

难加工材料超声辅助切削 加工技术*

Ultrasonic Assisted Machining of Difficult-to-Cut Material

大连理工大学精密与特种加工教育部重点实验室 康仁科 马付建 董志刚 郭东明



康仁科

大连理工大学教授、博士生导师。国际磨粒技术学会委员、中国机械工程学会生产工程分会委员、磨粒加工专业委员会副主任和切削加工专业委员会委员、中国刀协切削先进制造技术研究会常务理事。主要研究方向为超精密与特种加工技术、难加工材料高效加工技术、计算机辅助设计与制造。主持国家“973计划”和“863计划”课题、国家基金重点项目和其他科研项目20多项。获国家技术发明一等奖1项、教育部技术发明一等奖和科技进步一等奖各1项。

为了实现难加工材料高质量、高精度、高效率加工,满足不同应用领域难加工材料零件的加工要求,目前,超声辅助切削加工技术通过借鉴其他加工技术的发展经验,正不断向微细化、高效化、精密化、自动化、智能化等方向发展。

高性能合金(如高温合金、钛合金、高强度钢等)、复合材料、硬脆材料(如光学玻璃、工程陶瓷和功能晶体)等先进材料具有优异的性能,在航空、航天、军工、电子和汽车等领域得到越来越广泛的应用。复合材料具有密度低、比强度和比模量高、可设计性强、耐腐蚀性能好、抗疲劳性能好和结构尺寸稳定性好等优点,在航空航天领域主要用于制造如机翼、尾舵、刹车盘、制动鼓、仪器舱段、支架等复杂结构件和零件。这些经过成型制备的复合材料结构件和零件上,许多连接装配和附件安装用的孔、窗口、型腔和安装定位面等需要进行精密机械加工。航空航天领域典型的复合材料和硬脆材料结构件和零件如图1所示。这些结构件和零件不仅对加工精度和加工质量要求高,而且对加工效率也有很高要求。由于这些复合材料硬脆材料具有硬度高、脆性大和耐磨性好等特

点,材料切削加工性差,零件加工要求高,很难用传统机械加工方法和加工工具进行加工。因此,如何实现难加工材料零件的高质高效精密加工已成为当前国内外关注的课题。

为了适应各种先进材料不断扩大的应用需求,一方面,传统机械加工技术通过自身的不断更新发展以及与其他相关技术的融合,在一些难加工材料加工领域(尤其在模具加工、铝合金和钛合金结构件加工等)表现出了加工精度和加工效率方面的优势。另一方面,利用光、电、声、热、化学、磁和原子能等能量进行加工的特种加工方法(包括激光、超声、电火花、电化学、高压水切割等)得到了较快的发展,在一些高性能合金和硬脆材料等难加工材料加工领域显示出一定的优越性。但是,无论是传统机械加工,还是特种加工方法,多数是直接利用单一能量进行加工,在加工效率、精度、表面质量和工具

* 国家“973计划”(2011CB013201)、国家青年科学基金项目(51105055)和博士点基金(20100481128)资助。

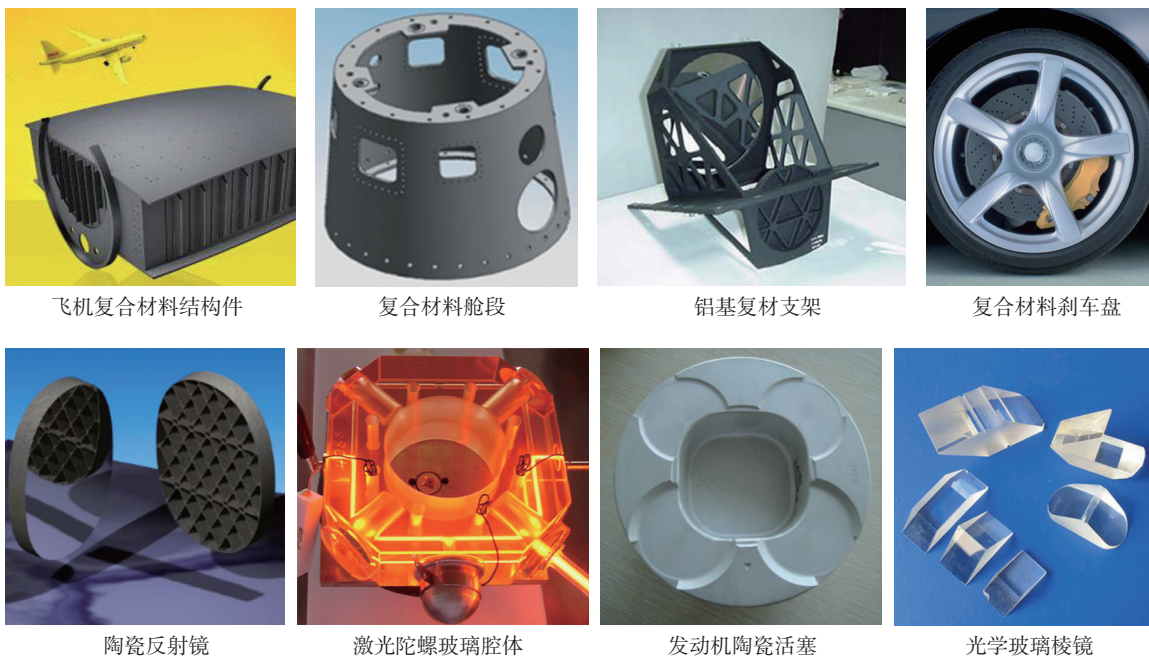


图1 典型的难加工材料零件

寿命等方面必然存在一定缺点和局限。于是,利用多种形式能量的综合作用的复合加工技术出现了。复合加工技术可以根据加工材料特性以及加工精度和效率的要求,通过传统加工和特种加工方法的复合,不同特种加工方法的复合等多种形式组合出各具特点的新的复合加工方法,达到优势互补,成为机械加工技术的重要发展方向之一。

超声加工作为 20 世纪初发展并开始应用于工业领域的一种非常有效的特种加工方法,特别适合于加工玻璃、陶瓷、石英、金刚石、硅等各种硬脆材料,并已得到了广泛应用。将超声加工与传统的切削加工结合所形成新的加工技术是一种典型的复合加工技术,多年来的研究和应用实践表明,这一复合加工技术既充分发挥了机械加工和超声加工这两种加工技术的优点,又弥补了两种技术的局限和不足,因而具有一些突出优点。超声辅助切削加工技术不仅可以有效降低切削力、提高加工质量、减小刀具磨损和提高加工效率,而且拓展了可加工材料和可加工零件的

适用范围和应用领域。近年来,国内外研究人员针对难加工材料的超声辅助切削加工开展了大量的研究,一些机床生产商还开发了超声辅助切削加工机床。超声辅助切削加工技术已成为难加工材料零部件加工中主要先进加工技术之一,具有重要的应用价值和广阔的应用前景。

本文针对航空航天等领域中典型难加工材料零件加工的技术需求和应用背景,结合作者和国内外学者的研究成果,介绍了几种超声辅助切削加工技术的原理、特点和应用效果,以及这一复合加工技术的一些新的进展。

超声辅助切削加工技术的原理、系统与分类

超声辅助切削加工是在传统切削加工中工具与工件相对运动的基础上,在切削工具或工件上施加超声振动,以获得更好加工性能的加工方法。超声辅助切削加工过程中,通过工具对被加工材料的机械和超声复合作用,使工具与被加工材料的接触状态和作用机制发生变化,主要通过

机械切削作用、高频微撞击作用以及超声空化作用等进行材料去除。由于超声振动的引入,改变了材料去除机理,降低了工具与工件之间的摩擦力,减少了工具与工件的接触时间,增强了工具对工件的切削去除作用,从而有效地提高了材料去除率,减小切削力,降低切削热,减少刀具磨损,改善加工精度和质量。

超声辅助切削加工系统主要由超声电源、超声能量传输系统、超声换能器、超声变幅杆、工具或工件、冷却液供给单元等组成。在超声辅助切削加工过程中,超声电源通过超声发生器将产生大于 15kHz 的高频电信号,并经过功率放大后输出功率超声信号,通过传输系统将功率超声信号传输到超声换能器,再经过超声换能器将电信号转换成相应频率的机械振动,通过超声变幅杆将机械振动的幅度增大,并传递给工具或工件,使其产生超声振动,实现超声辅助切削加工。根据超声辅助切削加工的方式不同,超声辅助切削加工技术的分类如图 2 所示。

本文结合航空航天难加工材料

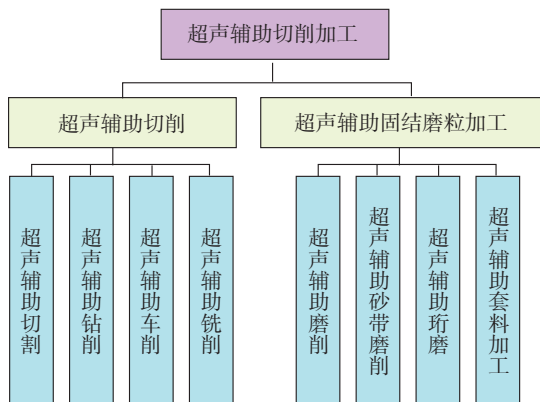


图2 超声辅助切削加工分类

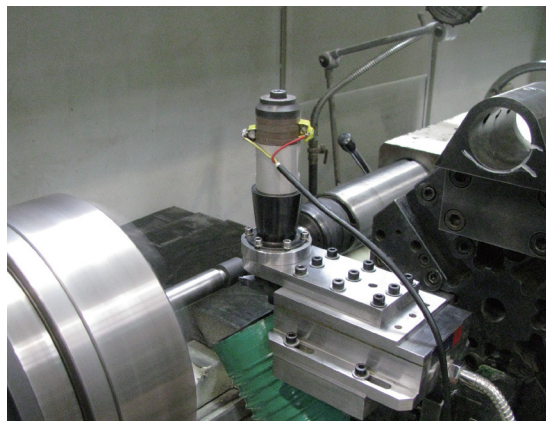


图3 超声辅助车削加工装置

零件的加工,介绍了超声辅助车削、超声辅助钻孔、超声辅助磨削和超声辅助切割等几种先进加工技术。

超声辅助车削技术

超声辅助车削是在普通车削机床运动基础上,在车刀上施加超声振动。超声振动方向主要有沿着工件旋转方向切向的振动和沿着进给方向的振动。图3为作者研制的一种安装在普通卧式车床上的超声辅助车削加工装置。

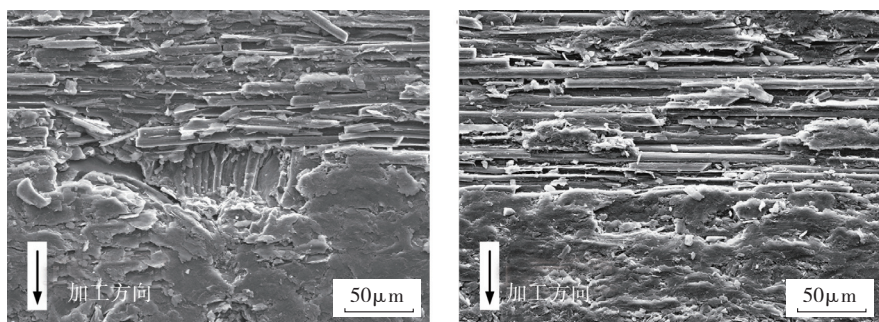
采用聚晶金刚石(PCD)刀具普通车削和超声辅助车削碳纤维复合材料的加工表面形貌和刀具磨损对比如图4和图5所示。

与普通车削加工表面相比,超声辅助车削表面碳纤维和基体过渡部位相对较光滑,碳纤维复合材料表面加工质量明显改善,刀具磨损量可减小约30%左右^[1-2]。采用硬质合金刀具普通车削和超声辅助车削Ni718和C263等高温合金并和普通车削加工质量进行对比试验表明,

超声辅助车削的加工表面粗糙度降低25%~50%,圆度提高40%~50%^[3]。超声辅助车削还可应用于铝基碳化硅等金属基复合材料的加工,和普通车削加工相比表面粗糙度可降低25%左右,切削力降低1/3~1/2^[4]。超声辅助车削作为先进的复合加工技术,已在发动机轴、叶轮胚体、机匣和活塞等航空难加工材料零件加工领域获得了重要应用。

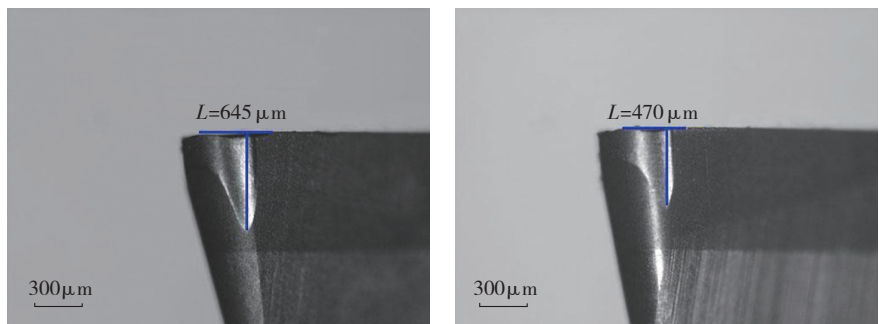
二维的超声椭圆振动车削(UEVC)是新发展起来的一种加工方法。目前UEVC的驱动主要包括两种方式:一种是非共振方式,目前主要是基于平行配置压电叠堆和相互垂直配置压电叠堆的直驱结构,这种椭圆振动需要两个激振源同时激振,其工作原理和基于该原理研制的加工装置如图6所示^[5]。另一种是共振方式,主要是利用变幅杆的两个模态振动组合实现椭圆振动,其工作原理如图7所示。

研究表明,这种方法不仅能够减小切削力,改善加工精度和表面质量,减少刀具磨损,而且能实现脆性材料延性切削,既可以用于宏观加工,也可以进行微细结构加工。近几年来这种加工方法受到国际学术界和工程界的高度关注。此外,名古屋大学的社本教授等人还提出了三维UEVC的概念,代表了UEVC的最新进展^[6]。



(a)普通车削 (b)超声车削

图4 碳纤维复合材料车削表面形貌



(a)普通车削 (b)超声辅助车削

图5 刀具后刀面磨损

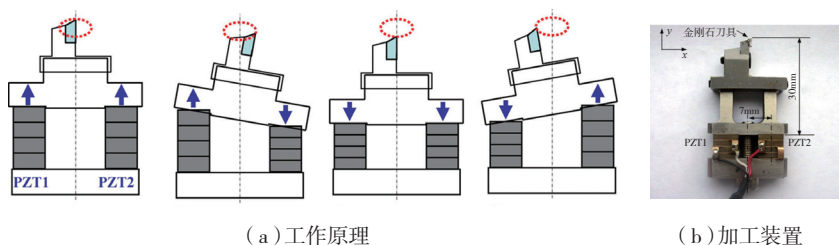
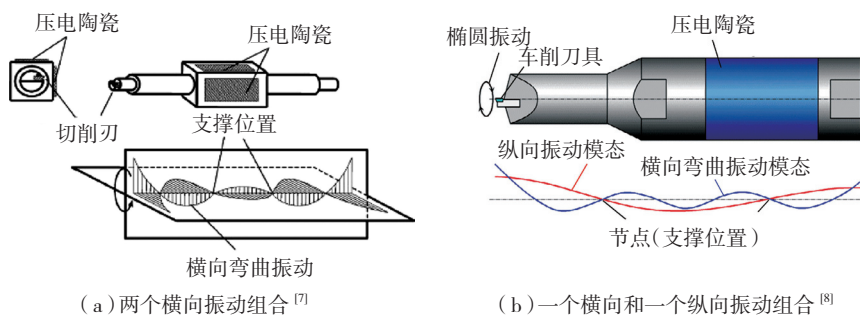
图6 非共振超声椭圆振动车削^[5]

图7 双模态椭圆振动超声辅助车削

超声辅助钻削技术

超声辅助钻削技术是在传统钻削机床的加工运动基础上,在旋转的钻削工具上施加超声振动,实现超声辅助钻削。图8所示为作者研制的超声辅助钻削装置。

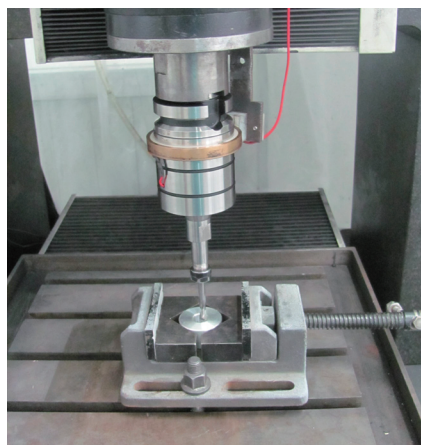


图8 超声辅助钻削加工装置

超声辅助钻削较早应用于钛合金、高温合金和复合材料等难加工材料的钻削加工。利用硬质合金钻头超声辅助钻削和普通钻削镍基高温合金材料的出口形貌和切屑形貌如图9和图10所示。结果表明,超声辅助钻削的出口毛刺小且少,切屑为

断续切屑,利于切屑的排出。与普通钻削加工相比,超声辅助钻削高温合金的表面粗糙度可以降低60%^[9]。利用WC硬质合金钻头超声辅助钻削Ti6Al4V钛合金材料时,切削力比普通钻削降低20%左右^[10]。目前,超声辅助钻削在航天器、飞机机体和发动机中难加工材料关键零部件的定位孔、连接孔、冷却孔和深小孔的加工中具有重要应用价值和应用前

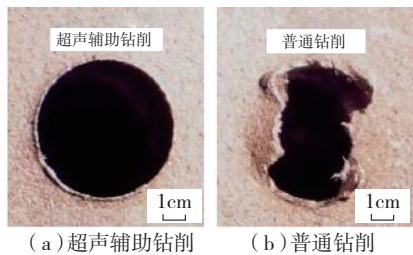


图9 钻孔的出口形貌

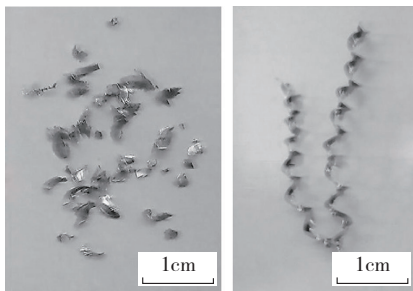


图10 钻削的切屑形貌

景,特别在航空航天结构件的加工装配中,可用于钛合金蒙皮和复合材料蒙皮与合金骨架之间装配连接孔加工。复合材料/合金叠层结构的钻孔加工,可以减小钻削力,延长刀具寿命,减小合金连续切屑对复合材料的损伤,改善钻孔质量。

超声辅助磨削技术

超声辅助磨削技术是采用电镀或烧结法制备的固结超硬磨料(金刚石和立方氮化硼)磨削工具,在磨削工具或工件上施以超声振动的复合加工方法。根据施加超声振动的方式不同,分为两种形式:一种是在传统磨床的基础上,通过在工件上施加超声振动,实现超声辅助磨削加工。图11所示为在一种在传统卧式平面磨床上通过对工件上施加超声振动进行加工的典型超声辅助磨削加工装置^[11]。另一种是利用数控机床或加工中心,将超声振动施加于旋转的磨削工具上实现超声辅助磨削加工,也称为旋转超声加工(RUM)。图12所示为作者研制的采用超声振动旋转工具的超声辅助磨削加工系统。超声辅助磨削加工系统包括超声加工电源、超声功率传输装置、超声振动刀柄、磨削工具和加工机床等,该系统中的超声振动刀柄内集成有超声换能器和传输超声装置,采用通用刀柄(如HSK、BT和SK等刀柄系列)结构与不同的数控机床或加工中心的主轴连接,可夹持杯型砂轮、平行砂轮、空心磨头、圆柱磨头、球形磨头等不同结构形式的磨削工具。该系统利用磨削工具的轴向超声振动和旋转运动,并结合数控机床或加工中心的加工运动,可以实现平面、内外圆面、制孔、型腔和复杂曲面的超声辅助磨削。

作者采用超声振动刀柄夹持电镀金刚石砂轮加工了碳纤维复合材料、铝基碳化硅复合材料、反应烧结碳化硅陶瓷和光学玻璃等难加工材

料取得较好的加工效果。其中采用电镀金刚石砂轮进行碳纤维复合材料超声辅助平面磨削和普通磨削后的加工表面和砂轮表面形貌分别如图 13 和图 14 所示。结果表明

超声辅助磨削加工的表面纤维丝翘起较少,边沿没有毛刺;超声辅助磨削后的工具表面磨粒磨损小,工具表面几乎没有堵塞现象;超声辅助磨削时磨削力可以降低约 50%,表面粗

糙度改善约 10%~30%^[13]。超声辅助磨削加工 C/SiC 陶瓷基复合材料,磨削力可降低约 20%,表面粗糙度可改善约 30%^[12]。

以固结金刚石的空心磨头为磨削工具“以磨代钻”是进行陶瓷、玻璃和复合材料等硬脆难加工材料高效精密制孔的有效加工方法。在此基础上,采用超声振动刀柄夹持电镀或烧结合金刚石空心磨削工具,可以实现这些硬脆难加工材料的超声辅助磨削制孔,其加工原理如图 15 所示。

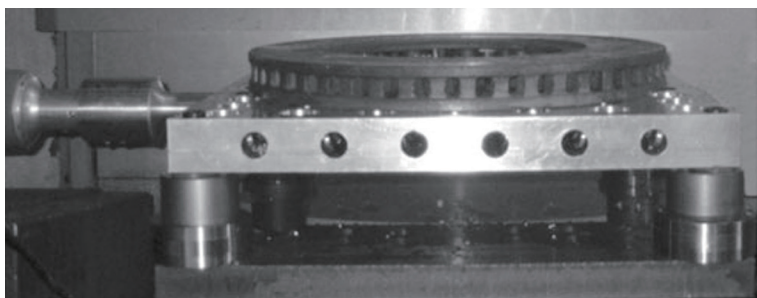


图11 平面磨床上对工件施加超声振动的超声辅助磨削加工装置^[12]



图12 采用旋转工具的超声辅助磨削系统、超声刀柄和加工工具

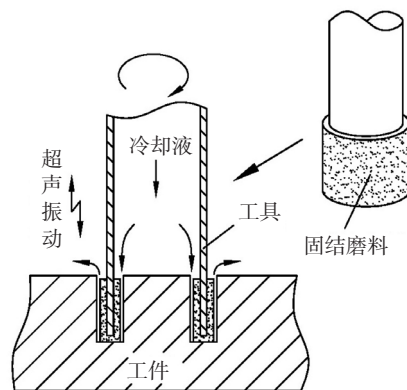
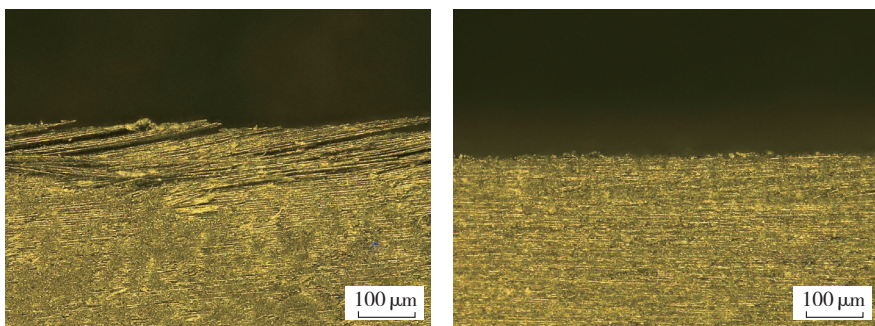


图15 超声辅助磨削制孔原理示意图

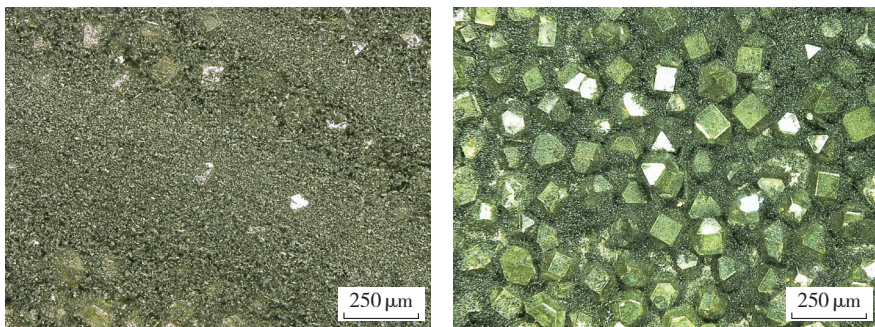
利用电镀金刚石空心磨头对碳纤维复合材料进行超声辅助磨削和普通磨削制孔加工,加工后的出口形貌和工具表面形貌如图 16 和图 17 所示。由图可以看出超声辅助磨削加工孔的出口处几乎没有毛刺,工具磨损较小,几乎没有堵塞现象^[14]。采用金属结合剂金刚石空心磨头进行陶瓷基复合材料超声辅助磨削制孔,与普通磨削制孔相比,轴向磨削力可以降低约 60%,加工效率可以提高约 10%,且孔壁和进出口质量明显改善^[15]。

近年来,德国在超声辅助加工技术应用方面处于领先水平。德国的 Hermann Sauer 公司和 Deckel Maho 公司将超声技术和先进的机床技术相结合,开发出了 ULTRASONIC 系列超声复合加工中心,已在光学、医药、半导体、汽车和航空航天等工业领域得到应用。



(a) 普通磨削 (b) 超声辅助磨削

图13 碳纤维复合材料磨削表面形貌



(a) 普通磨削 (b) 超声辅助磨削

图14 工具表面形貌

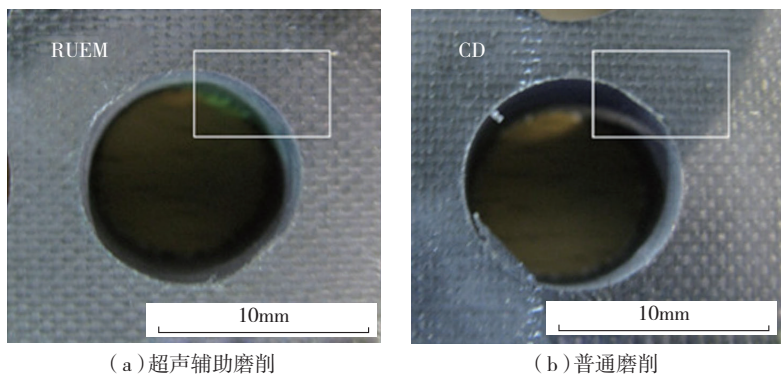


图16 复合材料制孔出口形貌

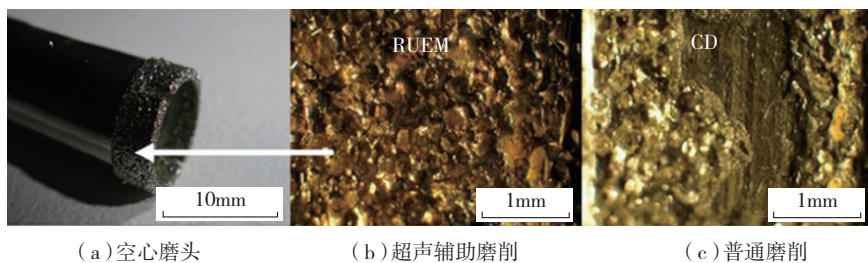


图17 金刚石工具表面形貌

超声辅助切割加工技术

超声辅助切割加工技术是在传统切割加工工具上施加超声振动的一种复合切削加工技术。采用固结磨料旋转将锯片切割技术用于陶瓷、光学玻璃和蓝宝石等硬脆材料划片、开槽、切断等加工。在硅和蓝宝石晶圆、面板玻璃等划片和切割中得到广泛应用。日本 DISCO 公司在已有金刚石薄锯片切割技术基础上,开发了采用旋转切割片的超声辅助切割加工技术(图 18)^[16]。采用金刚石旋转切割片进行超声辅助切割时,切割力更小,切割片不易堵塞,刀具寿命,可以采用高进给速度提高加工效率 3 倍以上,可使用更细粒度的切割片获得更好的加工质量和使用更薄的切割片获得更窄的切缝。

采用硬质合金尖刀和圆片刀等切割刀片的超声辅助切割加工技术主要用于复合材料铺设时预浸纤维材料的裁剪和下料以及蜂窝结构复合材料的切割和复杂型面加工等。奥地利 GFM 公司开发的超声辅助

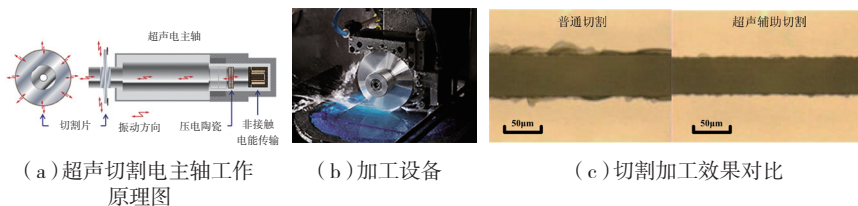


图18 采用固结磨料旋转切割片的超声辅助切割加工技术

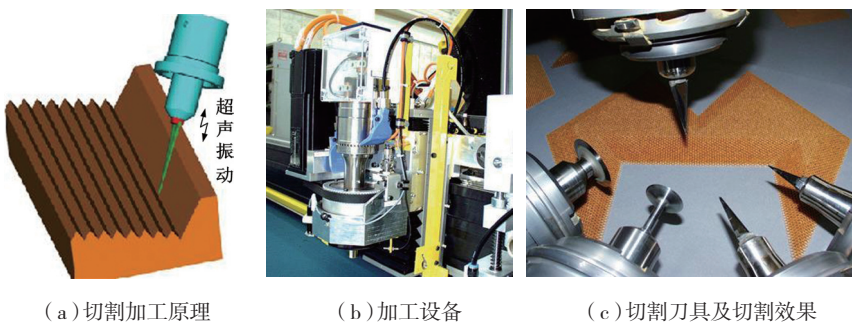


图19 采用切割刀片的超声辅助切割加工技术

切割技术的加工原理、加工设备、切割刀具及其切割复合材料效果如图 19 所示^[17]。与普通切割相比,采用超声辅助切割时,切削力小,材料不易变形,可提高切割精度;可以采用高的进给速度大幅度提高加工效率;可以减小刀具与工件间的摩擦力,降低切割温度,减小刀具磨损;可以解决普通切割加工中粘刀等问题。

工,满足不同应用领域难加工材料零件的加工要求,目前,超声辅助切割加工技术通过借鉴其他加工技术的发展经验,正不断向微细化、高效化、精密化、自动化和智能化等方向发展。

本文共有参考文献 17 篇,因篇幅所限未能一一列出,如有需要请向本刊编辑部索取。(责编 三丰)

结束语

复合加工技术是先进加工技术的重要发展方向之一,超声辅助切削加工技术是涉及技术领域较宽,应用范围较广的先进复合加工技术。国内外对难加工材料超声辅助切削加工技术的基础研究和应用研究结果表明,这种先进复合加工技术可以有效降低切削力、提高加工质量和精度、减少刀具磨损和提高加工效率,既可用于碳纤维复合材料、颗粒增强复合材料、陶瓷及陶瓷基复合材料等复合材料结构件的加工,也可用于光学棱镜、陶瓷盘、玻璃腔体、反射镜轻量化结构和陶瓷活塞等硬脆材料精密零件的加工,在航空航天等领域具有广阔的应用前景。为了实现难加工材料高质量、高精度、高效率的加