

多功能复合加工设备快拆式工具头结构设计

张志巍 袁亚萍 安 旭 白欣宇

内蒙古机电职业技术学院机电工程系, 内蒙古 呼和浩特 010070

摘 要: 针对现有桌面级 3D 加工设备功能单一、多工艺工具头人工更换流程繁琐、物料供料与电气数据接口相互独立、多次拆装后对接精度答复下降、易出现漏料与信号接触不良等实际工程痛点, 本文设计一种可兼容 FDM 3D 打印、高速 CNC 雕刻、1064nm 激光微雕三类加工工艺的一体化快拆式工具头装置。装置以 U 形整体安装基座为承载主体, 采用双侧滑轨滑块结构完成工具组件粗预定位, 内部同轴布置气动卡盘实现加工头高精度刚性锁紧; 上下插接对接接头集成矩阵弹簧触点数据传输通道与直通式挤出供料流道, 单次推入插接动作即可同步完成机械定位、电气信号通信、耗材物料输送三重对接。整机配套标准化三轴龙门步进运动平台, 单台桌面设备可连续完成增材成型、材料切削、精细激光微雕复合作业。整套结构采用统一标准化通用外部接口, 三类工艺工具组件可无差别快速互换, 全程无需人工重新调平、校准原点, 大幅缩短换刀耗时, 设备改造门槛低、改造成本低廉, 具备极强通用性, 适合手办打样、文创雕刻、小型非金属定制加工等桌面级增减材一体化加工装备批量应用。

关键词: 3D 打印; 增减材复合加工; 快拆工具头; 气动卡盘; 一体化对接接头

DOI: 10.64649/yh.shfzykjcx.issn3078-8994.202607022

0 引言

熔融沉积 FDM 3D 打印、CNC 数控铣削雕刻、光纤激光微雕是当前小型定制加工、文创手板制作领域应用最广泛的三类主流加工工艺, 但目前市面主流桌面加工设备普遍存在功能单一化的突出缺陷。若企业、工作室需要完成一套产品从原型打印、轮廓切削修整、表面精细浮雕打标完整复合加工工序, 必须单独采购多台独立专用设备, 不仅设备购置成本成倍增加, 还需要占用大量厂房、工作台场地, 小型加工从业者投入压力显著提升。

现阶段少数宣称集成多工艺的复合加工设备, 大多采用固定式一体式工具头结构, 切换加工工艺时需要人工逐一拆卸耗材挤出管线、电机供电线缆、激光控制信号线, 更换完成后还需重新手动校准加工原点、调平喷嘴与工件基准面, 整套换刀操作流程复杂, 单次完整更换耗时普遍达到 5~10 分钟, 在多批次、多工序连续复合加工场景下, 大量时间浪费在工具切换环节, 直接拉低整体加工生产效率。与此同时, 传统复合工具头机械夹持结构、电气信号接口、耗材供料流道三者相互分离独立布置, 经过多次拆装插拔后极易出现弹簧触点氧化接触不良、密封流道错位漏料、装配间隙导致加工原点偏移等故障, 大幅提升设备维护频次与停机维修成本。

从现有快换机构技术现状来看, 市面上成熟的快速更换喷头结构大多仅适配单一 FDM 3D 打印工艺, 缺少能够兼容切削、激光加工的通用标准化对接接口; 而工业大型增减材复合机床配套的自动换刀刀库、液压锁紧主轴机构体积庞大、结构复杂、造价高昂, 安装空间需求大, 完全不适用于轻量化桌面小型加工设备

改装使用。针对上述行业现存技术短板, 本文提出滑轨粗定位 + 气动卡盘精锁紧 + 料路电路一体化对接三合一全新结构方案, 一套主机安装基座统一兼容 3D 打印、CNC 切削、激光微雕三类标准化加工模块, 实现多工艺无损快速切换, 无需改动设备原有龙门运动框架, 为桌面级轻量化增减材复合加工装备低成本升级提供一套可靠、易落地的机械结构设计方案。

1 总体结构与工作原理

1.1 整体结构组成

快拆工具头整体划分为固定主机基座与可替换标准化工具组件两大独立模块, 二者依靠统一接口实现快速装配分离。主机基座核心包含 U 形一体化安装主体、顶部承载顶板、耗材挤出电机、中心同轴气动卡盘、集成式数据对接套筒、双侧滑轨滑块定位副、X 轴运动连接传动副; 可替换工具组件统一标准化配套顶部数据对接套轴、环形夹持套、左右对称工具滑块, 根据加工工艺分为 3D 打印增材组件、CNC 切削雕刻减材组件、光纤激光微雕精细加工组件三类, 三类组件外部装配尺寸、滑块安装位置、对接轴规格完全统一, 可任意互换装配。

主机背部一体成型集成 X 轴驱动传动螺母与直线导向滑块, 能够直接卡合装配在常规三轴龙门设备 X 轴丝杆滑轨上, 无需额外定制转接支架, 兼容市面绝大多数通用桌面 3D 打印龙门框架。U 形安装主体底部对称平行布置两条高精度工具导向滑轨, 滑轨顶端刚性固定金属上限位挡块, 操作人员向上推入工具组件时, 滑块顶端贴合限位块完成轴向精准限位, 保证上下对接接头自动同轴对位, 杜绝人工推拉不到位导致的流道错位、触点接触不全问题。

安装主体内部中心位置同轴布置气动卡盘，卡盘上部空间固定数据对接套筒，卡盘下端弹性夹持腔可均匀抱紧工具组件顶部的对接套轴，实现工具组件全周向刚性固定，抑制高速加工振动。



图1 快拆工具头

1.2 设备完整工作流程

(1) 装配预定位：将目标工艺工具组件两侧配套滑块对准主机底部滑轨竖直向上平稳推送，滑块顶端触碰滑轨顶部限位块自动停止，此时上下插接接头初步贴合对齐，完成粗定位；

(2) 程序自动锁紧：设备数控控制系统发送通气信号，气路电磁阀导通压缩空气，气动卡盘向内收缩抱紧数据对接套轴，浮动弹簧触点完全压紧导通，上下供料通道自动同轴密封连通；

(3) 多工序复合加工：三轴龙门 X/Y/Z 轴步进电机联动，带动整套快拆工具头沿三维轨迹运动，分别完成熔融沉积打印、材料铣削切削、非金属激光打标浮雕加工；

(4) 快速换刀拆卸：当前工序全部加工完成后，数控程序控制气路泄压，气动卡盘夹持爪自动张开释放对接套轴，操作人员向下平稳抽出当前工具组件，更换另一工艺模块重复上述装配流程，全程无需拆装任何外部管线、无需人工校准加工基准，操作门槛极低。

2 核心机构结构设计

2.1 气动卡盘锁紧机构

气动卡盘整体居中布置于 U 形安装主体内部，为各类工具组件提供周向均匀、稳定的径向夹持锁紧力。对比磁吸吸附、简易卡扣锁紧两类传统快拆结构，气动夹持定心同轴精度更高，抗高速切削振动能力更强，可稳定适配 CNC 主轴上万转高速铣削加工工况；气动卡盘气路直接接入整机数控系统，可通过加工程序代码实现全自动松夹动作，无需人工手动锁紧，适配长时间无人值守自动化批量加工。滑轨滑

块完成粗定位、气动卡盘完成高精度精定心，两级定位结构相互配合，彻底消除装配间隙带来的加工误差，保障多次拆装后的重复定位精度稳定可控。

2.2 一体化对接接头

主机侧数据对接套筒下端固定上插接头，工具组件套轴顶端配套下插接头，单组对接结构内部同时集成直通式耗材供料通道与矩阵式弹簧顶针数据传输通道，仅一次插接动作即可同步完成耗材输送、电气信号传输双重功能对接。

(1) 供料通道结构：上插接头内部开设贯通式竖直流道，向上通过硬质管路连通顶板挤出电机出料端；下插接头对应开设配套下供料通道，仅 3D 打印组件启用完整流道，CNC 雕刻、激光微雕组件可封堵流道开口，不影响通用接口装配。当滑块顶紧顶部限位块时，上下流道完全同轴贴合，配合端面密封垫圈杜绝耗材丝材输送过程中漏料、堵料故障。

(2) 数据传输触点阵列：接头内部均匀布置 4 排 5 列共 20 组浮动弹簧顶针触点，弹簧具备微量伸缩补偿能力，能够抵消滑轨装配产生的微小定位误差，保证高低速控制信号持续稳定导通。主机通过触点阵列向对应工具组件传输启停控制、主轴转速调节、激光功率输出、喷头温度采集、进给速度调控等多路控制信号，彻底省去独立外接信号线拆装步骤，简化换刀操作。

2.3 滑轨限位定位副

安装主体底部对称平行布置两根精加工工具导向滑轨，各工具组件两侧配套同规格工具滑块，滑轨与滑块采用小间隙精密间隙配合，推拉顺滑无卡顿，实现快速导向装配；滑轨顶部焊接固定金属上限位块，硬性限制工具组件轴向推入行程，强制保证上下对接接头精准同轴贴合。滑轨限位结构大幅简化拆装操作，仅依靠竖直推拉动作用即可完成工具更换，无需额外对位调整，相比传统多管线拆装结构，换刀操作难度大幅降低，显著缩短单次换刀耗时。

3 三类模块化工具组件设计

三类工艺工具组件采用完全统一标准化外部装配接口：顶部环形夹持套锁紧固定数据对接套轴，左右两侧对称安装尺寸、安装孔位完全一致的工具滑块，组件之间无差别互换，设备拓展性极强，后续可新增点胶、等离子切割等其他工艺模块。

3.1 3D 打印增材组件

打印组件由封闭式箱型打印承载主体与底部可拆卸黄铜打印喷头组成，夹持套与打印主体刚性紧固连接，内部数据对接套轴贯通完整供料通道。顶部挤出电机推送耗材丝材，经由一体化对接流道送入底部黄铜喷头完成熔融沉

积成型,同时弹簧触点双向传输喷头温度、进给速度、风扇启停等控制信号,适配实体模型、多材料双色手板、小型文创摆件打印生产。喷头采用通用 0.4mm 标准黄铜喷嘴,可按需更换不同孔径喷嘴适配精细/大尺寸打印需求。

3.2 CNC 雕刻减材组件

组件包含金属安装基座与高速水冷雕刻主轴,主轴下端可快速装配各类铣刀、钻头、倒角刀具,实现木板、亚克力、树脂等非金属材料切削加工。该组件无耗材挤出需求,下插接头可直接封堵下供料通道,仅保留矩阵弹簧触点传输主轴启停、转速调节、过载保护信号。气动卡盘提供大刚性夹持力,可有效抵消 CNC 高速切削产生的轴向、径向振动,保证雕刻、开槽、钻孔加工尺寸精度稳定。

3.3 激光微雕精细加工组件

两组对称安装块与顶部夹持套组合形成 U 形夹持腔,腔体内固定 1064nm 光纤激光雕刻头,整套组件仅保留数据通信通道,用于实时调控激光开关、输出功率、雕刻扫描速度。组件整体轻量化优化设计,降低 X 轴运动负载,适用于木质、皮革、亚克力非金属表面精细打标、浅浮雕、纹理雕刻加工,加工线条细腻,成品辨识度高。

4 三轴龙门配套运动系统

整机采用框架式三轴龙门结构,三轴独立步进电机驱动,实现三维轨迹加工。

(1) Z 轴:四组同步滚珠丝杆驱动升降工件平台,控制加工高度;

(2) Y 轴:机身顶部双滚珠丝杆带动 X 轴整组机构前后移动;

(3) X 轴:丝杆与主机背部驱动螺母啮合,驱动快拆工具头横向进给。

三轴光轴+直线滑块导向结构保证运动平稳,整套运动平台与快拆工具头机械接口标准化,现有桌面 3D 打印机可直接替换原有固定喷头,设备改造成本低。

5 结构创新与技术优势

5.1 核心创新点

(1) 双重定位锁紧结构:滑轨滑块实现快

速预定位,气动卡盘提供高精度刚性夹持,兼顾拆装便捷性与多工况加工刚度;

(2) 料路电路一体化接头:单一对接结构同步完成耗材输送与多通道数据传输,取消独立管线,简化换刀操作;

(3) 通用标准化模块化接口:3D 打印、CNC、激光三类工具共用同一主机基座,无需改动机身即可快速切换工艺;

(4) 集成式运动连接结构:主机背部一体成型 X 轴驱动副,直接适配通用三轴龙门设备,通用性强。

5.2 工程应用优势

(1) 换刀效率大幅提升:传统多工艺工具更换需 5~10 min,本装置推拉式拆装+气动自动锁紧,单次切换时间控制在 15 s 内,复合加工效率显著提升;

(2) 降低设备投入:单台设备覆盖增材、减材、微雕三类工艺,无需采购多台独立设备,减少场地占用与设备采购成本;

(3) 运行稳定性高:弹簧触点浮动补偿、同轴供料流道设计,杜绝接触不良、漏料、定位偏移故障;气动均匀夹持抑制 CNC 切削振动;

(4) 自动化适配性强:气动卡盘可由数控程序控制自动松夹,支持无人值守批量复合加工。

6 结论

本文设计一款适配桌面级复合加工设备的快拆工具头,通过 U 形承载基座、滑轨限位机构、气动卡盘锁紧系统、一体化对接接头,解决传统多工艺设备换刀繁琐、接口分离、定位精度差等痛点。标准化通用接口兼容 3D 打印、CNC 雕刻、激光微雕三类加工模块,单次插接同步完成物料输送与电气通信,拆装便捷、定位可靠、加工稳定性好。

该结构改造门槛低、推广成本小,在手板模型、文创定制、小型非金属雕刻领域具备良好应用价值。后续可拓展切割、点胶等多功能工具模块,增设自动刀库实现全自动无人换刀,并通过轻量化材料优化降低运动惯量,进一步提升设备加工性能。

参考文献:

[1] 度军波,王晓,张贤明.面向低碳节能的 FDM 3D 打印轮廓路径规划[J].组合机床与自动化加工技术,2023(09):44-47.

[2] 赵国伟.大型 FDM 多喷头 3D 打印机设计与控制系统及工艺参数研究[D].南昌大学,2021

[3] 邹国林,郭东明,贾振元,刘顺福.熔融沉积制造工艺参数的优化[J].大连理工大学学报,2002

作者简介: 张志巍(2005.03—),男,汉族,内蒙古乌兰察布人,大专在读,研究方向:机电一体化技术。