文章编号:1674-2974(2026)02-0122-14 DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2026162

复杂型材一站式加工智能机床装备的研发

李伟[1],陈勇彪[1],李卓[1],孟国飞[2],肖耘亚[3†]
(1. 湖南大学 机械与运载工程学院,湖南 长沙,410006;
2. 佛山镭科智能设备有限公司,广东 佛山,528231;
3. 韶关学院 智能工程学院,广东 韶关,512005)

摘 要:现有门窗幕墙型材生产线仍需配置个别单一功能机床,存在用工量大、工艺流程长、产线柔性化不足等问题.为了实现门窗幕墙复杂型材的高效高精加工,本研究首次引入激光加工技术,重点考虑型材材质和形状尺寸、激光加工特点、切削加工工况等因素,结合数学建模方法,开发出高反铝型材激光加工技术、高精加工技术、高效加工技术等关键技术,并深入研究多任务刀具(如光刀、铣断、铣榫、指铣/补刀等)的协同高效加工机制,建立了融合激光切割与高速铣削锯切的复合高效加工技术.通过优化型材上下料支撑装置、定位夹紧装置、激光切割装置和锯切铣削装置等机床关键结构,设计出激光切割和锯切铣削工艺相结合的一站式复杂铝型材加工机床.结果表明:与传统的单一功能型材加工机床相比,本研究开发的机床具备型材自动夹持、自动送料和转位、多工序自动协同等功能,且加工角度范围为30°~150°、加工精度误差小于0.1 mm,实现了复杂型材一站式全工序的高效、高精加工.

关键词:复杂型材;智能制造;激光加工;高效高精加工;一站式加工
中图分类号:TN773.1 **文献标志码**:A

Development of intelligent machine tool equipment for one-stop processing of complex profiles

LI Wei[1],CHEN Yongbiao[1],LI Zhuo[1],MENG Guofei[2],XIAO Yunya[3†]
(1. College of Mechanical and Vehicle Engineering, Hunan University, Changsha 410006,China;
2. Foshan Link Intelligent Equipment Co., Ltd., Foshan 528231,China;
3. College of Intelligent Engineering, Shaoguan University, Shaoguan 512005,China)

Abstract: Current production lines for door, window, and curtain wall profiles still need to be equipped with individual single-function machine tools, which have problems such as high labor demand, long process flow, and insufficient flexibility of the production line. To achieve efficient and high-precision processing of complex profiles for doors, windows, and curtain walls, this study introduces laser processing technology for the first time, focusing on factors such as profile material and shape dimensions, laser processing characteristics, and cutting conditions. Combined with mathematical modeling methods, key technologies such as high reflectivity profile laser processing

* **收稿日期**:2024-10-16
基金项目:广东省教育厅重点领域专项(2020ZDZX2062),Key Field Special Project of Guangdong Provincial Department of Education (2020ZDZX2062);韶关市科技计划项目(220605224531720),Science and Technology Plan Projects in Shaoguan City (220605224531720)
作者简介:李伟(1983—),男,湖南长沙人,湖南大学教授,博士生导师
† 通信联系人,E-mail:2092784984@qq.com

technology, high-precision processing technology, and efficient processing technology were developed. In-depth research was conducted on the collaborative and efficient processing mechanism of multi-task cutting tools (e.g., light cutting, milling cutting, milling tenons, finger milling/patching), and a composite high-efficiency processing technology that integrates laser cutting and high-speed milling sawing was established. By optimizing key structures of the machine tool, such as the support device for loading and unloading profiles, positioning and clamping device, laser cutting device, and sawing and milling device, a one-stop complex aluminum profile processing machine with a combination of laser cutting, sawing and milling processes was designed. The results show that, compared with traditional single-function profile processing machine tools, the machine tool developed in this study has functions such as automatic clamping, automatic feeding and indexing of profiles, and automatic coordination of multiple processes. The processing angle range is 30°~150°, and the processing accuracy error is less than 0.1 mm, achieving efficient and high-precision one-stop full-process processing of complex profiles.

Key words: complex profiles, intelligent manufacturing, laser processing, high-efficient and high-precision machining, one-stop processing

---

《中国制造2025》明确指出智能制造是推进信息化与工业化的主攻方向[1].随着国家提出“碳中和”“碳达峰”政策目标和互联网信息时代的到来,传统的门窗幕墙行业正在向配置个性化、绿色化、智能化方向发展.门窗幕墙产品呈现功能不断升级、材料丰富多样(铝、塑、木、钢等)、结构更加复杂、加工工艺要求明显提高等特点[2].传统制造系统与特种加工和智能技术的集成能大幅提高制造性能和水平,使制造业的生产力和产品质量进一步提高,满足消费者不断增长的需求[3,4].因此,融合先进制造技术的智能化设备是工业4.0及后续发展不可或缺的支柱[5,6].

集成铣削、钻削和锯切等工艺的复合加工技术是复杂型材高效高精加工的有效手段[7,8],目前德国叶鲁(ELUMATEC)[9]、德国安美百事达(AMEPRESSTA)[10]、意大利意美吉(EMMEGI)[11]等公司生产的数控加工中心在门窗幕墙铝型材加工领域占据统治地位.德国叶鲁的SB Z628 XL型材加工中心,配置8个主轴、30种不同的钻头或铣刀以及3片锯片,可在最长8 m型材上完成通风孔、锁扣孔和排水槽等特征结构的加工.德国安美百事达的SATELLITE XLE5轴数控加工中心,配置18个刀具库以及1个独立的圆盘锯切,可集中进行型材的铣削、钻削、攻丝和切削加工.通过优化刀具或机床结构来提升切削、锯切的工艺质量和效率是一种可行的方法.Chen等[12]利用有限元软件AdvantEage建立了不锈钢正交切削的二维有限元模型,对切削刃的几何参数进行了优化,在保持相同材料去除率的条件下明显降低了切削温度和内应力.对加工工艺参数或加工路径进行整合优化也能提升加工质量[13],Xiao等[14]建立了以铣削速度、进给量、主轴速度为优化变量的多目标优化模型,并以基于粒子群和NSGA-Ⅱ的组合优化算法来求解该模型,大幅提升了平面铣削的精度和效率.Jiang等[15]提出了一种基于机械智能数控编程的五轴数控工具路径优化方法,同时对不同表面刀具加工路径进行优化,选择出了加工效率最高、表面质量最优的切削轨迹,使加工效率提升了61.5%.加工误差计算和补偿也是提升加工精度的有效方法.康永刚等[16]提出了一种根据实际径向切深预测薄壁件加工表面变形误差的计算方法,成功用于航空铝合金薄壁件的加工变形误差预测中.张雷[17]通过优化高速铣削薄壁铝合金过程中的进退刀宏观指令和补偿工件变形转角余量有效控制了加工过程中零件的结构变形.

控制技术的升级和先进加工技术的引入对高性能机床的发展也至关重要.张辉等[18,19]利用FANUC-OMD通用数控系统开发出满足塑窗型材锯铣加工中心的控制系统,实现了加工中心的网络化管理和生产的自动化监控.Liu等[20]开发了一种用于智能工厂的数控机床智能监控和数据处理系统,该系统在复杂的制造环境中表现良好.引入激光加工等先进制造技术可大幅提升机床的加工效率.激光切割的切割宽度窄、变形小、精度高、无工具磨损,在

材料节省和自动化方面比传统切割更有优势[21, 22]. Zhang 等[23]研究了激光清洗铝合金过程中铝合金表面氧化物的去除机理及等离子体的产生行为.Marimuthu 等[24]采用激光切割氧化铝纤维增强铝金属基体,详细研究了激光参数对切割质量的影响.Wang 等[25]采用脉冲激光清洗7075铝合金表面,在去除铝合金表面氧化膜的同时提升了其表面硬度.

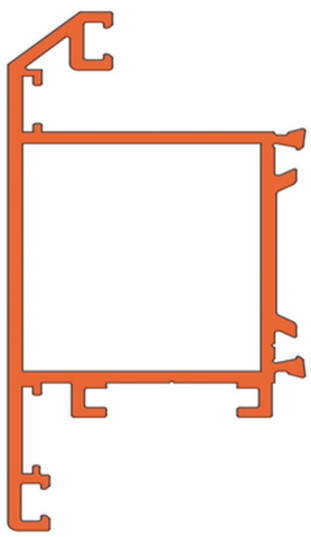
虽然现有门窗幕墙型材生产线通过数控加工中心及其他自动化设备提高了生产效率,但并未有效解决用工量大、工艺流程长、产线柔性化不足等问题,从而导致个性化的非标订单在大规模生产中不被重视.门窗幕墙加工这一行业目前正处于向柔性化、一站式和智能化发展的关键转型期.本文瞄准门窗幕墙产业未来智能化的生产趋势,提出高反铝型材激光切割、数控铣削与高速锯切复合的加工方法,深入研究多任务刀具(如光刀、铣断、铣榫、指铣/补刀等)协同高效加工技术,设计优化自动上下料、型材自动夹持及转位等关键部件及整机结构,实现复杂型材一站式全工序的高效、高精和智能加工,为我国门窗幕墙行业的技术改造和产业升级提供了重要技术支撑.

1 门窗复杂型材加工关键技术研究

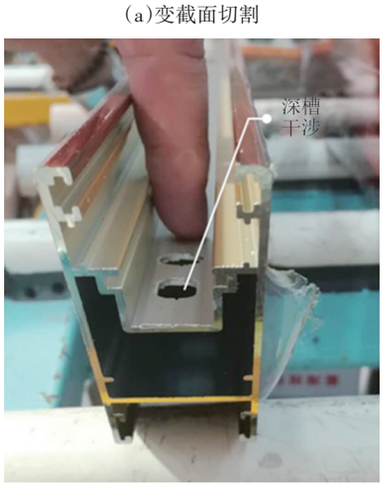
门窗幕墙中铝型材由于质轻、比强度高、韧性好、耐蚀以及绿色环保等优点[26],应用占比最大,超过50%,其次是塑料、钢、木材等材料[27].随着门窗产品高端个性化的发展,型材的结构越来越复杂.为了实现门窗幕墙复杂型材的高效高精加工,本研究首次引入激光加工技术,攻克高反铝型材激光加工技术、高精加工技术、高效加工技术等关键技术,建立融合激光切割与高速铣锯的复合加工技术.

1.1 高反铝型材高效精密激光加工技术

激光切割具有一刀通吃、切割速度快、加工质量好等优势,是理想的门窗型孔加工方案.但是铝型材的高反特性会大幅度降低其对激光能量的吸收率,影响切割效率的同时也会降低工艺质量的稳定性[28].对于如图1(a)所示的复杂结构变截面铝合金工件,需匹配相应的激光切割功率和速度才能进行加工,否则会导致过烧、切不透等问题,因此常规激光切割无法满足复杂型材的变截面加工要求.不仅如此,门窗型材的角码孔常布置在深槽滑道中,如图1(b)所示,深槽立边容易与切割头发生干涉,而激光切割速度很快(>5 m/min),一旦切割头与立边碰撞,将会产生破坏性后果,要么撞坏切割头,要么撞坏工件,从而使得加工无法继续.



(a)变截面切割



(b)深槽干涉

图1 激光切割门窗铝型材的难点

Fig.1 Difficulties in laser cutting of door and window profiles

本研究通过结合铝型材工件轮廓自识别、功率–速度(P–V)曲线自调整、防干涉自决策、防碰撞感应等手段,突破高反铝型材激光切割的技术瓶颈,开创激光切割在高反门窗幕墙复杂铝型材加工中的应用.具体以图2所示为例,系统首先自动读取铝型材的CAD文件数据(含材质),通过视觉扫描识别铝型材的截面轮廓,结合数据库存储的相关材质数据,确定铝型材工件信息如材料性质、切削厚度等.根据式(1)和式(2)的计算模型确定激光切割速度V.

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho C_{\mathrm{p}}} \tag{1}$$

$$V = k\frac{aP\alpha}{h(T_{\mathrm{m}} - T_0)(\rho C_{\mathrm{p}} + \rho L_{\mathrm{a}} + \lambda)} \tag{2}$$

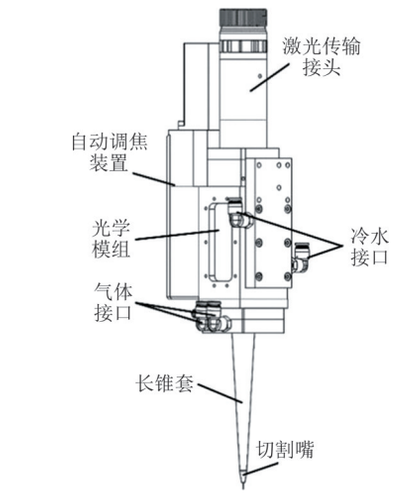
式中:α为扩散系数;λ为导热系数;ρ代表材料密度;C_p代表定压比热容;h代表切削厚度;a代表激光熔点吸收率;P代表激光功率;T_m代表材料熔点;T_0代表铝型材工件表面初始温度;L_a代表材料潜伏热;k代表通过大量实验拟合而来的修正系数.

激光头结构组成如图2(a)所示,为了实现切割头与工件不同距离的自动调焦,本研究在激光头中设计了由准直镜和长焦镜等组成的光学模组和自动调焦装置.配置的激光器可满足门窗幕墙铝型材的单层和多层切割,切割方法如图2(b)所示.当遇到带筋板的较厚区域时(如B区域),控制系统会自动降低切割速度以保证能切穿该区域,对于双层区域(如C区域),可先对C上部进行切割,然后系统自动调整焦距和速度,对C下部进行切割,以保证切割不断线.对于深槽型孔加工,当激光切割头在位置1处时,将与工件干涉.为此,自动调焦装置将增大光学模组中的长焦镜的焦距,并自动调节激光切割头的高度至位置2处,从而避免激光切割头与工件发生干涉.此外,当铝型材工件表面高度变化时,控制系统会使激光切割头快速移动来保持激光切割头与工件表面的间距不变,当铝型材工件厚度变化时,控制系统也会根据截面厚度并结合式(1)和式(2)自动计算并调整切割速度.通过以上措施,可保证激光加工始终都在全功率条件下进行,以此实现铝型材的高效加工.

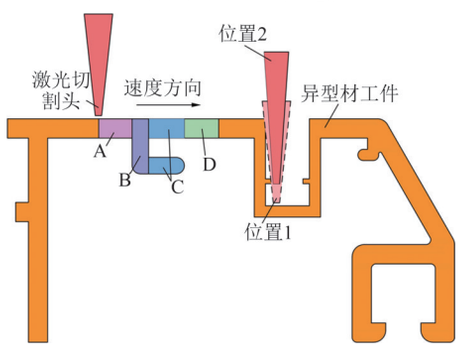
提高铝型材表面的激光能量密度能增强铝合金对激光的能量吸收率[29, 30].本研究所设计的激光头包含自动调焦装置,能够实时调整激光焦点位置,确保激光焦点始终位于铝型材的加工表面位置,增强铝型材表面对激光能量的吸收率,从而克服铝型材的高反特性.

1.2　型材的高效切削加工技术

传统的型材加工机床基本采用固定的切割速度和走刀行程进行加工.对于形状复杂的铝型材来说,基于最大截面轮廓或最厚截面壁厚所设定的较大走刀行程和较慢切割速度经常会导致刀具空载运行,此外低切割速度也会降低加工效率.本研究提出刀具直线进给和工件旋转相结合的高效加工方法,结合刀具规格、工件材质和截面轮廓自动计算走刀行程以及刀具和工件的旋转方向,同时考虑切削力及工件旋转的影响,建立走刀速度与切削力、切削深度以及工件旋转角度和角速度之间的关系,进而求得各段行程对应的走刀速度和工件旋转角速度,具体流程如图3所示.



(a)激光头结构组成示意图



(b)切割方法

图2　复杂型材的激光切割示意图

Fig.2　Schematic diagrams of laser cutting for complex profiles

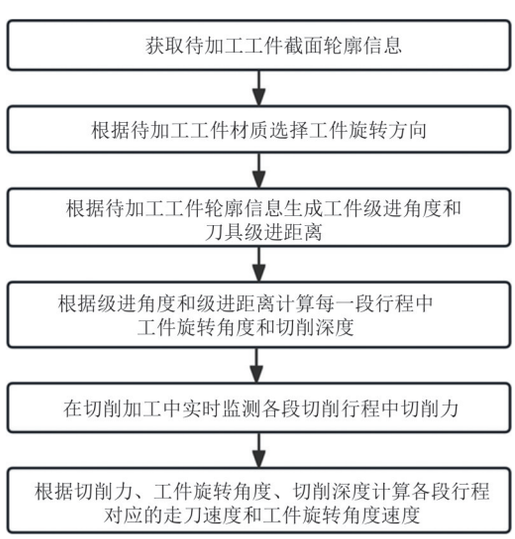


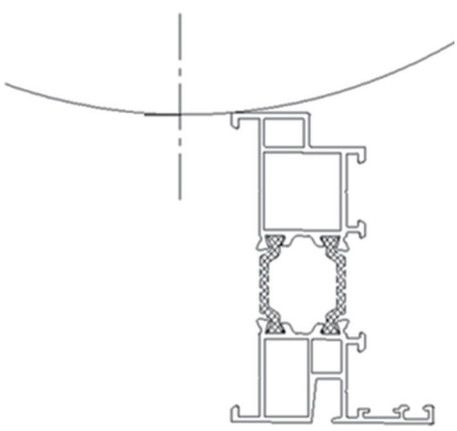
图3　型材的高效切削加工技术加工流程图

Fig.3　Efficient cutting technology and processing flow of profiles

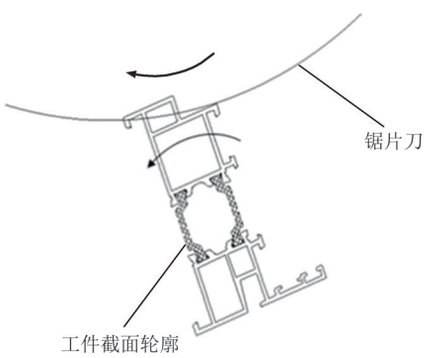
以图4(a)型材加工为例,结合CAD文件和图像识别获取工件表面轮廓信息,包括工件整体轮廓线长度及各线条之间相对位置,为后续计算提供依据.根据工件材质选择刀具锯切的旋转方向,当被切工件材质较硬时(硬度≥120 HBS)选择工件与刀具旋转

方向相反的加工方法,如图4(b)所示,可以保证在不调整锯片刀旋转速度下有效降低锯片刀与工件的相对转速,从而提高刀具寿命及加工稳定性.当被切工件材质硬度适中或较软时(硬度<120 HBS)选择工件与刀具旋转方向相同的加工方法,如图4(c)所示,可以保证在不调整锯片刀旋转速度的情况下提高锯片刀和工件的相对转速,获得较好的加工表面.

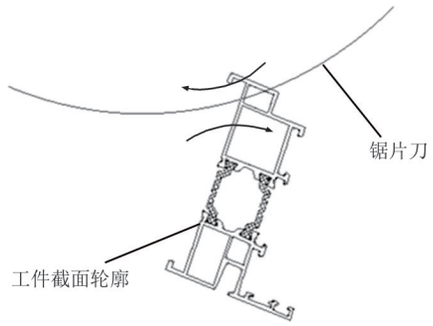
如图4(d)所示,对切割过程进行划分时,假设工件固定不动,刀具在直线运动的同时绕工件的旋转轴做旋转,进而产生一系列加工轨迹.其中,级进距离Δz指的是规划刀具走刀速度的最小单元,设置级进距离的目的是将刀具走刀行程离散为有限的段,并针对每一段计算走刀速度.级进角度$\Delta\theta$指的是规划工件旋转角速度的最小单元,设置级进角度的目的是将工件旋转过程离散为有限的段,并针对每一段计算角速度.级进角度的取值主要根据级进距离计算,由图5中锯刀和工件在加工过程中的相对位置可知,为确保总走刀行程较短,应使每次加工中工件的总旋转角度为90°.由图5中级进角度与级进距离的几何关系可知:当两者满足式(3)所示的关系时,可保证在切削完成后工件旋转角度刚好为90°,具体计算过程如式(4)所示.



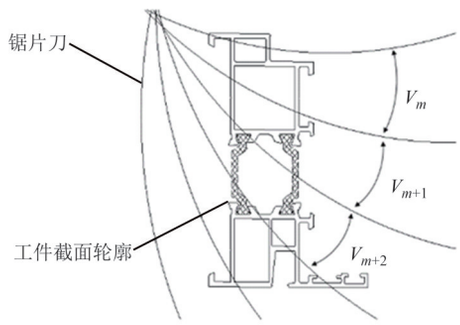
(a)初始切割位置



(b)工件与刀具反向旋转



(c)工件与刀具同向旋转



(d)切割行程划分

图4 铝型材高效切削加工案例

Fig.4 Case study of efficient cutting of profiled materials

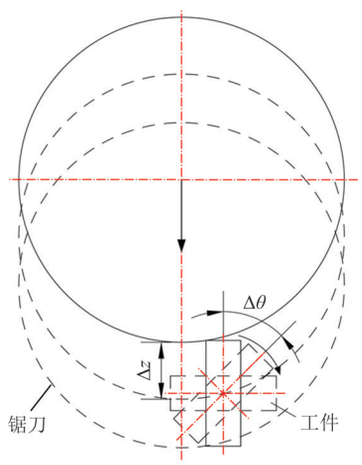


图5 级进角度与级进距离的几何关系图

Fig.5 Geometric relationship diagram between step angle and step distance

$$\Delta\theta = \frac{90}{h} \times \Delta z \tag{3}$$

$$n\Delta\theta = n \times \Delta z \times \frac{90}{h} = 90 \tag{4}$$

式中:n为切割行程划分的总段数;$n\Delta z$为切削过程中锯刀的走刀总行程,在本文提出的切削方法中通常情况下$n\Delta z$略小于工件截面高度h,但为了保证工件均能顺利切断,本研究中的$n\Delta z$设定等于h.通常Δz取值范围为0.1~0.5 mm,根据级进距离及常用工件截面尺寸可知$\Delta\theta$取值范围为0.11°~0.58°.

本研究采用变行程切削加工方法,其中切削深度根据工件截面轮廓和刀具规格计算,具体是根据行程划分段数和刀具直线运动对应的级进距离计算,工件旋转角度根据行程划分段数和刀具运动对应的级进角度来计算,具体计算如式(5)和式(6)所示.

$$a_j = j \times \Delta z \tag{5}$$

$$\theta = j \times \Delta\theta \tag{6}$$

式中:a_j为切割第j段时的切削深度;j为切割过程的段数;θ为切割第j段时工件旋转角度.

通过三向测力仪实时测量水平和竖直方向切削力的大小,当检测到刀具位于第j段切割行程的初始位置时,读取此时测力仪的数值并作为第j段切削力的值代入公式计算.走刀速度由切削功率、切削力、工件旋转角度、工件旋转角速度以及切削深度共同决定,同时走刀速度和工件旋转角速度还需要满足当刀具完成一个走刀行程时,工件要旋转对应的级进角度,从而保证刀具走刀与工件旋转之间的配合.式(7)和式(8)为走刀速度和工件旋转角速度的计算公式:

$$V = a \times \frac{P}{F_{jy}} + \frac{b}{a_j{}^m \times (F_{jy}\cos\theta - F_{jx}\sin\theta)} \tag{7}$$

$$\omega_j = \frac{\Delta\theta \times V_j}{\Delta z} \tag{8}$$

式中:a、b、m为经验常数,可根据经验选取,也可通过切削试验对参数进行拟合获得;P为刀具直线运动对应的额定切削功率;F_{jy}为切割第j段所对应的竖直方向的切削力;F_{jx}为切割第j段所对应的水平方向的切削力;ω_j为切割第j段时对应的工件旋转角速度;V_j为切割第j段时对应的走刀速度.

本研究提出的型材高效加工方法能够根据型材的材质、截面轮廓尺寸、加工深度、工件旋转角度及切削力等实际工况,自动匹配最佳走刀行程、切割速度以及工件旋转角速度.将相关计算及控制程序全部嵌入机床操控系统中,即可自动提供型材最佳切削加工方案,大幅提高加工效率.

1.3　型材的高精切削加工技术

如图6所示,由于型材多为具有较大长宽比的长条状结构,在其自身重力和切削力的共同作用下,工件悬空部位会出现较大的挠度变形,从而导致加工误差较大.本研究结合门窗幕墙型材加工精度及机床成本控制,采用对挠度变形和端面转角进行自动补偿的技术来提高型材加工精度,具体过程如下所述.

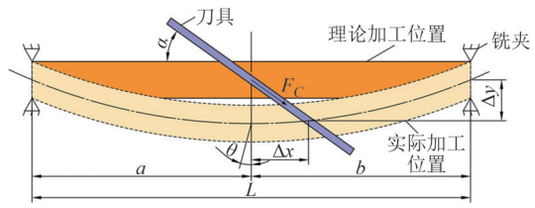


图6　型材的高精切削中挠度和端面转角补偿示意图

Fig.6　Schematic diagram of deflection and end face angle compensation in high-precision cutting of profiles

加工前,机床操控系统会读取被加工工件CAD文件数据,并结合图像识别技术识别工件表面轮廓,获取工件截面轮廓信息及加工要求,进而根据式(9)计算工件所受切削力.

$$F_C = mC_F K_f a_e{}^i f_z{}^j d^k z a_p \tag{9}$$

式中:m为刀片数量;C_F为切削系数;K_f为修正系数;a_e为侧吃刀量;f_z为每齿进给量;d为刀盘直径;z为刀具齿数;a_p为切削深度;i,j和k均为通过实验数据反推拟合而来的固定参数.该模型所需的各项参数都可直接从型材参数和加工要求中读取出来,可避免在获取中间参数时的计算误差累积,降低算法难度与计算量,提高精度.

如图6所示,型材在实际加工过程中两端通过夹具水平固定,中部悬空,由锯片从型材顶部向下进行切削,工件在自身重力和切削力的作用下会从理论加工位置移动到实际加工位置.根据切削力作用点与工件加工段的位置关系可知,加工过程中产生的挠度变形包括切削力产生的挠度变形和自身重力产生的挠度变形,具体计算过程如式(10)~式(12)所示.

$$\Delta x = \Delta x_1 + \Delta x_2 \tag{10}$$

$$\Delta x_1 = \frac{500L^2}{3EI} F_C bo(1 - o^2 - n^2)\sin\alpha \tag{11}$$

$$\Delta x_2 = \frac{125L^2}{3EI} Ma(1 - 2n^2 + o^3) \tag{12}$$

式中:Δx为挠度变形值;Δx_1为切削力产生的挠度变形;Δx_2为自身重力产生的挠度变形;L为工件加工区域长度;E为工件的弹性模量;I为工件的弯曲截面模量;b为加工区域侧端至切削点的距离;a为加工区域另一端至切削点的距离;n为b与L的比值;o为a与L的比值;α为切削角度,取值范围为0°~180°;M为工件加工区域质量.

加工过程中产生的端面转角误差包括切削力作用产生的转角误差和自身重力作用产生的转角误差,误差计算过程如式(13)~式(16)所示.

$$\theta = \theta_1 + \theta_2 \tag{13}$$

$$\theta_1 = \frac{30F_C Lb}{\pi EI}(1 - 3o^2 - n^3) \times |\cos\alpha| \quad (14)$$

(当切削角度为45°~135°)

$$\theta_1 = \frac{30F_C Lb}{\pi EI}(1 - 3o^2 - n^3)\sin\alpha \quad (15)$$

(当切削角度为180°内其他角度)

$$\theta_2 = \frac{15ML^2}{2\pi EI}(1 - 6o^2 + 4n^3) \quad (16)$$

根据以上步骤计算得出挠度变形值Δx与端面转角值$\Delta\theta$,结合既定加工程序中刀具走向,控制刀具反向微调运动方向,实现对加工误差的补偿,提高加工精度.

2 一站式加工机床结构的设计及优化

2.1 机床整体结构设计

针对门窗幕墙复杂型材激光切割与高速铣削的复合加工技术要求,对机床的成形运动、总体布局进行规划设计.机床分为上料、加工、卸料三部分,主体结构有以下4点:1)三段式床身设计如图7所示,机床主体两边布置相应的自动上下料托架系统,由气缸控制升降,伺服电机控制托承高度,上料区的定卡夹具具有对中功能,能实现工件预定位,下料区托架实现自动卸料;2)床身布置多个可调位定卡、双动卡和双旋转夹具,可在多工序同步加工下使工件实现360°旋转;3)机床主体核心切削加工区如图8所示,全新设计的长锥套结合长焦距切割头激光加工系统,可实现任意型孔加工;4)高速锯切铣削子系统与激光加工系统垂直布置,能够在30°~150°之间任意角度进行锯断、铣榫加工.

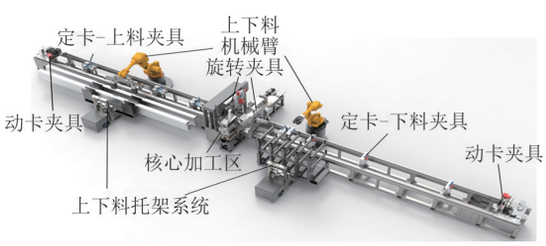


图7 机床3D模型渲染图

Fig.7 3D model rendering of machine tool

2.2 机床关键结构优化设计

2.2.1 型材的定位夹紧装置设计

加工过程中型材通过定卡夹具和动卡夹具来定位、夹紧和移动.定卡夹具由上下料支撑装置及其夹具组成,在上下料过程中支撑和夹紧型材.动卡夹具

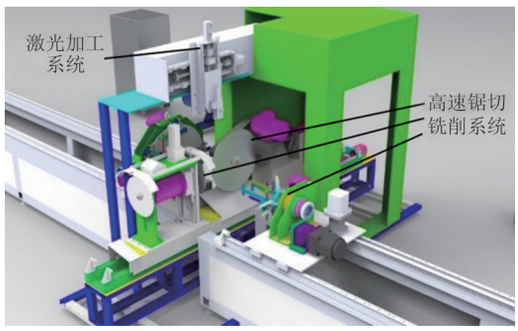


图8 核心加工区的三维图

Fig.8 3D drawing of the core processing area

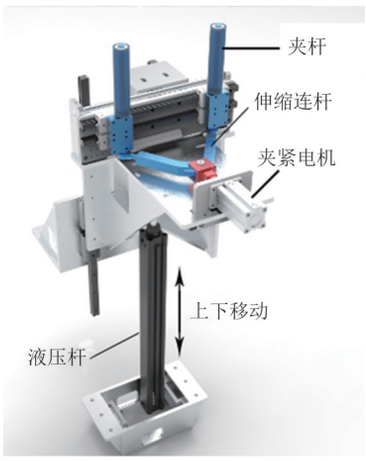
配合机床上料支撑装置,精准地将铝型材夹紧,确保铝型材在加工过程中的稳定性和精确性,并顺利地将铝型材送入加工环节,实现高效、精确的加工操作.

上料夹具在型材加工过程中不仅要起到支撑作用,同时也起到定位和夹紧作用.图9(a)为上料夹具的三维模型图,夹具上方配置有夹杆、伸缩连杆和夹紧电机,当工业机器人将铝型材放置在上料夹具上时,电机驱动伸缩连杆收缩,伸缩连杆带动夹紧杆迅速将铝型材夹紧.该上料夹具共有4个,上料过程中这4个夹具会迅速响应,协同工作,确保上料过程的稳定性与安全性.图9(b)为下料夹具的三维模型图,由于该夹具无须夹紧铝型材,只起到下料支撑作用,因此下料支撑装置结构简单,没有夹杆和电机.下料夹具同样有4个,分布在机床下料区域,协同工作,确保下料过程的稳定性.

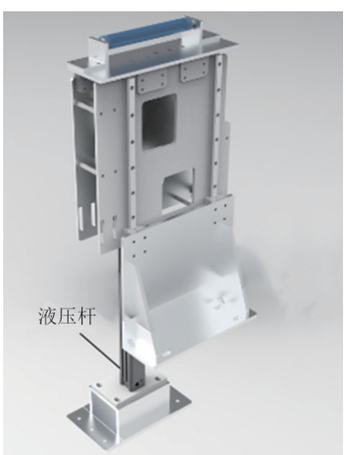
由于动卡夹具在型材加工过程中需要在定卡夹具所在位置来回移动,因此为了避免两类夹具发生干涉,在整个加工过程中,上下料夹具会根据铝型材的运动轨迹和需求进行动态调整.当铝型材需要被支撑时,它们会迅速到位,而当铝型材需要自由移动时,它们则会通过液压杆及时降下,避免产生阻碍.

设计动卡夹具时,首先要考虑该夹具的通用性,即可以应用于不同截面形状和大小的铝型材,其次考虑动卡夹具的运动,需保证夹具能够随铝型材顺利运动,将型材送至加工区域.

图10(a)为动卡夹具三维模型图,动卡夹具的夹持部分由一对宽夹和一对窄夹交替排布,宽夹可以增大夹具与铝型材之间的接触面积,使夹持更加稳定,宽夹窄夹可以在一定范围内线性移动,从而增大夹持范围,方便夹住不同截面的铝型材.如图10(b)



(a)上料夹具



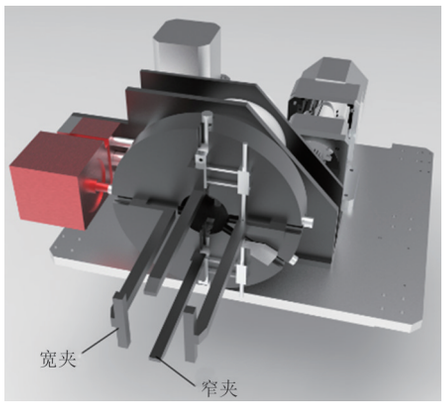
(b)下料夹具

图 9　上下料夹具模型图

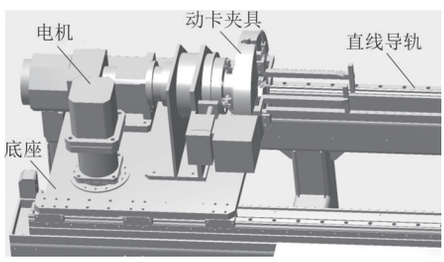
Fig.9　Model diagram of loading and unloading fixture

所示,动卡夹具通过底座连接在直线导轨上,由电机驱动在直线导轨上移动,以实现型材的夹持和送料,同时还可以实现旋转运动,便于型材在加工过程中的翻转.该动卡夹具共有两个,分别安装在机床的两端,以此来保证型材在上下料过程中的顺利移动.

由于型材加工时需要翻转角度在不同方向上进行加工,因此必须设置旋转夹具来提供型材加工时所必须的支持力以及支点,避免型材在加工过程中发生不稳定的抖动现象,增加型材的加工精度.旋转夹具的三维模型如图 11(a)所示,该夹具通过两组相互垂直分布的夹紧装置对型材进行定位夹紧,能保证型材 360°的旋转,可实现各个角度上的型材加工.此外,旋转夹具除了能保证型材的旋转外,其两组相互垂直分布的夹紧装置能够在各自方向上平移,从而实现了加工过程中型材在水平和垂直方向上的移动.如图 11(b)所示,旋转夹具一共有 2 个,分布在加工中心的两端,在加工过程中对型材加工区域的两



(a)动卡夹具

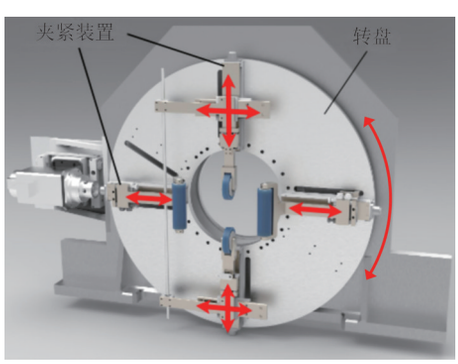


(b)动卡夹具安装

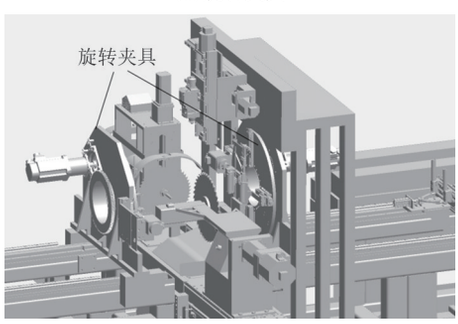
图 10　上下料动卡夹具及安装位置图

Fig.10　Loading and unloading moving fixture and installation position diagram

端进行夹紧和支撑.两端夹紧的方式可以确保型材在加工过程中始终处于简支梁状态,大幅度降低了型材加工过程中的扰曲变形,提升了加工精度.



(a)旋转夹具



(b)旋转夹具安装位置

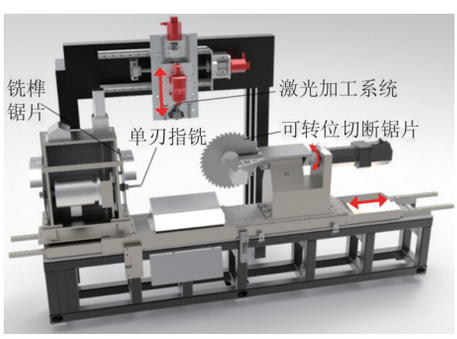
图 11　旋转夹具模型及安装位置图

Fig.11　Model and installation position diagram of rotating fixture

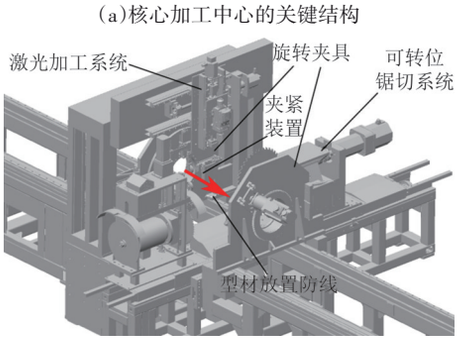
2.2.2 核心加工中心关键结构设计

机床的核心加工中心是机床完成型材切断、铣榫和打孔等加工步骤的核心结构.如图12(a)所示,加工中心包含激光加工和锯切铣削加工系统,其中锯切铣削加工系统由可转位切断锯片、铣榫锯片和单刃指铣3部分构成.其中可转位切断锯片支持与型材横截面夹角呈±60°方向范围内的转动,可实现较大角度范围内型材的切断,加工的长度误差小于0.5 mm,角度误差小于0.1°.铣榫锯片的加工精度与切断锯片一致,其主要用于型材上一些特殊榫形的加工.单刃指铣的加工精度误差小于0.1 mm,其主要用于型材上一些特殊锁孔的开槽加工.

如图12(b)所示,加工过程中型材的旋转和移动是通过加工中心两端可360°旋转的旋转夹具及旋转夹具上两组可平移的夹持装置来实现的.刀具的旋转是通过可转位切断锯刀来实现的,该锯刀可通过旋转机构沿着平行于型材截面的旋转轴旋转,也可沿着平行于型材截面的滑轨位移.加工时在机床控制系统的统一调控下,旋转夹具和可转位切断锯刀系统通过对型材位置和切断锯刀角度的实时调整来实现型材挠度变形和端面转角的自动补偿.



(a)核心加工中心的关键结构



(b)带有旋转夹具的加工中心

图12 核心加工中心

Fig.12 The core machining center

结合高反铝型材高效精密激光加工技术设计出的激光加工系统是加工中心的核心结构之一.激光加工系统采用功率为2 kW的激光光源,采用自主设计的激光头,可完成型材的切割、开孔、切槽等加工,其中切割速度5~25 m/min.在加工中心中,激光加工型材的现场如图13所示,锯切、铣削和激光加工的相互配合大幅提高了型材加工的精度和效率.

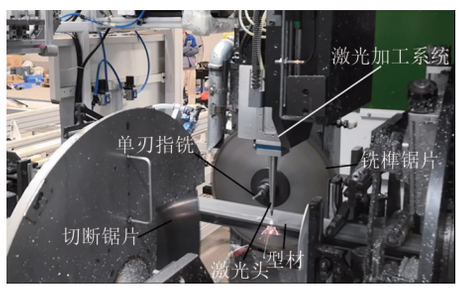


图13 激光加工型材现场图

Fig.13 On site drawing of laser processed profiles

激光切割头是激光加工的核心部件,其结构精细且功能强大.它主要由割嘴、准直、聚焦组件、控制盒等组成,各部分协同工作,确保切割过程的高效与精准.选取RC206型激光头作为本设备的激光切割头,具体参数如表1.

表1 RC206型激光头相关参数表

Tab.1 Related parameter table of laser head RC206

参数	数值
最大功率/kW	2
行程(沿A轴)/(°)	±135
切割速度/(m·min^{-1})	5~25
准直焦距/mm	100
调焦范围/mm	−18~+20
质量/kg	15
光纤芯径/μm	100
最大有效通光孔径Φ/mm	32

本研究设计的激光头带有防碰撞装置,如图14所示.激光切割嘴装接有延长管,导电弹片膜上部通过绝缘件与延长管固定连接,导电弹片膜未受到外力挤压时与激光切割嘴之间具有保护间隙,导电弹片膜受到外力挤压时会触碰到激光切割嘴从而连通导电,导电弹片膜和延长管分别通过导线与控制器连接.通过导电弹片膜与激光切割嘴的触碰,实现对激光切割嘴的有效控制,保证切割的顺利进行,对激光切割嘴起到有效的保护作用.

3 机床性能测试及经济性验证

3.1 高精切削加工方法精度验证

使用刀盘直径d=600 mm、刀具齿数z=144的高

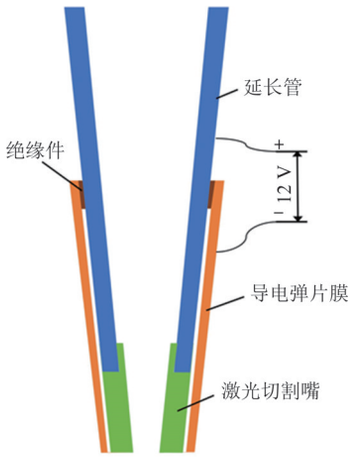


图 14　激光头的防碰撞装置简图

Fig.14　Principle diagram of anti-collision for laser head

速钢镶齿锯片铣刀对宽 112 mm、高 30 mm、弹性模量 72 GPa 的 AL6063 型材进行切削加工,调整两侧铣夹间距为 1 000 mm. 选定侧吃刀量 a_e=2 mm,每齿进给量 f_z=0.003 mm/z,切削深度 a_p=4.5 mm,由式(8)的切削力计算模型计算得到切削力 F_C=23.872 N,再根据式(10)~(16)计算得到表 2 的加工中挠度变形值与端面转角值,其中加工位置指的是 a 的长度.

根据计算所得结果,结合图 5 分析可得:当刀具在距离为 a=800 mm 处进行 40°切削时,刀具向左移 0.028 9 mm,顺时针旋转 0.005 30°,实现反向误差补偿.上述计算实例说明通过该方法可对切削加工中的挠度变形值与端面转角值进行误差补偿,从而实现型材的高精切削加工.

为了验证本文所提出的高精切削加工方法在型材实际加工中的应用效果,采用本文研发的已嵌入高精切削加工方法的一站式型材加工机床对截面形状如图 15 所示的型材进行了加工,并委托专业的检测机构对加工后型材截面的尺寸精度进行了检测,检测结果如表 3 所示.

由表 3 可知,采用高精切削加工方法加工出的型材截面 A 角处的平均角度误差为 0.010°,B 角处的平均角度误差为 0.029°,宽度的平均尺寸误差为 0.100 mm,平均误差均远低于该型材截面要求的尺寸误差范围,因此通过本文提出的高精切削加工方法能够实现型材的精密加工.

3.2　高效激光精密加工技术性能测试

铝是目前门窗行业最常用的铝型材,传统的锯片切割技术切割铝型材存在切割效率低等困难,普通激光切割铝型材也存在变截面切割困难、深槽切割干涉

表 2　型材加工时的挠度变形与端面转角计算值

Tab.2　Calculation values of deflection deformation and end face angle during profile processing

加工位置/mm	切削角度/(°)	挠度变形/mm	端面转角/(°)
200	30	0.013 8	0.005 81
200	45	0.019 7	0.007 74
200	60	0.024 2	0.005 81
200	90	0.028 0	0.001 15
200	120	0.024 2	0.005 81
200	135	0.019 7	0.007 74
200	150	0.013 8	0.005 81
400	30	0.033 1	0.003 26
400	45	0.046 3	0.004 45
400	60	0.056 4	0.003 26
400	90	0.064 9	0.000 37
400	120	0.056 4	0.003 26
400	135	0.046 3	0.004 45
400	150	0.033 1	0.003 26
600	30	0.036 3	−0.000 54
600	45	0.049 5	−0.001 66
600	60	0.059 6	−0.001 28
600	90	0.068 1	−0.000 37
600	120	0.059 6	−0.001 28
600	135	0.049 5	−0.001 66
600	150	0.036 3	−0.001 28
800	30	0.023 0	−0.004 08
800	45	0.028 9	−0.005 30
800	60	0.033 4	−0.004 08
800	90	0.037 2	−0.001 15
800	120	0.033 4	−0.004 08
800	135	0.028 9	−0.005 30
800	150	0.023 0	−0.004 08

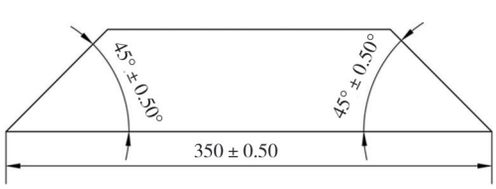


图 15　型材截面简图及加工尺寸要求

Fig.15　Schematic diagram of profile section and requirements for processing dimensions

表 3　型材截面位置的加工尺寸检测值

Tab.3　Measurement values of machining dimensions at each position of the profile section

检测位置	A 角/(°)	B 角/(°)	宽度/mm
尺寸要求	45±0.05	45±0.05	350±0.5
测量值 1	45.002	44.954	349.86
测量值 2	44.991	44.986	349.86
测量值 3	45.019	44.972	349.99
平均误差	0.010	0.029	0.100

等技术问题.通过自主研发的高效激光精密加工技术对铝型材进行了切割测试,来检验该技术的可行性以及与传统激光切割技术对比的优势,铝型材的固有参数如表4所示,截面形状如图16所示.

表4 铝型材的固有参数

Tab.3 Inherent parameters of aluminum materials

材料	密度ρ/(g·cm^{-3})	熔点T_m/℃	潜伏热L_a/(kJ·kg^{-1})	熔点吸收率a/%	比热容C_p/[kJ·(kg·℃)$^{-1}$]	导热系数λ/[W·(m·K)$^{-1}$]
铝	2.70	660	150	25	0.90	230

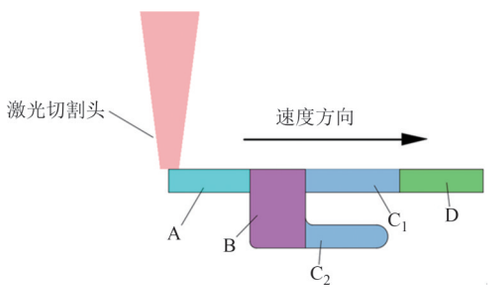


图16 铝型材截面图

Fig.16 Sectional view of aluminum profile

在室温(25 ℃)和激光头保持2 kW的全功率输出状态下,将表3中的铝型材的材料参数代入式(1)可得到铝型材不同截面厚度下对应的激光切割速度,如表5所示.

表5 铝型材不同切割厚度下对应的切割速度计算值

Tab.5 Calculation values of cutting speed corresponding to different cutting thicknesses of aluminum profiles

切割厚度/mm	切割速度/(m·min^{-1})
0.5	20.05
1.0	9.83
1.5	6.75
2.0	4.54
2.5	3.68
3.0	3.24
3.5	2.93
4.0	2.45
4.5	2.17
5.0	1.96

从表5可知本文提出的高效激光精密加工技术可先通过识别铝型材截面轮廓对型材不同截面厚度处匹配不同的激光切割速度,从而使激光始终保持全功率切割,提高激光能量利用率和切割效率.

采用本文提出的高效激光精密加工技术切割图14所示的铝型材时,结合表5和铝型材的截面形状尺寸可知铝型材各区域对应的切割速度和切割时间如表6所示.从表中可知,型材不同厚度区域匹配不同的激光切割速度后,所需的总切割时间为1.40 s.如果采用传统的无法实时调整焦点位置和切割速度的激光切割技术进行切割,为保证整个型材截面都能顺利切断,必须按照型材截面的最大厚度处来匹配相应的激光切割速度.对于图16所示的型材截面,最大厚度为5.0 mm,由表5可知需匹配的切割速度为1.96 m/min.型材截面总宽度为80 mm,因此需要的切割总时间为2.30 s.相对而言,本文提出的高效激光精密加工技术所需的切割总时间明显少于传统激光切割技术,切割效率提升了39.1%.

表6 铝型材各区域对应的切割速度和切割时间

Tab.6 Cutting speed and cutting time corresponding to each area of aluminum profiles

区域	厚度/mm	宽度/mm	切割速度/(m·min^{-1})	切割时间/s
A	2.0	20.0	4.54	0.26
B	5.0	5.0	1.96	0.15
C_1	2.0	30.0	4.54	0.40
C_2	2.0	25.0	4.54	0.33
D	2.0	20.0	4.54	0.26
总切割时间/s				1.40

3.3 经济性分析

相对于传统加工方式,本研究开发的机床具有很多优势,具体性能优势见表7.可以发现本项目所研发设备的加工范围和加工精度已经达到或超过国外先进设备水平,可加工型材长度已经达到国内先进设备水平.传统的冲裁加工或数控铣削加工型孔模式,往往依赖大量复杂的模具,这不仅增加了制造成本,而且降低了生产效率.由于模具的限制,加工范围也受到了极大的制约,难以满足日益多样化的加工需求.本项目的激光切割与数控铣锯复合高效加工技术则可解决这种问题.这种技术结合了激光切割的高效、精准和数控铣锯的灵活性,通过一体化的加工模式,实现了对材料的高效、快速、精确加工,大大提高了加工效率和加工质量.对于高反铝型材,传统的切割方法往往难以胜任,但高反铝型材激光切割技术凭借其独特的光学系统和切割策略,能够实现对这些型材的稳定、高效切割.这不仅拓展了可加工材料的范围,也为相关行业带来了更多的可能性.

表7　机床性能评价表

Tab.7　Evaluation table for machine tool performance

比较项目	本项目研发设备	一般设备	国内先进设备(济南派克DMCC6)[31]	国外先进设备(德国叶鲁SBZ 628 XL)[8]
设备数量	1台	5台	2台	1台
设备使用技术	激光+数控复合加工	双头锯2台,门窗加工中心2台,铣榫机1台	数控加工中心+铣钻中心或者流水线式	数控加工中心或者流水线式
设备关键指标	加工角度30°~150°,可加工型材长度7 m,精度误差≤0.1 mm	加工角度0°~45°,可加工型材长度6 m,精度误差≤0.5 mm	加工角度0°~90°,可加工型材长度7 m,精度误差≤0.5 mm	加工角度22.5°~180°,可加工型材长度8 m,精度误差≤0.2 mm
辅助生产用具	无需模具	大量模具和夹具	模具和夹具	模具和夹具
场地面积	110 m^2	600 m^2	180~220 m^2	200 m^2
每班生产效率(定制)	100 m^2/(班·人$^{-1}$)	小于20 m^2/(班·人$^{-1}$)	60 m^2/(班·人$^{-1}$)	100 m^2/(班·人$^{-1}$)
扩展性	无缝链接ERP、智能仓储、自动装配线,形成一个柔性生产系统	拓展性较差,受限于数控系统,对接的成本高,难度较大	以加工为主,未能连接或者连接ERP的能力有限	国外设备难以和国内ERP等软件兼容
设备总价格	极具竞争力	70~120 万元	300~400 万元	600~800 万元

4　结 论

本研究的主要结论如下:

1)本研究提出的型材高效高精加工方法能够根据型材的材质、形状尺寸以及切削力等实际工况,自动划分工序步骤,并为每一步工序匹配最佳的走刀速度和工件旋转速度等工艺参数,确保加工过程高效进行.同时能根据型材形状计算挠度变形值与端面转角值,结合既定加工程序实现对加工误差的补偿,实现型材的高精加工.

2)自研激光切割头,突破了变截面及多层切割等一系列关键技术,解决了复杂型孔、深槽加工等技术难题.此外,本研究将激光加工与多种切削加工工艺相结合,可进行任意长度/角度/榫形以及任意型孔的全自动高效加工,大幅度提高了复杂型材加工的自动化水平和生产效率,降低了生产成本.

3)通过对型材上下料支撑装置、定位夹紧装置、锯切装置、铣削装置和激光切割装置等机床关键结构的优化,设计出了具备自动上下料、自动定位夹紧、自动送料以及激光切割和锯切铣削工艺相复合的一站式复杂铝型材加工机床,实现了复杂铝型材的一站式的高效、高精加工.

参考文献

[1] 戚聿东, 徐凯歌. 新时代十年我国智能制造发展的成就、经验与展望[J]. 财经科学, 2022(12):63-76.
QI Y D, XU K G. The achievements, experience and prospects of China's intelligent manufacturing development since the new era [J]. Finance & Economics, 2022(12): 63-76.(in Chinese)

[2] LI B H, HOU B C, YU W T, et al. Applications of artificial intelligence in intelligent manufacturing: a review[J]. Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering, 2017, 18(1): 86-96.

[3] 李嘉佳,易茜, 冯毅雄, 等. 人本智造单元中人-智能系统协同双智能体工作机制研究[J]. 机械工程学报, 2025, 61(3): 105-118.
LI J J, YI Q, FENG Y X, et al. Research on dual-agent work mechanism with human-smart system collaboration in human-centric smart manufacturing cell [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2025, 61(3): 105-118.(in Chinese)

[4] KAMBLE S S, GUNASEKARAN A, GHADGE A, et al. A performance measurement system for industry 4.0 enabled smart manufacturing system in SMMEs—A review and empirical investigation[J]. International Journal of Production Economics, 2020, 229: 107853.

[5] 张根保, 罗天洪."高档数控机床的高端制造模式"(四):数控机床的先进制造模式研究[J]. 计算机集成制造系统, 2023, 29(7): 2191-2200.
ZHANG G B, LUO T H. Advanced manufacturing mode of CNC

machine tools[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2023, 29(7): 2191-2200.(in Chinese)

[6] IMAD M, HOPKINS C, HOSSEINI A, et al. Intelligent machining: a review of trends, achievements and current progress [J]. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 2022, 35(4/5): 359-387.

[7] KARAGÜZEL U, UYSAL E, BUDAK E, et al. Analytical modeling of turn-milling process geometry, kinematics and mechanics[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2015, 91: 24-33.

[8] ZHANG C, ZHOU G H, LI J J, et al. A multi-access edge computing enabled framework for the construction of a knowledge-sharing intelligent machine tool swarm in Industry 4.0[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2023, 66: 56-70.

[9] 马晓君. 门五金件安装孔槽数控加工关键技术的研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2012.
MA X J. Research on key technology of NC processing of mounting holes and slots of wooden door hardware[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2012.(in Chinese)

[10] 李刚. 广州开发区的科创转型及空间响应研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2022.
LI G. Research on science-technology innovation transition and spatial response of Guangzhou development district [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2022. (in Chinese)

[11] 何雪萍. 双悬膜中空玻璃系统关键装配工艺设计[D]. 北京: 北京信息科技大学, 2021.
HE X P. Design of key assembly process for double suspended membrane hollow glass system[D]. Beijing: Beijing Information Science & Technology University, 2021.(in Chinese)

[12] CHEN X X, ZHAO J, ZHANG W W. Optimization analysis considering the cutting effects for high-speed five-axis down milling process by employing ball end mill[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 105(12): 4989-5008.

[13] 崔中, 王文浩, 耿继青, 等. 基于近似模型的机床铣削质量稳健性优化设计[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2023, 50(12): 194-202.
CUI Z, WANG W H, GENG J Q, et al. Robust optimization design of milling quality for machine tools based on approximate model[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2023, 50(12): 194-202.(in Chinese)

[14] XIAO Y M, JIANG Z G, GU Q, et al. A novel approach to CNC machining center processing parameters optimization considering energy-saving and low-cost [J]. Journal of Manufacturing Systems, 2021, 59: 535-548.

[15] JIANG X H, LU W W, ZHANG Z Y. An approach for improving the machining efficiency and quality of aerospace curved thin-walled parts during five-axis NC machining[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 97(5): 2477-2488.

[16] 康永刚, 王仲奇, 吴建军, 等. 基于实际切深的薄壁件加工变形误差的预测[J]. 西北工业大学学报, 2007, 25(2): 251-256.
KANG Y G, WANG Z Q, WU J J, et al. Fast prediction of static form errors in peripheral milling of thin-walled workpieces using real cutting depth [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2007, 25(2): 251-256.(in Chinese)

[17] 张雷. 大型铝合金整体结构件高效加工技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
ZHANG L. Research on high efficiency machining technology of large aluminum alloy integral structure [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.(in Chinese)

[18] 张辉, 艾长胜, 赵方, 等. 塑窗型材锯铣加工中心数控系统开发[J]. 中国机械工程, 2008, 19(16): 1962-1965.
ZHANG H, AI C S, ZHAO F, et al. CNC system development of sawing and milling machining center for plastic door and window PVC profile[J]. China Mechanical Engineering, 2008, 19(16): 1962-1965.(in Chinese)

[19] ZHANG H, AI C S, ZHAO F, et al. The CNC development of the sawing and milling machining center for plastic door and window PVC profile based on Fanuc0[C]//2008 7th World Congress on Intelligent Control and Automation. June 25-27, 2008, Chongqing, China. IEEE, 2008: 9362-9367.

[20] LIU W, KONG C P, NIU Q, et al. A method of NC machine tools intelligent monitoring system in smart factories[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2020, 61: 101842.

[21] ANGHEL C, GUPTA K, MASHAMBA A, et al. Recent developments in laser cutting of metallic materials [C]// Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management. 2018, 2018(NOV): 1881-1891.

[22] LI Z, JIANG F, WANG N C, et al. Research on laser-induced Plasma-Assisted ablation of single crystal Diamond: Experiment and molecular dynamics simulation [J]. Optics & Laser Technology, 2025, 181: 111757.

[23] ZHANG G X, HUA X M, HUANG Y, et al. Investigation on mechanism of oxide removal and plasma behavior during laser cleaning on aluminum alloy[J]. Applied Surface Science, 2020, 506: 144666.

[24] MARIMUTHU S, DUNLEAVEY J, LIU Y, et al. Laser cutting of aluminium-alumina metal matrix composite[J]. Optics & Laser

Technology, 2019, 117: 251-259.

[25] WANG W, SHEN J, LIU W J, et al. Effect of laser energy density on surface physical characteristics and corrosion resistance of 7075 aluminum alloy in laser cleaning [J]. Optics & Laser Technology, 2022, 148: 107742.

[26] 任伟才, 于明洋, 张永安, 等. 淬火水温对7B50铝合金厚板组织和强韧性的影响[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2023, 50(12): 86-91.
REN W C, YU M Y, ZHANG Y A, et al. Effect of quenching water temperature on microstructure strength and toughness of 7B50 aluminum alloy thick plate[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2023, 50(12): 86-91. (in Chinese)

[27] FENG Z X, POKHAREL R, VOGEL S C, et al. Crystal plasticity modeling of strain-induced martensitic transformations to predict strain rate and temperature sensitive behavior of 304 L steels: Applications to tension, compression, torsion, and impact [J]. International Journal of Plasticity, 2022, 156: 103367.

[28] KIM H, NAM K, KIM Y, et al. Analysis of laser-beam absorptance and keyhole behavior during laser keyhole welding of aluminum alloy using a deep-learning-based monitoring system [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2022, 80: 75-86.

[29] 侯红玲, 解玉坤, 赵晋平. 激光切割铝合金吸收率试验研究[J]. 表面技术, 2016, 45(10): 193-198.
HOU H L, XIE Y K, ZHAO J P. Experimental research on absorptivity of aluminum alloy cut by laser [J]. Surface Technology, 2016, 45(10): 193-198. (in Chinese)

[30] 和岳. 铝合金激光压力焊接坡口内激光的波导和能量耦合行为研究[D]. 北京:北京工业大学, 2017.
HE Y. Laser waveguiding and energy coupling in V groove during laser pressure welding of aluminum alloy [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2017. (in Chinese)

[31] 周秋杉. 译者主体性视角下商务谈判交替传译实践报告[D]. 济南:山东建筑大学, 2023.
ZHOU Q S. A report on business negotiation consecutive interpretation from the perspective of interpreter's subjectivity [D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2023. (in Chinese)