

航空发动机刀具切削加工 现状与发展

Current Status and Development of Cutting Tool Machining for Aeroengine

沈阳黎明航空发动机(集团)有限责任公司 庞继有 胡家农 于在梅 张 川 杨金发
沈 阳 航 空 工 业 学 院 王明海
山 东 大 学 机 械 工 程 学 院 万 熠



庞继有

毕业于广西大学机械系。现任沈阳黎明航空发动机(集团)有限责任公司专业技术带头人,博士后合作导师。从事数控加工技术、难加工材料切削加工领域应用技术研究和切削工艺数据库技术开发工作。完成科研项目28项,获省科技进步奖2项,市科技成果奖6项,发明专利2项。

10多年来,国内航空发动机制造企业通过型号技改、转包生产等方式引进了大批先进技术和工艺设备。随着航空材料科学的不断进步,新型

为了提高航空动力机械切削加工的生产效率,促进航空发动机整体制造技术提升,增强市场竞争力,近年来,国内航空发动机制造企业非常重视先进切削刀具的推广与应用工作,并逐渐认识到可转位刀具及高效、高性能切削刀具与传统刀具相比,有明显的优越性。

航空难加工材料不断涌现及材料性能的不断提高,机械加工变得越来越困难。过去由于没有很好地应用高效和高性能的切削刀具,使这些先进的制造技术得不到充分应用。

为了提高航空动力机械切削加工的生产效率,促进航空发动机整体制造技术提升,增强市场竞争力,近年来,国内航空发动机制造企业非常重视先进切削刀具的推广与应用工作,并逐渐认识到可转位刀具及高效、高性能切削刀具与传统刀具相比,有明显的优越性。推广可转位刀具及高效、高性能切削刀具,是形势发展的需要,势在必行,是解决航空发动机生产效率由半停滞状态取得突破性和长足发展的有效途径。

航空发动机切削加工技术的需求及发展趋势

1 技术需求

(1) 先进航空发动机的叶片、盘轴、机匣等主要结构件,大量采用新型超高强耐高温合金、单晶合金、金属间化合物及轻质高强复合材料,这给机械切削加工增加了更大的难度,对切削技术提出了更高的要求。

(2) 航空发动机低成本制造目标,对发动机研制成本高、周期长提出了严峻的挑战,而切削效率与切削刀具使用成本之间的矛盾,一直影响着航空发动机的研制成本和进度。这对经济性切削技术提出了新的研究课题。

(3) 先进航空发动机增长可靠性设计技术,对关键零件的表面完整性提出了新的技术要求。

2 发展趋势

(1) 金属切削刀具作为数控机床必不可少的配套工艺装备,在数控加工技术的带动下,进入了“数控刀具”的发展阶段,显示出“三高—专”(即高效率、高精度、高可靠性和专用化)的特点。高度数控化、高效切削加工技术的关键是一系列高效刀具材料的合理应用及其对应的实用切削参数优化的技术问题。

(2) 以高速切削为代表的干切削、硬切削等新的切削工艺已经显示出很多优点和强大的生命力,成为航空发动机制造技术提高加工效率和质量、降低成本的主要途径。航空难加工材料切削加工的主要矛盾已从是否能够切削加工转向如何高效率、低成本地进行加工。

(3) 航空发动机每一种新产品的开发都意味着零件功能、结构、材料的重大变更,也会对切削加工提出各种新的开发任务。

国内航空发动机刀具切削加工现状与差距

1 现状

(1) 冷加工设备满足了三代机批产的需求,特别是某些生产线的设备配备已与国外先进企业发动机生产线所选用设备基本一致,在技术及生产能力上完全能够满足三代机批产及四代机研制所需。基本掌握了航空零件难加工材料的切削加工特性、特殊结构零件的机械加工工艺及特种加工工艺技术。

(2) 在推广高性能可转位刀具、新型刀具研制、振动切削、新型航空难加工材料切削技术研究方面取得了一定成果,积极适应了先进航空发动机的研制要求。

(3) 先进刀具采购量呈逐年上升趋势,平均每年以 18% 的复合增

长速度在提升。如某航空发动机厂 2003 年外购刀具总量只有 3.8 千万元,而到了 2008 年外购刀具总量超过 1 亿元。其主要原因是型号任务不断增加,导致机械加工量增长,同时随着数控设备数量的增加,外购刀具采购的数量也在逐年加大。但相对来讲,外购刀具占总产值的比例并没有明显增加,在 2% ~ 3% 之间波动。按各种刀具采购费用占采购总费用额度比例计算,刀具消耗额度依次是:铣刀 43%、车刀 27%、钻头(包



括铰刀、扩孔钻) 13%、镗刀 7%、螺纹刀具 4%、齿轮刀具 3%、其他刀具 3% (见表 1)。

近年来,外购刀具主要以进口刀具为主,国产刀具采购量始终处于较低水平,刀具国产化率总体呈逐年下降趋势,如表 2 所示。其原因主要是国产刀具和进口刀具质量水平差距较大,国产刀具高端产品质量不够稳定;很多关键件、重要件等难加工材

料零件只有进口刀具才能满足加工质量要求;某些情况下,国产刀具性价比还要低于进口刀具。另外,因试验条件有限,无法进行系统试验验证刀具性能。

(4) 航空发动机企业开展推广使用可转位及高性能刀具以来,在提高切削加工效率、提升产品质量方面取得了显著效果,据部分零件统计,使用可转位及高性能刀具的加工效率比传统材料焊接刀具平均要高 2 倍以上,最高可达 15 倍。使用可转位

及高性能刀具后,加工零件的表面质量和尺寸精度明显提高。同时还解决了一些新材料、难加工材料切削加工难的问题。

(5) 目前外购刀具修磨以整体硬质合金铣刀、钻头、铰刀、扩孔钻和复杂刀具为主。其他刀具(如刀片等)还没有全面开展修磨业务。因航空发动机企业内部现有的刀具修磨能力不足,因此,刀具修磨以委托加工

表1 各种刀具消耗额度比例情况 %

类别	铣刀	车刀	钻头(铰刀、扩孔钻)	镗刀	螺纹刀具	齿轮刀具	其他刀具
比例	43	27	13	7	4	3	3

表2 刀具国产化率情况

年份	2003	2004	2005	2006	2007	2008
国产化率/%	32	25	22	17	15	12

为主。通过开展刀具修磨业务,进一步降低了刀具的使用成本。

(6) 各航空发动机企业都通过不同的评价方式,对刀具供应商进行了资格认定和筛选。如某航空发动机企业通过刀具对比试验及综合评定,对外购刀具的供应商进行了全面规范和认定,由最初的 40 多家筛选出不到 15 家国内外刀具供应商,提高了刀具的采购、管理和使用效果。

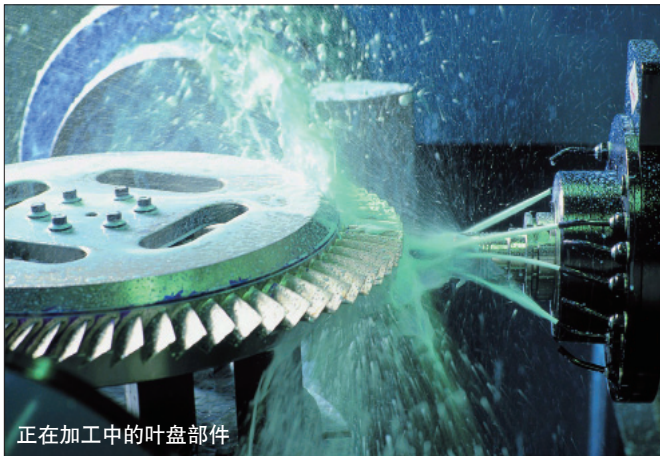
2 差距

(1) 但总体上看,冷工艺制造技术水平与国外发达国家先进制造技术水平相比存在着较大的差距,未能形成先进的综合加工工艺实力。

(2) 数控加工设备利用率不高,只限于单机操作,效率较低。

(3) 工艺试验条件和能力严重不足,数控加工效率较低。

(4) CAD/CAM/CAPP 技术及其集成尚处于初级水平,未建立一个



正在加工中的叶盘部件

包括刀具、切削参数、机床等产品制造资源数据库。

(5) 缺乏数控切削参数优化的系统研究,没有足够的切削参数数据库支持高效数控加工技术的应用。

(6) 针对高速切削和干切削技术的切削数据很少,没有形成专用数据库,限制了高速切削和干切削技术的应用。

(7) 面对一些新、难加工材料,刀具选择和切削用量选择不合理,既没有合适的切削数据库可供查询,又不

具备进行系统切削试验的条件。

(8) 对于新型航空发动机材料的切削加工,缺乏技术储备和实践经验。很多新型航空材料的加工没有相应的切削工具和成熟的对策。

(9) 不了解高速数控加工时工艺系统的动力学性能和稳定切削的参数域,因而对设备性能不能充分利用。在高速切削方面,硬质合金铣削钛合金速度可达 150 ~ 200m/min,陶瓷刀片铣削高温合金可达 600 ~ 700m/min,已居于世界领先水平,但生产应用目前还不普及。

(10) 高速、高效加工刀具主要依赖进口。高速、高效加工刀具国产化有赖于国内刀具厂家的研究与发展,但高速切削刀具应用并不普遍,高效强力切削刀具应用则很少。

(11) 新型切削加工工艺研究,在振动切削方面取得较大突破,但工程化推广应用技术研究工作还不到位,未达到应有的普遍提升加工技术的效果。

(12) 精密表面加工技术及表面完整性研究相对落后,切削加工效率低下、加工变形严重、表面质量差是航空发动机零件加工中普遍存在的首要问题。

(13) 外购刀具的品牌太杂,同一类型和规格的刀具有好几个品牌。由于各种品牌刀具切削性能差异很大,这就给工艺参数的固化工作和刀具的正确使用带来了比较大的困难。

(14) 刀具一体化管理水平低,刀具浪费严重,成本费用高。刀具使用过程中浪费现象比较严重,存在刀具没达到磨损标准就进行报废处理的情况。

航空发动机典型零件主要刀具应用情况

航空发动机典型零件主要切削刀具基本以进口高性能切削刀具和非标专用刀具为主。

1 涡轮盘

涡轮盘是用加工性很差的高温合金制成的复杂回转类零件,通常具有各式各样的成形凹腔,这就要求设计、选择刀具和规划走刀路径时充分考虑到刀具与工件之间的合理间隙,决不能有任何干涉。圆刀片车刀是加工这类特征的最佳选择,它特别适合粗、精加工难加工的工件材料,加工效率很高,同时还具有很好的可达性。90°弯头刀片则专门用于加工可达性很差的凹槽。

2 涡轮机匣

涡轮机匣通常采用高温合金制造,这些极具挑战性的工件材料容易对切削加工造成诸多问题,特别是铣削。而在制造这类零件时,恰恰需要通过铣削来去除大量材料。用陶瓷铣刀进行车铣可显著提高生产效率,使用圆刀片铣刀可以减少刀片切削刃的沟槽磨损并可采用更高的进给量从而确保加工安全高效。在实心材料上用螺旋插补方式铣孔。

3 风扇机匣

风扇机匣采用钛合金制造,钛合金的可加工性较差。根据零件材料和结构的特点,采用圆刀片,可完成径向和轴向凹腔车加工;用 80°菱形刀片可在受限空间下具有高可达性,并且可向 2 个方向进行切削,容易实行刀补。

4 盘轴

盘轴深内腔采用专门设计的非标刀具防振刀板加工,而鹤尾形叶根槽则用成形弯头刀片加工。

5 轴

轴加工面临的主要挑战是零件的长度和复杂的内部特性。用防振镗杆可很好地解决要求非常高的轴

的内部特性的加工。

6 整体叶盘/叶轮

整体叶盘的加工和叶轮上叶片的加工工艺类似。确保加工成功的因素包括:五轴五联动数控机床、专门的五轴CAM软件、特别开发的刀具和工艺。开槽一般采用整体硬质合金圆角铣刀。钛合金用点铣工艺开槽,高温合金用摆线铣削切削工艺,叶片轮廓精加工用锥度球头铣刀加工。

提高切削加工效率,降低刀具成本的主要途径及措施

1 推广应用一批先进的、成熟的、适用的高新切削技术,加快新型切削材料、新型刀具结构、新型切削技术的研究

以航空发动机关键零部件的机械加工制造技术为主要研究方向,进行以下几个方面的研究:

(1) 包括车削、铣削、钻削、拉削、磨削和加工表面完整性等切削加工试验。被试验材料对象主要是针对航空生产用的高温合金、钛合金和高强度钢及其他航空难加工材料,如热喷涂材料、复合材料等。

(2) 数控机床及加工高效、高速、强力切削加工技术及刀具在航空难加工材料加工中的应用试验研究。

(3) 研究整体机匣类零件数控加工过程的优化技术,包括毛坯状态、刀具参数、装卡方式、走刀路径、切削用量等工艺条件的全面优化。

(4) 研究叶片、叶盘等复杂曲面的加工技术。研究环形刀具的高效刀位计算、走刀路径优化、编程技术和针对各种机床的后置处理技术。

(5) 研究大型整体结构件和弱刚性零件的加工变形问题。研究各种工艺条件对变形的影响,以及减小加工变形的工艺措施。

(6) 研究高速切削技术。研究高速切削的刀具轨迹优化技术、编程技术、刀具动平衡技术、高效冷却技术

和切屑处理技术。

(7) 研究数控加工的刀具技术,针对工件材料和切削用量,选择刀具材料,设计刀具切削角度几何参数;针对整体叶盘等特殊曲面、走刀路径和刀位,设计特种专用刀具廓型;研究特种专用刀具的刃磨技术。

(8) 研究金刚石、CBN、涂层刀具等新型高效刀具在复杂整体零件加工中的应用技术。

(9) 研究切削参数试验技术,研究多因素、多水平试验设计方法,研究切削力、切削温度、刀具磨损、加工变形测量技术。

(10) 研究数控加工质量,研究大型整体结构、复杂形面加工精度分析技术,建立合理的误差分离模型,实现对加工误差的正确预测。

(11) 研究加工表面完整性的检测、评价技术;研究加工参数对加工表面完整性的影响。

(12) 在数控加工过程仿真的基础上,利用现有的优化理论和数学工具,建立数控加工切削参数优化系统,实现数控加工切削参数的快速优化。

(13) 研究加工过程的仿真技术。

(14) 建立基于网络、面向全行业的切削数据库系统。通过切削过程仿真和优化获取新的切削参数数据。建立切削数据处理系统,对来自不同数据源的切削参数数据的分类分级。建立切削参数优化管理系统,实现数控加工切削参数数据的“渐进优化”。

2 提升工艺水平,减少刀具消耗,降低切削成本

(1) 改进切削加工工艺,优化加工方案:通过对典型件原有工艺进行分析,选配合适的加工刀具、切削液,优化走刀路线,减少走刀次数,优化切削参数,从而减少刀具的消耗量。

(2) 改进毛料工艺,不断精化毛料,减少切削余量,从而降低刀具消

耗。改进热处理工艺,以减少由于材料表面硬度不均匀、切削不稳定造成刀具消耗大的情况。

3 加大国产刀具采购量,降低刀具采购成本

在筛选好国内供应商,做好系统试验的基础上,使用国产刀具能够满足部分发动机零件的加工需求,可以大幅度降低刀具的成本。

4 提倡刀具重新修磨,降低刀具消耗成本

按照航空发动机企业的生产特点,制定刀具修磨技术标准,严格按照刀具修磨技术标准,对刀具修磨及涂层后质量情况进行跟踪,及时掌握刀具修磨及涂层质量情况。

5 加强技术人员和操作者的培训

加强切削技术、刀具选型、使用等方面的培训。从而提高工程技术人员和操作者对刀具的选用、使用等方面的能力,强化切削刀具的使用效果。

6 加强刀具使用过程管理

(1) 刀具管理本身也要实现精益管理,其中很重要的一个方面是科学地组织刀具的采购和包括库存管理在内的刀具物流。需要研究和探索如何在确保生产线正常运转的情况下降低刀具的库存资金占用、优化刀具的最低库存设置、刀具的采购起始点、刀具的合理采购频率和采购批量,建立有效的刀具预警机制、应急机制和快速响应机制,用科学有效的方法跟踪、监控刀具库存状态和采购状态。

(2) 需要根据消除一切浪费的精益生产的理念,对设备的利用、人力资源的安排、包括刀具收送刀和调整及刃磨等在内的刀具物流路线不断地进行优化和及时调整,重构相应的流程,同时需切实实施刀具有关设备和检测仪器的预防性维护,以确保贯彻了精益理念的刀具管理工作,对实施了精益方式的生产提供有效可靠的支持。 (责编 岩石)