

高温合金材料精密加工刀具寿命优化研究

柴建

陕煤集团神南产业发展有限公司，陕西省榆林市神木市，719300；

摘要：本文对高温合金材料精密加工里的刀具寿命优化问题展开了系统研究，借助剖析高温合金的材料特性以及由其引发的加工难点，着重剖析了切削参数、刀具材料与几何形状等多个因素对刀具寿命的影响机制，研究运用理论分析同实验验证相结合的方式，给出了把合理挑选切削参数、运用新型刀具涂层及复合材料、优化刀具几何设计与刃口处理作为核心的综合优化策略。实验结果显示，借助控制切削速度、选用 TiAlN 涂层刀具以及 CBN 超硬材料、采用负前角和大后角等几何优化手段，可明显降低切削力与温度，可以让刀具寿命提升 30%以上，磨损速率较大降低，保证加工表面质量 Ra 值优于 $0.4 \mu\text{m}$ ，本研究为高温合金精密加工提供了有效的工艺优化方案，对于达成降本增效以及提升加工质量有着关键的工程应用价值。

关键词：高温合金材料；精密加工；刀具寿命；优化策略

DOI：10.69979/3029-2727.25.11.050

高温合金凭借其出色的高温强度以及抗氧化和耐腐蚀性能，已然成为航空发动机、燃气轮机以及航天部件等高端装备的关键材料，不过这类材料强度较高、导热性欠佳并且容易发生加工硬化，以至于在精密加工过程中会出现切削力大、温度高的情况，刀具面临着急剧磨损以及早期失效等问题，这对加工效率、表面质量以及经济性造成了严重的制约。刀具寿命短会导致频繁换刀以及成本增加，还会影响零件精度的一致性以及工艺的稳定性，大力开展高温合金精密加工中刀具寿命的优化研究，对于突破技术瓶颈、提升制造水平有着迫切的实际需求，本文依据高温合金的加工特性以及刀具磨损机理，系统地分析影响刀具寿命的关键因素，并且凭借实验验证多种优化策略的有效性，期望能为相关领域的工艺改进提供理论参考以及实践依据。

1 高温合金材料特性及加工难点

1.1 高温合金材料特性

高温合金是以铁、镍、钴作为基础成分的金属材料，在 600°C 以上的高温环境以及一定应力作用下，可长期保持稳定工作状态，这种合金有良好的高温强度特性，同时在抗氧化和抗热腐蚀方面表现出色，其晶体结构较为复杂，一般含有多种合金元素，像铬、钼、钨、钛等，这些元素的存在，让高温合金拥有较高的组织稳定性，不过也致使材料的硬度和强度变得较大。另外高温合金的导热性能欠佳，在加工期间所产生的热量不容易散发出去，容易造成刀具局部温度过高，加剧刀具的磨损情

况^[1]。

1.2 高温合金材料加工难点

高温合金有上述特性，其加工难点主要集中于以下几个方面，其一切削力大，高温合金的高强度以及硬度致使切削过程中需较大切削力，这对机床的功率和刚性提出较高要求，且容易造成刀具破损，其二切削温度高，导热性欠佳使切削热集聚在刀具与工件的接触区域，高温会让刀具材料的硬度下降，加快刀具的磨损与破损。其三加工表面质量难以保障，高温合金在切削过程中易产生加工硬化现象，致使已加工表面硬度上升，加重刀具磨损，同时也对加工表面的粗糙度和精度产生影响。

2 影响刀具寿命的因素分析

2.1 切削参数的影响

切削参数乃是影响刀具寿命最为直接的要素，其主要囊括切削速度、进给量以及背吃刀量这几个方面，切削速度对于刀具寿命起着决定性的作用，倘若切削速度过高，像是超过了 $60\text{m}/\text{min}$ ，那么就会致使切削温度急剧攀升，引发刀具材料出现相变软化以及塑性变形的状况，加速粘结磨损、扩散磨损以及氧化磨损的进程^[2]。进给量一旦增大，便会直接使得切削力与切削热增大，还会加剧刀具与切屑接触区域的摩擦，导致月牙洼磨损程度加深，并且会增加切屑厚度，对已加工表面质量产生影响，背吃刀量的增加会提高切削功率以及径向切削力，容易引发刀具振动以及崩刃现象，有研究显示，对于 GH4169 这类高温合金而言，适宜采用中低速切削，

即 20 - 50m/min, 适中的进给量, 也就是 0.1 - 0.2mm/r, 以及较小背吃刀量的组合方式, 以此来达成刀具寿命与加工效率之间的平衡。

2.2 刀具材料的影响

刀具材料的物理性能以及化学性能, 直接对其在高温以及高应力环境下的耐用性起到了决定性作用, 高速钢刀具拥有良好的韧性, 不过在高温硬度以及红硬性方面表现较差, 当温度超过 600°C 的时候, 其硬度就会出现明显下降的情况, 并不适用于高温合金的高效加工, 硬质合金依靠高硬度以及较好的韧性, 成为了最为常用的刀具材料, 然而其钻粘结相在高温状态下容易和合金元素发生扩散, 导致刀尖软化^[3]。添加 Ti、Ta 等碳化物的细晶或者超细晶硬质合金可提升高温稳定性, 陶瓷刀具像 Al₂O₃、Si₃N₄ 有优异的高温硬度以及化学惰性, 但是抗机械冲击性能比较差, 大多被用于精加工, 立方氮化硼也就是 CBN 作为超硬材料, 硬度很高, 热稳定性非常好, 可达到 1400°C, 特别适合用于加工镍基和铁基高温合金, 在高速精加工的时候刀具寿命可达到硬质合金的数倍, 不过成本较高, 而且脆性也比较大。

2.3 刀具几何形状的影响

刀具几何形状的合理设计对于控制切削力、热分布以及切屑形态起着非常关键的作用, 前角会对切削锋利度以及刃口强度产生影响: 正前角可降低切削力, 不过容易引发崩刃的情况, 负前角可以提高刃口强度, 适合用于高强度高温合金的粗加工, 后角会影响后刀面与工件之间的摩擦以及散热情况: 适当增大后角可减少摩擦以及加工硬化现象, 然而过大会削弱刃区的刚性。主偏角决定着切削分力的方向以及散热路径, 减小主偏角可增加切削宽度、改善散热效果, 但是径向力增大容易引发振动, 刀倾角控制着切屑的流向以及实际工作前角, 负刃倾角可提高刀尖强度并且引导切屑远离已加工表面^[4]。

3 刀具寿命优化策略

3.1 合理选择切削参数

合理选择切削参数是延长高温合金加工刀具寿命的关键所在, 借助系统的实验剖析以及理论剖析, 可明确最契合特定高温合金材料加工的切削参数组合, 一般在保证加工质量以及精度要求得以契合的情形下, 适宜采用较低的切削速度并搭配适中的进给量与背吃刀量, 这样的参数组合可有效地控制切削温度的上升, 减少刀

具与工件材料之间的化学交互作用, 降低刀具的扩散磨损以及氧化磨损。展开来说, 在粗加工阶段, 可以选用较大的背吃刀量以及进给量, 同时配合较低的切削速度, 以此实现较高的材料去除率并且避免刀具过早失效, 在精加工阶段, 则应当采用较小的背吃刀量和进给量, 适度提高切削速度, 获取更好的表面质量, 另外采用变参数切削策略, 依据刀具磨损状态实时调整切削参数, 可实现刀具寿命的延长。借助构建切削参数优化模型, 并结合在线监测技术, 可达成加工过程的智能化控制, 最大程度地发挥刀具的切削性能。

3.2 采用新型刀具材料

随着材料科学不断向前发展, 新型刀具材料的研发为高温合金加工给予了更多的选择机会, 涂层刀具是当下应用极为广泛的高性能刀具, 它是依靠在硬质合金基体之上沉积一层或者多层有高硬度以及良好耐磨性的涂层, 提高了刀具的表面硬度以及化学稳定性, TiAlN 涂层, 因为其在高温环境下可形成致密的 Al₂O₃ 保护膜, 抗氧化性能十分出色, 很适合用于高温合金加工。纳米复合涂层刀具, 例如 nc-TiN/SiN 纳米涂层, 把纳米技术运用到涂层制备过程中, 使得涂层同时拥有高硬度以及良好的韧性, 耐磨性能相较于传统涂层提升了一倍多, 陶瓷刀有着优异的高温硬度以及化学惰性, 不过其韧性较差的问题借助添加 TiC 等提高相得以改善, 金属陶瓷刀具兼具陶瓷的高硬度与金属的韧性特点, 在高温合金精加工方面表现较为突出^[5]。立方氮化硼作为硬度仅次于金刚石的超硬材料, 特别适用于镍基高温合金的高速精加工, 虽说成本比较高, 但其卓越的耐磨性能可让刀具寿命延长好几倍。

3.3 优化刀具几何形状

刀具几何形状的优化设计对于改善高温合金加工过程里的切削力、切削热以及切屑控制而言十分关键, 鉴于高温合金强度高且塑性好的特性, 一般会推荐采用负前角的几何设计, 以此来提高切削刃强度, 防止出现崩刃与破损的情况, 适当增大后角, 减少后刀面与已加工表面之间的摩擦, 降低切削温度以及功率消耗。主偏角的选择要综合考量机床刚性与切削力分布, 一般采用 45° 或者 75° 主偏角, 这样能保证切削刃有充足的参与长度, 又能避免因径向力过大而引发振动, 刀倾角的合理设计可控制切屑流向, 保护已加工表面, 并且提高刀尖强度, 另外先进的刃口处理技术也不能被忽视: 借助刃口钝化处理形成微小的倒圆, 可有效消除微观缺口,

提高刃口一致性，防止应力集中，让刀具抗破损能力得到提升，还可采用断屑槽优化设计，改善切屑形态，避免产生长的缠绕形切屑，减少切屑对已加工表面的划伤以及刀具的异常磨损^[6]。这些几何参数的协同优化，为高温合金加工提供了全面的刀具解决方案。

4 实验研究与结果分析

4.1 实验方案设计

为了系统地剖析各个因素对刀具寿命所产生的影响，此次研究精心设计了多因子正交实验，该实验选用 GH4169 镍基高温合金当作标准工件材料，于五轴精密数控加工中心开展端面铣削试验，运用单变量控制法，分别对切削速度、进给量、背吃刀量这三个切削参数变量，以及不同的刀具材料和刀具几何形状对刀具寿命的影响规律展开考察。每组实验都重复进行 3 次，以此来保证数据的可靠性，借助超景深三维显微镜监测后刀面磨损量，将 $V_{Bmax} = 0.3\text{mm}$ 作为判定刀具寿命终点的依据，使用表面粗糙度仪测量工件表面质量，利用热电偶测量切削温度，借助测力仪采集切削力数据，所有实验均在微量润滑的条件下开展，以此保证加工环境的一致性。

4.2 实验结果分析

实验得出的数据说明，在切削参数里，对刀具寿命产生影响最大的是切削速度，要是速度从 20m/min 提高到 60m/min ，刀具的平均寿命会从 45 分钟快速缩短至 12 分钟，这主要是因为切削温度上升使得扩散磨损加剧造成的，进给量加大以及背吃刀量增大也会加快刀具磨损，不过影响相对没那么明显：进给量增加 0.1mm/z ，寿命会降低大概 20%，背吃刀量增加 0.3mm ，寿命会降低大概 15%。对刀具材料进行对比发现，CBN 刀具表现最佳，平均寿命能达到 110 分钟，接着依次是 TiAlN 涂层硬质合金、未涂层硬质合金以及高速钢，对几何形状进行优化给予了十分突出的改善：使用负前角以及较大后角的刀具，再配合刃口钝化处理，其切削力降低了 18%、切削温度下降了 12%，刀具磨损速率比常规刀具降低了 30%以上，有效地延长了刀具的使用期限，同时工件表面质量稳定控制在 $0.4\mu\text{m}$ 以内^[7]。

5 结论与展望

5.1 结论

本文针对高温合金材料特性以及加工难点展开分析，研究了影响刀具寿命的相关因素，同时提出了一系列关于刀具寿命的优化策略，实验结果显示，合理挑选切削参数、运用新型刀具材料以及优化刀具几何形状等举措，可以提高高温合金精密加工时刀具的使用寿命，降低加工成本，提升加工效率与质量。这些研究成果为高温合金材料的精密加工提供了理论支撑与实践指引。

5.2 展望

未来的研究可去深入探寻高温合金材料的加工机理，开发出更为高效且耐用的刀具材料以及刀具涂层技术，可以将智能制造技术与之相结合，达成切削参数的智能优化以及刀具磨损的实时监测与预警，以此提升加工过程的自动化与智能化程度，另外还可开展高温合金材料与刀具材料的摩擦学研究，揭示刀具磨损的本质规律，为刀具寿命的优化给予理论支撑。

参考文献

- [1] 贾晓羽. 陶瓷刀具切削镍基高温合金的磨损研究 [D]. 长春工业大学, 2025.
- [2] 胡亚辉, 胡川川, 朱玉莹, 等. 锆基合金车削刀具表/界面磨损研究 [J]. 工具技术, 2025, 59(07): 21-25.
- [3] 张顺咏, 陈军红, 张斌, 等. 微结构和加载条件对镍基单晶高温合金动态拉伸性能影响 [J]. 爆炸与冲击, 2025, 45(07): 57-73.
- [4] 陆贤宇. PCBN 刀具车削 WN_xMoTaZr_x 难熔高熵合金的切削性能及机理研究 [D]. 合肥工业大学, 2023.
- [5] 畅述. 高速钢钻刀用 (SiTiVN_xCr) N 基高熵复合涂层的制备及其性能研究 [D]. 西安工业大学, 2025.
- [6] 李志强. N₂/Ar 对 AlCrTiN 涂层刀具抗高温氧化性能的影响 [J]. 金属加工(冷加工), 2025, (09): 54-57.
- [7] 王舒玮. 基于 WTConv-KAN 算法考虑刀具磨损的数控机床误差分析与预测 [J]. 机床与液压, 2025, 53(16): 93-99.

作者简介: 柴建, 出生年月: 1988.04.01, 性别: 男, 民族: 汉, 籍贯: 陕西米脂, 学历: 本科, 职称(现职称): 助理工程师。