

# 镍基高温合金的切削加工

## Cutting of Nickel-Based High Temperature Alloy

沈阳黎明航空发动机(集团)有限责任公司 赵秀芬 王玉华 刘阳 王兴林  
 山东大学机械工程学院 万熠



赵秀芬

高级工程师,现主要从事航空发动机难加材料的匹配刀具选择、高效加工、切削参数优化、刀具国产化等方面的研究。

现在的涡扇发动机的材料中难加工材料占绝大部分,其中高温合金有65%,其相对加工性很低。同时,航空航天发动机中叶片、机匣件等形状复杂,表面完整性要求又高,使镍基高温合金零件的切削加工更为困难。

航空发动机零件结构复杂,而高温合金等难加工材料加工难度更大。对工件来说,复杂型面数控程序优化难,高温合金材料容易造成加工变形和让刀,使加工精度不符合要求;对

航空发动机零件结构复杂,而高温合金等难加工材料加工难度更大。对工件来说,复杂型面数控程序优化难,高温合金材料容易造成加工变形和让刀,使加工精度不符合要求;对刀具来说,加工镍基高温合金零件,容易造成刀具快速磨损,刀具消耗大。

刀具来说,加工镍基高温合金零件,容易造成刀具快速磨损,刀具消耗大。

镍基高温合金材料的主要成分为镍,以GH4169为例,其镍的含量为50%~55%,其余主要元素有Fe、Cr、Nb等。它是以体心立方Ni3Nb( $\gamma''$ )和面心立方Ni3(Al,Ti,Nb)( $\gamma'$ )强化的镍铁基合金(通常称为镍基合金),从低温到700℃以下具有高的屈服强度、拉伸强度和持久强度。在650℃~760℃具有良好的塑性,一般认为GH4169的组织是由 $\gamma$ 基体和NbC、 $\gamma'$ 、 $\gamma''$ 、 $\delta$ 相组成。NbC(Ti,Nb)(CN)等碳化物数量很少,比较稳定。 $\gamma''$ 相数量最多,是合金的主要强化相。晶格常数为 $a_0=3.642\text{Å}$ , $c_0=7.406\text{Å}$ ,呈圆盘状在基体中弥散析出,强化作用是通过 $\gamma''$ 的共格畸变而实现。 $\gamma'$ 相数量次之,呈球状弥散析出,对合金起

一部分强化作用,此外还有一些碳化物起强化相作用。GH4169未经时效时,基本上为单相奥氏体,组织中强化相不多,此时一般仅能应用于受力不太大的高温薄壁零件,对于高温受力零件,如叶片、涡轮盘、涡轮轴等,则必须经过时效处理,淬火后得到饱和的镍基奥氏体,经过时效后析出金属间化合物 $\gamma'$ 和 $\gamma''$ 相以及碳化物强化相。它们呈弥散状分布于晶内(以 $\gamma'$ 为多)和晶界处(以 $\gamma''$ 为多),从而强化了晶界。这种局部合金化能阻碍晶界滑动和迁移。这些强化相越多,合金强度、硬度越高,耐磨性越好。高温合金的抗拉强度要比一般合金钢高很多,尤其是其高温强度和韧性,一般到750℃才开始有明显下降,但导热系数约是钢的30%,加上大量金属间化合物 $\gamma'$ 、 $\gamma''$ 的作用,使高温合金的切削加工出现切削力大、切削温度高、刀具

磨损严重、加工硬化严重等问题,显得特别难加工。

镍基高温合金切削加工的主要问题表现在以下几个方面:

(1) 切削力较大,一般为加工钢材的1.5~2倍。

(2) 切削温度高,在相同条件下,切削温度约为45钢的1.5~2倍。

(3) 刀具磨损严重,机械磨损、粘结磨损、扩散磨损和氧化磨损均比较严重,使刀具寿命明显降低。

(4) 加工硬化现象严重,已加工表面硬化程度可达基体硬度的1.5~2倍。

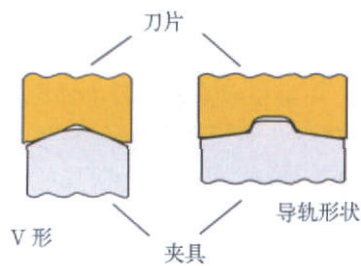
(5) 切屑硬而韧,不易折断,造成切削过程中切屑处理困难。

在以上5个难加工特点中,对生产实际影响最大的是刀具磨损严重。因此在生产现场,切削镍基高温合金的机床旁往往摆放许多的刀具,更换刀具比更换零件的频率要高得多,是一种典型的“刀海”战术。解决镍基合金的难加工问题对航空航天工业有非常大的实际意义。本文通过车、铣加工实例说明镍基高温合金的切削加工性。

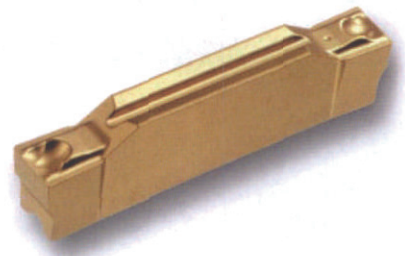
### 高温合金的车削加工实例

高温合金车加工中时必须注意:既要求刀具锋利,还要保证足够的刀尖强度。刃口必须经过仔细刃磨,保持刀具较好的表面粗糙度,保证刃口光滑,不允许有任何崩刃、缺口、裂纹和毛刺,防止在加工高温合金时刀片崩刃损坏。而选用硬质合金刀具材料时,应注意合金颗粒的大小,颗粒越小,刀具寿命越高,抗边界磨损的能力越大。刀具的耐磨性要好,才能保证加工高温合金发动机零件高的技术条件和表面质量。

某发动机零件,材料是GH4169,在车内孔工序:加工长度109.5mm,孔径为166mm。由于内孔表面跳动值是0.02mm,表面粗糙度是 $R_a 0.8\mu\text{m}$ ,要求很高,而材料本身加



T形导轨定位示意图



工性又很差。精加工使用一般的刀片一直很难保证要求,跳动值一般在0.05mm,经常超差;而且加工效率又低,刀片很容易磨损。

为解决这个问题,我们经试验比较选择了VNGP160408 S05F。这个刀片采用了新技术,是专为镍基高温合金的切削而设计的。刀片采用更细的晶粒,表面有 $4\mu\text{m}$ 的CVDTiCN- $\text{Al}_2\text{O}_3$ -TiN的薄涂层。根据产品样本介绍:此刀片特别适合镍基高温合金的精加工,其耐磨性好,适用于小切深。试验时我们采用的参数:转速40r/min,进给量0.18mm/r,切深0.1mm。但跳动值仍然是0.025mm,而且刀片有磨损。通过分析我们认为切削参数过低造成的。首先0.1mm的切深,是在硬化层上切削,严格的说不是切削而是磨削;况且硬化层比基体硬得多,自然刀片磨损得快。另一方面其线速度过低,容易造成冷焊现象,导致表面质量不好,而且这刀片是G公差,速度高些才能显示出优越性。所以提高参数:转速60r/min,进给量0.18mm/r,切深0.25mm。加工几刀后,刀片几乎没有磨损,跳动值0.01mm,在公差范围内,表面很好,达到 $R_a 0.8\mu\text{m}$ 以下。切削时间比原来相比减少了7min。采用这种新型刀片解决了超差的问题,保证了质量,而且综合计算成本有所降低。

另一高温合金零件,有端面槽,宽10mm左右,深28mm,且槽表面跳动值在0.015mm,用原来的刀片很难保证,经常超差。因为一般厂家

的槽刀定位方式是V型弧面定位,用侧刃加工会有微小窜动,尽管这些微小窜动仅在若干微米区间,但如果不断重复,使切削刃处于不适当的位置,就会影响0.015mm精度的保证。

我们查阅了资料,选择了某厂家新型刀片。此刀片和刀杆配合是T型导轨定位,这种T型导轨设计将刀片准确固定在刀体上,并高度稳定以保持切削刃位置,不会产生窜动。我们用T型导轨定位的槽刀加工,有效地解决了槽表面跳动值超差问题,保证了0.015mm的跳动精度。

我公司加工一转包零件是直径1米多的环形件,壁厚2mm,其跳动值要求很高,而且是高温合金材料,很难保证形位公差。由于直径大且壁薄,一般刀片加工都会产生变形。而且变形后发生让刀现象,表面加工硬化,刀具非常容易磨损。

通过分析我们认为加工此件时防止变形是主要的任务,这就需要刀具锋利,不能产生加工硬化。我们大胆采用了加工铝合金的大前角抛光刀片。这种刀片本是加工铝材料的,现在用在高温合金壁薄件加工上效果也很好。我们先后试验了2种刀片VBGT160408-W-25、VCGT160408F-AL KX效果都很好。原来用加工高温合金刀片加工一个大表面时,中间要换刀,有接刀痕而且变形量在0.05mm以上,需补加工。用大前角抛光刀片中间不用换刀,由于刀尖锋利,也大大减小了变形量,其变形量控制在0.02mm以内,保证了形位公差要求。

## 高温合金的铣削加工实例

高温合金的铣削是断续切削,要求铣刀刀齿有足够的强度,使其能承受高温合金切削的变形抗力和切屑负载。通常用进口的立铣刀铣削高温合金,线速度 30~60mm/min 之间,切削深度为 0.1~0.3D (D 为刀具直径),每齿进给依刀具直径的大小而不同。

现在无论是进口刀具还是国产刀具都有适合高温合金加工的五刃铣刀,能获得高的金属去除率。加工一封严环形件,材料是镍基高温合金,用一般的铣刀切削参数很低,而且刀具寿命也低,频繁换刀,机床占用时间长。为提高效率减少机床占用时间,我们采用了新型高性能整体硬质合金立铣刀具,这种铣刀有 5 个切削刃,刃间角不等分,能减少振动。这种铣刀的特点是既能获得较高的效率,又有足够容屑空间。在近端齿芯部直径小,近柄部芯部直径大,断面呈抛物线状,而且是不等分的刃倾角,可使切削平稳,减少振动,每个槽型也不相同。

经过试验,我们最终采用的参数是:转速 1000r/min,进给量 200mm/min,切深 4.5mm,切宽 6.5 mm,一把刀具可加工 3 件。而用原来四刃刀具的参数仅为转速 300 r/min,进给量 70 mm/min,一把刀只能加工 2 件。相比之下,采用这种新型刀具,效率大幅度提高。

加工高温合金若要大幅度提高效率,高性能陶瓷刀片是首选。一般来说高温合金的抗拉强度到 750℃才开始有明显下降,而陶瓷刀具在 900℃时红硬性也非常好。我们在加工中介机匣时为提高效率采用陶瓷刀具加工,取得了很好的效果。

中介机匣的材料是 inconel718 (含镍 51% 左右,硬度 HRC32 ~ 35),形状中间有很多“岛区”,单边加工余量最大 30mm 以上,最小也超

过 20mm,加工难度很大。原来采用硬质合金刀具进行铣削加工,刀具磨损、破损严重,加工效率很低。

用陶瓷刀具在真件上做圆台连续切削,注意切入、切出的角度,采用了不同切深多种参数,试验结果如表 1 所示。

从表 1 试验结果可见, TiN 金属陶瓷不适合高温合金的切削加工。而 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 赛阿龙陶瓷刀片则非常适合加工镍基高温合金。用赛阿龙陶瓷刀片进行加工时,加大切削深度,效果反而更好。这是因为赛阿龙陶瓷刀具是采用 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 为耐磨相, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 为硬化相,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 3mm 切深时远比 2mm 切深接触长度大,产生的切削热也高,此时被加工材料在高温下发生软化,(高温合金的硬度一般到 750℃ 已开始有明显下降)靠材料的自软性,使刀片的切削加工更为容易,工作寿命也相应延长。因此,陶瓷刀具切削镍基高温合金采用大切深,往往成为改善切削加工性的有利因素。陶瓷刀具通常比较适合镍基高温合金高速切削。此外切削角的变化决定了刀具的进刀方向,对切削加工性的影响

也很大。

上述试验确定了陶瓷刀片铣削中介机匣的加工参数。

## 加工高温合金刀具选择和切削参数、程序优化

刀具与工件材料之间的正确匹配也是实现高温合金加工的关键。有一转包机匣件,材料是含高钴的镍基高温合金,在采用硬质合金刀具车削时加工效率极低,刀具磨损严重,且不能保证尺寸精度和表面质量。根据现场刀片的磨损形态,发现所采用的刀具和被加工材料不匹配。高钴镍基高温合金比一般的镍基高温合金难加工得多,切削抗力更大,切削温度更高。必须要选择与被加工材料在物理、化学和机械性能都匹配的刀具才能保证顺利加工。根据用陶瓷刀具切削中介机匣的经验,采用了赛阿龙陶瓷刀具 RNGN120700KY2100、陶瓷刀片 RNGN120700 6065,效果很好,尺寸精度和效率都很高,表面粗糙度也改善了。陶瓷刀具具有高温下的红硬性和化学稳定性,刀具寿命长。同时切屑形态也从带状屑转变为单元切屑。切屑与前刀面的摩擦将不再是切削力和切削热的主要来源;后刀

表 1 中介机匣的切削试验

刀片材料	转速 $f / (r \cdot \min^{-1})$	进给量 $f / (mm \cdot \min^{-1})$	切深 /mm	切削角 $f / (^{\circ})$	切削 时间 /s	刀片磨损形式
TiN 金属陶瓷	3500	716	2	30	70	崩齿严重
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> 赛阿龙	4000	1540	2	30	80	刀片半层剥落
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> 赛阿龙	6000	1540	2	30	90	侧刃有崩齿(未在零件中)刀片半层剥落
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> 赛阿龙	7500	1900	2	30	110	刀片半层剥落
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> 赛阿龙	7500	1800	2	0	138	崩齿严重
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> 赛阿龙	7500	2000	3	0	180	磨损不大
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> 赛阿龙	7500	2000	3	0	190	磨损不大 (刀片转新面加工)
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> 赛阿龙	7500	2000	3	0	190	磨损不大 (刀片转新面加工)

面处工件材料的弹性变形也将由于变形速度逐渐跟不上切削速度而减小,使后刀面的摩擦也随着减小,从而对降低切削力和切削热产生有利影响。硬质合金刀具和陶瓷刀具的车削比较如表2所示。

从表2中可以看出,用此刀片加工高钴的镍基高温合金和硬质合金刀片相比,效率大幅度提高:是原来刀具的16倍以上,且尺寸精度、表面质量良好,没有让刀。而用原来刀具磨损严重,质量难以保证。从表2中还可看出:赛阿龙陶瓷刀具更适合加工高钴的镍基高温合金。

此机匣件的铣加工分别采用了铣刀体 KIPR032RP12CF04 (3刃) 铣刀片 RPGN120400E KY2100 和铣刀体 WSRN-4032R (3刃) 铣刀片 RNGN1204000T01020WG-300 KER 两种刀具,试验结果见表3。

1~2组参数是刀具商根据其样本所给的参数。第1组参数单纯的用样本上加工高温合金的参数,没有考虑到此材料含高钴的特点:粘度比 inconel718 大,抗力大,而刀片后角为

零,使刀具粘结在后刀面上,增加了切削热的产生,最致命的是每齿进给只有 0.038mm,切屑过薄使产生的切削热不能被切屑带走,热量传递到机床会将轴抱住。第2组参数,刀片选采用了 RPGN, 11° 后角,而每齿进给 0.1mm,使刀片切屑负载还可以,大部分切削热能被切屑带走,所以远比第一组效果好。但由于线速度低,陶瓷刀具利用材料自软性的特点没发挥出来,所以刀具寿命也不理想。

表3中3~5组参数是我们根据中介机匣经验给出的试验参数,因为高钴的镍基高温合金切削抗力远比 inconel718 大,所以参数有所降低。从表3可以看出:切削参数即线速度和每齿进给对陶瓷刀具的寿命的影响很大,线速度高,产生的切削热大,陶瓷刀具反而不易损害。而每齿进给,涉及到刀片所承受的切屑负载,负载过大,刀片就易损坏。第5组参数线速度所产生的切削热大,而切屑负载适中,所以效果最佳。

镍基高温合金的铣削加工,程序优化也非常重要,例如切削到拐角

处,要圆滑走刀。中介机匣切槽加工时,程序的影响非常大,这部分余量很大,在岛之间切削,频繁换向。开始编程时,走刀路线是拐直角,结果在换向时切削力很大,表现为零件很热、设备振动很大,陶瓷刀具严重崩刃。原因主要是陶瓷刀具的强度与韧性相对较低,切削过程中,频繁换向受到交变的应力作用,在这些交变应力作用下,陶瓷刀具很容易沿晶界产生微裂纹,并逐渐扩展,最后碎裂。针对这种情况我们优化了程序,在拐角处参数应衰减的地方,改成走圆角。这样就解决了问题:设备没有振动、零件也不热,而刀片的磨损也为正常磨损。

## 加工高温合金的切屑形式

镍基高温合金等难加工材料,当切削速度提高后,切屑变形特点发生明显变化,从连续切屑变为不连续切屑。加工镍基高温合金时,随着切削速度的提高,剪切变形区越来越窄,形成集中剪切滑移,最终产生单元体相互分离的节状切屑。

镍基高温合金虽然通常切屑为带状切屑,但用陶瓷刀片高速切削过程中,切屑由带状屑变成了碎屑,但这与普通材料在低速时产生的挤裂切屑有本质的不同。随着切削速度的逐步提高,切削时的变形规律发生一些改变。切屑中的剪切变形逐渐加剧,

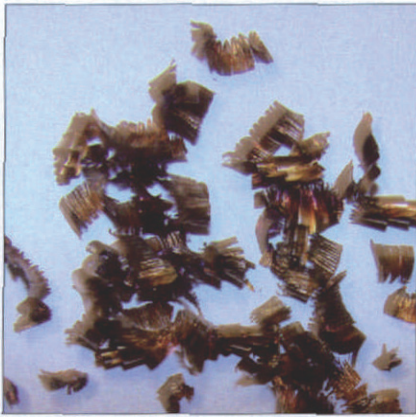
剪切区的滑移逐渐加强,即使是塑性材料的切屑形态,也会逐渐从带状切屑转变为锯齿状切屑,进而有可能转变为单元切屑。由于在高速切削的条件下切屑由带状切屑转变为单元切屑,切屑与前刀面的摩擦将不在是切削力和切削热的主要来源之一;后刀面处

表2 硬质合金刀具和陶瓷刀具的比较

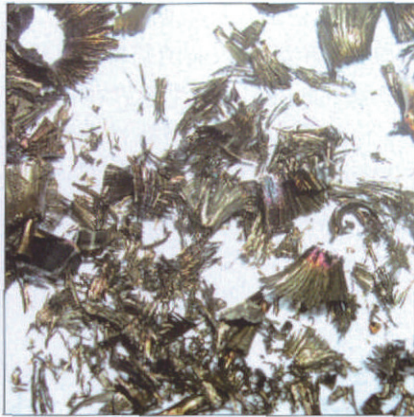
刀具种类	主轴转速 / (r·min <sup>-1</sup> )	切削速度 / (mm·min <sup>-1</sup> )	每转进给 / (mm·r <sup>-1</sup> )	进给速度 /mm	切深 /mm	效率比	表面质量
硬质合金刀具	8	25	0.1	0.8	1	1	不好
陶瓷刀具(山特)	70	229	0.12	8.4	1	10.5	良好
陶瓷刀具(肯纳)	80	260	0.16	12.8	1	16	良好

表3 陶瓷刀具铣削高钴的镍基高温合金

刀体	刀片材料	转速 / (r·min <sup>-1</sup> )	进给 / (mm·min <sup>-1</sup> )	切深 /mm	切削速度 / (mm·min <sup>-1</sup> )	每齿进给量 / (mm·z <sup>-1</sup> )	刀片磨损形式
WSRN-4032R (3刃)	RNGN1204000 T01020WG-300 KER	1800	280	2	226	0.038	产生热量大,将轴抱住
WSRP-4032R (3刃)	RPGN1204000, WG-300 KER	1000	400	2	125	0.1	稍好,但刀片仍有崩齿
KIP125 RP43570 (3刃)	RPGN120400E KY2100	3000	1100	2.5	299	0.122	刀片有崩齿
		3600	1100	2.5	299	0.1	稍好,但刀片仍有崩齿
		3800	900	2.5	379	0.0789	效果好

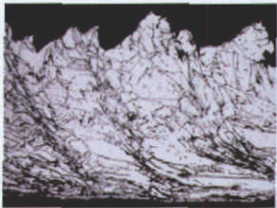


(a) 线速度为 400m/min 以上的单元切屑

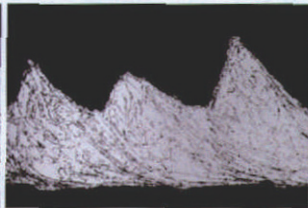


(b) 线速度为 700m/min 以上的单元切屑

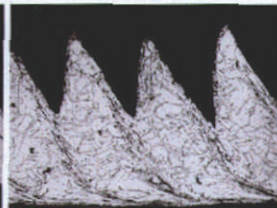
陶瓷刀具高速切削时的切屑



(a) 切削速度 100m/min



(b) 切削速度 125m/min



(c) 切削速度 200m/min

切削速度提高切屑变形明显

工件材料的弹性变形也将由于变形速度逐渐跟不上切削速度而减少,后刀面的摩擦也因此减少,从而对降低切削力和切削热产生有利影响。高速切削时切削热来不及传递到工件及刀具上,大部分热量由切屑带走。因此工件和刀具都不热,而切屑由于高温氧化作用,不但是成单元切屑,而且特别酥。线速度 400m/min 时,切屑变成了单元切屑,而到了 700m/min 以上,切屑就变成了单元碎屑。

### 加工高温合金的方法选择

加工方法的选择对切削高温合

金有很大影响,选择不当会产生加工硬化,通常,推荐使用顺铣方式。

我们在加工收扩喷嘴零件(铸造高温合金)时,就有这样的问题:加工梁两侧的凸耳,由于装夹和干涉的原因,只能一侧用顺铣,一侧用逆铣。顺铣一侧表面质量好,而且省刀。在逆铣一侧时,表面易产生硬化,屑易夹在容屑槽内参加切削,使表面质量差又费刀。此例也说明了加工高温合金最好选用顺铣。

现在的数控机床和加工中心都采用顺铣方式。用这种方式加工镍基高温合金,对减少加工硬化的发生非常有利。

镍基高温合金的铣削加工,会产生大量的切削热,所以高温合金的铣削尤其是高速铣削要避免大的接触长度。传统的铣削方法是采用大的切削宽度,小的切深,啮合量很大,刀具旋转一圈,接触长度是刀具周长的 44% 左右,不利于散热,

而镍基高温合金材料切削本身切削热就很大,尤其是在高速下切削热高。高速切削方法采用小的径向切削深度,使啮合量变小,与传统切削同样的切屑体积,啮合量仅为刀具周长的 20%,从而降低切削热产生,有利于镍基高温合金的铣削降低切削热。高速切削方法采用小的径向切削深度,使啮合量变小,与传统切削同样的切屑体积,啮合量仅为刀具周长的 20%,从而降低切削热产生,有利于镍基高温合金的铣削降低切削热。

### 结论

(1) 采用耐磨性好的和定位精度高的刀具是保证高温合金零件高精度的必要条件。

(2)  $\text{Si}_3\text{N}_4$  赛阿龙陶瓷刀具适合镍基高温合金切削,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。

(3) 加工含高钴的镍基高温合金,陶瓷刀具远远比硬质合金刀具匹配性好,且经济高效。

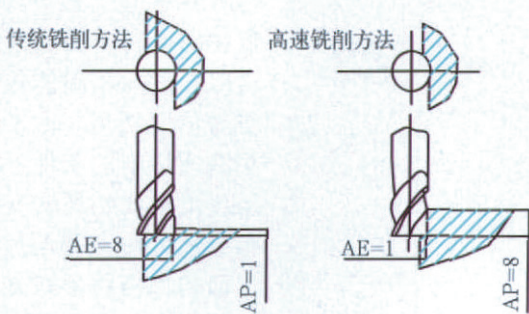
(4) 采用新型的五刃铣刀加工高温合金效率可提高。

(5) 为了获得满意的加工效果,切削参数的合理选择十分重要,注意切入和切出也能提高刀具寿命。加工编程时对走刀路线的优化(转角处走圆角)对于改善刀具磨损状况提高刀具寿命作用很大。

(6) 高温合金采用陶瓷刀具进行高速铣削时,线速度 400m/min 以上时,改变了高温合金的带状切屑,切屑形态为单元切屑,而到了 700m/min 时切屑形态变成了为酥脆的单元碎屑。

(7) 加工高温合金,采用合理的切削方法,能减少加工硬化,降低切削热,提高刀具寿命。

(责编 侧卫)



传统和高速铣削方法的比较