

用于加工 Inconel718 的切削刀具发展现状

李刘合^{1,2}, 杨海健¹, 陈五一¹, 朱剑豪²

¹ 北京航空航天大学; ² 香港城市大学

摘要: 镍基高温合金 Inconel718 具有熔点高、热传导率低、加工硬化现象严重的特点,被认为是最难加工金属材料之一。近年来,随着航空航天、能源动力技术的飞速发展,Inconel718 高温合金的应用越来越多,其高速、高效切削的加工需求也日益扩张,其切削工艺的制定、尤其是切削刀具的选择越来越重要。本文综述了常用于加工 Inconel718 的刀具(高速钢、硬质合金、陶瓷、立方氮化硼)及其涂层刀具的加工性能,分析了不同涂层对于刀具寿命和工件表面质量的影响,对硬质合金刀具和陶瓷刀具作了详尽的对比分析。最后,对高速钢、陶瓷、硬质合金和立方氮化硼刀具切削 Inconel718 的应用情况进行了总结,给出了 Inconel718 高温合金切削加工刀具选择的有益参考。

关键词: Inconel718; 高速钢; 硬质合金; 陶瓷; 涂层

中图分类号: TG506.1

文献标志码: A

Review on Inconel718 Cutting Tools

Li Liuhe, Yang Haijian, Chen Wuyi, Paul. K. Chu

Abstract: Supper alloy Inconel718 is one of the hardest machining materials because of its high melting point, low thermal conductivity and work-hardening at high temperatures. Rapid development in the aeronautic, astronautic and energy industry has raised the requirements for machining especially used in cutting. It has thus become more important to select the suitable cutting tools in machining applications. In this paper, several tools for cutting nickel-based alloys are introduced and they include high-speed steel, carbide, ceramics, and boron nitride. We focus our attention on carbide and ceramics, the effects of different coatings on the tool life and surface quality. In addition, common applications of high speed steels, ceramics, carbide and boron nitride tools are summarized. Useful references are provided with respect to cutting tools made of Inconel718.

Key words: Inconel718; high speed steel; carbide; ceramic; coating

1 引言

Inconel718 合金(相当于国产牌号 GH4169)是美国国际镍公司于上世纪五十年代末最先研制成功的镍铬沉淀硬化高温合金。合金中镍含量为 50% - 55%,其余元素有 Cr、Nb、Mo 等。该合金在高温环境中具有屈服强度高、塑性好的特点,同时还具有良好的成型性能、较高的耐腐蚀性能、高温抗氧化性能以及耐辐射性能。与一般用面心立方 Ni₃(Al, Ti) () 进行沉淀强化的高温合金不同,Inconel718 的沉淀相和基体之间共格畸变较大,致使该合金在高温环境中依然具有很高的热强性、良好的抗氧化性和焊接性能,广泛应用于制造航空发动机涡轮盘、压气机盘、轴和承力环等受力转动件^[1-4]。

镍基合金在高温下仍具有较高强度,容易加工硬化,使其切削加工十分困难,是最难加工的材料之一。若将 45 # 钢的可切削性设为 100%,则 Inconel718 的相对可切削性仅为 6% - 20%(见图 1)。

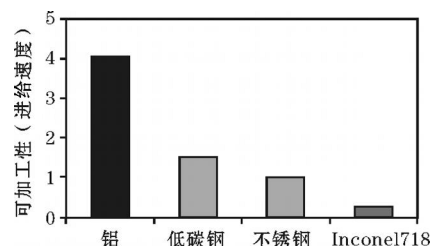


图 1 几种金属的加工性能对比^[5]

Inconel718 的难加工性包括两个方面:一是加工件的表面质量难以保证,需要多次切削才能达到使用要求;二是刀具的磨损极其严重,刀具使用寿命短。而刀具的磨损及使用寿命又会影响到工件的表面质量,因此,在 Inconel718 的切削加工过程中,研究不同工艺下刀具的摩擦磨损机理、刀具材料及其切削参数的匹配显得尤为重要。

镍基高温合金影响刀具磨损和使用寿命的因素很多,最主要的有以下几点:

(1) 切削力。Inconel718 合金含有许多高熔点金属元素,构成组织结构致密的奥氏体固溶体,合金的塑性好,原子结构十分稳定,需要很大能量才能使原子脱离平衡位置,因此变形阻力大,其切削力是普通钢材的 3 - 5 倍^[5]。通常加工中刀具与工件的摩擦

热能减小低熔点金属(如铜和铝)所需切削力,但切削温度即使达到 760 以上也不足以熔融镍基合金等高温合金,需要更大的切削力^[6]。

(2)加工硬化。切削一般金属时,加工硬化会因温度升高引起的软化现象被削弱。但 Inconel718 的软化温度高,软化速度慢,在刀具热硬性允许的切削温度范围内,其变形硬化程度远大于软化程度。此外,在较高的切削温度下,合金中的强化相常从固溶体中分解出来,呈极细弥散相均匀分布,导致材料表面强度和硬度进一步提高。切削加工后,合金的硬化程度可达 200% - 500%^[7]。

(3)金属亲和力。Inconel718 对多种金属表现出高亲和力,尤其是硬质合金刀具加工 Inconel718 时,刀具、切屑与工件之间易粘附,扩散磨损严重。若刀具表面粘附镍基合金,拔刀时刀具前刀面易剥落,严重时甚至产生缺口^[8]。

(4)热导率。Inconel718 的强度高,刀具、切屑和工件之间摩擦严重,产生大量切削热。镍基合金的低热导率导致切削热从切削区间向外传递速度慢,大部分的切削热集中在切削区,使切削区平均温度很高,可达 1200^[9,10]。高温一方面会加剧刀具的扩散磨损和氧化磨损;另一方面,当切削深度较大时,温度梯度产生的内应力会导致工件切口变形,卡住刀具^[11]。

(5)切屑形状。在 Inconel718 的加工过程中,随着切削速度的提高,剪切变形区越来越窄,形成集中的剪切滑移,切屑类型会由连续带状切屑转化成单元体相互分离的节状切屑。高速切削时,这种切屑形状的周期性变化会造成切削力的高频变化。切削力的不稳定最终会影响到工件的表面质量和刀具寿命^[2]。

基于以上原因,镍基高温合金被世界各国公认为是最难进行切削加工的材料之一,而随着能源动力、航空航天的发展,镍基高温合金的高速切削加工又日益重要,因此很多发达国家都开展针对镍基高温合金的快速切削研究^[12-15]。尤其是随着新型刀具的出现,采用新型刀具对 Inconel718 合金以及其它镍基高温合金的切削加工研究报道不断。近些年多种新型刀具被采用和研究,如复合涂层和纳米涂层的硬质合金刀具^[16-19]、晶须增韧陶瓷刀具^[20-24]以及立方氮化硼刀具^[25-27]等,种类繁多。然而,由于切削参数不同,面对如此之多的报道,会让镍基合金切削加工使用单位无所适从,因此,有必要对镍基合金的切削加工进行研究,尤其是对镍基合金切削

加工中所用刀具效果的研究进行总结和对比分析,为加工镍基合金选择刀具提供参考。本文对涂层改性刀具在内的硬质合金刀具、陶瓷刀具等 Inconel718 镍基合金常用切削刀具的切削加工适用性进行了介绍,并对比研究了同种材质不同类别刀具以及不同材质刀具对镍基合金的切削性能。通过不同刀具切削研究试验结果的对比分析,得出不同刀具的适用条件,以期在不同的切削环境中 Inconel718 切削刀具的选择提供依据。

2 加工 Inconel718 的常用切削刀具

切削镍基合金的刀具需满足四个基本条件:高耐磨性、较高的高温硬度和韧性、良好的抗热震性、足够的化学稳定性^[8]。常用的 Inconel718 切削刀具下面几种。

2.1 高速钢刀具

高速钢是早期用于加工镍基合金的刀具材料,由于加工效率低和高温硬度差($H_v < 1000$),逐渐被硬质合金等刀具材料所取代。但在一些成形刀具以及工艺系统刚性差的条件下,采用高速钢刀具材料加工高温合金仍是很好的选择。此外,高速钢刀具材料有较高的强度和韧性,且刃口可以更锋利,产生的切削热更低,加工硬化现象较轻,这使高速钢有能力对部分种类镍基合金进行加工。目前,用于加工镍基合金的高速钢刀具材料主要有含钴高速钢和粉末冶金高速钢两种^[29]。

含钴高速钢即在高速钢中添加钴,它有三个作用:一是适量的钴能促进高速钢奥氏体中碳化物的溶解,提高高速钢的热稳定性和二次硬度;同时钴还可促进高速钢回火时从马氏体中析出钨或钼的碳化物,增加弥散硬化效果,提高高速钢的回火硬度,增加高速钢的耐磨性。二是在高速钢中增加钴量能改善其导热性,特别是高温时更为明显,在相同条件下,刀刃温度可减小 30 - 75,这对于减轻镍基合金切削过程中的加工硬化是非常有利的。三是高速钢中加入钴后,可降低刀具与工件间的摩擦系数,改善其加工性。M42 (W2Mo9Cr4VCo8) 是镍基合金切削和制造精密成型刀具中应用最多的高速钢,可用于多种镍基合金的磨削、铣削和切削。同时,M42 也是拉削 Inconel718 涡轮盘的主要刀具材料^[28]。

粉末冶金高速钢是用细小而均匀的高速钢结晶粉末在高温高压(1100, 100MPa)下直接压制而成^[29]。这种工艺完全避免了碳化物的偏析,在相同硬度条件下强度比熔炼钢提高 20% - 80%,硬度随

着密度加大而提高,组织均匀,高温硬度比熔炼钢高0.5 - 1.0HRC。其中加入适当的碳化物(如TiC、TiCN、NaC等)增加了耐磨性、耐热性,为加工Inconel718在内的镍基高温合金创造了条件。车削铸造高温合金K214时,国产粉末高速钢GF3比W18Cr4V刀具耐用度提高7倍,车削Inconel718时提高2倍^[28]。

近些年还研制出了TiN、ZnN、CrN、AlTiN和TiCN等PVD涂层高速钢,广泛用于麻花钻、立铣刀、丝锥等刀具。涂层的使用明显提高了这些刀具在高温条件下的使用寿命^[30,31],但对高速钢车刀使用寿命的提高并不显著^[32]。

2.2 硬质合金刀具

硬质合金刀具目前占世界范围内刀具总费用的30%左右,金属切除量约占70%。作为常用的金属切削刀具材料,高速钢的常温硬度为63 - 70HRC(83 - 83.6HRA),而硬质合金的硬度可达89 - 94HRA;高速钢的耐热温度为500 - 650,而硬质合金的耐热温度为800 - 1000^[28]。从这些数据来看,硬质合金比高速钢更适宜对镍基合金的切削加工。然而,硬质合金刀具切削Inconel718的一般速度为20 - 30m/min,当刀具以50 - 200m/min高速切削时,工件缺口处温度的急剧升高会导致刀具边缘的过早变形或破碎^[32-36]。目前有两个途径可以解决这个问题:刀具材料改性和刀具涂层。

2.2.1 刀具材料改性

硬质合金刀具是以高硬度难熔金属的碳化物(WC、TiC)微米级粉末为硬质相,以钴(Co)或镍(Ni)、钼(Mo)为粘结相,在真空炉或氢气还原炉中烧结而成的粉末冶金制品。硬质相与粘结相的比例以及硬质相颗粒的大小对合金的性能有重大影响。随着硬质相(主要是WC)晶粒尺寸的减小,刀具的硬度、弯曲强度以及抗磨损性有显著提高^[37]。根据Hall - petch关系,硬质合金中WC的晶粒尺寸越小,粘结相Co的平均自由程越短,则合金的硬度和强度越高。而当WC的晶粒尺寸降低到100nm左右时,其硬度和强度都有很大提高^[38]。研究人员采用高能球磨方法将WC - Co粉碎细化复合,得到平均10nm的WC晶粒,WC颗粒被Co分离和覆盖^[39],如此得到的硬质合金刀具的高温硬度和强度显著提高,切削镍基合金中的刀具寿命也得到相应延长。此外,也有人通过对硬质合金粉末进行梯度烧结的方法,使刀具表面形成缺立方相碳化物和碳氮化物的韧性区域,在不降低刀具硬度的情况下,提高刀具

的韧性和塑性,从而延长刀具寿命^[40]。这种方法有效地解决了镍基合金高速切削过程中硬质合金刀具韧性与硬度之间的矛盾。

2.2.2 硬质合金刀具的涂层改性

仅依靠刀具材料的更新提升刀具性能并不能满足生产需要,大量研究人员尝试通过涂层改性改善刀具性能。这种方法在控制成本的前提下,对镍基合金切削刀具的性能改善更为显著。一般来说,切削镍基合金的刀具涂层需要有很强的抗氧化性、抗粘结性和耐磨性;同时,涂层的摩擦系数较低,能最大限度降低高速切削镍基合金时的切削力及切削温度,延长刀具寿命。

TiC涂层、TiN涂层和Al₂O₃涂层是镍基高温合金切削领域研究最多、使用最早的三种涂层,后来又出现兼有TiC和TiN性质的TiCN涂层以及TiAlN涂层等。TiC涂层的硬度高、耐磨性好,适用于加工镍基合金时会产生剧烈磨损的刀具;TiN涂层与合金的亲合力小、润湿性好、抗氧化性强,适用于容易发生粘结磨损的刀具;Al₂O₃涂层在高温下具有良好的热稳定性,适用于高速切削时产生大量切削热的刀具^[41]。TiCN涂层同时具有TiN结合力好和TiC耐磨性好的优点,硬度比TiN高,且摩擦因数小,可以减小镍基合金切削过程中刀具的粘着磨损。此外,通过连续改变C、N的成分控制TiCN性质,形成不同成分的多层结构,可以降低涂层的内应力,提高韧性,增加涂层厚度,阻止裂纹的扩展,减少崩刃^[42]。TiAlN涂层与基体的结合力比TiN涂层大,耐热性能优越,开始氧化的温度高,所以特别适合于镍基合金等难加工材料的高速加工。切削镍基合金的刀具涂层种类多样,化学成分复杂,仅从涂层的结构构成大致可分为PVD单涂层、PVD复合涂层、PVD纳米涂层和CVD涂层。

(1) PVD单涂层(PVD-Monolayer)

早期应用于镍基合金切削刀具的涂层多为PVD(Physical Vapor Deposition)单涂层。Jindal^[43]等研究了利用PVD法在WC(6%Co)刀具上沉积TiN、TiCN和TiAlN三种单涂层对刀具切削Inconel718过程的影响。实验在切削速度分别为46m/min和76m/min、进给速度和切削深度分别为0.15mm/rev和1.5mm的条件下对刀具的磨损形式和寿命进行了研究。两种速度下,刀具的磨损形式主要是月牙洼磨损和刀尖磨损;三种刀具中,TiAlN刀具的这两种磨损最小(见图2)。TiN涂层刀具的寿命最短,TiAlN涂层刀具的寿命最长(17min)。

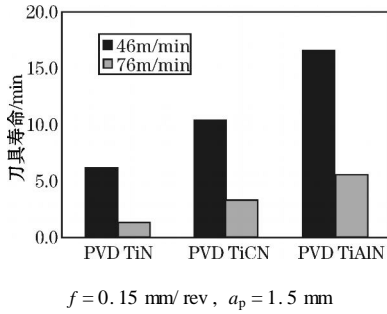


图2 TiN, TiCN和 TiAlN三种涂层刀具的寿命^[43]

实验排除了涂层对刀具横向断裂强度的影响(见表1)。可见,三种刀具使用寿命的不同完全是由涂层本身的耐磨性以及基底性能的改变造成的。

表1 涂层与未涂层刀具的横向断裂强度^[43]

材料	TRS(MPa)
无涂层 WC - 6%钴	3523 ±200
PVD TiN 涂层	3475 ±248
PVD TiCN 涂层	3330 ±200
PVD TiAlN 涂层	3379 ±276

TiAlN 涂层刀具使用寿命最长的原因主要有以下三个方面:

切削温度高于 750 时, TiAlN 涂层的硬度高于 TiN 和 TiCN 涂层,从而拥有更好的耐磨性能;

高速切削过程中, TiAlN 涂层在刀具最外层形成了 Al₂O₃ 保护层,并在保护层与基底之间有一个铝、氧和氮元素构成的中间过渡层,提高了其抗氧化性和化学稳定性;

三种涂层中, TiAlN 的热导率最低。因此,高速切削过程中所产生的热量大多数都被切屑带走,降低了刀尖的温度,从而减少了对刀具的月牙磨损。

此外, Prengel^[45]发现,在金属粒子高度离化的 PVD 过程中, TiAlN 的结构更加致密,膜基结合力更高,刀具的改性效果更好。Settinen^[46]发现,在 K20 硬质合金刀具施加 TiAlN 涂层,再利用磁控溅射法附加 MoS₂ 涂层,形成复合涂层,能够进一步提升刀具的使用寿命和镍基合金加工件的表面质量。

(2) PVD 复合涂层(PVD-Multilayer)

在厚度相当的前提下,复合涂层比单层涂层的改性效果更为显著。例如, TiC 有很高的硬度并且在硬质合金刀具上有很强的粘着力; Ti(N,C) 在硬质合金上的粘着力相对 TiC 要小,将 Ti(N,C) 涂层附着在 TiC 涂层上,由于 N 具有化学惰性, Ti(N,C) 可以提高刀具的耐氧化和扩散磨损的能力。两种涂层

的性能互补,从而使以 TiC 为中间层的复合涂层改性效果优于单层 TiC 或 Ti(N,C)。

Prengel^[47]对 Jindal 所涉及的涂层作了进一步研究。实验测试了硬质合金刀具(6% Co)上沉积 TiAlN-PVD 复合涂层后切削 Inconel718 的性能。结果表明, TiAlN 复合涂层的效果比 TiAlN 单层涂层的效果要好,尤其是以 76 m/min 的速度切削时有明显的差异(见图3)。然而, TiN/TiCN/TiAlN 复合涂层的效果却并不如期望的那样具有更为优良的性能,其原因可能是由于工艺的不成熟,使得涂层之间留有残余应力,导致复合涂层整体性能的下降。

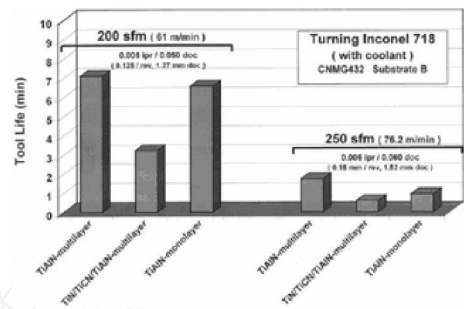
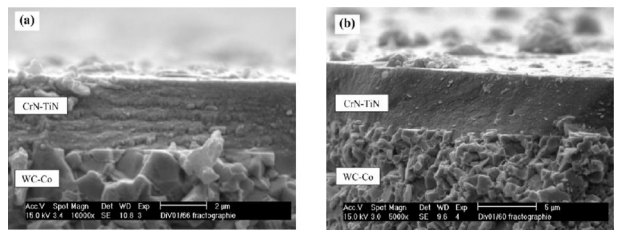


图3 复合 TiAlN 涂层与单层 TiAlN 涂层切削 Inconel718 的性能^[47]

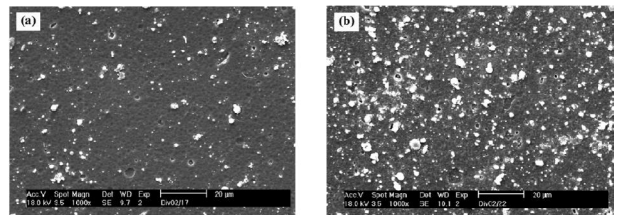
(3) PVD 纳米涂层(PVD-Nanolayer)

Ducros^[48]等在 K20 硬质合金刀具上分别沉积 CrN/TiN 和 TiN/AlTiN 纳米涂层,就其切削性能与复合涂层和单层涂层进行了对比。



(a) 26层复合涂层 (b) 纳米涂层

图4 CrN/TiN 涂层刀具断裂截面的 SEM 照片^[48]



(a) CrN/TiN 涂层 (b) TiN/AlTiN 涂层

图5 刀具涂层表面形貌的 SEM 照片^[48]

通过图4和图5两组 SEM 照片可以发现,纳米

涂层的柱状晶结构相对 26 层复合涂层要少,且涂层与基体的亲和性更好;TiN/AlTiN 的粗糙度比 CrN/TiN 涂层高,是由于在阴极电弧沉积过程中 Ti 大颗粒在基体上的累积造成的,Gr 的引入有利于消除大颗粒。在切削速度为 40m/min、切削深度为 1.5mm、进给速度为 0.2mm/rev 时,TiN/AlTiN 纳米涂层能够减弱 Inconel718 的加工硬化程度。Ducros^[48]认为其原因是 TiN/AlTiN 纳米涂层附着在刀具表面后,切屑更容易从切削区域滑移出去,带走大量切削热,最终减弱了切削区域的加工硬化现象。由 Ducros 的实验可以推断,TiN/AlTiN 纳米涂层拥有比单层、复合涂层更好的耐磨性、高温稳定性以及更长的刀具寿命(见表 2)。

表 2 不同涂层刀具的寿命及磨损形式^[48]

刀具类型	刀具寿命 (min)	刀具缺口 (4 分钟后)	后刀面磨损 (μm)	加工 4 分钟后积屑瘤
无涂层	4	非常严重	500	非常严重
26 层 TiN/AlTiN 薄膜	6	开始出现	300	开始出现
CrN/TiN 多层膜	5	严重	400	严重
CrN/TiN 纳米涂层	6.5	严重	250	开始出现
TiN/AlTiN 多层膜	6	开始出现	300	开始出现
TiN/AlTiN 纳米涂层	7.5	无缺口	100	无缺口

注:表中的刀具寿命指的是平均刀面磨损量达到 0.5mm、切削缺口宽度达到 1mm 或者刀尖磨损量达到 0.8mm 时的切削时间。

在 Inconel718 合金的切削加工领域,对 PVD 涂层的研究主要集中在提高涂层在刀具上的粘附力和涂层的耐磨性这两个方面。高温合金切削过程中产生大量的切削热,氧化和扩散现象经常发生,因此刀面和刀尖磨损成为了制约刀具寿命的两大因素。

切削刀具用的硬质合金主要包括 P、M、K 三大类。P 类合金主要用于加工长切屑的黑色金属;M 类合金为通用型,适于加工长切屑或短切屑的黑色金属及有色金属;K 类合金主要用于加工短切屑的黑色金属、有色金属及非金属材料。在镍基高温合金的切削领域,K 和 P 系列是研究应用最多的两类刀具^[12,33,36,44,46,48-55]。相对于 P 系列硬质合金刀具,K 系列除 WC 以外所含的碳化物很少(甚至没有),因而拥有更高的韧性,切削边缘破碎的可能性更小,一般被认为更适宜加工 Inconel718^[48]。有研究人员在对比研究 K20 和 P20 刀具切削 Inconel718 的磨损机制时发现,K20 比 P20 刀具的磨损形式更为规则,刀具侧面磨损量更小,沟槽更浅^[54]。常用

加工镍基高温合金的几种刀具涂层中,(Al,Ti)N 涂层在切削过程中表现出的抗氧化性、化学稳定性、硬度和热导率等综合性能最佳。因此,(Al,Ti)N 涂层 K20 刀具应该是最适合高速切削 Inconel718 的硬质合金刀具。

(4) 硬质合金刀具的 CVD 涂层

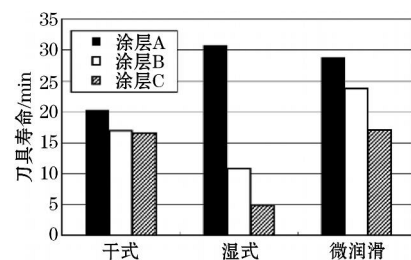
尽管 PVD 涂层有诸多优点,如工艺温度低,不会降低硬质合金刀具自身的强度,刀刃可磨得十分锋利,可降低机床的功率消耗等,但 CVD (Chemical Vapor Deposition) 涂层依然有其可取之处。CVD 涂层膜基结合力高,涂层的临界载荷大,生产成本低廉^[56]等,都是 CVD 工艺应用广泛的原因。

但对于高温镍基合金切削刀具涂层的研究,多数人倾向于 PVD 涂层性能优于 CVD 涂层。Kamata^[57]等研究了以 CVD 和 PVD 法在硬质合金刀具上沉积涂层对切削 Inconel718 的影响(见表 3)。

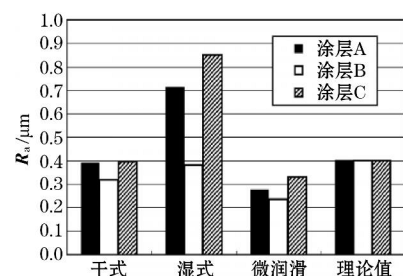
表 3 切削 Inconel718 的不同刀具涂层^[57]

名称	涂层方式	涂层材料与层数
涂层 A	CVD	TiC/Al ₂ O ₃ /TiN
涂层 B	PVD	TiN/AlN 超晶格(点阵)
涂层 C	PVD	TiAlN

该实验同时测试了三种条件(湿式、干式、微润滑)下不同涂层刀具切削 Inconel718 的性能。实验发现在切削速度为 1m/s 时,涂层 A (TiCN/Al₂O₃/TiN) 刀具使用寿命最长,并且有较好的表面质量(见图 6)。



(a) 刀具寿命



(b) 表面质量

图 6 切削速度 1m/s 时,三种涂层刀具性能对比^[57]

当切削速度提升到 1.5m/s 后,涂层 A 的性能明显下降,刀具寿命急剧缩短。虽然刀具使用寿命的缩短可以通过在湿式加工中加大润滑剂的用量予以缓解,然而其表面质量依然急剧下降。相反的,速度的提升对 B 涂层(TiN/AlN)刀具的寿命影响则没有 A 涂层刀具那么明显,润滑剂的加入可以使加工产品的表面质量大幅度提高(见图 7)。

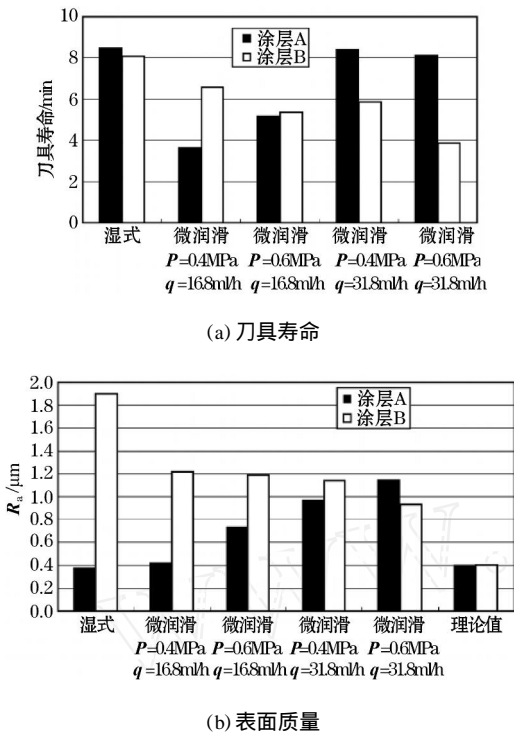


图 7 切削速度 1.5m/s 时,AB 两种涂层刀具对比^[57]

总体上看,PVD 涂层比 CVD 涂层更适宜对 Inconel718 等镍基合金高速切削,尤其是在不限制使用润滑剂的情况下,无论是从刀具寿命还是从工件的表面质量上来看,PVD 涂层硬质合金刀具的性能均优于 CVD 涂层刀具。当然,还应该充分注意到,无论 PVD 涂层或者 CVD 涂层,涂层本身质量及涂层与基体的结合力都与涂层制备工艺、设备、前处理等息息相关,尤其是 PVD 涂层,对前处理工艺非常敏感,因此,在选择镍基合金加工刀具的时候,还需要对这方面因素进行考虑。

2.3 陶瓷刀具

陶瓷刀具在高温环境中拥有比硬质合金刀具更高的硬度和耐蚀性能,且价格相对氮化硼类刀具更为低廉,因此越来越受到人们的欢迎^[4]。陶瓷刀具具有优良的高温硬度,然而切削 Inconel718 过程中,由于合金加工硬化现象严重,刀具磨损依然存在。韧性差和热导率低制约了陶瓷刀具的应用,其中断裂

韧性差是影响陶瓷刀具寿命的最主要因素^[34,44,58]。

切削镍基合金的陶瓷刀具多为复合相陶瓷,它是以一定的组分设计为基础,采用各种精选高纯超细的氧化物、氮化物、碳化物或硼化物等为初始原料,并依据不同的增韧补强机理进行微观结构设计,从而获得各种具有良好综合性能的陶瓷刀具材料^[59]。用于切削镍基合金的陶瓷刀具主要有三种:氧化铝基陶瓷刀具、塞隆和晶须增韧陶瓷刀具。

(1) 氧化铝基陶瓷刀具 (Aluminium oxide ceramic)

在高温环境中,与镍和铁相比,Al₂O₃ 陶瓷的化学性质非常稳定,这使它能够作为高温切削的刀具而被使用。Al₂O₃ 陶瓷的断裂韧性和抗热震性很低,刀具在 Inconel718 的加工过程中容易出现破损等情况,缩短了刀具寿命。在 Al₂O₃ 陶瓷中加入 ZrO₂ 可以大幅度提高它的断裂韧性;加入 TiN(或 TiC) 能够提高其抗热震性能,并且可以使其在高温环境中依然维持高硬度。早在上个世纪七十年代,就出现了用这种提高了断裂韧性和抗热震性的陶瓷刀具用于高速切削镍基合金的先例,其速度相当于当时用硬质合金刀具加工速度的 10 倍。

(2) 塞隆 (Sialon)

塞隆 (Sialon) 是英国 LucasAymon 公司研制成功的一种陶瓷刀具。它以 Si₃N₄ 为主要组分,添加少量的 Al₂O₃ 作为耐磨相,以获得更高的热硬性和韧性;硅铝陶瓷被认为是世上最坚硬的陶瓷之一,该刀具在上世纪八、九十年代开始被大量用于镍基合金的切削。

在高速切削 Inconel718 时,塞隆拥有比 Al₂O₃ 陶瓷更为优越的性能^[60]:

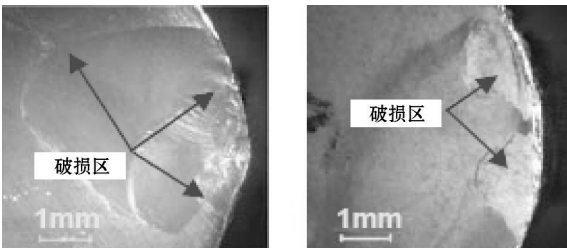
塞隆陶瓷比 Al₂O₃ 陶瓷有更好的热性能和韧性。

塞隆陶瓷拥有更低的热膨胀系数(为硬质合金的 1/2,Al₂O₃ 的 1/3)和更高的韧性,这使塞隆陶瓷的抗热震性更强。

Al₂O₃ 陶瓷刀具在高温(1170 以上)下的 ZrO₂ 增韧效果会显著减小,所以 Al₂O₃ 陶瓷刀具不适合温度较高的高速或超高速切削;而塞隆在高速切削 Inconel718 时也能有较高的韧性^[61]。

(3) 碳化硅晶须增韧陶瓷 (Whisker-reinforced alumina ceramics (Al₂O₃ - SiCw))

碳化硅晶须增韧陶瓷是近些年陶瓷刀具的研究热点,它通过在 Al₂O₃ 陶瓷中增加碳化硅晶须以提高热导率,同时获得比塞隆陶瓷更高的拉伸强度和断裂韧性(见图 8、表 4)。



(a) 硅铝陶瓷 (b) 碳化硅晶须增韧陶瓷

$v = 175 - 250\text{m/min}$, $a_p = 1 - 2\text{mm}$, $f = 15 - 25\text{mm/rev}$

图8 切削镍基合金时两种陶瓷刀具的破损情况^[62]

Narutaki^[64]等通过对 SiC 晶须增韧陶瓷、塞隆陶瓷和 $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{TiC}$ 陶瓷刀具切削 Inconel718 的性能对比发现,切削速度为 $100 - 300\text{m/min}$ 、进给速度为 0.19mm/rev 、切削深度为 0.5mm 时, SiC 晶须增韧陶瓷的缺口磨损量最小; 以更高的切削和进给速度切削时, SiC 晶须增韧陶瓷和 Si_3N_4 陶瓷的缺口磨损量和刀面磨损量 (VB) 急剧升高。 $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{TiC}$ 陶瓷表现出了最小的刀面磨损量, 但以 100m/min 的速度切削时, 其缺口磨损量最大。速度在 500m/min 时, $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{TiC}$ 陶瓷的刀面磨损和缺口磨损量均非常小。综合 Narutaki 的实验结果分析可得, $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{TiC}$ 是最适宜对 Inconel718 进行高速切削 (尤其是切削速度 $> 500\text{m/min}$) 的陶瓷刀具。 Kitagawa^[49] 也认为, $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{TiC}$ 陶瓷刀具相对于其他陶瓷刀具在加工 Inconel718 时的切削性能最佳。

2.4 立方氮化硼刀具

立方氮化硼 (CBN) 刀具可以分为两种: 一种是高 CBN 含量刀具 (CBNH), 另外一种是低 CBN 含量刀具 (CBNL)。 CBN 刀具的性能并不仅仅由 CBN 含量决定, 同时受粘结相的微观结构、制造工艺等因素影响。 CBNL 是在刀具中加入 TiN 或 TiC 等粘结相以减小切削过程中所产生的内应力, 并降低切削温度, 提升刀具的切削性能。 但是, 在 CBN 刀具切削 Inconel718 过程中, 工件的加工硬化现象严重, 需要很大的切削力, 刀具伴随产生严重的缺口磨损, 这是制约刀具寿命的主要因素, 而 CBNH 的耐缺口磨损性能高于 CBNL, 因而更适合对 Inconel718 进行切削^[53]。

对于 CBN 加工过程中的磨损形式, 存在多种理论, 一般认为其磨损形式是一种混合形式, 包括: 磨蚀磨损、粘着磨损、扩散磨损和化学侵蚀等。 Coelho^[27] 等对 CBN 刀具与陶瓷刀具加工 Inconel718TM 的切削效果进行过对比, 发现 CBN 刀具的综合性能并不如陶瓷刀具。 在镍基合金的加工领域, 氮化硼类

刀具并没有得到人们的广泛认可, 其原因主要源于: (1) 切削深度较大时, 刀具容易发生破碎、崩刃; (2) 刀具成本高: 其成本是硬质合金刀具的 $10 - 20$ 倍。 因此, 很多生产厂家和研究机构都把氮化硼类刀具作为镍基合金的精加工刀具。

3 几种刀具性能及适用范围的对比

Inconel718 等镍基合金的难加工性决定了对切削刀具性能的依赖, 要实现高效快速切削, 对刀具的要求更为苛刻。 加工 Inconel718 的刀具种类很多, 且性能有所差异 (如表 4 所示), 但目前硬质合金刀具依然是切削 Inconel718 的主流刀具。 多种改性手段被用于提升其性能, 其中对刀具表面进行涂层改性的研究最多。 CVD 涂层成本相对较低, 但在镍基合金加工领域, 人们更关注的是切削刀具的寿命、切削速度以及加工件的表面质量, 在这些方面 PVD 涂层具有明显优势。 尤其是通过对 K20 刀具进行 (Al, Ti)N - PVD 复合以及纳米涂层改性后, 改性效果极为明显^[43 - 48]。

陶瓷刀具有着出色的高温硬度和耐蚀性能, 与硬质合金刀具相比, 其切削速度有了很大的提高。 普通的氧化铝陶瓷不能满足切削 Inconel718 的需要, $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{TiC}$ 陶瓷能够实现。 硅铝陶瓷和晶须增韧陶瓷也可用于 Inconel718 的切削, 然而, 当切削速度较高时, 陶瓷刀具加工的镍基合金工件的表面质量相对硬质合金涂层刀具要差^[64], 因此用陶瓷刀具对镍基合金进行粗加工是一个很好的选择。

表4 不同刀具材料的性能^[63]

材料性能	刀具材料					
	碳化钨 (K10)	氧化铝	混合氧化铝	晶须增韧氧化铝	塞隆	CBN
晶粒度 / μm	1 - 2	1 - 2	1 - 2	-	1	1 - 3
密度 / g cm^{-3}	14.8	3.9 - 4.0	4.2 - 4.3	3.7	3.2	3.1
硬度 (20 °)	1700	1700	1900	2000	1600	3000 - 4500
硬度 (1000 °)	400	650	800	-	900	1800
断裂韧性 / $\text{MN m}^{-3/2}$	10	1.9	2	8	6	10
弹性模数 / kN mm^{-2}	630	380	420	390	300	680
导热系数 / W m^{-1}	100	8 - 10	12 - 18	32	23	100
热膨胀系数 ($\times 10^{-6}$)	5 - 6	8.5	8	-	3.2	5

在切削 Inconel718 的实验研究以及工业领域,普通高速钢刀具已逐渐被硬质合金以及陶瓷刀具取代,仅在镍基合金拉削方面应用较多;立方氮化硼类刀具本身的成本较高,刀具寿命短,加工成本高昂,其切削效果又不足以补偿成本,故这类刀具一般仅用于精加工环节。

4 结语

综合现有文献和研究得到以下结论:高速钢多用于镍基合金攻丝或拉削等低速加工,车削加工较少;高速切削 Inconel718 时,PVD 涂层的硬质合金刀具具有良好的切削性能,复合涂层和纳米涂层能显著提高刀具的使用寿命和工件的表面质量;陶瓷刀具由于刀具寿命短以及高速车削时工件表面质量差的原因多用于 Inconel718 的粗加工;氮化硼类刀具由于成本的限制仅用于 Inconel718 的精加工。

随着镍基高温合金 Inconel718 在航空发动机零部件加工制造等领域的应用日益增多,着眼于对刀具性能提升及加工工艺改进的研究越来越多。如何在达到工件表面质量要求的前提下实现高效快速切削,并延长刀具寿命,仍将是高速切削 Inconel718 等镍基合金领域的研究热点。

参考文献

- [1]蔡学章. 镍合金在航空上的应用与发展[J]. 稀有金属快报,2002(8):10-11.
- [2]刘海滨. 镍基高温合金高速车削研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2007.
- [3]韩雅芳,陈亚莉,张国庆. 镍钴高温合金在航空发动机上的应用[A]. 中国国际镍钴工业年会会议论文集,2003:79-89.
- [4]E O Ezugwu, J Boney, Y Yamane. An overview of the machinability of aeroengine alloys [J]. Journal of Materials Processing Technology,134(2003):233-253.
- [5]E O Ezugwu. Key improvements in the machining of difficult-to-cut aerospace superalloys [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 45 (2005):1353-1367.
- [6]L N López de lacalle J PêÁrez, J I Llorente, et al. Advanced cutting conditions for the milling of aeronautical alloys[J]. Journal of Materials Processing Technology,100(2000):1-11.
- [7]韩荣第,金远强. 航空用特殊材料加工技术[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2007.
- [8]E O Ezugwu, Z M Wang, A R Machado. The machinability of nickel-based alloys: a review[J]. Journal of Materials Processing Technology, 86(1999):1-16.
- [9]T Kitagawa, A Kubo, K Maekawa. Temperature and wear of cutting tools in high speed machining of Inconel718 and Ti-6Al-6V-2Sn[J]. Wear, 202(1997):142-148.
- [10]郭晓东,李军利,邹斌,等. 剪切温度对车削加工 GH4169 镍基高温合金的影响[J]. 上海交通大学学报,2009,43:79-85.
- [11]D B Lewis, S R Bradbury, M Sarwar. Analysis of the wear and failure mechanisms that develop in high speed steel circular saw blades when machining nickel-based alloys[J]. Wear, 197(1996):74-81.
- [12]G Byrne, D Dornfeld, B Denkena. Advancing cutting technology[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 52(2003):483-507.
- [13]Y Kamata, T Obikawa. High speed MQL finish turning of Inconel 718 with different coated tools[J]. Journal of Materials Processing Technology, 192-193(2007):281-286.
- [14]R S Pawade, Harshad A Sonawane, Suhas S Joshi. An analytical modeling to predict specific shear energy in high-speed turning of inconel 718 [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 24(2009).
- [15]N Fang, Q Wu. A comparative study of the cutting forces in high speed machining of Ti-6Al-4V and Inconel 718 with a round cutting edge tool [J]. Journal of Materials Processing Technology,209(2009):4385-4389.
- [16]F Klocke, K Gerschwiler, R Fritsch. PVD-coated tools and native ester-an advanced system for environmentally friendly machining[J]. Surface & Coatings Technology, 201(2006):4389-4394.
- [17]K D Bouzakis, S Gerardis, G Katirtzoglou. Increasing tool life by adjusting the milling cutting conditions according to PVD films' properties[J]. CIRP Annals-manufacturing Technology, 57(2008):105-108.
- [18]R M Arunachalam, M A Mannan, A C Spowage. Surface integrity when machining age hardened Inconel 718 with coated carbide cutting tools[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture,44(2004):1481-1491.
- [19]S H Yao, W H Kao, YL Su, et al. On the tribology and micro-drilling performance of TiN/AlN nanolayer coatings [J]. Materials Science and Engineering, A 386(2004):149-155.
- [20]黄传真,李久立. 新型 Al₂O₃ 基陶瓷刀具材料颗粒弥散增韧与晶须增韧的协同作用[J]. 山东工业大学学报,1998,28:112-116.
- [21]刘炳强. 原位生长晶须增韧氧化铝陶瓷刀具及切削性能研究[D]. 山东:山东大学,2007.
- [22]Deng Jianxin, Liu Lili, Liu Jianhua. Failure mechanisms of TiB₂ particle and SiC whisker reinforced Al₂O₃ ceramic cutting tools when machining nickel-based alloys [J]. International

- Journal of Machine Tools and Manufacture, 45(2005):1393 - 1401.
- [23] M A El-Bestawi, T I El-Wardany. Performance of whisker-reinforced ceramic tools in milling nickel-based superalloy [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 42(1993):99 - 102.
- [24] Zhao Jun, Deng Jianxin, Zhang Jianhua. Failure mechanisms of a whisker-reinforced ceramic tool when machining nickel-based alloys[J]. Wear, 208(1997):220 - 225.
- [25] R S Pawade, Suhas S Joshi, P K Brahmanekar. An investigation of cutting forces and surface damage in high-speed turning of Inconel 718[J]. Journal of Materials Processing Technology, 192 - 19(2007):139 - 146.
- [26] Sunarto, Yoshio Ichida. Creep feed profile grinding of Ni-based superalloys with ultrafine-polycrystalline cBN abrasive grits[J]. Precision Engineering, 25(2001):274 - 283.
- [27] R T Coelho, L R Silva, A Braghini, et al. Some effects of cutting edge preparation and geometric modifications when turning INCONEL 718TM at high cutting speeds [J]. Journal of Materials Processing Technology, 148(2004):147 - 153.
- [28] 郭建亭. 高温合金材料学(中册)[M]. 北京:科学出版社, 2008.
- [29] 于启勋. 粉末冶金高速钢[J]. 机械工程师, 2001(2):66 - 67.
- [30] A E Ozgur, B Yalcin, M Koru. Investigation of the wear performance and thermal diffusivity properties of M41 tools steel coated with various film coatings[J]. Materials and Design, 30(2009):414 - 417.
- [31] 白力静, 蒋百灵. CrAlN 镀层对 M2 基高速钢切削性能的影响[J]. 材料研报, 2006, 20:54 - 57.
- [32] 中国金属加工网. 涂层高速钢刀具的应用. <http://www.mw35.com/article/apply/13374-2.html>. 2007.
- [33] D G Thakur, B Ramamoorthy, L Vijayaraghavan. Study on the machinability characteristics of superalloy Inconel 718 during high speed turning [J]. Materials and Design, 2008:1 - 8.
- [34] J L Li, N He, M Wang. High speed cutting of Inconel718 with coated carbide and ceramic inserts [J]. Journal of Materials Processing Technology, 129(2002):127 - 130.
- [35] H H Habeeb, K A Abou-El-Hossein, B Mohammad. Effect of tool holder geometry and cutting condition when milling nickel-based alloy 242[J]. Journal of Materials Processing Technology, 201(2008):483 - 485.
- [36] A Devillez, F Schneider, S Dominiak, et al. Cutting forces and wear in dry machining of Inconel 718 with coated carbide tools [J]. Wear, 262(2007):931 - 942.
- [37] P Gustafson, S Norgren, A Grearson, et al. The smaller they come, the harder they get [J]. Metal Powder Report, 60(2005):22 - 27.
- [38] 张凤林, 朱敏, 王成勇. 纳米硬质合金进展[J]. 稀有金属, 2002, 26:54 - 57.
- [39] 毛昌辉. 高能机械研磨纳米结构 WC - Co 复合粉末的研究[J]. 稀有金属, 1999, 23(3):185.
- [40] 张武装, 刘咏, 贺跃辉. 梯度结构硬质合金涂层刀片切削性能研究[J]. 稀有金属与硬质合金, 2006(3):12 - 17.
- [41] 刘战强, 艾兴. 高速切削刀具磨损寿命的研究[J]. 工具技术, 2001, 35(3):3 - 5.
- [42] 魏莎莎, 钟启茂. TiAlN 涂层与 TiCN 涂层硬质合金刀具性能对比[J]. 机械制造, 2008, 44:48 - 49.
- [43] P C Jindal, A T Santhanam, U Schleinkofer, et al. Performance of PVD TiN, TiCN, and TiAlN coated cemented carbide tools in turning [J]. International Journal of Refractory Metals & Hard Materials, 17(1999):163 - 170.
- [44] D Dudzinski, A Devillez, A Moutki, et al. A review of developments towards dry and high speed machining of Inconel718 alloy[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 44(2004):439 - 456.
- [45] H G Prengel, A T Santhanamb, R M Penich, et al. Advanced PVD - TiAlN coatings on carbide and cermet cutting tools [J]. Surface and Coatings Technology, 91 - 95(1997):597 - 602.
- [46] L Settineri, R Levi. Surface properties and performance of multilayer coated tools in turning Inconel [N]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 54(2005):515 - 518.
- [47] H G Prengel, P C Jindal, K H Wendt, et al. A new class of high performance PVD coatings for carbide cutting tools [J]. Surface and Coatings Technology, 139(2001):25 - 34.
- [48] C Ducros, V Benevent, F Sanchette. Deposition, characterization and machining performance of multilayer PVD coatings on cemented carbide cutting tools[J]. Surface and Coatings Technology, 163 - 164(2003):681 - 688.
- [49] T Kitagawa, A Kubo, K Maekawa. Temperature and wear of cutting tools in highspeed machining of Inconel718 and Ti - 6Al - 2Sn[J]. Wear, 202(1997):142 - 148.
- [50] D A Axinte, L De Chiffre. Effectiveness and resolution of tests for evaluating the performance of cutting fluids in machining aerospace alloys[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 57(2008):129 - 132.
- [51] E O Ezugwu, I R Pashby. High speed milling of nickel-based superalloys[J]. Journal of Materials Processing Technology, 33(1992):429 - 437.
- [52] E O Ezugwu, C I Oke, A R Machado. High speed threading of inclusion-modified steels with coated carbide tools[J]. Journal of Materials Processing Technology, 86(1999):216 - 225.
- [53] Kono Y, Hara A, Yazu S, et al. Cutting performance of sintered CBN tools[A]. Proceeding of International Conference on Cutting Tool Materials[C]. Ft. Mitchell, 1981:281 - 295.