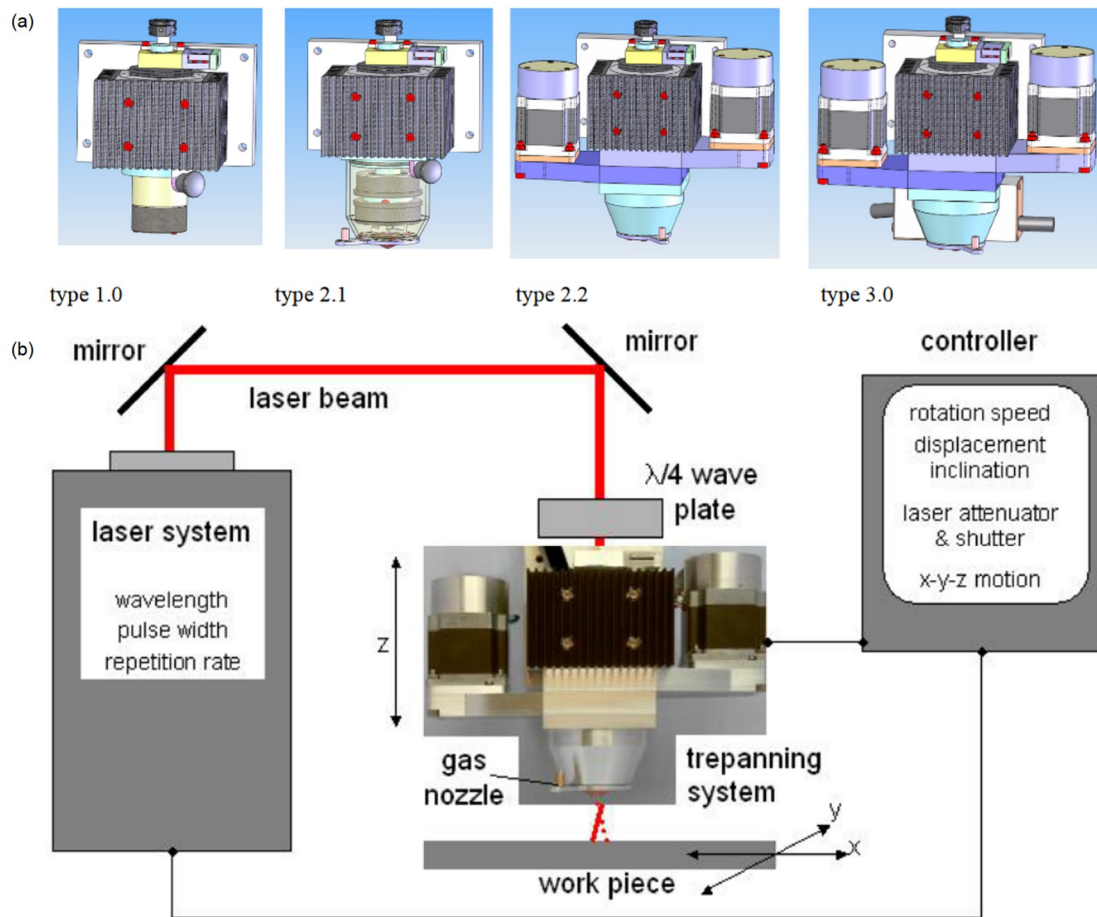


图 7 (网络版彩图) (a) LMTB 公司开发的四种型号激光加工头结构示意图; (b) 装置示意图^[44]

Figure 7 (Color online) (a) Schematic diagrams of the four types of laser processing heads developed by LMTB company; (b) a schematic diagram of the overall device^[44].

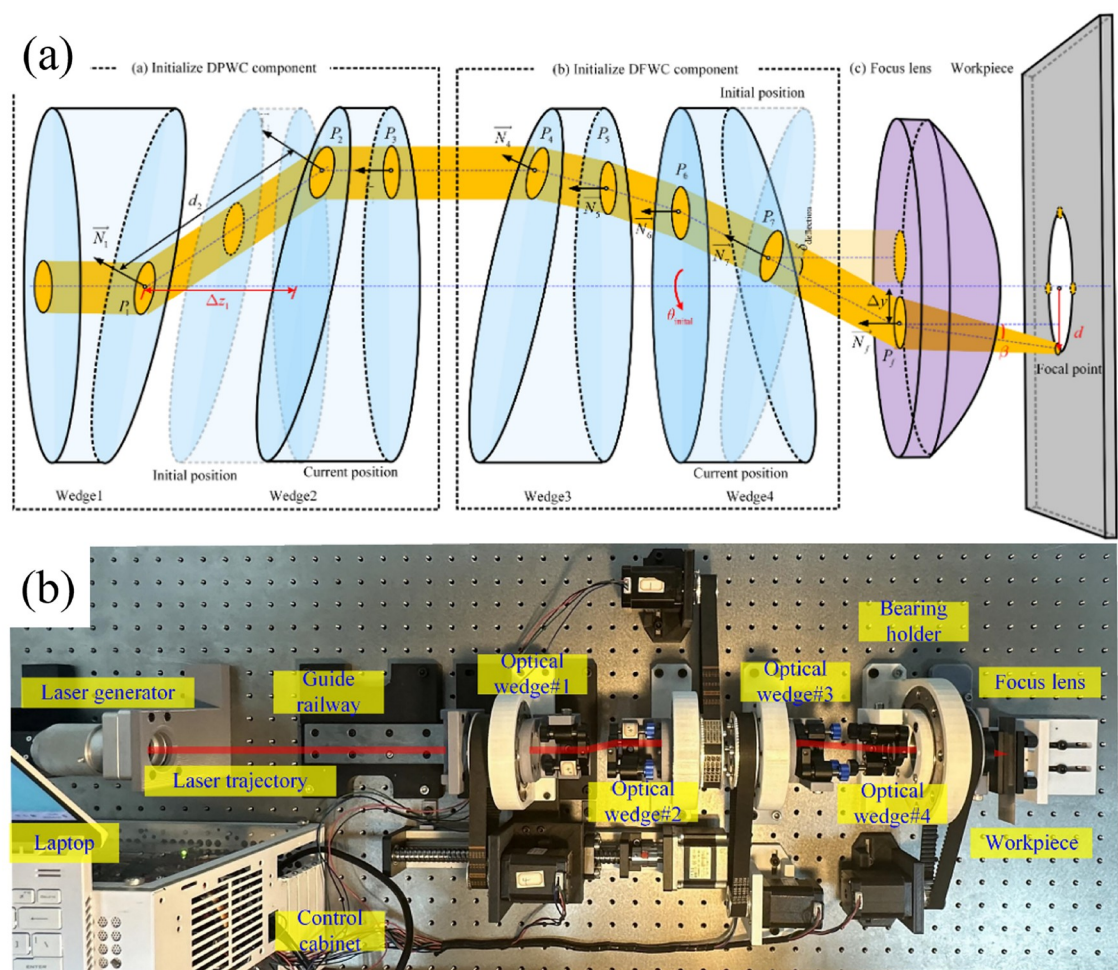


图8 (网络版彩图)诺丁汉大学四光楔钻孔系统^[47]. (a) 光路示意图; (b) 实物结构图

Figure 8 (Color online) University of Nottingham four-wedge drilling system [47]. (a) Schematic diagram of the optical path; (b) photograph of the actual structure.

作光楔相比于四光楔方案进一步扩大了系统的能力范围, 且由于该方案将四光楔方案的偏置光楔对和倾斜光楔对分开放置在聚焦模块的前后, 影响激光光束攻角的因素变成只由偏置距离决定, 进一步成功将控制激光攻角与半径解耦, 更便于实际调节控制与使用。

深入分析这种基于光楔与平行平板方式即可发现, 实现可变锥度的加工所需的倾斜角度只能由双光楔实现, 而实现偏置可以由一对光楔或双平行平板实现。双光楔改变倾角需要光楔安装在两个旋转电机上, 两个电机需在基本转速的基础上产生速度差, 以产生光楔之间的相位差, 通过相位差改变合成倾角的大小。平行平板组改变偏置距离与双光楔改变倾角同理, 一对光楔改变偏置则需在双光楔同速旋转同时增添一个

电机改变间距, 由于在旋转装置内部安置可以在线改变间距的电机十分困难, 因此该方案多数如图9所示, 其中双光楔使用两个电机同步旋转方案, 因此“光楔组+平行平板组”方案需要四个电机, 四光楔方案则需要五个电机, 邓磊敏等人^[50]开发的聚焦镜前后光楔组方案则需要六个电机实现。这些电机之间需要有较高的同轴度以及轴平行度, 装配难度较高, 对电机的性能也有较高要求, 速度需要有较高同步性, 控制产生相位差的电机还需要有较高的速度精度, 以精确控制相位的产生。硬件成本以及装配难度较高, 且由于结构限制, 无法实现高旋转速度加工。

该类加工系统目前已有方案大多暂未考虑光束偏振的影响或均使用圆偏振光入射系统。由于相比于后

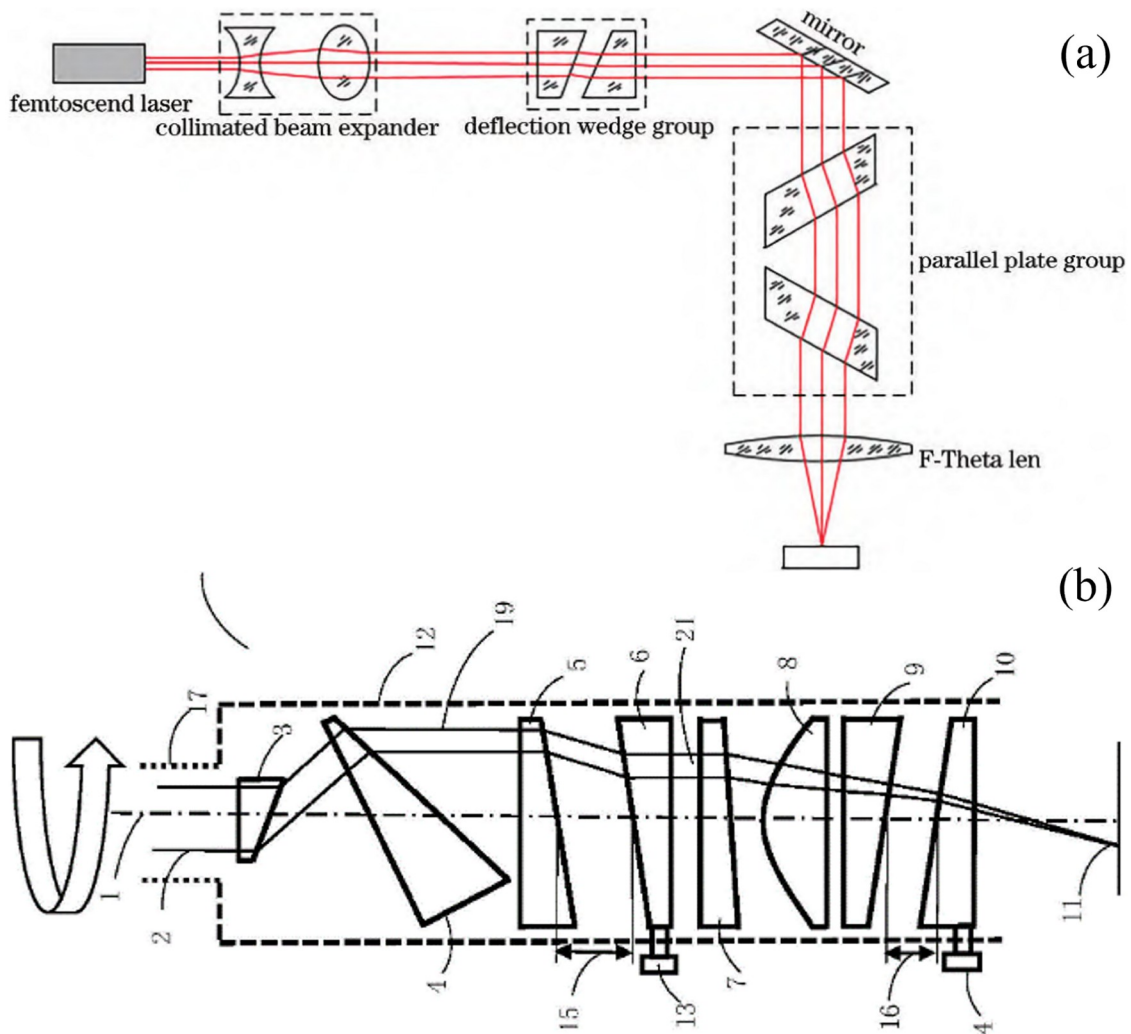


图 9 (网络版彩图) (a) 西安光学精密研究所旋切头光路示意图^[48], (b) 邓磊敏团队旋切头光路示意图^[50]

Figure 9 (Color online) (a) Schematic diagram of the optical path of the rotary cutting head from Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics [48]; (b) schematic diagram of the optical path of the rotary cutting head from Leimin Deng's team [50].

面介绍的反射式为主的加工系统, 透射式系统对光束偏振的影响也相对较小, 因此偏振在此类系统中的影响也可以不再考虑.

2.2 基于道威棱镜的加工系统

在实际加工中, 激光器输出的光斑往往圆度不佳. 上述基于光楔与平行平板的方案由于光学原理的限制, 光斑的不规则性会以平移和扩大的方式复制到孔壁上, 如图10所示. 使用道威棱镜的原理是光束经过第一面折射后在棱镜底面会发生一次全反射, 使经过这次全反射的光旋转 180° , 则根据反射性质, 当道威

棱镜绕光轴以转速 ω 旋转时, 透射光束的截面图像将以 2ω 的速度旋转. 这一特性可以用于实现光束的“自旋”控制. 正是由于道威棱镜可以使光束自转这一独特的特点, 进而迫使光束在绕孔轴公转的同时以相同角速度自转, 确保光束始终以同一“切削刃”作用于孔壁, 从而有效规避光斑各向异性导致的加工误差.

德国夫琅和费激光技术研究所的Wawers等人^[51]、Zibner等人^[52]和Fornaroli等人^[53]开发了以道威棱镜为核心组件的高集成度旋切头. 如图11(a)所示, 该装置利用了一个反射镜、三个光楔、一个平行平板和一个道威棱镜作为光学元件. 其中反射镜通过平移控制光

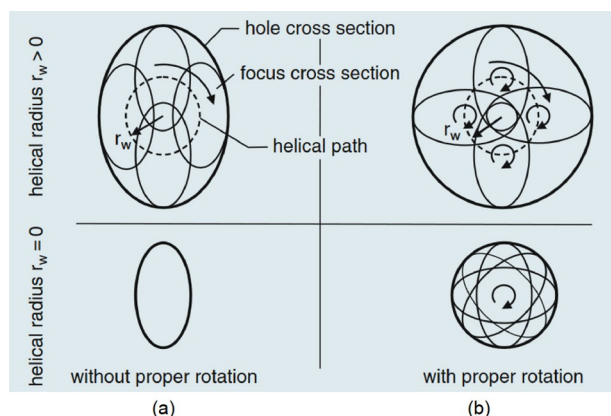


图 10 (网络版彩图)激光相对工件平移加工方式(a)和激光自身旋转复合画圆(b)的区别示意图^[9]

Figure 10 (Color online) Schematic diagram illustrating the difference between laser processing with relative translation of the workpiece (a) and laser processing with combined rotation and circular motion of the laser itself (b) [9].

束偏置光轴的距离, 光楔通过在一定范围内偏摆改变光束的倾斜角度, 道威棱镜则实现光束的绕光轴旋转。

带有偏置位移和倾斜角度的光束通过道威棱镜旋转的原理如图11(b)所示。该方案具备较为合理的误差光学补偿元件, 两个光楔用于补偿装配所带来的倾斜角度误差, 平行平板则用来补偿同轴度的误差。该方案的专利中还特别提到了可以使用屋脊棱镜、K形反射镜和可调节K镜的方案来替代道威棱镜在光路中的作用, 其基本原理均为使光路在旋转模组中经历奇数次反射即可实现光束的自转。这种带有自旋补偿光斑问题以及误差光学补偿的方案已达到较高集成度和实用度, 已有多家单位采购该装置进行加工实验。

这种方案有效地避免了光楔与平板组方案的硬件高成本以及调节装配难度高的问题。整个装置由于只有一个主要的旋转电机, 因此可以对电机进行高精度和高性能的配置, 可以实现极高转速和较高精度的旋转。该装置还成功将偏置、倾斜和旋转这三个需求通过三个分离的模块实现, 成功降低了后续使用时调节的难度以及进行联动控制时相互间的耦合影响。该种基于道威棱镜的旋切头加工系统由于会在棱镜内部发

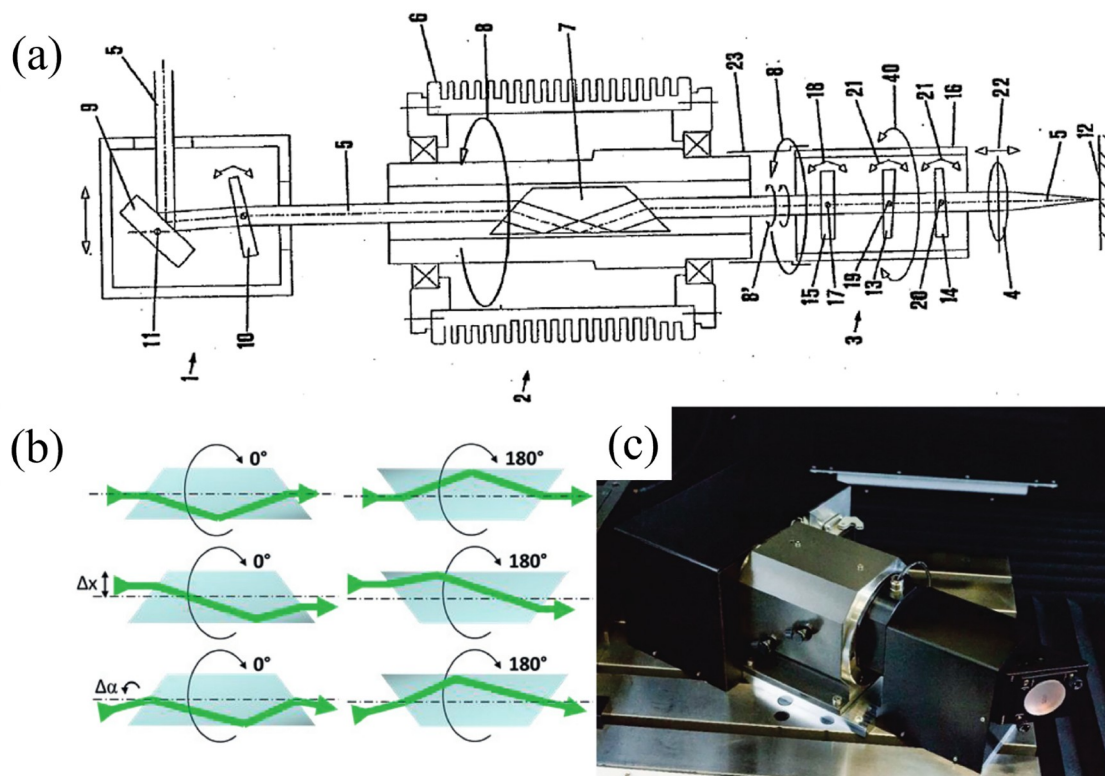


图 11 (网络版彩图)德国夫琅和费激光技术研究所的基于道威棱镜的旋切头^[51-53]。(a) 专利光路示意图; (b) 道威棱镜旋转原理示意图; (c) 实物图

Figure 11 (Color online) The Dove prism-based rotary cutting head from the Fraunhofer Institute for Laser Technology in Germany [51-53]. (a) Schematic diagram of the patented optical path; (b) schematic diagram of the Dove prism rotation principle; (c) photograph of the actual device.

生全反射, 并且光路中有反射镜来改变偏振距离, 因此需要考虑光束的偏振态, Wawers等人在该系统中添加了一个1/2波片和一个1/4波片, 并且1/2波片随道威棱镜一起旋转以根据旋转方向同步改变光束偏振态, 来保证光束的偏振态不变. 另一种光束偏振态调控思路是使用线偏振光, 由于光束在旋转时会自转, 因此在主要应用的打孔领域只需保证在加工孔一圈的各个位置上光束的偏振方向沿径向, 即可实现在圆周方向各点材料对激光的吸收率相同.

2.3 透射式加工系统应用进展

透射式旋切系统凭借更紧凑的机械结构和较好的回转对称性, 易于实现高速旋切, 在解决高质量、高深径比及难加工材料制孔问题方面有较好的应用前景.

西北工业大学^[54]、中国航空制造技术研究院^[55]、西安光学精密研究所^[56]和哈尔滨工业大学^[57,58]的学者使用三光楔和双光楔+一片平行平板等三光学元件的方案分别对柴油机喷嘴、镍基合金和树脂基碳纤维复合材料(carbon fiber reinforced plastics, CFRP)进行了孔加工, 如图12所示. 中国航空制造技术研究院张晓兵使用皮秒激光在4 mm的镍基合金样件上加工出了无锥孔, 孔的深径比高达20:1; 哈尔滨工业大学黄怡晨采用两步旋切钻孔的策略, 先利用高能量密度快速去除材料, 后利用低能量密度、高重叠率的光束对孔壁进行修整. 通过该种加工方式优化后, 镍基合金孔壁表面粗糙度Sa从0.65 μm 降低至0.42 μm . 该方法在加工C/C复合材料时同样极为有效, 使用响应面法对多参数进行优化后, 对比只螺旋钻孔、多次螺旋钻孔和螺旋+环切加工方法发现可以有效降低孔侧壁粗糙度. 然而飞秒激光配合光楔+平板方案在加工效率上仍有一定瓶颈, 使用该方案加工2 mm厚的CFRP材料时, 耗时15 min, 加工效率较低, 这可能是由于光束入射倾斜平行平板导致的能量损耗.

随着多光楔或光楔组+平板组方案的不断完善和发展, 国内外学者利用该类系统, 在新型旋切策略的提出、微孔几何形貌和质量的控制以及大深径比高效加工等方面取得了突破性进展. 受发展较早的影响, 德国斯图加特大学^[40]和LMTB公司^[45,46]借助各自开发的装备率先进行了实验探究, 成功在不锈钢板、铝板、氧化铝板、熔融石英板上加工出了无锥和倒锥孔. 由于加工材料厚度较薄, 因此加工时间都较短, 但很好地

验证了该类系统在控制轨迹和加工几何形貌上的可行性. 在此基础上, 国内学者进一步探索了该类系统在厚壁金属如不锈钢、钴基合金等和碳纤维陶瓷基或碳基复合材料加工中的潜力. 西安光学精密研究所的Wang等人^[48]与中科中涵激光设备股份有限公司的刘华等人^[59]分别验证了使用光楔组+平板组和四光楔的方案可以加工汽车喷油嘴油孔, 孔径都在200 μm 左右. 如图13(a)和(b)所示, 也验证了该类加工系统对于大厚度不锈钢孔加工的能力, 在6 mm厚的不锈钢上实现了深径比20:1的微孔加工. 华东师范大学的Qin等人^[31]利用四光楔系统的动态补偿能力, 在2 mm厚钴基高温合金上实现了从正锥、零锥到负锥孔的自由调控, 如图13(c)所示, 通过轨迹补偿, 微孔入口圆度达到98.76%, 出口圆度达到96.43%. 显著提升了微孔圆度.

随着航空航天热端部件对耐高温、轻量化材料需求的增加, 研究重点逐渐从金属延伸至极难加工的碳基/陶瓷基复合材料领域. 针对碳纤维陶瓷基复合材料(C/SiC和SiC/SiC), 传统的加工方式极易产生纤维拔出与层间开裂. 国内多所高校团队利用透射式旋切加工系统开展了从基础机理到工艺策略的系统性研究, 加工结果如图14所示. 西北工业大学Liu等人^[60-63]和Li等人^[64]较早地开展了相关工艺研究, 他们研究侧重于参数(能量密度、速度、重叠率等)对孔型质量的影响规律, 以及从皮秒到飞秒的演进, 这为后续研究奠定了机理基础. 大连理工大学Yang等人^[65]、董志刚等人^[66]、Li等人^[67]和杨峰^[68]在此基础上使用了新的工艺策略, 使用两步法在3 mm厚的SiC/SiC复合材料上加工出了锥度小于0.02°的近乎零锥度微孔, 孔壁粗糙度降低至3.5 μm 以下, 且有效抑制了热影响区与分层缺陷. 为了加工倾斜无锥孔, 采用倾斜旋切工艺, 在2.4 mm SiC/SiC复合材料上加工出直径500 μm 、倾斜45°的高质量斜孔. 青岛理工大学Zhang等人^[69]使用紫外纳秒激光进行加工烧蚀机理的探究, 尽管纳秒激光的热效应通常较强, 但该研究发现, 紫外激光还能够加工出内壁光滑、无明显缺陷的通孔, 且在水平纤维取向区域的圆度高达97%, 为低成本光源在复合材料精密制孔中的应用提供了实验依据.

基于道威棱镜的旋切系统由于集成度与实用度较高, 对使用该系统进行各种材料的加工研究同样丰富. 德国夫琅和费激光技术研究所的Uchtmann等人^[70]和德国亚琛工业大学的He等人^[71-75]对道威棱镜旋切头

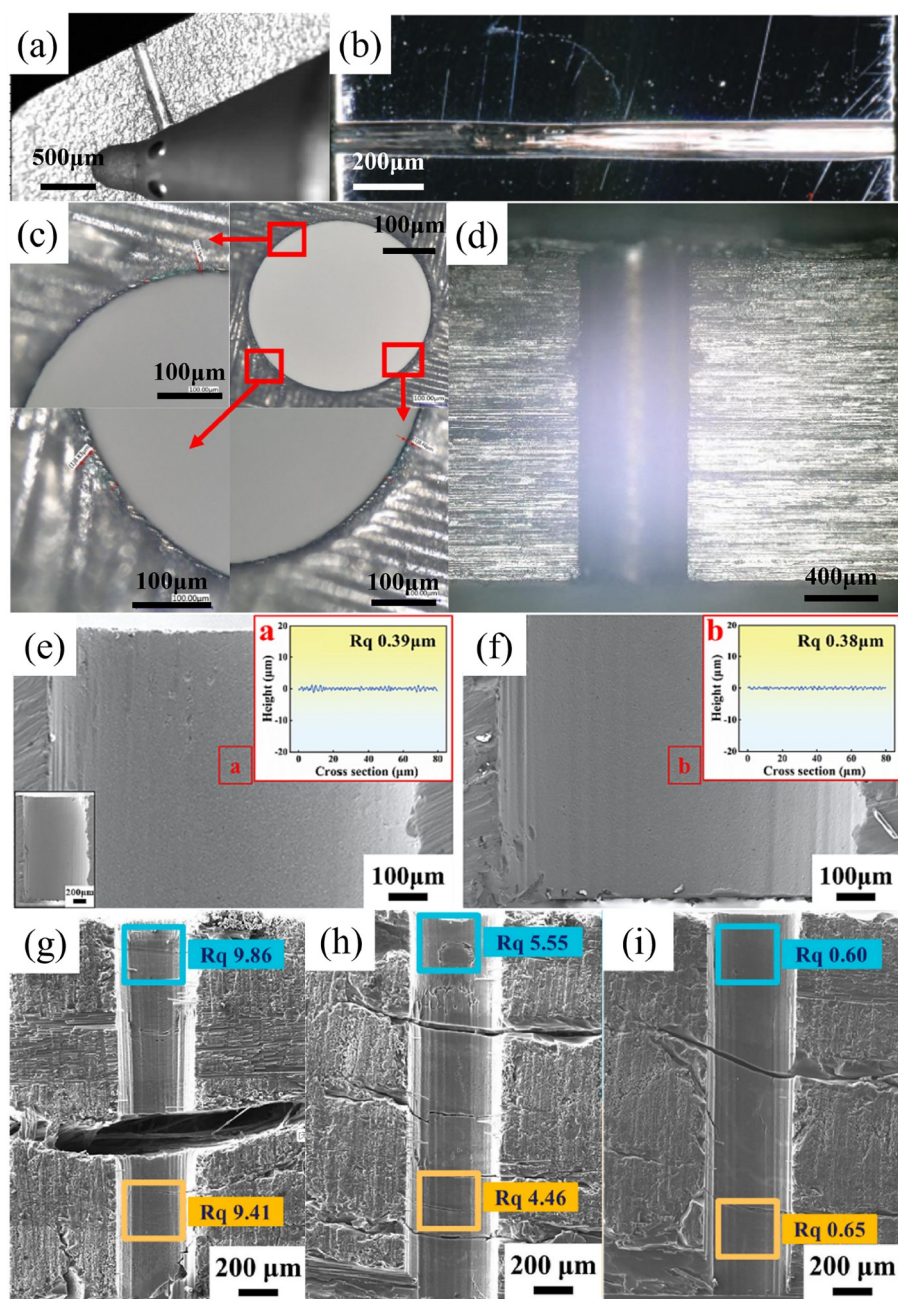


图 12 使用三光楔或双光楔和一片平板等方案加工结果^[54-58]。(a) 飞秒激光加工的柴油机喷嘴倒锥孔截面图; (b) 皮秒激光加工镍基合金无锥孔截面图; (c), (d) 双光楔+平行平板加工CFRP孔入口与截面图; (e), (f) 双光楔+平行平板加工镍基合金孔上下部截面图; (g)~(i) 双光楔+平行平板不同工艺加工C/C复合材料孔截面图

Figure 12 Processing results using three or two laser wedges and a plate ^[54-58]. (a) Cross-sectional view of the inverted conical hole of a diesel engine injector processed by femtosecond laser; (b) cross-sectional view of a non-tapered hole processed in a nickel-based alloy using picosecond laser; (c), (d) inlet and cross-sectional view of CFRP hole processed by two-way laser wedge and parallel plate; (e), (f) cross-sectional views of the upper and lower parts of a hole in a nickel-based alloy processed using a double optical wedge and parallel plate; (g)~(i) cross-sectional images of holes in C/C composite materials processed using different techniques with double optical wedges and parallel plates.

的应用进行了深入的研究。面对大深径比与变截面内腔的加工挑战, 他们提出了适应性能量沉积理论。该

理论的核心为利用道威棱镜配合动态光楔进行加工, 调控激光在螺旋路径上的能量密度分布。He等人在

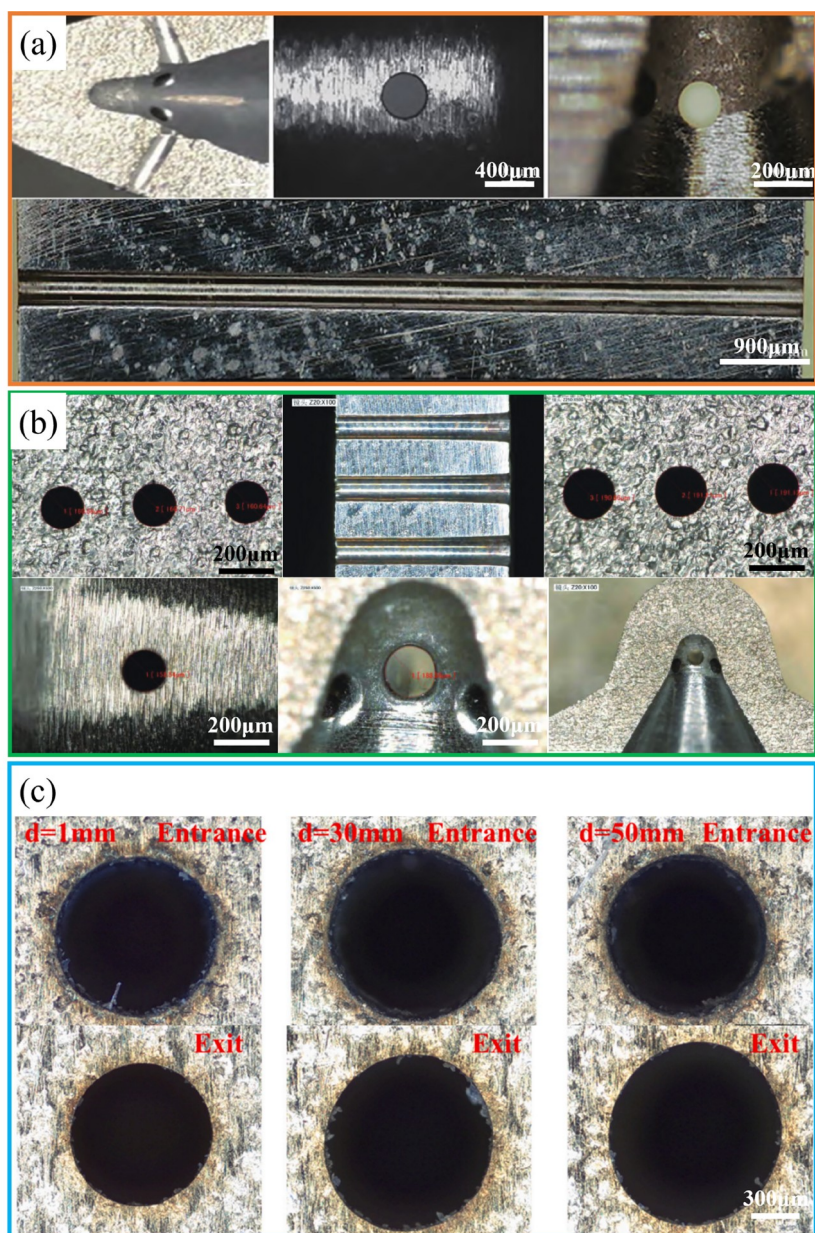


图 13 使用四光楔或双光楔和平板组方案加工结果. (a), (b) 喷油嘴和 6 mm 不锈钢平板件加工结果^[48,59]; (c) 三种锥度孔出入口形貌图^[31]

Figure 13 Processing results using a quadruple wedge or double-wedge and double-plate. (a), (b) Machining results of fuel injectors and 6 mm stainless steel plate parts ^[48,59]; (c) inlet and outlet morphology diagrams of three types of tapered holes ^[31].

1 mm 厚的不锈钢板上, 通过单侧加工成功制造出了具有先收敛后发散特征的三维孔, 如图 15(a) 和 (b) 所示. 汇聚部分的角度可以达到 90° 以上. 随后 He 等人制定并采用了多步骤的激光焦点在深度方向上连续移动的策略, 在 2 mm 厚的不锈钢板上加工出了深径比为 20:1 的孔, 如图 15(d) 所示.

苏州大学的林恩旻^[76]与中南民族大学的刘晓东等人^[77,78]采用了基于该类型旋切系统的皮秒旋切加工平台, 以不锈钢为对象系统研究了脉冲能量、离焦量及重复频率对微孔形貌的影响. 通过光路追踪法得到了旋切制孔的孔径和光楔的旋转角之间的关系, 并且分析了反射镜的平移距离对微孔锥度的影响. 但实验

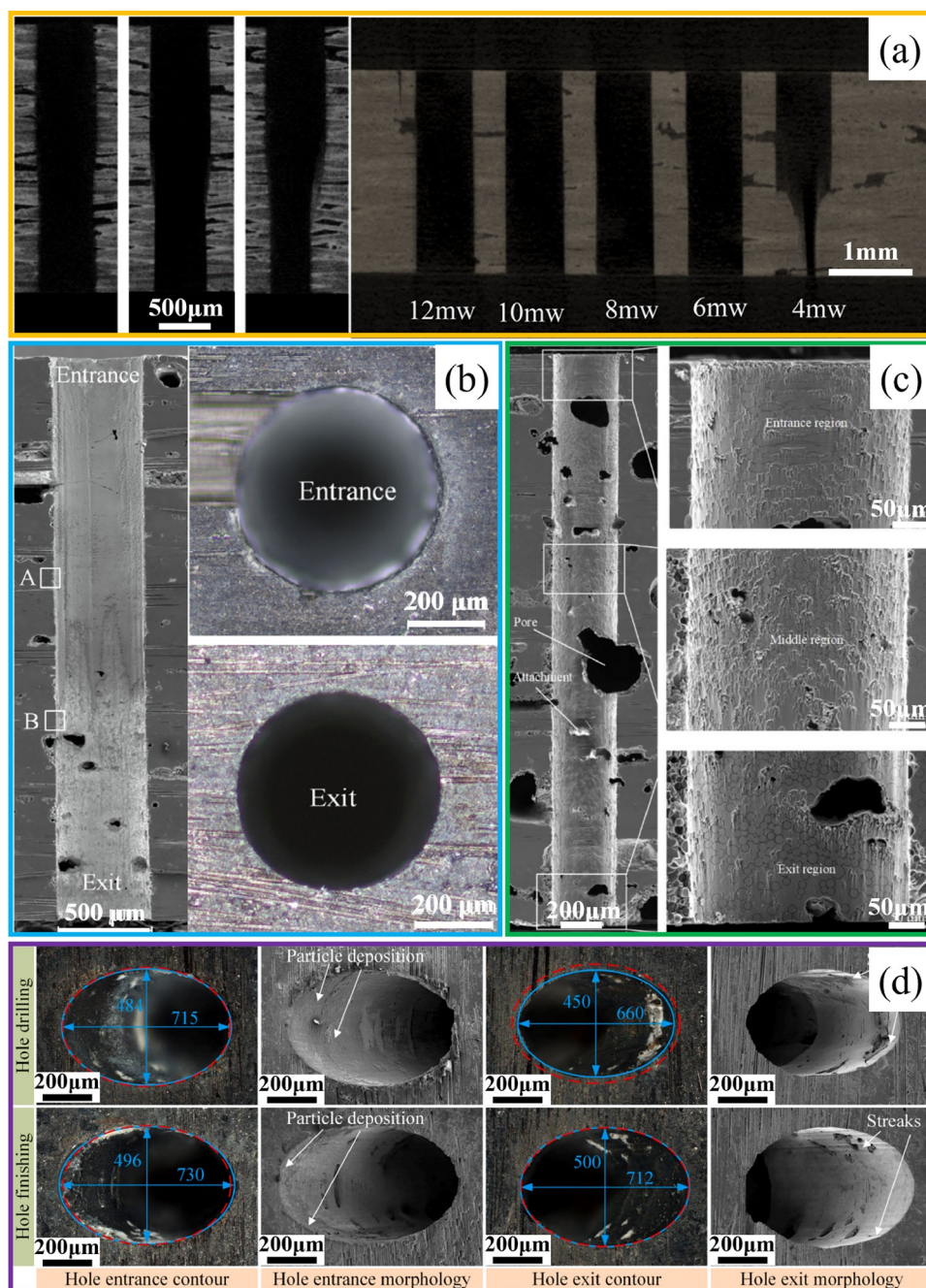


图 14 双光楔和双平行平板方案旋切头加工结果. (a) 皮秒激光在 3 mm C/SiC 和 2 mm SiC/SiC 复合材料上加工孔截面图^[61,63]; (b), (c) 飞秒激光在 3 mm SiC/SiC 复合材料上加工的无锥直孔出入口与截面图^[65,66]; (d) 飞秒激光在 2.4 mm SiC/SiC 复合材料上加工的无锥斜孔出入口^[67]

Figure 14 Machining results using a double-wedge and double-parallel-plate rotary cutting head. (a) Cross-sectional view of holes machined in 3 mm C/SiC and 2 mm SiC/SiC composite materials using a picosecond laser ^[61,63]; (b), (c) entrance, exit, and cross-sectional views of taper-free straight holes machined in 3 mm SiC/SiC composite material using a femtosecond laser ^[65,66]; (d) entrance and exit views of a taper-free inclined hole machined in 2.4 mm SiC/SiC composite material using a femtosecond laser ^[67].

发现在 1 mm 厚的样件上可以加工出质量较好的孔, 而在 1.5 mm 厚样件上只能加工出正锥孔, 2 mm 样件孔无

法加工穿透. 为了实现更加复杂的孔型, 清华大学的 Zhang 等人^[79]通过调制光束自旋相位与公转轨迹的耦

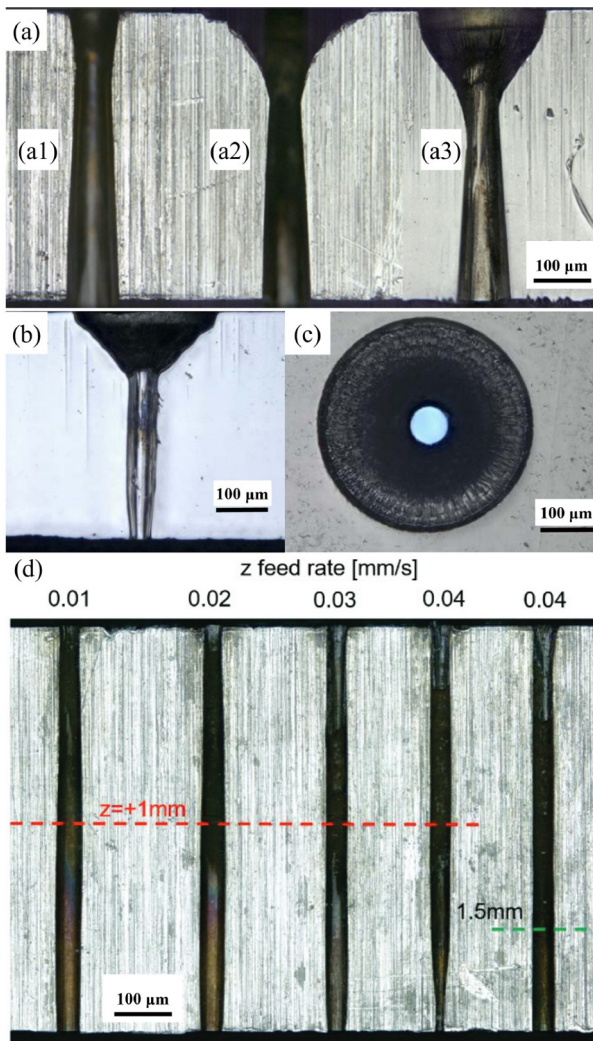


图 15 基于道威棱镜旋切头使用飞秒激光在不锈钢上的加工结果^[72-74]。(a) 1 mm材料加工的三种孔截面图; (b), (c) 0.5 mm材料加工的“漏斗形”孔截面和入口图; (d) 2 mm材料加工的非锥形孔截面图

Figure 15 Results of machining on stainless steel using a femtosecond laser with a Dove prism rotary cutting head^[72-74]. (a) Cross-sectional views of three holes processed in 1 mm thick material; (b), (c) cross-sectional and entrance views of a “funnel-shaped” hole processed in 0.5 mm thick material; (d) cross-sectional view of a non-tapered hole processed in 2 mm thick material.

合关系, 在不锈钢上制造了一系列孔径0.6 mm的圆形、三角形、矩形和菱形的微孔, 孔入口端、出口端和侧壁光滑, 如图16(a)所示。在此基础上, 清华大学的阿古文等人^[80]进一步建立了道威棱镜旋切系统中孔径与锥度的数学映射模型, 在0.5 mm厚的黄铜板上加工出了孔径为100 μm的无锥孔, 用时11 s。但孔入口形貌均较差, 有明显的损伤和残渣堆积现象。美国内布拉

斯加大学的Zhu等人^[81]利用飞秒激光配合道威棱镜旋切系统, 实现了具有垂直侧壁的毫米级几何结构加工。该研究通过对倾斜光束加工进行深入探索, 发现大倾斜角度可以使入口边缘过渡宽度减小到10 μm以下, 从而得到具有锐利入口的加工结果, 如图16(b)所示。

针对航空发动机叶片的高效制孔需求, 湖南大学的Li等人^[82]提出了一种高效一步旋切的加工方法。该方法采用一次性贯穿加工方法, 在保证孔壁质量较好的同时显著提升加工效率。但是这种加工方法只能加工较薄材料, 加工0.8 mm厚的镍基合金无锥400 μm通孔仅需3~5 s。而在超高温材料领域, 哈尔滨工业大学的Wang等人^[83]使用道威棱镜旋切头对碳纤维增强超高温陶瓷基复合材料进行了烧蚀加工, 但目前研究尚浅, 实验验证了旋转光学系统在抑制超高温陶瓷表面氧化与微裂纹扩展方面的适用性, 为新一代高超声速飞行器热防护系统的制造奠定了工艺基础。

目前来看, 虽然已有许多研究人员对几种方案的透射式光束调控加工系统的实际加工应用进行了探索和研究, 成功实现了加工结构的无锥度甚至负锥度, 但是在调控和优化加工质量与加工效率方面研究依旧较少, 加工结果的质量与效率尚不能满足需求。目前对于难加工材料的研究也大多较薄, 深径比较小, 仍需进一步深入研究。在现有的几种方案系统中, 德国夫琅和费激光技术研究所开发的基于道威棱镜的旋切头集成度、精度等均相对较高, 被更多的研究学者选择作为加工系统, 其次为西安中科微精光子制造科技有限公司开发的加工系统。

3 反射式光束调控加工系统

相比于透射式旋切系统, 反射式激光光束调控系统主要通过多组扫描振镜的级联与协同偏转, 实现对光束在三维空间中的控制。由于反射镜片质量轻、转动惯量小, 该类系统具备极高的动态响应带宽, 能够支持复杂的非圆轨迹扫描与大视场跳变加工; 同时, 全反射式的光路设计有效避免了高功率激光在透射介质中产生的热效应与能量损失, 使其成为超快激光精密制造领域的重要技术。传统的二维振镜扫描系统通常由X、Y两个正交反射镜与F-theta场镜组成。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, 目前产品

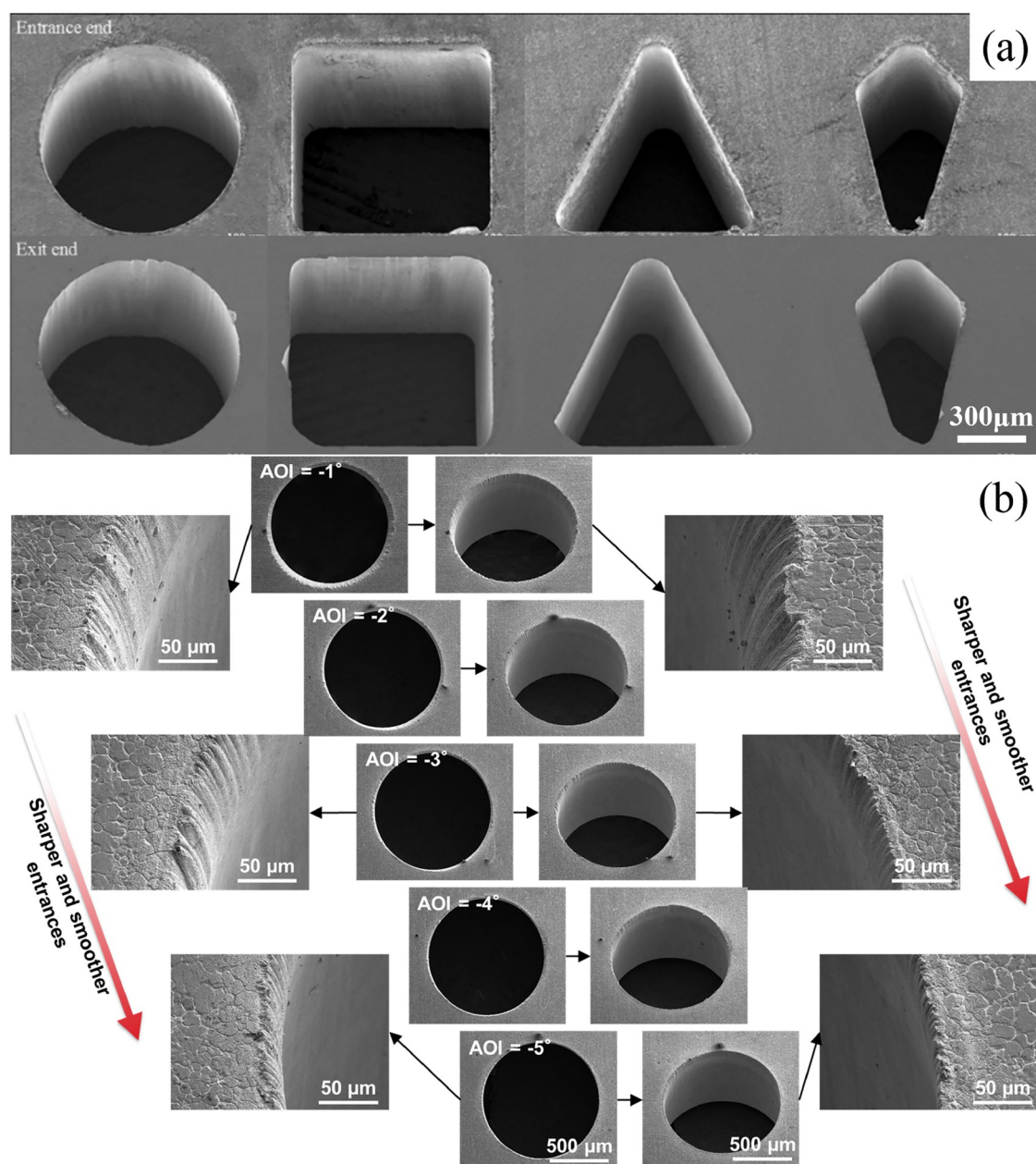


图 16 (网络版彩图)基于道威棱镜的旋切头在不锈钢上的加工结果. (a) 四种不同孔型孔出入口形貌^[79]; (b) 光束倾斜攻角与入口锐利程度变化关系^[81]

Figure 16 (Color online) Machining results on stainless steel using a rotary cutting head based on a Dove prism. (a) Entrance and exit morphologies of four different hole types ^[79]; (b) relationship between beam tilt angle and entrance sharpness ^[81].

已较多^[84]。但与双光楔方案一样,无法得到真正无锥的结构。为了实现光束焦点位置与入射姿态的控制,研究人员发展出了多维反射式激光光束调控加工系统构型,五维反射式激光光束调控加工系统也被称为五维振镜,分别可以控制光束焦点的三轴位置与光束的

两个方向倾角,一半为在二维或三维振镜的基础上增加改变光束偏置光轴距离的模块,一半由几片反射镜构成,具体改变原理如图17所示,通过改变两片平行反射镜与光轴的角度,从而改变从两片反射镜出射光束与原光轴的距离。

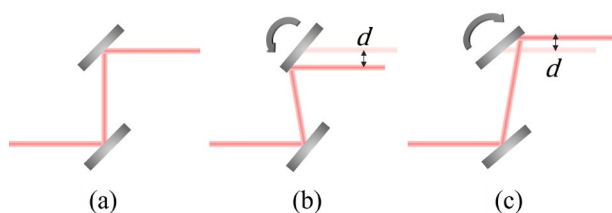


图 17 (网络版彩图)反射式光路调节偏置距离示意图。(a)默认状态光路; (b), (c) 反射镜同步旋转产生偏置光路

Figure 17 (Color online) Schematic diagram illustrating the adjustment of the offset distance in a reflective optical path. (a) Default optical path; (b), (c) biased optical path generated by synchronous rotation of the mirrors.

3.1 国外反射式调控加工系统与应用进展

目前德国、美国及比利时的多家光电企业已推出了成熟的商用化产品, 其技术路线主要分为集成式五轴扫描头与模块化旋切单元两大类。

德国Novanta(原Arges)公司是该技术的早期开拓者。其核心技术为一篇2008年公开的一项专利^[85], 该专利采用双平行平板方法结合二维振镜的混合结构, 搭配上动态聚焦模块实现了五维激光加工。其改变偏置距离与透射式方案类似, 利用两个偏摆的平行平板控制光束的偏置距离, 在其后使用二维振镜电机获得光束的倾斜, 从而分别控制在聚焦之后的攻角和加工半径。基于此专利开发的Precession Elephant 3系列扫描加工头¹⁾如图18(b)所示, 已成为当前工业界的标杆产品。该系统可以支持绿光到红外波段, 可以使光束实现 $\pm 9^\circ$ 的攻角调整, 并且可以将光斑压缩至 $9\ \mu\text{m}$, 因此可以进行更精细的加工。加工圆孔的旋转速度可以在 $18000\sim 39000\ \text{r/min}$ 之间变换, 适用于产业界高密度探针卡或燃油喷嘴的加工。根据产品网站的产品技术规格报告, 新一代产品集成了圆偏振控制单元, 确保激光能量在任意入射角度下都能均匀吸收, 从而进一步提高孔圆度。

德国SCANLAB公司的precSYS系列加工头则是采用纯反射路线, 支持绿光波段, 其核心是一篇2020年公开的一项专利^[86]。该专利将四片振镜两两一组, 一组用来控制激光摆角, 另一组用来控制激光偏离光轴

位置, 动态聚焦镜用于改变激光焦点位置, 该专利将计算单元、存储单元和监测反馈单元集成在一个系统中, 该公司根据专利开发了precSYS激光加工头^[87], 如图18(d)所示。可以使光束实现 $\pm 7.5^\circ$ 的攻角调整, 最高旋转速度可达 $39000\ \text{r/min}$ 。该产品可以执行离线精细校准, 并且可以实时补偿长期运行产生的热漂移, 有着较好的工艺稳定性。

美国Aerotech公司的AGV5D加工头²⁾则以其卓越的运动控制算法著称。它可以使系统在大范围曲面工件上连续加工出无拼接痕迹的复杂微结构, 可以使光束实现 $\pm 9^\circ$ 的攻角调整, 在介入性心血管植入、微电子加工方面广泛运用。还有一些公司同样有相似功能的产品, 但暂时未有详细信息和报道, 如美国佳能公司³⁾、比利时LASEA公司LS-Precess模块⁴⁾、德国GFH公司GL.Trepan模块⁵⁾等。

五维振镜加工系统与棱镜和平板为主的旋切头加工系统在光束偏振态的调控方式上同样相近。这是由于五维振镜不会使光束发生类似经过道威棱镜一样的自转现象, 因此五维振镜在扫描时光束同样进行“平移”运动。在这个过程中光束的偏振态不随“平移”过程而改变, 因此无需相对更复杂的随时改变光束偏振态的设计, 一般仅需固定的波片补偿反射所改变的偏振态。但为了保证偏置模块与倾斜模块的控制可以同步, 一般会全部采用振镜电机带动反射镜或平行平板运动, 以保证控制协议共用XY2-100或SL2-100协议。五维振镜与旋切头的区别在于, 旋切头主要通过机械电机的旋转带动光学元件进行运动实现圆形的轨迹扫描, 而五维振镜与普遍使用的二维振镜近似, 通过光束的指向与位置在两个正交方向上的改变近似插补出圆形轨迹。因此两种方式在实现不同形状的结构加工时各有优劣。对于电机带动旋转的方式, 圆形扫描速度较快, 即使较小的圆也可以保证同样的转速和精度, 但实现其他形状轨迹的扫描有较高难度; 五维振镜采用插补实现的圆形轨迹, 较小圆形轨迹的高精度高速扫描加工一直为振镜行业的难题, 但扫描如菱形、矩形和三角形等形状时较为容易实现。

1) <https://novantaphotonics.com/product/precession-elephant-iii>.

2) <https://www.aerotech.com/product/agv5d>.

3) <https://www.photonicsonline.com/doc/5-axis-micro-drilling-scanhead-0001>.

4) <https://www.lasea.com/modules/ls-precess>.

5) <https://gfh-gmbh.de/en/laser-machines/hardware-modules/gl-trepan>.

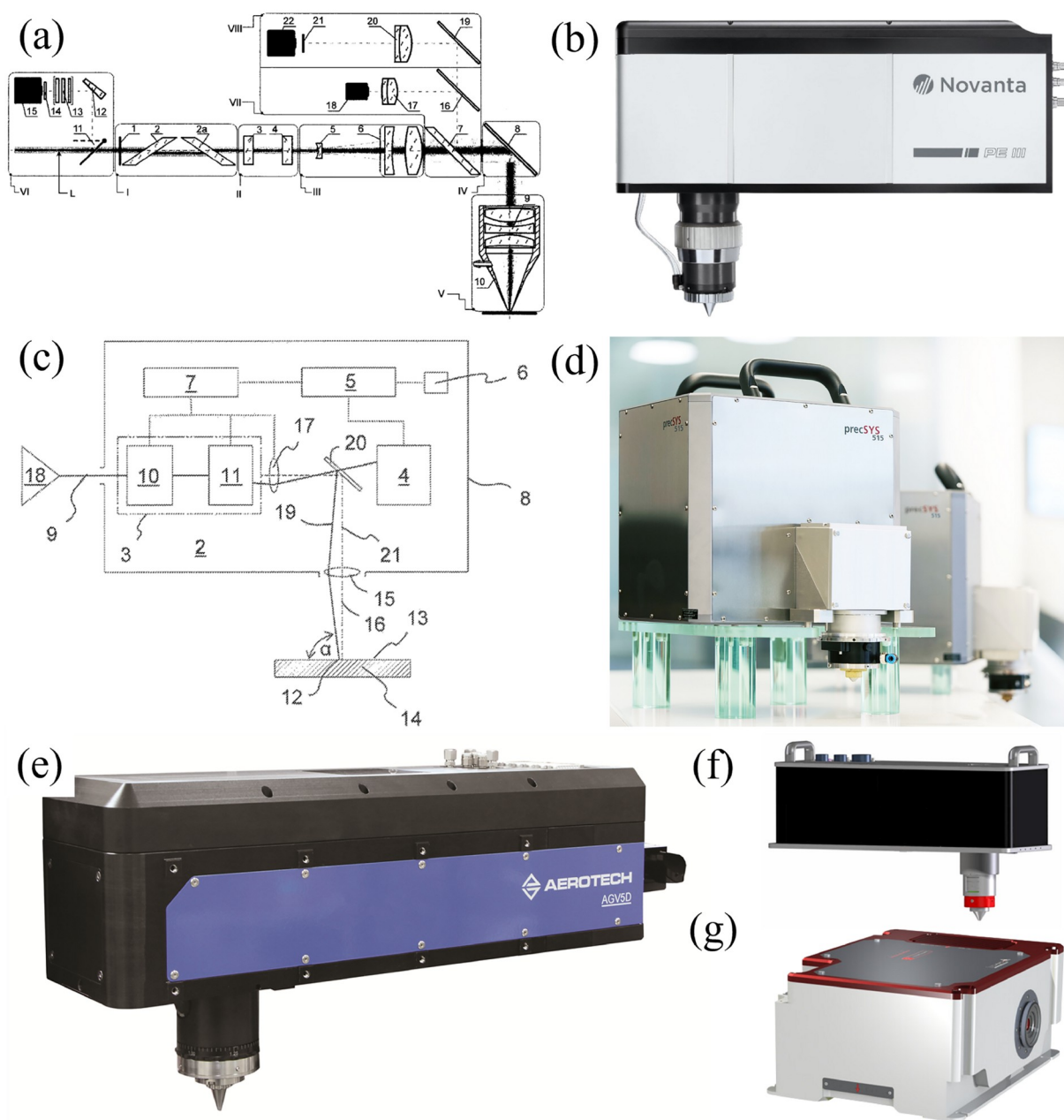


图 18 国外多家公司的反射式光束调控加工系统^[85-92]. (a), (b) 德国Novanta公司的加工头光路示意图和产品图; (c), (d) 德国SCANLAB公司的加工头光路示意图和产品图; (e) 美国Aerotech公司的加工头; (f) 美国佳能公司的加工头; (g) 比利时LESEA公司的LS-Precess模块

Figure 18 Several reflective beam shaping and processing systems from international companies [85-92]. (a), (b) Schematic diagram and product image of the processing head from Novanta, Germany; (c), (d) schematic diagram and product image of the processing head from SCANLAB, Germany; (e) processing head from Aerotech, USA; (f) processing head from Canon, USA; (g) LS-Precess module from LESEA, Belgium.

五维振镜与透射式在轨迹规划上的根本区别在于五维振镜的控制调控更加复杂, 由于五维振镜可以加工异形结构, 因此需要计算结构的每一点所需的“半径”与“攻角”, 并在路径上连接, 因此需要对多振镜电

机进行联动控制。从轨迹与对应轨迹点位所需的“攻角”, 到对应的正交方向偏置距离与倾角, 再到最终几个振镜电机的分别运动这个过程是否在线实时解算尚未有披露, 动态加工中不同电机同步误差的解决方法

也需进一步发掘与研究。

国外学者使用上述高性能的五维振镜加工头实现了多种复杂微结构的精密制造。意大利帕尔马大学的Romoli等人^[88]使用Novanta的加工头对不锈钢进行钻孔加工,他们提出了一种基于钻导向孔、扩孔和倾斜精加工孔的三步微孔钻削循环。实验得出,该种钻孔循环方法可以在3.75 s内在350 μm 厚的不锈钢板上钻出孔径为180 μm 的无锥孔,如图19(a)和(b)所示。在解决高压燃油喷嘴的倒锥孔加工难题上,德国通快激光的Führa等人^[89]与SCANLAB合作,利用五维振镜系统开展了高精度打孔实验。实验表明,通过精确控制光束的攻角,可以在1 mm厚的不锈钢板上稳定加工出入口直径100 μm 、出口直径可调的倒锥孔,孔圆度较好,可以满足喷嘴要求。针对复杂微机械零件的切割应用,瑞士通快机器的Auerswald等人^[90]研究了光束倾斜对切缝锥度的修正作用。在一块0.2 mm厚的黄铜板上,实验切割出了复杂的微机械轮廓,如图19(c)和(d)所示。SCANLAB官方的应用案例^[91]中也展示了使用precSYS加工头在300 μm 厚的钢板上加工出了任意形状的结构,如图19(e)所示。

3.2 国内反射式调控加工系统与应用进展

近年来,国内研究机构在反射式光束调控领域取得了显著突破。华中科技大学的邓磊敏等人^[91]开发了

一种双振镜级联的激光扫描光学系统,该系统利用双振镜组成了一种新型激光倾斜旋转加工系统,该系统包括动态聚焦模块、光束平行平移模块、二维扫描模块和聚焦模块。使用该系统在250 μm 的氮化硅材料上实现了55 $\mu\text{m} \times 55 \mu\text{m}$ 的正锥、负锥、无锥方形微孔以及三角形、五边形、六边形无锥孔^[92],如图20(b)所示。这种五维振镜加工系统还可以用于加工大口径孔,在3.6 mm厚的GFRP复合板上,该系统成功加工出了直径10 mm的大口径直壁孔^[93],验证了这种结构的五轴振镜的具有足够大的加工范围。

西安交通大学赵万芹等人^[94]和Li等人^[95]针对五维联动加工中光束指向精度难以保证的难题,团队提出基于矢量法的光束追踪理论,基于此理论开发了一种由六片振镜构成的五维振镜加工系统,如图20(d)所示,装置采用模块化设计,光路依次由转折模块、偏移模块、扩束模块、平面扫描模块及聚焦模块组成,建立了包含所有反射镜位置与姿态的4 $\times$ 4变换矩阵,推导出了系统控制参数与输出光束空间状态的精确映射关系。该系统为复杂曲面上三维微结构的零误差制造提供了坚实的理论与硬件基础。

厦门大学的王禹祺等人^[96]也是采用这种六片反射镜方案开发的扫描加工头,针对2 mm厚TC4钛合金开展了高深径比打孔研究。通过实验探究得出了多工艺参数对孔锥度、圆度、热影响区等的影响,成功加

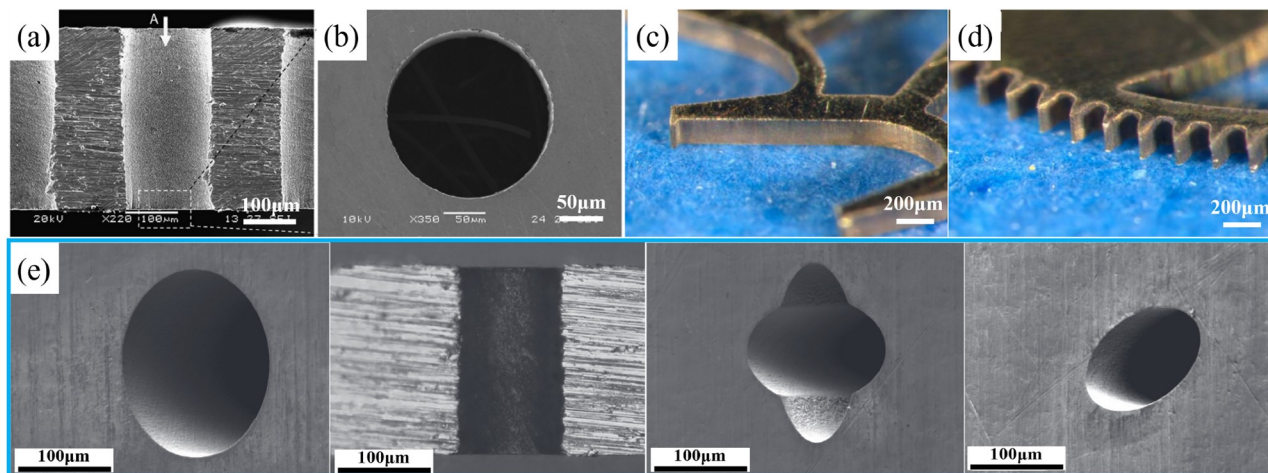


图 19 (网络版彩图)国外五轴振镜扫描加工头加工结果。(a), (b) 350 μm 厚不锈钢板无锥孔截面图与入口形貌^[88]; (c), (d) 0.2 mm厚黄铜板切割出的复杂微机械轮廓^[90]; (e) 350 μm 厚钢板加工的圆孔、异形孔、斜孔形貌^[87]

Figure 19 (Color online) Processing results of a five-axis galvanometer scanning processing head from abroad. (a), (b) Cross-sectional view and entrance morphology of a tapered hole in a 350 μm thick stainless steel plate ^[88]; (c), (d) complex micromachined contours cut from a 0.2 mm thick brass plate ^[90]; (e) morphology of circular holes, irregular holes, and slanted holes processed in a 350 μm thick steel plate ^[87].

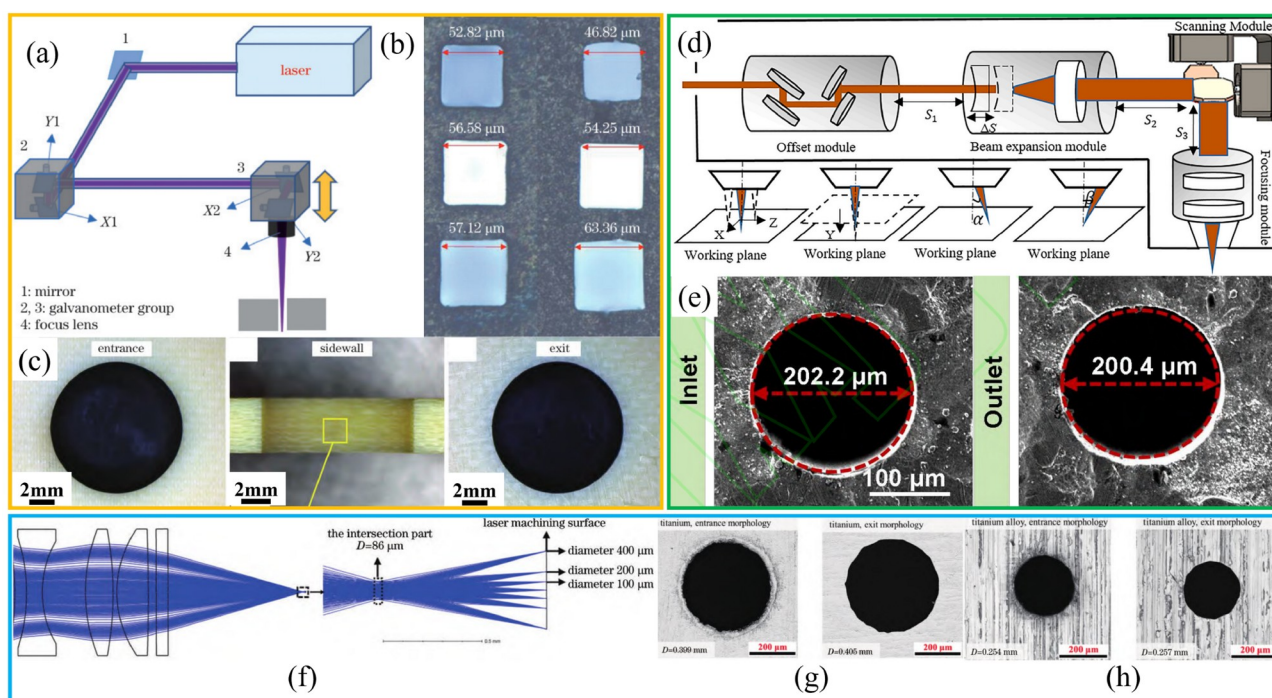


图 20 国内五轴振镜扫描加工头应用进展. (a) 华中科技大学双振镜加工头光路示意图^[92]; (b) 不同光束偏移距离下不同锥度微孔的入、出口形貌^[92]; (c) 在3.6 mm的玻璃纤维复合材料板上加工的直径10 mm孔入口、侧壁和出口形貌^[93]; (d) 西安交通大学五轴振镜加工系统光路示意图^[95]; (e) 厦门大学使用五轴振镜在2 mm TC4钛合金板加工微孔入、出口形貌^[96]; (f) 中国工程物理研究院激光聚变研究中心扫描旋切光路示意图^[2]; (g), (h) 振镜扫描旋切加工钛和钛合金板不同大小孔入、出口形貌^[2]

Figure 20 Progress in the application of domestic five-axis galvanometer scanning processing heads. (a) Schematic diagram of the optical path of the dual-galvanometer processing head from Huazhong University of Science and Technology [92]; (b) inlet and outlet morphologies of micro-holes with different taper angles under different beam offset distances [92]; (c) inlet, sidewall, and outlet morphologies of a 10 mm diameter hole machined on a 3.6 mm glass fiber composite plate [93]; (d) schematic diagram of the optical path of the five-axis galvanometer processing system from Xi'an Jiaotong University [95]; (e) inlet and outlet morphologies of micro-holes machined on a 2 mm TC4 titanium alloy plate using a five-axis galvanometer from Xiamen University [96]; (f) schematic diagram of the scanning rotary cutting optical path from the Laser Fusion Research Center of the China Academy of Engineering Physics [2]; (g), (h) inlet and outlet morphologies of different sized holes machined on titanium and titanium alloy plates using galvanometer scanning rotary cutting [2].

工出深径比达10:1的无锥孔, 如图20(e)所示。

中国工程物理研究院的Zhang等人^[2]设计了一种基于扫描振镜和摄远结构的旋切光路结构。该系统通过加入了一组对称透镜将镜头长度大幅缩短, 可以用于100~400 μm 孔径范围的无锥加工, 其光路结构如图20(f)所示, 研究人员使用该加工头在2 mm的钛合金和钛金属上分别实现了0.25和0.4 mm的无锥孔加工。

国内一些企业也相继开展激光五维加工系统开发研制, 如大族激光科技产业集团股份有限公司、北京金橙子科技股份有限公司、深圳拓博瑞激光科技有限公司、深圳市单色科技有限公司等。但对这些企业开发的加工系统相关信息和报导有限, 并未披露光路与结构。

目前来看, 虽然已有了多种反射式光束调控加工系统, 但是国外已知信息中加工的目标材料均较薄, 国内现有加工结果相比国际虽稍厚, 但仍不满足许多应用领域的需求。几种五维振镜加工系统中, 国外的产品Novanta的Elephant系列和SCANLAB的precSYS相比国内开发的加工系统集成度、精度等均更高。国内开发的系统大多还处于实验与试加工阶段, 仍需要进一步的深入研究与开发。

4 总结与展望

激光微纳加工制造正朝着极端化、精细化与功能化的方向发展, 而激光光束多维空间调控技术是其中

表 1 激光光束空间调控加工系统多方面对比

Table 1 Multi-faceted comparison of laser beam spatial modulation processing systems

系统类型	生产/研发机构	产品/原型机	旋转速度 (r/min)	最大加工范围	同精度下系统 硬件成本	系统成 熟度
光楔与平板 系统	德国斯图加特大学IFSW	Wedge-prism-based helical drilling optics	—	—	中	较高
	西安中科微精	双光楔+双平行平板加工系统	≤3000	—		
	德国GFH	GL.Trepan	30000	—		
	德国Novanta	Koala 4D-Laser-Trepanning system	—	—		
道威棱镜系统	德国夫琅和费ILT	Dove-prism-based helical drilling optics	30000	1 mm ± 15°	低	高
反射扫描式 系统	德国Novanta	Precession Elephant3	39000	/, ±9°	高	较高
	德国Scanlab	precSYS 5-Axis Micromachining System	39000	2.5 mm, ±7.5°		
	美国Canon	MA-1010 Laser Trepanning Scan System	36000	/, 0°~20°		
	美国Aerotech	AGV5D 5-Axis Laser Micromachining System	48000	2 mm, ±9°		
	比利时Lesea	LS-Precess	30000	5 mm, -5°~7°		中
	大族激光	五轴加工系统	—	—		
	深圳单色		—	—		
	北京金橙子		—	—		
	深圳拓博瑞		—	—		

的核心。本文系统地梳理了光束空间调控技术的发展历程与不同方案的原理与实现方式，两种透射式系统与反射式系统的多方面差异对比总结如表1所示。透射式加工系统凭借电机带动光学元件可以实现较好的圆度，且可以实现高速的旋转加工，该路线适用于针对微小孔结构的高深径比、高圆度加工。当该路线与机床运动结合，适当调控后也可以用于切割加工场景。反射式系统优势在于振镜的高动态响应特性和不受电机旋转运动制约，因此可以实现多种异形结构的加工，在非对称非常规结构/轨迹加工时有独特优势。同时振镜偏摆范围较大，不受光学元件通光孔径的限制，可以有更大的加工视场进而加工更大的结构，具有较高灵活性，但小路径快速扫描的精度有待进一步提升。

总体来说，尽管激光光束多维空间调控技术已取得显著进展，但在面向未来的航空航天、微电子器件制造中，还面临着系统集成度、环境适应性及极限制

造能力的挑战。透射式加工系统能量衰减较高，对加工的极限能力限制较大；而反射式加工控制和误差补偿较难，加工扫描速度可能受电机带宽限制，多电机协同控制较难。未来可以进一步深入研究简化轨迹到运动之间的转化路径，开发更简单的系统降低系统能量衰减。目前的研究主要还聚焦于加工能力和加工效果，加工能力与效果尚未能充分满足需求，光束偏振态、光束整形、在线监测、在线误差检测补偿等功能均需集成到系统内。加工头与机床的联动控制，对大幅面高锥度等加工需求有较好的解决前景，五轴加工头与五轴机床联动可以获得更多的复杂结构。针对特殊材料或结构需求，使用空间光调制器调制激光或双光束耦合与加工头复合的“光场/脉冲调控+光束空间调控”加工也有较大的研究前景，可以解决许多极端加工需求。实际工业加工时复杂系统的长时间运行稳定性也需要着重研究并优化系统结构。

致谢 感谢李凯琳博士、申鹏博士和范润泽博士的有益讨论。

参考文献

1 Hasan M, Zhao J, Jiang Z. A review of modern advancements in micro drilling techniques. *J Manufacturing Processes*, 2017, 29: 343–375

- 2 Zhang J, Zhuo J, Jin H L, et al. Optical design of helical drilling system with ultrashort pulse laser based on scanning galvanometer (in Chinese). *Acta Opt Sin*, 2023, 43: 229–236 [张健, 卓瑾, 金会良, 等. 基于扫描振镜的超短脉冲激光旋切制孔光学系统设计. *光学学报*, 2023, 43: 229–236]
- 3 Tong H, Li Y, Zhang L, et al. Mechanism design and process control of micro EDM for drilling spray holes of diesel injector nozzles. *Precision Eng*, 2013, 37: 213–221
- 4 Okasha M M, Mativenga P T, Driver N, et al. Sequential laser and mechanical micro-drilling of Ni superalloy for aerospace application. *CIRP Ann*, 2010, 59: 199–202
- 5 Chao S C, Huang W C, Liu J H, et al. Oxidation characteristics of commercial copper-based lead frame surface and the bonding with epoxy molding compounds. *MicroElectron Reliability*, 2019, 99: 161–167
- 6 Dubey A K, Yadava V. Laser beam machining—A review. *Int J Machine Tools Manufacture*, 2008, 48: 609–628
- 7 Chichkov B N, Momma C, Nolte S, et al. Femtosecond, picosecond and nanosecond laser ablation of solids. *Appl Phys A*, 1996, 63: 109–115
- 8 Pattanayak S, Panda S. Laser beam micro drilling—A review. *Lasers Manuf Mater Process*, 2018, 5: 366–394
- 9 Poprawe R. Tailored Light 2: Laser Application Technology. Heidelberg: Springer Berlin, 2011
- 10 Nath A K. Laser drilling of metallic and nonmetallic substrates. *Compr Mater Process*, 2014, 9: 115–175
- 11 Yan Y, Ji L, Bao Y, et al. An experimental and numerical study on laser percussion drilling of thick-section alumina. *J Mater Processing Tech*, 2012, 212: 1257–1270
- 12 Zhao Z, Yu Y, Sun R, et al. Design of a femtosecond laser percussion drilling process for Ni-based superalloys based on machine learning and the genetic algorithm. *Micromachines*, 2023, 14: 2110
- 13 Zhang Z, Wang W, Jiang R, et al. Investigation on geometric precision and surface quality of microholes machined by ultrafast laser. *Optics Laser Tech*, 2020, 121: 105834
- 14 Zhang F, Wang J, Wang X, et al. Experimental study of nickel-based superalloy IN792 with femtosecond laser drilling method. *Optics Laser Tech*, 2021, 143: 107335
- 15 Sun X, Dong X, Wang K, et al. Experimental investigation on thermal effects in picosecond laser drilling of thermal barrier coated In718. *Optics Laser Tech*, 2019, 113: 150–158
- 16 Zhou X J, Xie H R, Xu J J, et al. Experimental study on femtosecond laser processing non-taper micro-holes in injection components of liquid rocket engines (in Chinese). *J Mech Eng*, 2024, 60: 357–366 [周熙杰, 谢合瑞, 徐静吉, 等. 飞秒激光加工液体火箭发动机喷注部件无锥度微孔试验研究. *机械工程学报*, 2024, 60: 357–366]
- 17 Zhang S Y, Zhou X J, Cui J L, et al. Experimental study on femtosecond laser processing non-taper microholes in nickel-based alloys (in Chinese). *Infrared Laser Eng*, 2024, 53: 10–19 [张书愿, 周熙杰, 崔健磊, 等. 飞秒激光加工镍基合金无锥度微孔试验研究. *红外与激光工程*, 2024, 53: 10–19]
- 18 Zhang S Y, Zhou X J, Xie H R, et al. Experimental study on femtosecond laser processing non-taper micro-group holes in nickel-based alloys (in Chinese). *J Mech Eng*, 2025, 61: 1–10 [张书愿, 周熙杰, 谢合瑞, 等. 飞秒激光加工镍基合金无锥度微群孔试验研究. *机械工程学报*, 2025, 61: 1–10]
- 19 Fan Z, He S, Yi L, et al. Femtosecond laser preparation and tensile behavior of taper/gully-free FCHs. *Int J Mech Sci*, 2026, 309: 110994
- 20 Wang X, Chen H, Li Z, et al. Helical drilling of carbon fiber reinforced polymer by a femtosecond laser. *Appl Opt*, 2022, 61: 302–307
- 21 Lin H X. Research and design of laser uniform line spot shaping system (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology. 2017 [林华鑫. 激光均匀线光斑整形系统的研究与设计. 硕士学位论文. 武汉: 华中科技大学. 2017]
- 22 Wang R, Wang K, Fan Z, et al. A comparative study on high pulse energy femtosecond laser drilling of high-aspect-ratio holes under different pressure conditions. *J Manufacturing Processes*, 2023, 85: 492–502
- 23 Liu B, Yan Y, Zhao J, et al. Research on hole depth in femtosecond laser deep micropore processing technology based on filament effect. *Optik*, 2022, 249: 168307
- 24 Jedrkiewicz O, Valetti D, Di Trapani P. Etching and drilling of through-holes in thin glass by means of picosecond Bessel beams. *SN Appl Sci*, 2019, 1: 1267
- 25 Yao Z, Jiang L, Li X, et al. Non-diffraction-length, tunable, Bessel-like beams generation by spatially shaping a femtosecond laser beam for high-aspect-ratio micro-hole drilling. *Opt Express*, 2018, 26: 21960
- 26 Xie Q, Li X, Jiang L, et al. High-aspect-ratio, high-quality microdrilling by electron density control using a femtosecond laser Bessel beam. *Appl*

Phys A, 2016, 122: 136

- 27 Mori S. Side lobe suppression of a Bessel beam for high aspect ratio laser processing. *Precision Eng*, 2015, 39: 79–85
- 28 Vettenburg T, Dalgarno H I C, Nylk J, et al. Light-sheet microscopy using an Airy beam. *Nat Methods*, 2014, 11: 541–544
- 29 Mei X S, Li K L, Zhao W Q, et al. Overview of laser self spatial dimensional processing systems (in Chinese). *J Mech Eng*, 2023, 59: 375–388 [梅雪松, 李凯林, 赵万芹, 等. 激光自身空间维度加工系统综述. *机械工程学报*, 2023, 59: 375–388]
- 30 Long Z. Research of laser micro-hole processing system based on double galvanometer group (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology. 2023 [龙宙. 基于双振镜组的激光微孔加工系统的研究. 硕士学位论文. 武汉: 华中科技大学. 2023]
- 31 Qin Z, Yang J, Niu J, et al. Precision control of hole morphology by modulating femtosecond laser beam track with a four-wedge drilling system. *Optics Laser Tech*, 2025, 192: 113972
- 32 Warger W C, Guerrero S A, Eastman Z, et al. Efficient confocal microscopy with a dual-wedge scanner. *Proc SPIE*, 2009, 7184: 71840D
- 33 Pan Y, Jiang Z H, Zhang W, et al. Rotating dual-wedge laser micro-hole processing device (in Chinese). China patent, CN101670486A, 2010 [潘涌, 姜兆华, 张伟, 等. 旋转双光楔激光微孔加工装置. 中国专利, CN101670486A, 2010]
- 34 Li A H, Gao X, Ding Y L. Comparison of refractive rotating dual-prism scanner used in near and far field. *Proc SPIE*, 2014, 9192: 91920Z
- 35 Gao F, Wang M. Adjustment technology of optical axis pointing by double optical wedges (in Chinese). *Opto-Electron Eng*, 2018, 45: 60–66 [高飞, 王苗. 双光楔光轴指向调整技术. *光电工程*, 2018, 45: 60–66]
- 36 Xie Y H. Design and research of laser drilling wedge scanning optical system (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology. 2011 [谢云辉. 激光打孔光楔扫描光学系统的设计与研究. 硕士学位论文. 武汉: 华中科技大学. 2011]
- 37 Wang Y L. Research on laser rotating drilling technology (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology. 2012 [王砚丽. 激光旋转打孔技术的研究. 硕士学位论文. 武汉: 华中科技大学. 2012]
- 38 Foehl C, Breitling D, Jasper K, et al. Precision drilling of metals and ceramics with short- and ultrashort-pulsed solid state lasers. *Proc SPIE*, 2002, 4426: 104–107
- 39 Foehl C, Dausinger F. High precision deep drilling with ultrashort pulses. *Proc SPIE*, 2003, 5063: 346–351
- 40 Dausinger F. Femtosecond technology for precision manufacturing: Fundamental and technical aspects. *Proc SPIE*, 2003, 4830: 471–478
- 41 Ashkenasi D, Kaszemeikat T, Mueller N, et al. Laser micro machining of glass, ceramics and metals utilizing trepanning optics. *Proc ICALAO*, 2010: 1046–1054
- 42 Ashkenasi D, Kaszemeikat T, Mueller N, et al. Laser trepanning for industrial applications. *Phys Procedia*, 2011, 12: 323–331
- 43 Ashkenasi D. Advanced laser micro machining using a novel trepanning system. *J Laser Micro/Nanoeng*, 2011, 6: 1–5
- 44 Ashkenasi D, Kaszemeikat T, Mueller N, et al. Rotating optics for laser taper-drilling in research and production. *Proc SPIE*, 2012, 8244: 82440Q
- 45 Ashkenasi D, Kaszemeikat T, Kuntze A. Compact laser and trepanning system solutions for versatile micro-machining. *Procedia CIRP*, 2016, 42: 833–838
- 46 Jahns D, Kaszemeikat T, Mueller N, et al. Laser trepanning of stainless steel. *Phys Procedia*, 2013, 41: 630–635
- 47 Ye M, Xiu H, Ket Thein C, et al. On the prediction of hole geometry in laser trepanning drilling: A generic 3D analytical model considering drill system structure. *Optics Laser Tech*, 2024, 177: 111158
- 48 Wang S, Zhao W, Zhao H L, et al. Large depth-to-diameter ratio and inverted cone micro-hole machining system with controllable trajectory and its application (in Chinese). *Laser Optoelectron Prog*, 2022, 59: 1122002 [王珊, 赵卫, 赵华龙, 等. 轨迹可控的大深径比倒锥微孔加工系统及应用. *激光与光电子学进展*, 2022, 59: 1122002]
- 49 Kang W, Liu G Q, Jiang B N, et al. Beam scanning system for laser micro-hole processing (in Chinese). China patent, CN110695521A, 2020 [康伟, 刘国强, 姜保宁, 等. 激光微孔加工的光束扫描系统. 中国专利, CN110695521A, 2020]
- 50 Deng L M, Qiao Y Q, Duan J, et al. Optical system for laser variable-taper and variable-diameter trepanning drilling (in Chinese). China patent, CN110449731B, 2023 [邓磊敏, 乔亚庆, 段军, 等. 一种激光变锥变径旋切孔加工光学系统. 中国专利, CN110449731B, 2023]
- 51 Wawers W, Gillner A. Device for drilling and for removing material using a laser beam. US patent, US7842901B2, 2010
- 52 Zibner F, Fornaroli C, Holtkamp J, et al. 1 μm adjustment-tolerance for high-precision helical laser drilling. *Proc SPIE*, 2015, 9582: 95820C
- 53 Fornaroli C, Holtkamp J, Gillner A. Laser-beam helical drilling of high quality micro holes. *Phys Procedia*, 2013, 41: 661–669
- 54 Wang F, Luo J J, Li M. High precision method of machining taper holes of diesel engine nozzle with femtosecond laser (in Chinese). *Acta Photonica Sin*, 2014, 43: 143–147 [王锋, 罗建军, 李明. 飞秒激光高精度加工柴油机喷嘴倒锥孔法. *光子学报*, 2014, 43: 143–147]

- 55 Zhang X B, Ji L, Cai M, et al. Research on ultrafast laser machining of film cooling hole in turbine blade (in Chinese). *Aeronaut Manuf Technol*, 2021, 64: 14–22 [张晓兵, 纪亮, 蔡敏, 等. 超快激光加工涡轮叶片气膜冷却孔技术研究. *航空制造技术*, 2021, 64: 14–22]
- 56 Jiang H, Ma C, Li M, et al. Femtosecond laser drilling of cylindrical holes for carbon fiber-reinforced polymer (CFRP) composites. *Molecules*, 2021, 26: 2953
- 57 Wang X, Li L, Huang Y, et al. Process applicability and hole wall microstructure evolution mechanism of femtosecond laser spiral drilling. *Optics Laser Tech*, 2024, 169: 109941
- 58 Wang X, Huang Y, Zhang Z, et al. Damage-free processing of carbon-carbon composites based on ultrafast laser and rotational optics. *Compos Commun*, 2025, 55: 102320
- 59 Liu H, Qiao N, Zheng W. Research on ultrafast laser machining process of inverted cone spray holes of fuel injectors (in Chinese). *MW Met Form*, 2018, 3: 5–9 [刘华, 乔娜, 郑伟. 喷油嘴倒锥喷孔超快激光加工工艺研究. *金属加工(热加工)*, 2018, 3: 5–9]
- 60 Liu Y, Wang C, Li W, et al. Effect of energy density on the machining character of C/SiC composites by picosecond laser. *Appl Phys A*, 2014, 116: 1221–1228
- 61 Liu Y, Wang C, Li W, et al. Effect of energy density and feeding speed on micro-hole drilling in C/SiC composites by picosecond laser. *J Mater Processing Tech*, 2014, 214: 3131–3140
- 62 Liu Y, Wang J, Li W, et al. Effect of energy density and feeding speed on micro-holes drilling in SiC/SiC composites by picosecond laser. *Int J Adv Manuf Technol*, 2016, 84: 1917–1925
- 63 Liu Y, Zhang R, Li W, et al. Effect of machining parameter on femtosecond laser drilling processing on SiC/SiC composites. *Int J Adv Manuf Technol*, 2018, 96: 1795–1811
- 64 Li W, Zhang R, Liu Y, et al. Effect of different parameters on machining of SiC/SiC composites via pico-second laser. *Appl Surf Sci*, 2016, 364: 378–387
- 65 Yang F, Dong Z, Kang R, et al. Femtosecond laser rotary drilling for SiCf/SiC composites. *Chin J Aeronautics*, 2025, 38: 103056
- 66 Dong Z G, Yang F, Xing G H, et al. Laser processing of small holes with large aspect ratio in SiCf/SiC composites (in Chinese). *Acta Mater Compos Sin*, 2024, 41: 1–13 [董志刚, 杨峰, 邢光浩, 等. 激光加工SiCf/SiC陶瓷基复合材料大深径比小孔研究. *复合材料学报*, 2024, 41: 1–13]
- 67 Li Z, Dong Z, Yang F, et al. Femtosecond laser processing technology of inclined hole in SiCf/SiC composites. *Optics Laser Tech*, 2025, 188: 112995
- 68 Yang F. Femtosecond laser two-step rotary processing for large aspect ratio small holes in SiC/SiC composites (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Dalian: Dalian University of Technology. 2024 [杨峰. SiC/SiC复合材料大深径比小孔飞秒激光两步旋切加工方法研究. 博士学位论文. 大连: 大连理工大学. 2024]
- 69 Zhang F, Sun S, Wang X, et al. Research on the ablation mechanism and feasibility of UV laser drilling to improve the machining quality of 2.5D SiC/SiC composites. *Optics Laser Tech*, 2025, 181: 111754
- 70 Uchtmann H, He C, Gillner A. High precision and high aspect ratio laser drilling: Challenges and solutions. *Proc SPIE*, 2016, 9741: 974106
- 71 He C. High-precision and complex geometry helical drilling by adapted energy deposition. Dissertation for Doctoral Degree. Aachen: RWTH Aachen University. 2020
- 72 He C, Bühring J, Gillner A. Helical drilling of three-dimensional conical converging-diverging nozzle in steel using ultrashort laser pulses. *Procedia CIRP*, 2018, 74: 305–309
- 73 He C, Buehring J, Zibner F, et al. Ultrafast laser helical drilling of three-dimensional shaped holes using synchronized adaption of energy deposition. *J Laser Micro/Nanoeng*, 2018, 13: 31–35
- 74 He C, Esch D, Gillner A. Adaption of energy deposition in helical drilling of multidimensional micro holes using ultrashort laser pulses. *J Laser Micro/Nanoeng*, 2019, 14: 55–60
- 75 He C, Weber M, Gillner A. Recast-free helical drilling of fused silica using SHG picosecond laser pulses. *J Laser Micro/Nanoeng*, 2020, 15: 242–247
- 76 Lin E M. Research on technology of precision micro-hole fabrication by ultrashort pulse laser (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Suzhou: Soochow University. 2019 [林恩旻. 超短脉冲激光制备精密微孔的技术研究. 硕士学位论文. 苏州: 苏州大学. 2019]
- 77 Liu X D. Research on process and mechanism of picosecond laser trepanning drilling (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Wuhan: South-Central University for Nationalities. 2021 [刘晓东. 基于皮秒激光的旋切制孔工艺及机理研究. 硕士学位论文. 武汉: 中南民族大学. 2021]

2021]

- 78 Liu X D, Chen L, Wang X Z, et al. Study on technology of picosecond laser making micro-hole with helical drilling (in Chinese). *Laser Optoelectron Prog*, 2022, 59: 0714005 [刘晓东, 陈亮, 王曦照, 等. 皮秒激光旋切制孔工艺研究. 激光与光电子学进展, 2022, 59: 0714005]
- 79 Zhang H, Di J, Zhou M, et al. An investigation on the hole quality during picosecond laser helical drilling of stainless steel 304. *Appl Phys A*, 2015, 119: 745–752
- 80 A Z W, Chen L L, Wu Y, et al. Controlling of diameter and taper in ultrafast laser helical drilling (in Chinese). *Chin J Laser*, 2021, 48: 0802017 [阿占文, 陈灵灵, 吴影, 等. 超快激光旋光钻孔孔径和锥度的控制. 中国激光, 2021, 48: 0802017]
- 81 Zhu Q, Fan P, Li N, et al. Femtosecond-laser sharp shaping of millimeter-scale geometries with vertical sidewalls. *Int J Extrem Manuf*, 2021, 3: 045001
- 82 Li M, Chen Y, Dong L, et al. Quality evaluation of micro-holes processed by efficient one-step femtosecond laser helical drilling method in nickel-based superalloy. *Appl Sci*, 2025, 15: 4384
- 83 Wang X, Huang Y, Zhang Z, et al. Applicability of ultra-fast laser machining process and microstructure evolution mechanism of ultra-high temperature ceramic matrix composites. *J Eur Ceramic Soc*, 2026, 46: 118061
- 84 Zhao H L, Zhou R K, Zhao W, et al. Design of reflective scanning device for drilling the inverted cone micro-hole with femtosecond laser pulses (in Chinese). *Acta Photonica Sin*, 2014, 43: 0914006 [赵华龙, 周仁魁, 赵卫, 等. 飞秒激光倒锥微孔加工的反射式扫描装置设计. 光子学报, 2014, 43: 0914006]
- 85 Hartmann M, Guggenmos M, Badyukov D. Scan head as part of a laser drilling and cutting device. German patent, DE102004053298B4, 2008
- 86 Sonner C, Rabe M. Scanning head with integrated beam position sensor and adjustment arrangement for an off-line adjustment. US patent, US10773339B2, 2020
- 87 SCANLAB GmbH. precSYS: 5-axis Micro Processing Sub System. Puchheim: SCANLAB GmbH, 2020
- 88 Romoli L, Vallini R. Experimental study on the development of a micro-drilling cycle using ultrashort laser pulses. *Optics Lasers Eng*, 2016, 78: 121–131
- 89 Führa B, Russ S, Hammers-Weber P, et al. High precision drilling with ultra-short laser pulses. In: *Proceedings of the Lasers in Manufacturing Conference (LiM)*. 2017. 1–10
- 90 Auerswald J, A Ruckli T G, Weber P, et al. Taper angle correction in cutting of complex micro-mechanical contours with ultra-short pulse laser. *J Mech Eng Autom*, 2016, 6: 334–338
- 91 Deng L M, Qiao Y Q, Duan J, et al. A multi-axis laser scanning optical system (in Chinese). China patent, CN113319425B, 2021 [邓磊敏, 乔亚庆, 段军, 等. 一种多轴激光扫描光学系统. 中国专利, CN113319425B, 2021]
- 92 Long Z, Qin Y X, Xu W Q, et al. Micro-hole laser helical drilling system based on double galvanometer groups (in Chinese). *Chin J Laser*, 2023, 50: 1202402 [龙宙, 秦应雄, 许文强, 等. 基于双振镜组的微孔激光旋切加工系统. 中国激光, 2023, 50: 1202402]
- 93 Zhang P, Qiao Y Q, Su X H, et al. Fabrication of straight-walled holes in GFRP composites based on double-galvanometer laser scanning (in Chinese). *Chin J Lasers*, 2023, 50: 2402403 [张聘, 乔亚庆, 苏晓慧, 等. 基于双振镜激光扫描的玻纤复合板直壁孔制造. 中国激光, 2023, 50: 2402403]
- 94 Zhao W Q, Li K L, Mei X S, et al. A five-dimensional laser scanning processing device and method (in Chinese). China patent, CN116713589A, 2023 [赵万芹, 李凯林, 梅雪松, 等. 一种五维激光扫描加工装置及方法. 中国专利, CN116713589A, 2023]
- 95 Li K, Zhao W, Duan W, et al. Beam tracking of a five-dimensional processing system with independent control of laser spatial dimensions based on the vector method. *Optics Lasers Eng*, 2024, 178: 108204
- 96 Wang Y Q, Li J, Ma Y, et al. Research on five-axis galvanometer laser processing technology for high aspect ratio micro-holes in titanium alloy (in Chinese). *Chin J Lasers*, 2026, 53: 1602406 [王禹祺, 李军, 马尧, 等. 高深径比钛合金微孔的五轴振镜激光加工工艺研究. 中国激光, 2026, 53: 1602406]

Research progress on multidimensional spatial manipulation technology and systems for laser beams

YIN ZeKun¹, MEI XueSong¹, KANG HaoZhe¹, ZHENG QingZhen², ZHANG JianWei², SUN Zheng¹, LU Yang³ & CUI JianLei¹

¹ State Key Laboratory for Precision Micro-Nano Manufacturing Technologies, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710054, China

² School of Physics and Electronic Information, Yan'an University, Yan'an 716000, China

³ Department of Mechanical Engineering, The University of Hong Kong, Hong Kong 999077, China

The continuous development of industries such as electronics, aerospace, and automotive has driven an increasingly strong demand for high-precision machining of precision equipment components, where structures like precision micro-holes and micro-grooves serve as critical structural units. Traditional methods of directly processing structures using lasers suffer from sidewall taper issues. Even with processing equipment such as two-dimensional and three-dimensional galvanometers, it is difficult to completely eliminate the taper, which greatly restricts the wider application of laser processing. Laser beam multi-dimensional spatial control processing systems, through specific combinations and movements of optical components, endow the laser focus with multi-dimensional degrees of freedom in both position and orientation within space, making them suitable for high-efficiency and high-precision processing scenarios of complex microstructures. This paper systematically reviews the evolutionary trajectory and research status of laser beam multi-dimensional spatial control processing technology. Based on the two major technical schools of transmissive and reflective methods currently achieving multi-dimensional laser control, the technical principles and implementation structures of published processing systems from both schools are systematically introduced. Combined with the latest experimental progress domestic and abroad, the results of practical processing using relevant systems are summarized. Based on the experimental results, the improvement effects of these processing systems on machining quality are comparatively analyzed to discuss the advantages and disadvantages of various domestic and international products, providing references and guidance for the upgrade and industrial application of multi-dimensional laser processing systems.

laser processing, beam shaping, optical structure, multi-dimensional spatial control, helical drilling

doi: [10.1360/SST-2025-0462](https://doi.org/10.1360/SST-2025-0462)