

航空用镍基高温合金切削 现状研究

Research on Cutting Status of Ni-Based Superalloy in Aviation Industry

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



刘 阳

现任职于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。主要从事金属切削基础研究,高效加工、航空难加工材料以及切削数据库的智能化研究。

随着航空发动机技术的不断更新与提升,越来越多的难加工材料和复合材料被广泛地应用到新型发动机上,这就对零件的工艺方法和加工能力提出了更高的要求。在发动机的难加工材料中,镍基高温合金有着举足轻重的作用,如发动机的压气机盘、涡轮盘、承力环、机匣、紧固件、叶

镍基高温合金的力学、抗氧化、抗高温变形的性能很好,但是导热系数低、材料塑性大和加工硬化等问题常常制约着镍基高温合金的广泛使用。所以分析和研究零件材料的切削性、刀具制作材料以及切削参数等现状,对解决镍基高温合金难加工问题有很大的帮助。

片等在高温下长期工作的发动机零件,都可以见到镍基高温合金的身影。

镍基高温合金的力学、抗氧化、抗高温变形的性能很好,但是导热系数低、材料塑性大和加工硬化等问题常常制约着镍基高温合金的广泛使用。所以分析和研究零件材料的切削性、刀具制作材料以及切削参数等现状,对解决镍基高温合金难加工问题有很大的帮助。

镍基高温合金及其切削加工性

高温合金按基体元素可分为:铁基、镍基和钴基高温合金。按照制造工艺分为:变形(GH4169、GH4133、Inconel718等)、铸造(K477、K421、Rene77等)、定向结晶(DZ4等)

和粉末冶金(FGH97、FGH98等)高温合金。镍基高温合金耐热温度高达950℃以上,具有良好的力学性能和组织结构特性,具有抗氧化、耐腐蚀、抵抗高温交变应力的特性。镍基高温合金在发动机上得到了广泛的应用(见表1)。

由于镍基高温合金高硬度、强度和塑性的性能,致使它的可切削性较差。在镍基高温合金里铸造的材料比锻造的切削性差,单晶、粉末冶金高温合金的切削性更差。镍基高温合金的其他难加工特性表现为:切削力一般为钢件的1.5~2倍,切削温度约为钢的2倍;材料导热系数低,导热性很差,切削热集中在刀尖,不易散出。切削产生的高温能使刀具发生严重的扩散磨损、氧化磨损和粘

表1 镍基高温合金在发动机上的应用

名称	主要应用范围
变形高温合金	高温机匣、高压压气机盘、涡轮盘、转子叶片等
铸造高温合金	燃烧室及其附件、尾喷口附件、涡轮叶片等
单晶高温合金	涡轮叶片等
粉末冶金高温合金	涡轮盘等

结磨损；加工后零件表面硬化现象十分严重，加工硬化表面的硬度约为正常表面的2倍以上；切屑硬度高，韧性好，不易折断，造成切削过程中断屑困难，切屑不好处理；材料中金属化合物和硬质点较多，刀具很容易崩刃，不容易保证尺寸和精度要求。

盘轴、机匣和叶片是发动机上的关键零件，在高温工作区的部分都是采用镍基高温合金作为材料的。这些零件对配合表面尺寸、表面完整性和位置精度等技术指标要求都很高，而且这几种零件都属于典型的结构复杂、薄壁、易变形的难加工零件。盘轴类零件涉及到较多的车削工艺，机匣类、叶片类的零件涉及到较多的铣削工艺。盘件壁厚较小且不均匀，尺寸精度要求较高，外型面较复杂，不能沿圆周连续切削，在加工过程中零件变形明显，需要多次进行修整。

例如某盘件的外径尺寸精度IT6~IT7，焊缝表面的配合精度高达IT4~IT5。垂直度为0.01~0.03mm，表面粗糙度 $R_a 0.8 \mu\text{m}$ 。机匣零件刚性差且形状复杂，加工过程零件极易变形。零件的尺寸精度、表面粗糙度，位置精度要求都很严格。如某机匣零件表面粗糙度为 $1.6 \mu\text{m}$ ，薄壁端厚2.5mm，定位孔的尺寸公差0.015。某机匣毛坯加工余量大，单边余量为20~30mm，大部分余量要通过铣削去除，刀具消耗量大。叶片零件外形结构复杂不规则、尺寸较多、加工时间长，加工基准需要反复地切换。某机叶片最薄处为0.18mm，零件的表面粗糙度为 $0.4 \mu\text{m}$ 。在加工过程中系统振颤大，让刀现象严重，零件的表

面完整性差。

刀具的选取

1 刀具材料的选取

在航空用镍基高温合金的加工中，零件的尺寸精度和表面效果很大程度上取决于刀具的材料。根据镍基高温合金的特性，加工用的刀具材料一般应满足以下要求。

- 稳定性好、抗氧化、耐高温、抗冲击能力强。
- 硬度和耐磨性好。刀具材料硬度必须比零件材料的硬度高，一般都在HRC60以上。
- 有足够的抗弯强度和抗冲击韧性。
- 耐热性好，在高温下保持一定的强度和韧性以及抗黏结、扩散的性能。
- 有良好的热处理性能、可磨削性能、锻造性能及高温塑性变形性能。

(1) 硬质合金(Carbide)。

硬质合金由难熔的金属碳化物和起粘结作用的金属烧结而成，具有高的强度和硬度。硬度达HRC69~81，红硬性在900~1000℃下可保持HRC60。细晶粒、超细晶粒硬质合金材料的开发使硬质合金刀具的强度和韧性显著提高。图1为硬质合金硬质合金刀片车削加工实例。使用加压烧结的涂层硬质合金刀片，具有良好的抗塑性变形能力和韧性表层的梯度硬质合金，从而提高

了涂层硬质合金刀片的切削性能和应用范围，使硬质合金刀具进入高速切削时代。硬质合金刀具虽然有以上优点，但是由于其脆性大、抗弯强度低、抗震能力差，故多用于车加工、冲击较小的半精加工和精加工。粗加工镍基高温合金常用的材料牌号有YG8、YD15、YF06等，精加工有YD05、YG643M，而YS2T牌号的合金适用于断续切削。



图1 硬质合金刀片车削加工实例

涂层硬质合金刀具：涂层主要分为化学涂层(CVD)和物理涂层(PVD)，现代国内使用的刀具中有50%以上为涂层刀具，国外硬质合金可转位刀片的涂层比例已达70%以上。涂层已成为提高刀具性能的关键技术，采用涂层技术可使切削刀具获得非常优良的综合力学性能，大幅度地提高切削加工效率的同时还能提高刀具的使用寿命。新型涂层适应高速切削、干切削、硬切削，纳米级超薄超多层涂层和新型涂层材料的开发大幅度提高了涂层的硬度和韧性，新型涂层的应用将成为改善刀具性能的主要途径。

(2) 陶瓷刀具(Ceramic)。

陶瓷刀具适合于高速切削，可提高切削速度3~5倍。陶瓷刀具的硬度可达到HRA93~95，可加工HRC65的高硬度材料。在1200℃的高温下仍能保持良好的抗粘结性和化学稳定性，且摩擦系数低于硬质合金。陶瓷刀片如图2所示。陶瓷刀具有良好的耐磨性和高温稳定性，但是由于抗冲击韧性较差，所以要求被加工

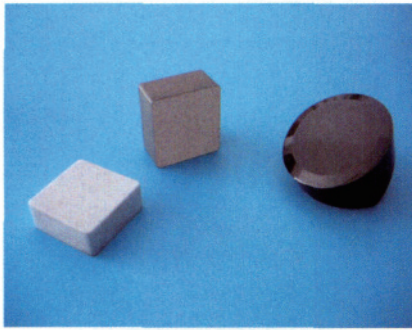


图2 陶瓷刀片

材料材质均匀,切入角度正确,切削过程平稳,最好不用于断续切削。陶瓷刀具有氧化铝基和氮化硅基两大类,当切削镍基高温合金的刀具时,应选用氮化硅的刀片,氧化铝系列的陶瓷硬度虽然高,但是韧性和强度比较差。利用陶瓷刀具的高温稳定性,在被加工材料不发生相变的情况下,采取风冷等干式切削所产生的切削热去软化被加工材料,使切削过程变得容易。陶瓷刀具加工高镍基高温合金时,其性能远好于硬质合金刀具,不仅切削速度可以大幅提升,而且能更好地解决切削热不易排出的问题。例如当切削速度在420m/min以上时,切屑成段状表面氧化呈金黄色;当线速度在700mm/min以上时,切削热大部分由切屑带走,切屑氧化变色、松散发脆^[1]。

(3) 超硬刀具。

立方氮化硼(CBN)具有很高的硬度、热稳定性、化学稳定性,可作为难加工材料高速切削的首选,见图3。立方氮化硼刀具属于负前角切削,适用于高速切削镍基和钴基高温合金,尤其是粉末冶金高温合金的高速

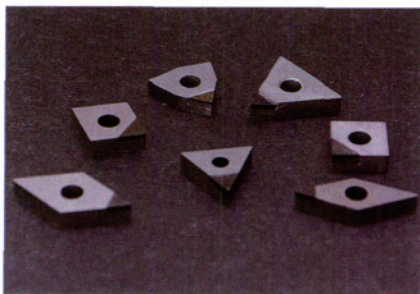


图3 CBN刀片

切削加工,但是高温下CBN容易发生粘结,可以通过使用高压切削液来减少粘结磨损,但是不可使用水溶性冷却液。CBN刀具效率优于硬质合金,寿命高于陶瓷刀具。聚晶立方氮化硼(PCBN)具有高硬度、耐磨性、热稳定性好,温度在1400~1500℃时具有高的化学稳定性、导热性。其摩擦系数为0.1~0.3约为硬质合金的1/2~1/4,从而具有了优质的抗粘结性,减少了积屑瘤的产生。如高速加工GH4169最佳的速度为110m/min, $f=1\text{mm/r}$, $a_p=1\text{mm}$ 。但由于其价格昂贵,在生产中的应用不是十分广泛。

2 刀具空间几何结构的选取

决定刀具切削性能的因素除了刀具材料,还有切削部分的空间几何结构,这些因素直接影响到切削热的大小、切屑的流向和形状、已加工表面质量、切削分力的大小。加工镍基高温合金通常选用 $0^\circ \sim 10^\circ$ 的前角,粗加工时切深和进给比较大,应选择比较小的前角,精加工时加大前角能减少变形,约为 $5^\circ \sim 10^\circ$,当车削变形高温合金时前角 $5^\circ \sim 10^\circ$,车削铸造高温合金时前角为 $0^\circ \sim 5^\circ$ 。增大后角能减少后刀面与已加工面的摩擦,还可以减少刀刃的半径,但是过大的后角会降低刀具的强度,粗加工镍基高温合金的后角一般为 $6^\circ \sim 8^\circ$,精加工 $10^\circ \sim 12^\circ$ 。主偏角的大小会影响到刀具的耐用度和切削力以及切屑的厚度,在各种刀具的角度中主偏角对零件加工的精度和表面形状影响最大。因此,在选择主偏角的时候应先考虑零件的形状其次是系统的刚性。加工镍及高温合金的主偏角一般为 $30^\circ \sim 60^\circ$,副偏角一般选择 $0.5^\circ \sim 3^\circ$ 刃倾角一般为约为 $-10^\circ \sim -20^\circ$ 。

合理切削参数的选取

在已经选择好刀具材料和空间几何角度的基础上,合理选用切削参数可以达到提高效率、优化加工效果

的目的。目前用来衡量加工效果的指标有:单件加工成本、加工时间、表面粗糙度、零件尺寸精度等。切削用量对这几项指标的影响方向并不一致,通常选用的标准是在最低成本下获得较高的效率,以期达到利益最大化。

1 切削深度的选择

在保证刀具耐用度、系统刚性、刀具强度的前提下,根据加工余量来确定切削深度。由车削的金属去除率公式,刀具寿命模型公式可知,

$$Q = V_c f_n a_p \quad (Q \text{ 金属去除率}), \quad (1)$$

$$T = C_1 V_c^x f_n^y a_p^z \quad (T \text{ 为刀具寿命}, C_1 \text{ 为常数}). \quad (2)$$

金属去除率 Q 与切深正相关,在刀具寿命的 T 为定值的时候,提高切深比和进给更有利。但是切深受机床的功率和刚性的影响,不能任意扩大。在一般情况下,粗加工应尽量去除多的余量,减少走刀次数,以获得高的切除率。在精加工和半精加工时,用较小的加工余量可以减少零件的加工变形,获得好的表面质量和高的尺寸精度。在切削表层有硬皮的锻件、铸件毛坯或是冷作硬化程度较严重的材料时,应避免刀具在硬皮或冷硬层上切削。

2 进给量的选择

切削深度选定以后,可根据系统刚性、零件工艺状态、刀具材料等因素,结合相应的经验参数或刀具技术样本给出切削深度。根据公式(1)可知,在粗加工时高的进给可以提高切除率,但是由切削力模型公式(3)可知,较大的进给量使切削力也同时增加,在选择切深的同时还需要考虑系统刚性、刀具强度等方面。在半精加工和精加工时,根据公式(4)可知,要达到要求的表面粗糙度和精度,可适当增大刀具圆弧半径,或是降低进给。

$$F = C_2 V_c^x f_n^y a_p^z \quad (F \text{ 为切削力}, C_2 \text{ 为常数}), \quad (3)$$

$$R_{\max} = 1000 f_n^2 / 8 r_\epsilon. \quad (4)$$

3 切削速度的确定

当切削速度与进给量选定后,应当在此基础上再选最大的切削速度,速度受刀具寿命的影响最大,另外刀具的材料对切削速度也有影响。例如,涂层的硬质合金刀具相对于普通的硬质合金刀具,其切削速度可适当的提升。另外限制切削速度的因素也可能是机床功率。因此在一般情况下,可以先按刀具材料以及使用寿命确定出切削速度,然后再校验机床功率是否超载。表2、表3是硬质合金加工GH4169的例子。

表2 YD15硬质合金铣刀铣削GH4169的例子

加工条件	刀具直径 / mm	切削参数			
		$V_c / (\text{m} \cdot \text{min}^{-1})$	$f_n / (\text{mm} \cdot \text{z}^{-1})$	a_p / mm	a_e / mm
粗铣	$\phi 20$	40~60	0.15~0.2	3~15	3~10
精铣	$\phi 12$	50~80	0.05~0.15	1~5	3~4

表3 YD15硬质合金车削GH4169的例子

加工条件	切削参数		
	$V_c / (\text{m} \cdot \text{min}^{-1})$	$f_n / (\text{mm} \cdot \text{z}^{-1})$	a_p / mm
粗车	35~60	0.2~0.4	2~6
半精车	40~70	0.15~0.3	0.5~2
精车	50~80	0.05~0.2	0.1~1

发展趋势

以镍基高温合金为代表的高性能难加工材料的切削问题已经成为制约航空发动机制造产业的瓶颈,对此,加快难加工材料关键切削技术的开发和方案的研究成为解决问题的关键。以发达国家高速高效切削、绿色切削等技术为代表的新型加工理念对解决难加工材料问题有很好的帮助和指导作用。

1 高速高效切削

高速切削技术特征主要表现在如下几个方面。

(1) 金属切除率可以提高3~6倍,单位功率材料切除率可达 $130 \sim 160 \text{cm}^3 / (\text{min} \cdot \text{kW})$,生产效率大

幅提高;

(2) 切削力可降低15%~30%以上,尤其是径向切削力大幅降低;

(3) 高速加工时机床的激振频率特别高,远离“机床-刀具-工件”工艺的固有频率,工作平稳,工艺系统振动小;

(4) 95%~98%的切削热被切屑带走,切削温度增加缓慢,工件温升低,基本可以保持冷态加工,工件表面热损伤小,适用于加工易变形的零件;

(5) 由于加工振动小切屑变薄,

切削力和受力变形小,所以可以获得良好的加工精度和表面质量,加工表面质量可以提高1~2级,可获得相当于磨削加工的表面粗糙度;

(6) 允许进给速度提高5~10倍,切削速度提高15%~20%,可降低制造成本20%~40%^[2]。

高效切削并非只限于单纯的提高切削速度和进给速度,而是把提高切除率放在首位,目的是在单位时间内尽可能多地去除被加工材料。实现高效加工的途径主要有以下几个方面。

(1) 选择高效的机床。主要是指高的主轴转速、高的进给系统、良好的刚性和抗震能力。

(2) 选择高效的刀具。良好的

耐磨性、高强度和韧性的刀具材料,优良的刀具涂层技术,动平衡技术。

(3) 合理安排工艺路线。合理地分配加工余量,应该是根据机床和刀具进行工艺路线的安排,来适应高效加工。

(4) 减少辅助时间。通过减少辅助时间来实现高效加工,利用复合刀具、夹具尽量减少辅助时间,或者合并不必要的工序。

2 绿色切削

从现阶段来看,绿色切削主要包括以下几个方面。

(1) 绿色刀具。主要是指在切削过程中,应用具有良好导热性、耐高温、高硬度的刀具材料、涂层来适应微量切削液或无切削液的状态。

(2) 少余量切削。精密铸造、精密锻造技术的应用使零件的加工余量减少,从而降低了切削过程中刀具、能源、工装的浪费。

(3) 惰性气体保护。国外车削氮化硅陶瓷的试验表明:在液氮冷却条件下,刀具磨损可减小到1/4左右,零件表面粗糙度值可降低到原来的1/6。这种先进的冷却切削技术为钛合金等难加工材料的绿色切削技术提供了新思路。

(4) 气体射流冷却。日本学者对此研究较多,其主要原理是通过一定压力的气体对加工区进行冷却和冲刷,以达到降温和清除切削的目的。绿色切削主要以降低能源的浪费,减少废气、废渣、废液的排放为目的。随着人们对环境问题的日益关注以及可持续发展的要求,以减少污染为主的绿色切削必将成为未来的发展方向。

参考文献

[1] 赵秀芬,刘阳.陶瓷刀具在转包机匣镍基高温合金加工中的应用.新技术新工艺,2010(5): 63.

[2] 蔡光起,原所先.机械制造技术基础[D].沈阳:东北大学,2002.

(责编 泰山)