

钛合金材料切削加工性能探讨

Research of Machining Performance for Titanium Alloy

中航工业沈阳黎明航空发动机(集团)有限责任公司 胡晓群 李家永 岳召启 刘旭萍
中航工业沈阳黎明航空发动机(集团)有限责任公司军代表室 陈亚莉



胡晓群

研究员级高级工程师,长期从事航空发动机整体叶盘、机匣加工工艺研究、高效数控和精密加工技术的研究。

本文通过对钛合金材料整体叶盘、压气机机匣的切削实践,总结了钛合金切削特点、切削刀具材料、刀具结构、钛合金高效切削参数的获取以及提高刀具耐用度和加工效率所采取的工艺对策,希望能起到一些参考作用。

异性能,在航空领域得到越来越广泛的应用。基于上述优点,钛合金材料成为飞机发动机一些零部件的首选材料。

钛合金材料的切削特点

钛合金的一些物理力学性能给切削加工带来了较大难度。钛合金切削时变形系数小,使得切屑在前刀面上滑动摩擦路程增大,加速刀具磨损^[1]。钛合金导热系数小,切削时产生的热量不易传出,集中在切削刃附近的小范围内。钛合金弹性模量小,加工时在径向力的作用下容易产生弯曲变形,引起振动,加大刀具磨损并影响零件的精度。由于钛合金对刀具材料的化学亲和性强,在切削温度高和单位面积上切削力大的条件下,刀具容易产生粘结磨损。

航空发动机行业常用的难加工材料包括高温合金、钛合金等。航空发动机难加工材料加工中普遍面临

的难题是切削效率偏低,这制约了新产品研制的快速反应和现有产品的生产批量扩大。据了解,国外铣削加工一台同直径尺寸钛合金整体叶盘,从实体环形毛坯到精加工后的成品所需加工时间仅为国内加工时间的1/3左右。差距如此之大,从一个侧面反应出我国难加工材料的加工技术亟待提高。

合理选用刀具材料

刀具材料是影响切削加工的重要因素之一,所以合理选择刀具材料是解决难加工材料切削的一条有效途径。钛合金材料切削用刀具具有硬质合金刀具、涂层刀具、立方氮化硼(CBN)刀具、金刚石刀具和高性能高速钢刀具等。不同材料的刀具具有特定的适应加工范围,其寿命也存在差异。被加工材料的特性往往是选择刀具材料的基本依据,同时刀具材料与工件材料的切削性能要合理

为了提高发动机的可靠性和推力,先进高性能发动机采用了大量新材料,其结构越来越复杂,加工精度要求越来越高,对制造工艺提出了更高的要求。在新一代航空发动机性能的提高中,制造技术与材料的贡献率为50%~70%;在发动机减重方面,制造技术和材料的贡献率占70%~80%,这也充分表明先进的材料和工艺是航空发动机实现减重、增效、改善性能的关键^[1]。

钛合金材料因比强度高、密度小、耐腐蚀、耐高温和焊接性好等优

匹配。刀具材料的性能对加工表面质量、加工效率和刀具寿命有重要影响。

航空发动机机匣类和整体叶盘类零件的大量加工经验表明,加工工况也是选择刀具时需要参考的条件之一。当被加工零件结构特殊、刚性较弱、工艺中又无法增强其刚性时,切削中会有振颤发生。此时,选择刀具需要考虑刀具材料具有一定的韧性,避免刀具崩刃现象产生,造成刀具过快报废。

刀具结构的优化

刀具的切削性能不仅取决于刀具材料,还与刀具的结构和几何形状有关^[2]。切削难加工材料时,适宜刀具的几何形状有助于充分发挥刀具的切削性能,提高切削效率。刀具的主要几何参数有前角、后角、主偏角、副偏角、刃倾角和刀尖圆角半径等。

刀具的前角愈大,刀具愈锋利,切削力愈小,适用于精加工。

钛合金已加工表面材料回弹大,采用大后角可减少工件对后刀面造成的摩擦和粘结等现象,并减少后刀面的磨损。粗加工时,为增加刀具强度,宜选用小后角。

切削钛合金时切削温度高、弹性变形倾向大,在工艺系统刚性允许的条件下,应尽量减小主偏角,以增加切削部分的散热面积和减小切削刃单位长度上负荷。减小副偏角可以加强刀尖,有利于散热和降低加工表面粗糙度值。

在毛坯有硬皮和表层组织不均匀的状态下,粗车时切削刃容易崩损,为了增加切削刃的强度和锋利程度,应加大切削的滑动速度,选择适宜的刃倾角。

国内有学者通过对高速铣削加工开展数值模拟研究^[3],把高速铣削过程简化,建立了斜角切削几何模型和有限元模型。用这些模型预测高速切削过程中不同刀具几何参数组

合下的切削力,给高速数控铣削过程中的刀具选择提供依据。

近年来在深型腔复杂结构件的加工中,刀柄的整体几何形状也引起了工程技术人员的注意。例如在精铣削整体叶盘的轮毂与叶片型面时(图1),需要采用整体硬质合金直柄球刀。当两叶片之间间距过于狭窄或叶片根部与轮毂转接R较小时,刀具直径减小。为增强刀具的刚性和提高加工效率,往往采用锥柄球刀(图2)。特别是在使用大长径比刀具的工况下,和直柄球刀相比,锥柄球刀使刀具系统刚性增强,可以使刀具每齿进给量增大,加工时不易折断,效果远远好于直柄球刀。

提高刀具耐用度和加工效率的工艺对策

钛合金切削时,切削刃附近区域切削温度高,主要是高温热效应作用下加剧了刀具磨损。对于硬质合金刀具而言,磨损主要是粘结温度所引起的粘附磨损。在刀具直径允许情况下,可以尽量采用带有内部冷却功能的刀具,这种刀具喷出的冷却液角度恰好集中在刀尖区域,可有效地降低切削区域温度,延长刀具寿命,提高刀具的耐用度。通常内冷刀具直径较大,对于小曲率半径的曲面或区域,可以预先采用大直径带内冷的刀具进行粗加工,以提高加工效率。

铣削加工是不连续的切削过程,加工中刀具承受断续的冲击负荷,在铣削加工中发现,工艺装备系统的刚性较差时,在切削力、装夹力、切削振颤等因素作用下,刀具磨损加剧,耐用度明显下降。同时工件表面出现振纹,影响表面质量。因此提高工艺装备系统的刚性,改善装夹方法或工件夹紧部位,提高工件铣削时的稳定性,可以降低振颤,减少磨损,提高刀具耐用度。在机械加工中,通常要求装夹定位基准与设计基准、加工后的检测基准为同一个基准。对于大型

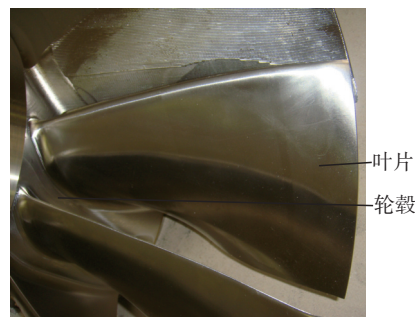


图1 整体叶盘叶片与流道

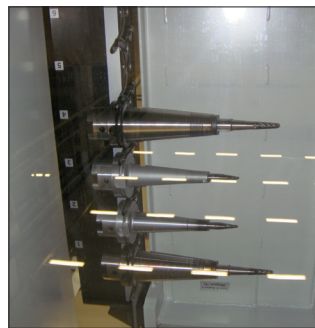


图2 加工用锥柄球刀

薄壁弱刚性工件整体叶盘而言,考虑到增加零件铣削时的刚性,在铣削加工中将工艺基准转移到靠近叶片的轮毂处(图3)。通过不同装夹部位的对比加工和验证,获得了较好的加工精度和加工效率。

采用浇注填充材料的工艺也可以有效地抑制振颤发生。在大型钛合金整体叶盘的叶片型面铣削加工中采用了该项工艺,消除了叶尖表面颤纹,使叶身型面刀具轨迹均匀,有利于后续无损检查工序的进行。由于工件系统刚性增强,提高了走刀进给率,使铣削效率得到提高。

刀具磨损自动监测技术近年来发展的比较快,有资料报道国外进行了有效应用,在安全使用的范围内,最大限度地延长了刀具的使用时间。磨损是刀具主要失效因素之一,在加工中刀具寿命一般来自切削试验,根据刀具磨损程度和加工时间确定,但通常留有一定裕度。常规加工中,机床操作者可以根据机床振动变化、切削噪声的突然提高、主轴功率显示表等判断刀具磨损的情况。如果加工中应用刀具破损自动监测技术,能够

动态随时准确进行刀具磨损状态分析、监控,则刀具寿命可以安全地适度延长。

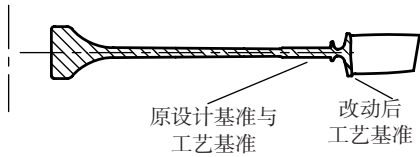


图3 工艺基准变换

钛合金高效切削参数获取

企业在目前的产品制造中,已经满足了刀具轨迹的优化验证需求,但尚未完全解决优化切削参数的获取方法问题。近年来,各企业正在积极研究钛合金的高效切削技术。据悉,西方国家大型钛合金整体叶盘切削速度可以达到 300mm/min 或更高。航空发动机制造企业所拥有的进口机床先进性与国外企业相当,切削所采用的刀具相当一部分也是进口刀具,可以说从硬件上已经具备了相同的实力,但是加工效率和国外相比差距不小,特别是钛合金等难加工材料的加工效率亟待提高,经分析存在以下一些原因。

(1) 有针对性的基础切削试验不足,难以得到具有较高切削速度的参数做工艺决策支撑。

(2) 企业获取切削参数渠道有限,通常来自刀具供应商手册推荐数据。这种参数尽管是来自于国外供应商较为系统的切削试验数据,但试验条件和环境与企业加工零件的工况差异不同,很难完全照搬手册数据。

(3) 高效切削参数试验和获取的周期较长。由于企业机床以产品批量生产为主体,很难抽出专用设备开展专项试验,切削数据的优化试验往往与真实零件的加工同步进行,存在较大风险。特别是在精加工工序,切削后零件表面已经无余量,要顾及到万一切削参数使用不当,产生断刀、崩刃或其它极容易引起表面质量问题的情况。因此,高效切削参数试

验数据的选取需要分阶段逐步提升,谨慎而行,不可能在较短的周期内快速提高。往往需要多个批次、多个零件的加工验证,乃至持续数年,从验证机到原型机,甚至产品进入定型阶段还在进行提高加工效率的精益改善。

(4) 科研院所的研究成果工程化推广与应用不充分。事实上科研院所对难加工材料的高效加工极为重视,并开展了大量试验,取得一些成就。但所作的切削试验不是完全基于发动机零件的真实加工环境,包括试验零件所选取的工艺特性数据例如:零件真实尺寸、结构形状、零件刚性、装夹方式、刀具悬伸等等。因而是一种共性的试验而不是典型特征试验,因此切削参数在实际应用中有局限性。作为企业一方亟需要得到科研院所的技术支撑,共同合作,以加快企业技术创新和提升制造能力的步伐。

国外的高效(高速)切削参数多数来自设立在企业的切削实验室,根据试验结果指导生产现场,通常大型企业的切削试验室科研能力与高校不分伯仲。这种科研体制具有针对性强、见效快、易于全面推广的优点。

“交钥匙”工程是近年来颇受企业青睐的一种有效获取高效加工或新产品工艺方式之一。“交钥匙”工程是在引进国外先进工艺加工零件,由企业额外支付一定费用。

国外大型高端机床供应商通常拥有专门的切削实验室,具备较高的研发能力。为拓宽销售渠道,扩大市场份额,往往以“交钥匙”的方式按客户需求承担研发任务。借助这种方式,企业在引进、消化、吸收、提高的基础上,以最快的速度获取所需要的高效切削技术,不失为一条快捷的途径。

切削过程物理仿真技术应用

随着数字化制造技术的飞速发展,金属切削过程的有限元仿真作为制造工艺的一种新型技术,正逐渐融

入机械加工领域,是推动未来高效切削工艺快速发展的途径之一。

通过切削仿真不仅可以预报切削力,分析切削过程中应变、应变率、应力和温度等状态变量的分布,同时还可以预报刀具磨损、工件残余应力,并进一步优化切削参数。有限元法的引入丰富了钛合金切削机理的研究手段。研究学者针对钛合金加工中的刀具磨损仿真预测进行了研究,建立了综合考虑刀具多种磨损因素下的仿真模型,可在一定程度上实现刀具磨损的仿真预测。随着数值计算理论和软件工具的不断发展,切削过程仿真和预测必将在切削加工理论和技术的研究中起到重要作用^[4]。

工程技术人员可以依据仿真结论提前预测弱刚性部位的变形规律,重新建立供数控编程用的适宜变形部位加工的三维几何数据模型。

结束语

钛合金材料的高效切削技术是航空发动机行业内重点关注的关键技术,它可以使发动机制造行业产能实现大幅提高,充分体现“科技是第一生产力”的内涵。本文通过对钛合金材料整体叶盘、压气机机匣的切削实践,总结了钛合金切削特点、切削刀具材料、刀具结构、钛合金高效切削参数的获取以及提高刀具耐用度和加工效率所采取的工艺对策,希望能起到一些参考作用。

参考文献

- [1] 黄维,黄春峰,王永明,等.先进航空发动机关键制造技术研究.四川:中国燃气涡轮研究院,2009,6(3): 42-48,52.
- [2] 郑文虎,张玉林,詹明荣.难切削材料加工技术问答.北京:北京出版社,2001.
- [3] 王春,苏彬,汤武出,等.6005A 铝合金高速铣削加工数值模拟研究.航空制造技术,2010(15): 86-90.
- [4] 陈五一,袁跃峰.钛合金切削加工技术研究进展.航空制造技术,2010(15): 28-29.

(责编 三丰)