

改善难加工材料可加工性 方法的研究进展*

State-of-the-Art Methods for Improving the Machinability of Difficult-to-Machine Materials

哈尔滨理工大学高效切削与刀具国家工程实验室 翟元盛 胡静姝 李玉甫



翟元盛

工学博士,硕士生导师,现任哈尔滨理工大学机械动力工程学院副教授。主要研究方向为高效切削机理及加工过程控制,主持1项国家自然科学基金项目,参与1项国家自然科学基金青年项目,发表文章10余篇。

随着航空航天业和核能工业的发展,难加工材料如钛合金、高温合金等被越来越广泛地应用^[1]。因为高温合金具有较高的高温强度,抗氧

本文叙述了航空航天难加工材料钛合金和高温合金加工方法;并从优选刀具材料、选择合适的刀具几何参数、采用优化的加工工艺参数、选择合适的铣削加工方式和针对难加工典型零件设计新型刀具5方面讨论了提高难加工材料切削效率的方法。

化、抗热腐蚀、抗疲劳和断裂韧性等综合性能良好,且能够在600℃以上长时间保持良好性能,所以该类材料被广泛应用于航空航天、舰船及化工等行业。高温合金的切削加工性差主要表现在:(1)高温强度高,切削力大;(2)热导率低,加工过程中切削温度高达1000℃;(3)刀具磨损严重,在高温高压下,造成刀具的粘结磨损和扩散磨损。

钛合金比强度高、耐腐蚀和耐高温等良好性能使其成为飞机发动机零部件的材料。钛合金也是一种难加工材料,其切削温度较高、加工变形系数小使得刀具易产生磨损。因

此,加工钛合金的切削速度一般在40m/min以下,这影响着切削钛合金的加工效率。

材料可加工性的分析方法

国内外学者对材料可加工性评价和分析方法有6种。

(1)单一指标评定方法:根据刀具寿命或刀具寿命下所能达到的切削速度、切削力或切削温度、切削加工后工件的表面质量、切屑控制或断屑的难易程度等单一指标来评价材料的可加工性。

(2)相对加工性方法:以正火状态下的中碳钢45钢为基准来评价其

* 黑龙江教育厅科学技术研究项目“核电材料高效插铣力学建模及有限元分析”(12511090)资助。

他材料的可加工性。

(3) 模糊综合评判方法: 利用材料性能参数如硬度、抗拉强度、延伸率及导热率等作为影响材料可加工性的主要性能指标, 根据其可对加工性的影响, 然后用模糊综合评判方法对材料的可加工性进行综合评价^[2]。

(4) 利用切削加工过程的材料及工艺参数(工件材料的物理机械性能指标、刀具材料及刀具的几何参数等)对影响参数(刀具的磨损、切削力的大小、加工后的表面精度和尺寸精度)影响评价材料的可加工性。

(5) 利用切削加工过程输出参数评价材料的可加工性, 基于切削力和表面粗糙度利用加权因子来评估钢件可加工性的方法^[3]。

(6) 利用相位图方法, 确定影响难加工材料可加工性的 5 个关键物理机械性能指标, 即硬度、延展性、加工硬化、导热性及磨蚀性^[4]。

难加工材料加工方法

1 高压喷射冷却加工

山特维克可乐满公司采用高压冷却技术冷却液直接喷向刃口区域, 降低切削区域温度, 使易于卷屑, 从而达到控制切屑的目的。在切削速度相同的情况下, 其金属去除量增加 50%; 若切削速度提高 20%, 金属去除量同时增加 20%。

对于钛合金等难加工材料的切削, 在用普通切削液加工时, 由于切削热量多、切削温度高且集中于切削刃附近, 易于形成月牙洼磨损^[5]。在切削钛合金时, 采用高压内冷刀具, 冷却液通过高压喷射到切削区域, 直接对切削点的刀尖进行冷却, 降低切削刃的温度和减轻刀具磨损, 同时高压液体打碎切屑并及时将切屑排走。而且冷却液还可起润滑的作用, 减少刀具和工件之间的摩擦, 使切削力降低, 利用这种方法可提高刀具寿命, 降低刀具成本, 而且良好的断屑和排屑效果能够改善零件的加工质量^[6]。

2 微量润滑切削加工

微量润滑切削(Minimal Quantity Lubrication, MQL)是一种应用较广的准干式切削方法, 它在压缩空气中混入微量的无公害油雾, 代替大量油剂对切削区域冷却、润滑和排屑。研究表明 MQL 技术可以有效地减轻刀具、切屑及刀具、加工表面之间的摩擦阻力, 降低最高切削温度、减小刀具磨损、提高加工表面质量作用^[7]。

南京航空航天大学李新龙以钛合金 TC4 的高速铣削为对象, 高速铣削力和刀具磨损特性分析表明, 利用低温氮气和微量润滑剂能够有效地抑制加工区的温升、降低切削力、延长刀具的使用寿命及提高加工表面精度^[8]。李克强采用气雾微量润滑辅助 PCD 刀具切削钛合金, 并改善钛合金的切削加工工艺^[9]。气雾微量润滑辅助 PCD 刀具切削钛合金装置如图 1 所示。



图1 气雾微量润滑辅助PCD刀具切削钛合金装置

3 加热辅助切削加工

加热辅助切削是通过等离子或激光加热源, 把工件的整体或局部加热到一定温度后再进行切削加工的方法。通过等离子加热源对切削区域局部加热, 如 Inconel 718 在 750℃ 以上时屈服强度有明显降低。Leshock 等^[10]利用离子加热切削法(Plasma Enhanced Machining, PEM)切削 Inconel 718 的研究表明, 随着表面温度的提高, 切削力明显下降, 同时加工后工件表面质量也有所改善。但是, 当温度超过 530℃ 以上时, 工件表面会出现氧化现象, 通过精确控

制加热源可避免这种现象。Lopez de Lacalle LN 等研究等离子弧辅助铣削 3 种难加工材料(Inconel 718、Haynes 25 和 Ti6Al4V), 加工 Inconel 718 和 Haynes 25 时, 其切削力显著降低, 刀具使用寿命和表层质量提高; 但是, 加工 Ti6Al4V 时由于加热改变材料微观结构, 反而使得刀具寿命降低和材料表面变脆, 因此, 等离子弧不适宜加工钛合金^[11]。

其中, 激光加热辅助切削(Laser Assisted Machining, LAM)技术是将高功率激光束聚焦到切削刃前的工件表面, 短时间内将工件局部加热到很高的温度, 软化金属材料并使其屈服强度降低, 从而减轻切屑变形、降低切削力和减小刀具磨损, 达到提高加工表面质量和加工效率的目的^[12]。

Sun 等研究激光束对 Ti6Al4V 合金加工过程时切屑形成的影响, 采用一个物理模型解析 LAM 高速切削时形成连续切屑机理^[13]。Rashid 等研究了 LAM 加工 β 钛合金 Ti-6Cr-5Mo-5V-4Al 的特点, 因激光照射工件表面升温, 使材料屈服强度降低、切削力下降且金属去除率提高^[14]。Rashid 等研究了 LAM 改善难加工材料 Ti-10V-2Fe-3Al 的切削加工性^[15]。Attia 等干式下采用激光辅助高速精车高温合金 Inconel 718, 提高材料去除率, 最高可达传统车削的 8 倍, 且刀具使用寿命和表面加工质量也得到提高^[16]。王岩针对激光加热辅助铣削高温合金 K24 研究, 获得工艺参数对切削力、刀具使用寿命及表面质量的影响规律^[17]。

4 低温冷却辅助切削加工

液氮冷却的方法之一是将液氮作为切削液直接喷射到切削区(见图 2)。该方法是用液氮(最低温可达 -186℃)、液体二氧化碳(最低温可达 -76℃)及其他低温液体作切削液喷射到加工区, 对刀具和工件之间的加工部位进行润滑。既可以冷却切削区, 也可以润滑液在刀具表面形成的

润滑膜从而提高刀具的寿命。这种冷却切削的冷却能力比高压喷射冷却强,能够显著降低切削钛合金和高温合金等难加工材料时由高温引起的刀具磨损^[18]。TiAlN 涂层硬质合金刀具车削 Inconel 718 时,刀尖磨损在低温油雾冷却的情况下,已加工表面的表面质量相对于冷风和干切削都有明显改善^[19]。

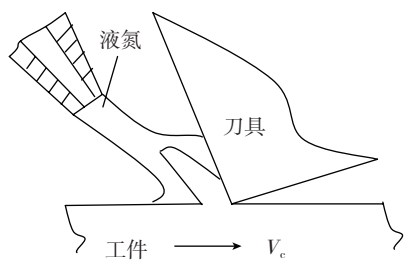


图2 液氮切削示意图

提高难加工材料切削效率的方法

为了提高航空航天难加工材料切削效率,可采用的措施有:刀具材料的选用、合理的刀具几何参数选择、切削用量的优选、加工方式的选择和新型刀具设计等5种。

1 刀具材料的选用

因为 Co 材料热稳定性好和高温下能保持较高的硬度,如钴高速钢在切削温度 645~650℃时,其硬度为 67~70HRC,可用于加工高温合金、钛合金、奥氏体耐热钢及其他难加工合金。含钴超硬高速钢(W2Mo9Cr4Co8 (M42))的硬度为 69~70HRC,适合加工铁基高温合金、铸造高温合金、钛合金和超高强度钢等难加工材料。

碳化物晶粒的平均尺寸在 0.5 μm 以下的 WC-Co 硬质合金硬度为 90~93HRA,其抗弯强度为 2000~3500MPa,如 YS2 (K30) 适合加工铁基、镍基高温合金和钛合金。对于经过 PVD 工艺的 TiAlN 涂层硬质合金刀具,涂层表层生成高强度的非结晶氧化铝薄膜(Al₂O₃),其硬度高、氧化温度高、红硬性好、附着力强、摩擦力小、导热率低。该种刀具

适合较高的切削速度,而较低的切削速度易于产生积屑瘤,从而导致微崩和沟槽磨损。

陶瓷如 Si₃N₄、氧化铝基陶瓷具有很高的耐高温性能(Al₂O₃ 熔点为 2050℃)、高硬度和耐磨性(91~95 HRA),能加工镍基或钴基耐热合金,如加工 Inconel 718 (GH169)时,切削参数 V_c=200m/min, f_z=0.2mm/z,而采用硬质合金加工时切削参数 V_c=30m/min, f_z=0.3mm/z。

立方氮化硼 CBN 具有很高的硬度和耐磨性、热稳定性(1400~1500℃时比金刚石高一倍;800℃时是陶瓷和硬质合金常温性能),优良的化学稳定性及抗氧化能力(1000℃时会产生一层氧化硼 B₂O₃ 薄膜,防止进一步氧化),良好的导热性,较低的摩擦系数(0.1~0.3)。CBN 的含量越高其硬度越高,适合加工耐热钢、高硬钢;含量低的适合加工一般硬钢及有冲击的切削。CBN 晶粒尺寸小、耐磨性好(21 μm 减至 13 μm 时,刀具寿命可提高 28%)。CBN 刀具采用负前角(-6°~-18°),加工镍基合金应采用正前角(0°~8°),后角可大些(6°~25°)。

金刚石(单晶)刃口锋利、热传导率高,具有较少的刀尖滞留热量,极高的硬度和耐磨性,很低的摩擦系数等特点。金刚石(碳)在钛中的溶解度比在铁中小得多,故其扩散磨损很小。硬质合金(K类)加工 Ti6Al4V, V_c=20~50m/min;加工天然金刚石 V_c=100~120m/min,切削时间 30min,刀具几乎没有磨损;用湿式法切削

V_c=200m/min,刀具几乎没有磨损。

2 合理的刀具几何参数选择

一般来说,正前角(γ)刀片降低切削力、切削热、加工硬化等,但强度减弱;大后角 α (6°~10°)减轻刀具与工件摩擦、锋利、切削力、切削热、散热性等;主偏角 k_r (45°~90°)增强刀具散热、减少切削力,切屑厚度和宽度等;刃倾角 λ_s (0°~20°)影响切屑流向、增强刀尖强度等;刀尖 r_s 小些好,但刀尖强度要考虑。

采用陶瓷刀具加工铸造高温合金时 γ=0°~3°, α=10°~15°;变形高温合金 α=0°~10°, α=10°~15°;立方氮化硼和金刚石刀具:变形高温合金 γ=0°~8°, α=8°~20°;关于刀具涂层应用于切削高温合金材料,其中 CVD 涂层适用于粗加工, PVD 适用半精加工和精加工,而 PVD 适用于精加工。

3 切削用量的优选

切削高温合金时切削速度不宜过高,因为高温合金的强度高、粘性强,切削中更容易在切削区产生和积聚热量,且导热性差,在大切除量的切削时,如果切削速度过高,有引起刀具和工件烧伤的趋势。就目前的使用刀具而言,钛合金的切削速度一般在 30~80m/min 之间,镍基合金也在 250m/min 之内。

选择合理切削速度需要考虑:高的切削速度可以避开材料的积屑瘤区;增加切削速度可使温度上升,通过减少切削速度达到低温或采用冷却。表 1 为不同刀具材料加工高温合金、钛合金的切削速度选择。

表1 难加工材料切削速度推荐表

切削刀具	加工材料	切削速度 V _J (m·min ⁻¹)
高速钢刀具	铸造高温合金	3~8
	变形高温合金	5~12
硬质合金刀具	铸造高温合金	8~15
	变形高温合金	30~70
氮化硅陶瓷刀具	高温合金	100~200
立方氮化硼刀具	高温合金	60~200
金刚石刀具	钛合金	100~200

高温合金切削温度高,同时存在加工硬化的问题。每齿进给量过大,则切削力过大而导致崩刃或是切削温度过高而烧刀;而每齿进给量过小,则因刀刃始终在加工硬化层中工作而快速磨损。一般来说,切削参数取每齿进给量 $f_z=0.1\sim 0.5\text{mm/z}$,且精车和铣削加工时工艺系统刚性不好时取小值,粗车加工工艺系统刚性好时可取大值。以加工 Inconel 718 (GH169)为例:采用硬质合金刀具切削参数: $V_c=25\text{m/min}$, $a_p=3.4\text{mm}$, $f_z=0.23\text{mm/z}$;采用氮化硅陶瓷刀具切削参数: $V_c=172\text{m/min}$, $a_p=10\text{mm}$, $f_z=0.18\text{mm/z}$ 。

4 加工方式选择

就高温合金而言,逆铣切屑是由薄到厚,在最初切入时刀具易与工件发生干摩擦,加重刀具的粘屑和崩刃,因此尽量采用顺铣加工,即刀齿一开始切入就碰到硬皮而容易导致刀具破损。对于涡轮叶片加工,可采用高效插铣技术,即在3轴或4轴专用铣床上插铣加工涡轮叶片:从涡轮叶片顶部插铣刀向下运动,直接到达其根部,并通过X-Y平面的数控控制平面运动可加工出复杂曲面。

5 新型刀具设计

波型刃的立铣刀有效改善刀具切入和切出时刀刃受到机械冲击和热冲击的影响,从而尽量避免其脆性破损。伊斯卡刀具公司开发用于粗加工镍基合金波型刃的立铣刀,其螺旋角 20° ,有4~6刀槽,直径为6~20mm,排屑顺畅(见图3)。

刀具生产厂商为典型零件加工



图3 伊斯卡公司的波型刃铣刀

提供可操作的加工方案^[20]。如山特维克可乐满就难加工材料高温合金制造的如涡轮盘类回转零件,该零件有多种凹腔,要求设计、选择刀具和规划走刀路径时考虑到刀具与工件之间的合理间隙以避免干涉。

(1)切槽专用弯头刀片:CoroCut弯头刀片结构独特,高效的加工难加工的凹槽。该刀片控制切屑以保证表面完整性符合要求。

(2)CoroDrill R846整体硬质合金钻头的钻尖和槽形进行了优化,使得轴向切削力小,并提高刀具寿命,适用于高温合金钻削。

结束语

本文叙述了航空航天难加工材料钛合金和高温合金加工方法;并从优选刀具材料、选择合适的刀具几何参数、采用优化的加工工艺参数、选择合适的铣削加工方式和针对难加工典型零件设计新型刀具5方面讨论了提高难加工材料切削效率的方法。

参考文献

- [1] Ulutan D, Ozel T. Machining induced surface integrity in titanium and nickel alloys: A review. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2011(51):250-280.
- [2] Boubelai N, Rodriguez J, Asfour S. Development of an aggregate indicator to assess the machinability of steels. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003, 134:159-165.
- [3] 吴斌,夏伟,汤勇,等.基于模糊理论和数据库技术材料切削加工性评价. *机械设计与制造工程*, 2000(3):12-15.
- [4] 徐林红.难加工材料可加工性分析方法的研究[D].武汉:武汉理工大学,2010.
- [5] 宋智勇,牟文平,阮超.钛合金航空结构件的高效数控加工. *航空制造技术*, 2009(19):42-45.
- [6] Brinksmeier E., Walter A, Janssen R, et al. Aspects of cooling lubrication reduction in machining advanced materials. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 1999, 213(B):769-778.
- [7] 横田秀雄.吴敏镜,译. MQL 切削的现状和发展. *航空精密制造技术*, 2004(1):24-

26.

[8] 李新龙,何宁,李亮.绿色切削中的MQL技术. *航空精密制造技术*, 2005(2):24-27.

[9] 李克强.钛合金车削用PCD刀具优选及切削参数优化[D].哈尔滨:哈尔滨理工大学,2013.

[10] Leshock C E, Kim J N, Shin Y C. Plasma enhanced machining of Inconel 718: modelling of workpiece temperature with plasma heating and experimental results. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2001(41):877-897.

[11] López de Lacalle L N, Sánchez J A, Lamikiz A, et al. Plasma assisted milling of heat-resistant superalloys. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2004, 126(2):274-285.

[12] 吴雪峰,王扬.激光加热辅助切削技术及研究进展. *哈尔滨理工大学学报*, 2012(8):34-46.

[13] Sun S, Brandt M, Dargusch M S. The effect of a laser beam on chip formation during machining of Ti6Al4V alloy. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2010, 41(6):1573-1581.

[14] Rashid R R A, Sun S, Wang G, et al. An investigation of cutting forces and cutting temperatures during laser-assisted machining of the Ti-6Cr-5Mo-5V-4Al beta titanium alloy. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2012(63):58-69.

[15] Rashid R R A, Bermingham M J, Sun S, et al. The response of the high strength Ti-10V-2Fe-3Al beta titanium alloy to laser assisted cutting. *Precision Engineering*, 2012, 37(2):461-472.

[16] Attia H, Tavakoli S, Vargas R, et al. Laser-assisted high-speed finish turning of superalloy Inconel 718 under dry conditions. *CIRP Annals—Manufacturing Technology*, 2010, 59(1):83-88.

[17] 王岩.镍基铸造高温合金K24激光加热辅助铣削技术研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2013.

[18] Hong S Y, Ding Y. Cooling approaches and cutting temperatures in cryogenic machining of Ti-6Al-4V. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2001(41):1417-1437.

[19] 何宁,李亮,赵威,等.难加工材料高性能加工的冷却润滑技术. *航空制造技术*, 2007(7):46-48.

[20] 金属加工杂志社,哈尔滨理工大学. *数控刀具选用指南*.北京:机械工业出版社,2014.

(责编 深蓝)