数控加工中超硬钨钢合金刀具特性与应用工艺探析

李伟

巴彦淖尔应用技师学院，内蒙古 巴彦淖尔 015400

DOI: 10.61369/RTED.2026140040

摘　　要： 在精密数控加工领域，刀具性能直接决定工件加工精度、表面质量与生产效率。超硬钨钢合金刀具凭借高硬度、高耐磨性、优异的高温稳定性与结构刚性，成为数控切削、铣削、钻孔加工的核心刀具类型，广泛应用于模具制造、航空航天、汽车零部件等高端制造领域。本文基于超硬钨钢合金刀具的材质构成与物理力学特性，系统分析其相较于传统高速钢刀具的性能优势，结合数控加工工艺特点，融合立铣刀、钻头角度参数与选材细则，探究刀具选型、切削参数匹配、涂层工艺优化、磨损管控等关键应用技术，总结不同材质工件的加工工艺方案，针对实际加工中出现的崩刃、磨损、振纹等问题提出优化策略，为提升数控加工精度、延长刀具使用寿命、降低生产成本提供理论参考与工艺支撑。

关 键 词： 数控加工；钨钢合金刀具；刀具角度；切削工艺；工艺优化

Analysis on Characteristics and Application Technology of Superhard Tungsten Carbide Tools in CNC Machining

Li Wei

Bayannur Applied Technician College, Bayannur, Inner Mongolia 015400

Abstract: In the field of precision CNC machining, cutting tool performance directly determines the machining accuracy, surface quality and production efficiency of workpieces. Characterized by high hardness, superior wear resistance, excellent high-temperature stability and structural rigidity, superhard tungsten carbide cutting tools have become the core tools for CNC turning, milling and drilling, and are widely adopted in high-end manufacturing sectors including mold manufacturing, aerospace and automotive component production. Based on the material composition and physical and mechanical properties of superhard tungsten carbide cutting tools, this paper systematically analyzes their performance advantages over traditional high-speed steel tools. Combined with the characteristics of CNC machining processes, it integrates the angular parameters and material selection criteria of end mills and drills, investigates key application technologies such as tool selection, cutting parameter matching, coating process optimization and wear control, and summarizes machining process schemes for workpieces of different materials. Optimization strategies are proposed to address common practical machining problems such as edge chipping, tool wear and chatter marks, providing theoretical reference and technical support for improving CNC machining accuracy, extending tool service life and reducing production costs.

Keywords: CNC machining; tungsten carbide cutting tool; tool angle; cutting process; process optimization

引言

随着智能制造与高端精密制造产业的快速发展，数控加工技术朝着高精度、高效率、高稳定性、自动化量产方向持续升级，市场对零部件加工精度、表面光洁度及批量加工一致性的要求大幅提升。刀具作为数控加工的核心执行部件，其材料性能、刃口角度结构与适配工艺直接制约加工系统的整体效能。传统高速钢刀具硬度低、耐高温性差，无法满足高硬度合金、不锈钢、钛合金等难切削材料的高速、高精度加工需求，已逐步无法适配高端数控加工场景。

超硬钨钢合金刀具以碳化钨为核心基体、金属钴为粘结相，经粉末冶金烧结、精密磨削加工制成，涵盖立铣刀、钻头等主流切削刀具，是目前数控加工中应用最广泛的超硬刀具之一。相较于传统刀具，其兼具超高硬度、耐磨抗冲击、高温力学性能稳定等多重优势，可实现硬态切削、高速干式切削等特殊加工工艺，有效解决难切削材料加工难题[1]。现阶段，行业内普遍存在刀具角度设计不合理、刀具材质选型错位、切削参数匹配混乱、工艺适配性不足等问题，导致刀具损耗快、加工缺陷多、生产效率偏低。基于此，本文深入剖析超硬钨钢合金刀具的核心特性，结合立铣刀、钻头角度参数与选材规范，系统探究其标准化、精细化应用工艺，为数控加工工艺优化提供实践依据。

Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

一、超硬钨钢合金刀具的材质构成与核心特性

（一）刀具材质构成

超硬钨钢合金刀具属于硬质合金刀具范畴，核心成分为碳化钨（WC）与粘结剂钴（Co），部分高端刀具会添加微量碳化钛、碳化钽等稀有碳化物，优化综合性能。其中，碳化钨作为硬质相，为刀具提供超高硬度与耐磨性；金属钴作为粘结相，填充碳化钨晶粒间隙，提升刀具的韧性与抗冲击能力。通过调控碳化钨晶粒尺寸与钴含量，可实现刀具硬度与韧性的动态平衡。超细晶（0.2-0.5μm）乃至纳米晶钨钢基体可通过双峰晶粒结构、梯度钴分布及微量 η 相控制，大幅提升刀具力学性能，目前高端钨钢刀具横向断裂强度可突破3800MPa，断裂韧性可达14MPa · $m^{1/2}$以上。

根据成分与性能差异，超硬钨钢合金刀具可分为细晶粒、超细晶粒、纳米晶粒三大类，晶粒越细小，刀具硬度、耐磨性与加工精度越高，适配精密、超精密数控加工场景；钴含量越高，刀具韧性越好，抗冲击、抗崩刃能力越强，适合断续切削、粗加工等复杂工况。实际选材中，立铣刀、钻头细分材质体系清晰：YG类 WC-Co 合金适配铸铁、有色金属加工；YT 类 WC-TiC-Co 合金适配各类钢件加工；金属陶瓷以 TiC、TiCN 为硬质相，耐磨抗粘接，多用于不锈钢、淬硬钢精加工；搭配 TiN、AlCrSiN 等 PVD/CVD 涂层的硬质合金，适配高速切削。对比之下，高速钢仅适用于低硬度材料钻孔，耐磨性能远不及钨钢基材。

（二）核心性能特性

第一，超高硬度与耐磨性。超硬钨钢合金刀具常温硬度可达HRA89-94（等效 HRC74-82），远高于高速钢刀具的 HRC62-65，接近天然金刚石硬度。其耐磨性能优异，在高速切削工况下，体积磨损率极低，相较于高速钢刀具，使用寿命可提升5-10倍，能够长期保持刀具刃口完整性，保障批量加工的尺寸一致性，尤其适用于 HRC50-55硬度淬火钢的持续加工。

第二，优异的高温力学稳定性。数控高速切削过程中，切削区域温度可达600-1000℃，普通高速钢刀具在高温下易出现软化、退火、刃口变形等问题。而超硬钨钢合金刀具耐高温性能突出，800℃高温下仍可保留60%-80% 的常温硬度，不会发生热软化现象，可稳定适配高速干式切削、硬态切削等高温加工工艺，有效避免高温导致的加工精度失效问题。

第三，高刚性与低形变特性。钨钢合金弹性模量高，刀具刚性优异，切削过程中不易发生弯曲、形变，能够有效抑制切削振动，减少工件表面振纹、毛刺等缺陷，大幅提升加工精度。同时，高刚性特性可支持小直径立铣刀、微钻头完成深腔、薄壁精密加工，解决细长刀具刚性不足、加工易变形的行业难题，适配复杂结构零部件的数控精密加工。

二、超硬钨钢合金刀具数控加工核心应用工艺

超硬钨钢合金刀具的加工性能能否充分发挥，核心取决于刀具角度设计、材质精细化选型、切削参数匹配、加工方式选择及后期运维工艺的合理性[2]。结合数控铣削、钻孔主流刀具角度规范，梳理车、铣、钻、镗加工核心工艺要点如下。

（一）刀具角度与材质精细化选型工艺

刀具角度与材质选型是数控加工工艺优化的基础，需结合工件材质、加工精度、加工工序、加工工况四大核心要素精准匹配。

1. 合金立铣刀角度与选材规范

角度参数层面：螺旋角常规取30°-45°，平衡切削平稳性、排屑与刃口强度；加工钛合金、高温合金、HRC > 50硬料时提升至45°-60°，减小切削阻力；槽铣、薄壁件加工降至15°-25°，强化刃口、降低径向力。前角分材质匹配：铝、铜等软材料选用15°-20°大前角，提升锋利度；淬火钢、铸铁采用-5°~0°负前角，防止崩刃。后角区分工序：精加工8°-12°，降低摩擦提升光洁度；粗加工、硬料加工5°-8°，增强刀刃强度。

材质选择：通用工况选用 YG、YT 系列硬质合金；不锈钢、淬硬钢精加工选用金属陶瓷；高速切削统一搭配 PVD、CVD 复合涂层硬质合金。粗加工优先选用高钴超细晶粒立铣刀，精加工选用低钴纳米晶涂层刀具。

2. 合金钻头角度与选材规范

角度参数层面：螺旋角常规18°-30°适配钢、铸铁；铝、铜有色金属提升至30°-40°优化排屑；高强度硬材料降至10°-15°强化刃口。钻顶角标准118°用于普通材料，硬料高精度钻孔采用140°减小切削阻力。后角差异化设计：外圆8°-10°，横刃20°-25°，抵消轴向进给摩擦，减少崩刃。

材质选择：绝大多数金属钻孔选用硬质合金钻头；塑料、木材等低硬度材料可选用高速钢钻头；难加工材料高速钻孔优先选用涂层硬质合金钻头。

整体选型逻辑：粗加工工序以去除余量为核心，切削冲击力大、负载高，优先选用高钴钨钢基材、小螺旋角、小后角刀具；精加工工序以保障精度与表面质量为核心，切削负载小，选用低钴纳米晶基材、大后角刀具，搭配精密刃口钝化处理[3]。加工不锈钢、钛合金等粘性难切削材料，统一采用大螺旋角、优化排屑槽结构的专用刀具，搭配抗粘结涂层，抑制积屑瘤产生。

（二）切削参数匹配工艺

切削速度、进给量、切削深度是数控加工的三大核心参数，参数匹配不合理是导致刀具快速磨损、加工缺陷的主要原因。超硬钨钢合金刀具适配高速切削工艺，相较于高速钢刀具，切削速度可提升2-4倍，但需严格遵循“粗加工重韧性、精加工重精度”的参数匹配原则。

粗加工工况下，优先采用大切削深度、中等进给量、中低切削速度，通过减少走刀次数提升加工效率，同时避免超高切削速度带来的剧烈磨损与冲击。以45钢粗铣加工为例，钨钢刀具切削速度控制在80-120m/min，进给量0.15-0.3mm/z，切削深度1-3mm，可实现效率与刀具寿命的平衡。精加工工况下，采用高切削速度、小进给量、浅切削深度，依托刀具高硬度、高刚性优势，提升工件表面光洁度与尺寸精度，淬火钢精加工切削速度可达150-200m/min，进给量控制在0.05-0.15mm/z。

 Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

针对难切削材料，需针对性下调参数阈值：钛合金、高温合金加工时，切削速度需降至60-100m/min，减小切削热堆积与刀具磨损；不锈钢加工需控制进给量均匀，避免间歇进给导致的刃口冲击磨损。同时，批量加工可采用深冷处理工艺优化刀具性能，经深冷处理的钨钢刀具可显著降低后刀面磨损，提升加工稳定性。

（三）涂层与刃口处理工艺优化

涂层处理是提升超硬钨钢合金刀具加工性能的核心工艺手段，未涂层钨钢刀具仅适用于普通软质材料粗加工，高端精密加工必须搭配专用超硬涂层。目前主流涂层分为 PVD 涂层与 CVD 涂层两大类，PVD 涂层厚度薄、表面光洁度高、刃口完整性好，适用于精加工、高速切削场景，常见类型包括 TiAlN、AlCrSiN 纳米多层涂层，具备耐高温、抗粘结、低摩擦特性；CVD 涂层厚度大、耐磨性极强，适用于重负荷粗加工、硬态切削场景，可大幅提升刀具使用寿命。

刃口处理工艺直接影响加工质量与刀具稳定性，未处理的锋利刃口易出现微小崩口，影响批量加工精度。精加工刀具需采用微钝化处理，去除刃口微小毛刺与裂纹，提升刃口强度，避免加工过程中崩刃；粗加工刀具可适度增大刃口钝化半径，提升抗冲击能力。同时结合刀具角度设计同步优化刃口，大前角刀具需延长钝化处理时间，弥补刃口强度短板。

（四）冷却润滑与工况适配工艺

数控切削过程中产生的高温、摩擦是刀具磨损的核心诱因，合理的冷却润滑工艺可有效降低切削温度、减小摩擦阻力、延长刀具寿命。超硬钨钢合金刀具适配干式切削、湿式切削、微量润滑等多种加工模式[4]。高速精加工场景优先采用干式切削，避免切削液残留导致的工件腐蚀，同时依托刀具优异的耐高温性能稳定加工；重负荷粗加工、难切削材料加工需采用湿式切削，选用适配的切削液持续降温润滑，快速带走切削热量，减少刀具磨损与切屑粘结。加工钛合金、高温合金等大螺旋角刀具加工工况，需搭配高压冷却，及时排出长卷切屑，防止切屑缠绕划伤刃口。

三、超硬钨钢合金刀具的典型数控加工应用场景

模具、航空航天、汽车、精密医疗器械加工均需根据工件材质匹配对应角度、材质的钨钢立铣刀与钻头，依托刀具综合性能完成高精度加工。模具钢多为 HRC50-60淬火硬化材料，采用 45° -60° 大螺旋角纳米晶涂层球头铣刀，搭配140° 顶角硬质合金钻头完成硬态切削；航空钛合金、高温合金加工选用大螺旋角抗粘结涂层刀具，降低切削力与粘结磨损；汽车零部件批量加工选用通用角度 YT 类硬质合金刀具，标准化参数实现稳定量产；微小医疗器械零件采用小直径微刀具，依靠高刚性抑制加工变形，满足微小孔、薄壁结构加工要求。

四、数控加工中刀具常见问题与工艺优化策略

（一）常见加工问题及成因

实际加工中，刀具角度搭配错误、材质选型失当是故障重要诱因：刃口磨损过快除参数、冷却因素外，还存在刀具涂层与工件不匹配、螺旋角过小排屑不畅问题；崩刃碎裂常出现在负前角偏小、钻头顶角过大、断续切削选用低钴刀具工况；工件振纹、尺寸偏差源于刀具刚性不足、后角设计不合理、切削振动叠加。

（二）针对性工艺优化策略

刀具磨损优化：按工件材质固定刀具角度、材质与切削参数，难切削材料选用 AlCrSiN 涂层、大螺旋角刀具，高压喷淋降温排屑。

崩刃碎裂优化：粗加工、断续切削选用高钴基材，减小螺旋角、适度降低前角；走刀增加圆弧过渡，定期校准机床主轴减少振动[5]。

加工缺陷优化：精加工刀具加大后角并做微钝化，薄壁件分层切削；根据加工材料调整刀具螺旋角、钻顶角，定期检测刀具磨损及时更换。

五、结论

本文通过剖析超硬钨钢合金刀具的材质构成、力学性能，融合合金立铣刀、钻头的角度参数与选材标准，系统梳理刀具选型、参数匹配、涂层优化、冷却润滑等核心应用工艺，结合模具、航空航天、汽车制造等典型场景明确差异化应用方案，同时针对加工过程中刀具磨损、崩刃、工件加工缺陷等问题，提出刀具角度、材质协同优化的工艺策略。在智能制造持续升级的背景下，未来超硬钨钢合金刀具将朝着纳米晶基体、多层复合涂层、精准角度定制化方向发展，通过刀具材料、刃口角度与加工工艺的深度融合，进一步提升数控加工的精度、效率与稳定性，为高端精密制造产业高质量发展提供有力支撑。

参考文献

[1] 于忠光，吕显豹，张继波 . 高温合金刀具 AlTiN 涂层结构研究 [J]. 工具技术，2021,55(4):4.

[2] 白利硕，陈月鹏，范保岐，等 . 深入论述数控加工针对不同结构刀具的选择 [J]. 中文科技期刊数据库（全文版）工程技术，2022(5):5.

[3] 姜峰，胡荣辉，邓杰东等 . 硬质合金刀具增材制造技术发展趋势和展望 [J]. 中国机械工程，2025,36(6):1300-1313.

[4] 崔莹，赵奔，于洋 . 硬质合金刀具车削 GH4169二次包络环面蜗杆切削参数优化研究 [J]. 制造技术与机床，2024(12):112-118.

[5] 李友生 . 高速铣削中 TaC(NbC) 对硬质合金刀具磨损性能的影响 [J]. 中国机械工程，2020,31(13):1572-1577.

Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.