切削加工技术的发展及应用

王 勇 范晓雷 徐伟利 逯敬虎 白亚群*
北京航天爱锐科技有限责任公司 北京 100076

摘要: 切削加工是现代工业生产中不可或缺的精密切造技术。本文首先通过追溯切削加工技术的历史演变,分析传统切削加工技术的特点与局限性。接着详细阐述了现代切削加工技术的关键进展,随后深入探讨切削加工技术在多个工业领域的具体应用,并对其未来发展趋势进行展望,期以对相关人员在研究、开发和生产实践有所帮助。

关键词: 切削加工技术; 工业应用; 智能化; 绿色化

引言

从传统切削加工技术的成熟应用到现代先进切削技术的崛起,每一次技术变革均对航空航天、汽车制造、模具制造等诸多工业领域的发展格局产生了深远影响。随着当前科技的飞速发展,制造业对零件加工的精度、生产效率、材料适应性以及环保特性等方面的要求也日益严格。因而,切削加工技术也应持续进行创新与演进。深入探究其发展历程、当前应用状况及其未来趋势,对于提升机械制造行业的综合竞争力,实现可持续发展具有至关重要的意义。

1 切削加工技术的发展

1.1 传统切削加工技术

切削加工技术历史悠久,起源于石器时代,当时人们通过打制和磨制工具加工石材。随着金属冶炼技术的发展,青铜和铁器时代到来,人们开始使用金属工具进行金属材料的切削,制造武器、农具和日用品。但那时的切削加工主要依赖人力或畜力,精度和效率都不高,应用范围有限。工业革命成为切削加工技术发展的关键分水岭,蒸汽机的应用使机械动力替代人力与畜力,金属切削机床应运而生并持续改良,如车床、铣床、钻床等。基本类型机床在18世纪末至19世纪初相继涌现,推动切削加工向精确化迈进,且切削刀具材料从碳素工具钢逐步过渡至合金工具钢,助力效率与质量提升,不过近代切削加工技术整体仍处较低层级,加工精度多在毫米级,难以契合现代工业对高精度、高效率与高复杂性零件加工的诉求。^[1]传统切削加工技术具备成熟、设备普适、工艺稳定等特性,于大批量生产中可借由工艺与参数优化达成高效生产与质量稳定,但其局限性亦颇为显著。具体表现为加工精度难以达到微米级,难以处理精密零件如航空航天发动机叶片和高端光学镜片;材料去

除率低,加工难切削材料如高温合金、钛合金效率低,导致刀具磨损严重,成本高,周期长;大量使用切削液增加成本并污染环境,不符合绿色制造理念。

1.2 现代切削加工技术

现代切削加工技术主要包括以下几种加工方式,每种方式都有其独特的应用范围和优势。(1)高速切削技术。其能够通过使用远高于常规速度的切削速度,显著提高了加工效率和表面质量。同时在高速条件下,切削力降低,切屑易于脱离,减少了能量损耗和刀具磨损,特别适用于对表面质量要求高的精密零件,此外,高速切削还扩展了对难加工材料和复杂形状零件的加工能力。但高速切削的实现需要配备高速、高精度的机床和创新的刀具材料与结构,如涂层硬质合金和减振刀柄。(2)精密与超精密切削技术是切削加工领域的高端工艺,旨在实现微米至纳米级的高精度加工。精密切削精度一般在1~10微米,而超精密切削可达到亚微米甚至纳米级。要实现这种高精度,不仅要求机床必须具备高精度的主轴回转、导轨直线度、定位和重复定位精度。还要求极小的刃口半径和高硬度、耐磨性及化学稳定性。此外,也加工环境需要精细控制,如温度波动控制在 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$,湿度在40%-60%,尘埃颗粒直径小于0.1微米。(3)硬切削技术。拥有着高硬度和耐磨性的新型刀具材料的出现使得硬切削在高硬度材料上成为可能,现已成为针对硬度超过50HRC的材料进行直接切削的先进工艺。与磨削相比,硬切削具有连续切削过程、切削力平稳、加工精度和表面质量高、加工效率高等优点,此外,硬切削还能简化加工工序,降低成本,提高生产柔性和适应性。(4)干式切削技术,强调在加工过程中最小化或不使用切削液,以减少对环境的污染和对工人健康的危害。通过创新刀具材料、使用涂层提升耐热润滑性能,优化切削参数如速度、进给量来减少热量和力的产生,降低了对冷却液的依赖。干式切削技术在材料加

通讯作者: 白亚群, 1990年10月, 硕士, 工程师。
研究方向机械制造, 工艺技术, 数控加工技术。

工中表现出色,尤其在铝合金加工中,无需切削液即可获得高质量和高效率。

2 切削加工技术在各工业领域的应用

2.1 航空航天领域

航空航天零件因独特的应用场景与性能需求,呈现出形状复杂、精度要求超高以及材料难切削等显著特点。^[2]如航空发动机涡轮叶片会极大影响发动机的性能和可靠性,必须确保叶片的形状、尺寸精度和表面粗糙度。叶片常由具有高强度和低热导率的高温合金或钛合金制成,这些材料加工过程复杂,高速切削技术和超硬刀具材料(如CBN刀具)的协同应用是当前加工这些叶片的主流策略。高速切削提升了加工效率,减少了刀具磨损,CBN刀具在高硬度材料的切削环境下仍能维持出色的性能。此外,飞机机翼大梁和机身框架常由铝合金或复合材料制成。精密铣削技术为应对铝合金虽易加工但尺寸和薄壁易导致变形的问题而广泛应用,通过优化铣削参数和使用高精度数控铣床,可以有效控制变形,提高加工精度。例如,在机翼大梁加工中,高速精密铣削配合真空吸附装置,能将变形控制在最小,确保装配精度和飞行性能。此外,复合材料具有各向异性,硬度不高但纤维韧性好,加工易分层撕裂,因此需匹配特定刀具和工艺。因而在实际切削加工通过应用金刚石涂层刀具,优化切削参数以及进给量等参数,可以减少分层撕裂概率,提高加工质量。

2.2 汽车制造领域

汽车制造涉及众多零部件的加工,对切削技术有广泛需求。一方面发动机作为汽车的关键部分,其内部零件如曲轴、缸体等均对精度与表面质量有着极为严苛的要求。因而传统的车削、铣削、钻削、镗削等技术依旧占据着重要地位,并始终处于持续创新与发展的进程之中。如高速镗铣加工中心可结合先进刀具和在线测量技术,实现发动机缸体的高效、高精度加工,并确保加工质量稳定。硬切削技术在汽车齿轮加工中更为普及,如运用CBN刀具精切淬硬齿轮,相较传统磨齿工艺不仅提高效率,还能降低成本,缩短生产周期。此外,干式切削和微量润滑技术在铝合金零部件加工中也备受关注,不仅可以有效减少切削液的使用量,从而降低对环境的污染压力,并且通过对刀具材料的优化筛选以及工艺参数的精细调整,能够确保加工表面质量与精度达到预期要求。另一方面,随着汽车轻量化理念的深入推进,轻质材料如铝合金和镁合金在汽车制造中越来越受欢迎,但它们的切削加工特性与传统钢铁不同,因此开发相应的加工技术变得迫切,因而汽车制造中的切削加工正买

入快速智能化的发展轨道。如利用智能传感器、大数据和人工智能算法,实现了对加工过程的智能监控、故障预测和工艺优化,显著提升了生产效率和产品质量,为汽车制造业的现代化提供了技术支持。

2.3 模具制造领域

模具作为工业生产中成型各类产品的关键工艺装备,其制造过程对切削技术存在特殊要求。具体来说,模具材料通常是高硬度的钢材或合金,如模具钢和硬质合金,这要求切削刀具必须硬、耐磨且有韧性,以实现精确加工;同时模具的核心部分如型腔和型芯形状复杂,精度要求高,并且为避免加工引起的表面应力和裂纹影响模具寿命和产品质量,模具制造更加注重表面完整性;此外,模具加工要快速完成才能适应新产品开发,因而对加工效率也有更高要求。在模具制造领域,切削加工技术不仅应用广泛,还展现出显著优势。^[3]首先,高速切削因能够迅速去除模具材料,有效缩短模具制造周期,并且切削速度快,工件热变形小,所以可以获取较好的表面质量和较高的加工精度,对提高模具使用寿命和成型产品质量颇为有利,因而在模具加工中被大量采用。其次,针对淬硬后的模具钢零件,采用硬切削工艺能够实现“以切代磨”,减少加工工序,提升加工效率和加工精度。此外,精密与超精密切削技术在模具的分型面、镶块配合面等加工中应用广泛。通过采用高精度机床和刀具,能够保障这些部位的尺寸精度和表面质量,从而提升模具的装配精度和整体性能。

2.4 其他工业领域

除上述重点领域外,切削加工技术在众多其他行业也发挥着关键作用在能源电力领域,制造汽轮机和发电机等大型设备时,必须确保零件的尺寸、形状和表面质量以满足高性能需求。船舶制造行业要求高精度的切削加工和材料性能,以适应恶劣的工作环境和大型部件。通用机械制造中,泵、风机、压缩机等设备的质量和性能依赖于精确的切削加工技术。医疗器械制造领域,切削加工技术对于制作符合人体工程学和医疗功能要求的手术器械和植入式医疗器械至关重要。不过值得注意的是,不同规模企业应用切削加工技术存在差异。大型企业资金和技术实力强,能引入先进设备和技术,并配有专业技术人员进行工艺研发和生产管理。这些企业在应用切削加工技术时,更加强调技术的先进性和创新性,旨在提升生产效率、产品质量,进而增强企业竞争力。中小企业则受限于资金和技术,更注重实用性和经济性,往往选用性价比高的切削设备和更为成熟的传统工艺,在工艺优化和成本控制方面下功夫。不过,随着智

能制造技术的日益普及和市场竞争加剧,中小企业也逐渐开始关注并引进一些先进的切削加工技术,比如通过租赁或共享智能切削加工设备的方式来提升企业的加工能力和产品质量。

3 切削加工技术的未来展望

3.1 智能化切削加工

智能化切削加工作为切削加工技术演进的关键趋向,正逐渐重塑行业格局,为制造业的生产模式带来显著改变。由智能机床、刀具、传感器、大数据平台和AI算法组成智能切削系统是其发展核心,能够实现实时监控并调整加工参数,有助于快速响应不同产品需求并保证加工质量和稳定性;还能监测刀具状态和切削参数,并挖掘运作规律,基于分析结果进行智能决策,对于优化工艺、提高加工效率、质量和可靠性均有极大优势。通过智能化切削加工,企业能高效生产定制零件,不仅有助于企业从大规模生产向个性化定制的转型,更能推动协同制造模式的发展,实现设计、装配、物流等环节的信息共享和高效协作。此外,智能化切削还能通过优化加工过程,减少能源消耗和环境影响,支持制造业的绿色可持续发展。

3.2 绿色切削加工

绿色切削作为制造流程中的核心环节,凭借削减切削用量、降低能源消耗、提升材料利用率等举措,能够为可持续制造战略提供有力支撑。^[4]例如,以干式切削或微量润滑切削技术替代传统湿式切削手段,能够显著削减切削液的消耗与处理成本,同时降低因切削液排放所致的环境污染;通过优化切削工艺参数提升材料去除率,减少原材料的浪费现象,增强资源利用效率。再者,绿色切削的持续发展亦将牵引关联产业的绿色转型进程,诸如刀具制造企业为契合绿色切削需求,致力于研发与生产更为环保的刀具材料及涂层;机床制造企业着力开发更为节能、环保的智能机床等,以此推动整个制造业产业链的可持续性演进与发展。未来,切削加工将持续展现出朝着更为环保、高效路径前行的显著态势。持续推进诸如低温冷风切削与液态氮冷却切削等新型绿色切削技术及工艺的研发与普及进程势在必行。

3.3 微纳切削加工

微纳切削加工作为切削加工技术在微观领域延伸拓展的前沿分支,正面临着系列严峻的技术挑战。微纳尺度下制备高精度刀具和控制刃口半径需要新型加工技术如聚焦离子束和电子束光刻,但这些技术成本高且效率低。同时,精确加工和检测手段存在局限性。其二,微纳切削的尺度效应显著,传统切削理论已无法完全适用于此,需要新理论模型指导实践。其三,由于加工持物微小,微纳加工精度和表面质量控制困难,需开发高精度机床和先进测量技术以确保产品质量。然而近年来,微纳刀具制备、微纳切削理论和微纳加工机床研发等领域也取得了显著进展。例如,采用新型刀具材料和涂层,显著提升了微纳刀具的性能;借助分子动力学模拟等手段,对微纳切削过程中的尺度效应有了更为深入的理解;微纳加工机床的定位精度和运动精度不断提高,为微纳切削加工提供了更为坚实的硬件基础。未来,随着微纳切削技术的不断发展与完善,其应用也必将不断拓展与深化,为相关领域的科技进步注入强劲动力。

结语

从古代的原始切削到近代的传统切削,再到现代的高速切削、精密与超精密切削、硬切削、干式切削等先进技术的出现,切削加工技术经历了漫长的发展历程,并逐渐在各个工业领域都有着广泛而深入的应用。随着科技的持续进步和研究的深入,切削加工技术未来将朝着智能化、绿色化、微纳化方向发展,也必将在未来的制造业中发挥更为重要的作用,创造更多的价值。

参考文献

- [1]黄春莲.机械制造过程中金属切削刀具的应用[J].南方农机,2022,53(21):135-138.
- [2]周瑜.高速切削加工技术及其加工工艺[J].当代农机,2022,(08):53-54.
- [3]沈宇峰,许爱军.高速切削技术的研究与发展[J].新技术新工艺,2022,(02):5-9.
- [4]胡桂领.绿色切削中干式切削技术研究[J].石河子科技,2021,(06):39-40.