

航空难加工材料切削加工中的关键应用技术

Key Application Technology of Cutting for Aircraft Difficult-to-Machine Material

中航工业沈阳黎明航空发动机(集团)有限责任公司 叶洪涛 张 军 杨金发 刘 阳



叶洪涛

中航工业沈阳黎明航空发动机(集团)有限责任公司技术中心金属切削技术研究室专职技术专家,高级工程师,研究方向为切削数据智能专家系统技术、难加工材料高速高效切削技术等方面。

难加工材料由于其良好的常温和高温机械性能,在航空航天等尖端科学领域得到了越来越广泛的应用。传统的航空难加工材料一般包括钛合金、高温合金、不锈钢等。随着对于航空发动机产品性能要求的不断提高以及材料技术的不断进步,大量

航空难加工材料由于其常温和高温机械性能优越,使其切削性很差。其切削加工具有以下特点:切削力大、切削温度高,加工硬化现象十分严重,切削时容易粘刀、刀具磨损剧烈,刀具寿命低。选择适宜的切削用量数据对于提高切削效率、延长刀具寿命、保证产品质量显得尤其重要。多年来,国内外很多研究机构都在竞相进行针对难加工材料切削数据库的研究开发工作。但是还少有在难加工材料领域非常成功的案例。

新型航空难加工材料不断涌现。美国 NASA、GE 和 PW 公司在高速民用运输机计划项目中联合研制的第四代单晶合金制造的涡轮叶片已经在多种先进发动机上完成了试验评价。在第三代粉末高温合金中成功实现了双晶粒组织,为高推重比航空发动机用双性能涡轮盘的制造打下了坚实的基础。金属间化合物是处于高温合金和陶瓷材料之间的一种新型材料。它与常规合金相比,具有高熔点、低密度、优异的高温强度、高的导热率,同时具有好的抗氧化和抗腐蚀等性能,因而成为航空发动机高温部件的理想材料。

更高的性能要求导致新型难加

工材料的应用比例越来越高。同时发动机的关重零件往往型面复杂,对加工精度和表面完整性的要求极高。切削加工一直是航空发动机零部件的主要制造手段,新型刀具材料和结构、新型切削工艺方法以及围绕航空发动机的典型材料建立的切削数据系统等正逐渐成为航空难加工材料切削加工中的关键应用技术。近年来作者所在单位联合国内多家科研院所在以上技术领域开展了广泛研究并取得了一定的进展。

新型刀具材料应用

传统航空发动机难加工材料切削加工的刀具材料可选择使用高速

钢、硬质合金、陶瓷和超硬刀具材料(CBN、PCD等)。现阶段以硬质合金刀具所占比重最大。最近几年,陶瓷刀具、CBN等材料刀具使用比例正在逐年增加,其中以陶瓷刀具的应用较为广泛。与硬质合金相比,陶瓷材料具有更高的硬度、热硬性和耐磨性,化学稳定性、抗氧化能力等均优于硬质合金,非常适合干式连续高速切削高温合金等难加工材料。鉴于陶瓷刀具的特性,选用时应该注意以下几方面的问题:具备良好的系统刚性,必须考虑工件、夹具、刀具等影响因素;防止工件对刀具的冲击;合理选择刀具几何参数;合理选择切削用量^[1]。

对于新型航空难加工材料,陶瓷刀具、CBN刀具则具备更广阔的应用前景。以粉末高温合金为例,粉末高温合金具有组织均匀、晶粒细小、屈服强度高、抗疲劳性能好等优点,但是由于其中含有多种高熔点合金元素,使得粉末高温合金得到很大的强化效应,在一定的温度范围内,随温度的升高,其硬度反而有所提高,由于其材料本身的化学成分及独特的多孔性结构,在较小的面积内其硬度值也有一定的波动。即使测得的宏观硬度为20~35HRC,但组成零件的颗粒硬度会高达60HRC,这些硬颗粒会导致严重而急剧的刃口磨损。

使用硬质合金刀具切削粉末高温合金时,由于粉末高温合金导热性差,粘结倾向大,容易粘刀产生积屑瘤。在合金中存在的大量金属碳化物在切削过程中相当于对刀具进行研磨。粉末高温合金中的微量元素在高温下与硬质合金刀具产生亲和作用,使硬质合金微粒随切屑一同带走,形成刀具材料的局部剥落,使切削刃呈现须状崩碎纹。加工粉末高温合金时只能在很短的时间内保证加工精度。如果是使用TiAlN涂层的硬质合金刀具其寿命要好于其他刀具。其中铝元素在加工过程中形

成的氧化铝成分可以阻止刀具的进一步磨损。

使用陶瓷刀具切削粉末高温合金,可选用阿赛龙(SiAlON)陶瓷刀片。由于其具有很高的室温与高温硬度,优良的化学稳定性和抗机械磨损性能,在1000℃的高温下仍能进行切削。在高温条件靠材料的自软性,使刀片的切削加工更为容易。同时切削速度越高,产生的切削热越高。因此,用阿赛龙陶瓷刀片进行加工时,加大切削速度效果有时反而更好。

使用CBN刀具切削粉末高温合金寿命明显要高于涂层硬质合金。但是在高温高压下粉末高温合金与CBN刀片表面会发生亲合作用,因而发生较明显的粘结,造成粘结磨损,需要通过使用高压切削液和减少切削抗力的办法减少磨损。用CBN刀具加工粉末高温合金,效率高于硬质合金刀具;刀具寿命高于陶瓷刀具,但是从经济性考虑,CBN刀具的优越性并不明显^[2]。

新型切削工艺方法

高速切削和振动切削作为典型的新型切削工艺方法近年来开始逐渐应用于航空难加工材料的切削加工。

高速切削(HSM或HSC)是20世纪90年代迅速走向实际应用的先进加工技术,国际上在航空航天制造业、模具加工业、汽车零件加工、以及精密零件加工等得到广泛的应用。高速切削是一项系统技术,从刀具材料、刀柄、机床、控制系统、加工工艺技术、CAD/CAM等,均与常规加工有很大区别。高速切削的最大优势并不在于速度、进给速度提高所导致的效率

提高,而是由于采用了更高的切削速度和进给速度,允许采用较小的切削用量进行切削加工。由于切削用量的降低,切削力和切削热随之下降,工艺系统变形减小,可以避免铣削颤振。利用这一特性可以通过高速铣削工艺加工薄壁结构零件。

当机床最高转速达到15000r/min,通常需要采用HSK高速铣刀刀杆,保证刀杆短锥和端面与机床紧密配合。高速铣削可采用弹性夹紧式、液压夹紧式和热膨胀式刀杆,其中以热膨胀装夹的刀具安装精度最高,同时能提供更大的扭矩,特别是在应用小直径刀具进行高速加工时,热膨胀装夹更具优势。同时还必须考虑刀具动平衡问题,应尽量选用短而轻刀具,定期检查刀具与刀杆的疲劳裂纹和变形征兆。带侧夹平台或柄部削平的刀具,通常动平衡等级较低,不适合用于高速铣削加工。多齿刀具可以采用侧铣试切的方式,根据铣削表面是否出现振纹来估算刀具的动平衡。

在高速铣削时,施加在刀具上的热源可认为是三角形或矩形分布的脉动热源,刀具承受脉动的热应力。从测温结果上看,最高温度并不是很高,但如果用冷却液进行冷却,会使刀具在一个极短的时间内经历高-低-高的快速温度变化,易引起刀具出现热裂纹。如采用油雾冷却,一方面能够为刀具提供足够的润滑剂,另

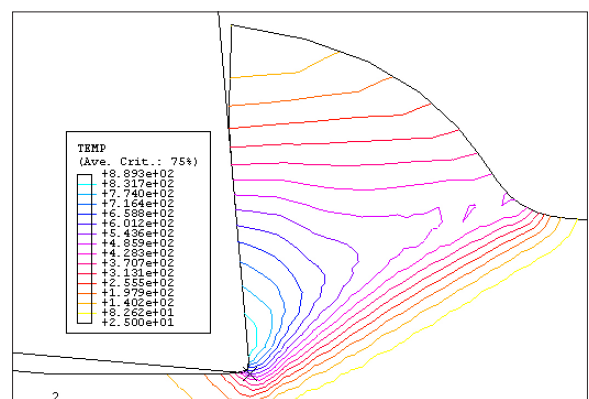


图1 高速铣削TC4的切削温度分布图

一方面又可避免刀具出现较大的温差。对延缓刀具磨损有益。图1所示为高速铣削TC4的切削温度分布。

振动切削是一种脉冲切削,在切削过程中,刀具周期性地离开和接触工件,其运动速度的大小和方向在不断地变化。迄今为止,世界各国虽然在振动切削某些现象的解释上和某些参数的选择上还有相当差别,但对它的工艺效果却是一致公认的。振动切削按照其振动源频率分为高频振动和低频振动。特别是在难加工材料切削加工中,采用超声或高频振动切削改变了传统常规的金属切削方法,振动切削不仅使难切削变成能切削和易切削,零件表面精度和质量得到提高,而且大大提高刀具的使用寿命。图2是振动攻丝与普通攻丝钛合金表面质量的比较。



(a) 振动攻丝加工表面 (b) 普通攻丝加工表面
图2 振动攻丝与普通攻丝加工表面质量比较

切削数据系统

航空难加工材料由于其常温和高温机械性能优越,使其切削性很差。其切削加工具有以下特点:切削力大、切削温度高,加工硬化现象十分严重,切削时容易粘刀、刀具磨损剧烈,刀具寿命低。选择适宜的切削用量数据对于提高切削效率、延长刀具寿命、保证产品质量显得尤其重要。多年来,国内外很多研究机构都在竞相进行针对难加工材料切削数据库的研究开发工作,但是还少有在难加工材料领域非常成功的案例。

已有的研究表明,传统的直接检索的数据库模式由于无法获得足够的数据库支持,低的检出率将成为影响数据库运行的基本障碍^[3],在难加工材料切削数据研究方面不具备现实的应用前景。引入基于规则与实例

相结合的推理模式是目前建立难加工材料切削数据库系统的较佳选择。

基于实例的推理(Case-based Reasoning, CBR)起源于1982年Schank提出的关于人和机器学习的动态存储理论,其本质是利用旧问题的解(解决方案)来解决新问题。与基于规则的推理不同,基于实例的推理不依赖于求解问题领域的规则,而是依赖于以前的经验和成功解决问题的实例,这与人类专家解决问题时的思路和方法更为接近,因而也更易于理解和应用^[4]。近年来,沈阳黎明发动机公司联合山东大学、北京航空航天大学等开展了多项切削数据库系统研究^[5]。其中部分已经实现了工程化应用。

图3所示为黎明公司所开发的MCDS切削数据库系统软件界面。该系统由数据分析处理模块和关系数据库组成。关系数据库包括切削用量基准数据库、扩展数据库、工件材料数据库、刀具材料数据库、刀具结构数据库等,可针对7种切削工艺(普通车削、切槽车削、侧刃铣削、端刃铣削、钻削、铰削、镗削)、8类200余种航空材料、300余种刀具材料和结构提供适宜的切削用量参数。



图3 MCDS切削数据库系统界面

该系统综合考虑影响切削参数的多种因素,包括被切削材料的切削加工性、刀具材料和几何形状、切削工艺方法和种类、所采用的切削液、设备类型、转速范围等。同时可以根

据刀具耐用度、产品生产率和质量需求对切削用量数据进行调整。

切削深度、切削宽度(行距)可以由系统根据所选工件材料、刀具材料、刀具尺寸、表面粗糙度推荐,也可以由用户根据实际加工余量指定。进给量可以由系统综合考虑切削深度、表面粗糙度、工件材料与刀具材料匹配因素推荐进给量,也可以根据刀具结构及尺寸确定或由用户指定。

切削速度的生成通过从切削用量基准数据库、工件材料数据库和刀具材料数据库中提取相应的基准数据和经验公式系数,先行计算在基准切削深度和进给量下的切削速度。然后依据经验公式计算指定切削深度和进给量下的切削速度。经验公式由相应的切削试验取得。另外,工件实际硬度与工件材料数据库中硬度的差别对于切削速度的影响依据经验公式,系数保存于工件材料数据库中。

切削数据库还提供切削用量与机床所接受的数据间的换算功能,将切削用量换算为直接控制机床的主轴转速和进给速度(主要用于加工中心)等。对于圆角及球头铣刀,在计算主轴转速时还会进行有效直径的换算。系统还对切削效率(材料切除率)进行计算,并显示数控程序代码。

参考文献

- [1] 杨金发. 航空航天制造业刀具应用研究. 金属加工, 2010(4): 12-13.
- [2] 刘阳, 赵秀芬. 航空粉末冶金高温合金的车削加工. 航空制造技术, 2010(15): 44-46.
- [3] 叶洪涛, 大型切削数据库系统构建方法. 航空制造技术, 2007(10): 87-89.
- [4] 叶洪涛, 杨金发, 贺芳. 难加工材料切削数据库开发应用中的瓶颈问题. 工具技术, 2010, 44(3): 87-88.
- [5] 任小平, 刘战强, 万熠, 等. 难加工材料切削数据库系统的研究与开发. 工具技术, 2009, 43(10): 39-41.

(责编 小城)