

高温合金切削中刀具的合理选用

Reasonable Selection of Cutting Tool for High-Temperature Alloy

北京理工大学 王新永 于启勋 庞思勤



王新永

北京理工大学机械与车辆工程学院博士生。主要从事难加工材料的高速、高效切削加工研究工作。

随着航空航天业的快速发展以及新型材料的广泛应用,金属切削加工技术的研究与发展需解决更多、更复杂的加工问题。尽管目前多种特种加工技术已应用于航空航天材料的加工,并可达到设计要求,但切削加工仍是生产中首选的方法。其中,高速切削加工技术是先进实用的制造技术,正成为切削加工的主流,具有强大的生命力和广阔的应用前景。

刀具材料是刀具几何设计和加工工艺参数选择的基础。刀具材料是推动当今高速切削技术发展的关

键技术之一,刀具材料的超前发展为高速切削加工技术的发展创造了重要的条件。本文主要讨论切削加工典型航空航天材料——高温合金刀具材料的合理选用,并进一步对刀具几何角度做简要分析。

工,会有比常规切削加工更低的切削温度和更小的切削力,因此,高速切削加工能得到高的加工精度并显著提高生产率。

高速切削技术是高速切削加工过程能量的应用中,由于高硬的刀具(切削部分)对工件的作用,导致其表面层产生高应变速率的高速切削变形,同时刀具与工件之间存在着高速切削摩擦学行为。所以,形成热、力耦合不均匀强应力场,这种工艺技术称之为高速切削加工技术。

高速切削技术是高速切削加工过程能量的应用中,由于高硬的刀具(切削部分)对工件的作用,导致其表面层产生高应变速率的高速切削变形,同时刀具与工件之间存在着高速切削摩擦学行为。所以,形成热、力耦合不均匀强应力场,这种工艺技术称之为高速切削加工技术。

高速切削技术背景以及被加工材料

1 高速切削技术

在常规切削速度范围内,切削温度随切削速度的提高而升高,然而德国物理学家 Carl. J. Salomon 的高速切削理论却指出:当切削速度提高到某一阈值后,切削温度反而随切削速度的提高而降低,在这样的高速区进行切削加

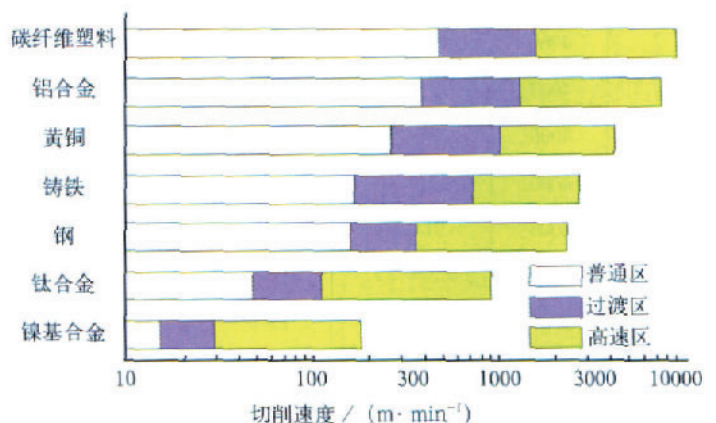


图1 不同材料的高速切削加工速度范围

高速切削是一个相对的概念,不同的加工方式、不同工件有不同的高速切削范围。根据目前实际情况和可能的发展趋势,不同的工作材料的大致切削速度范围如图1所示。

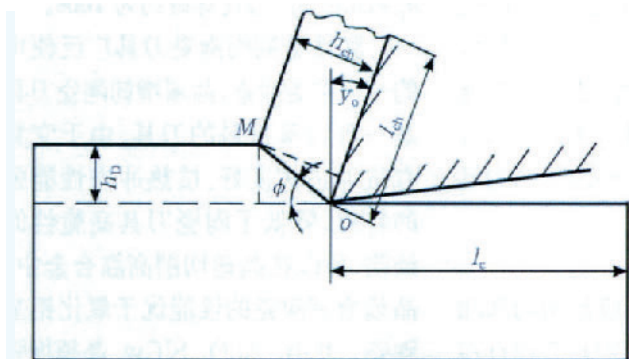


图2 剪切面与变形系数

2 高温合金

高温合金,特别是镍基高温合金具有优良的高温强度、热稳定性及抗热疲劳性能。

高温合金是难加工材料之一。若45#钢的加工性为100%,则高温合金的相对加工性仅为10%~20%。其切削加工的特点为:切削力大,约是普通钢材的1.5~2倍;切削温度高,最高达1000℃以上,加工硬化严重,表面硬度比基体硬度高50%~100%;塑性变形大,在室温下的延伸率可达30%~50%;刀具易磨损,常见的有扩散磨损、边界磨损、刀尖塑性变形、月牙洼磨损及积屑瘤。

3 应用高速切削技术加工高温合金

对应不同的工件材料,其高速切削的临界值因为材料各自的加工性差异而各有不同。在高温合金的切削加工中,由于该材料体现出上述诸多的难加工特性,使得它的加工性能极其差,因而通常的切削速度比较低,一般在10~20m/min左右。根据图1可知,当切削速度达到15~30m/min时,即认为该速度进入了普通切削和高速切削的过渡区,当切削速度超过30m/min时,可以认为其完全进入了高速切削状态。

在高速切削加工中,切削速度提

高到某一阈值后,随着切削速度的提高,切削力降低,切屑带走的热量相对更多,传给刀具和工件的热量相对不多。因此,切削温度开始虽然升高很快,但达到一定速度后,逐渐缓慢,

升高很少,甚至略有下降。因此,高速切削加工能得到高的加工精度并显著提高生产率。

切削高温合金实际上是一种高温切削加工,与高温合金一样,硬质合金在高温下(例如1000℃)硬

度会显著下降,所以应用高速切削技术,合理地选择切削速度和切削会使切削效率和切削效果明显改善。

高速切削高温合金的刀具材料应该具有高强度、高的红硬性、良好的耐磨性和韧性、高的导热性和抗粘接能力等,适用于高速切削的刀具材料主要包括:涂层硬质合金刀具、陶瓷刀具和立方氮化硼(CBN)刀具等。

高速切削高温合金的机理简析

1 高速切削的切削区的材料变形

在刀具与工件相对运动的作用下,工件材料的被切除部分及其邻近区域将受到刀具的“切”、“割”和“挤”的作用,使被切除的材料经变形后形成切屑,而其邻近区域(如已加工表面)也将产生一定的变形。

切削区分为4个变形区:(1)基本变形区;(2)前刀面摩擦变形区;(3)后刀面摩擦变形区;(4)刃前变形区。1区和2区消耗动力的主要部分,而3区和4区则对形成加工表面起着重要的作用。

如果切削刃锋利,则4区很小;如刀具后角大,则3区也很小。1区是主要变形区,如切削速度足够高,

则1区变得很窄,几乎成为一个面,称为剪切面(见图2中的线OM)。剪切面的方向与切削速度的方向之间的夹角是剪切角 ϕ 。

剪切角 ϕ 的大约数值可用M. E. Merchant(麦钱特)公式或Lee and Shaffer(李和谢弗)公式计算。

M·E·Merchant公式:

$$\phi = \pi / 4 - \beta / 2 + y_0 / 2,$$

Lee and Shaffer公式:

$$\phi = \pi / 4 - \beta + y_0,$$

式中: β 为前刀面与切削间的摩擦角; y_0 为前角。

当切削速度很高时,被切材料来不及充分变形,剪切角 ϕ 加大,变形量减小,从而切削力也减小。切削速度提高后,前、后刀面与切屑、工件间的摩擦随之降低,因此,前刀面与切屑间的摩擦角 β 减小,进而摩擦因数减小,从而有利于切削力减小。

应用高速切削技术加工高温合金,可以使得切削速度增大并超过某一阈值后,切削力增大的趋势大大减缓,甚至出现切削力降低,从而有利于切削的顺利进行。

2 高速切削的切削热和切削温度

在切削过程中,切削热的来源是剪切面区域材料变形所做的功和前、后刀面所做的摩擦功,如图3所示。一部分切削热传到切屑中被切屑带走;一部分热传到工件中;还有一部分热传到刀具中。当切削速度提高后,传入切屑而被切屑带走的热量份额增多,而传入工件和刀具的热量份额减小,故工件、刀具升温并不大。

高温合金由于其材料的特性,具有较高的高温强度、动态剪切强度,热扩散系数较小,切削时易产生加工硬化,这将导致刀具切削区温度高,所以切削温度很高。切削高温合金实际上是一种高温切削加工,刀具材料在高温下(1000℃以上)与高温合金的硬度会同时显著下降,这使得刀具快速磨损、破损直至失效。所以,

高温合金的加工的一个重要手段就是降低温度。除了冷却液等冷却方式外,应用高速切削技术,可以使得在加工效率、加工精度提高的情况下,切削温度并不明显提高,反而会略有下降。因此,高速切削高温合金是其加工的极其优化的选择。

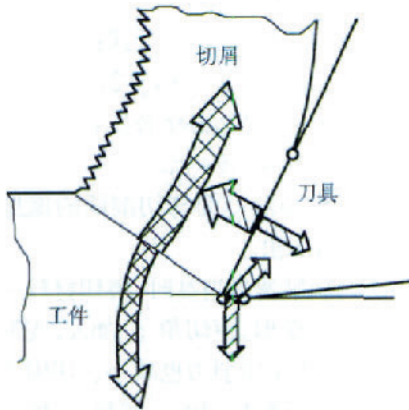


图3 切削热的来源

3 高速切削的动力学简析

从动力学的角度来看,高速切削加工中,随着速度的增加,切削力增大趋势减缓甚而略有下降,将有利于减小由于切削力原因产生的振动。另外,由于转速的提高,使切削系统的工作频率大大远离机床的低阶固有频率,因此高速切削加工可大大降低加工表面质量。

高温合金广泛应用于航空航天工业。由于航空航天中的很多部件由于所受的载荷多为周期性载荷,因此为了保证其良好的使用寿命,必须对其加工表面质量提出严格的要求,因此,能够大大改善其表面加工质量的高速切削技术的应用势在必行。

刀具材料的选择

1 硬质合金

硬质合金刀具材料业已广泛应用于高温合金的加工。由于加工高温合金切削力大,切削温度高并集中在刀刃附近,容易产生崩刃和塑性变形现象,因而通常采用韧性和导热性较好的K类和高温性能好的S类合金。

碳化物晶粒的平均尺寸低的

WC-Co类硬质合金(超细颗粒硬质合金),其硬度可达HRA90~93,抗弯强度为2000~3500MPa,由于其硬质相和钴高度分散,增加了粘结面积,提高了粘结强度,在高温合金的加工中表现出优异的切削性能。如用超细晶粒硬质合金(HRA91.5, $\delta_{bb}=2800\text{MPa}$)切削镍基合金GH141,在切削速度 $V_c=42\text{m/min}$,进给 $f=0\sim 3.5\text{mm/r}$ 条件下,刀具寿命接近15min。

2 涂层硬质合金

涂层硬质合金一般是用物理和化学气相沉积工艺(PVD, CVD)在硬质合金表面涂覆一层或多层耐磨性化合物,如TiC, TiN, Al_2O_3 等,使刀具表层具有很高的耐磨性和耐热性,同时整体的强度和韧性也不降低,从而获得远高于基体的表面硬度和优良的切削性能。

涂层刀片的涂层温度低,保持了基体的高强度,而且能给刀具切削刃表面提供一个可防止高温合金切削中最容易产生裂纹的压应力,而没有减少刀具韧性,所以它能提供一个密度高、金相组织均匀的涂覆表面,极好地延长刀具寿命。对当前涂层硬质合金所使用的各种图层材料,对应高温合金的高速切削,笔者认为TiAlN涂层由于其化学分解的温度较高而最适合。如笔者使用伊斯卡IC907 TiAlN PVD涂层刀片,用于加工GH4169,切削速度 $V_c=50\text{m/min}$, $f=0.1\text{mm/r}$,切削深度 $a_p=1\text{mm}$,寿命为22min。

3 陶瓷

镍基合金切削温度高,在高温区易与刀具材料发生非常强烈的化学反应,陶瓷刀具材料具有硬度高、耐磨性能好、耐热性和化学稳定性优良、不易与金属产生粘结的特点,已成为高速切削高温合金的主要刀具材料之一。

氧化铝(Al_2O_3)基陶瓷(如 $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$)在 1200°C 时也能保持

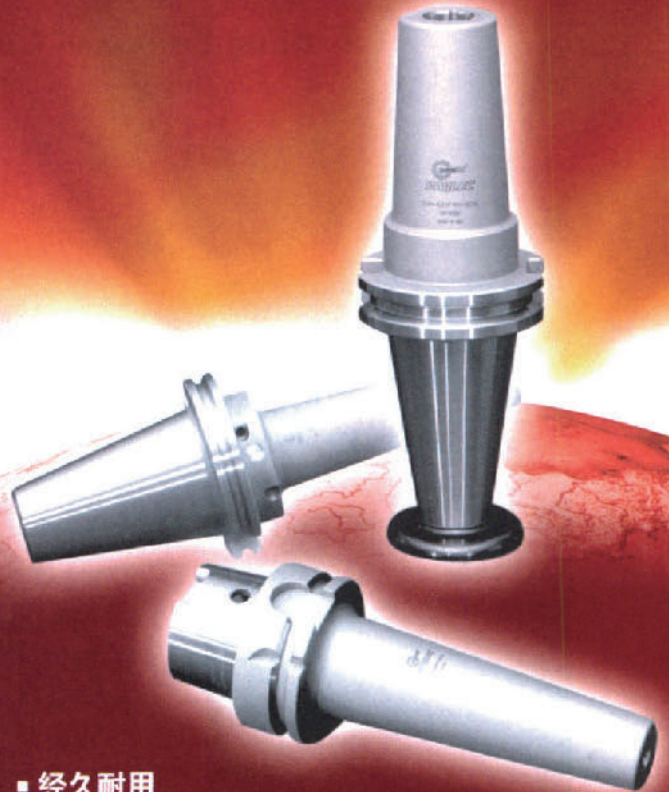
HRA80的硬度进行切削,所以可以用比硬质合金高4~5倍的切削速度加工高温合金,如笔者用氧化铝(Al_2O_3)基陶瓷加工GH4169, $V_c=50\text{m/min}$, $f=0.1\text{mm/r}$, $a_p=1\text{mm}$ 时,刀具寿命约为100s。

脆性是制约陶瓷刀具广泛使用的一个重要因素,晶须增韧陶瓷刀具是一种特殊材料的刀具,由于它具有抗冲击韧度好、抗热冲击性能强的特点,降低了陶瓷刀具高脆性的缺陷,所以在高速切削高温合金中,晶须增韧陶瓷的性能优于氧化铝基陶瓷。其中, Al_2O_3 SiCw晶须增强陶瓷特别适合于高速加工硬度低的镍基合金。例如,南京航空航天大学使用晶须状陶瓷 Al_2O_3 和SiCw混合结构的KY4300切削GH4169, $V_c=50\text{m/min}$ 、 $f=0.2\text{mm/r}$, $a_p=1\text{mm}$ 时,刀具寿命约为120s,切削速度为 80m/min 时,刀具寿命约为150s;氮化硅(Si_3N_4)基陶瓷有较高的强度和韧性(抗弯强度为 $900\sim 1500\text{MPa}$)、较高的耐热性能(可达 $1300^\circ\text{C}\sim 1400^\circ\text{C}$ 以上)、优良的耐热冲击能力(是 Al_2O_3 的2~3倍)和高的导热系数。氮化硅陶瓷(Si_3N_4)也可用于高温合金的加工。应用氮化硅(Si_3N_4)基陶瓷切削镍基合金时,切削速度可达 300m/min 以上。

氮氧化铝(Sialon)此种材料系用氮化铝、氧化铝和氮化硅的混合物在高温下进行热压烧结而成的材料。该种刀具材料具有很高的硬度和韧性。利用高速干式切削产生的切削热,可使被加工材料变软而改善其切削加工性,而陶瓷刀具仍可保持良好的高温红硬性,这是刀具寿命显著提高的根本原因。Sialon陶瓷韧性很高,适合于切削过固溶处理高温合金,已成功用于镍基高温合金的加工,是高速加工镍基高温合金的理想刀具材料。例如,南京航空航天大学使用Sialon基体的KY2100圆形陶瓷刀具切削GH4169, $f=0.2\text{mm/r}$,

帕莱克热缩刀柄系列

高精度，高刚性，高动平衡性



■ 经久耐用

采用高强度合金钢材料，使用寿命长久！

■ 高精度

同心度在3倍直径处小于 $3\mu\text{m}$

■ 高速度

25000转/分时，动平衡达到G2.5

获得专利的可调平衡系统

广告索引号 08-063

帕莱克是全球刀具系统和刀具预调仪解决方案的领航者，一直致力于为客户提供全方位的加工解决方案，以其先进的技术，高质量的产品，本土化的服务，帮助您在生产经营中降低成本，创造更高效益！

帕莱克机械（南京）有限公司

USA · Europe · 中国 · 南京 · 上海 · 广州 · 天津 · 成都

电话：025-66612228 传真：025-66612278

Email: sales@parlec.com.cn

$a_p=1\text{mm}$, $V_c=160\text{m/min}$ 时，刀具寿命约为60s。沈阳黎明航空发动机集团有限公司，使用 Si_3N_4 Sialon陶瓷铣削镍基合金N0.263（与Inconel718相近），切削速度为150~400m/min，刀具寿命为40s左右。

4 立方氮化硼

立方氮化硼CBN有高的硬度和耐磨性，有很高的热稳定性（可达 $1400^\circ\text{C}\sim 1500^\circ\text{C}$ ），优良的化学稳定性、较好的导热性（是硬质合金的20倍）和较低的摩擦系数（系数值为0.1~0.3，硬质合金的摩擦系数为0.4~0.6），低的摩擦系数和优良的抗粘能力使CBN刀具切削时不易形成滞流和积屑瘤，故适于高速切削高温合金。加工高温合金inconel718，最佳切削速度为100~120m/min。PCBN是在高温高压下将微细的CBN材料通过结合合金元素（TiC、TiN、Al、Ti等）烧结在一起的多晶材料。PCBN的化学惰性特别大，在 $1200^\circ\text{C}\sim 1300^\circ\text{C}$ 时也不与铁系材料发生化学反应，与碳在 2000°C 时才发生反应，在中性、还原性的气体中，对酸碱都是稳定的。PCBN刀具用来高速切削镍基高温合金，进给量 $f=0.05\sim 0.15\text{mm/r}$ ，切削深度 $a_p=0.1\sim 3.0\text{mm}$ 的条件下，切削速度 $V_c=120\sim 240\text{m/min}$ ；进给量 $f=0.05\sim 0.15\text{mm/r}$ ，切削深度为 $a_p=0.1\sim 3.0\text{mm}$ 。

刀具几何角度及 工艺参数

高速切削高温合金时，刀具失效的类型主要有：沟槽磨损、积屑瘤等。尤其是在用陶瓷刀具高速切削镍基合金时，沟槽磨损非常严重，是制约刀具寿命的重要因素。

针对沟槽磨损，刀具几何角度及工艺参数的设计选择为：（1）增大刀柄夹持角度；（2）采用较大的切削深度，对应不同的高温合金材料，应该尽量使得切削深度大于上一道工序留下的加工硬化层的厚度；（3）刀片形状尽量设计得强度足够大。如果可能，设计成圆形，并且，当刀片形状设计为圆形时，切削深度相对减小一些，减小大概原切削深度的1/7。

针对积屑瘤，刀具几何角度及工艺参数度的设计选择为：（1）高速切削状态下，尽量增加切削速度，积屑瘤现象将受到抑制；（2）采用比较小的正前角，锋利的涂层刀具；（3）合理使用冷却液。

结束语

高速切削加工技术可显著提高高温合金切削加工的效率 and 刀具寿命，且能得到很好的加工质量。选择合理的高速刀具材料，并相应设计其合适的几何角度和加工工艺参数是实现高温合金这种典型的航空航天难加工材料高效加工的必要前提和重要途径。（责编 金卯）