

多孔零件数控加工工艺与工装设计研究

齐信哲 王霞

河北科技学院, 河北唐山, 063200;

摘要: 多孔零件在机械、航空航天、汽车制造等行业广泛使用, 其孔系精度、位置度和表面质量影响整机的装配性能和运行稳定性, 针对多孔零件孔位多、加工变形严重、定位装夹难等工艺问题, 并结合数控加工技术的高精度、高效率优势, 开展加工工艺及专用工装设计。通过对多孔零件结构特性、技术要求及加工难点进行分析, 提出合理的数控加工工艺路线, 完成定位方案、夹紧机构、工装本体的专项设计, 同时优化切削参数和加工路径, 解决多孔加工定位偏差、振动变形、排屑不畅等问题, 通过实际加工试验证明, 该工艺与工装方案可有效提升孔系加工精度与生产效率, 降低废品率, 为其他类型多孔零件数控加工提供可行方案。

关键词: 多孔零件; 数控加工; 工艺优化; 工装设计

DOI: 10.69979/3029-2727.26.05.063

引言

现代机械中的多孔零件具有结构小、受力平均、装配简便等优点, 是各类装备的关键零部件, 从通用连接到航空发动机机匣、汽车缸体等, 都离不开密集孔的精密加工。孔系尺寸精度、位置度公差、同轴度以及表面粗糙度会影响零件的装配精度、密封性能、使用寿命, 普通机床采用分步加工方式, 存在工序分散、定位误差大、效率低下、质量稳定性差的缺陷, 不利于高精度、大批量的加工。数控加工具有自动化程度高、精度可控、柔性等优势, 成为多孔零件加工的主流工艺, 合理加工工艺和专用工装是保证数控加工质量和提高数控加工效率的关键。根据多孔零件的结构特征, 优化数控加工工艺, 配置适合的工装, 解决加工变形、偏位、装夹的难题, 对提高零件的制造精度、节约生产成本、提升企业的市场竞争力具有重要的工程应用价值。

1 多孔零件工艺性分析

1.1 零件结构与技术要求分析

多孔零件的结构差异直接影响加工工艺和工装设计, 通常多孔零件为板、盘类、壳体类结构, 孔系分布为规则方形孔、不规则方形孔、同轴孔、斜孔等, 部分多孔零件兼容平面、槽腔等加工要素。分析时需要全面分析零件图纸, 了解每个孔的尺寸、形位、表面粗糙度要求, 分清通孔、盲孔、深孔, 标注孔与孔、孔与基准面的位置关系, 决定重点精度孔和一般孔加工优先级。除了几何精度的要求, 零件材质也是工艺分析的重点, 铝合金、碳钢、不锈钢、工程塑料等不同材质的切削性

能、硬度、韧性差别较大, 对应刀具类型、切削参数、装夹力等方面均要进行针对性调整, 避免材质造成的加工变形、刀具磨损过快等问题。零件的毛坯形式、加工余量分布也影响工序划分和工装支撑结构, 结合毛坯精度合理分配粗精加工余量, 保证加工精度的同时提高材料利用率。

1.2 加工难点与工艺痛点梳理

多孔零件的结构决定着加工工艺及工装设计, 一般多孔零件为板、盘类、壳体类的结构, 孔系分为规则方形孔、不规则方形孔、同轴孔、斜孔等, 部分多孔零件还可以进行平面、槽腔等加工, 需要全面分析零件图纸, 知道每个孔的尺寸、形位、表面粗糙度要求、通孔、盲孔、深孔以及孔与孔、孔与基准面的位置关系, 选取重点精度孔和一般孔加工的优先级。零件除了要求几何精度以外, 材质也是工艺分析的一个重要内容, 铝、碳、不锈钢、工程塑料等材质切削性能、硬度、韧性不同, 对应的刀具类型、切削参数、装夹力等均有相应调整, 避免材质造成的加工变形、刀具磨损过快。零件的毛坯形式、加工余量也影响工序、工装支撑结构, 根据毛坯精度的粗精加工余量合理分配, 在保证精度的同时提高利用率。

2 多孔零件数控加工工艺设计

2.1 加工基准选择与工序划分

加工基准选择坚持“基准一、基准重合”原则, 零件上精度高、面积大且与孔系关联强的平面或工艺孔作

为精基准,减少基准转换误差,使各工序加工基准与设计基准一致,确保孔系位置度精度;粗基准要考虑毛坯余量的均匀性,以无毛刺、表面平整的毛坯面为毛坯面作为精加工准备基准。工序划分为粗加工、半精加工、精加工三部分,粗加工快速去除大部分加工余量,减少切削应力;半精加工修正粗加工变形,为精加工留余量;精加工强调尺寸精度与表面质量,高精度孔可加铰削、镗削等光整加工。工序顺序贯彻“先面后孔、先粗后精、先主后次”原则,先定位基准面,再孔系加工,先加工精度孔,再普通孔,避免工序颠倒带来精度影响,减少装夹次数。

2.2 刀具选型与切削参数优化

刀具选用需要满足零件的材质、孔径大小和孔型特征,普通碳钢、铝合金多孔加工选用硬质合金麻花钻、扩孔钻、铰刀即可;不锈钢、高温合金等难加工材料,选用涂层硬质合金刀具或高速钢刀具,提高刀具的耐磨性和切削稳定性;深孔加工选用带内冷却通道的深孔钻,通过高压冷却介质,改善排屑条件;小直径精密孔加工采用定径刀具,确保孔径一致性。切削参数要考虑刀具性能、零件材质和机床刚性,粗加工的背吃刀量、进给量大,精加工的切削速度要低,进给量要小。通过正交试验或仿真分析确定主轴转速、进给速度、背吃刀量最佳的组合,并调整切削液流量和喷射角度降低切削温度,减小刀具磨损、零件热变形,提高切削稳定性。

2.3 数控加工路径规划

加工路径决定加工速度和孔系精度,对于阵列式多孔零件按行或列依次加工可减少刀具频繁换向引起的振动;对于不规则孔根据孔位分布就近走刀减少空行程,提高加工效率。孔加工路径采用“中心钻定位—钻孔—扩孔—铰孔/镗孔”的加工方式,首先用中心钻加工定位孔,避免钻头偏位,以保证孔位精度;粗钻孔去除大部分余量,扩孔修正孔径偏差,最后通过铰削或镗削精度达标。对于多层孔或斜孔合理设置刀具补偿参数,控制刀具切入切出角度,防止刀具与零件、工装干涉。编程采用模块化编程,将相同规格孔加工指令封装为子程序,简化程序结构便于后期修改调试,同时加入误差补偿指令,抵消机床间隙、刀具磨损引起的精度偏差,使孔系加工精度满足图纸要求。

3 多孔零件专用工装设计

3.1 工装设计原则与定位方案

多孔零件工装是保证数控加工精度、提高批量生产效率的关键环节,总体原则为精度优先、结构可靠、操作方便、成本可控,兼顾加工质量、生产实操与经济效益。工装本体需具有足够的刚性和抗弯能力,在切削中能够适应切削过程中交变的切削力、夹紧力的影响,避免工装因自身变形导致零件加工出现的偏差。定位元件是加工精度的关键点,其精度高于零件图纸上标注的公差等级1-2级,严格控制形位公差和尺寸精度,工装重复定位误差控制在零件公差的1/3以内,可满足大批量连续加工的要求。

定位方式选用机械加工中成熟的“一面两销”完全定位方式,根据多孔零件零件特点限位。以零件自身精加工基准平面为主定位面,以平面接触约束零件沿Z轴移动、绕X、绕Y转动三个自由度;以高精度圆柱销和菱形销组合定位,圆柱销插入基准孔约束x、Y向移动自由度,菱形销对应另一定位孔约束绕Z转动自由度,六个自由度约束,完全杜绝加工过程中零件窜动偏转现象。定位销选用20CrMnTi等耐磨合金钢材质,经渗碳淬火+低温回火,表面硬度达58-62HRC,提高耐磨性和使用寿命;定位销直径与零件定位孔间隙选用H7/H6间隙,人工或自动装夹既不影响加工效率又精确无误。针对异形多孔、壁厚不均的零件,增设可调辅助支撑元件,支撑点位分布均匀均衡受力,防止局部承压变形;所有定位元件严格避让孔位加工区域和刀具进给路径,避免切削过程中刀具和工装碰撞造成加工过程的干涉;

3.2 夹紧机构设计与夹紧力分析

夹紧机构设计遵循“夹紧可靠、受力均匀、操作方便”的要求,根据零件结构复杂、生产批量、生产节拍灵活采用夹紧形式,进行合理组合。小批量、多品种试制生产、小批量生产、小批量流水线生产、小批量、多品种生产、单件、单点位夹紧机构宜采用螺旋压板夹紧机构,其结构简单、制造方便、价格低廉,不需动力,简单手动操作即可完成夹紧松卸,适合柔性化生产;大批量流水线生产,可选用气动联动夹紧机构,其利用气源动力,装夹时间缩短,大大提高生产效率,减少人工劳动量。

夹紧力参数需要由力学计算得到,“足够且适度”即零件在切削力、离心力作用下不移位,零件不振动,也不允许过紧而挤压变形、压伤零件。夹紧点应选在零

件筋板、凸台等刚度较大的部位，与定位点对应布置，对称夹紧，受力分布均匀，减小局部应力集中；薄壁多孔易变形零件采用多点浮动夹紧，采用弹簧、橡胶垫等弹性元件自适应调整夹紧力，贴合零件表面弧度进行柔性夹紧，减少应力变形；夹紧机构自带自锁功能，避免加工过程中因振动而松动；工装内预留排屑通道和切削液流通间隙，防止切屑堵塞定位面、划伤零件表面，保证定位精度，加工后快速清理工装和零件。

3.3 工装本体结构与校核

工装本体采用 HT250 铸铁或厚钢板焊接结构，铸铁吸震性强，刚性好，适合批量加工；钢板焊接结构制造周期短、布局方便，可满足非标异形零件工装的制造。工装底座用定位键槽和标准安装孔与数控机床 T 型槽对接，用定位键约束工装位移，安装定位误差 0.01mm。工装整体布置紧凑，统筹安排定位元件、夹紧元件、辅助支撑的安装工位，减少冗余结构，降低加工制造难度；预留足够的刀具加工空间，可适用钻、镗、铰孔加工。

设计前期利用 ANSYS 等有限元软件，对工装本体进行受力仿真，模拟夹紧力、切削力作用下应力及变形量，校核承重部位强度及刚度。对变形过大、应力较集中的部位采用加强筋、壁厚、倒角等方法进行修正改进。工装制造完成后进行装配调试及精度检测，采用三坐标测量仪进行定位销位置度、工装基准平面度、平行度等精度的校准，核验合格后开展工作，为多孔零件数控加工提供稳定、精准、可靠的装夹，确保零件孔位精度、形位公差完全满足设计要求。

4 工艺与工装可行性验证

4.1 试加工准备与流程

试加工是工艺与工装可行的必要前期，包括调试、刀具安装、工装校准、程序校验等，采用批量生产毛坯材质与规格相同的工装安装于数控工作台上，并用百分表校准工装定位面与工作台的平行度与垂直度。将编写好的数控程序导入机床系统，进行空运行仿真，检查刀具路径是否存在干涉、程序指令是否正确，调整刀具补偿参数与切削参数，加工流程正常。按照所定工艺，先粗加工、半精加工，再精加工，观察切削状态，判断零件装夹稳定性、排屑性与切削振动，记录加工参数变化，出现异常情况暂停调整零件。

4.2 加工精度检测与结果分析

试加工完成后，通过三坐标测量仪、内径百分表、位置度检具等检测设备对零件孔系尺寸、位置度、同轴度、表面粗糙度等进行全面检测，测定多组试加工零件的精度，统计各项精度，找出误差来源。最终检测表明，该工艺与专用工装加工多孔零件孔尺寸精度在公差范围内，位置度误差在 0.02mm，表面粗糙度达到图纸要求，无明显变形、偏位、刮伤等缺陷，加工精度、质量稳定优于传统加工方式。对于少量超差数据，对误差来源进行排查，确定是因为刀具磨损、参数偏差还是工装定位误差导致的，有针对性地调整切削参数或校准工装定位元件，进一步改进方案。批量试生产后，验证该工艺与工装方案加工效率可以提高 20%以上，废品率在 1%以内，可以满足批量生产。

5 结论

本次研究通过对多孔零件结构特性与加工难点的系统分析，完成了数控加工工艺与专用工装的一体化设计，形成了一套适配多孔零件的高精度、高效率加工方案。研究明确了“一面两销”定位、联动夹紧、分步切削的核心思路，通过优化加工基准、工序划分、刀具参数与工装结构，有效解决了多孔零件加工中的定位偏差、变形、排屑不畅等痛点，保障了孔系加工精度与质量稳定性。实践验证表明，该工艺方案与工装设计具备较强的实用性与可靠性，既能满足单件小批量生产的柔性需求，又适配大批量生产的效率要求，可为同类多孔零件的数控加工提供成熟的技术参考，同时验证了工艺与工装协同设计对提升机械加工质量的重要作用。

参考文献

- [1] 曲全鹏, 李可, 王旭辉. 一种用于多孔零件倒角加工的夹具设计[C]//中国智慧工程研究会. 2024 工程技术应用与施工管理交流会论文集(下). 河南工程学院工程训练中心; , 2024: 421-422.
- [2] 周树强. 基于典型多孔零件加工的精度应用技术研究[J]. 工具技术, 2023, 57(02): 144-147.
- [3] 丁雪莲. 基于 OBE 理念的中职数控加工技术课程设计与实践研究[D]. 贵州师范大学, 2022.
- [4] 韦溟. 航空多孔零件五轴数控加工在机视觉检测技术研究[D]. 南京航空航天大学, 2021.