



机械工程学报
Journal of Mechanical Engineering
ISSN 0577-6686, CN 11-2187/TH

《机械工程学报》网络首发论文

题目： 超声振动辅助磨削加工技术及装备研究的现状与展望
作者： 丁文锋，曹洋，赵彪，徐九华
网络首发日期： 2022-03-17
引用格式： 丁文锋，曹洋，赵彪，徐九华. 超声振动辅助磨削加工技术及装备研究的现状与展望[J/OL]. 机械工程学报.
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2187.th.20220315.1945.036.html>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

超声振动辅助磨削加工技术及装备研究的 现状与展望*

丁文锋 曹洋 赵彪 徐九华

(南京航空航天大学机电学院 南京 210016)

摘要：超声振动辅助磨削加工技术通过传统磨削加工基础上叠加高频微幅超声振动，可以减小磨削力，降低磨削温度，提高材料去除率，改善工件表面质量，在航空航天、高档机床、高速列车、能源动力等高端装备高效高品质制造方面具有显著优势和广阔应用前景。现阶段，国内外已经开展了众多超声振动辅助磨削加工技术及装备的研究工作，相关成果已在多种难加工材料关键部件加工中得到工程应用。在概述超声振动辅助磨削加工技术的基本原理、加工优势、主要分类和发展趋势的基础上，系统总结了国内外学者在超声振动辅助磨削装备及设计方法、材料去除机制和表面形成机制方面的研究成果，并对超声振动辅助磨削加工技术未来发展趋势和重要研究问题进行了展望。

关键词：超声振动辅助磨削；超声装置；材料去除机制；表面形成机制

中图分类号：TB559

Research Status and Future Prospects of Ultrasonic Vibration-assisted Grinding Technology and Equipment

DING Wenfeng CAO Yang ZHAO Biao XU Jiuhua

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016)

Abstract: Ultrasonic vibration-assisted grinding (UVAG) technology, by superposing high-frequency and micro-amplitude ultrasonic vibration on the conventional grinding operation, has significant advantages and broad application prospects in the high-efficiency and high-quality manufacturing area of aviation and aerospace, advanced machine tools, high-speed railway, energy and power technologies owing to the low grinding force and temperature, high materials removal rate and improved ground surface quality. At present, lots of research work on UVAG technology and equipment has been carried out, and the relevant results have been applied in the machining of various difficult-to-machine materials and key parts. Based on the overview of the basic operating principle, working advantages and main classifications of UVAG technology, this paper systematically reviews the achievements of UVAG equipment, material removal mechanism and surface topography generation mechanism in the past decades. Finally, the future development trend and important research issues of UVAG technology are provided.

Keywords: ultrasonic vibration-assisted grinding; ultrasonic equipment; material removal mechanism; surface topography generation mechanism

0 前言

近年来，随着航空航天、高档机床、高速列

车、能源动力等高端装备技术性能要求的不断提高，各种高性能钛合金、高温合金、不锈钢、金属间化合物、工程陶瓷、陶瓷基/树脂基/金属基复合材料等难加工材料不断投入应用，其关键部件

* 国家自然科学基金(51921003 和 52175415)、江苏省研究生科研创新计划(KYCX20_0179)和江苏省自然科学基金(BK20210295)资助项目。

的高效高品质加工给机械制造领域带来了巨大机遇和严峻挑战^[1-3]。磨削是难加工材料关键部件精密加工的主要方法，其技术水平高低对高端装备制造质量具有关键影响^[4-5]。特别是，以缓进深切磨削、高速超高速磨削、高效深切磨削为代表的现代磨削加工技术依靠砂轮工作面上众多磨粒的微切削作用去除材料，打破了“粗切精磨”的传统加工模式，在获得零件要求的加工精度和质量同时所能提供的材料去除能力在很多情况下甚至超过了传统切削加工，理论上具有更好地解决难

加工材料关键部件高效高品质加工难题的潜能。但是，在面对更高精度、更高效率、更高质量、更低成本要求的现代高端装备制造需求时，现有磨削加工方式仍难以满足要求^[6-8]，为此亟需开展磨削工艺方法创新。

超声振动辅助磨削加工技术是一种将超声振动叠加到工件材料去除过程中的复合加工方法^[9-14]，通过改变磨粒与工件的接触状态^[15-21]，提高加工效率和质量。相比于传统磨削加工，超声振动辅助磨削加工的优势体现在多个方面^[22-27](图 1)。

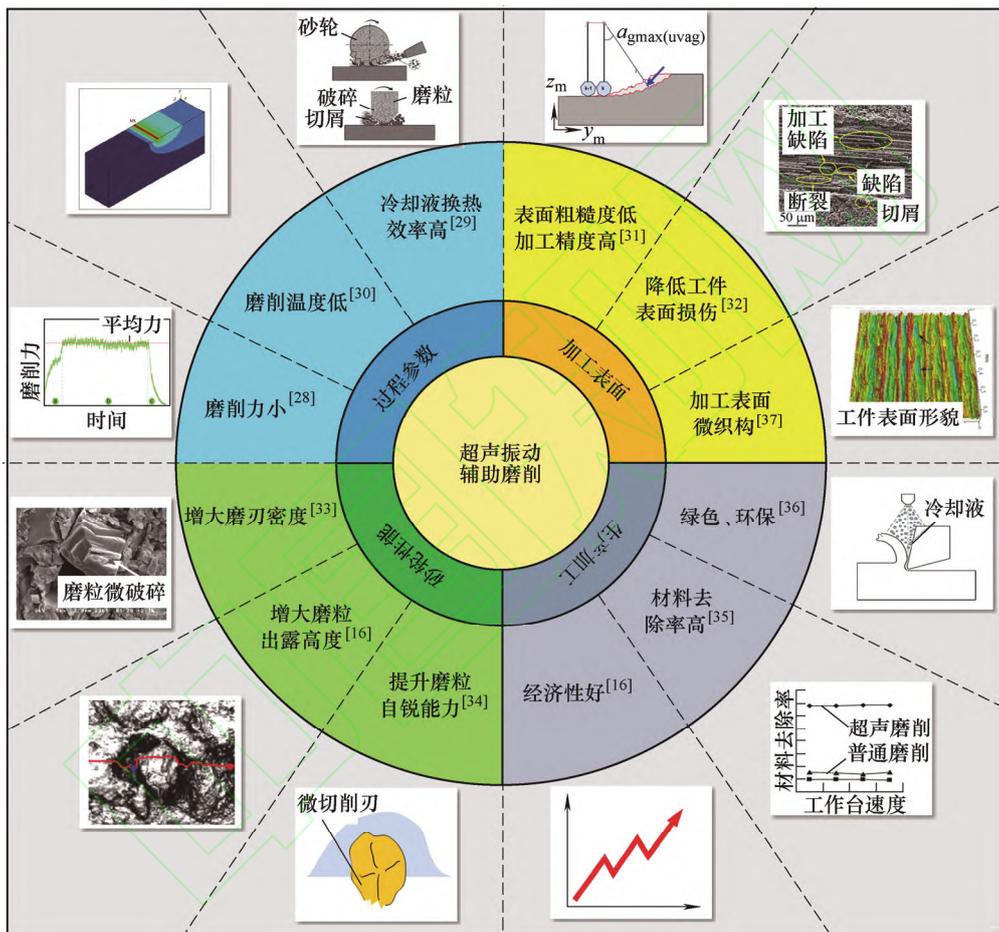


图 1 超声振动辅助磨削加工技术的主要特点与优势

从加工过程来看，超声振动与传统磨粒运动轨迹叠加，使得磨粒与工件之间的相对运动呈现“短接触，长分离^[10]”的波动式运动轨迹，可以有效降低磨削力^[28]。磨粒与工件之间的“接触-分离-接触-分离”循环间歇磨削使得冷却液可以有效进入加工区，提高冷却液的换热效率^[29]，降低磨削温度^[30]，有效缓解磨削烧伤。加工表面质量方面，在超声振动辅助磨削中，磨粒轨迹叠加增加了有效磨粒数，降低了表面粗糙度，提高表面完整性^[31]。磨粒与工件的冲击效应使得传统磨削加工中容易出现的材料

大块脱落变为微小破碎，减小了加工表面损伤^[32]。此外，超声振动能够促进磨削过程中钝化磨粒的微破碎^[33]，破碎后的磨粒表面分布着更多的微刃，有利于增大磨削刃密度^[34]，提升磨粒自锐能力^[33]，从而减弱砂轮的其他不利磨损方式，例如磨粒大块破碎、磨粒拔出、砂轮堵塞。除此之外，超声振动辅助磨削加工技术还具有材料去除率高^[35]、生产经济性好^[16]、绿色环保^[36]的优势，在高端装备制造领域呈现出广阔的应用前景。

近年来，国内外已开展了众多的超声振动辅助

磨削加工技术及装备研究工作, 相关成果已在多种难加工材料关键部件加工中得到工程应用, 本文对此进行了系统总结和分析。具体而言, 第一部分主要对超声振动的发展历程、研究现状进行了分析, 阐明超声振动辅助加工具有广泛应用空间和重要研究价值。第二部分主要讨论了现阶段超声振动装备的特点, 包括装备的分类、工作原理、设计方法。第三部分从磨粒运动轨迹、材料去除行为和磨削力等方面总结了超声振动辅助磨削加工的材料去除机制。第四部分主要论述了现阶段超声辅助磨削工件表面形成机制的研究成果。最后, 本文对超声振动辅助磨削加工的发展趋势和值得研究的重要问题进行了展望。

1 超声振动辅助磨削技术

1.1 超声振动辅助磨削技术的发展

1927年, WOOD等^[38]报道了利用超声振动能量进行材料加工的方法, 通过在悬浮磨料中叠加超声振动, 提高了工件加工表面质量(图2)。早期的超声振动辅助磨削被应用于医疗领域(口腔、骨科^[39])。20世纪80年代, ZAITESV等^[40]提出超声振动辅助磨削可能是一项提升加工质量的有效措施, 特别是对于陶瓷、难加工合金、金属陶瓷、玻璃等。王先逵和李洪斌^[41]采用超声砂带精密磨削加工磁盘表面, 使得磁盘表面光洁度提高一个等级。1991年, KOMARAI AH^[42]提出旋转超声加工方法, 在超声振动辅助加工的同时工件进行旋转运动, 发现增大工件转速可以有效提高超声加工的材料去除率。

2000年以来, 随着新型材料研发速度逐步加快, 对于材料加工工艺的要求越来越高, 超声振动辅助磨削加工技术的应用也愈加广泛(图2)。WU等^[43]研制出超声振动辅助无心磨削装置, 并使用该装置加工了直径60 mm, 长15 mm的圆柱形零件, 验证了超声振动辅助无心磨削的可行性和优势。肖永军等^[45]研制了旋转超声辅助磨削主轴结构, 超声电源输出高频电信号, 通过碳刷铜环驱动超声换能器振动, 可以在磨头匀速旋转同时实现超声振动。根据电磁感应原理, 李华等^[46]将传统碳刷式电信号传输装置改进为非接触式电信号传输装置, 研制了超声辅助内圆磨削系统。通过计算副边回路阻抗, 在原边电路中通过电感、电容匹配, 实现机械结构(换能器、砂轮)与电学结构(电源、匹配电路、非接触电信

号传输装置)的整体协调运转, 实现最大功率输出。

2010年, WU等^[47]设计了工件椭圆超声振动磨削装置。该装置包含两组压电陶瓷, 谐振条件下, 一组压电陶瓷在工件位置产生 X 方向振动, 另一组压电陶瓷在工件位置产生 Y 方向振动, 通过对两组压电陶瓷输入相位不同的相同频率电信号, 从而在工件位置获得 X 和 Y 方向频率相同而相位不同的超声振动, 实现了工件的椭圆超声振动辅助磨削。同年, SINGH^[48]使用超声冲击磨削加工纯钛材料, 超声振动的使用有效提高了材料去除率; 他们的研究发现, 增大超声功率还可以进一步提升材料去除率, 但也增大了工具磨损。RABIEI等^[49]研究了MQL在超声振动辅助磨削中的换热效果, 结果表明由于超声振动条件下磨粒与工件接触时间更短, 从而降低磨削过程中的热量的产生; 同时, 超声振动有效提高了冷却液的换热能力, 并降低了磨粒划擦过程中的摩擦系数, 可以减小磨削工件时的热损伤。ZHAO等^[50]提出超声振动辅助ELID磨削更加适合陶瓷材料的精密加工。相比于传统ELID磨削, 超声振动辅助ELID磨削增大了塑性去除的临界切削厚度, 改善了加工表面质量。XIANG等^[52]研究了CBN磨粒在超声高速磨削时的磨损行为。磨削速度为100 m/s, 超声的频率和振幅分别保持在20 kHz和7 μm 。结果显示, 在高速磨削条件下, 超声振动辅助磨削的磨粒磨损体积更大, 主要原因在于超声能量作用于磨粒时产生软化效应, 使得磨粒更易断裂。MISHRA和PANDEY^[53]尝试使用超声电火花辅助磨削加工Inconel 601镍基合金, 提高了材料去除率达到60%以上, 原因主要在于纵向超声振动可以有效清除加工过程中的残渣, 并引入充足的电介质, 保证了电介质与工件的有效接触。

2020年后, ZHAO等^[54]实现了切向超声振动辅助成形磨削齿轮并建立了磨削温度模型, 结果表明超声振动辅助磨削可以降低磨削区温度(38.7%)和磨削力(71.3%), 同时还发现, 超声振动辅助磨削表面形成了更大的残余压应力, 主要原因归结于切向超声振动产生的磨粒与工件频繁分离现象增大了冷却效率, 从而减少了热应力对砂轮表面残余应力的影响。DING等^[21, 33]发展了超声振动辅助缓进深切成形磨削航空发动机叶片榫齿结构的工艺技术, 考虑榫齿特殊的轮廓对砂轮磨损的影响建立了刚玉砂轮磨损体积模型。研究表明, 磨粒与工件之间的“接

触-分离-接触-分离”循环现象虽在一定程度上增大了刚玉砂轮的径向磨损,但也有助于砂轮的自锐,从而降低磨削力,提高工件加工表面质量。综上,目前超声机床的快速发展使得超声振动辅助磨削技

术的应用逐渐便捷化;具有更全面功能和更复杂模态超声工具的需求使得超声装备的研制更加专业化,超声和激光、电火花等技术的复合使得超声振动辅助磨削技术的发展朝向多样化。

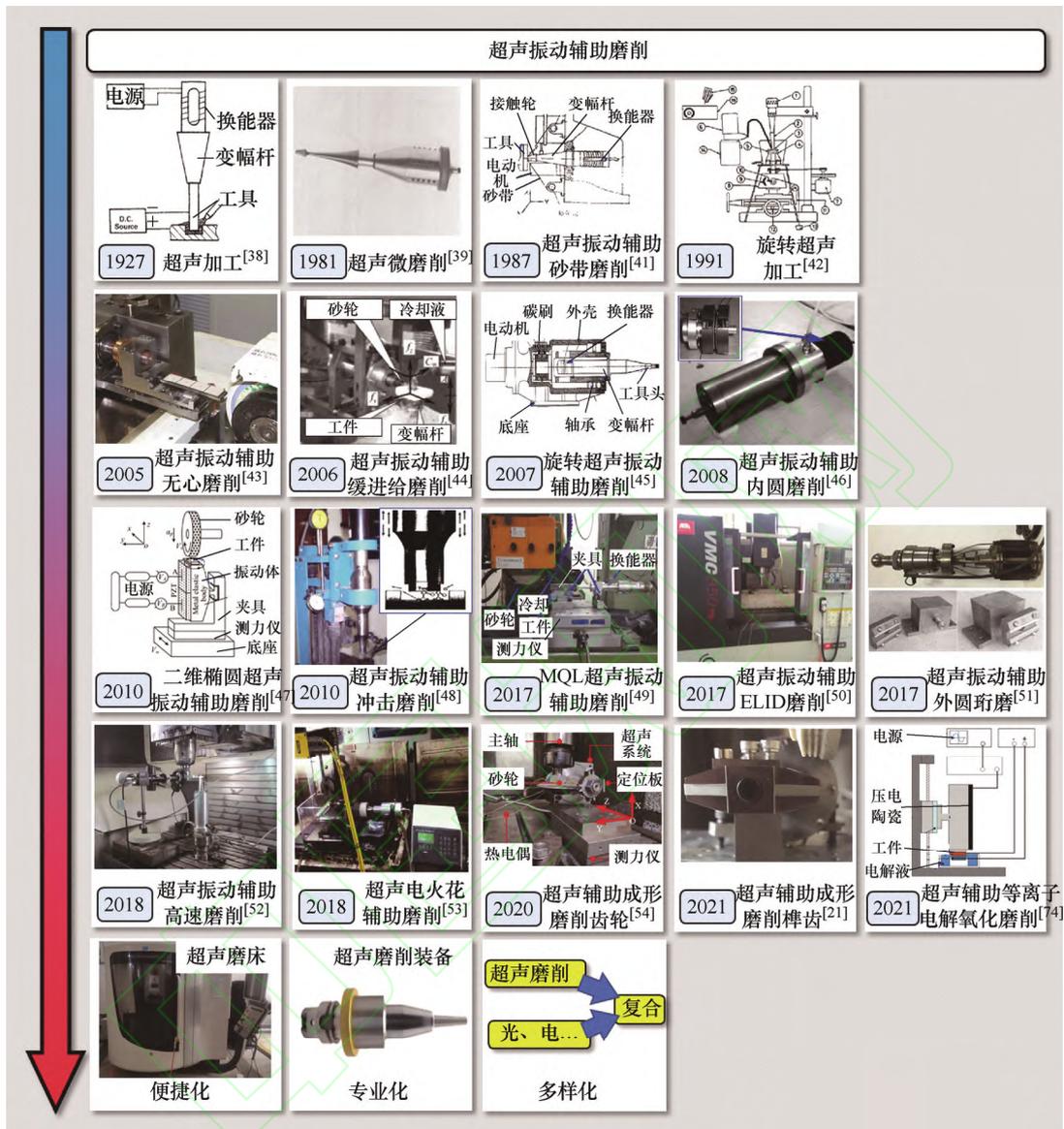


图2 超声振动辅助磨削加工技术的主要发展历程

研究文献方面,通过查询重要文献数据库发现,最近20年来,超声振动辅助磨削加工技术及装备研究的SCI收录期刊论文由每年84篇增加到每年480篇以上(图3a)。超声振动辅助车削、铣削的研究文献具有相同的增长趋势。总体而言,在超声振动辅助机械加工技术研究方面,超声磨削的研究论文数量最多,2020年相比于超声车削和铣削的期刊论文分别多出100余篇和近300篇,这说明超声振动辅助磨削加工技术受到了国内外学者更加广泛的重视。

同时,对比中国与制造业发达国家(如美国、德

国和日本)的超声振动辅助磨削研究SCI论文数量可以发现(图3b),中国的年文献数由2000年4篇大幅增长到2020年的161篇。特别是,相比于美国,在2005年以前,中国超声磨削研究年文献数不足美国的一半;到2020年,中国年文献量已大幅度超过美国。由此可以认为,超声振动辅助磨削加工技术在中国的关注度正不断上升,已经成为先进制造技术领域的发展热点和研究前沿,也是我国从“制造大国”走向“制造强国”不可或缺的重要支撑技术。

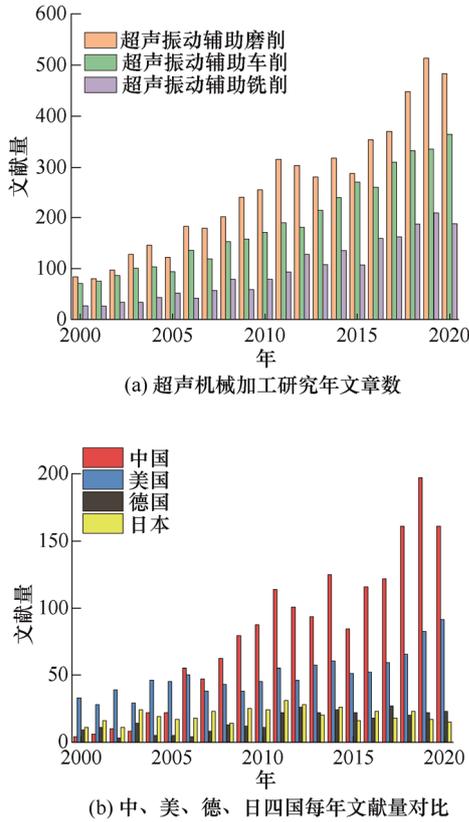


图3 超声振动辅助加工技术的SCI收录论文数量

1.2 超声振动辅助磨削技术的分类

目前，超声振动辅助磨削加工主要包括一维超声振动和多维超声振动。一维超声振动辅助磨削加工时，超声振动朝向一个方向。相对于砂轮，超声振动的方向可分为轴向、径向和切向(图4)。

轴向超声振动辅助磨削在工件平面内产生加工轨迹干涉，从而在工件表面形成特殊的磨削痕迹。WANG等^[55]发现轴向超声振动辅助磨削时产生的磨粒运动轨迹重叠导致工件表面形貌残余高度更小，获得的磨屑更短。在此基础上，计算了轴向超声振动辅助磨削 Si_3N_4 工件时临界超声频率 f 和振幅 A 与磨削参数的关系

$$f = \frac{t_1(v_s + v_w) - 2C_L}{4C_L t_1} \quad (1)$$

$$A = \frac{b - nb_1}{2n} - C_L \quad (2)$$

式中， t_1 表示磨粒与工件一个转动周期内接触时间， C_L 表示横向裂纹长度， b 和 b_1 分别表示砂轮宽度和磨痕宽度， n 表示砂轮宽度方向磨粒数， v_s 和 v_w 表示砂轮线速度和工件进给速度。当超声频率和振幅大于临界值后，超声振动对磨削力和加工表面的改

善效果逐渐明显。向道辉等^[24]发现轴向超声辅助磨削会发生运动轨迹重叠现象，从而对工件表面产生往复熨平效果。相比于传统磨削材料时的“滑擦-耕犁-切削”三个阶段，超声辅助磨削还增加了冲击作用，从而影响加工残余应力。随后，他们通过轴向超声振动辅助磨削淬硬42CrMo钢实验发现超声加工可以提高工件表面残余压应力30%，提高显微硬度10%以上。

相比于轴向超声振动，径向超声振动由于在垂直于工件表面内振动，因此会对工件表面产生明显的冲击效果，从而大幅度减小磨削力。AKBARI等^[61]开展了径向超声振动辅助磨削 Al_2O_3 陶瓷的实验，发现径向超声振动的使用可以提高 Al_2O_3 陶瓷磨削后工件表面粗糙度8%，同时提高10%断裂强度，主要原因归结于砂轮自锐性能的提升。ZHOU等^[31]提出由于径向超声振动可以引起切屑厚度的波动，导致粗糙度增大，因此磨削加工中径向振动振幅需要被控制在某范围以内。ZHENG等^[56]通过研究单颗磨粒径向(垂直加工表面方向)超声振动辅助磨削的材料去除过程，结果表明超声振幅增大会促进陶瓷材料中裂纹的产生，从而在相同磨削参数时，超声辅助磨削具有更大的材料去除率。在此基础上，进一步通过对磨粒磨刃的观测发现超声振动虽然提高了加工效率，但往往伴随着金刚石磨粒磨损的加快，主要原因可以归结于作用于磨粒中的超声能量促进了磨粒的裂纹产生和破碎。

切向超声振动方向沿着磨粒运动方向，由于磨削弧区的几何形状，同样可以导致“接触-分离-接触-分离”循环，可以降低磨削力，改善加工表面质量。YANG等^[15]建立的轴向超声振动辅助磨削 ZrO_2 陶瓷磨削力模型，发现超声振动可以有效降低磨粒拔出现象，从而提高工具寿命。CAO等^[21, 33]研究了切向超声辅助磨削时砂轮在初始、稳定、剧烈磨损阶段的径向磨损量，发现砂轮稳定磨损阶段时，超声振动会加速砂轮磨损，其原因主要归结于磨粒微破碎的产生。综合YANG和CAO的研究结论可以发现，切向超声振动通过促进磨粒微破碎磨损缓解磨粒拔出磨损，导致砂轮稳定磨损阶段的径向磨损量较大，但是砂轮整体寿命较长。RABIEI等^[49]研究了MQL在切向超声振动辅助磨削中的冷却效果，由于此时磨粒可以往复运动，减小了磨粒的实际切削时间，以及磨粒与工件的接触长度，从而减少了磨削热的产生。

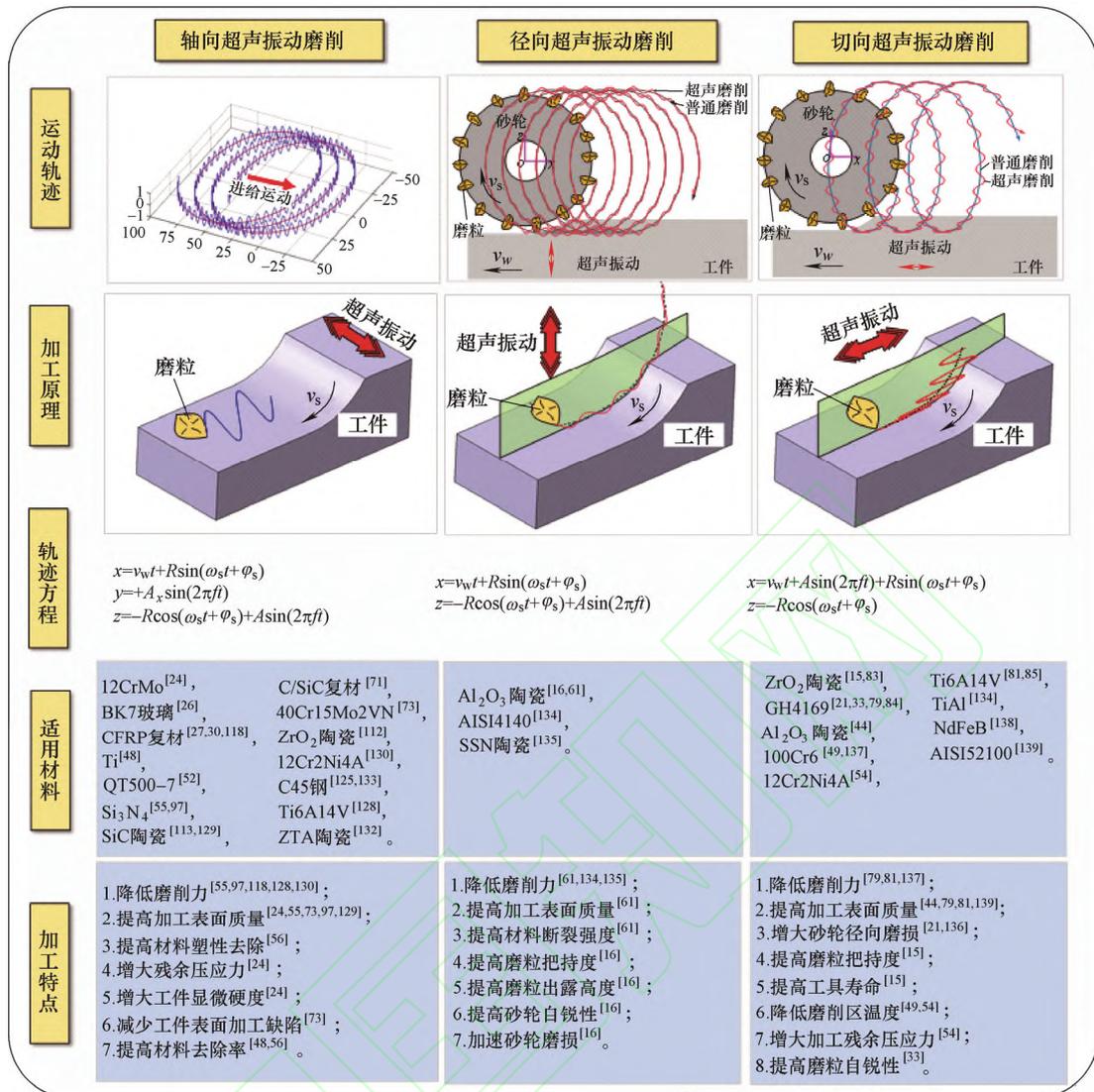


图4 一维超声振动辅助磨削技术

二维超声振动是两个方向不同的一维超声振动的叠加，从而形成平面内振动的情况。ZHOU等^[31]将频率为25 kHz的轴向超声振动作用于直径100 mm的CBN砂轮中，由于砂轮直径大于1/4超声波长，泊松效应导致超声振动条件下的磨粒运动轨迹更加复杂，磨粒的运动轨迹包含换能器输出的轴向超声振动(振幅最大值为10 μm)以及由泊松效应产生的径向超声振动(振幅最大值为1 μm)，最终超声振动辅助磨削形成的工件表面形貌是二维超声振动的结果。GAO等^[57]使用两个超声换能器共同作用于GH4169工件，每个换能器施加一个方向的超声振动，通过调整两个超声换能器之间的夹角和工作状态，可以实现一维(轴向或切向)或二维超声振动，从而在磨削区形成不同的磨粒运动轨迹，影响材料的去除行为，研究表明，在一维超声振动条

件下，相比于轴向超声振动，切向超声振动辅助磨削的工件表面粗糙度更低，在二维超声振动条件下，当两个超声换能器夹角为45°或者135°时，工件加工表面粗糙度最低。

二维椭圆超声振动是当两个相近频率、不同方向、不同相位的超声振动轨迹的叠加，使得工具与工件之间的相对运动轨迹呈现椭圆形状。二维椭圆超声振动方法主要包括振动转换和振动复合两种。第一种方法中，超声振动系统由一个超声换能器驱动，通过振动转换装置，在端部产生两个方向的超声振动，由于两个方向振动传递速度不同，产生振动相位差，实现椭圆超声振动，例如纵弯转换椭圆超声振动和纵扭转换椭圆超声振动。2019年，ZHAO等^[58]研制出超声振动辅助杯型砂轮，谐振状态下，超声换能器产生纵振，在砂轮和主轴连接位置产生纵弯振动转换，

从而在砂轮端部产生轴向、径向椭圆超声振动(图 5a)。袁松梅等^[59]设计了纵扭同频超声振动换能器,通过在超声变幅杆处添加螺旋槽(振动转换装置),实现纵扭振动转换,将超声换能器输出的纵向振动转换为纵扭复合振动(图 5b)。第二种方法采用双超声换能器(或者两组压电陶瓷)驱动的复合振动系统,谐振时不再需要振动转换装置(图 5c),每个超声换能器驱动系统实现一个方向的谐振,通过超声电源控制电信号的相位和频率,通过两个模态的复合实现椭圆超声振动辅助磨削。陈涛等^[60]设计了由纵振压电陶瓷和弯振压电陶瓷共同驱动的超声换能器,采用纵向 4 阶和弯曲 13 阶的同频模态复合,实现了水平方向振幅 $3 \mu\text{m}$ 和垂直方向振幅 $2.5 \mu\text{m}$ 的椭圆超声振动。

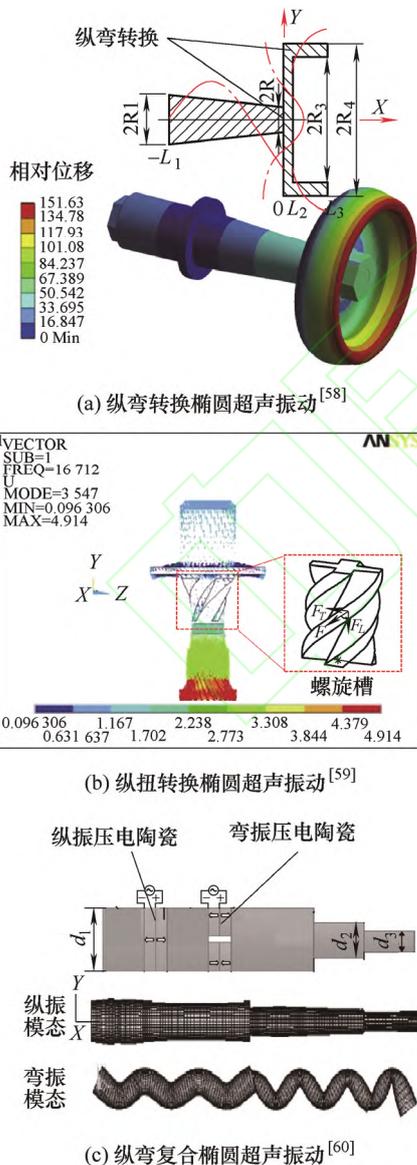


图 5 二维椭圆超声振动辅助磨削加工

两种椭圆超声振动方法具有不同的加工特点和优势。采用振动转换结构的椭圆超声系统采用单激励输入,设计难度小且简化了控制电路,但是往往会在振动转换结构处产生较大的应力,同时难以控制输出端实际的椭圆轨迹形状^[14]。其中,纵弯、纵扭转换超声振动的区别体现在磨粒和工件的相对运动状态上。纵弯转换椭圆超声振动包含轴向和径向(图 4)超声振动,纵扭转换超声振动包含轴向和切向超声振动。采用振动复合方法的椭圆超声振动系统采用双换能器激励,可以通过调整每一个超声换能器的角度、输出振幅、振动相位等实现椭圆振动轨迹的控制,然而,该方法需要满足在一种结构上实现两个频率相近的模态,且这两个模态至少具有一个相同的振动节点,因而增大了设计难度。在超声系统的设计中,需要依据每种方法的特点和具体工作条件进行选择。

二维超声振动辅助磨削具有显著的加工优势^[57]。WANG 等^[62]通过对比二维和一维超声振动时的工件表面形貌,发现二维椭圆超声振动辅助磨削包含对应两种一维超声加工的优势。他们分别计算了一维轴向、径向以及二维椭圆超声磨削形成的表面,结果表明轴向超声振幅增大有效促进相邻磨粒轨迹的交叉和叠加,导致表面粗糙度的减小,而当径向超声振动振幅大于切削深度时,磨粒的径向运动可以有效降低磨削力,但是产生更深的磨削痕迹,增大了表面粗糙度,椭圆超声振动同时包含轴向和径向两个方向超声振动的优势,因此可以获得更大的材料去除率和更稳定的加工状态。

三维超声振动是轴向、径向和切向超声振动的组合。徐瑞玲和赵波^[63]发现三维超声振动辅助磨削中单颗磨粒的运动轨迹为空间的螺旋形(图 6),可以有效增加单颗磨粒切削弧长,有利于磨粒在切削过程中长时间保持锋利。通过对比二维和三维超声振动辅助磨削后工件表面形貌,发现后者可以有效降低工件表面微裂纹和局部破碎现象,说明三维超声振动辅助磨削可以获得更优的表面质量。马新毅^[64]从宏观力学角度展开分析,建立了三维超声振动辅助条件下的磨削力模型,发现相比于二维超声振动,三维超声振动辅助磨削条件下磨削力可以降低 20%。然而,现阶段三维超声振动加工方法的研究仍然较为缺乏,加之三维超声振动系统往往具有更复杂的结构和控制系统,限制了实际的工业应用。

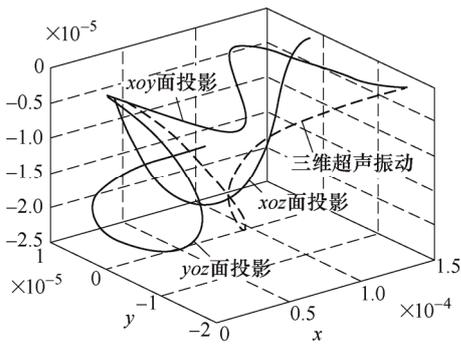


图6 三维超声振动辅助磨削的磨粒运动轨迹

2 超声振动辅助磨削装备

超声振动装备作为超声振动辅助加工系统中的振动发生装置,在整个加工系统中占据关键地位,其性能直接影响超声振动辅助加工效果。目前,超声振动辅助磨削加工的实现方法主要有工件超声振动法和工具超声振动法(图7)。工具超声振动法中,超声换能器通过弹簧夹头等连接方式与砂轮紧密连接,构成谐振系统,从而在砂轮中产生固定方向和频率的超声振动;而工件振动法主要利用超声平台或者特殊的超声夹具,使得超声换能器、平台、夹具和工件构成谐振系统,工作时工件产生超声振动,实现超声振动辅助磨削。工具超声振动对工件形状、尺寸没有严格要求,可以实现复杂形状零件加工,但工具直径往往较小,导致磨削速度偏低,材料去

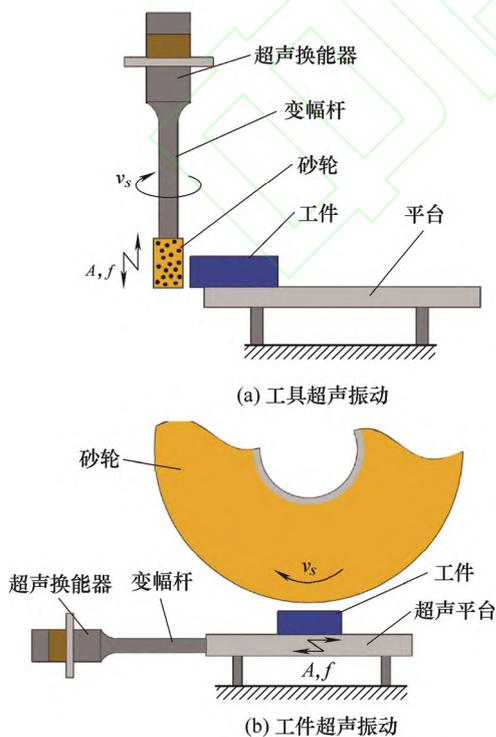


图7 超声振动辅助磨削示意图

除率难以成倍提升。工件超声振动对工具没有尺寸要求,可以采用大直径砂轮磨削,因此能够实现缓进深切磨削、高速超高速磨削、高效深切磨削等加工方式,特别适合磨削负荷较大、材料去除率较高的工况。

2.1 工具超声振动装置

工具超声振动法具有不受工件形状限制的优点,因此受到了国内外学者和工业界的广泛关注(图8)。1984年,中国科学院声学研究所成功研制了超声旋转加工样机^[65],超声频率范围为7~22 kHz,功率为400 W,加工精度可以达到0.03 mm,促进了工具超声振动技术的发展。现阶段,由于超声刀柄已经具有成熟的结构,可以保证砂轮旋转过程中的加工精度、以及能量的有效传递,因此工具超声振动的发展主要表现在具有特殊功能的超声工具头设计、超声与其他能量的复合加工技术、以及具有多功能的超声机床和多轴超声加工中心研制方面^[66-68]。

丁仕燕等^[69]开展了超声振动磨削陶瓷研究,计算了磨粒运动轨迹,通过砂轮两次位移变换,保证了零件的加工精度。唐军等^[70]设计了单激励纵扭复合超声振动系统,建立了纵扭复合振动变幅杆的频率方程,并通过有限元方法进行了仿真验证。DING等^[71]采用磨粒有序排布金刚石砂轮轴向超声振动辅助磨削C/SiC陶瓷基复合材料,磨粒直径为150~160 μm ,磨粒排布角度45°,发现超声磨削条件下的磨削力更小,纤维断裂尺寸也更小。付俊帆等^[72]设计了大负载超声振动砂轮,采用纵弯转换原理,通过超声换能器纵向振动驱动圆形砂轮弯曲振动,形成纵弯复合振动模态,实现了超声振动辅助磨削。尹龙等^[73]针对40Cr15Mo2VN轴承套圈在传统磨削中表面粗糙度和波纹度偏大的问题,提出了超声辅助内圆磨削方法,发现加工表面粗糙度随着超声振幅的增大而减小,当超声振幅大于0.7 μm 时,改善了加工表面振纹缺陷。LI等^[74]开展了超声振动辅助等离子电解氧化磨削Ti-6Al-4V小孔(直径1 mm),轴向超声振动作用于CBN砂轮中,超声频率和振幅分别为40 kHz和4 μm ,研究表明超声振动对阴极氧化有促进作用,当电压增大时,超声振动的优势更加明显,相比传统磨削方法,超声振动辅助等离子电解氧化磨削工艺可以降低60%的磨削力和19%的表面粗糙度,并有效提高砂轮寿命。

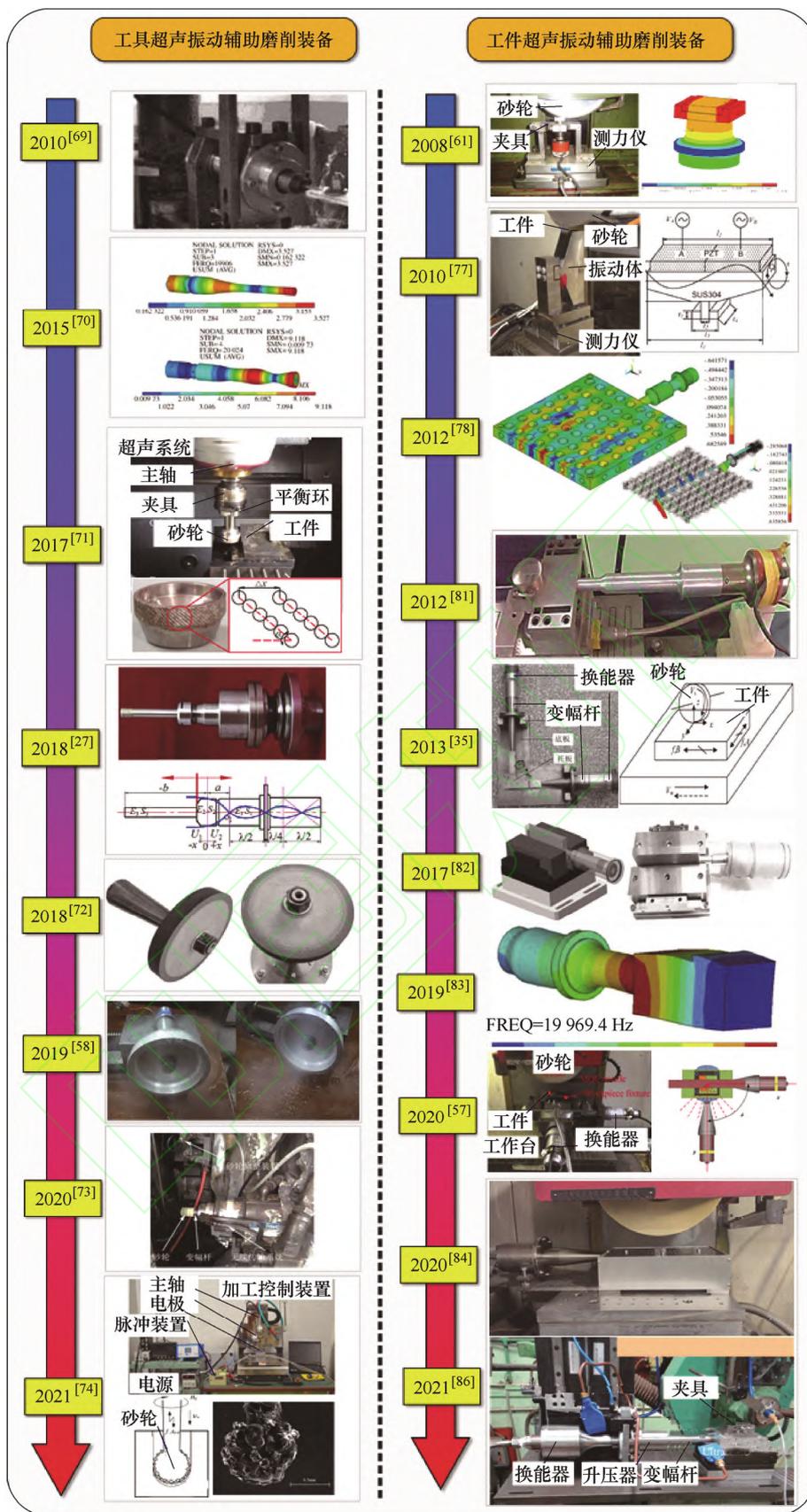


图 8 近期超声振动装备发展

综合上述分析可知，目前工具(砂轮)超声振动辅助磨削技术发展已较为成熟，应用范围也非常广

泛，但是由于超声振动需要满足系统谐振条件，限制了砂轮规格，进而限制了磨削速度和材料去除效

率。同时,砂轮超声振动需要将静态电信号转换为旋转的电信号,传统的实现方法主要为电刷法,目前主要采用非接触电能传输装置,电刷法的装置寿命受到电刷的限制。非接触法的电能传输效率受到磁体间距、线圈匝数等因素影响^[75-76],制约着工具(砂轮)超声振动的能量利用率(振幅)的提升。

2.2 工件超声振动装置

相比于工具超声振动,工件超声振动没有通用固定的装备结构,需要根据零件结构、材料、尺寸等特征以及超声振动方向进行具体设计,因此工件超声振动的装备结构更加丰富。

2008年,AKBARI等^[61]采用径向超声振动装备磨削 Al_2O_3 陶瓷,超声换能器从底部直接连接夹具和工件,通过超声换能器的纵向振动实现工件径向超声振动辅助磨削,相比传统磨削,分别降低磨削力和表面粗糙度22%和8%。2010年LIANG^[77]通过两块压电陶瓷驱动,实现了纵向基频振动、弯曲2阶振动的工件超声振动装置,两种模式的谐振频率接近($f_{L1}=21.6145\text{ kHz}$, $f_{B2}=21.6139\text{ kHz}$),通过调整输入电源信号相位,可以实现相位差分别为 0° 、 90° 和 180° 的椭圆超声振动。随后他们采用该装置磨削单晶硅材料,发现轴向超声振动有利于表面质量的提高,径向超声振动更有利于磨削力的降低。2012年,AZARHOUSHANG和TAWAKOLI^[78]为了实现大型难加工合金材料的缓进深切磨削,研制了超声振动平台,该超声振动平台采用板状结构,通过沿着轴向、径向和切向均匀布孔,实现多频率共振。随后,BHADURI等采用该平台加工了GH4169镍基合金和TiAl金属间化合物材料^[79,80],均发现超声振动可以明显降低磨削力,提高表面质量。NIK等^[81]设计了切向超声振动装备,该超声装备通过超声换能器前端部连接板状结构平台,平台采用挠性连接在机床加工平台上,工件固定在平台最远处位置,从而提高振幅。基于该装备开展切向超声振动辅助磨削Ti-6Al-4V钛合金材料试验,发现超声软化效应导致了磨削力的降低,超声振动使得钛元素不容易与磨粒之间发生粘连,提高了加工表面质量。2013年,赵波等^[35]研制了双超声换能器驱动的椭圆超声振动辅助磨削装置,两个超声换能器夹角 90° , $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$ 纳米复相陶瓷试件固定在两个换能器的交点位置,通过输入超声换能器电信号控制试件振动轨迹,实现椭圆超声振动辅助磨削加工。PAKNEJAD等^[82]设计了特殊的工件超声振动装置,工件直接固定在超声变幅杆端部,再被特殊的夹具固定在机床上,实现工件超声振动。他们采用该装

置开展了缓进深切磨削X20Cr13材料,发现超声振动条件下磨粒与工件之间的分离可以使得磨削区的热量快速消散,从而降低磨削区温度。2019年,YANG^[83]等采用切向工件超声振动法磨削 ZrO_2 陶瓷,超声换能器驱动长方体形状的夹具共振,工件固定在夹具端部实现切向超声振动。2020年,CAO等^[84-85]设计了板状超声振动平台,通过纵向2阶、横向1阶的谐振模态,在平台中心区域形成均匀的“几”字形位移分布曲线(图9),工件固定在平台中心区域形成单一方向的超声振动。综上所述,工件超声振动辅助磨削方法具有能量利用率高、结构简单的特点,然而,在工件超声振动中,工件的质量、材料和形状会影响超声振动的效果,现有的超声振动加工装置受功率等因素限制,难以实现体积大、重量高、材料和形状复杂工件的超声振动,影响着工件超声振动方法的工业应用。

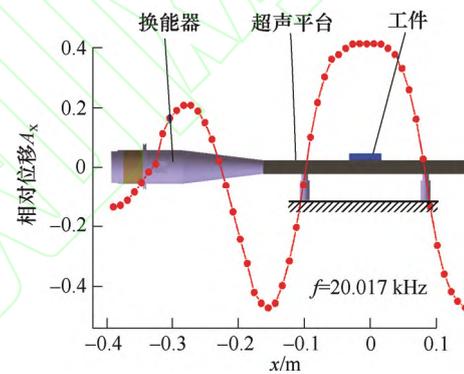


图9 超声振动平台位移分布曲线^[84]

工具超声振动磨削法和工件超声振动磨削法具有各自的特点,两者相辅相成。WANG等^[32]同时采用工件振动和工具振动实现了三维旋转超声振动加工CFRP材料,采用两个超声电源分别驱动工件水平超声振动和工具垂直振动,同时与磨削旋转运动叠加,形成特殊的三维磨粒运动轨迹(图10)。结果

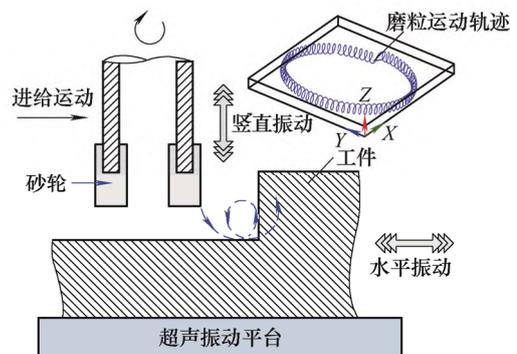


图10 工件和工具共同振动的三维旋转超声振动辅助磨削^[32]

表明三维旋转超声振动辅助磨削比普通旋转超声振动辅助磨削具有更低的磨削力和表面粗糙度，水平超声振动可以产生磨削轨迹重叠现象，使得加工后的表面更加的光滑。

2.3 超声振动装置的设计方法

丰富的超声装备设计方法是超声振动辅助磨削的发展基础(图 11)。力学方程法是超声振动装置设计的本质方法。这种方法是基于几何方程、物理方程和运动方程，满足连续性要求、胡克定律和牛顿

第二定律，通过输入边界条件，计算谐振状态。然而，由于三维振动的力学方程法需要求解包含 15 个未知数的微分方程，虽然现阶段已经提出多种求解方法，但是运算量依然很大，并且仅限于规则形状的振动体，限制了该方法的应用。CAO 等^[85]采用梁函数组合法计算了板状超声振动平台的振动特性，得到了板状纵向 2 阶、横向 1 阶平台的挠度、位移、应力和应变的分布规律，获得了振动平台中心区域长度 90 mm 的均匀振动波形。

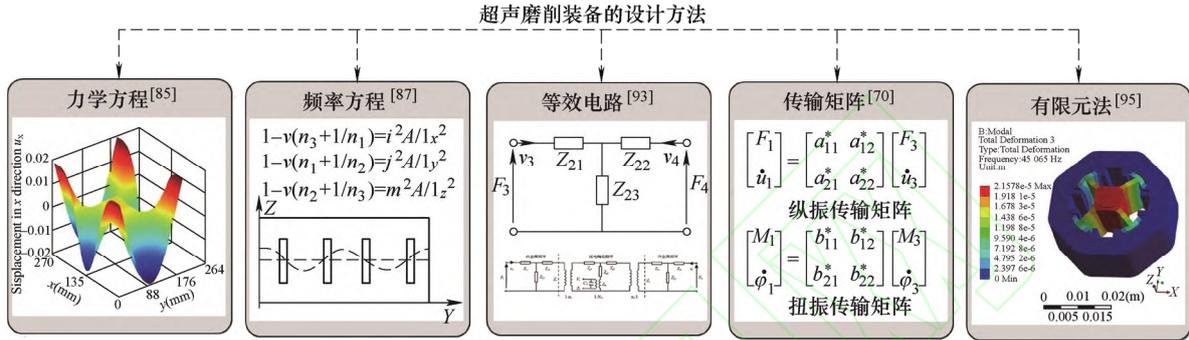


图 11 超声振动辅助磨削加工装备设计方法

针对一些常用结构的超声振动辅助磨削装置，已经拥有较为成熟的设计方法。在满足一定假设的条件下，通过力学方程可以直接推导出相应的频率方程，通过频率方程建立了装置的结构参数与谐振频率的关系。任树初、林书玉等^[87-89]早在 1983 年就提出了利用表观弹性法分析各种压电振子(包括长条状、矩形板、实心圆柱和空心圆柱)，表观弹性法将均匀弹性体三个方向的振动看作具有不同的表观弹性常数，把三个方向的振动看作是各个方向上的一维振动的合成，只考虑三个方向上纵向应力和应变的关系，通过引入三个方向的振动耦合系数得到了共振频率的简单解析表达式，推导出相应的频率方程，获得了谐振频率随振子几何尺寸改变的关系曲线。他们采用频率方程用来对一些几何形状简单的超声振动系统进行设计，所得到的结果与实验结果相符。在《超声变幅杆的原理和设计》^[90]和《超声加工技术》^[91]等著作中，林仲茂和曹凤国详细推导了多种超声变幅杆结构的频率方程，扩展了该方法的应用范围。

等效电路法^[92]的出现大大简化了超声系统的计算，这种方法利用力-声-电之间的类比原则，将力学振动或声波传播转化为理论上较成熟的电路系统。2020 年，王晓宇和林书玉^[93]采用等效电路法构建了锥形剖面径向复合超声换能器的等效电路，研究了超声换能器尺寸、材料对其振动特性的影响规

律，发现锥形剖面比普通截面换能器具有更大的辐射面积，更强的辐射功率。在此基础上发展的传输矩阵法是一种十分高效的设计方法，通过振动系统的振型确定传输矩阵中各参数表达式，可以直接推导出系统频率方程。唐军和赵波^[70]采用传递矩阵法对椭圆超声振动刀柄进行设计，将纵扭复合超声振动系统分成三部分，即大端、过渡端和小端(图 12)，然后分别依据一维纵向振动波动方程和一维扭转振动波动方程建立传输矩阵表达式

$$\begin{bmatrix} F_1 \\ v_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11}^1 & a_{12}^1 \\ a_{21}^1 & a_{22}^1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{11}^2 & a_{12}^2 \\ a_{21}^2 & a_{22}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{11}^3 & a_{12}^3 \\ a_{21}^3 & a_{22}^3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_3 \\ v_3 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} M_1 \\ \omega_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{11}^1 & b_{12}^1 \\ b_{21}^1 & b_{22}^1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_{11}^2 & b_{12}^2 \\ b_{21}^2 & b_{22}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_{11}^3 & b_{12}^3 \\ b_{21}^3 & b_{22}^3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_3 \\ \omega_3 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中， F 、 v 、 M 和 ω 分别表示力、速度、扭矩和角速度； a_{ij} 和 b_{ij} 分别表示纵向振动、扭转振动传输矩阵参数，可以依据自由振动边界条件确定。

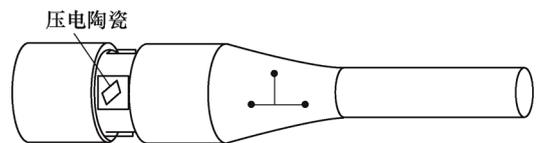


图 12 纵扭复合超声振动系统结构图^[70]

基于有限元法的装备设计通过有限元软件的模态分析、谐响应分析、瞬态分析，计算谐振下振动

频率、位移分布、相位角等参数,得到超声振动系统整体振型图,已获得广泛应用。朱昆仑等^[94]基于有限元软件对夹心式压电超声换能器进行尺寸优化,在研制的换能器谐振频率与工作频率不一致时,通过改变后端盖的尺寸使换能器的谐振频率和工作频率趋于一致。

针对确定结构参数的振动系统,有限元法可以较为准确地获得谐振频率以及相应模态。然而,超声系统的设计往往是在已知系统谐振频率的条件下设计结构参数,如果单纯采用有限元法,往往需要反复修改参数进行计算,显著降低了设计效率。因此,很多超声系统的设计往往同时采用两种方法。首先采用频率方程、等效电路、传输矩阵或力学方程计算超声振动系统的结构参数,然后采用有限元法检验设计的合理性,并依据结果进行调整和优化。LU等^[95]采用T形柔性铰链研制三维超声振动平台(图11),通过建立柔性铰链的动力学模型,计算了T形结构参数,然后采用有限元法进行模态分析,实现了平台一维水平/竖直方向振动和二维椭圆超声振动。ABDULLAH等^[96]使用相似的步骤设计了高功率超声换能器,通过频率方程计算了超声换能器的前盖板、后盖板规格、材料,压电陶瓷的选择以及换能器预紧力的值,最后采用有限元软件进行模态分析,获得了谐振条件下换能器的位移分布。

3 超声辅助磨削材料去除机制

3.1 磨粒与工件的相对运动轨迹

超声振动辅助磨削加工条件下,磨粒与工件之间的相对运动轨迹包括切削运动、工件进给运动和超声往复运动。复合运动轨迹使得超声振动辅助磨削材料去除机制与传统磨削的材料去除机制不同,产生磨削轨迹重叠和磨粒冲击作用。

YANG等^[15]计算了切向超声振动磨削ZrO₂陶瓷时磨粒对工件表面的冲击效应,发现切向超声振动在磨削弧区中可以形成正弦状运动轨迹,从而产生旋转形式的磨粒与工件的分离现象,并不断产生冲击效应,促进陶瓷工件表面材料微破碎去除。他们采用变量 K 和 Δt 分别表示磨粒与工件的冲击角度 α 和冲击时间(图13),可以表示为

$$K = \frac{2A}{L_{\text{distance}}} \quad (5)$$

$$\Delta t = \frac{1}{\pi f} \left[\frac{\pi}{2} - \arcsin\left(1 - \frac{\delta}{1}\right) \right] \quad (6)$$

式中, A 表示超声振幅, L_{distance} 表示一个超声周期

内磨粒沿着砂轮旋转方向的路径长度, δ 为磨粒冲击深度。 K 值的增加反映冲击效应在竖直方向越弱,水平方向越强。计算结果表明,超声辅助磨削的材料去除率与磨粒冲击载荷成正线性相关,并把原因主要归结为单位时间内有效磨粒数增多和磨粒自锐行为的增强。

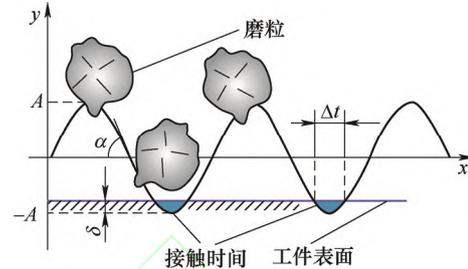


图13 超声振动辅助磨削的冲击作用^[15]

GAO等^[57]指出轴向超声振动具有更宽的磨削沟槽和工件表面往复熨平作用。由于超声振动方向与工件磨削进给方向垂直,使得磨粒具有更宽的覆盖范围,从而降低了工件垂直截面上突起的高度和宽度,降低了工件表面粗糙度。磨粒在磨削弧区的振动次数 m 可以表示为

$$m = f \frac{\sqrt{a_p d_s}}{v_s} \quad (7)$$

式中, d_s 表示砂轮直径和磨削速度, a_p 表示磨削深度。 m 大于1时,磨粒在磨削弧区产生往复磨削,改善工件表面质量。

WU等^[98]计算了两个方向超声振动相位差对椭圆超声振动轨迹的影响。采用双换能器驱动,进而产生超声相位不同、振幅不同的椭圆超声振动。通过计算超声振动相位角对磨削轨迹的影响,发现当两个方向的振幅相位角相差很小时,椭圆振动的相位并不明显;随着两个方向超声振动的相位角增大,椭圆超声振动轨迹的倾角逐渐减小。当超声振动相位角为0时,磨削轨迹是一条斜线;当超声振动相位角为 $\pi/2$ 时,椭圆超声振动轨迹效果最好。

有效磨粒数和单颗磨粒最大未变形切屑厚度(以下简称单颗磨粒切厚)是磨削过程的重要参数,与磨削力、磨削表面质量直接相关^[99-102]。WU等^[103]开展了轴向超声振动辅助磨削颗粒增强钛基复材的砂轮磨损行为研究,计算了轴向超声振动的单颗磨粒切厚 $a_{\text{gmax}(uvag)}$,可以表示为

$$a_{\text{gmax}(uvag)} = \sqrt{\frac{4v_w a_p}{v_s C} \frac{1}{N_d(uvag) l_s(uvag)}} \quad (8)$$

式中, C 、 N_d 和 l_s 表示与磨粒形状相关的系数、有效磨粒数和磨削弧区长度。基于高斯分布模型,通

过磨削表面沟壑密度反向推导出超声振动辅助磨削条件下的有效磨粒数。发现轴向超声振动增大了有效磨粒数，减小了单颗磨粒切厚。CAO 等^[21]计算了切向超声振动辅助磨削 GH4169 镍基合金的单颗磨粒切厚。结果显示，由于切向超声振动磨粒与工件的分离现象，导致磨粒实际切削时间减少，从而产生一个瞬时较大的单颗磨粒切厚(图 14)，导致有效磨粒数的增大。

磨削过程通常包括滑擦、耕犁和成屑三个阶段^[104-106]。ABDULLAH 等^[107]开展超声振动磨削 7075 铝合金和 X210Cr12 钢时发现，超声振动的冲击效应可以提高材料去除时的单颗磨粒切厚，从而降低滑擦、耕犁过程占比，把更多能量用于材料成屑阶段。

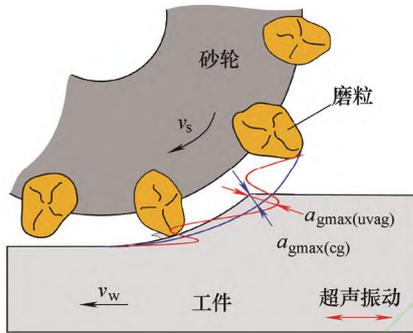


图 14 切向超声振动磨削的单颗磨粒切厚

3.2 超声磨削的材料去除方式

除了磨削轨迹效应以外，针对不同材料，超声振动辅助磨削的材料去除方式也不同。金属材料的磨削去除经过弹性变形、塑性变形和断裂阶段，超声振动可以产生软化效应^[107]，降低材料流动应力，使材料更容易产生塑性变形。

栗育琴等^[22]提出超声振动下磨削力的降低原因主要是材料等效硬度的减少，在超声振动过程中，合金微元发生左右振动，从而在合金内部产生压缩、膨胀和剪切应力，应力向四周的传递产生可以生成应力波，导致磨削力降低。BHADURI 等^[80]采用切向超声缓进深切磨削 GH4169 镍基合金，超声振动可以引起更高的机械载荷，导致在外力相同的情况下材料产生更大的塑性变形。VERMA 等^[17, 18]通过超声拉伸实验研究了超声振动对材料应力-应变关系的影响规律(图 15)，可以发现当超声开启时候材料塑性变形过程中的应力发生明显降低，他们进一步依据研究结果建立了超声软化效应下材料的 J-C 本构模型，并将其用于轴向超声振动辅助切削加工 Al6063 切削力的计算。依据该 J-C 模型，超声振动条件下材料的应力应变关系满足

$$\tau = \frac{1}{\sqrt{3}} (A_k + B\varepsilon^N) [1 + M \ln(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0})] [1 - (\frac{T - T_L}{T_m - T_L})^D] (1 - dE_u)^e \quad (9)$$

式中， τ 为材料流动应力， A_k 、 B 、 D 、 M 、 N 为 J-C 本构参数， ε 、 $\dot{\varepsilon}$ 和 $\dot{\varepsilon}_0$ 分别表示应变、应变率和参考应变率， T 、 T_L 和 T_m 分别表示温度、参考温度和材料熔点温度， d 和 e 为声软化系数，其值可以由超声振动拉伸试验获得， E_u 表示超声能量强度，可以表示为^[108]

$$E_u = \frac{\sigma_{acoustic}^2}{\rho v_c} \quad (10)$$

式中， ρ 和 v_c 分别表示材料密度和材料中声音传播速度。 $\sigma_{acoustic}$ 为声应力， $\sigma_{acoustic} = \rho v v_c$ ， v 表示材料中质点的真实速度。可以发现，超声频率越高，振幅越大，产生应变需要的流动应力越小，使得材料更容易发生塑性变形^[109]，最终降低磨削力。

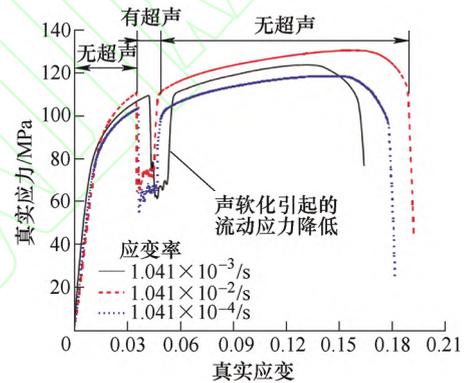


图 15 超声振动对材料应力-应变关系的影响^[17]

除此之外，MITROFANOV 等^[110]计算了超声振动辅助切削 GH4169 镍基合金中的摩擦力，提出相比于传统库仑摩擦应力模型，剪切摩擦应力模型^[111]更加适用于高接触应力条件的材料去除过程，相应的剪切摩擦应力 $\tau_{friction}$ 可以表示为

$$\tau_{friction} = K_m K_{chip} \quad (11)$$

式中， K_m 为剪切摩擦系数， K_{chip} 表示材料的剪切屈服应力。超声软化效应降低了材料的屈服应力，从而降低了切削过程中的摩擦应力。

与金属材料不同，硬脆陶瓷材料的磨削去除过程包括塑性去除和脆性去除两个阶段，因此，裂纹的产生和扩展^[113]是磨削硬脆陶瓷材料去除过程的关键，影响磨削力、材料去除率和工件表面完整性。WANG 等^[55]研究了超声振动辅助磨削硬脆材料的加工机理。当磨削载荷小于临界载荷 P^* 时，陶瓷主要以塑性方式去除，临界载荷 P^* 可以表示为：

$$P^* = 54.5 \left(\frac{\alpha}{\eta^2 \gamma^2} \right) \frac{K_I^4}{H_V^3} \quad (12)$$

式中, α 、 η 和 γ 为无量纲参数。 H_V 表示材料维氏硬度, K_I 表示材料断裂韧性。在塑性去除阶段, 磨粒切削时下部的材料发生显微塑性流动。任敬心和华定安^[99]指出, 当硬脆陶瓷表面由显微塑性流动形成时, 该表面具有金属材料磨削的基本特征, 磨痕长而完整, 且比较光滑, 没有明显的裂纹产生。超声磨削条件下, 材料的等效硬度为普通磨削时等效硬度的 30%, 导致超声振动辅助磨削陶瓷时的塑性去除域大于传统磨削。

当磨粒载荷超过临界载荷 P^* 后, 磨削过程中裂纹的产生和扩展^[113]是磨削硬脆陶瓷材料去除过程的关键, 影响磨削力、材料去除率和工件表面完整性。YANG 等^[15]建立了超声振动辅助磨削 ZrO_2 陶瓷的磨削力模型。他们指出, 随着磨削应力的增大, 首先产生中心裂纹, 然后产生横向裂纹, 当横向裂纹扩展至陶瓷材料表面时, 实现材料去除(图 16), 因此横向裂纹尺寸直接影响磨削表面质量。横向裂纹的长度 C_L 和深度 C_H 可以表示为

$$C_L = \varepsilon_1 \left(\frac{P}{K_{ID}} \right)^{\frac{3}{4}} \quad (13)$$

$$C_H = \varepsilon_2 \left(\frac{P}{H_V} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (14)$$

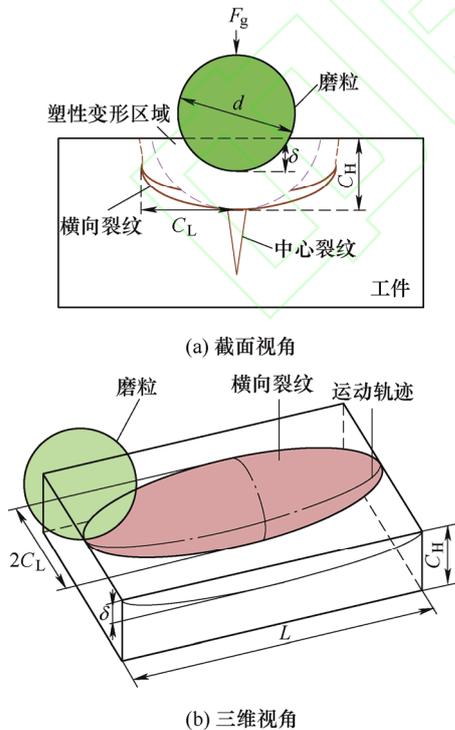


图 16 硬脆陶瓷材料去除过程中裂纹的产生与扩展^[28]

式中, P 为磨削载荷, ε_1 和 ε_2 为比例系数, K_{ID} 表

示材料动态断裂韧性。公式(13)和(14)表明超声振动降低了磨削力, 产生的磨削裂纹更小, 工件表面完整性更好。ZHANG 等^[97]发现超声振动使磨粒对硬脆材料表面产生高频冲击, 当超声频率超过阈值时, 单颗磨粒在多次冲击过程中产生的横向裂纹区域发生重叠(图 17), 重叠区域的大小决定着工件表面质量。超声频率阈值与磨削加工参数有关, 可以表示为

$$f_t = \frac{\omega_2 R}{2\pi v_w} \quad (15)$$

式中, f_t 、 ω 和 R 分别表示超声频率阈值、砂轮角速度和砂轮半径。

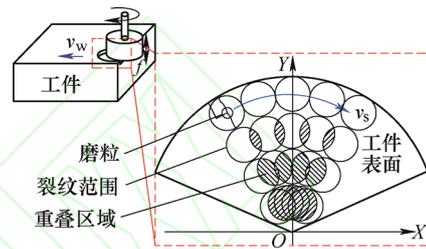


图 17 旋转超声加工的裂纹叠加区域^[97]

CFRP 复合材料具有优异的物理力学性能, 广泛使用在航空航天领域^[114-116]。对 CFRP 复合材料去除机制的研究集中于超声振动对纤维去除的影响。CHEN 等^[27]研究了超声振动辅助磨削 CFRP 复合材料中, 纤维方向与磨削方向的夹角对磨削力和表面完整性的影响。当该夹角为 45° 时, 砂轮磨削涉及的纤维量最少, 可以有效降低磨削力, 同时, 超声振动可以有效提高磨粒的锋利度, 减少纤维断裂现象, 并对工件表面产生超声清洗效果。超声清洗的主要基于超声空化作用^[117], 空化泡的迅速胀大和闭合对周围产生巨大压力, 在固体和液体界面产生反复冲击, 击碎工件表面残留物并将其剥落, 以提升加工表面质量。WANG 等分别构建了水平超声振动^[28]、竖直超声振动^[118]和二维椭圆超声振动^[119]辅助磨削 CFRP 复合材料的磨削力解析模型。由于纤维材料具有各向异性, 他们分别计算了沿着纤维方向和垂直于纤维方向的等效泊松比和等效弹性模量。然后同时从磨粒运动轨迹和材料去除机理考虑, 建立磨削力和加工参数之间的关系。结果表明水平方向超声振动主要降低了磨粒与工件的实际接触时间, 竖直方向的超声振动可以增大磨粒与工件的接触长度, 最终导致了磨削力的降低。

除此之外, 作用于冷却液的超声空化作用增强了冷去却液的换热能力和润滑能力。张小强^[51]

研究了超声空化作用对珩磨磨削区温度场的影响。超声空化作用包括空化泡的产生、涨大、振荡和溃灭。超声空化泡的溃灭瞬间可以释放出大量能量,该能量产生的冲击作用(10^7 Pa)远大于磨削冲击作用(图 18),可以对磨削流场产生扰动,工件表面流场由层流转化为紊流,最终使得超声振动时冷却液对流换热系数($1\ 400\ \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$)可以增大为传统磨削时冷却液对流换热系数($200\ \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$)的 7 倍以上。

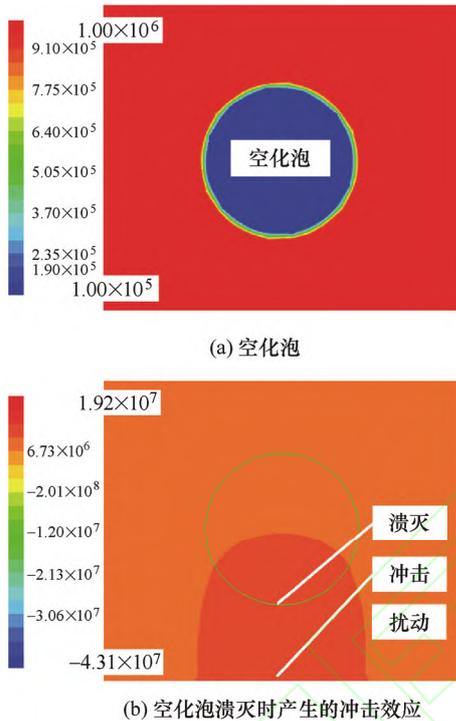


图 18 超声空化作用对冷却液流场压力的影响^[51]

4 超声辅助磨削的表面形成机制

4.1 超声振动对工件表面的影响

超声振动对工件表面的影响可以分为磨削轨迹产生的直接影响和超声振动物理效应的影响两方面。

磨削轨迹的直接影响包括磨粒运动轨迹的交叉和重叠^[128]、磨粒对工件表面的往复熨压^[15]和磨痕形貌的改变^[73]。WANG 等^[128]发现超声振动辅助磨削时,磨粒运动轨迹的重叠和交叉是引起表面粗糙度降低的主要原因之一。当超声频率超过阈值时,相邻磨粒轨迹发生交叉,在工件表面产生正弦状磨痕(图 19),超声频率和振幅的增大会提高磨粒运动轨迹重叠的程度,进一步提高表面质量。GAO 等^[57]分别研究了不同方向超声振动对磨削表面的影响。他们发现,由于切向超声振动的方向与磨粒运动方

向一致,所以切向超声振动主要是通过磨粒的往复熨压抛光来提高表面质量,而轴向超声振动的方向垂直于磨粒运动方向,因此主要通过拓宽磨削沟槽宽度和减小表面突出高度而提高表面质量。尹龙等^[73]发现超声振动增加了单颗磨粒磨削长度,使工件表面沟槽变宽,沟槽残留高度更低,降低了表面粗糙度。向道辉等^[24]在磨削 42CrMo 钢时观测到超声加工后工件表面纹理更加模糊,工件表面沟壑更浅、更窄,是表面粗糙度降低的主要原因之一。同时,超声振动增大了磨粒的轨迹长度,使得工件材料表面散热能力增大,工件表面残余压应力较高。

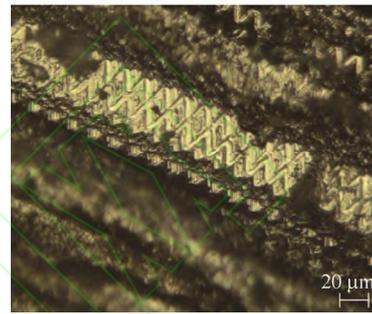
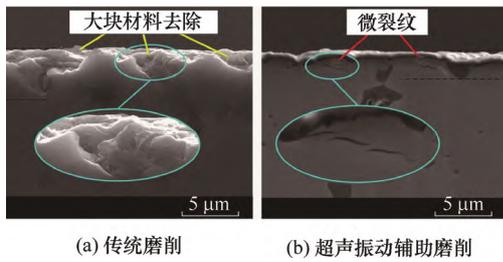


图 19 超声振动引起的磨粒轨迹交叉和重叠^[128]

超声振动物理效应的影响主要包括超声振动辅助磨削中的应力、应变、材料去除方式、砂轮磨损对加工表面的影响。BHADURI 等^[136]提出超声振动增大了切削过程中材料的侧向流动,使得 γ -TiAl 材料更容易实现塑性去除。同时,超声振动降低了材料去除过程中的剪切区拉应力,从而减少了工件表面裂纹的扩展,有效降低表面缺陷。NIK 等^[81]使用超声振动辅助磨削钛合金时发现超声的使用可有效避免钛元素与磨粒的粘连,对表面质量的改善起到积极作用。除此之外,LIANG^[34]和 MOLAIE^[139]等也发现超声振动缓解了砂轮的黏附磨损,提高了磨粒的锋利度,促进了工件表面质量提高。LI 等^[113]提出传统磨削 SiC 陶瓷时材料亚表面的损伤主要由大块断裂的去除方式导致,超声振动可以缓解材料的大块去除,促进材料微裂纹,因此超声振动辅助磨削后材料亚表面损伤裂纹更浅更短(图 20)。DING 等^[71]研究了超声振动辅助磨削 C/SiC 陶瓷基复合材料的表面/亚表面断裂机制。实验结果表明,磨削中纤维的断裂方式主要有 2 种,分别为层状脆性断裂和由材料拔出引起的坑型断裂。与普通磨削相比,超声振动辅助磨削对这两种断裂的减小均有明显改善效果。超声振动可以有效降低复合材料的纤维断裂,使得工件表面粗糙度明显降低,最大降幅为 12%。

图 20 两种加工方式后工件亚表面损伤^[113]

4.2 表面形成机制的研究方法与结果

目前对于超声振动辅助磨削工件表面形成机制的研究主要有三种方法：实验测量、理论模型构建和数值仿真计算。实验测量主要是通过实验结果测定和分析，阐明超声磨削的加工特点。理论模型构建是通过构建磨削区切削模型，计算磨削加工中的关键参数(单颗磨粒切厚、有效磨粒数、磨削弧长度)等，同时考虑工件的材料去除机制(塑性去除、脆-塑转换等)构建加工中的平衡方程来表征工件表面特定参数(表面粗糙度、表面轮廓特征频率等)。数值仿真法首先表征砂轮表面，一般通过假设磨粒的形状、大小以及分布构建砂轮表面几何模型，然后通过计算每一颗磨粒的相对运动轨迹来仿真计算工件表面轮廓，最后，通过检验仿真得到的表面参数来阐明加工效果。

实验方法可以快速、直观地体现出超声振动辅助磨削加工技术的优势。栗育秦等^[22]研究了磨削 Ti-6Al-4V 钛合金时超声振动对磨削力的影响，并观察了加工表面(图 21a 和 b)，发现超声振动产生的轴

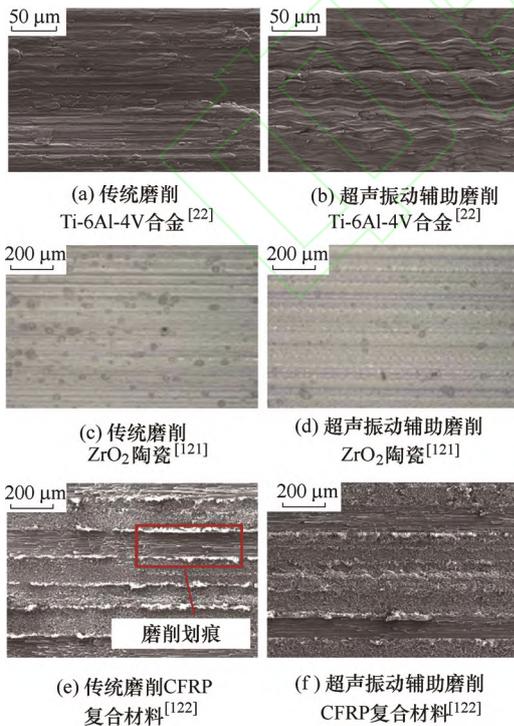


图 21 超声振动辅助磨削与传统磨削金属、陶瓷和复合材料的工件表面形貌对比

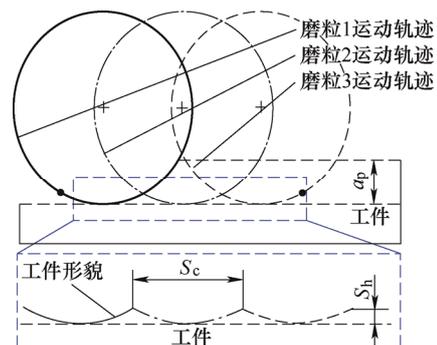
向运动在工件表面形成正弦状的磨削痕迹，减小了磨削钛合金的黏附现象，从而减少磨削过程中的摩擦和耕犁，提高了加工表面质量。除此之外，WDOWIK 等^[121]检测了超声辅助和普通磨削 ZrO₂ 陶瓷的表面质量，发现超声振动可以明显促进材料塑性去除，并可以在工件表面形成特殊织构。针对复合材料，LIANG 等^[122]发现超声振动而可以有效降低磨削 CFRP 复合材料时划痕的产生，其主要原因在于轴向超声振动可以有效增加磨削弧长度，磨粒运动轨迹之间的叠加对工件表面起到往复熨平的作用。

理论模型构建相比实验法较复杂，但是可以更加直接阐明超声磨削优势的根本原因。LI 等^[123]通过工件表面轮廓傅里叶变换得到的特征频率，评价了超声振动辅助磨削的加工效果。磨削区几何模型与傅里叶变换模型相结合，提出了工件形貌傅里叶变换的新模型，结果表明该模型对于计算普通磨削和超声磨削的工件表面都非常准确。NASKAR 等^[86]研究了 MQL 条件下高速超声振动辅助振动磨削 Ti-6Al-4V 钛合金表面形成机制，并采用沿着磨削方向的工件表面形貌几何参数评价了加工表面质量(图 22)。通过计算磨粒与工件的相对运动状态，得到了沿着磨削方向形成的工件表面形貌长度 S_c 和高度 S_h 的表达式

$$S_c = \frac{v_w L}{v_s} \quad (16)$$

$$S_h = \frac{1}{4d_s} \left(\frac{v_w L}{v_s} \right)^2 \quad (17)$$

式中， L 表示砂轮前进的距离。 S_h 的值越小表示磨粒与工件接触瞬间的冲击作用越弱，得到的工件表面质量越好。LI 等^[113]理论计算了 SiC 陶瓷的弹-塑和脆-塑性去除转换临界切削厚度，利用显微镜测量了脆塑性去除转换的临界切削厚度，然后基于纳米划痕实验和超声振动辅助磨削轨迹计算结果，建立了法向磨削力的理论模型。结果表明，与普通磨削相比，超声振动辅助磨削可以有效降低磨削力和亚表面损伤。

图 22 沿着磨削方向形成的工件表面形貌^[86]

数值仿真法具有很高的准确性，基本思路为首先构建砂轮表面磨粒出露高度函数，然后计算每一颗磨粒切削后工件表面轮廓，获得工件表面形貌函数(图 23)。由于需要计算每一颗磨粒的运动轨迹和干涉情况，使得计算量大。

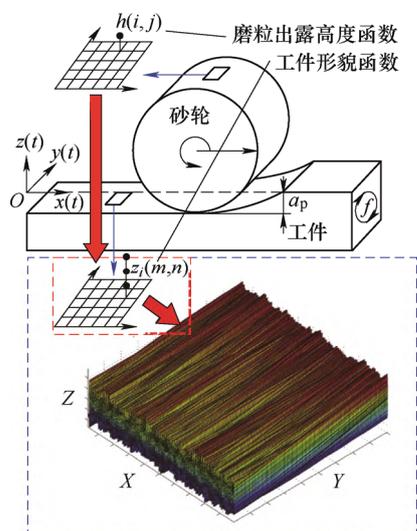


图 23 数值仿真计算得到的椭圆超声振动辅助磨削加工表面^[62]

WEN 等^[124]考虑了材料变形的三个阶段：完全弹性变形、弹-塑性变形和完全塑性变形阶段，分析了超声振动条件下磨粒与工件表面的接触行为，并且依据磨粒与工件的接触行为构建了工件表面形貌模型。他们发现，工件表面粗糙度随着超声振幅的增大先降低再升高，当超声振幅为 $4\ \mu\text{m}$ 时，超声振动的工件表面粗糙度比普通磨削条件降低了 24%，在超声振动辅助磨削中，磨粒的干涉运动使磨削表面高度分布比较集中，从而导致切削产生的磨痕更密，提高了工件表面质量。SUN 等^[125]研究了超声振动参数与工件表面粗糙度的关系。磨粒被认为球形的离散颗粒，磨刃被认为具有三角形形状，具体参数通过观测单颗磨粒得到，从而构建出砂轮表面模型。然后，逐步计算每一颗磨粒的运动轨迹，获得磨粒与工件干涉情况，从而构建工件表面模型。研究表明，超声参数和磨削参数是耦合在一起的，对于每一组磨削加工参数，应该有对应的超声振动参数，使得工件表面粗糙度达到最低值。在此基础上，ZHOU 等^[126]考虑超声振动中的泊松效应和磨粒复杂表面，计算了超声振动辅助磨削 12Cr2Ni4A 钢的工件表面形貌。在研究过程中，工件表面被看作由很多离散单元组成，材料的去除表现为离散点的消失。然后，计算每一颗磨粒的微切削行为，得到工件表面三维形貌、单颗磨粒切厚和

动态有效磨粒数。仿真结果表明，轴向超声振动的引入可以增加有效磨粒数，降低工件表面粗糙度。LI 等^[127]采用一种自相关函数计算了工件表面三维形貌，相似的是，他们也假设磨粒可为球形，磨粒的分布满足高斯分布规律。以此为基础，通过磨粒逐个微切削工件表面计算了三维表面形貌。结果表明，自相关函数可以很好地表征超声振动辅助磨削的工件表面形貌，与轴向超声振动磨削相比，径向超声振动磨削对工件表面的影响更加明显。WANG 等^[62]建立了椭圆超声振动辅助磨削的工件表面形貌模型，砂轮表面被分割成具有不同突出高度的点，磨粒突出高度整体满足高斯分布。在此基础上，计算了每一颗磨粒的运动轨迹，从而得到砂轮表面三维形貌。依据以上模型，分析了椭圆超声振动中径向振动和轴向振动分别对工件表面的影响。轴向超声振动可以在一定程度上降低磨削力和工件表面粗糙度，径向超声振动对于磨削力的降低效果更加明显，但是对于粗糙度的影响却很小。

5 结论

(1) 最近 20 年来，超声振动辅助磨削加工技术及装备研究的 SCI 收录期刊论文由每年 84 篇增加到每年 480 篇以上，说明超声振动辅助磨削加工技术受到了国内外学者更加广泛的重视。超声振动辅助磨削技术正朝向便捷化、专业化和多样化发展，其研究深度与广度都在不断扩展。

(2) 超声振动辅助磨削包括工具超声振动和工件超声振动两种方式。工具超声振动磨削不受工件形状、尺寸限制，但由于工具(砂轮)需满足谐振条件，因此工具直径较小，磨削速度较低，加工效率成倍提升困难。工件超声振动磨削适用于中小型零件的加工，由于可采用大直径工具(砂轮)，磨削速度高，因此加工效率可显著提升，适用于缓进深切磨削、高速超高速磨削、高效深切磨削等高效磨削加工。

(3) 超声振动促使磨粒运动轨迹相对传统磨削发生改变，产生冲击、磨削轨迹重叠、反复磨削现象，改变了单颗磨粒切厚和有效磨粒数等关键参数，提高了磨削过程的能量利用率。除此之外，针对于金属、陶瓷和复合材料，超声振动还可以分别产生软化、提高塑性去除域和改善纤维断裂方式等作用。

(4) 实验测量、理论模型和数值仿真都可以有

效描述和阐释超声振动辅助磨削加工表面的特征。通过超声磨削过程的磨粒运动轨迹重叠,可以有效降低表面和亚表面损伤,提升加工表面质量。

6 展望

(1) 研制可靠的超声振动辅助装置。现有的超声工具和磨削工艺仍然难以完全满足加工要求,超声加工过程中的发热问题影响着超声振动装备的可靠性,加工过程中的频率漂移仍然无法很好地解决,需要匹配高性能的超声电源,通过动态频率调整保证磨削过程中的系统谐振,减少超声装备的发热问题,同时,优化超声装备结构,并辅助散热装置(油冷、压缩空气等),提升装备散热性能,保证超声装备长时间工作的稳定性。同时,不断出现的新型零件具有更复杂的形状、更极限的尺寸,进一步研制满足超声功率、工件形状和尺寸要求的超声装备是实现超声振动辅助高效高品质磨削加工的前提。

(2) 提升超声振动辅助磨削加工中的检测技术。现阶段,超声振动频率和振幅的检测大多在非加工状态完成,而加工过程中的磨削力、热对超声装备谐振状态的影响规律尚不明确,同时,受限于力、热传感器分辨率限制(普通传感器分辨率频率远小于超声振动频率),无法检测到超声振动辅助磨削过程中的动态加工参量,因此需要提升传感器性能,开发超声振动辅助磨削加工的在线动态测量技术。

(3) 深化超声振动辅助磨削基础研究。随着大量新型复合材料的不断涌现,材料去除机理的研究不应只考虑磨削轨迹的影响,同时需要考虑材料在超声振动条件下引起材料的物理、化学性能变化(超声软化、超声空化效应等),从而进一步揭示新型材料超声振动辅助磨削加工的材料去除机制和表面创成机制。

(4) 工业应用驱动的超声振动辅助磨削机理研究。目前,实际加工中采用的超声工艺参数仍然主要凭经验确定,超声振动辅助磨削的基础研究成果难以很好地指导实际生产。为此,需要考虑更加复杂的实际加工环境,研究超声振动参数、磨削工艺参数、材料特性参数与加工过程中力、热、表面质量的关系,并考虑冷却液对换热和润滑的影响,打通基础研究与工程应用之间的障碍。

(5) 拓展超声磨削加工的研究深度和应用广度,实现航空航天、高档机床、高速列车、能源动力等高端装备复杂型面构件的超声振动辅助磨削加工。同时,进一步发展超声磨削与激光、电火花等复合的新型加工方式,促进超声振动辅助加工技术的跨越进步。

参 考 文 献

- [1] 徐九华, 张志伟, 傅玉灿. 镍基高温合金高效成型磨削的研究进展与展望[J]. 航空学报, 2014, 35(2): 351-360.
XU Jiuhua, ZHANG Zhiwei, FU Yucan. Review and prospect on high efficiency profile grinding of nickel-based superalloys[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(2): 351-360.
- [2] 梁巧云, 单坤, 李兆瑞, 等. 航发钛合金叶片金刚石砂带磨削的磨粒磨损研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2020, 40(4): 59-64.
LIANG Qiaoyun, SHAN Kun, LI Zhaorui, et al. Investigation of grain wear in diamond abrasive belt grinding titanium[J]. Diamond and Abrasives Engineering, 2020, 40(4): 59-64.
- [3] 丁文锋, 苗情, 李本凯, 等. 面向航空发动机的镍基合金磨削技术研究进展[J]. 机械工程学报, 2019, 55(1): 189-215.
DING Wenfeng, MIAO Qing, LI Benkai, et al. Review on grinding technology of nickel-based superalloys used for aero-engine[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(1): 189-215.
- [4] SETTI D, ARRABIYEH P A, KIRSCH B, et al. Analytical and experimental investigations on the mechanisms of surface generation in micro grinding[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2020, 149, 103489.
- [5] 刘秀梅, 肖贵坚, 刘智武, 等. 航空发动机整体叶盘数控砂带磨削变形行为及其试验研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2020, 40(3): 25-32.
LIU Xiumei, XIAO Guijian, LIU Zhiwu, et al. Research on deformation behavior of NC belt grinding of aero-engine blisk and its test[J]. Diamond and Abrasives Engineering, 2020, 40(3): 25-32.
- [6] 丁玉龙, 苗卫鹏, 骆苗地, 等. 陶瓷结合剂金刚石砂轮组织结构对其性能的影响[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2020, 40(4): 19-23.
DING Yulong, MIAO Weipeng, LUO Miaodi, et al. Influence of structure of vitrified bond diamond grinding

- wheel on its performance[J]. *Diamond and Abrasives Engineering*, 2020, 40(4): 19-23.
- [7] 赵恒华, 冯宝富, 高贯斌, 等. 超高速磨削技术在机械制造领域中的应用[J]. *东北大学学报*, 2003, 24(6): 564-568.
- ZHAO Henghua, FEN Baofu, GAO Guanbin, et al. Application of ultra-high speed grinding technology in the field of machinery manufacturing[J]. *Journal of Northeastern University*, 2003, 24(6): 564-568.
- [8] ZHONG Z W, RAMESH K, YEO S H. Grinding of nickel-based super-alloys and advanced ceramics[J]. *Materials and Manufacturing Processes*, 2001, 16(2): 195-207.
- [9] 张德远. 中国的超声加工[J]. *机械工程学报*, 2017, 53(19): 1-2.
- ZHANG Deyuan. Ultrasonic processing in China[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 53(19): 1-2.
- [10] 张德远, 刘逸航, 耿大喜, 等. 超声加工技术的研究进展[J]. *电加工与模具*, 2019, 5: 1-10.
- ZHANG Deyuan, LIU Yihang, GENG Daxi, et al. The research progress of ultrasonic machining technology. *Electromachining and Mould*. 2019, 5: 1-10.
- [11] 冯平法, 王健健, 张建富, 等. 硬脆材料旋转超声加工技术的研究现状及展望[J]. *机械工程学报*, 2017, 53(19): 3-21.
- FENG Pingfa, WANG Jianjian, ZHANG Jianfu, et al. Research status and future prospects of rotary ultrasonic machining of hard and brittle materials. *Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 53(19): 3-21.
- [12] NING F D, CONG W L. Ultrasonic vibration-assisted (UV-A) manufacturing process: State of the art and future perspectives[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, 51: 174-190.
- [13] YANG Z C, ZHU L D, ZHANG G X, et al. Review of ultrasonic vibration-assisted machining in advanced materials[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2020, 156, 103594.
- [14] 林书玉, 鲜小军. 功率超声换能器振动系统的优化设计及其研究进展[J]. *陕西师范大学学报(自然科学版)*2014, 42(6): 31-39.
- LI Shuyu, XIAN Xiaojun. Progress and optimization design of high power piezoelectric ultrasonic vibrating system. *Journal of Shaanxi Normal University (Natural Science Edition)*, 2014, 42(6): 31-39.
- [15] YANG Z C, ZHU L D, LIN B, et al. The grinding force modeling and experimental study of ZrO₂ ceramic materials in ultrasonic vibration assisted grinding[J]. *Ceramics International*, 2019, 45: 8873-8889.
- [16] SHEN J Y, WANG J Q, JIANG B, et al. Study on wear of diamond wheel in ultrasonic vibration-assisted grinding ceramic[J]. *Wear*, 2015, 332-333: 788-793.
- [17] VERMA C C, PANDEY P M, DIXIT U S. Modeling of static machining force in axial ultrasonic-vibration assisted milling considering acoustic softening[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2018, 136: 1-6.
- [18] VERMA C C, PANDEY P M, DIXIT U S. Estimation of workpiece-temperature during ultrasonic-vibration assisted milling considering acoustic softening[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2018, 140: 547-556.
- [19] SIDDIQ A, SAYED T E. Ultrasonic-assisted manufacturing processes: Variational model and numerical simulations[J]. *Ultrasonics*, 2012, 52: 521-529.
- [20] DONG S, DAPINO M J. Dynamic system model for ultrasonic lubrication in perpendicular configuration[J]. *Ultrasonics*, 2017, 75: 98-105.
- [21] CAO Y, YIN J F, DING W F, et al. Alumina abrasive wheel wear in ultrasonic vibration-assisted creep-feed grinding of Inconel 718 nickel-based superalloy[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2021, 297, 117241.
- [22] 栗育琴, 肖罡, 李涛. 超声辅助对 TC4 钛合金磨削力的影响[J]. *机械工程材料*, 2019, 43(7): 10-13.
- LI Yuqin, XIAO Zheng, LI Tao. Effect of ultrasonic assisted on grinding force for TC4 titanium alloy[J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2019, 43(7): 10-13.
- [23] BHADURI D, SOO S L, NOVOVIC D, et al. Ultrasonic assisted creep feed grinding of Inconel 718[J]. *Procedia CIRP*, 2013, 6: 615-620.
- [24] 向道辉, 牛肖肖, 李章东, 等. 超声辅助磨削淬硬 42CrMo 钢表面质量试验研究[J]. *河南理工大学学报*, 2020, 39(5): 73-79.
- XIANG Daohui, NIU Xiaoxiao, LI Zhangdong, et al. Experimental study on surface quality of hardened 42CrMo steel processed by ultrasound-assisted grinding[J]. *Journal of Henan polytechnic University*, 2020, 39(5): 73-79.
- [25] 刘浩, 靳刚, 李占光, 等. 氧化锆陶瓷超声磨削实验及磨削力模型研究[J]. *机械研究于应用*, 2019, 4(32): 55-59.

- LIU Hao, JIN Gang, LI Zhanguang, et al. Study on ultrasonic grinding experiment and grinding force model of zirconia ceramics[J]. *Mechanical Research and Application*, 2019, 4(32): 55-59.
- [26] LV D X, YAN C, CHEN G, et al. Mechanistic prediction for cutting force in rotary ultrasonic machining of BK7 glass based on probability statistics[J]. *Ultrasonics*, 2020, 101, 106006.
- [27] CHEN Y, LIANG Y H, Xu J H, et al. Ultrasonic vibration assisted grinding of CFRP composites: Effect of fiber orientation and vibration velocity on grinding forces and surface quality[J]. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 2018, 1: 189-196.
- [28] WANG H, HU Y B, CONG W L, et al. A mechanistic model on feeding-directional cutting force in surface grinding of CFRP composites using rotary ultrasonic machining with horizontal ultrasonic vibration[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2019, 155: 450-460.
- [29] MADARKAR R, AGARWAL S, ATTAR P, et al. Application of ultrasonic vibration assisted MQL in grinding of Ti-6Al-4V[J]. *Materials and Manufacturing Processes*, 2018, 33(13): 1445-1452.
- [30] 刘军, 范宝朋, 陈燕, 等. 超声振动磨削 CFRP 温度场的有限元仿真[J]. *机械科学与技术*, 2020, 39(6): 821-828.
- LIU Jun, FAN Baopeng, CHEN Yan, et al. FEM simulation of temperature field in ultrasonic vibration grinding of CFRP[J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2020, 39(6): 821-828.
- [31] ZHOU W H, TANG J Y, CHEN H F, et al. A comprehensive investigation of surface generation and material removal characteristics in ultrasonic vibration assisted grinding[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2019, 156: 14-30.
- [32] WANG H, HU Y B, CONG W L, et al. A novel investigation on horizontal and 3D elliptical ultrasonic vibrations in rotary ultrasonic surface machining of carbon fiber reinforced plastic composites[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, 52: 12-25.
- [33] CAO Y, ZHAO B, DING W F, et al. On the tool wear behavior during ultrasonic vibration-assisted form grinding with alumina wheels[J]. *Ceramics International*, Published online. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.06.059>.
- [34] LIANG Z Q, WANG X B. An investigation on wear mechanism of resin-bonded diamond wheel in elliptical ultrasonic assisted grinding (EUAG) of monocrystal sapphire[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2012, 212: 868-876.
- [35] 赵波, 陈凡, 童景琳. 超声磨削材料去除率的理论分析与试验研究[J]. *河南理工大学学报* 2013, 32(3): 302-307.
- ZHAO Bo, CHEN Fan, TONG Jinglin. Theoretical and experimental research on material removal rate under ultrasonic grinding[J]. *Journal of Henan Polytechnic University*, 2013, 32(3): 302-307.
- [36] 王大中, 吴淑晶, 林靖朋, 等. 基于 MQL 的超声椭圆振动微切削 Inconel718 的机理研究[J]. *机械工程学报*. 2021, 57: 1-8.
- WANG Dazhong, WU Shujing, LIN Jingpeng, et al. Research on ultrasonic elliptical vibration micro-cutting Inconel718 based on minimum quantity lubrication[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2021, 57: 1-8.
- [37] ZHOU W H, TANG J Y, SHAO W. Modelling of surface texture and parameters matching considering the interaction of multiple rotation cycles in ultrasonic assisted grinding[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2020, 166, 105246.
- [38] WOOD R W, LOOMIS A L. The physical and biological effects of high-frequency sound-waves of great intensity[J]. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 1927, 4: 417-436.
- [39] ARO H, KALLIONIEMI H, AHO A J, et al. Ultrasonic device in bone cutting: a histological and scanning electron microscopical study[J]. *Acta Orthopaedica Scandinavica*, 1981, 52: 5-10.
- [40] ZAITSEV G N, NIKITKOV N V, BUTUROVICH I K. Effectiveness of surface ultrasonic grinding of ceramics with diamond disks[J]. *Glass and Ceramics*, 1980, 37: 185-186.
- [41] 王先逵, 李洪斌. 超声砂带精密磨削技术[J]. *电加工*, 1988, 4: 17-21.
- WANG Xiankui, LI Hongbin. Ultrasonic belt precision grinding technology[J]. *Electromachining and Mould*, 1988, 4: 17-21.
- [42] KOMARAI AH M, REDDY P N. Rotary ultrasonic machining - a new cutting process and its performance[J]. *International Journal of Production Research*, 1991, 29(11): 2177-2187.
- [43] WU Y B, FAN Y F, KATO M. A feasibility study of

- microscale fabrication by ultrasonic-shoe centerless grinding[J]. Precision Engineering, 2006, 30: 201-210.
- [44] ZHENG J X, XU J W. Experimental research on the ground surface quality of creep feed ultrasonic grinding ceramics (Al_2O_3)[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2006, 19(4): 359-365.
- [45] 肖永军, 杨卫平, 李尧忠, 等. 旋转超声磨削装置研制[J]. 设计与研究, 2007(6): 70-72.
XIAO Yongjun, YANG Weiping, LI Yaozhong, et al. Development of rotary ultrasonic grinding equipment[J]. Design and Research, 2007, 6: 70-72.
- [46] 李华, 李征. 基于有限元的超声振动内圆磨削系统的主轴设计与研究[J]. 制造技术与机床, 2008(3): 135-139.
LI Hua, LI Zheng. Study on the design of ultrasonic vibration internal grinding system shaft based on FEM[J]. Manufacturing Technology & Machine tool, 2008(3): 135-139.
- [47] WU Y, LIANG Z, WANG X, et al. Elliptical ultrasonic assisted grinding (EUAG) of monocrystal sapphire - wear behavior of resin bond diamond wheel[J]. Advanced Materials Research. 2018, 126-128: 573-578.
- [48] SINGH R. Experimental investigations on machining characteristics of titanium in ultrasonic impact grinding[J]. International Journal of Computational Materials Science and Surface Engineering, 2010, 3(1): 24-33.
- [49] RABIEI F, RAHIMI A R, HADAD M J. Performance improvement of eco-friendly MQL technique by using hybrid nanofluid and ultrasonic-assisted grinding[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 93: 1001-1015.
- [50] ZHAO B, CHEN F, JIA X F, et al. Surface quality prediction model of nano-composite ceramics in ultrasonic vibration-assisted ELID mirror grinding[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2017, 31(4): 1877-1884.
- [51] 张小强. 超声振动外圆珩磨磨削区温度场及单空化泡溃灭温度研究[D]. 太原: 中北大学, 2017.
ZHANG Xiaoqiang. Study on temperature field and single cavitation bubble collapse temperature in the grinding zone under ultrasonic vibration cylindrical honing[D]. Taiyuan: North university of China, 2017.
- [52] XIANG D H, ZHOU Z K, LIU Z Y, et al. Abrasive wear of a single CBN grain in ultrasonic-assisted high-speed grinding[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 98: 67-75.
- [53] MISHRA V, PANDEY P M. Experimental investigations into electric discharge grinding and ultrasonic vibration-assisted electric discharge grinding of Inconel 601[J]. Materials and Manufacturing Process, 2018, 33(14): 1518-1530.
- [54] ZHAO B, GUO X C, BIE W B, et al. Thermo-mechanical coupling effect on surface residual stress during ultrasonic vibration-assisted forming grinding gear[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 59: 19-32.
- [55] WANG Y, LIN B, WANG S L, et al. Study on the system matching of ultrasonic vibration assisted grinding for hard and brittle materials processing[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2014, 77: 66-73.
- [56] ZHENG F F, Kang R K, DONG Z G, et al. A theoretical and experimental investigation on ultrasonic assisted grinding from the single-grain aspect[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2018, 148: 667-675.
- [57] GAO T, ZHANG X P, LI C H, et al. Surface morphology evaluation of multi-angle 2D ultrasonic vibration integrated with nanofluid minimum quantity lubrication grinding[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 51: 44-61.
- [58] ZHAO B, CHANG B Q, WANG X B, et al. System design and experimental research on ultrasonic assisted elliptical vibration grinding of Nano-ZrO₂ ceramics[J]. Ceramics International, 2019(45): 24865-24877.
- [59] 袁松梅, 唐志祥, 吴奇, 等. 纵扭超声换能器设计及其性能测试研究[J]. 机械工程学报, 2019, 55(1): 139-148.
YUAN Songmei, TANG Zhixiang, WU Qi, et al. Design of longitudinal torsional ultrasonic transducer and its performance Test[J]. Journal of Mechanical Engineering. 2019, 55(1): 139-148.
- [60] 陈涛, 刘德福, 严日明, 等. 纵弯复合型超声椭圆振动辅助抛光光纤阵列系统设计[J]. 振动与冲击, 2017, 36(24): 242-249.
CHEN Tao, LIU Defu, YAN Riming, et al. Design of longitudinal bending compound mode ultrasonic elliptical vibration-assisted fiber array polishing system[J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(24): 242-249.
- [61] AKBARI J, BORZOIE H, MAMDUHI M H. Study on ultrasonic vibration effects on grinding process of alumina ceramic[J]. International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering, 2008, 2(5): 722-726.
- [62] WANG Q Y, LIANG Z Q, WANG X B, et al. Modelling and analysis of generation mechanism of micro-surface topography during elliptical ultrasonic assisted grinding[J].

- Journal of Materials Processing Technology, 2020, 279, 116585.
- [63] 徐瑞玲, 赵波. 三维超声辅助磨削的表面质量研究[J]. 检测与质量, 2020(5): 102-105.
XU Ruiling, ZHAO Bo. Study on surface quality of three-dimensional ultrasound-assisted grinding[J]. Test and Quality, 2020(5): 102-105.
- [64] 马新毅. 三维超声辅助平面磨削力研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2016, 5(36): 69-74.
MA Xinyi. Study on three-dimensional ultrasonic-aided grinding force[J]. Diamond and Abrasive Engineering, 2016, 5(36): 69-74.
- [65] 徐超亮, 汤晓华, 夏天煜, 等. 旋转超声机床的机电系统设计[J]. 机床与液压, 2014, 42(20): 22-24.
XU Chaoliang, TANG Xiaohua, XIA Tianyu, et al. Design of mechatronics system for rotary ultrasonic machining[J]. Machine Tool and Hydraulics, 2014, 42(20): 22-24.
- [66] 韩雷震. 旋转超声机床动态特性分析及磨削力与材料去除研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
HAN Leizhen. Analysis of dynamic Characteristics of rotary ultrasonic machine tool and research on grinding force and material removal[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.
- [67] 黎志国, 姚震, 张永俊, 等. 旋转超声磨边机床设计与实验[J]. 机械设计与制造, 2021, 5: 92-95.
LI Zhiguo, YAO Zhen, ZHANG Yongjun, et al. Design and experimental study of rotary ultrasonic edge grinding machine[J]. Machinery Design and Manufacture, 2021, 5: 92-95.
- [68] 张能, 魏昕, 汪永超, 等. 超声振动磨削工程陶瓷的磨削力试验研究[J]. 组合机床与自动化加工技术. 2019, 1: 23-25.
ZHANG Neng, WEI Xin, WANG Yongchao, et al. Experimental study on grinding force of engineering ceramics by ultrasonic vibration grinding[J]. Modular Machine and Automatic Manufacturing Technique, 2019, 1: 23-25.
- [69] 丁仕燕, 徐家文, 干为民, 等. 陶瓷叶片型面超声磨削数控装置研制[J]. 设计与研究, 2010, 4: 73-77.
DING Shiyan, XU Jiawen, GAN Weimin, et al. Development of the CNC device of ultrasonic grinding the surface of ceramic blade[J]. Design and Research, 2019, 1: 23-25.
- [70] 唐军, 赵波. 一种新型纵扭复合超声振动系统的研究[J]. 机械科学与技术, 2015, 34(5): 742-747.
TANG Jun, ZHAO Bo. Study on a new type of longitudinal-torsional composite ultrasonic vibration system[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering 2015, 34(5): 742-747.
- [71] DING K, SU H H, CUI F F, et al. Study on surface/subsurface breakage in ultrasonic assisted grinding of C/SiC composites[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 91: 3095-3105.
- [72] 付俊帆, 秦慧斌, 吴霄, 等. 大负载纵弯谐振超声磨削变幅器的设计与试验[J]. 工具技术, 2018, 52: 20-24.
FU Junfan, QIN Huibin, WU Xiao, et al. Design and research of longitudinal-flexural resonant ultrasonic grinding transducer with large load[J]. Tool Engineering, 2018, 52: 20-24.
- [73] 尹龙, 赵波, 郭星晨, 等. 超声辅助内圆磨削 40Cr15Mo2VN 轴承套圈的试验研究[J]. 中国机械工程, 2021, 32(10): 1172-1180.
YIN Long, ZHAO Bo, GUO Xingchen, et al. Experimental research on ultrasonic assisted internal grinding of 40Cr15Mo2VN bearing ring[J]. China Mechanical Engineering, 2021, 32(10): 1172-1180.
- [74] LI S S, WANG L J, LI G Z, et al. Small hole drilling of Ti-6Al-4V using ultrasonic-assisted plasma electric oxidation grinding[J]. Precision Engineering, 2021, 67: 189-198.
- [75] 谢鸥, 李华, 曹洋, 等. 旋转超声振动加工中非接触电能传输特性研究[J]. 机械科学与技术, 2017, 36(5): 736-740.
XIE Ou, LI Hua, CAO Yang, et al. Study on contactless power transmission characteristic in rotary ultrasonic vibration machining[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2017, 36(5): 736-740.
- [76] 周莲, 李华. 超声磨削系统中非接触电能传输特性对声学系统的影响[J]. 苏州科技大学学报, 2019, 32(2): 75-80.
ZHOU Lian, LI Hua. Influence of non-contact electric energy transmission on acoustic system in ultrasonic grinding system[J]. Journal of Suzhou University of Science and Technology, 2019, 32(2): 75-80.
- [77] Liang Z Q, WU Y B, WANG X B, et al. A new two-dimensional ultrasonic assisted grinding (2D-UAG) method and its fundamental performance in monocrystal silicon machining[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2010, 50: 728-736.
- [78] AZARHOUSHANG B, TAWAKOLI T. Developing a

- special block sonotrode for ultrasonic-assisted grinding process[J]. *International Journal of Mechatronics and Manufacturing System*, 2012, 5(2): 165-176.
- [79] BHADURI D, SOO S L, ASPINWALL D K, et al. A study on ultrasonic assisted creep feed grinding of nickel based superalloys[J]. *Procedia CIRP*, 2012, 1: 359-364.
- [80] BHADURI D, SOO S L, NOVovic D, et al. Ultrasonic assisted creep feed grinding of Inconel 718[J]. *Procedia CIRP*, 2013, 6: 615-620.
- [81] NIK M G, MOVAHHEDI M R, AKBARI J. Ultrasonic-assisted grinding of Ti6Al4V alloy[J]. *Procedia CIRP*, 2012, 1: 353-358.
- [82] PAKNEJAD M, ABDULLAH A, AZARHOUSHANG B. Effects of high power ultrasonic vibration on temperature distribution of workpiece in dry creep feed up grinding[J]. *Ultrasonic - Sonochemistry*, 2017, 39: 392-402.
- [83] YANG Z C, ZHU L D, NI C B, et al. Investigation of surface topography formation mechanism based on abrasive-workpiece contact rate model in tangential ultrasonic vibration-assisted CBN grinding of ZrO₂ ceramics[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2019, 155: 66-82.
- [84] CAO Y, ZHU Y J, DING W F, et al. Vibration coupling effects and machining behavior of ultrasonic vibration plate device for creep-feed grinding of Inconel 718 nickel-based superalloy[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2021, Published online. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2020.12.039>.
- [85] CAO Y, ZHU Y J, LI H N, et al. Development and performance of a novel ultrasonic vibration plate sonotrode for grinding[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, 57: 174-186.
- [86] NASKAR A, CHOUDHARY A, PAUL S. Surface generation in ultrasonic-assisted high-speed superabrasive grinding under minimum quantity cooling lubrication with various fluids[J]. *Tribology International*, 2021, 156, 106815.
- [87] 林书玉, 张福成, 郭孝武. 超声频矩形六面体的三维耦合振动[J]. *声学学报*. 1991, 16(2): 91-97.
LIN Shuyu, ZHANG Fucheng, GUO Xiaowu. Three dimensional coupled vibration of block-like resonators[J]. *Acta Acustica*, 1991, 16(2): 91-97.
- [88] 任树初. 压电振子多维耦合振动(I)-纯压电振子[J]. *声学学报*, 1983, 8(3): 147-158.
REN Shuchu. Multi-dimensional coupled vibrations of piezoelectric vibrators (I) pure piezoelectric vibrators[J]. *Acta Acustica*, 1983, 8(3): 147-158.
- [89] 任树初. 压电振子多维耦合振动(II)-复合电振子[J]. *声学学报*, 1983, 8(5): 272-279.
REN Shuchu. Multi-dimensional coupled vibrations of piezoelectric vibrators (II) composite piezoelectric vibrators[J]. *Acta Acustica*, 1983, 8(5): 272-279.
- [90] 林仲茂. 超声变幅杆的原理和设计[M]. 北京: 科学出版社, 1987.
LIN Zhongmao. Principle and design of ultrasonic horn[M]. Beijing: Science Press, 1987.
- [91] 曹凤国. 超声加工技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
CAO Fengguo. Ultrasonic machining technology[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004.
- [92] 林书玉. 扭转振动超声变幅杆计算及其等效电路[J]. *声学与电子工程*. 1995, 4: 19-23.
LIN Shuyu. Calculation of torsional vibration ultrasonic horn and its equivalent circuit[J]. *Acoustics and Electronics Engineering*, 1995, 4: 19-23.
- [93] 王晓宇, 林书玉. 锥形剖面径向复合超声换能器的机电等效电路[J]. *声学学报*, 2021, 46(2): 271-280.
WANG Xiaoyu, LIN Shuyu. Electromechanical equivalent circuit of conical section[J]. *Acta Acustica*, 2021, 46(2): 271-280.
- [94] 朱昆仑, 李翔龙, 刘一凡, 等. 基于 Workbench 的夹心式压电超声换能器的尺寸优化[J]. *机械工程师*, 2018, 6: 28-30.
ZHU Kunlun, LI Xianglong, LIU Yifan, et al. Size optimization of sandwich piezoelectric ultrasonic transducer based on workbench[J]. *Mechanical Engineer*, 2018, 6: 271-280.
- [95] LU K K, TIAN Y L, LIU C F, et al. Design of a novel 3D ultrasonic vibration platform with tunable characteristics[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2020, 186, 105895.
- [96] ABDULLAH A, SHAHINI M, PAK A. An approach to design a high power piezoelectric ultrasonic transducer[J]. *Journal of Electroceram*, 2008, 22: 369-382.
- [97] ZHANG X F, YANG L, WANG Y, et al. Mechanism study on ultrasonic vibration assisted face grinding of Hard and brittle materials[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, 50: 520-527.
- [98] WU Q L, WANG C, CUI M M, et al. Analysis of ultrasonic vibration belt grinding processing method[C]. 7th Annual International Conference on Materials Science and Engineering, 2019, 562: 012145.

- [99] 任敬心, 华定安. 磨削原理[M]. 北京: 电子工业出版社, 2011.
REN Jingxin, HUA Dingan. Grinding principle[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2011.
- [100] TOUBHANS B, FROMENTIN G, VIPREY F, et al. Machinability of Inconel 718 during turning: Cutting force model considering tool wear, influence on surface integrity[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2020, 285, 116809.
- [101] ZHANG Y Z, FANG C F, HUANG G Q, et al. Modeling and simulation of the distribution of undeformed chip thicknesses in surface grinding[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2018, 127: 14-27.
- [102] YANG M, LI C H, ZHANG Y B, et al. Maximum undeformed equivalent chip thickness for ductile-brittle transition of zirconia ceramics under different lubrication conditions[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2017, 122: 55-65.
- [103] WU B F, ZHAO B, DING W F, SU H H. Investigation of the wear characteristics of microcrystal alumina abrasive wheels during the ultrasonic vibration-assisted grinding of PTMCs[J]. Wear, Published online. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.203844>.
- [104] LI B K, DAI C W, DING W F, et al. Prediction on grinding force during grinding powder metallurgy nickel-based superalloy FGH96 with electroplated CBN abrasive wheel[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2021, 34(8): 65-74.
- [105] DURGUMAHANTI U P, SINGH V, RAO P V. A New Model for Grinding Force Prediction and Analysis[J], International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2010, 50: 231-240.
- [106] DAI C W, YIN Z, DING W F, et al. Grinding force and energy modeling of textured monolayer CBN wheels considering undeformed chip thickness nonuniformity[J]. International Journal of Mechanical Sciences. 2019, 157-158: 221-230.
- [107] ABDULLAH A, SOTOODEZADEH M, ABEDINI R, et al. Experimental study on ultrasonic use in dry creep-feed up-grinding of aluminum 7075 and steel X210Cr12[J], International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 14(2): 191-198.
- [108] SIDDIQ A, SAYED T E. Ultrasonic-assisted manufacturing processes: Variational model and numerical simulations[J]. Ultrasonics, 2012, 52: 521-529.
- [109] WU B F, CAO Y, ZHAO J S, et al. The effect of superimposed ultrasonic vibration on tensile behavior of 6061-T6 aluminum alloy[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, published online. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07564-8>.
- [110] MITROFANOV A V, AHMED N, BABISKY V I, et al. Effect of lubrication and cutting parameters on ultrasonically assisted turning of Inconel 718[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 162-163: 649-654.
- [111] YEN Y C, JAIN A, TAYLAN A. A finite element analysis of orthogonal machining using different tool edge geometries[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 146: 72-81.
- [112] XIAO X Z, ZHENG K, LIAO W H, et al. Study on cutting force model in ultrasonic vibration assisted side grinding of zirconia ceramics[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2016, 104: 58-67.
- [113] LI C, ZHANG F H, MENG B B, et al. Material removal mechanism and grinding force modelling of ultrasonic vibration assisted grinding for SiC ceramics[J]. Ceramics International, 2017, 43: 2981-2993.
- [114] 刘树良, 陈涛, 魏宇祥, 等. 旋转超声振动断面磨削 CFRP 表面质量研究[J]. 航空制造技术, 2016, 5: 57-61.
LIU Shuliang, CHEN Tao, WEI Yuxiang, et al. Study on surface quality of cfrp after rotary ultrasonic face grinding[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 5: 57-61.
- [115] 王巍, 陈燕, 牟娟, 等. 钎焊金刚石工具磨削 CFRP 的试验研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2012, 32(1): 15-18.
WANG Wei, CHEN Yan, MOU Juan, et al. Experiment on CFRP edge machining with brazed diamond grinding head[J]. Diamond and Abrasives Engineering, 2012, 32(1): 15-18.
- [116] 周井文, 秦文津, 穆英娟, 等. 碳纤维复合材料铣削与磨削加工对比研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2020, 40(4): 76-80.
ZHOU Jingwen, QIN Wenjing, MU Yingjuan, et al. Comparative study on machining of CFRP by end mill and abrasive router[J]. Diamond and Abrasives Engineering, 2020, 40(4): 76-80.
- [117] 冯若, 黄金兰. 超声清洗及其物理机制[J]. 应用声学, 1994, 1(3): 42-47.
FENG Ruo, HUANG Jinlan. Ultrasonic cleaning and its physical mechanism[J]. Journal of Applied Acoustics,

- 1994, 1(3): 42-47.
- [118] WANG H, PEI Z J, CONG W L. A mechanistic cutting force model based on ductile and brittle fracture material removal modes for edge surface grinding of CFRP composites using rotary ultrasonic machining[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2020, 176, 105551.
- [119] WANG H, PEI Z J, CONG W L. A feeding-directional cutting force model for end surface grinding of CFRP composites using rotary ultrasonic machining with elliptical ultrasonic vibration[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2020, 152, 103540.
- [120] SUN J, GUO Y B. A comprehensive experimental study on surface integrity by end milling Ti-6Al-4V[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, 209: 4036-4042.
- [121] WDOVIK R, PORZYCKI J, MAGDZIAK M. Measurements of surface texture parameters after ultrasonic assisted and conventional grinding of ZrO₂ based ceramic material characterized by different states of sintering[J]. *Procedia CIRP*, 2017, 62: 293-298.
- [122] LIANG Y H, CHEN Y, CHEN B B, et al. Feasibility of ultrasonic vibration assisted grinding for carbon fiber reinforced polymer with monolayer brazed grinding tools[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2019, 20: 1083-1094.
- [123] LI L, TANG J Y, WEN Y Q, et al. Numerical simulation of ultrasonic-assisted grinding surfaces with Fast Fourier Transform[J]. *Journal of Tribology*, 2020, 142: 092301.
- [124] WEN Y Q, TANG J Y, Zhou W, et al. Study on contact performance of ultrasonic-assisted grinding surface[J]. *Ultrasonics*, 2019, 91: 193-200.
- [125] SUN S Y, TANG J Y, SHAO W, et al. Research on the matching relationship between ultrasonic-assisted grinding parameters and workpiece surface roughness[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, 102: 487-496.
- [126] ZHOU W H, TANG J Y, CHEN H F, et al. A comprehensive investigation of surface generation and material removal characteristics in ultrasonic vibration assisted grinding[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2019, 156: 14-30.
- [127] LI L, TANG J Y, WEN Y Q, et al. Characterization of ultrasonic-assisted grinding surface via the evaluation of the autocorrelation function[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, 104: 4219-4230.
- [128] WANG Y, LIN B, CAO X Y, et al. An experimental investigation of system matching in ultrasonic vibration assisted grinding for titanium[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2014, 214: 1871-1878.
- [129] CHEN Y R, SU H H, QIAN N, et al. Ultrasonic vibration-assisted grinding of silicon carbide ceramics based on actual amplitude measurement: Grinding force and surface quality[J]. *Ceramics International*, 2021, 47: 15433-15441.
- [130] LI D G, TANG J Y, CHEN H F, et al. Study on grinding force model in ultrasonic vibration-assisted grinding of alloy structural steel[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, 101: 1467-1479.
- [131] UNYANIN A N, KHOUSAINOV A S. Study of forces during ultrasonic vibration assisted grinding[J]. *Procedia Engineering*, 2016, 150: 1000-1006.
- [132] CHEN F, LI G X, ZHAO B, et al. Thermomechanical coupling effect on characteristics of oxide film during ultrasonic vibration-assisted ELID grinding ZTA ceramics[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2021, 34(6): 125-140.
- [133] CHEN H F, TANG J Y, LANG X J, et al. Influences of dressing lead on surface roughness of ultrasonic-assisted grinding[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, 71: 2011-2015.
- [134] ELHAMI S, RAZFAR M R, FARAHNAKIAN M. Analytical, numerical and experimental study of cutting force during thermally enhanced ultrasonic assisted milling of hardened AISI 4140[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2015, 103: 158-171.
- [135] UHLMANN E. Surface formation in creep feed grinding of advanced ceramics with and without ultrasonic assistance[J]. *Annals of the CIRP*, 1998, 47: 249-252.
- [136] BHADURI D, SOO S L, ASPINWALL D K, et al. Ultrasonic assisted creep feed grinding of gamma titanium aluminide using conventional and superabrasive wheels[J]. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 2017, 66: 241-344.
- [137] TAWAKOLI T, AZARHOUSHANG B. Influence of ultrasonic vibrations on dry grinding of soft steel[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2008, 48: 1585-1591.

- [138] 张洪丽, 张建华. 切向超声振动辅助磨削对单颗粒切削力的影响[J]. 兵工学报, 2011, 32(4): 487-492. ZHANG Hongli, ZHANG Jianhua. Effects of tangential ultrasonic vibration on grinding force of single abrasive grit[J]. Acta Armamentarii, 2011, 32(4): 487-492.
- [139] MOLAIE M M, AKBARI J, MOVAHHEDY M R. Ultrasonic assisted grinding process with minimum

quantity lubrication using oil-based nanofluids[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 129: 212-222.

作者简介: 丁文锋(通信作者), 男, 1978 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要从事难加工材料高效精密磨削技术与应用研究。

E-mail: dingwf2000@vip.163.com

曹洋, 男, 1989 年出生, 博士研究生。主要从事航空发动机镍基合金叶片超声辅助磨削加工技术研究。

E-mail: y.caol@foxmail.com

