

超声加工技术的发展及其在航空航天制造中的应用潜能

Development and Application Potential of Ultrasonic Machining Technology in Aviation and Aerospace Manufacturing

清华大学精密仪器与机械学系 郑书友 冯平法 吴志军 郁鼎文



郑书友

博士, 清华大学精密仪器与机械学系博士后。主要从事超声加工机床研制, 超硬磨料刀具制备及其应用和硬脆材料加工等方面的研究。参加国家重大专项 1 项, 863 计划项目 1 项, 摩擦学国家实验室资助项目 1 项, 申请专利 1 项, 发表论文 10 余篇。

陶瓷、光学玻璃、功能晶体、金刚石、宝石和先进复合材料等具有优越的物理、化学和机械性能, 在航空、航天、军工、电子、汽车和生物工程等领域正得到越来越广泛的应用, 并且其

超声技术在工业中的应用开始于 20 世纪 10 ~ 20 年代, 它是以经典声学理论为基础, 同时结合电子技术、计量技术、机械振动和材料学等学科领域的成就发展起来的一门综合技术。旋转超声加工是集普通超声加工与磨粒磨削加工为一体的复合加工, 是加工硬脆性材料的一种高效方法, 必将在航空航天制造中具有广阔的应用潜能。

应用还在不断向新的领域扩展。与此同时, 人们开始探索特种加工方式来加工这些难加工材料。超声加工技术就是在此背景下发展起来的, 实践证明, 它是加工上述难加工硬脆材料的高效和经济有效的方法之一。

超声技术在工业中的应用开始于 20 世纪 10 ~ 20 年代, 它是以经典声学理论为基础, 同时结合电子技术、计量技术、机械振动和材料学等学科领域的成就发展起来的一门综合技术。超声技术的应用可划分为功率超声和检测超声两大领域。其中, 功率超声是利用超声振动形成的能量使物质的一些物理、化学和生物

特性或状态发生改变, 或者使这种状态改变加快的一门技术。功率超声在机械加工方面的应用, 按其加工工艺特征大致分为 2 类, 一类是带磨料的超声磨料加工(包括游离磨料和固结磨料), 另一类是采用切削刀具与其他加工方法相结合形成的超声复合加工。具体如图 1 所示。

超声加工技术的发展

1927 年, 美国物理学家伍德和卢米斯最早作了超声加工试验, 利用超声振动对玻璃板进行雕刻和快速钻孔。但当时超声加工并未应用到工业上, 直到大约 1940 年在文献

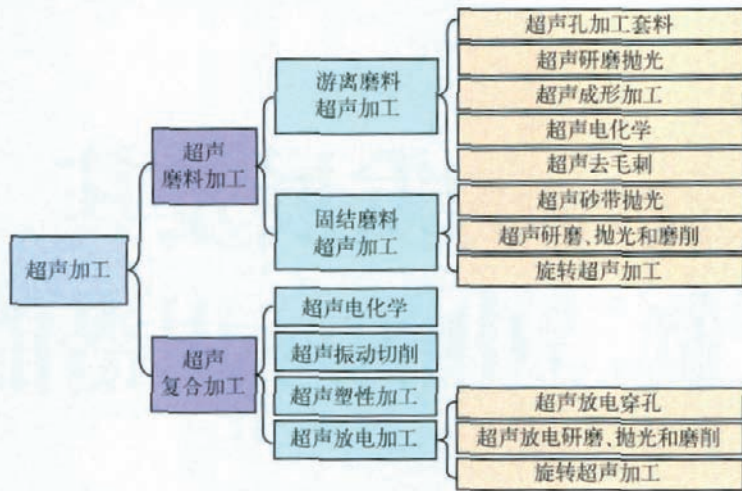


图1 超声加工类别

上第一次出现超声加工(USM - Ultrasonic Machining)工艺技术描述以后,超声加工才吸引了大家的注意,并且逐渐融入到其他的工业领域。1951年,科恩研制了第一台实用的超声加工机,为超声加工技术的发展奠定了基础。

USM 提供了比常规机械加工技术更多的优点。例如,导电和非导电材料它都可以加工,并且加工复杂的三维轮廓也可以像简单形状那样快速。此外,超声加工过程不会产生有害的热区域,同时也不会在工作表面带来化学/电气变化,而且加工时在工作表面上所产生的有压缩力的残余应力可以增加被加工零件的高周期性疲劳强度。

然而,在 USM 中必须供给磨料工作液,并且要保证加工过程中能有效清除刀具和工件间隙中的切屑和磨损磨粒。因此,材料的去除速率相当慢,甚至于在切削深度较大时会停止工作。而且,在磨粒及切屑混合液的流通过程中,对已加工表面或者孔壁会造成二次磨蚀,导致工件加工精度的降低,尤其是小孔加工。此外,磨料工作液还会磨蚀刀具本身,它将引起刀具端面及径向的大量磨损,从而很难保证加工精度。

为了克服这些问题,P. Legge

提出采用固结金刚石刀具,结合工件的旋转进行孔加工的方法,形成了最初的旋转超声加工。这种加工方法克服了普通超声加工中游离超硬磨料液在刀具和工件之间流通不畅,以及磨料对加工刀具和加工孔壁的磨蚀等问题,同时使加工精度和材料的去除率得到了显著提高。后来研制了一种具有旋转超声振动系统的超声加工机床,固结式金刚石刀具以一定的静压力作用到工件材料上,并以一定振幅作轴向超声频振动,同时还作相对于工件的高速旋转运动,并且冷却液不断地被输送到刀具和工件表面之间,这种方法已被证实是一种高效低成本的硬脆性材料加工方法。

因此,旋转超声加工技术一直倍受各国研究学者的关注。英、美、苏、德、日和中等国家已对超声旋转加工设备的研制以及工艺方法作了一些研究。其中,典型的旋转超声加工机床特性如表1所示。

当前,旋转超声加工技术的应用范围,已由最初的旋转超声孔钻削加工,扩展到旋转超声磨削加工、旋转超声平面铣削加工等加工方式。

通过对超声加工刀具与工件间运动学关系的分析以及对加工工件表面质量和刀具磨损等方面的研究,大家普遍认为旋转超声加工的机理

主要包含以下几个相互作用的因素:刀具头上金刚石磨料在超高加速度下对工件材料表面的锤击作用,致使工件的局部应力远远超过材料的断裂极限,这种应力使材料表面产生压痕,导致微细裂纹的产生、扩展,最终形成微观局部破碎去除;同时,金刚石刀具相对于工件材料的高速旋转,使得嵌入工件表面的磨粒在工件表面上划擦、磨抛以及撕扯工件材料,这种磨抛作用大大加速了微裂纹的扩展,造成了材料的宏观破碎去除。A.I.Markov, D. Prabhakar 和 Z. J. Pei 等人先后推导出基于脆性断裂去除模式的旋转超声钻削中材料去除率理论模型。后来 Z.J.Peii 等人研究发现在旋转超声钻削先进陶瓷中,材料的去除机理包括脆性去除和塑性去除,于是在1998年提出了基于塑性变形去除模式的旋转超声钻削中材料去除率理论模型。此外,超声加工中工作液受刀具端面超声振动作用而产生高频、交变的正负压冲击波和空化作用,促使工作液进入被加工材料的微裂缝,加剧了机械破坏作用,加工过程得到加强。而且,超声空化爆破作用和刀具的旋转运动使碎屑始终处于运动状态,同时阻止了碎屑的沉积过程,促进了碎屑在工作液中流动,加速了碎屑的排出,推进了加工的进行。上述几个加工机理的相互促进和综合作用,大大地提高了材料的去除率。

旋转超声加工的特点及优势

随着各种先进材料应用需求的不断扩大,激光加工、高压水切割、电火花加工、电子束加工和电化学加工等特种加工方法均得到了较快的发展,相比传统加工方法,其特色和优越性得到较好的展示。激光加工的特点是切缝小、速度快、能大量节省原材料和可以加工形状复杂的工件,但是加工表面热损伤很难控制;高压水切割的特点是切口质量高、结构

表1 国内外旋转超声加工机床技术特征

| 国家 | 研制单位 | 机床名称 | 主要技术特征 |
|-----|---------------|---------------|--|
| 美国 | Sonic-Mill 公司 | Sonic-Mill 10 | 转速:0~8000r/min, 中心频率:20KHz, 功率:500W, 适用于小孔加工 |
| 德国 | DMG 机床 | Ultrasonic 50 | 转速:0~6000r/min, 频率:17.5~30KHz, 功率:300W, 最小孔径: ϕ 0.3mm, 最高精度 0.2 μ m |
| 英国 | Kerry 超声公司 | UMT-5 | 功率:250W, 频率:20KHz |
| 日本 | 超音波工业公司 | UMT-7 | 功率:450W, 频率:20KHz, 加工孔径 ϕ 1.6~10mm |
| 前苏联 | 莫斯科航空工艺研究院 | УЗБГ-4 系列 | 转速:0~2500r/min, 功率:400W, 频率:44KHz, 加工孔径 ϕ 2.5~10mm |
| 中国 | 清华大学 | 旋转超声加工机床 | 转速:100~3000r/min, 频率:18~25KHz, 功率:250W, 加工孔径 ϕ 1.5~30mm |
| 中国 | 华侨大学 | 旋转超声加工机床 | 转速:0~3500r/min, 中心频率:20KHz, 功率:1000W, 适用于直径 ϕ 60mm 以下孔及面加工 |

完整性好以及速度快,特别适宜金属基复合材料的切割,但是加工系统复杂;电火花加工和电化学加工则要求加工工件具有导电性。旋转超声加工是集普通超声加工与磨粒磨削加工为一体的复合加工,是加工硬脆性材料的一种高效方法,相比其他特种加工方法,它具有其独特的优势:

(1) 超声加工可以加工导电和非导电等各种硬脆性材料,如陶瓷、宝石、硅、金刚石和大理石等非金属材料;也适用于加工低塑性和硬度高于HRC40的金属材料,如淬火钢、硬质合金、钛合金等金属材料;

(2) 由于工件材料主要依靠磨粒瞬时局部的冲击作用,故工件表面的宏观切削力很小,切削热就少,不会因产生变形及烧伤而改变工件表面的化学/电性质,故加工精度和加工表面质量都比较好。与其他材料去除过程相比,超声加工能达到更高的精度和表面光洁度,同时还能延长刀具寿命;

(3) 旋转超声加工采用固结磨粒的刀具对加工工件进行高频、断续加工,是超声加工和切、磨削加工的复合加工方式,比单纯的超声加工和切磨削加工具有更突出的优势,可以有效地提高已加工表面的耐磨性和耐腐蚀性。同时,旋转超声加工的复

合加工机理,更适宜于硬脆性材料的加工,其去除率可以达到普通切磨削的6~10倍,是普通超声加工材料去除率的10倍。

超声加工技术在航空航天制造中的应用潜能

现代航空航天制造业已不是传统意义上的机械制造业,它是集机械、电子、光学、信息科学、材料科学、生物科学、激光学和管理学等学科的最新成就为一体的一个新技术与新兴工业的综合体。航空航天制造工程的发展水平对飞机、火箭、导弹、激光武器和航天器的可靠性和使用寿命的提高,综合技术性能的改善,研制和生产成本的降低,甚至总体设计思想能否得到具体实现均起着决定性的作用。

航空航天技术的发展对材料性能的要求愈来愈高,比如强度和比刚度高、有一定的耐高温和抗低温性能、有良好的耐老化和抗腐蚀能力、有足够的断裂韧性和良好的抗疲劳性能。因此,高温合金、钛合金、高强度钢、先进复合材料和工程陶瓷等材料得到了越来越广泛的应用。如碳纤维复合材料具有密度低、比强度和比模量高、可设计性强、抗疲劳性能好、耐腐蚀性能好和结构尺寸稳定性好

等优点,在航空领域获得了广泛的应用。截至2008年,波音B787飞机上复合材料的用量已突破性地达到了50%,其后空客公司制造的A350飞机上复合材料的用量也将达到52%。

再者,功能晶体材料由于其优异的物理、化学和光学性能在航空航天、国防军工、信息、微电子及光电子等尖端科技领域得到越来越广泛而特殊的应用。如何实现光学晶体材料零件的高效精密与超精密加工已成为当前各国关注的新焦点。

对于功能晶体材料零件,除要求满足机械尺寸精度外,还要保证零件的光学功能特性,传统的加工工艺流程(磨削后进行研磨和抛光)工序多、周期长、成本高,相应地产品废品率较大,特别是脆性光学零件的精密磨削加工,容易造成加工表面和亚表面损伤。大量理论和试验研究表明,由于超声振动的引入,材料在加工过程中的变形行为、加工机制和刀具受力状态等会发生完全不同于常规机械加工的变化,具有特殊的工艺效果,如切削力小、切削热少,因而不会或者较少引起加工表面的热损伤以及由此引起的电/化学及光学性质的变化,从而可显著提高零件加工质量,并且加工过程平稳,刀具的使用寿命得以大幅度提高,是脆性材料精密、高效加工的一种有效方法。而如何利用这些优势实现光学晶体材料的精密超声加工,降低加工表面和亚表面质量损伤,并没有得到充分有效的发挥和应用。

近两年,国内军工企业也引进了几台高水平的旋转超声加工机床,尝试用于脆性材料的精密加工,但由于对超声加工机理和工艺缺乏系统的研究,使用效果并不理想。在超声加工机床和工艺参数范围既定的情况下,刀具参数的选择对于加工效果有着至关重要的影响。为了拓展超声加工在航空航天及军工国防领域的应用,单就超声加工刀具方面,作者

认为应该从以下几个方面给予充分考虑。

1 超声加工刀具基体材料选择

在功率超声加工中,要求刀具必须能够承受高频交变载荷,有效传导由变幅杆传递过来的超声能量,因此,对刀具基体的尺寸、截面形状及材料等提出了特殊要求。功率超声加工主要考虑刀具与超声振动系统的匹配连接,使得超声能量得以有效传递,并且在刀具的输出端面上有最大的能量(振幅)输出。因此,要求刀具基体材料具有较低的声阻抗和较高的超声能量极限强度,否则会因为超声能量在传递过程中的耗损而引发刀具发热,严重时可导致刀具断裂、超声振动系统不工作甚至是超声波电源功率器件或线路的烧毁损坏。

由此,在超声加工的实际应用中,考虑上述旋转超声加工对金刚石刀具基体材料的要求,同时结合变幅杆的材料选择以及刀具与变幅杆的声阻有效匹配,需要合理选择金刚石刀具的基体材料。超声加工要求基体材料内部晶粒细小、匀质,不能出现内部裂纹或者气穴等缺陷,否则振动能量会产生反射和衍射,导致能量衰减剧增,从而无法实现超声能量的有效传递,并可能导致裂纹迅速扩展,致使刀具失效。必要时,要对材料进行适当的热处理,调质材料内部晶粒均匀性,降低材料的声阻抗,同时增大其强度。

2 超声加工刀具基体结构设计

旋转超声加工是超声振动和金刚石刀具切削相结合的高效加工方法,其去除率大大高于单一的传统超声加工和金刚石刀具切磨加工方法。因此,提高排屑能力和金刚石刀具冷却效果是保证旋转超声加工效率和刀具寿命的重要手段。

根据不同功率大小超声加工机床的实际情况,从能量的有效传递和利用的角度出发,对刀具的结构参数进行合理设计,尤其是工作端面的优

化设计,包括工作端面截面大小、形状、壁厚以及水槽的有无和大小等因素。刀具基体的结构设计,一方面要避免刀具结构参数设计不当造成的热和应力集中,另一方面要使得刀具有效地工作在换能振子的工作频带范围内。

3 超声加工刀具磨料层的制备

在旋转超声加工刀具的设计与制造方面,相比传统超硬磨料刀具在磨削和抛光加工中所引起的广泛注意力,目前关注的还比较少。而刀具作为材料去除的关键因素,其工作端面的几何参数、超硬磨料的种类和粒度、浓度以及制作的工艺等方面都关系到刀具的寿命以及加工表面质量的优劣。

目前,国内外用于旋转超声振动加工的工具均为电镀或者粉末冶金烧结而成的金刚石工具。但是,由于在电镀或者粉末冶金烧结中很难形成金属与金刚石磨料的有效化学冶金结合,因而电镀层或者金属结合剂对金刚石磨料的把持力较小,在较重负荷加工中,金刚石磨料的非正常脱落现象较为严重,导致工具磨损也较为严重,这些都直接制约了旋转超声加工的普及和推广。而钎焊金刚石工具能在结合界面上实现化学冶金结合,从根本上改善磨料、结合剂(钎焊合金材料)和基体三者间的结合强度,在高速高效率磨削中能够承受较大的负荷。作者在前期的旋转超声加工研究中,已经证实钎焊工具完全能够胜任旋转超声加工中的高频冲击加工,而且在加工过程中基本不存在磨粒的脱落和破碎磨损,其工作过程也较为平稳。这为航空和航天等高科技领域中广泛使用的功能晶体材料的精密加工提供了一个非常有利的条件。通过加工工艺参数的优化选择,配合高效钎焊工具的使用,能够克服在传统精密磨削晶体材料时,由于工具的自锐及砂轮上磨粒的破碎和脱落对加工表面的二次损

伤,从而提高零件表面的完整性。

结束语

随着各行业对于新型材料需求的增加,超声加工技术的发展和研究也倍受关注,使得在超声加工工艺以及超声加工机床的研制方面取得了丰富的成果。但是,旋转超声加工相对其他特种加工方法在航空航天以及军工和国防工业中的应用,并没有凸现其固有的优势。这在很大程度上受限于超声加工技术的发展相对缓慢,主要因为数字化高性能的超声加工机床出现时间不长,而且大功率超声加工机床稳定工作还存在一些需要攻克的难题。如市场化的数控旋转超声加工机床,满额超声功率在500W以下,而且长时间工作下只推荐使用几十瓦甚至是十几瓦的超声功率。因此超声加工硬脆材料潜能的开发还有待于机床性能的进一步完善。

同样,超声加工刀具的研究相对于传统切磨加工刀具而言也没有得到广泛的关注。而在超声加工中,实现刀具与超声振动系统之间的有效连接,能否平稳传递超声能量,是机床能否正常工作的关键所在。在刀具的设计与制造方面,可以借鉴传统超硬磨料刀具制作的工艺方法和相关的研究成果,结合超声加工的特点,对超声刀具的结构参数以及工作端面磨料层的制备,包括磨料的种类和粒度、浓度和制作工艺等方面因素作详尽的研究,从而有效地提高加工刀具的寿命,保证加工表面的质量。

我们相信,在超声加工机床性能日益完善的条件下,随着超声加工工艺条件的不断优化和提高以及适宜于超声加工的刀具的开发和应用,超声加工技术的应用领域将得到大大的扩展,它必将在航空和国防工业中广泛使用的先进复合材料以及功能晶体材料的精密加工上大有作为。

(责编 玉龙)