

针对航空难加工材料的刀具 与切削参数优化途径

Cutting Tool and Cutting Parameter Optimization Path for
Difficult-to-Machine Material in Aviation Industry

北京航空制造工程研究所 刘畅 王焱



刘畅
北京航空制造工程研究所硕士,研
究方向为难加工材料切削加工技术。

在航空领域,随着钛合金、高温合金以及复合材料的广泛应用,飞机零部件的性能(如强度、硬度、耐磨性、耐热性等)不断提高,这也给加工制造带来了更大的挑战。从物理性能来看,上述材料都属于难加工材料^[1]的范畴,而普通工程材料在重要的航空结构件中已经不被采用。

解决难加工材料的切削加工在很大程度上依赖刀具材料、结构的合理组合与切削参数的优化。每一种刀具材料和结构都有其适用的加工范围和最合理的切削参数,为了达到加工目标,往往要根据被加工材料的特性及其实际加工条件,综合考虑刀具材料的物理、化学性能优选刀具,通过试验和数学归纳获得优化切削加工解决方案。

在现代飞机主承力结构中,整体结构件通常采用切削加工,零件成品的质量只占毛坯质量的10%~20%,甚至更低,其余材料都变成了切屑。切削加工过程中,刀具与被加工材料是相互对立又相互联系的,新的材料需要有更新的刀具和更新的方法来实现其高效加工^[2-3]。对难加工材料,通常采用的方法是:根据该材料的特点,列出适合的备选刀具,并在不同切削参数下使用备选刀具进行试切,通过测量加工过程中的切削力、刀具磨损和加工表面质量选取最优刀具。图1是典型钛合金材料TC4的切削试验现场。

难加工材料切削加工中最突出

的问题是刀具磨损过快导致加工效率偏低和工件质量差。从加工的角度讲,影响刀具寿命的关键因素在于刀具材料、刀具几何参数以及切削参数的选取和优化。本课题结合TC4材料的切削参数试验及其分析,从刀具优选、切削状态数据采集分析试验、切削参数优化等方面,探讨难加工材料的切削参数优化途径及其技术发展趋势。

刀具材料

刀具材料是影响切削加工性能最重要的因素之一,用于刀具制造的材料种类繁多。航空制造领域常用的刀具材料有高速钢、硬质合金、金



图1 钛合金铣削试验现场
(切削力及振动)

刚石、陶瓷、立方氮化硼(CBN)以及涂层刀具材料,每种材料的刀具都有其特殊的性能和应用范围。

(1) 高速钢。

高速钢早在20世纪初就应用于切削,由于其可加工性能好,常用于复杂形状刀具(如铣刀、钻头、齿轮刀具等)的制造。通过添加V、Co、Al等合金元素,可以使高速钢的性能大幅度提高,可用于切削高强度钢、高温合金及钛合金。粉末冶金高速钢的出现解决了碳化物偏析的问题,细化了晶粒,增强了高速钢的强度、韧性和热硬性,刀具寿命可提高0.5~2倍。

(2) 硬质合金。

硬质合金是以高硬度、高熔点的金属碳化物(WC、TiC、NbC、TaC等)粉末为基体,以熔点较低的金属(Co或Ni等)粉末为粘结剂,经高压后烧结制成的^[4]。硬质合金刀具的耐热温度和最大允许切削速度都大大高于普通高速钢刀具,但强度不如高速钢,抗切削振动和冲击能力也较差,在切削用量较大时常常发生崩刃现象(图2)。

硬质合金刀具的最新进展主要是细化晶粒和梯度材质。普通硬质

合金晶粒尺寸在10 μm 以下,超细晶粒硬质合金可达1 μm 以下。晶粒的细化可提高硬质合金的强度、硬度和韧性,刀具寿命可提高1~2倍^[5]。梯度材质是指硬质合金刀具的材质根据切削需要呈现梯度分布,对不同的部位赋予不同的性能,从而获得最佳的整体性能。

(3) 超硬刀具材料。

超硬刀具材料主要包括金刚石、陶瓷和立方氮化硼(CBN)。

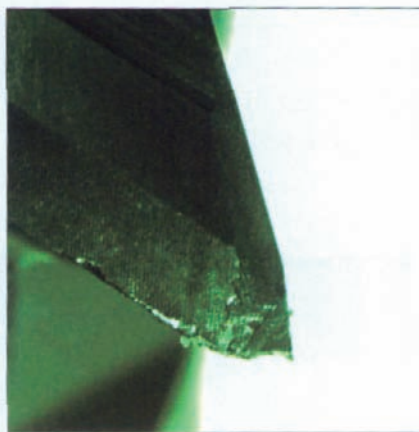


图2 崩刃的硬质合金铣刀

金刚石是自然界最硬的材料,硬度高达HV10000。制造刀具用的金刚石有各向异性的单晶体,也有各向同性的聚晶金刚石。单晶金刚石可以在被加工材料的晶粒内部进行超精密切削,聚晶金刚石则可以切削有色金属、陶瓷和硬质合金等难加工材料。由于其高硬度,金刚石可以制成很锋利的刀具,在切削复合材料时可以保证纤维被迅速切断,是较为理想的刀具。金刚石刀具耐热温度较低,在700~800 $^{\circ}\text{C}$ 时无法切削。由于主要成分为C,容易和铁族元素亲和,金刚石刀具不宜加工钢和铸铁等铁族金属。

陶瓷刀具具有很高的硬度、耐磨性和热硬性,可用来加工淬火钢等高硬度材料,而且陶瓷的主要成分为Al、Si和O,比制造合金刀具的主要元素储量更为丰富。陶瓷刀具的主

要缺点是强度低、较脆、抗振性不高,目前,可以通过热压等工艺在陶瓷材料中加入碳化物、金属等来增强其强度和韧性。

立方氮化硼(CBN)的硬度仅次于金刚石,耐热温度达到1400 $^{\circ}\text{C}$,而且具有较好的化学稳定性,可以加工淬硬钢、冷硬铸铁和高温合金等。在切削耐磨材料时,CBN刀具耐磨性是硬质合金刀具的30~50倍,切削速度比硬质合金高5倍。CBN既可做成整体式刀具,也可与硬质合金做成复合型的刀片。

(4) 涂层刀具材料。

涂层刀具材料^[4]是指通过气相沉积或其他技术方法,在硬质合金或高速钢基体上涂覆一层耐磨性极高的化合物。传统的涂层主要有TiC、TiN和Al₂O₃等;最新的涂层材料有TiAlN、AlCrN、聚晶金刚石等。图3为带有AlCrN涂层的硬质合金刀具。目前,纳米结构涂层刀具的涂层数达到1000层以上,每层厚度仅为几nm。

涂层刀具有效地解决了刀具材料硬度、耐磨性和强度、韧性之间的矛盾,切削时具有以下特点^[6]:涂层刀具可以大幅度提高刀具的切削寿命;涂层与被加工材料摩擦系数小,切削力有所降低;采用涂层刀具加工的零件表面质量好;涂层刀具具有



图3 AlCrN涂层硬质合金刀具

较好的通用性。

使用涂层刀具切削时要考虑涂层材料的物理化学性能。在 $f_z=0.08\text{mm/齿}$, $a_p=2\text{mm}$, $a_e=4\text{mm}$, $v=20\text{m/min}$ 切削用量下使用 TiAlN 纳米、多晶金刚石涂层刀具和无涂层硬质合金刀具铣削 TC4 钛合金的铣削力最大值见表 1。

TiAlN 涂层容易与钛合金发生亲和,加速了刀具的扩散磨损,使摩擦系数增大,所以加工钛合金时的铣削主切削力要大于无涂层刀具;多晶金刚石涂层耐热温度低,而钛合金导热系数小,切削热难以扩散,导致刀具无法在正常状态进行切削,其主切削力也大于无涂层刀具。

刀具的几何参数和结构

除了刀具材料外,刀具的几何参数和结构对切削力、加工表面质量、刀具寿命和加工效率都有很大的影响。针对不同材料和加工情况,选择合适的前角、后角以及刀尖圆角半径等刀具参数对减小切削力和提高刀具寿命有很大的影响。

前角越大,刀具越锋利,切削力越小,但刀刃强度也会越低,断屑效果和加工表面质量也会受影响。例如,加工超高强度钢时,为了增加刀刃强度和利于断屑,可以选择前角为负值的硬质合金刀具。

后角增大可以减少刀具与工件表面的摩擦,使刀具更加锋利,精加工时常选取较大后角;粗加工时,为了提高刀具强度,则选用小后角。在前、后角的选用上,必须综合考虑,兼顾各种矛盾。例如,在加工钛合金时,由于材料回弹较大、与刀具摩擦剧烈,应采用大后角;但考虑到材料切削应力大、刀具容易崩刃,所以前角应选取较小值。

对难加工材料的铣削,在粗加工时应尽量选择刀尖圆角半径 R 不为 0 的铣刀。当 $R=0$ 时,铣刀齿参与切削的面积更多,铣削力更大,而且刀

尖容易崩刃。在参数 $f_z=0.05\text{mm/齿}$, $a_p=3\text{mm}$, $a_e=4\text{mm}$, $v=80\text{m/min}$ 下,使用 $R=0\text{mm}$ 和 $R=3\text{mm}$ 的 2 种相同牌号铣刀铣削 TC4 时的铣削力测量曲线见图 4。

随着设计制造水平的日益提高和刀具厂家的不断创新,出现了很多新结构和复杂形状的刀具。为了提高刀具的经济性,出现了主切削刃和刀具主体部分相分离的可转位刀具,带有螺旋角的刀刃被呈螺旋状的叠加刀片代替(图 5);为了方便断屑和排屑,切削刃被设计成了复杂的形状并增加了锯齿形的断屑槽^[7];可变螺旋角立铣刀则可以减少刀具振动,减少加工表面粗糙度值。

航空领域的整体件、薄壁件不仅采用难加工材料,而且结构复杂、刚性弱,切削加工过程中有大量材料需要去除,而且容易变形,对刀具也提出了更高的要求。一些刀具厂家提出了面向上述零件各个加工环节的解决方案,针对钛合金的粗精加工、整体件型腔的铣削、复合材料的钻孔以及复杂曲面的多坐标加工等问题,设计了专用刀具,并给出了相应的切削参数,使刀具寿命和加工效率得到提高。

切削参数优化

在刀具确定的情况下,切削加工希望选择合理的切削参数,以达

表1 相同加工参数下铣削TC4时的最大铣削力值

方向	最大铣削力/N		
	无涂层硬质合金刀具	TiAlN纳米涂层刀具	多晶金刚石涂层刀具
F_x	333.8	392	407.5
F_y	488	554	572
F_z	133.7	139.9	89.9

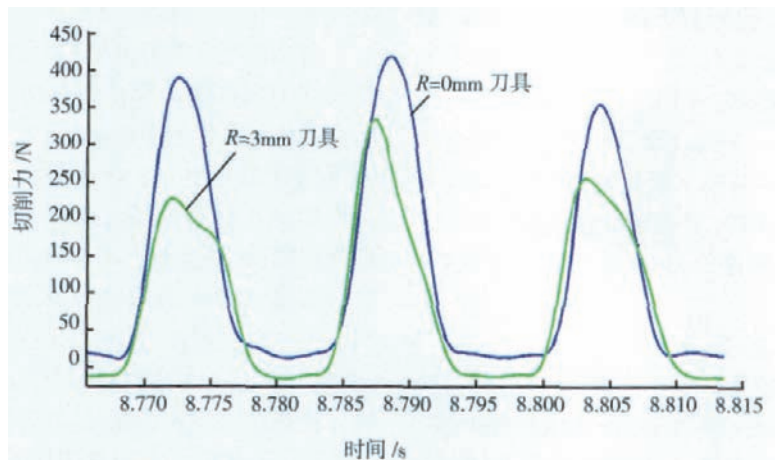


图4 刀尖半径 $R=0\text{mm}$ 、 $R=3\text{mm}$ 下的TC4铣削力曲线



图5 玉米铣刀铣削钛合金平面

到切削效率的最大和加工目标(如刀具寿命、切削力和表面粗糙度等)的最优,可以通过建立切削参数和加工目标之间的经验公式来反映二者的关系。

以材料 TC4 的铣削试验为例,为了提高刀具寿命、控制铣削薄壁件的精度,需要建立铣削力和铣削参数的关系。试验的优化目标为铣削力,加工参数为切削速度 v 、每齿进给量 f_z 、切削深度 a_p 、切削宽度 a_e 。通过测定不同参数组合下的各目标值(如正交试验、单因素试验等),采用多元线性回归等数学方法可以建立加工参数和加工目标的数学表达式。该方法的优点是不必考虑复杂的材料机理和切削过程,只对测量结果进行数学分析,也适用于粗糙度、温度和刀具寿命的计算。

表 2 为实测不同铣削参数下加

表2 不同参数水平下的铣削力最大值

A_p/mm	a_e/mm	$f_z/(mm \cdot \text{齿}^{-1})$	$v/(m \cdot \text{min}^{-1})$	$F_{x\max}/N$	$F_{y\max}/N$	$F_{z\max}/N$
2	4	0.08	20	182.6	384.4	93.70
2	6	0.05	40	151.9	365.0	95.54
3	4	0.05	80	167.6	611.3	98.15
3	6	0.08	60	212.8	775.3	134.6
3	8	0.12	20	331.8	1207	194.4
3.5	4	0.16	40	348.1	1198	229.7
3.5	6	0.12	20	331.2	1240	266.3
3.5	8	0.05	60	475.4	805.2	203.2

工的铣削力值。

选用指数模型 $F = C_F a_p^x f_z^y v^n a_e^k$ (也可使用其他模型),对上述参数进行回归分析,得到切削力和切削参数的经验公式:

$$\begin{cases} F_z = 76.7892a_p^{1.4031} f_z^{0.1835} v^{-0.2353} a_e^{0.3011} \\ F_y = 356.041a_p^{1.4251} f_z^{0.4836} v^{0.0269} a_e^{0.321} \\ F_x = 64.4169a_p^{1.4354} f_z^{-0.0484} v^{-0.2493} a_e^{0.3753} \end{cases}$$

切削力是反映切削加工过程的最基本的物理量^[8],刀具温度、磨损和加工变形都与其有关。对于给定刀具和材料,切削力和切削参数的关

系最为密切,加工弱刚性零件时,若

要实现精确加工,必须考虑工件在切削力作用下的变形对铣削用量产生的影响。实际铣削过程可以这样理解:铣刀首先按照名义铣削厚度进行走刀,作用的铣削力使工件发生变形,发生让刀,铣刀实际切削的厚度会小于理论厚度,铣削厚度的减小也导致铣削力的减小,铣削力减小的同时工件也产生回弹,使切削厚度增大,切削力也随之增大,切削力增大将再次使工件变形增大、实际切削厚度减小……该过程在铣削加工中不断往复。图 6 是铣削加工中让刀变形示意图。

此时,实际切除的材料厚度已经不等于加工前给定的参数,存在加工误差,需要重新计算。应用上述公式,计算给定切削参数下的最大铣削力,

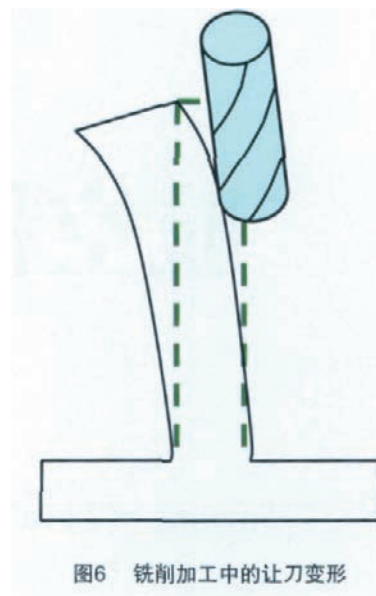


图6 铣削加工中的让刀变形

理组合与切削参数的优化。每一种刀具材料和结构都有其适用的加工范围和最合理的切削参数,为了达到加工目标,往往要根据被加工材料的特性及其实际加工条件,综合考虑刀具材料的物理、化学性能优选刀具,通过试验和数学归纳获得优化切削加工解决方案。

参考文献

- [1] 张念淮. 难加工材料的切削加工技术. 农业装备与车辆工程, 2008 (7): 46-48.
- [2] 王焱, 王文理. 先进刀具技术与航空零件切削加工. 航空制造技术, 2009 (23): 38-42.
- [3] 赵晓强. 航空难加工材料特点及其特殊加工方法. 航空制造技术, 2009 (23): 50-51.
- [4] 李喜桥. 加工工艺学. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2003.
- [5] 冯之敬. 机械制造工程原理. 北京: 清华大学出版社, 1999.
- [6] 于启勋, 张京英. 刀具涂层技术的发展和应用. 航空制造技术, 2007 (7): 36-39.
- [7] 刘占强. 先进刀具设计技术: 刀具结构、刀具材料与涂层技术. 航空制造技术, 2006 (7): 38-42.
- [8] Budak E. Analytical models for high performance milling. Part I: Cutting forces, structural deformations and tolerance integrity. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2006, 46: 1478-1488.

(责编 良辰)

结束语

解决难加工材料的切削加工在很大程度上依赖刀具材料、结构的合