

Performance of specialized coated cutting tools for high-temperature alloy materials in cutting and their impact on surface integrity during machining

Hao Liang

AVIC Shenyang Liming Aero Engine Co., Ltd. Shaft Factory, Shenyang, Liaoning, 110000, China

Abstract

High temperature alloys have excellent mechanical properties and high temperature resistance, and have broad application prospects in high-end manufacturing fields such as aerospace and energy. However, high-temperature alloys are extremely difficult to machine, and traditional cutting methods suffer from problems such as rapid tool wear and poor surface quality. In recent years, cutting, as a new type of green manufacturing technology, has received widespread attention. Among them, liquid nitrogen low-temperature cutting technology has shown significant advantages in reducing cutting temperature, minimizing tool wear, and improving machining surface quality. In this context, conducting research on the cutting performance of high-temperature alloy coated cutting tools and their impact mechanism on the integrity of machined surfaces is of great significance for improving machining efficiency, reducing costs, and enhancing product quality.

Keywords

High-temperature alloy; Coated cutting tools; Cut

针对高温合金材料的专用涂层刀具在切削中的性能及对加工表面完整性的影响

梁昊

中国航发沈阳黎明航空发动机有限责任公司盘轴厂，中国·辽宁 沈阳 110000

摘 要

高温合金具有优良的力学性能及耐高温性能，在航空航天、能源等高端制造领域有着广泛的应用前景。但高温合金是一种极难加工的材料，传统的切削方法存在着刀具磨损过快和表面质量不佳等问题。近几年来，切削作为一种新型的绿色制造技术，受到了广泛的重视。其中，液氮低温切削技术在降低切削温度、减少刀具磨损、提高加工表面质量等方面表现出明显的优势。在这一背景下，开展高温合金涂层刀具切削性能及其对加工表面完整性的影响机理研究，对提高加工效率、降低成本和提高产品质量具有重要意义。

关键词

高温合金；涂层刀具；切削

1 引言

高温合金切削加工一直是加工领域的一大难题，其硬度高、导热系数小、加工硬化等特点决定传统切削方法存在刀具磨损大、加工表面完整性难保证的问题。涂层刀具因其优异的抗冲击性能和化学稳定性，已成为高温合金切削加工的重要工具。然而，切削条件下，涂层工具的性能表现及其对加工表面完整性的影响机制尚不明确。液氮低温切削是一种切削方法，可有效降低切削温度、降低刀具磨损、提高加工表面质量。因此，开展涂层刀具在不同液氮射流温度条件

下的切削性能及表面粗糙度、硬度及残余应力的变化规律研究，对优化加工工艺，提高加工效率与质量具有重要的理论与实际意义。

2 高温合金涂层刀具在切削中的性能

2.1 涂层刀具的耐磨性与抗氧化性

高温合金涂层刀具的耐磨抗氧化性能是其切削性能的重要指标，高温合金切削温度高、切削力大，对刀具耐磨、抗氧化性能要求很高。结果表明：TiAlN 涂层可显著提高刀具的高温抗氧化性能^[1]。TiAlN 涂层可以有效地降低刀具切削时刀具的磨损，同时提高了刀具的耐热性能。另外，AlCrN 涂层具有优异的耐磨、抗氧化性能，在较高温度下仍能保持较高的综合性能。

【作者简介】梁昊（1994-），男，满族，中国辽宁抚顺人，本科，工程师，从事机械加工研究。

2.2 涂层刀具的切削力与切削温度

在切削工艺中,切削力与温度直接影响着切削效率与表面质量。高温合金切削温度高,不仅加速刀具的磨损,也降低加工表面的质量。液氮低温切削能有效地降低切削温度、降低切削力,采用液氮低温切削技术,可以大幅度降低切削温度,降低刀具与工件间的热扩散,降低摩擦,提高切削效率。另外,在低温条件下,涂层工具的性能也有所提高。如 TiAlN 涂层刀具具有切削力小、切削温度稳定等优点,有利于提高刀具表面完整性,提高刀具使用寿命。

2.3 涂层刀具对加工表面完整性的影响

涂层刀具切削性能的好坏不仅体现在刀具自身的耐磨性、切削力等方面,而且还直接关系到已加工表面的完整性。机械加工表面完整性是影响零件性能和服役寿命的重要参数。采用液氮低温切削可以明显改善切削表面的粗糙度,改善加工后的残余应力^[2]。低温切削加工表面粗糙度低,残余应力以压应力为主,有利于提高疲劳寿命。另外,在低温条件下,涂层工具的性能也得到了优化。如 AlCrN 涂层刀具具有表面粗糙度低、残余应力分布均匀等特点,有利于改善已加工表面完整性,提高零件综合性能。

3 提高高温合金涂层刀具切削加工表面完整性的工艺策略

3.1 优化刀具选择与参数设定

选择合适的刀具材料对高温合金加工至关重要。优先选用涂层刀具,如 TiAlN 涂层刀具,其具备良好的高温硬度与抗氧化性能,可有效降低刀具磨损。在刀具几何参数方面,增大前角能减小切削力,降低表面粗糙度,但前角过大可能导致刀具强度下降,一般根据合金材料特性,将前角控制在 8° - 15° 。同时,合理设定切削参数,切削速度不宜过高,过高会加剧刀具磨损,引发积屑瘤,降低表面质量,通常对于镍基高温合金,切削速度控制在 50-150m/min。进给量和切削深度需综合考虑机床功率、刀具寿命与加工精度,保持三者间的合理匹配,避免因切削参数不当引发振动,影响加工表面完整性。

例如,在复杂零件的制造工程,需要多组分高温合金的高精度制造,项目组首先对各种高温合金的特点进行深入的研究,在查阅大量资料 and 与材料供应商交流的基础上,确定各合金在硬度、热导率、加工性能等方面的关键参数。项目组在前期工作基础上,选取 TiAlN 涂层、TiCN 涂层和非涂层硬质合金三种刀具材料开展对比实验。在模拟实际加工环境下, TiAlN 涂层刀具具有优异的高温稳定性及耐磨性能,并能有效减少刀具磨损。在刀具几何参数确定方面,项目组借助专业有限元软件,对不同前角、后角、刀半径等参数的刀具进行模拟分析。在此基础上,对不同高温合金材料进行切削实验。在中等硬度高温合金中,随着前角由 8° 逐渐增加至 15° ,切削力明显降低,表面粗糙度下降。但是,

超过 15° 以后,刀具的强度就会降低,而且在连续切割时还会出现崩刃现象,可综合考虑,确定了该合金的刀具前角为 12° 。在切削参数设置方面,项目组通过多因素正交实验设计,系统地研究切削速度、进给速度、切削深度等因素对加工表面质量的影响规律。在大量实验的基础上,确定一套适合不同合金材料的切削用量组合。在实际生产过程中,严格按预先确定的刀具选择及参数设置方案进行加工,可使已加工表面的平整度、光洁度得到明显提高,刀具更换频率显著减少,大大提高了生产效率。

3.2 运用高效冷却润滑技术

冷却润滑是高温合金切削加工的关键,可采用微量润滑(MQL)技术,在切削区中加入少量润滑油,并以雾状喷射,不仅可以有效降低切削温度,降低刀具磨损,还可以起到润滑、减小切削力、提高加工表面质量的作用^[1]。同时,应根据高温合金的化学特性及加工要求,选用适当的润滑剂,以提高润滑效果。在冷却模式方面,内部冷却可将冷却介质直接送至切削区,比外部冷却效果更好,可有效降低刀具及工件表面温度,降低热变形,抑制加工表面热损伤,提高工件表面质量。

例如,某能源装备制造企业采用传统的冷却润滑方式对热交换器部件进行冷却,导致刀具磨损严重、表面质量差($Ra1.2$ - $Ra1.8\mu m$)、刀具寿命只有 20 小时,针对这一问题,企业用微量润滑(MQL)技术及内部冷却模式。针对 MQL 技术的应用,可采用棕榈油作为基础油,加入极压剂 10% 的润滑油配方。在大量实验的基础上,选择了 0.6MPa 的压缩空气和 50mL/小时的润滑剂,将润滑油均匀地喷射到切削区。在内部冷却方式的设计方面,企业可定制一种特殊的内冷工具,以浓度 30% 的乙二醇水溶液作为冷却介质,流量 25 L/min。为验证其冷却与润滑效果,想开展微量润滑工艺与内部冷却工艺的对比实验。同时,可采用红外热像仪、扫描电镜、表面粗糙度仪、三坐标测量仪对工件的尺寸精度进行测试。如结果表明,采用微量润滑技术及内部冷却方法,可使切削区温度降低 $250^{\circ}C$ 左右,刀具磨损量降低 50% 以上,刀具寿命可达 40 小时以上。加工后的表面粗糙度稳定在 $Ra0.6$ 微米左右,远低于传统的外部冷却工艺。与传统的外部冷却方式相比,零件的尺寸误差为 ± 0.01 毫米。同时,微量润滑剂用量小,可降低后续清洗工序成本及环境污染,实现清洁、高效加工,显著提高加工表面完整性。

3.3 实施切削过程振动控制

振动对加工表面质量有很大的影响,因此需要有效地控制切削过程中的振动。对刀具结构进行优化,采用不等齿距刀具,以打破振动周期,降低振动幅度。机床主轴的动平衡试验和调节,保证主轴的平稳运行。同时,通过对工件夹持位置的合理安排,加强工件的夹紧刚度,避免由于装夹不当而引起的振动。另外,可利用在线监测系统对切削力和振动信号进行实时采集,并对其进行分析判断。在检测到振

动信号后,及时调整切削参数,降低切削速度、减少进给量等,有效地抑制振动,保持加工过程的稳定,保证加工表面的完整性。

进行后处理

例如,在精密高温合金结构件制造过程中,振动是影响加工表面质量与尺寸精度的重要因素。项目组在切削加工过程中应优化刀具结构,可通过改变刀具齿距分布,设计出一种不等齿距铣刀。采用动力学分析软件模拟分析刀具振动特性,确定最优齿距变化规律,使刀具能有效突破振动周期,减小振动幅值。对于机床,要定期检查并调整主轴的动平衡,可采用高精度动平衡仪对主轴转动件进行全面的检测,使之达到最大限度。经过对配重块的更换和精密动平衡调试,使主轴振动降至允许范围之内。同时,将切削力、振动等传感器安装到机床上,构成一套在线监测系统。该系统能实时采集切削力、振动等信号,并经数据分析算法处理、分析。当检测到异常的振动信号时,系统会自动调整切削参数,如减速、进给等。

3.4 开展加工后表面处理

加工后的工件表面经过适当的处理,可进一步提高表面质量,可利用抛光技术消除被加工表面的微观不平整,减小表面粗糙度,提高表面光泽度。根据工件的形状和大小,可选用机械、化学、电解三种抛光方式进一步采用喷丸强化等表面强化技术,利用高速弹丸冲击工件表面,使工件表面发生塑性变形,形成残余压应力,从而提高表面硬度和疲劳强度。通过对抛光时间、喷丸强度等处理参数的严格控制,保证处理效果达到要求,避免因过度处理而影响表面质量。

例如,以某高温合金零件为研究对象,对其表面进行表面处理,以进一步改善零件表面质量及使用性能。在抛光过程中,根据被加工对象的形状、大小,采用机械抛光与电解抛光相结合的方法进行抛光。对形状较规整的零件,可采用机械抛光的方法,去除表面较大的刮痕和凸出物。机械抛光时,应选择适当的抛光轮及抛光膏,并调节抛光轮的转速及压力来控制抛光效果。对形状复杂且不易机械抛光的零件,采用电解抛光法进行精加工。在电解抛光之前,工件要经过严格的表面处理,包括去油和除锈。然后,把被加工的工件置于一种特殊的电解池内,采用不锈钢作阳极,工件作阴极,接上直流电源。在此基础上,通过调节电解液的组成、温度、电流密度等参数,实现对抛光效果的精确控制。表面强化采用喷丸强化,根据工件材料特点及使用要求,对弹丸的材质及尺寸进行选择。在喷丸处理时,通过调节喷丸压力、喷丸时间、喷丸角度等参数,可以有效地控制工件表面的残余压应力及硬化层深度。通过表面处理,可使工件表面粗糙

度减少 80% 左右,表面硬度提高 20% 左右,显著提高疲劳寿命,达到高可靠应用要求。

3.5 构建全面的质量管控体系

建立健全的品质控制体系,从原料检验、生产过程监控到成品检验等全过程的质量控制。原材料方面,严格检测材料的成分和性能,保证满足加工要求。在加工过程中,通过传感器实时获取切削参数和刀具状态等信息,并结合数据分析技术实时评价加工过程,及时发现异常情况并及时调整。在成品检验阶段,利用表面粗糙度测试仪、轮廓仪等设备全面检测加工表面质量,对比检验结果,分析并改善不合格品,持续优化加工工艺,使高温合金涂层刀具切削加工表面完整性稳步提高。

例如,在原材料检测阶段,可利用先进的光谱分析技术,准确地分析高温合金原料的成分;利用拉伸试验机和硬度仪,对材料的机械性能进行测试。只有当原材料的各项性能指标都达到标准后,才能进入生产环节,应对每一批原料建立详细的质量记录,记录原材料的来源和检测结果。此外,可通过在机床上安装多种传感器,实现对切削参数、刀具状态和工件温度的实时监测。数据采集系统将数据传输至数据处理中心,由专门的数据分析软件进行实时分析处理。当检测到参数不正常时,系统会立即报警,提示操作者调整。在成品检验阶段,可采用高精度表面粗糙度仪、轮廓仪、三维测量仪等设备,对被加工表面进行全面的检测。针对不合格产品,对测试数据进行分析,找出根本原因,优化工艺。

4 结语

综上所述,开展高温合金涂层刀具切削性能及其对加工表面完整性的影响机理研究,对促进高温合金切削加工技术的进步具有重要意义。采用液氮低温切削技术,可大幅度提高镀层工具的寿命,并改善其表面质量。未来,可结合切削技术的开发与应用,实现高温合金的绿色、高效、优质加工,不仅有利于降低制造成本,也将为中国高端制造产业的发展提供强有力的支撑。

参考文献

- [1] 徐兴伟,李良成,伍爱江,陈诚,崔俊博,熊计,刘俊波.高性能涂层刀具切削GH4169高温合金的切削性能研究[J].工具技术,2024,58(05):47-52.
- [2] 姜秀丽,楚满福,韩增颂,尹亮,郑光明.涂层刀具高速切削GH2132铁基高温合金加工表面变质层研究[J].工具技术,2023,57(11):25-29.
- [3] 刘海,王明红,刘雪勇.复合涂层刀具切削高温合金Inconel 718切削性能研究[J].宇航材料工艺,2023,53(04):75-80.