

Research on efficient machining technology for aluminum alloy panels

Liying Liu

General Technology Group Machine Tool Engineering Research Institute Co., Ltd., Shenyang, Liaoning, 110023, China

Abstract

Due to its low density, high strength-to-weight ratio, and corrosion resistance, aluminum alloy panels are increasingly widely used in high-end equipment fields such as aerospace and automotive manufacturing. This paper focuses on the research of efficient machining technology for aluminum alloy panels, analyzing their material properties, structural characteristics, and machining deformation mechanisms. Subsequently, it delves into key technologies for efficient machining from four dimensions: process parameter optimization, tool design and selection, CNC programming and path planning, and vibration suppression and stability control. Finally, the paper verifies the feasibility and effectiveness of the technology through practical cases in the aerospace and automotive manufacturing sectors, providing theoretical support and practical guidance for the efficient and high-precision machining of aluminum alloy panels.

Keywords

aluminum alloy panels; efficient machining; process parameter optimization; tool design

铝合金壁板的高效机床加工技术研究

刘丽英

通用技术集团机床工程研究院有限公司沈阳分公司, 中国·辽宁 沈阳 110023

摘要

铝合金壁板因密度低、比强度高、耐腐蚀等优势,在航空航天、汽车制造等高端装备领域应用日益广泛。本文围绕铝合金壁板高效加工技术展开研究,分析其材料特性、结构特性及加工变形机理。之后从工艺参数优化、刀具设计与选用、数控编程与路径规划、振动抑制与稳定性控制四个维度,深入探讨高效加工关键技术。文章最后结合航空航天、汽车制造领域的实际应用案例,验证技术的可行性与有效性,为铝合金壁板高效、高精度加工提供理论支撑与实践指导。

关键词

铝合金壁板; 高效加工; 工艺参数优化; 刀具设计

1 引言

在轻量化制造趋势推动下,铝合金凭借优异的综合性能,成为替代传统钢材制造结构件的核心材料之一,其中铝合金壁板作为承力、减重的关键部件,被广泛用于飞机机身、机翼蒙皮、汽车电池包壳体等核心结构中。随着高端装备对性能要求的提升,铝合金壁板逐渐向“大尺寸、薄壁化、复杂化、高精度”方向发展,这对其加工技术提出了更高要求。本文以铝合金壁板加工全流程为研究对象,从特性分析切入,聚焦高效加工关键技术,结合实际应用案例验证技术效果,旨在构建一套涵盖“特性-技术-应用”的完整研究体系,为相关制造企业提供技术参考。

2 铝合金壁板加工特性分析

2.1 材料特性

铝合金作为典型的有色轻金属材料,其特性对加工过程的影响主要体现在三个方面。铝合金的低密度和高塑性并存,其密度约为 2.7g/cm^3 ,仅为钢材的 $1/3$,符合轻量化需求,但这种高塑性会导致切削过程中产生较大的塑性变形,虽然切削抗力低于钢材,但变形能转化的热量易集中在切削区域,从而使刀具温度升高。铝合金还具有良好的导热性,导热系数约为 $200 \sim 300\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,是钢材的 $3\sim 5$ 倍,理论上有利于切削热的扩散,但在加工过程中,高温下的铝屑容易与刀具表面发生化学亲和作用,形成积屑瘤,这会改变刀具的实际切削角度,导致加工表面粗糙度增大,严重时还会出现“粘刀”现象,破坏已加工表面的完整性。此外,铝合金在切削过程中会表现出明显的加工硬化效应,表层金属因塑性变形发生晶格扭曲,导致硬度和强度升高,而塑性和韧性下降,加工硬化层的存在会使后续切削时刀具磨损加剧,

【作者简介】刘丽英(1977-),女,中国内蒙古赤峰市人,本科,工程师,从事研机械设计、制造及自动化研究。

甚至引发切削振动，影响加工的稳定性和精度。

2.2 结构特性

铝合金壁板的结构设计以“减重”和“承力”为核心，其结构特性直接决定加工难度。这些特性主要表现为大尺寸与薄壁化、复杂构型集成化以及结构刚度分布不均。在航空航天领域，机身壁板尺寸常达到数米，而壁厚仅为2~5mm；汽车电池包壳体壁板尺寸多为1~2m，壁厚为3~8mm，这种大尺寸导致加工时工件装夹跨度大，而薄壁则使工件整体刚度低，在切削力作用下容易发生弯曲、扭转等变形，难以保证尺寸精度。为了满足功能需求，铝合金壁板常常集成筋条、凸台、孔系等复杂特征，部分航空壁板甚至采用整体铣削成型工艺，需要从整块铝合金坯料中去除90%以上的材料，这种复杂构型导致切削路径多变，刀具易出现干涉，同时不同特征的加工要求差异大，增加了工艺控制难度。

2.3 加工变形机理

铝合金壁板加工变形是力学变形、热变形及残余应力释放等多种因素协同作用的结果。在切削过程中，刀具对工件施加的切削力，尤其是径向力，是导致薄壁件变形的主要因素。由于壁板刚度低，径向力会使工件产生弹性或塑性变形，弹性变形在切削力消失后可部分恢复，但会导致实际切削深度与设定值偏差，而塑性变形则会造成永久性尺寸误差，如壁板翘曲、筋条弯曲等。不均匀的装夹力也易引发局部凹陷或翘曲，尤其对于大尺寸薄壁件影响更为显著。切削热则会导致铝合金工件局部温度升高，铝合金热膨胀系数约为钢材的2倍以上，冷却过程中因温度分布不均而产生的膨胀量差异会引发收缩变形，例如铣削表面时，表层收缩量大于内部，导致壁板向加工面弯曲。

3 高效加工关键技术研究

3.1 工艺参数优化

铝合金壁板加工需围绕切削速度、进给量、切削深度三大核心参数，结合冷却方式进行协同优化。在切削速度方面，铝合金加工适合采用高速切削技术，高速切削可有效抑制积屑瘤产生，提高材料去除率，采用硬质合金刀具加工6061铝合金时，切削速度可控制在1000~2000m/min，采用聚晶金刚石(PCD)刀具时，切削速度可提升至2000~4000m/min，材料去除率较传统低速切削提高3—5倍，但切削速度超过刀具承受极限时，会导致刀具急剧磨损，降低加工效率。

进给量需在保证表面质量的前提下最大化进给速度，进给量过小会导致切削刃与工件摩擦加剧，易产生加工硬化，过大则会增加切削力，引发工件变形，薄壁壁板加工的进给量通常控制在0.1~0.3mm/r，并配合1—5mm的切削深度^[1]。针对铝合金加工特性，可采用微量润滑(MQL)或低温冷风冷却技术替代传统乳化液冷却(如图1所示)，微量润滑通过将极少量润滑油与压缩空气混合形成油雾，喷射至切

削区域，既能起到润滑作用，减少粘刀与积屑瘤，又能通过压缩空气带走切削热，且无废液污染。低温冷风冷却则是将压缩空气冷却至-10℃~30℃后喷射至切削区域，利用低温气流快速降低切削温度，抑制加工硬化，尤其适用于高速切削工况。采用MQL技术加工铝合金壁板时，刀具寿命可延长30%以上，表面粗糙度Ra可降低至1.6μm以下，同时加工效率提升15%~20%。



图1 MQL微量润滑液图

3.2 刀具设计与选用

铝合金壁板加工常用刀具材料包括硬质合金、聚晶金刚石(PCD)和立方氮化硼(CBN)等，其中硬质合金刀具成本较低，适合中低速切削或粗加工，通过TiAlN、AlCrN等涂层处理可提高耐磨性与抗粘刀性能，AlCrN涂层因具有良好的高温稳定性在铝合金高速切削中应用广泛。PCD刀具硬度高、耐磨性好、摩擦系数低，能有效抑制积屑瘤，适合高精度、高速精加工，尤其适用于硅含量较高的铝合金加工，但PCD刀具脆性大，不宜用于加工含硬质点的材料或断续切削工况(如图2所示)。

CBN刀具硬度仅次于PCD，耐高温性能优异，但与铝合金的亲性和性较强，易粘刀，仅在特定高强度铝合金加工中少量应用^[2]。在刀具几何参数优化方面，铝合金塑性高，需采用较大前角以减少切削变形，通常取10°~20°，后角取8°~12°，精加工时可增大至10°~15°，刃口半径一般取0.05—0.2mm，螺旋角取30°~45°时可使切削力分布更均匀，减少振动，同时有利于排屑。针对壁板复杂构型与薄壁特性，刀具结构需满足排屑顺畅、刚性匹配的要求，粗加工时可采用多刃、大螺旋角的可转位铣刀，精加工时采用整体硬质合金或PCD立铣刀，刀具柄部采用锥柄结构，提高刀柄与主轴的连接刚度，减少振动。



图2 PCD刀具图

3.3 数控编程与路径规划

铝合金壁板加工需根据特征与加工阶段采用差异化加工策略,在粗加工阶段以快速去除余量为目标,采用层切法配合顺铣,顺铣时切削力小、工件变形小,且表面质量优于逆铣。半精加工阶段需修整粗加工后的表面缺陷,同时为精加工预留均匀余量,采用等高线加工或平行加工策略^[1]。精加工阶段以保证精度与表面质量为核心,对平面采用面铣刀环切加工,筋条采用侧刀顺铣,孔系采用先钻后铰或镗削的方式,确保位置度与圆度。

路径优化需围绕“缩短行程、均匀负荷、减少干涉”三个目标展开,采用连续路径规划,避免刀具频繁启停,减少非切削时间,例如粗加工时相邻层路径采用螺旋线过渡,而非直线跳转。根据壁板刚度分布优化路径顺序,先加工刚度较高的区域,后加工刚度较低的薄壁区域,减少后续加工对已加工表面的变形影响。合理选择加工策略与优化加工路径,可显著提高铝合金壁板加工的效率与质量,减少刀具磨损与工件变形,是实现高质高效加工的关键举措。

3.4 振动抑制与稳定性控制

在铝合金壁板加工中,振动抑制与稳定性控制至关重要,需从工艺、结构、控制等多个层面综合施策。工艺层面主要通过优化切削参数实现振动抑制,核心是避开切削颤振区,可通过切削稳定性 lobe 图确定稳定加工参数范围,选择位于稳定区内的切削速度与切削深度组合。结构层面的振动抑制主要通过优化装夹方式与增强工件刚度实现,采用“多点支撑、均匀夹紧”的原则,避免单点夹紧导致的应力集中,例如航空壁板加工时采用真空吸盘与辅助支撑结合的装夹方式,小型壁板可采用工装夹具与工件一体化设计。刀具结构优化也能抑制振动,如采用液压减振刀柄、摩擦减振刀柄等,通过刀柄内部的阻尼元件吸收振动能量。控制层面则引入自适应控制技术,通过振动传感器实时采集振动信号,根据预设阈值自动调整切削参数,使振动幅值控制在允许范围内。

4 高效加工技术应用案例

4.1 航空航天领域案例

某航空制造企业需加工某型飞机机身壁板,材料为7075-T6 铝合金,壁板尺寸4000mm×1200mm×3mm,集成10条高度20mm的筋条及200余个直径8mm的孔系,要求平面度 $\leq 0.5\text{mm/m}$,表面粗糙度 $Ra \leq 1.6\ \mu\text{m}$ 。传统加工采用高速钢刀具,切削速度300m/min,进给量0.1mm/r,加工周期长达48小时,且壁板翘曲变形量达2—3mm,合格率仅60%。为解决上述问题,在工艺参数优化方面,选用PCD面铣刀,将切削速度提升至3000m/min,进给量增大至0.2mm/r,切削深度设定为2mm,并采用MQL冷却方式,润滑油流量20mL/h,压缩空气压力0.6MPa。

刀具与装夹优化方面,筋条加工采用整体硬质合金立

铣刀,刀具前角 15° ,后角 10° ,刃口半径0.1mm,装夹采用真空吸盘与6个可调节辅助支撑的组合方式,辅助支撑均匀分布在筋条之间的薄壁区域。编程与振动控制方面,通过CAM软件生成连续螺旋线层切路径,粗加工后采用等高线半精加工,精加工阶段引入自适应振动控制系统,设定振动阈值0.04mm。残余应力控制方面,粗加工后增加去应力退火工序,在 120°C 下保温2小时,以释放加工残余应力。应用该方案后,材料去除率从传统的 $150\text{cm}^3/\text{min}$ 提升至 $500\text{cm}^3/\text{min}$,加工周期缩短至12小时,较传统工艺提升75%,壁板翘曲变形量控制在0.3mm以内,平面度与表面粗糙度均满足要求,刀具寿命从8小时延长至25小时,生产成本降低30%,产品合格率提升至98%,加工效果显著改善。

4.2 汽车制造领域案例

针对某汽车零部件企业在加工新能源汽车电池包壳体6061铝合金壁板时遇到的散热槽尺寸超差率高、难以满足批量生产需求等问题,本文研究提出了一套优化的高效加工技术方案。在刀具与工艺参数方面,散热槽加工选用AlCrN涂层硬质合金立铣刀,该刀具为4刃设计,螺旋角 35° ,切削速度提高至1500m/min,进给量增大至0.25mm/r,切削深度设定为1mm,并采用低温冷风冷却,冷风温度 -20°C ,流量 $15\text{m}^3/\text{h}$ 。

路径与装夹优化方面,采用分层环切路径加工散热槽,先加工槽底再加工侧壁,装夹采用气动夹具与定位销相结合的方式,确保壁板定位准确且夹紧力均匀。为抑制加工振动,选用摩擦减振刀柄,刀柄阻尼系数0.2,同时通过稳定性 lobe 图确定稳定加工参数,避开颤振区。应用该优化方案后,批量生产数据显示单件加工时间缩短至0.8小时,生产效率提升46.7%,散热槽尺寸超差率降至2%以下,安装孔位置度合格率达100%。低温冷风冷却替代乳化液,不仅减少了废液处理成本,还使刀具磨损量降低20%,单件加工成本下降18%,完全满足了批量生产需求。

5 结语

综上所述,通过多维度协同优化,可显著提升铝合金壁板的加工效率、降低加工成本、保证加工质量,为高端装备制造中铝合金薄壁件的加工提供了可行路径。然而,随着铝合金壁板向“超薄壁、超大尺寸、超复杂”方向发展,未来还需进一步研究,通过持续技术创新,推动铝合金壁板加工技术向更高效率、更高精度、更智能化方向发展。

参考文献

- [1] 张化斌.7075铝合金飞机整体壁板SLM增材制造工艺研究[D].中北大学,2024.
- [2] 孙逊.7075-3.5陶瓷铝合金壁板长桁的力学性能及结构优化设计研究[D].哈尔滨工业大学,2022.
- [3] 吕振兴,闻强苗,张天梁,等.大型薄壁铝合金壁板加工变形控制技术[J].航天制造技术,2022,(05):52-54+73.