



切削加工

让难削材料变得易切削

航空发动机高温高压部分的零件必须采用各种超耐热合金作为原材料，如：Inconel 718、Hastelloy、Waspalloy 及 Rene 41 等。其中镍基的 Inconel 718 用得最多，这些材料含有多种合金元素，所占比例很高。如 Inconel 718 中 Ni 占 50% ~ 55%、Cr 占 17% ~ 20%、Mo 占 2.8% ~ 3.3%、Nb+Ta 占 4.75% ~ 5.5%，其他含有的合金元素还有 Co、Ti、Al 及 Cu 等，各种合金元素总量要占到 80% 以上，余下的占比量才是 Fe 和 C 等。

文 | 尚亚（上海）国际贸易有限公司顾问 章宗城

大量的合金元素极大地提高了材料整体的热强度和热稳定性，虽然它们的含碳量不多，但它能和合金元素形成多种稳定高硬度的合金碳化物，它们以极微细的弥散状态分布于晶界处，强化了晶界，有力地阻碍了在外力作用下晶面和晶界的滑移和变形。Inconel 718 作为锻件使用时通常要进行固溶强化处理，这种处理使合金元素在一定温度下固溶于基体金属中，由于合金元素含量高，溶质超过了固溶体溶剂的溶解度而使晶粒畸变，同时还形成结构复杂硬度高、熔点高且弥

散分布多种的化合物，使得整个合金组织致密，再加上上述合金碳化物形成的晶界强化，极大地增强了位错运动阻力，而显示出其强度、硬度和热稳定性异常的高。它的抗氧化温度可达 900℃ ~ 1100℃，硬度达到 HRC37-47，可在高温氧化气氛或燃气条件下工作。对它的加工方法目前多为先固溶热处理后再进行切削加工，这样可以减少加工后零件的变形。因此切削是在固溶处理后更硬、更强且更耐高温的状态下进行，再加上它极易加工硬化，所以它是特别难以加工的材料。

图 1 先进陶瓷立铣刀的底刃和加工情况



切削的难易程度若以含硫易削钢易削指数为 100 计，奥氏体不锈钢为 45，钛合金中的 Ti-6Al-4V 为 26，Inconel718 为 12，Rene 41 则在 5 以下，可知难削性依次以大于 2 倍的比例增加。因此为了实现高效加工就必须采用特别抗高温、硬度强度均高、抗粘结性能好且摩擦系数小的优异材料和具备先进合理几何形状的刀具才能胜任。一般材料的刀具会被很快磨损，无法保证其被持续使用，在车、铣、钻等不同的切削方式条件下，人们曾尝试使用各种材料的刀具包括对 CBN 进行了试验开发，也设计了多种结构形状来寻找能高效加工 Inconel 718 不同切削方式相应材料和形状的刀具。本文介绍的是一个成功开发专用于 Inconel 718 平面、槽和型面加工的立铣刀。

新型陶瓷材料在圆弧头立铣刀中的应用

三菱公司最近开发了用新型陶瓷（CERAMIC）材料制成具有 4 刃的 CE4SRB 型和具有 6 刃的 CE6SRB 型的圆弧头立铣刀，它们的直径分别为 6、8、10 及 12 四种。采用陶瓷的原因是 Inconel 718 强度硬度高，热稳定性好，在 800℃ 左右仍可保持这种高性能，一般的硬质合金在此温度条件下，硬度强度下降许多，不能胜任高效切削，而这种陶瓷刀具在 1000℃ 甚至 1400℃ 仍能保持很高的抗氧化能力和高硬度（HRA61.5-64.5）。能以高出硬质合金 2 ~ 5 倍的高速、较大的切削深度进行高速高效切削。他们除了在选用新型陶瓷材料方面外，在立铣刀的结构形状与几何角度设计等方面，也作了细致的考虑和改进。立铣刀采用圆弧头型，即其头部的转角呈圆弧形，这样就比球头立铣刀头部刚性大，可承受较严酷的切削条

件且加工效率高。

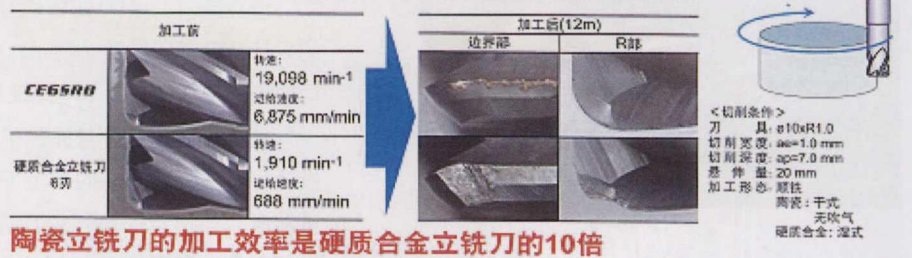
一般在对高硬度材料、高速大进给加工，深难加工时，直角头立铣刀易产生缺损，圆弧头抗缺损性能可大为提高。通过测定圆弧中心，它可与球头立铣刀一样，利用 CAD/CAM 方法进行高效精加工。其中的 4 刃立铣刀容屑槽较宽大适加工型槽，6 刃的容屑槽较小较浅，但芯部较粗壮，刚性高，刃齿数 z 增多了 2 齿，可实现在同样每齿进给量 f_z 的条件下，进给加快、效率提高。因为每分进给量 $F=n \times f_z \times z$ (n = 立铣刀每分钟转速)。在一定的每分钟进给量条件下，刃齿数增多，加工表面光洁度可提高。这种新开发的立铣刀刃齿呈螺旋状，螺旋刃齿的特点是同时参与切削刃刀的长度较长，抗振性好，易排屑。刃齿的螺旋角大小设计也作出了细致考虑，螺旋角是刃齿与立铣刀轴心线间的夹角，螺旋角大易排屑振动减小，但轴向的分力增大，在高速大进给高效加工 Inconel 718 时，切削力非常大有可能使刀具拔出脱落，三菱公司优化了设计，使之既能保证高速高效加工，抗振排屑，又可防止立铣刀的脱出。此外在立铣刀各部为提高自身的耐破损性能，设计时应尽量增强各部刚性，消除薄弱结构。在底刃处由于切削负荷大、温度高且切削条件特别差，为避免刃齿损伤也特别注意了提高其刚性(图 1)。

图 2 所示为新陶瓷立铣刀与硬质合金立铣刀加工 Inconel 718 零件外圆柱面的比较，这两种刀具的尺寸，悬伸长度，切削宽度 ae (侧吃刀量) 切削深度 ap (背吃刀量) 相同，但一个是环保节能的干式切削，而另一个必须是加冷却润滑液的湿式切削。尽管在这两种不同的冷却润滑条件下，陶瓷立铣刀反而可以十倍于硬质合金立铣刀的切削速度和进给速度高效完成加工，效率惊人且环保的功能突出。新开发的此型立铣刀若与以往一般陶瓷立铣刀相比由于材料改进在同样的切削条件下，寿命可提高 2 倍。

这里可以提出另外两个实例作为参考。第一个是用 CE6SRBD1000R100 即直

切削性能

因科镍合金®718(HRC45)加工 与硬质合金立铣刀的比较



陶瓷立铣刀的加工效率是硬质合金立铣刀的10倍

图 2 新陶瓷立铣刀与硬质合金立铣刀加工比较

径为 $\phi 10$ ，6 齿，圆弧转角半径 R 为 1mm 的陶瓷圆弧头立铣刀，在复合加工中心上粗加工 Inconel 718 制涡轮机叶片翼面，可以切削速度 $V=628\text{m/min}$ ， $f_z=0.03$ ， $ap=0.7$ ， $ae=1.2$ ，不加任何切削液不吹风，效率是硬质合金刀具的 3 倍。第二个是用 CE6SRBD1200R150 即直径 $\phi 12$ ，6 齿，圆弧头转角半径 R 为 1.5mm 的陶瓷圆弧头立铣刀在立式加工中心上，粗加工 Inconel 718 制 $100 \times 100 \times 10$ 的方形型腔，切削速度达 $V=700\text{m/min}$ ， $f_z=0.06$ ， $ap=1.5$ ， $ae=5.0$ ，仅用 2 分 40 秒即完成了加工。

实际也有不少公司采用陶瓷作为刀具材料用于加工 Inconel 718，如采用碳化硅陶瓷，复合氧化铝陶瓷等。三菱公司做了实验，这次新开发的铣削用陶瓷比原有一般的陶瓷能以更高的速度进给加工寿命更长。

使用陶瓷刀具时的注意事项

陶瓷刀具特长是能在高温下，高速、大进给地进行高效加工。应积极研发推广应用，但这加工中也有些必须注意的事项：第一，不能用它加工钛合金，钛合金虽也为耐热合金，广泛用于航空工业，它适应的温度和加工条件远比 Inconel 718 为低，因此若以这种陶瓷立铣刀切削条件加工钛合金，有可能引发火灾，带来危险；第二，陶瓷刀具加工必须使用高速条件 $V_c=350\text{--}1000\text{m/min}$ ，不采用这样的高速 Inconel 718 反难切削，不以高速条件，刀具还会产生异常磨损，

甚至发生折断；第三，冷却方式推荐采用吹冷风或完全干式，不要使用冷却液，因为这样反会产生热龟裂，吹风的方式也并非为了冷却，而是为了吹除切屑；第四，推荐用于连续切削，不要用于断续切削，以免造成刀具折断或寿命降低；第五，连续切削时，切削宽度可以逐渐增加，一开始就选最大厚度易造成刀具折断或缺损；第六，为使切削稳定宜采取顺铣方式，这不仅可以提高寿命，而且可改善防止切屑粘刀；第七，立铣刀的夹持刀柄推荐使用吸振抗振性能良好的液压刀柄，其次是滚柱锁紧式铣刀刀柄，一般弹簧夹头切削很不稳定，不宜采用；第八，刀刃刀尖上加工中黏上粘结物时，不要强行去除，这样易损伤刀具，可允许带着粘结物继续加工，由于切削温度高，粘结物会脱落；第九，用陶瓷立铣刀加工因切削温度非常高，因此被加工零件的表面可能形成变质层，这可成为刀具异常损伤的原因，为避开变质层，应确保精加工的余量大于 0.3，而粗加工时，为避开加工硬化层切削深度可选得较大；第十，因为加工时产生高热切削，必须采用有全护罩的机床，加工前对机床内部进行仔细清扫，确保无残留可燃物质残留后，再开始加工。

虽然 Inconel 718 很难加工，是塑性难切削材料中最难加工的几种材料之一，但只要充分认识其性能和切削特点，合理选择先进的刀具和相应的切削条件以及遵守必须的注意事项，完全可以高速高效安全顺利地完成任务。[MM]