

复合材料和钛合金的切削加工

Cutting Process of Composite Material and Ti Alloy

哈尔滨理工大学 王树鹏 刘献礼 胡景姝 贾冬开 严复钢



王树鹏

哈尔滨理工大学机械制造及其自动化专业的工学硕士,从事DEFPDM有限元仿真研究工作。

近年来,航空、航天、汽车、船舶、能源等行业发展迅猛,对结构材料性能的要求不断提高,同时航空领域对材料加工的要求也越来越高,尤其航空材料中一些加工难度较大的材料,因此,增进对刀具材料与被加工材料各项性能和特性的了解有助于正确选择刀具材料,并通过对难加工材料的加工归纳出航空材料加工中选用刀具材料的一般方法是非常必要的。

航空材料分为金属材料、非金属材料 and 复合材料三大类。金属材料包括结构钢、不锈钢、变形高温合金、

铸造高温合金、铝合金、镁合金、钛合金、铜合金、粉末冶金材料、精密合金与功能材料等。非金属材料包括胶粘剂、塑料、透明材料、绝缘材料、橡胶、密封剂、涂料、镀覆层、防锈材料、燃料、润滑材料与纺织材料等。复合材料是指由有机高分子、无机非金属或金属等几类不同材料通过复合工艺组合而成的新型材料,它既能保留原有组分材料的主要特色,又通过材料设计使各组分的性能互相补充并彼此关联与协同,从而获得原组分材料无法比拟的优越性能,与一般材料的简单混合有本质的区别。由于航空领域钛合金和复合材料应用较多,故以下将着重对这2种材料进行介绍。

刀具材料的分类及其性能

切削常用的刀具材料主要有超硬刀具、硬质合金、高速钢、陶瓷等。由于在加工钛合金和复合材料时,超硬刀具和硬质合金刀具具有一定加工优势,本文将着重介绍超硬刀具和硬

质合金刀具。

1 超硬刀具

常用的超硬刀具具有天然金刚石刀具、聚晶金刚石刀具、聚晶立方氮化硼刀具等。

(1) 天然金刚石刀具。天然金刚石刀具是目前超精密切削加工领域中常用的刀具,其刃口极其锋利,在显微镜下观察,刃口平直,无崩口,加工工件表面粗糙度值极低,常用于铜、铝及其合金材料的精加工。

(2) 聚晶金刚石刀具。常用于切削有色金属及其合金材料。实践表明,在切削有色金属时,刀具的寿命是硬质合金刀具的几十至几百倍。经现场使用表明,车削电机整流子时,一次刃磨寿命可达一万只。刀具在加工铝硅合金时,比硬质合金刀具寿命至少大两个数量级。

(3) 立方氮化硼刀具。立方氮化硼刀具能胜任切削淬硬钢(HRC60)、模具钢、冷硬铸铁的粗加工和半精加工,同时还能高速切削HRC35以上的钴基和镍基高温合

热缩刀具预调仪



专为热缩刀具设计！将热缩技术和刀具测量技术完美结合，即使在极苛刻的环境下，也能快速的装载刀具，并达到您理想的公差范围！

核心优势：

- 高频热感应技术
- 独有的核心冷却技术
- 全面的刀具测量与管理功能
- 操作简便、安全、高效

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

金、热喷涂材料、硬质合金及其他难加工材料。被加工材料的硬度越高越能体现出刀具的优越性，是实现以车、铣代磨削的最佳刀具之一。

由上述介绍可知，一般超硬刀具材料具有很高的硬度、很高的弹性模量、很好的导热性、较小的密度、很小的热膨胀和较低的断裂韧性。而在化学性质方面CBN的热稳性好，对铁族元素呈惰性，在酸中不受浸蚀，金刚石在常温下化学性质稳定，在酸、碱中均不受浸蚀。

2 硬质合金刀具

硬质合金是高硬度、难熔的金属化合物粉末（WC、TiC等），用钴或镍等金属做黏结剂压坯、烧结而成的粉末冶金制品。它的耐热性好，能耐高达800℃~1000℃的切削温度。同时由于硬质合金刀具的硬度高、锋利性好、耐磨损、比高速钢刀具耐用，其形状保持性更是高速钢无法比拟的，另外，硬质合金刀具使用寿命长、加工质量好、精度高。

复合材料和钛合金的切削

1 切削复合材料

复合材料是由2种或2种以上性质不同的材料、用人工方法制成的多相固体材料，它可以充分发挥单一组成材料的优点，克服其弱点。例如树脂基、碳纤维、玻璃纤维加强的复合材料（即玻璃钢）等，具有很高的强度、韧性和耐磨性，这是单一组成材料所不能达到的。先进复合材料具有轻质、高强度、高模量、抗疲劳、耐腐蚀、可设计、成型工艺性好和成本低等特点，是理想的航空结构材料，在航空领域得到了广泛应用，已成为新一代飞机机体的主体结构材料。由于复合材料的广泛应用，因此相应的对加工复合材料的刀具也提出了新的要求，国内外学者也进行了许多这方面的研究。

(1) 不同刀具材料切削复合材料时的磨损。

根据国外资料所述，刀具材料的硬度与刀具的磨损率之间不完全是线性关系，一般分为2种情况：一种是当刀具基体材料的硬度大于增强体材料时，如PCD、CBN刀具，刀具的磨损率与硬度成线性关系，随着刀具基体材料的硬度升高，其磨损率下降；另一种当刀具基体材料的硬度低于增强体材料时，刀具的磨损与其硬度没有呈现单调的趋势。

为了比较刀具材料对刀具磨损的影响，分别采用PCD和YG6两种切削方式进行刀具磨损试验。2种刀具材料切削18%的SiCp/Al复合材料。PCD和YG6两种刀具在相同条件下PCD刀具的磨损值都约为YG6刀具磨损值的1/10，这是因为PCD刀具的硬度、耐磨性远高于YG6硬质合金刀具。

碳纤维复合材料因其优良的性能在航天领域获得广

泛的应用,其构件质量轻、比刚度高,但成型后的构件精度往往达不到要求。由于碳纤维复合材料属难加工材料,其加工过程中易产生分层、撕

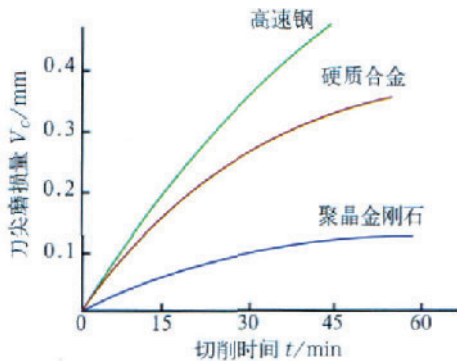


图1 刀具切削时间与刀尖磨损量之间的关系

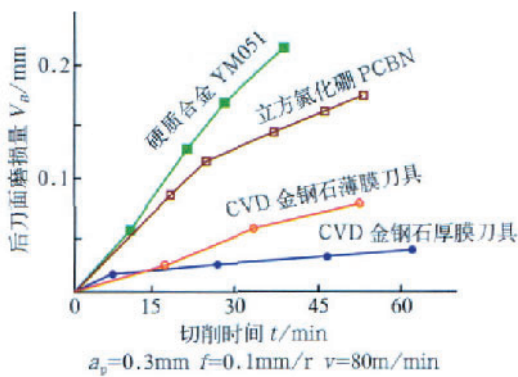


图2 刀具切削时间与后刀面磨损量之间的关系

裂、毛刺、拉丝、崩块等缺陷,尺寸控制比较困难,加工时刀具温度很高,极易产生发热堵塞,从而导致碳纤维复合材料基体表面产生碳化现象,影响表面质量。因此要解决碳纤维复合材料的切削加工问题,首先应解决刀具材料问题。

一些学者通过对高速钢、硬质合金和聚晶金刚石刀具进行切削碳纤维复合材料的试验,得到了切削时间与刀尖磨损量之间的关系曲线,见图1。刀具的磨损主要是在刀尖处先形成一个亮点,然后主切削刃和副切削刃相继磨损,当主切削刃形成一个反转的渐开线圆弧时,表明刀具已严重磨损,不能再使用。

在碳纤维复合材料加工领域,高速钢材料由于近年来晶粒细化,可增加刀具强度和耐磨性,仍可继续

使用;硬质合金刀具由于晶粒超细化,结合界面增大,出现了整体硬质合金刀具群,改善了刀具的刚度和刀具寿命,因而获得广泛应用。聚晶金刚石刀具的出现,使碳纤维复合材料表面加工质量大幅度提高。可以预料,聚晶金刚石刀具将作为首选刀具而在碳纤维复合材料加工中占有更大比重。

用 CVD 金刚石厚膜与薄膜刀具、立方氮化硼 PCBN 刀具和 K 类硬质合金 YM051 刀具车削一种酚醛树脂基玻璃纤维增强的复合材料(GFRP,玻璃钢),图2所示为刀具切削时间与后刀面磨损量的关系。

(2) 不同刀具材料切削复合材料时的表面切削质量。

用整体高速钢立铣刀和:3种超硬材料刀具立方氮化硼 CBN、金刚石刀具 PCD 和镀层金刚砂切削高硅氧玻璃纤维复合材料进行了切削对比试验。高硅氧玻璃纤维属于特种玻璃纤维,它的耐高温性能非常好,

可在 900℃下长期使用,短时间可耐 1200℃的高温,是一种优良的耐烧蚀材料和隔热材料,已在国防、宇航、黑色及有色金属熔体净化过滤方面获得应用,是高科技纤维之一。高硅氧玻璃纤维复合材料的切削加工完全不同于金属材料的切削加工,它的热导性比金属材料小得多,切削加工时的散热条件极差,切削时产生的大量热不易被切屑带走,大部分聚集在刀具的刀尖、刀刃附近,使刀具急剧磨损,影响表面的切削质量。对比结果如图表1所示。

采用整体高速钢立铣刀切削,表

面的质量明显要比超硬材料刀具的差,这主要由于高速钢铣刀硬度低、耐磨性差、进给速度低、加工效率不高、加工表面不理想。由于高硅氧玻璃纤维复合材料的导热性能差,组织不均匀,为切割其中层压的玻璃纤维状织物,一般应采用刃口较锋利的刀具,所以另外3种超硬刀具的切削表面质量较好,因此超硬刀具材料更适合于高硅氧玻璃纤维材料的切削。超硬刀具主要是指立方氮化硼刀具和人造金刚石刀具,立方氮化硼刀具在切削玻璃纤维表面时,切削质量要比采用 PCD 刀具和镀层金刚砂刀具理想得多,而镀层金刚砂刀具的切削效果又比 PCD 刀具好。

2 切削钛合金

在数目庞大的航空零部件中,发动机、起落架机构、机身机翼和液压供油系统的零部件颇具特色。其中航空发动机作为飞行器的动力核心,其零件的主要材料是钛合金和高温合金,一般来讲,航空发动机的冷端部分为钛合金零件,而热端部分主要为高温合金零件。钛合金具有重量轻、强度高、耐高温等优良特性,多用于航空航天以及人工关节等方面,但由于其加工难度大、切削效率低、刀具寿命短而影响了它的应用。

钛合金物理化学机械性能的相互影响使它成为一种难切削加工材料。钛合金的切削加工困难性主要表现在:

(1) 切屑的变形系数小:由于钛合金塑性小,切削时切屑的变形系数小。钛合金切屑的变形系数约为1(切削层长度/切屑长度),而普通碳钢切屑的变形系数约为3。

(2) 切削温度高:由于钛合金的导热系数很小(仅为铁的1/5、铝

表1 不同超硬刀具材料切削高硅氧化玻璃的表面质量对比表

材料	整体高速钢	CBN	PCD	镀层金刚砂
表面均方根偏差 $Sq/\mu\text{m}$	25.34	6.422	14.522	11.384

的1/14),且切屑与前刀面的接触长度极短,切削时产生的切削热不易传出,集中在切削区和切削刃附近的较小范围内,切削温度很高,造成工件的烧灼,致使刀具材料软化加快刀具的磨损,这是钛合金加工的一个显著特点。

(3) 弹性恢复大: 钛合金弹性模量为 107.8GPa, 约为钢的 1/2, 在切削力作用下, 会产生大的切削变形以及大的弹性恢复。

(4) 冷硬、粘结、扩散等现象严重。

(5) 切屑形态: 钛合金的切屑呈典型的锯齿剪切状。原因是钛的化学活性大, 在高温下易与大气中的氧、氮、氢等发生强烈化学反应, 生成 TiO_2 、 TiN 、 TiH 等硬脆层。在切削刃口区域, 切屑层金属由于承受很高的压应力和高温作用会发生塑性变形; 而在距切削刃口一段距离的前刀面上某一位置, 当达到临界载荷时, 刀具与切削层金属之间就会处于非平衡状态, 从而发生突变性的局部剪切并进而产生锯齿状切屑。

(6) 刀具的磨损特性: 切削钛合金时, 由于切削热量多、切削温度高且集中于切削刃附近, 所以月牙洼会很快发展为切削刃的破损; 切削合金钢时, 随着切削速度的提高在距离切削刃处一定位置会产生月牙洼磨损。产生这种磨损的原因在于高温下硬质合金刀具中的 W、C 较容易扩散。刀具的磨损磨损形态如图 3 所示。

因此我们在钛合金加工时应注意以下问题:

(1) 加工钛合金时, 不宜使用含

有钛元素的刀片。因为它会与钛合金发生亲和作用, 粘掉刀尖。应尽可能使用 YG 类硬质合金刀具, 因为钨钴类硬质合金与钛合金化学亲和力小、导热性好、强度也较高。

(2) 由于钛合金回弹量大, 后刀面与加工表面接触面积大。为减少后刀面与加工表面间的摩擦, 需加大后角。从刀具耐用度来看, 后角小于或大于 15° , 都会降低车刀的耐用度。此外, 后角为 15° 的车刀刀刃比较锋利, 并可降低切削温度。因此, 大多数切削钛合金的车刀采用 15° 后角。由于钛合金在切削过程中, 会与空气中的氧、氢、氮等形成硬脆化合物, 加速刀具磨损, 因此钛合金切削应采用较小的前角; 另外, 钛合金的塑性低, 切屑与前刀面的接触面积小, 为了降低切削温度也应选用较小的前角。实践表明, 在保证工件加工质量的前提下为达到刀具的使用寿命, 采用硬质合金刀具车削钛合金时, 刀具的前角通常取 5° 左右。

(3) 切削速度宜低, 以免切削温度过高。高的切削速度使切削刀具剧烈地磨损, 并且使钛合金具有从周围大气中吸收氧和氢的能力, 产生所谓“组织的 α 化”, 并使加工表面强化; 进给量应适中, 过大易烧刀, 过小则因刀刃在加工硬化层中切削而磨损过快; 切削深度可较大, 使刀尖在硬化层以下切削, 有利于提高刀具耐用度。通常在选用切削速度和进给量时, 以保持切削温度在 800°C 左右为宜, 即当进给量 $f=111 \sim 135\text{mm/r}$, 取切削速度 $v=40 \sim 60\text{m/min}$ 。

(4) 加工时须加冷却液充分冷却。

(5) 切削钛合金时吃刀抗力较大, 故工艺系统需保证有足够的刚度。由于钛合金易变形, 所以切削夹紧力不能大, 特别是在某些精加工工序时, 必要时可使用一定的辅助支承。

(6) 由于钛合金导热系数低、塑性低、加工硬化倾向高等特性, 故在加工中切削力大、切削温度高, 导致刀具易磨损, 寿命减低, 所以要选用硬性好、耐磨性高的刀具材料。切削加工钛合金常用的刀具材料如下: 硬质合金, 高速钢刀具, 超硬刀具等。

许多学者已经开始了使用金刚

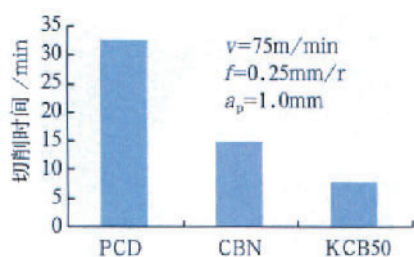


图 4 3 种刀具材料切削寿命对比

石和立方氮化硼刀具高速切削钛合金的研究。在国外聚晶金刚石刀具已经被用来高速加工钛合金, 当切削速度 $180 \sim 220\text{m/min}$ 时, 进给速度 0.05m/min , 切削深度 0.5mm 时, 切削效果较好。国外学者将 PCD 刀具、CBN 刀具和 KCB50 刀具进行了钛合金的干切削试验。图 4 分别为 3 种刀具材料切削寿命对比。

结束语

随着科技的高速发展, 材料的不断更新, 我们需要对新型航空材料的切削机理、刀具磨损状况进行进一步的研究, 也需要对切削过程不断进行优化与预测。同时超硬刀具和硬质合金刀具的发展也使其在航空零件的加工领域中占有很大优势, 他们必将为制造业的发展起到积极的推动作用。 (责编 微凉)



图 3 刀具磨损形态对比