

航天铝合金薄壁零件高效加工策略

High Efficiency Machining Strategies of Aerospace Aluminum Alloy Thin-Wall Parts

上海航天精密机械研究所 蹇悦 杨叶 郭国强



蹇悦

上海航天精密机械研究所工程师，主要从事机械加工工艺及数控加工相关技术研究。

高效加工是以高速加工技术和切削工艺优化相结合的新工艺，是解决航天复杂整体结构件的关键技术。高效加工技术的特征是加工过程中的高材料去除率和短的单件加工时间，并通过切削参数优化，保证加工精度和表面质量。

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.06.054

高强度铝合金虽具有良好的可切削性，但由于航天产品结构件具有形状结构复杂、材料去除量大、薄壁易变形等特点，且对零件加工精度、质量及加工效率等各方面具有更高的要求，因此，一直以来航天制造业也持续进行高强铝合金的高效切削加工研究。高效加工是以高速加工技术和切削工艺优化相结合的新工艺，是解决航天复杂整体结构件的关键技术。高效加工技术的特征是加工过程中的高材料去除率和短的单件加工时间，并通过切削参数优化，保证加工精度和表面质量。

高效加工方案

1 加工系统优化

高速高效加工相比普通加工对整个加工系统具有更高的要求。在航天整体结构件数控铣削加工过程中，要保证零件加工质量和加工精度，提高加工过程的材料去除率，首先必须针对由机床-刀具-工件及其相互间接口(刀柄和夹具)组成的切削加工系统进行系统优化，保证高速切削过程中整个系统的稳定可靠。

1.1 机床

高速切削加工对机床的要求主要包括以下方面：

(1) 机床结构要有优良的静、动态特性和热态特性；

(2) 主轴单元能够提供高转速、大功率、大扭矩；

(3) 进给单元能够提供大进给

目前，我国航天产品已经逐渐步入高密度发射时期，各类航天产品的制造需求量逐年递增，迫使航天制造企业产能必须大幅提升。

航天典型零件目前最常采用的是高强度铝合金材料(例如 2A12)，属于易切削塑性材料，强度和硬度较低，熔点低，导热性好，抗拉强度低。

速度。

必要时,可通过对切削加工系统进行模态分析试验,获取铣削加工系统动态性能参数,为求解铣削加工动力学模型和预测加工稳定性提供相应的基础数据。

1.2 刀柄

对于高速加工刀具与刀柄选用,首先应考虑使用的安全性,否则会破坏机床主轴,甚至发生安全事故。高速切削加工对刀具和刀柄的选用要求主要包括以下方面。

(1) 刀具的许用速度必须大于等于实际加工速度。

(2) 高速加工刀具和刀柄必须满足动平衡和径向跳动的要求,一般应达到 G6.3 或 G2.5 以上要求。

经动平衡测试(见图 1),液压刀柄和刀具、强力动平衡式刀柄和刀具能够达到 G2.5 的动平衡精度要求,而弹簧夹头式刀柄和刀具能达到 G6.3 的动平衡精度要求,但达不到 G2.5 的动平衡精度要求。



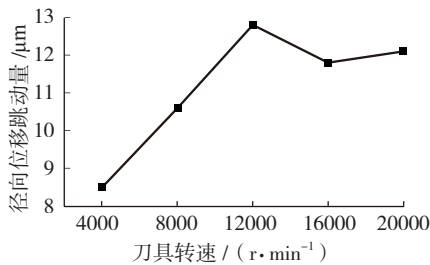
图1 刀柄和刀具的动平衡检测

在分别对强力动平衡式刀柄、弹簧夹头刀柄、柄液压式刀柄进行最大径向位移跳动测量(见图 2)时发现,强力动平衡式刀柄具有最小径向跳动(见图 3)。

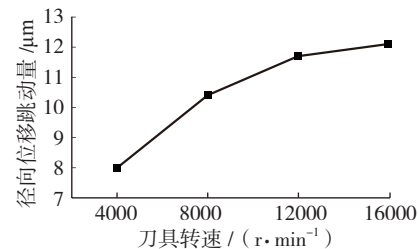
从径向位移跳动测量试验中可以看出,在刀具转速为 20000r/min 的条件下,选用了动平衡质量精度达到 G2.5 等级的强力刀具与刀柄。经过径向位移跳动检测,当机床主轴转速达到 20000r/min 时,刀具的最大径向位移跳动量为 10.95~12.05 μm ,满足



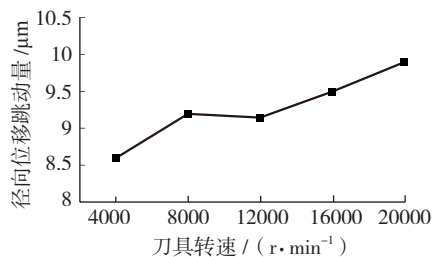
图2 径向位移跳动测量现场图



(a) 强力刀柄



(b) 弹簧夹头刀柄



(c) 液压式刀柄

图3 不同刀具、不同转速下的最大径向位移跳动量

高速精密加工中刀具径向跳动量要求。

(3) 在高速加工中要求刀柄具有更高的夹持力。

图 4 给出了 HSK 系列中常用的液压刀柄、强力刀柄和热缩刀柄能达到的最大扭矩对比,从图中可以看出,若采用普通的弹簧夹头 ER32 所能达到的最大扭矩仅为 196N·m,采用液压刀柄 HYDRO32 所能达到的最大扭矩为 441N·m,采用热缩刀柄

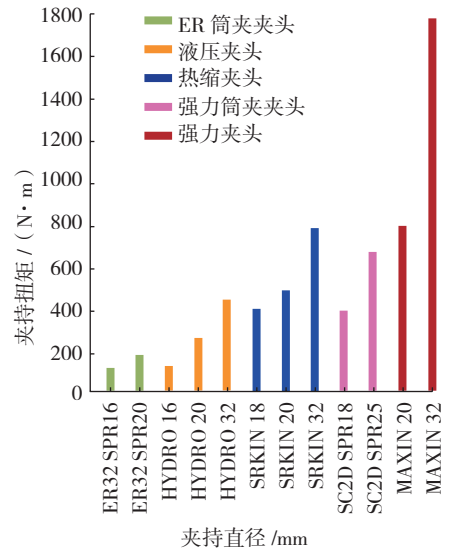


图4 不同夹紧方式最大扭矩对比

所能达到的最大扭矩为 784N·m,与强力刀柄 MAXIN20 所能达到的最大扭矩相同。

综上所述,强力动平衡刀柄具有高动平衡精度、小径向跳动,适合用于高速高精加工。另外,采用热缩刀柄亦能获得较高的动平衡精度,较低的刀柄重量,以及较高的刀具夹持力。

1.3 装夹系统

高效加工专用工装不但要保证高速切削时有效夹紧定位,同时还应考虑方便实现快速定位夹紧,其设计要点主要包括以下几个方面。

(1) 工装与工件的定位接触面积尽可能大,同时在工件上选择尽可能大的平面(或曲面)作为定位面,并提高该定位面的加工精度要求,确保工件定位面与夹具基准面自然、紧密贴合,增大接触刚度。

(2) 对刚性较差的薄壁零件常采用过定位方式定位,特别是在刚性薄弱处要加支撑,以提高工件的工艺刚度。

(3) 在保证可靠夹紧的前提下,采用尽可能小的、均布的夹紧力,适当增加夹紧点的数目和增大夹紧力的作用面积。在零件刚性好的方向施加夹紧力,并且作用于刚性好的表面上。

目前制造业普遍采用的装夹夹具主要有机械式、液压可调式、真空吸附式、气压式等。相较于传统手动机械装夹夹具,液压、真空吸附和气动夹具具有可实现自动化、装夹效率高、夹紧力可控等特点,更适合高效加工。

真空吸附夹具夹紧力较小(其单位压力不超过一个大气压,即小于 10^5Pa),但分布均匀,适用于夹紧任何具有较光滑表面的物体,特别是非金属类不适合夹取的弱刚性大型薄壳工件的精车、磨削、抛光等小余量去除加工。但真空吸附夹具对与夹具接触的工件表面粗糙度及轮廓尺寸要求较高。

液压可调夹具,能实现夹紧原件姿态、状态的实时可调可控,可保证刀具切削轨迹的连续性;此外,还可以改变或更换夹具的部分组件来改变夹具结构,以适应不同零件的加工装夹要求,具有更广泛的适用性。

气压夹具能够实现液压夹具功能,并达到足够大的压紧力,与液压夹具不同的是,气压夹具采用空气压力作为动力源。

2 加工工艺改进

粗加工的主要目的是去除材料,为精加工留合适的余量,因此粗加工一般不需要考虑工件的尺寸精度、表面质量以及变形问题,只要机床的功率允许,可以从多方面提高生产效率。

零件的精加工与粗加工有一定区别,在精加工中需要充分考虑装夹、走刀、工艺参数对零件内部应力的影响以及切削时切削力、切削热对零件结构的影响,控制变形,避免由于效率提升引起变形,造成零件精度及表面质量破坏。

2.1 切削刀具

选择更加合理的刀具可以直接提高生产效率。铝合金材料的切削加工对刀具材料要求不高,一般采用硬质合金铣刀即可,涂层可使用无涂

层或金刚石涂层。在粗加工中由于不必考虑精度及质量问题,可以最大限度高效切除金属材料,因此可以选择大直径刀具,减少走刀次数,缩短走刀时间。另外,在粗加工中尽量选择密齿刀具替代疏齿刀具,可以增加每转进给量,在相同的转速下切削速度可以得到增加。在精加工中,除了考虑材料高效去除的问题,还应充分考虑薄壁构件在切削中受力变形控制问题。航天铝合金薄壁件精加工宜选用K系列硬质合金刀具(相当于我国原钨钴类,主要成分为 $\text{WC}+\text{Co}$,代号为YG)。刀具前角不能太小,否则增大了切削变形和摩擦力,前刀面磨损加大,降低刀具使用寿命。切削试验表明:在高速铣削 AlCuMgPb 时前角每减少 1° ,则切削力增加1%。为此一般推荐使用 γ_0 为 12° 左右。刀具后角的选取会影响刀具刚度,为了减少刀具和工件之间的摩擦,后角一定要选得大一些,必要时可采用双倒棱后角,在增大后角的同时保证刀具刚度。刃倾角影响了切屑流出的方向和各切削分力的大小,在铝合金切削时宜选用较大的刃倾角。在高速铣削铝合金时,一般推荐使用 λ_s 为 $20^\circ\sim 25^\circ$ 。此外,刀尖圆弧半径的选择应适当,刀齿不能太密,便于切屑排出,有利于进给量进一步提高,防止冷作硬化层,延长刀具使用寿命^[1]。

2.2 走刀轨迹

提速增效中一个较为有效的方法就是优化走刀轨迹,在高速切削时要保证刀位路径的方向性,即刀具轨迹尽可能简化,少转折点,路径尽量平滑,减少急速转向;应减少空走刀时间,尽可能增加切削时间在整个工件中的比例;应尽量采用回路切削,通过不中断切削过程和刀具路径,减少刀具的切入和切出次数,获得稳定、高效、高精度的切削过程。

在航天整体结构件的大型复杂曲面高速切削加工中,曲面曲率变

化大时,应以最大曲率半径方向作为最优走刀方向,如图5所示;曲面曲率变化小时,曲率半径对走刀方向的影响减弱,宜选择单条刀轨平均长度最长的走刀方向,如图6所示。

在斜面加工时,若采用图7所示的横向水平走刀,每一段走刀距离都很短,在切削过程中主轴需要频繁换向,切削稳定性差,且由于切削的是斜面,水平走刀需要X或Y轴与Z轴的联动,不利于切削速度的提升。因此,针对此类斜面加工,走刀轨迹尽量安排为平行于最长斜边(见图8),不但走刀轨迹最长、换向次数最少,而且单道走刀都只是在XY平面运动切削,Z轴方向运动都是安排在工件轮廓之外的位置,即使在高速切削下亦可减小刀具损伤。

2.3 切削参数

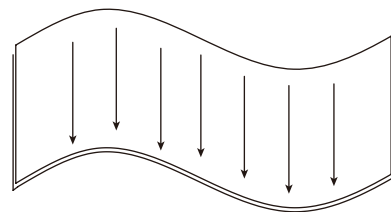


图5 小曲率半径曲面的走刀路径

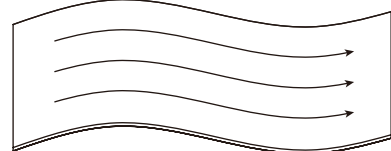


图6 大曲率半径的曲面走刀路径

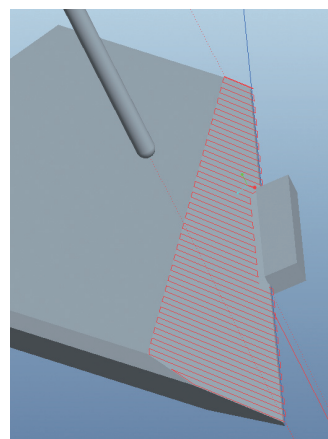


图7 横向水平走刀轨迹

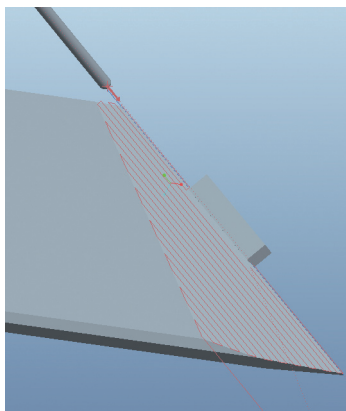


图8 斜向平行走刀轨迹

在粗加工时,一般可选择大进给量与适当的切削深度并配以中等切削速度的“大功率”高效切削,更能达到高材料切除率,从而极大提高生产效率。而对于精加工来说,只有提高转速和增大齿数是可行的,而增大每齿进给量可能会降低表面精度,产生残余应力导致变形。所以以往通过高切削速度、低每齿进给量的“轻切快切”来保证生产效率的提高和产品的精度及表面质量。

切削参数可通过切削加工有限元分析和切削加工试验最终确定:利用 Third Wave AdvantEdge 软件,针对不同工艺参数下的机床主轴功率与扭矩需求,进行了仿真分析运算,获取机床主轴能够很好地满足产品高速加工工艺需求的主轴转速、每齿进给量和切削深度等要素的可选范围。为切削试验参数选择提供指导性建议。

在 Third Wave AdvantEdge 软件内,通过新建任务,完成工件材料、刀具材料及涂层、刀具结构参数、切削用量的设定,进行仿真,获取某一切削用量下切削扭矩需求曲线图。根据曲线图显示数据确定在当前的切削用量下,切削功率及切削扭矩的最大需求,比对机床实际性能参数(电主轴扭矩、功率图)即可确定工艺参数的符合性。

例如,最高转速 24000r/min 的加工中心进行 2219 铝合金薄壁结构

表1 高速铣削粗加工的功率和扭矩仿真计算结果

编号	刀具直径/mm	刀齿数	主轴转速/(r·min ⁻¹)	每齿进给量/(mm·z ⁻¹)	切削深度/mm	切削功率/kW	切削扭矩/(N·m)
24-1	25	3	6000	0.15	1.5	7	11
24-2	25	3	8000	0.20	3.0	40	43
24-3	32	3	6000	0.20	3.0	25	40
24-4	32	3	20000	0.15	2.0	52	25
40-1	25	3	10000	0.15	1.5	11	10.5
40-2	25	3	15000	0.15	2.0	22	14
40-3	32	3	20000	0.10	1.5	20	9.5
40-4	32	3	20000	0.15	1.5	23	11

件高速粗铣加工,采用可转位刀具搭配无涂层细晶粒硬质合金刀片,选用 $\phi 25\text{mm}$ 、 $\phi 32\text{mm}$ 两个水平的刀具直径,进行仿真计算,结果如表 1 所示。其中,编号 24-1 刀具直径 25mm,刀齿数 3,主轴转速 6000r/min,每齿进给量 0.15mm/z,切削深度 1.5mm。

(1) 功率需求如图 9 所示。

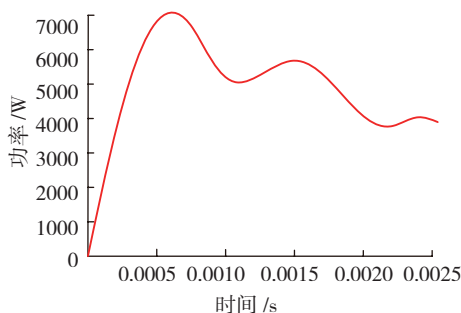


图9 编号24-1切削用量下切削功率需求

(2) 扭矩需求如图 10 所示。

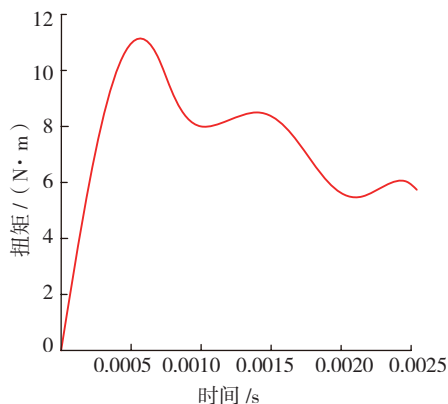


图10 编号24-1切削用量下切削扭矩需求

从图 9 和图 10 可以看出,在当

前的切削用量下,切削功率的最大需求为 7kW,切削扭矩需求为 11N·m。机床主轴最大转速为 24000r/min 的龙门高速加工中心在 6000r/min 时的最大功率输出为 42kW (额定工作条件 S1),最大输出扭矩为 67N·m (额定工作条件 S1),能够满足当前的加工需求。

通过对 8 组仿真结果确认可以发现,为了使机床的加工功率和扭矩能够满足切削加工用量的要求,必须合理选择刀具和切削用量,如表 2 所示。

现有的龙门数控加工中心,机床主轴最高转速达 24000r/min,在薄壁壁板的粗加工过程中,若选用 $\phi 25\text{mm}$ 或者 $\phi 32\text{mm}$ 可转位式刀具,对于切削用量的优化,主轴转速应适当提高,选择范围为 12000~15000r/min;每齿进给量和切削深度不应过大,可选择范围分别为 0.15mm/z 和 2~3mm。

在有限元分析所得参数可选范围内即可设计切削试验,以切削效率、表面粗糙度、加工表面形貌为评判标准,最终选取最优切削参数。

加工实例

根据以上改进思路,对一种典型折叠式翼板进行了高效加工工艺改进。

根据该零件多角度斜面、圆弧面

表2 机床功率与扭矩需求分析

编号	刀具直径/mm	主轴转速/(r·min ⁻¹)	每齿进给量/(mm·z ⁻¹)	切削深度/mm	材料去除率/(cm ³ ·min ⁻¹)	切削功率/kW	切削扭矩/(N·m)	机床功率与扭矩是否满足要求
24-1	25	6000	0.15	1.5	101.25	7	11	是
24-2	25	8000	0.20	3.0	360	40	43	是
24-3	32	6000	0.20	3.0	345.60	25	40	是
24-4	32	20000	0.15	2.0	576	52	25	否
40-1	25	10000	0.15	1.5	168.75	11	10.5	是
40-2	25	15000	0.15	2.0	337.5	22	14	是
40-3	32	20000	0.10	1.5	288	20	9.5	是
40-4	32	20000	0.15	1.5	432	23	11	是

过渡、高精度孔槽特点,选用 DMG 高精度五轴加工中心作为加工设备,设计制造了专用液压可调工装,以一台液动力单元为专用液压工装提供动力源,油液通过管道进入工装主体内部液压缸,以控制夹持原件的夹紧和松弛运动。

翼板零件的各个型面材料去除量占到了整个零件材料去除量的70%,在加工中时间占比也非常高,通过改进刀具,优化切削参数,提升型面加工效率,可大幅缩短翼板类零件制造时间。

改进后采用 SECO 品牌的 R220.69-0050-10-5A ϕ 50mm 镶片式立铣刀头搭配 XOEX10T304FR-E05 H15 刀片(见图 11)完成各型面的粗加工。镶片式铣刀较之整体式铣刀有刚性好、经济性高的特点,本次选用的 ϕ 50mm 镶片式立铣刀适用于方肩铣,镶嵌刀片长度为 10mm,最大切深可达 9mm,一把刀就可同时完成翼板零件各端面及侧面的加工。为了提升加工效率,走刀时几乎采用满切宽进行切削,每齿进给 f_z 约为 0.05mm/z,进给速度约为 900m/min。

在翼板零件型面精加工时,由于零件存在较高的侧壁需要加工,必须选择悬伸较长的刀具进行切削,因此对刀具的刚性提出更高的要求。因此选用了 SECO 品牌的 ϕ 20mm 整体硬质合金立铣刀,搭配热缩夹持刀

柄,进一步提升切削刚性,如图 12 所示。

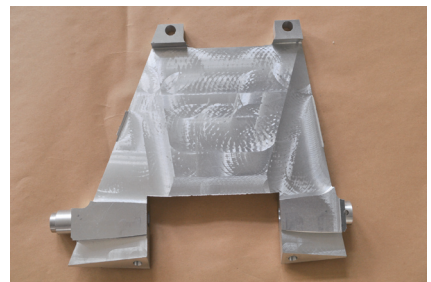
经过对翼板零件型面的粗精加工高效改进,该零件加工效率提升 3 倍以上,产品尺寸精度及表面质量得到有效保证,改进前后加工出的型面表面形貌如图 13 所示。另外,在精加工高速切削时,金属材料被迅速切断并脱离工件表面,因此加工出的零件周边毛刺明显减少,后续钳工挫修工作量大幅减少,进一步缩短零件整体加工时间。



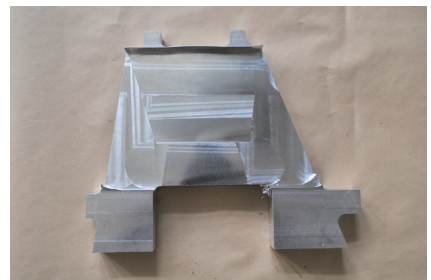
图11 ϕ 50mm 镶片铣刀刀盘及刀片



图12 热缩刀柄夹持的SECO ϕ 20mm 整体硬质合金立铣刀



(a) 改进前



(b) 改进后

图13 改进前后加工出的型面表面形貌

结束语

航天铝合金结构件在航天产品结构件加工中占比大,通过高效加工改进,可大幅提升产品加工效率,缩短加工时间、降低劳动强度,同时保证产品精度并获得了更佳的产品表面质量。该改进思路亦可以拓展运用于其他行业更多薄壁结构件的机械加工中。

参考文献

[1] 王少红. 航空薄壁零件的铣削加工变形控制研究 [D]. 大连: 大连交通大学, 2008

(责编 玲犀)