

表面质量控制及检测

# 超声振动辅助加工表面微结构及其特性研究进展

张存鹰<sup>1,2</sup>, 赵波<sup>1</sup>

(1.河南理工大学 机械与动力工程学院, 河南 焦作 454150;  
2.河南职业技术学院 机电工程系, 郑州 450046)

**摘要:** 针对超声振动复合加工方法种类繁多且表面微结构指征复杂等问题, 阐述了表面微结构的内容和研究现状, 论述了国内外超声切削、磨削、表面强化等方法的加工原理及超声振动加工表面微结构特性的试验研究方法, 归纳了超声振动条件下表面粗糙度、表面微观形貌的建模方法及其特点, 讨论了实验回归建模、数值解析建模和神经网络建模的研究进展, 并预测了国内外超声振动表面加工的新技术领域和发展方向, 对改善高性能难加工材料的表面微结构特性具有重要意义。

**关键词:** 超声振动加工; 表面微结构; 表面形貌; 表面粗糙度; 表面建模

**中图分类号:** TG5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2019)05-0259-16

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.05.038

## Research Progress of Properties of Surface Micro-structure in Ultrasonic Vibration Assisted Machining

ZHANG Cun-ying<sup>1,2</sup>, ZHAO Bo<sup>1</sup>

(1.School of Mechanical and Power Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, 454150, China;  
2.Department of Mechanical and Electrical Engineering, Henan Polytechnic, Zhengzhou, 450046, China)

**ABSTRACT:** The introduction of ultrasonic vibration into typical material processing can solve the problem that traditional processing is difficult to overcome. In view of the variety of ultrasonic vibration machining methods and the complexity of surface micro-structures, the main contents and research status of surface micro-structures have been described. The machining principle of ultrasonic cutting, ultrasonic grinding and ultrasonic surface strengthening and the experimental research methods of surface micro-structure characteristics in ultrasonic machining have been discussed. The modeling methods and characteristics of surface roughness and surface micro-topography under ultrasonic vibration are summarized. The research progress of experimental modeling, numerical analysis modeling and neural network modeling have been expounded. Finally, the new technology fields and development tendency of ultrasonic vibration surface processing technology at domestic and foreign are predicted, which is of great significance to improve the surface micro-structure characteristics of high-performance and difficult-to-machine materials.

**KEY WORDS:** ultrasonic vibration machining; surface micro-structure; surface topography; surface roughness; surface modeling

收稿日期: 2018-09-29; 修订日期: 2018-11-15

Received: 2018-09-29; Revised: 2018-11-15

基金项目: 国家自然科学基金 (51475148, U1604255)

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China (51475148, U1604255)

作者简介: 张存鹰 (1982—), 女, 博士研究生, 主要研究方向为精密制造技术、超声振动表面加工技术。

Biography: ZHANG Cun-ying (1982—), Female, Doctor, Research focus: precision manufacturing.

通讯作者: 赵波 (1956—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为再制造工程、精密制造装备。邮箱: zhaob@hpu.edu.cn

Corresponding author: ZHAO Bo (1956—), Male, Doctor, Professor, Research focus: precision machining theory and equipment. E-mail: zhaob@hpu.edu.cn

随着航天、国防、生物工程、精密机械等装备的快速发展,传统加工逐渐难以满足日益增长的精度和表面加工质量要求。钛合金、陶瓷材料、镍基高温合金、超高强度铝合金材料等由于其硬度高、比强度高、耐高温及耐腐蚀性等优良特性被广泛应用于航天航空、军工等先进制造领域。然而这些材料因其高硬度、高强度、导热性差等特点导致切削加工性能较差,是典型的难加工材料<sup>[1]</sup>,零件经过加工后产生的表面沟痕、微裂纹等缺陷加剧缩短了材料的疲劳周期。断裂力学表示,较大的表面粗糙度值和表面沟痕将导致表面残余应力集中,易降低表面疲劳强度,且这种现状在高强度材料中表现尤其明显<sup>[2-3]</sup>,而高性能材料零件的关键性能又往往取决于零件表面微结构特征。因此在加工脆硬性典型材料时,需对其表面微观形貌及表面粗糙度进行有效控制。

针对以上问题,对加工表面微观结构的研究引起了广大学者的重视。国内外研究人员试图通过试验研究和表面建模等方式来对零件表面的微结构进行控制,将超声振动引入难加工材料的切削加工是一种有效方法。超声振动辅助切削因其对材料的适应性广、切削效果好、切削效率高、切削寿命长等优点,近年来得到了广泛研究。已有研究表明,采用超声振动技术能够在加工过程中通过超声振动对零件表层产生压应力,进而对零件表面微结构进行有效控制,改善零件表面微观结构并延长刀具寿命<sup>[4]</sup>。

## 1 加工表面微结构研究现状

表面微观形貌和表面粗糙度是衡量表面微结构的重要指征,表面粗糙度是衡量表面微结构的关键性指标<sup>[5]</sup>。二维粗糙度又称为线粗糙度,在平面上沿不同的直线方向进行测量,具体有高度参量、功能参量和间距参量等,以测量高度参量为主。二维高度参量主要采用轮廓算术平均偏差  $R_a$ 、微观不平度十点高度  $R_z$  和轮廓最大高度  $R_y$  等表征来衡量。在面积范围内进行三维扫描测量可得到面粗糙度,有高度参量、功能参量、空间参量和复合参量等。高度参量有算术平均值  $S_a$ 、均方根方差  $S_q$ 、最大波峰  $S_p$ 、最大波谷  $S_v$ 、表面偏态  $S_{ssk}$  和表面峰态  $S_{sku}$ ;空间参量有衰减自相关长度  $S_{al}$ 、表面纹理结果比率  $S_{tr}$  和表面纹理方向  $S_{td}$ 。

具有相同粗糙度的两个加工表面的表面形貌可能相差很大,即粗糙度表征不能完全反映加工表面的本质特征。表面形貌特征与零件的耐磨性、配合性质、密封性、疲劳强度、接触刚度、振动与噪音等有密切关系,对零件的使用性能和可靠性有重要影响。加工表面微观形貌特征一般由所采用的加工方法及其他相关因素形成,例如切削刃形状、刀具运动轨迹、刀具后刀面与工件表面之间的摩擦、切屑分离导致材料表面层的塑性变形、刀具刚度不足及机床引起的系统

震动等。加工方法和工件材料不同导致已加工表面产生刀痕的深浅、疏密、形状和纹理都不同。表面微观形貌总体分为二维表面形貌和三维表面形貌,包括表面波紋度、表面纹理、表面裂纹缺陷等主要几何特征。

表面微结构的采集方法有接触式测量、非接触式测量,其中非接触式又可以分为光学测量(白光干涉仪)和非光学测量(扫描显微电镜)等。

当前国内外学者对典型难加工材料的表面粗糙度和表面形貌特征展开了广泛研究。G. Urbikain<sup>[6]</sup>提出了一种使用圆弧端部米尔斯预测侧面铣削表面形貌的几何模型,将预测值与 Al7075T 铝合金侧铣实验测量值进行对比验证,结果显示,模型吻合度较高。Zahia Hessainia 等<sup>[7]</sup>利用响应面法(RSM)进行车削表面粗糙度建模,用实验数据预测表面粗糙  $R_a$  和  $R_T$  度,预测结果和实验表面粗糙度之间一致性良好。EI Baradie 等<sup>[8]</sup>对车削加工中的表面粗糙度进行了实验分析。Azouzi 等<sup>[9]</sup>采用神经网络建立了表面粗糙度在线预测模型。M. Cemal Cakir<sup>[10]</sup>通过车削实验数据开发了加工表面数学模型,研究了切厚及刀具涂层对表面粗糙度的影响,两种涂层模型的平均误差为 4.2% 和 5.2%。Moaz H. Ali<sup>[11]</sup>研究了钛合金端面铣削过程中进给速度对表面粗糙度的影响,进行有限元仿真并建立了表面粗糙度预测模型。Biswajit Das<sup>[12]</sup>提出了“前馈-反向传播”型人工神经网络法,并分析和预测了 Al-Cu-TiC 金属复合材料加工过程中切削参数对铝表面粗糙度的影响。

杜随更等<sup>[13]</sup>研究 GH4169 材料高速铣削时表面的完整性,获得了高温合金加工表面形貌和微观组织的演化规律,并分析了在不同铣削参数下加工 TC4 钛合金的表面形貌和表层组织。李锋等<sup>[14]</sup>通过单因素试验研究了铣削 CFRP 材料时加工表面形貌和表面粗糙度与切削参数、刀具几何结构、加工工艺等之间的相关性。张为等<sup>[15]</sup>针对切削加工表面完整性的建模方法及研究最新现状进行了综合性论述,并对各种建模方法的优缺点进行了总结。W. S. Lin 等<sup>[16]</sup>采用溯因网络建立了表面粗糙度预测模型,并采用回归分析方法建立了二次预测模型,验证溯因网络的精度,对比发现,溯因网络模型比回归分析更精确。姚倡峰等<sup>[17]</sup>对 TB6 钛合金进行了高速铣削试验,发现铣削速度和每齿进给量配比组合会影响表面形貌,在适当的铣削速度和每齿进给量范围内,可获得 0.6  $\mu\text{m}$  以内的表面粗糙度。

表面加工质量的早期研究主要致力于降低加工表面粗糙度值等方面,随着制造技术的发展,仅仅研究表面粗糙度值已不能满足现代加工的要求,表面形貌、表面纹理等微结构特征亦在很大程度上对零件的使用性能和寿命造成影响,因此加工表面微结构特性引起了研究人员的兴趣和重视。目前研究加工表面微结构时,普遍采用数学解析、实验数据回归、神经网络

络分析等方法建立表面微结构模型对加工表面特性进行预测,并通过实验对预测结果进行验证,最终建立加工参数和表面微结构特性之间的联系,以对表面加工过程进行指导。

## 2 超声振动加工表面微结构特性试验研究现状

超声振动系统由超声波发生器、超声换能器、变幅杆和工具头等部分组成,超声波发生器产生高频电信号,换能器通过压电效应将电信号转换为机械振动,变幅杆遵循能量守恒理论对机械振动信号进行位移放大,并将该机械振动作用在工具杆上。振动加工在刀具或工件上附加了高频微幅振动,使其在接触瞬间发生能量聚集,被加工材料局部受到巨大冲击力,致使零件材料内部的疲劳性能和切削加工性能改变,且其间断性切削特点使加工区域切削温度下降,切削力大幅降低,减少刀具磨损,延长刀具寿命,零件表面质量显著提高,超声振动对于加工表面微结构改性控制意义重大。

### 2.1 材料去除及表面创成机理

金属切削过程是利用刀具从工件上去除多余的材料层,在保证提高生产效率和加工质量、降低生产成本的前提下,获得符合形状、尺寸及表面质量等要求零部件的加工过程。振动切削是 20 世纪 60 年代发展起来的一种复合加工技术,是于常规切削过程中在刀具或工件的一个或多个方向上施加可控的规律性振动,从而改变其材料去除机理的脉冲切削方法。振动加工技术是在深入研究加工材料去除机理的基础上发展起来的一种精密加工方法,弥补了普通切削方式在加工难加工材料时的不足,具有延长刀具寿命、降低切削力、提高表面质量以及改善脆硬切削材料的切削加工性等优点。

在超声振动磨削、珩磨、抛光、车削、钻削、铣削等实验研究中发现,超声加工的材料去除机理与普通加工不同。在超声作用下,硬脆材料出现延性切削深度成倍增加、切削力减小等现象<sup>[18-23]</sup>。文献[24]通过研究超声激励对陶瓷压痕裂纹扩展特性的影响,寻求工程陶瓷在超声振动下的延性域加工本质。超声激励下,裂纹在扩展过程中发生偏转和分叉现象,增加了裂纹扩展的能量消耗,提高了裂纹扩展的路径和难度,使断裂表面能得到增加。当裂纹平面不再垂直于所受应力法线方向时,应力需进一步增加,才能使裂纹继续扩展,此时将消耗更多的裂纹扩展能量,断裂表面能增大。超声激励可以减缓裂纹扩展、提高裂纹扩展阻力,增加断裂韧性。同样切削条件下,超声振动加工比普通加工的切削力更小,切削温度更低,材料内部微观裂纹的产生和表面的破碎受到抑制,加工

表面质量进一步改善。

对脆硬材料进行超声振动磨削加工中发现<sup>[25]</sup>,在超声振动的作用下,磨粒不断对加工表面进行撞击,去除表面多余材料的同时形成加工表面,在磨粒与工件的每个作用周期内,产生一次相互分离时间。此时冷却液充分进入工作区域,使磨削区和磨粒都得到一定程度的冷却,阻止了工作区内温度的升高和粘结的形成,有效降低了磨削温度和磨削力。外部超声振动与材料内部粒子之间发生相互作用时,在磨粒和工件接触的局部区域内,瞬时集中了巨大的超声振动能量,在接触区域产生了微观软化,宏观上表现为材料抵抗塑性变形能力下降,切削力降低,材料去除率提高。附加超声振动增强了砂轮磨粒的自锐性,使磨粒变得更加锋利,亦提高了砂轮的切削性能。因此在超声振动作用下,进行脆硬磨削时,加工表面的微观形貌较普通磨削更加均匀整洁,表面质量提高。

二维椭圆振动切削时,刀具产生一个垂直于切削表面的振动,在切削方向上形成一系列振动纹理,进而使椭圆振动切削出现切削厚度连续改变、刀具变前角切削、切屑提拉等特性<sup>[26-27]</sup>,能够有效降低切削力,抑制加工过程中产生的颤振。进给方向上产生进给刀纹,进给刀纹与切削方向上的振动纹理相互交织,形成了二维振动切削特有的表面形貌,如图 1 所示。

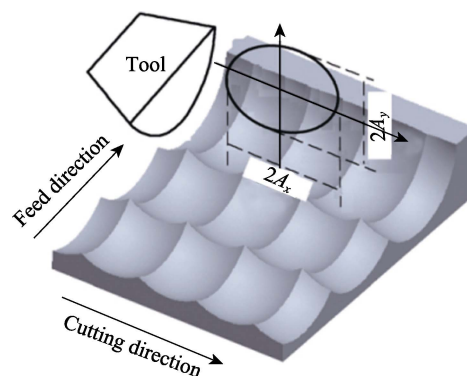


图 1 二维椭圆振动切削模型

Fig.1 The model of two dimensional elliptical vibration cutting

超声研齿以磨粒锤击齿面材料塑性流动、微切削为主要去除材料方式,材料去除率在同等条件下约为普通研齿的 3 倍。磨粒的弹跳冲击、研磨液空化效应能够起到良好的光整作用,尤其对表面粘结切屑的去除、齿面光整和清洗作用十分重要<sup>[28]</sup>。两种研磨加工的表面形貌如图 2 所示,超声研磨齿面的微切削与塑性流动纹理明显且均匀,而普通研磨表面材料撕裂损坏严重。

钻削加工时,超声振动有助于提高孔的加工精度,减小刀具前刀面和切屑之间的摩擦,促进排屑,且能有效降低加工表面的粗糙度值。超声振动钻削改善加工表面质量的主要原因是切削方式由连续切削转变为分离式脉冲切削,每个振动周期可看成是能量完成一次“聚集-释放”的过程,使钻削时的轴向力

和扭矩静态分量降低,利于切屑的排出及切削温度的降低<sup>[29]</sup>。普通钻削和超声钻削玉石材料的实验结果如图3所示。由图3a可看出,孔未完成加工,且表面

存在颗粒状杂质,边缘表面存在明显的微观裂纹。由图3b可看出,超声振动钻削加工表面没有明显的微观裂纹,且圆度较好。

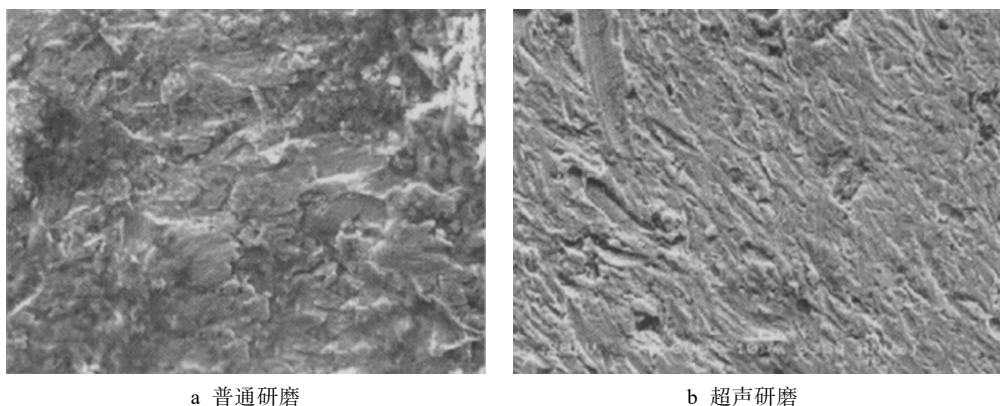


图2 研磨加工表面形貌  
Fig.2 Surface topography of lapping: a) ordinary grinding; b) ultrasonic grinding

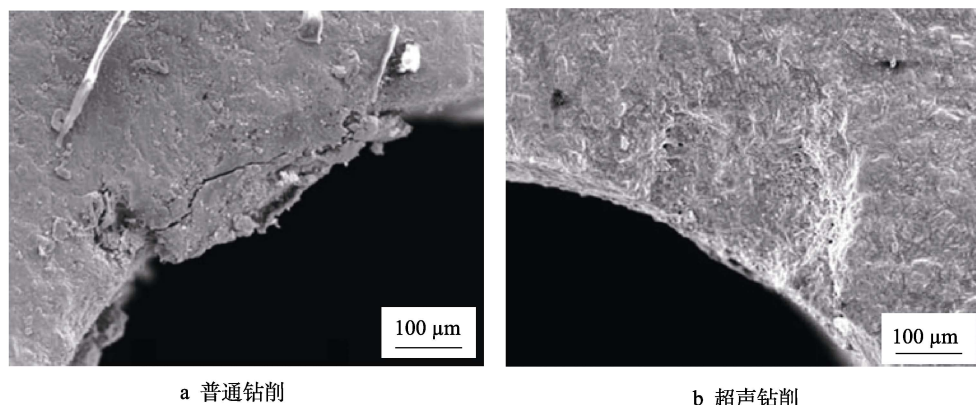


图3 钻削加工表面形貌  
Fig.3 Surface topography of drilling: a) ordinary drilling; b) ultrasonic drilling

超声加工时,刀具或工件在很小的位移上获得巨大的瞬时加速度,并由此产生剧烈的局部冲击,被加工材料被瞬时撞击,致使其脱离加工表面。此时切削力仅为普通切削力的1/10~1/3<sup>[30]</sup>,这种脉冲式加工导致被加工工件还未进入稳态振动时就已经将刀具与工件分离,削弱了加工过程中的颤振,极大程度地改变加工表面微结构特征。超声振动加工的分离式加工机理是提高加工表面质量的关键因素,超声振动辅助作用使加工过程中材料的脆韧转变增强,加工表面损伤显著减小。

## 2.2 表面微结构特性试验研究

超声切削工艺包含超声车削、超声铣削、超声钻削等。超声振动切削加工原理如图4所示,在切削过程中,工件与刀具周期性接触、分离以产生脉冲性切削力。当工件与刀具发生接触时,切削力为 $F$ ,而工件与刀具分离时切削力为0。超声振动切削时,在一个振动周期 $T$ 内,切削刃只有 $T/3$ 处于切削状态。

Silberschmidt等<sup>[31]</sup>对铜、铝、不锈钢、镍基和钛基合金等多种金属材料进行了超声辅助车削和普通

车削实验对比,研究两种切削方式下,加工参数对金属表面粗糙度的影响和每种材料的最佳参数范围及其与表面的关系。Schubert等<sup>[32]</sup>对AA2124材料进行了超声振动辅助车削实验,研究了在轴向、径向和进给方向施加振动时,加工表面的微观结构特征,实验结果如图5所示。

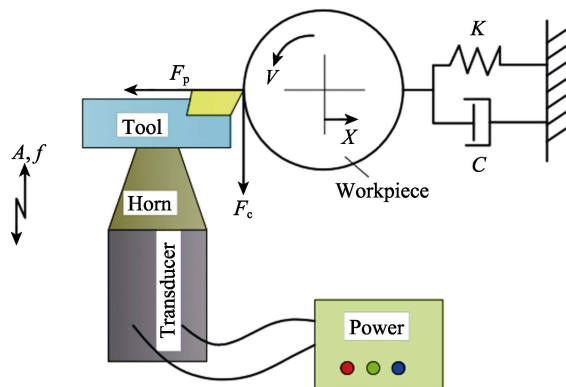
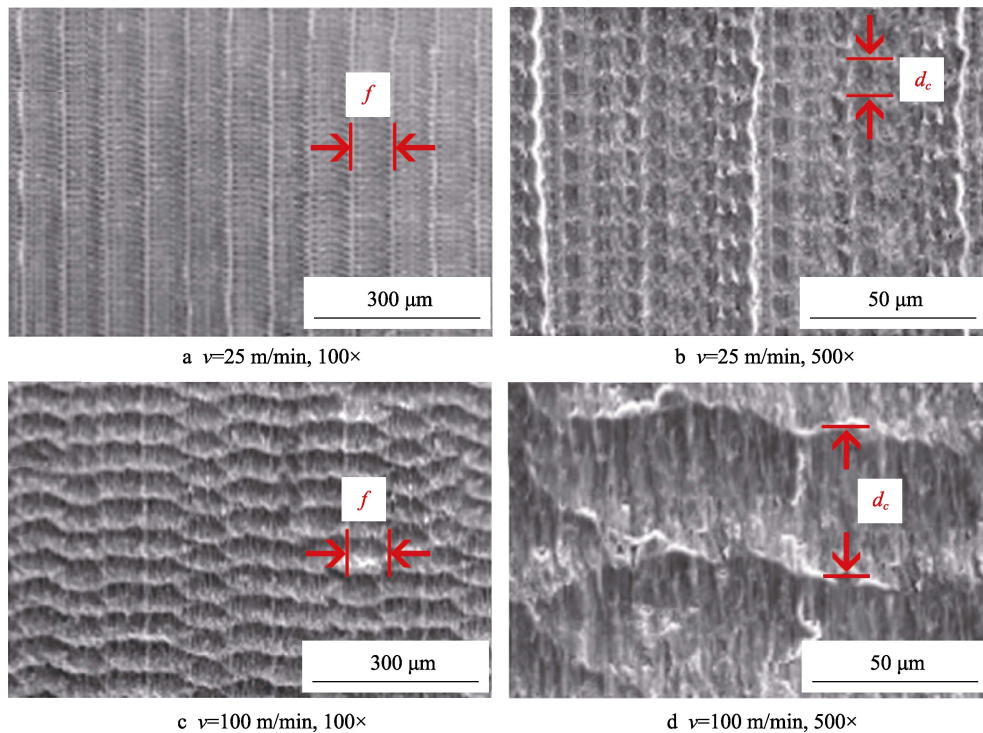


图4 超声振动切削加工装置及工作原理  
Fig.4 Machining device and machining principle of ultrasonic vibration cutting



图 5 SCHUBERT 对超声车削表面微观结构研究<sup>[32]</sup>Fig.5 Study on surface microstructure of ultrasonic turning by SCHUBERT<sup>[32]</sup>

Tian Chuan-xin 等<sup>[33]</sup>通过旋转超声铣削石英玻璃试验研究了材料去除机理和转变规律、加工表面粗糙度与三维表面纹理,结果表明,超声振动和切削深度对铣削加工表面粗糙度产生的影响较大。Sui He 等<sup>[34]</sup>进行了高速超声振动车削 Ti-6Al-4V 钛合金表面质量试验研究,振动始终与进给方向一致,在切削加工过程中,切削力显著降低,且表面粗糙度得到改善,结果显示,该加工技术可以获得粗糙度值在  $Ra$  0.4 以下的钛合金表面。高国富等<sup>[35]</sup>对碳纤维复合材料进行了超声振动铣削试验,研究其加工表面形貌特征,相对于普通铣削,超声振动下所形成的加工表面凹坑较少,碳纤维束与基层分界处裂纹和分层不显著,基体表面沟槽分布均匀,且浅而宽。栾晓明等<sup>[36]</sup>对 7075-T6 铝合金进行了单向超声振动车削和普通车削实验对比,同等切削参数条件情况下,超声振动加工由于刀具对已加工表面反复的熨压效应,导致表面粗糙度降低,可获得更加精密的表面微结构特征。张建华等<sup>[37]</sup>通过超声振动铣削 2A12 金属材料实验发现,超声振幅对加工表面粗糙度值影响显著,每齿进给量不同的情况下,振幅对表面粗糙度的影响趋势有所不同,且在振幅不同时,每齿进给量对表面粗糙度的影响规律亦不同。

超声振动切削表面微结构试验研究过程中,一般在相同切削参数下进行超声切削和普通切削对比实验,采用单因素实验或正交实验方式获取表面微结构参数。对实验结果进行分析发现,超声振动加工过程中,切削力和切削热减小,使加工表面撕裂等微观缺陷减少,表面微观形貌得到明显改善,表面纹理更加

均匀,刀具高频振动对加工表面的反复熨压作用使表面粗糙度大幅降低,  $Ra$  值可降低 60% 以上。

试验结果表明,与传统切削相比,超声切削可以显著降低表面粗糙度,但过大的振幅将带来较大的挤压和摩擦,导致加工性能不稳定,且对加工表面产生不利影响。随切削速度的增加,切削表面粗糙度值先增加再减小。加工表面纹理如图 6 所示<sup>[38]</sup>,传统切削时,产生刀痕、凸起和跳动较明显,而在超声铣削中,由于切削刃和工件的连续分离和接触,使加工表面产生均匀的振动纹理,且振动纹理随着切削速度的增加而更加明显。

工艺参数中,超声振幅和切削速度对表面粗糙度值的影响较大,进给速度影响较小,一个振动幅值应匹配相应的切削参数、刀具径向跳动和工件装夹方法等,可获得更小的  $Ra$  值和均匀的表面纹理。振动方向亦对表面微观结构产生较大影响,产生表面纹理改变的同时,导致粗糙度值发生变化,施加高频振动可降低表面的波纹度,从而提高表面质量。

## 2.3 表面微结构特性试验研究

超声辅助磨削是一种改进难加工材料磨削加工的新方法。在普通磨削过程中,对砂轮或工件施加超声振动,沿砂轮振动方向可分为切向振动、径向振动或轴向振动,如图 7 所示。切向振动和径向振动超声辅助磨削为间断性磨削,又称为分离型磨削。轴向超声振动磨削则为连续性磨削,但其磨削过程与普通磨削却存在本质区别。

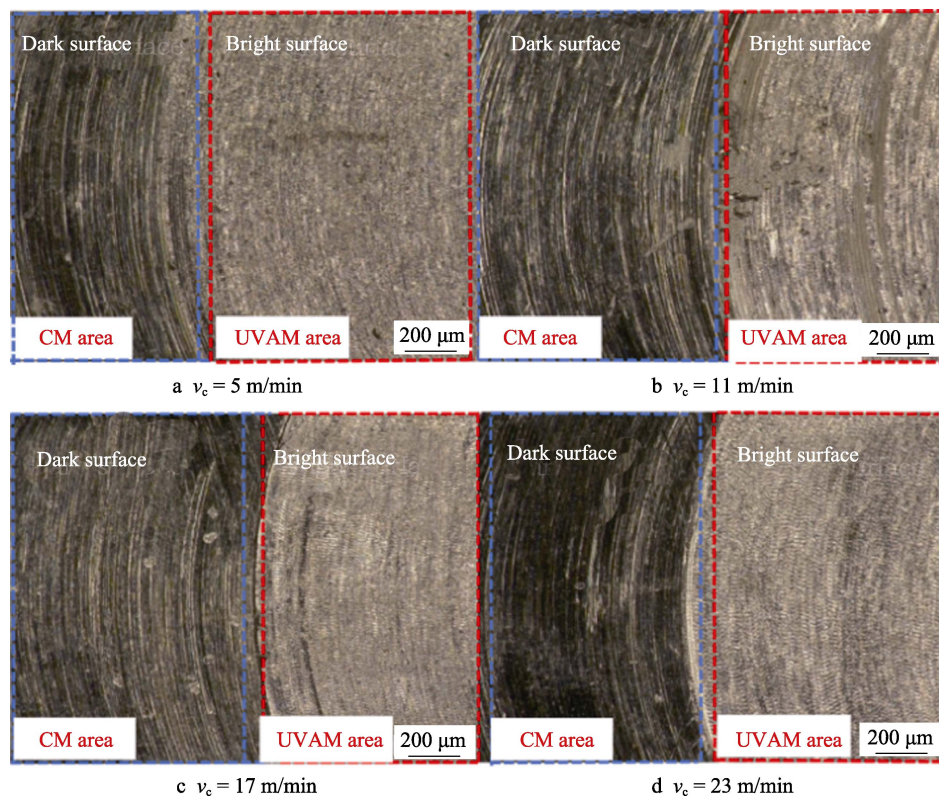
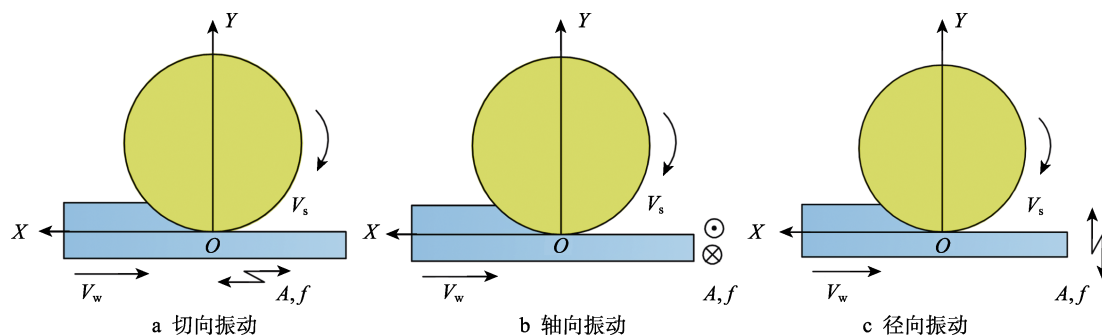
图 6 普通切削与超声切削加工表面形貌对比<sup>[38]</sup>Fig.6 Comparison of surface morphology between conventional cutting and ultrasonic cutting<sup>[38]</sup>

图 7 不同方向超声振动磨削

Fig.7 Ultrasonic vibration grinding in different directions: a) tangential vibration; b) axial vibration; c) radial vibration

由于附加了超声振动, 砂轮磨粒与工件的相对运动轨迹较普通磨削加工发生了较大变化, 磨粒不再沿直线运动, 而是随具有一定振幅和频率的超声振动发生运动轨迹互相交错, 导致磨削表面成形机理与普通

磨削不同。因此采用超声振动磨削时, 形成了特殊的工件表面纹理形貌几何特征。如图 8 所示, 被加工表面磨粒纹路亦不再相互平行, 而是相互交错成网状, 整体分布较为均匀。

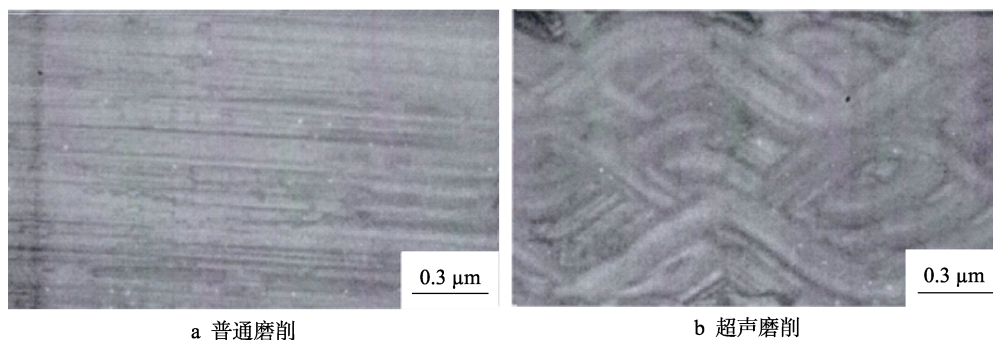


图 8 普通磨削与超声磨削表面形貌对比

Fig.8 Comparison of surface topography between a) conventional grinding and b) ultrasonic grinding



Madarkar R 等<sup>[39]</sup>采用超声振动辅助最小量润滑 (UMQL) 技术对 Ti-6Al-4V 合金的磨削性能进行了试验研究, 通过超声振动磨削的磨削力、表面粗糙度和表面形貌等评价 UMQL 工艺的磨削性能。利用显微成像技术对表面质量进行研究发现, UMQL 磨削具有更小的磨削力, 且能够改善磨削表面质量。GUO Bing 等<sup>[40]</sup>通过正交实验研究了超声振动辅助磨削硬脆材料时超声参数和倾角对表面微结构的影响, 结果表明, 在超声振动条件下, 加工表面粗糙度  $S_{ra}$  从 136 nm 减小到 78 nm, 微结构的边缘锐度得到较大改善, 磨削参数对表面质量影响作用的显著性由大到小依次为: 进给速度、工件倾角、磨削深度、振动频率、振幅。Zhang Qing-long 等<sup>[41]</sup>采用超声表面研磨工艺改善 17-4PH 不锈钢的表面性能, 在被加工表面获得由纳米金属颗粒组成的一定厚度的变形层, 该加工方法使加工表面粗糙度明显降低。赵波等<sup>[42]</sup>通过二维超声辅助磨削试验对纳米陶瓷进行了加工表面粗糙度特性及磨削机理研究, 实验结果发现, 工件速度、磨削深度、磨粒粒度及砂轮线速度等加工参数的选择对被

加工表面粗糙度有较大影响, 其中工件速度影响最大。唐进元等<sup>[43]</sup>对 45 钢材料进行了超声振动辅助干磨削切削实验, 研究了磨削参数、超声振动参数以及表面质量表征参量之间的相关联特性, 结果表明, 在同等加工条件下, 超声振动干磨削的加工表面微观形貌优于传统干磨削, 能够获得较小的表面粗糙度值, 且该值随超声振幅的增大呈现先下降再升高的变化趋势。

二维超声振动磨削时, 由于磨粒对工件已加工表面具有研磨及熨压作用, 使得已加工表面凹谷和凸峰减少, 表面粗糙度值明显降低, 加工表面局部破碎减少。磨粒不断地冲击垂直于其运动方向所隆起的沟壁, 而磨粒压入运动所产生的横向裂纹则在高频冲击下急剧扩展, 延伸到加工表面, 导致材料破碎和脱落, 此时材料塑性变形模式被改变。如图 9 所示, 普通磨削时, 加工表面出现了破碎及材料剥落现象<sup>[44]</sup>, 加工表面处于脆塑混合变形状态, 沟槽深而窄。二维超声振动时, 磨削表面光滑洁净, 且沟槽底面网纹均匀, 划痕较宽。

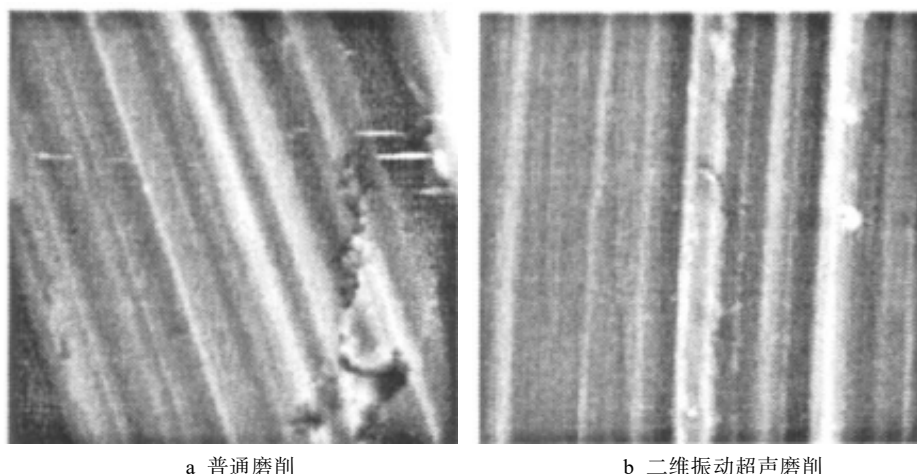


图 9 磨削加工表面形貌对比

Fig.9 Comparison of surface topography of grinding: a) ordinary grinding; b) two dimensional ultrasonic grinding vibration

从以往的研究中可以发现, 在超声磨削加工表面微结构试验研究过程中, 一般通过施加不同方向、振幅和频率的超声振动来讨论振动方向、振幅、频率、工件转速、磨削深度、磨粒粒度、砂轮线速度等因素对零件加工表面粗糙度和表面形貌的影响。试验结果表明, 普通磨削时, 工件转速对表面粗糙度值影响不明显, 而在超声磨削加工各因素中, 工件转速对表面粗糙度影响最大, 主轴转速增加使单位时间内磨粒与工件的作用次数增加, 其交互作用使得材料去除更加均匀, 表面整体趋于平滑。另一方面, 高转速下超声振动的作用加深了磨粒的运动轨迹, 导致工件与刀具间的冲击作用减小、磨切削力降低, 加工表面质量得到提高。在较低的切削速度下更容易形成切屑瘤, 且切屑易断裂, 导致表面质量下降。进给速度的增加导

致切削力增大, 磨粒对表面的熨压作用弱化, 最终加工表面出现凹坑和尖峰, 表面质量变差。切深增加时, 单颗磨粒单位时间内的材料去除量增大, 材料去除精度下降。超声振动作用使磨粒的实际切入深度连续变化, 导致切深对表面形貌的影响作用增加。较大的超声振幅可以获得较好的表面微观形貌, 并能够大幅降低表面粗糙度值, 且该值随振幅呈非线性变化, 随着振幅的增大, 先呈减小趋势, 当振幅增大到一定程度时反而增加。

## 2.4 超声振动强化加工表面微结构特性试验研究

将超声振动技术与表面强化工艺相复合, 即进行超声表面强化加工, 是当前表面强化技术发展的新领

域。目前较成熟的超声振动表面强化技术有超声滚压、超声挤压、超声喷丸等工艺,其中超声滚压和超声挤压工艺对改善加工表面微观结构效果尤其突出。超声表面滚压是一种同时施加超声振动和静力作用在工件表面上的加工方法。该技术可以产生具有高性能的纳米结构表面层,可直接用于最终产品的制备,其工作原理如图 10 所示。超声滚压加工时,超声波振动作用使工具相对工件进给时产生的摩擦力减小,导致被加工材料表面塑性变形出现明显变化,零件加工表面粗糙度值大幅降低。

R. Jerez-Mesa<sup>[45]</sup>研究了振动辅助抛光后 AISI 1038 合金拓扑表面的完整性,与传统的球抛光工艺进行比较,表面上的划痕损伤可以通过振动辅助来防止。Miru Kim 等<sup>[46]</sup>提出了超声冲击处理表面强化技术,实验发现,经过多次超声冲击后,表面粗糙度从  $0.694\text{ }\mu\text{m}$  降低至  $0.112\text{ }\mu\text{m}$ 。李礼等<sup>[47]</sup>采用超声表面深滚工艺对钛合金材料进行了表面强化处理,研究超声深滚加工对零件表面几何形貌和表面粗糙度的影

响,实验表明,超声表面深滚加工过程中,伴随幅值的增大,表面粗糙度值大幅降低。张勤俭等<sup>[48]</sup>基于超声挤压强化技术研究了其对 30CrMoA 钢加工表面质量的影响,超声强化后的工件表面可以达到较好的镜面效果,表面粗糙度值由  $3.746\text{ }\mu\text{m}$  降低到  $0.2\text{ }\mu\text{m}$  左右,降低了 95%。何全茂等<sup>[49]</sup>将纵扭复合超声振动引入深滚加工,通过试验对比研究了传统滚压和超声滚压两种方式下工件的表面微观形貌,如图 11 所示,试验结果表明,超声滚压获得的微观形貌优于传统加工。

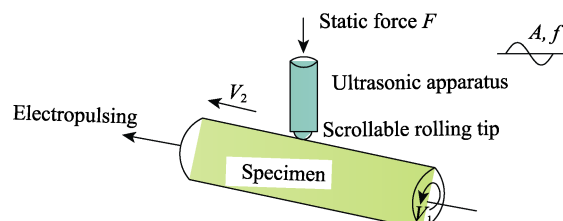


图 10 超声深滚强化处理示意  
Fig.10 Schematic Diagram of Ultrasonic Deep Rolling Strengthening Treatment

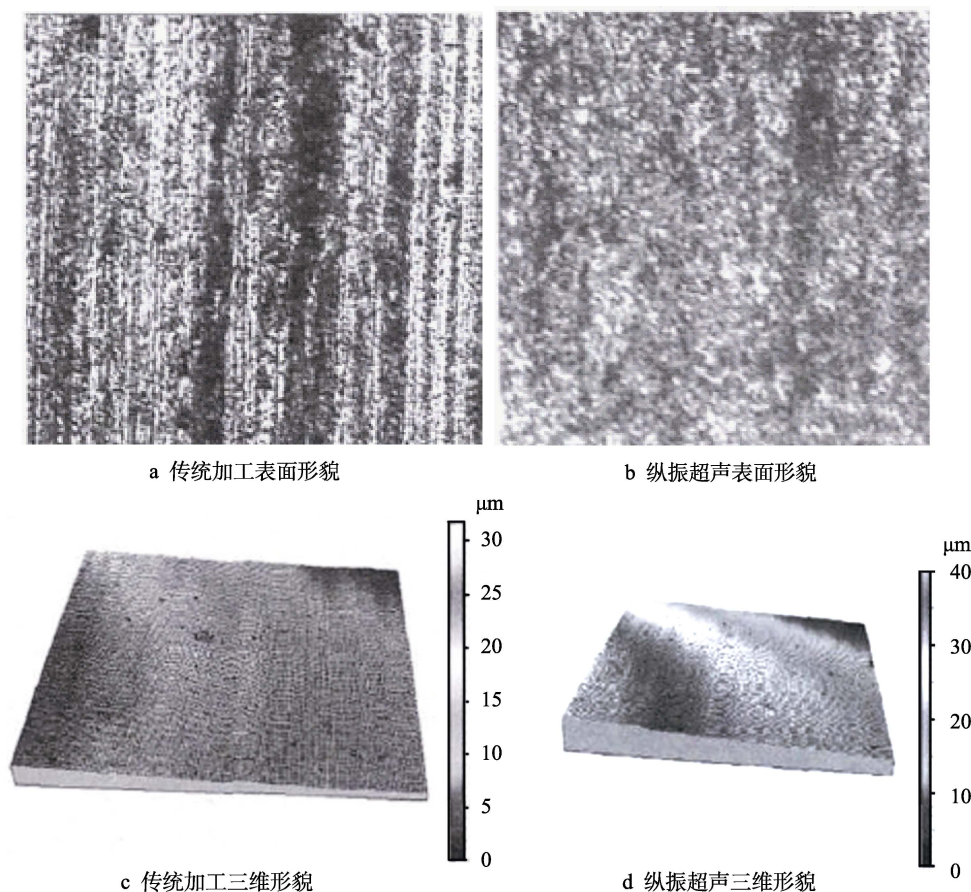


图 11 深滚加工后工件表面形貌特征<sup>[49]</sup>

Fig.11 Characteristics of workpiece surface topography after deep rolling<sup>[49]</sup>:

- a) surface topography of traditional processing; b) longitudinal vibration of ultrasonic surface topography;  
c) traditional three-dimensional topography; d) axial ultrasonic three-dimensional topography

试验分析结果显示,经超声强化处理后,工件加工表面出现了明显的变化<sup>[50-51]</sup>。超声强化处理前,表面存在明显的加工纹理,主要为犁沟以及由刀具粘着

引起的表面微观缺陷,而经超声强化后,加工表面产生塑性变形,使表面变得光滑平整,加工纹理大幅降低。这是由于超声强化处理时,工具头连续敲击金属



表层,使表层金属的凸凹不平得到较好的改善,消除了由前道工序产生的表面缺陷。

高强钢零件表面经过超声滚压、挤压等强化后,可以获得优于普通表面强化的表面质量,其表面粗糙度值较普通强化降低 50%以上,强化效果提升 60%以上,对加工表面形貌和表面粗糙度值均有明显改善。超声滚压和超声挤压加工设备可以通过安装在车床、铣床、加工中心等传统设备上,来实现超声表面强化处理工艺。在超声振动滚、挤压试验装置方面的研究主要集中在滚、挤压工具头的优化设计以及变幅杆结构设计。超声表面强化加工试验研究结果发现,超声振动强化效果与压力、滚/挤压速度、进给速度、加工次数、工具头半径、振动频率及振幅等工艺参数关系密切。超声挤压的工作频率一般取 20 kHz 左右,静态挤压力对工具头影响较大。挤压力过大时,将导致工具头磨损加剧。通过大量试验结果可知,较适宜的工艺参数为:挤压速度为 35~45 m/min,进给量为 0.08~0.12 mm/r,挤压淬火钢压力  $P=100\sim300$  N,挤压碳钢压力  $P=60\sim200$  N,挤压不锈钢、黄铜、铸铁等材料压力  $P=60\sim100$  N,工具头振幅为 4~10  $\mu\text{m}$ 。超声深滚时,滚压力亦对表面粗糙度产生较大影响,在一定范围内,表面粗糙度值随深滚力的增加而下降。滚压力过大时,会促使加工表面产生不均匀的塑性变形。超声抛光时,各工艺参数对强化后表面质量影响的显著性由大到小依次为:进给速度、工件转速、抛光压力、工具头形状。因此超声强化过程中,合理选择工艺参数将会有利于工件表面质量的提高。

### 3 超声振动加工表面微结构建模方法研究现状

研究加工表面的创成机理,建立有效的表面微结构模型,预测和控制加工表面质量,对切削加工意义重大。关于超声振动加工表面的建模和仿真方面,已开展了深入的研究,并取得了显著成果。从各个角度建立了多种表面模型来表征表面粗糙度、表面几何形貌特征等与加工工艺参数之间的关系,以期揭示超声振动参数和切削加工参数等对表面质量的影响趋势,为超声振动加工硬脆材料时合理选择最优化的加工参数提供理论依据。

对工件或刀具施加轴向、径向和进给方向的超声振动,刀尖切削轨迹呈三维空间曲线,在加工工艺和超声振动等多维参数共同作用下,工件材料去除机理发生变化,表面微观结构形成过程也极其复杂。在超声振动表面形貌和表面粗糙度模型研究中,较多采用数学解析、实验回归分析和人工神经网络等方法进行表面建模<sup>[52]</sup>。

#### 3.1 实验建模

超声振动加工中,加工表面形成的影响因素繁多

且不可控性较强,各因素之间还相互耦合交互,综合全部变量对表面粗糙度的影响进行理论建模非常困难。实验建模方法是指依据实验数据,利用回归分析方法建立表面粗糙度经验模型,可以克服几何模型中难以计算的复杂过程变量的问题,能够有效地预测表面形貌模型,但需要大量实验数据<sup>[53]</sup>。

回归分析法是对大量统计数据进行数学分析(各变量之间的相关关系会表现出一定的规律性,能够通过函数关系式来表达,这种函数即为回归方程),并进行外推用于预测其他因变量变化的分析方法。在超声振动加工表面微结构的实验建模中,以多元回归分析为主,其是考虑多个自变量的线性回归推广,是因变量数限制为 1 而形成的一般线性模型的具体情况。目前应用较多的是方差分析、响应曲面分析等方法,用因变量对数(粗糙度值)和独立变量(转速、进给速度、切深、振幅、频率等)对数之间的关系来生成指数模型。

国内外学者对超声振动表面微结构的实验回归建模做了大量研究。Reza Teimouri<sup>[54]</sup>进行了 7075 铝合金超声辅助振动车削研究,讨论了加工参数对切削力和表面粗糙度的影响,采用响应曲面法建立了各响应的经验模型,并通过方差统计分析检验了所开发模型的正确性。Vikas Kumar 等<sup>[55]</sup>针对 BK7 陶瓷材料进行了旋转超声钻削表面粗糙度的回归分析及微观结构研究,采用响应面法观察了输入变量对表面粗糙度的影响(见图 12),利用中心复合设计方法估算了表面粗糙度二次模型的回归系数,并用方差分析检验了二次模型的适应度。Teimouri 等<sup>[56]</sup>通过实验分析超声辅助滚珠抛光过程中超声振幅、进给速度和静摩擦力对 6061-T6 铝合金加工表面粗糙度和硬度的影响,采用响应面方法关联过程参数和反应之间的经验关系,并建立了表面粗糙度经验模型,以预测和改善表面加工质量。

王明海等<sup>[57]</sup>对 C/SiC 复合材料施加超声扭振进行槽铣削加工实验,研究振幅、切削速度、进给量等切削参数对加工表面的影响,采用方差分析和响应曲面分析研究了交互因素对表面粗糙度的显著性,并建立了表面粗糙度预测模型。王晓强等<sup>[58]</sup>根据单因素实验获得了加工参数对轴承套圈表面粗糙度的影响,并采用二阶曲面响应法建立了超声滚压挤压的三个加工参数与表面粗糙度之间的预测模型,预测值与试验值之间误差为 2.32%。

实验回归建模方法适用于某个特定的实验条件范围内,将其移植到其他工艺系统时则会出现较大偏差,如何从超声振动加工的实际物理角度出发,结合加工中主要过程参量来进行表面微观结构建模,是超声振动加工表面微观结构建模的主要研究方向。

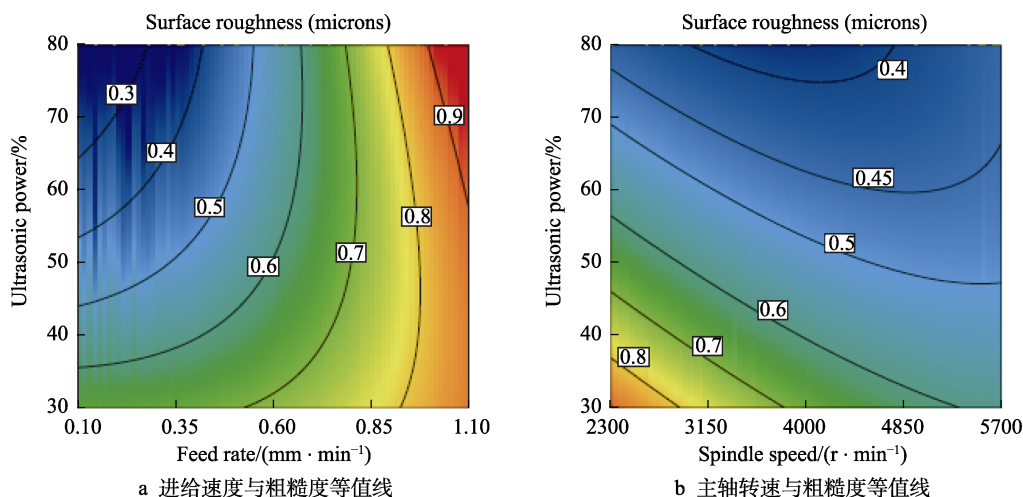
图 12 输入因子与表面粗糙度的等值线<sup>[55]</sup>

Fig.12 Contour map of input factor and surface roughness<sup>[55]</sup>.  
a) feed speed and roughness contour; b) spindle speed and roughness contour

### 3.2 数学解析建模

超声振动表面微结构数学解析建模指根据刀具几何参数、振动参数以及最小切削厚度等加工因素建立的表面几何模型<sup>[59-60]</sup>。工件加工表面形貌由加工工艺、切削刃形状、走刀方式、切削系统刚度以及动态特性等多种因素所决定,是衡量工件表面加工质量的关键指标。许多学者针对切削加工过程中刀尖的运动形式进行研究,根据刀具轨迹的运动学和动力学参数表达式研究切削加工形成的表面几何形貌。目前超声加工表面微结构数学建模主要集中在切削机制、材料去除机理等方面,考虑刀具与工件之间的超声振动,结合刀尖的轨迹运动方程,建立超声辅助切削过程表面形貌的仿真模型。

纵扭超声振动铣削时,在加工过程中,对刀具施加沿轴向和周向的复合高频振动,即刀具在产生主轴旋转运动、刀具进给运动的同时还被施加轴向振动和扭转振动。运动学模型如图 13 所示,其中主轴旋转运动和扭转振动发生在  $x$ - $y$  平面内,沿刀具圆周方向,该方向运动可分解为  $x$  方向和  $y$  方向的直线运动;而进给运动在  $x$  方向上;轴向振动则沿  $z$  方向运动。对刀具施加的轴向振动和扭转振动为周期性运动,可以得到铣刀刀刃在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的位移为:

$$\begin{cases} f(x) = (v_x + v_f) \cdot t + r \cdot \sin(\omega t - n\phi) + A \sin(2\pi f t) \\ f(y) = v_y \cdot t + r \cdot \cos(\omega t - n\phi) + B \sin(2\pi f t) \\ f(z) = C \sin(2\pi f t + \psi) \end{cases} \quad (1)$$

式中:切向速度  $v_x$  和法向速度  $v_y$  是主运动切削速度  $v$  在  $x$ - $y$  平面内的分解;  $v_f$  为进给速度,相对于切削速度  $v$  很小;  $t$  为切削时间;  $r$  为刀具半径;  $n$  为刀齿数量;  $\phi$  为齿间角;  $\omega$  为刀具旋转频率;  $A$ 、 $B$ 、 $C$  分别为  $x$ 、 $y$ 、 $z$  三个方向的振幅;  $f$  为振动频率;  $\psi$  为扭振和纵振相位差。

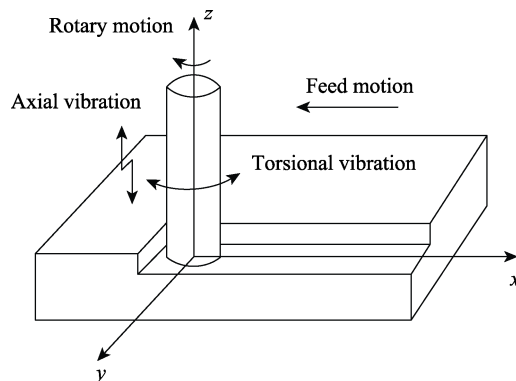


图 13 纵扭超声振动铣削系统运动学模型

Fig.13 Kinematic model of longitudinal torsional ultrasonic vibration milling system

超声纵扭振动刀尖轨迹如图 14 所示,表面形貌的几何关系如图 15 所示。图 15 中,实线表示纵扭振动切削形成的微观形貌,虚线表示相同切削参数下普通切削形成的微观形貌。

超声磨削表面微结构建立数学模型方面,通常根据超声振动辅助磨削的加工表面创成机理,基于超声振动磨削的运动学特性推导磨粒运动方程,建立加工表面粗糙度及表面形貌的理论模型,超声磨削运动轨迹及表面形貌模型如图 16 所示。Chen Hai-feng 等<sup>[61]</sup>考虑工件的超声振动和磨粒形状,建立磨粒轨迹运动学方程作为时间函数,通过将工件分割成网格,并计算每个网格点处留下的所有晶粒的最小值,建立磨削过程表面形貌仿真模型。

Borner 等<sup>[62]</sup>利用 MATLAB 开发了超声辅助铣削表面仿真工具,并进行了表面结构设计和建模,表面模型如图 17 所示。该模型可以通过相关加工参数对表面微结构特征进行预测,显著降低实验误差,预测值与加工表面高度一致。Sajjady 等<sup>[63]</sup>对超声振动辅助车削条件下表面的组织形貌进行了分析,提出了一种在一维、二维和三维振动模式下对超声辅助车削过

程中的表面纹理进行模拟的算法, 刀具运动轨迹及加工表面仿真形貌如图 17 所示, 并通过在 AL7075-T6 上进行实验验证, 模拟算法得到的表面纹理与实验结果吻合良好。

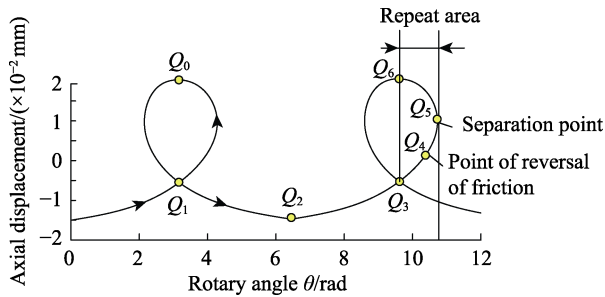


图 14 纵扭复合振动刀尖运动轨迹  
Fig.14 The trajectory of L-T composite vibration

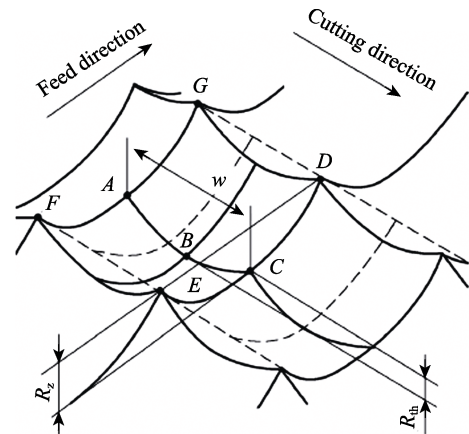
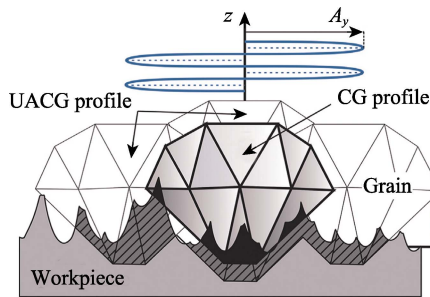
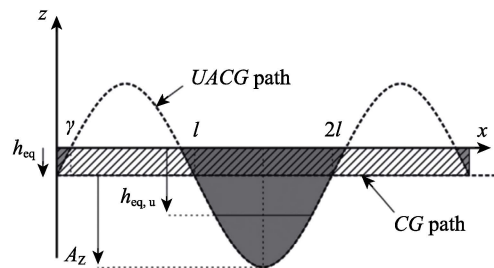


图 15 超声纵扭振动切削表面形貌几何关系  
Fig.15 Geometric relationship of surface topography



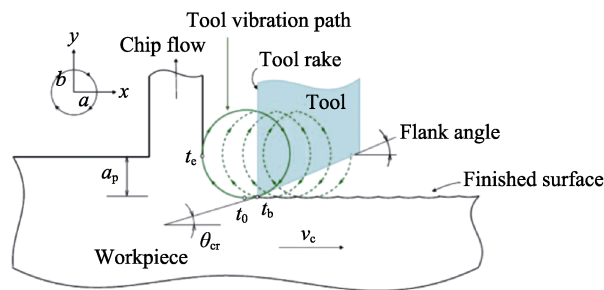
a 超声磨削下表面形貌



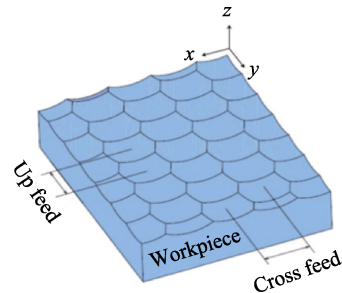
b 超声磨削磨粒运动轨迹

图 16 超声磨削表面形貌及运动轨迹

Fig.16 Surface topography and trajectory of ultrasonic grinding: a) surface topography of ultrasonic grinding; b) abrasive particle trajectory of ultrasonic grinding



a 超声椭圆振动运动轨迹



b 超声振动表面形貌

图 17 超声车削表面形貌建模及表面三维纹理<sup>[62]</sup>

Fig.17 Ultrasonic turning surface topography modeling and 3D surface texture<sup>[62]</sup>.  
a) ultrasonic elliptical vibration trajectory; b) ultrasonic vibration surface topography

张洪丽等<sup>[64]</sup>研究了超声辅助振动磨削运动学特性, 建立了引入磨粒间隔和顶锥角的磨削加工表面粗糙度数学几何模型。何玉辉等<sup>[65]</sup>考虑磨粒运动轨迹重叠效应的影响, 建立了轴向超声振动磨削硬脆性材料的表面粗糙度模型。李虎等<sup>[66]</sup>在超声磨削过程中提出了基于磨粒切削工件路径的离散算法和最小高度值包络曲面提取法, 并建立了超声磨削表面三维形貌模型, 可有效预测超声磨削获得的表面形貌特征。王秋燕等<sup>[67]</sup>提出了超声振动螺旋磨削加工表面创成模型, 分别模拟传统磨削和超声振动磨削的三维表面微观

结构, 获得了超声振动对表面形成过程的影响规律。对于超声振动加工表面微结构的数值解析建模, 一般通过研究附加超声振动的刀具运动轨迹和加工表面形貌创成机理, 来建立超声振动条件下的表面形貌模型。同时对超声振动表面微结构模型生成的表面形貌与实验加工表面测量值进行比较, 来进一步验证该模型的有效性。

虽然众多学者对超声振动表面微结构数值解析建模方法进行了初步探索, 但目前仍未形成系统的理论建模方法体系。因此研究超声振动加工过程中工件



表面的创成机制,探讨不同的刀具运动轨迹对表面微结构的影响规律,具有重要的理论意义。

### 3.3 神经网络建模

近年来,随着计算机技术的发展,人工智能方法在表面形貌建模上被广泛应用。人工神经网络是一个非线性动力学系统,其特点在于信息的分布式存储和并行协同处理,是处理复杂非线性问题的有效方法,能够建立输入和未被发现的过程条件下输出数据之间的关系<sup>[68-69]</sup>。BP 人工神经网络是误差反向传播的学习算法,具有很强的非线性映射能力,有助于对离散型试验数据进行准确预测,尤其适用于超声振动表面粗糙度的建模过程。

Jing Jun-tao 等<sup>[70]</sup>以旋转超声磨削加工为对象,基于鲍威尔方法,建立了表面形貌与工艺参数之间的 BP 神经网络模型,如图 18 所示。该算法迭代速度快、精度高,为表面形貌优化提供了有效支持。

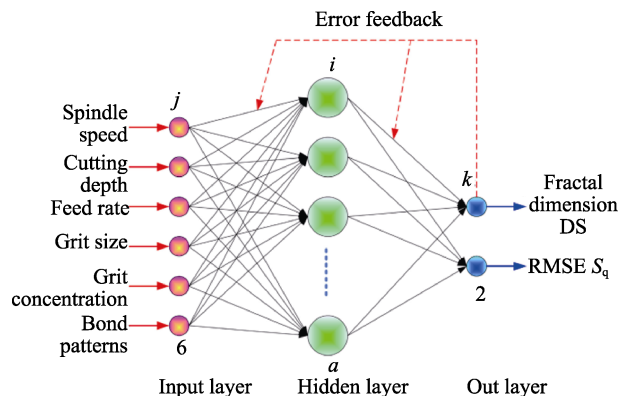


图 18 超声表面形貌 BP 神经网络模型<sup>[70]</sup>

Fig.18 BP neural network model for ultrasonic surface topography<sup>[70]</sup>

王晓斌等<sup>[71]</sup>采用 BP 神经网络建立了超声珩磨条件下磨削表面粗糙度预测模型,经过数次网络训练,获得了具有良好非线性映射能力的 BP 神经网络,并对超声珩磨钹铁砧表面粗糙度进行预测,模型预测结

果理想。Yang C B<sup>[72]</sup>结合田口方法与人工神经网络 (田口神经网络),建立了一个超声辅助车削预测模型,并将 Levenberg Marquardt 方法结合到预测模型中,建立参数以提供超声辅助车削的优化模型,表面粗糙度  $Ra$  预测值为  $1.71 \mu\text{m}$ ,试验值为  $1.69 \mu\text{m}$ ,预测值与实验值的误差为 1.2%。苏玉珍等<sup>[73]</sup>利用径向基函数 RBF 神经网络进行超声无磨料外圆抛光表面粗糙度的 RBF 神经网络建模,并对所建模型进行了验证,结果表明,预测值与实测值具有较好的一致性,且 RBF 网络性能稳定。

超声振动表面粗糙度的神经网络建模一般基于正交试验等方法研究各参数对表面粗糙度的影响,然后建立神经网络预测表面粗糙度。进化算法模拟生物进化优胜劣汰,例如遗传算法的全局寻优能力很强,可以用来解决最值问题。将人工神经网络与进化算法相互融合、相互补充,可增强其解决应用问题的能力,从而实现超声振动表面微结构的智能化预测。

## 4 新技术领域及发展方向

### 4.1 表面微结构再生性超声制造

不同材料的表面微观结构区别较大,其微观结构特征取决于加工材料的硬度值。针对此现象,国内外学者展开了表面微结构再生性研究,切削几何特征与加工参数匹配对表面微结构的形成至关重要。在零件工作表面制备合理的微结构,可有效减少摩擦磨损,延长零部件使用寿命,但其加工要求微细化程度较高。

特定微结构表面制备方面,施加不同方向的超声振动,根据微结构的几何模型对其切削轨迹进行数学计算,并对其形貌进行分析,验证加工轨迹生成方法的正确性。采用基于微纹理模型的超声振动加工技术,以实现制备特定的表面微结构几何特征<sup>[74-75]</sup>,如图 19 所示。

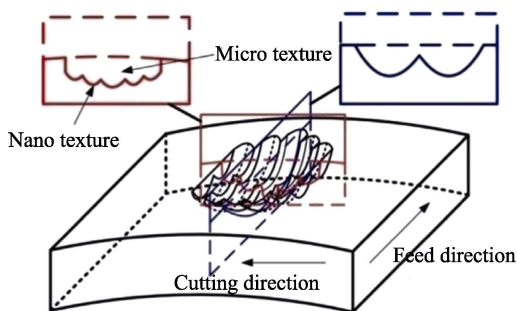
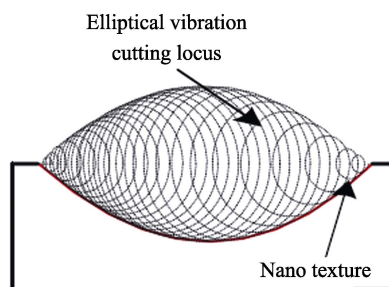


图 19 超声椭圆振动制备混合微结构<sup>[74]</sup>

Fig.19 Mixed microtexture by ultrasonic elliptical vibration<sup>[74]</sup>

仿生表面加工方面,对鳞片等表面微观结构和超声振动辅助加工表面的特性进行分析和讨论,基于图像处理技术提取仿生表面特征,仿生表面特征曲线可



以看作是刀具尖端轨迹相同的函数曲线。通过刀尖轨迹仿真与超声加工实验以及生物表面的对比,结果表明,超声辅助振动铣削表面和典型生物表面形貌具

有相似性, 超声加工可获得具有一定振动和加工参数的仿生表面, 能够应用于仿生表面形貌加工<sup>[76-77]</sup>。

随着先进制造技术的发展, 工业生产系统对性能的要求越来越严格, 对资源效率和成本控制也提出了更高要求。因此具有特殊性能的表面在目前生产制造中尤为重要, 其功能化是许多研究领域的重要课题。超声振动加工技术代表了一种特定表面织构可再生的制造方法, 利用其获得具有一定表面性能的可再生表面织构是当前先进制造新兴趋势。

## 4.2 微细零件超声表面加工

针对微细槽、孔等微尺度结构加工中的高精度要求, 采用超声振动加工方式在低转速和大振幅条件下可以获得更好的加工尺寸精度和表面质量<sup>[78]</sup>。近年来, 微细超声电解复合加工方面的研究发展较快, 微细超声复合电加工技术用于微器件及零件表面微结构的精细化制作。用该技术在摩擦副工作表面制造出适当形貌特征的储油微结构, 可有效降低摩擦系数、减少表面磨损量<sup>[79]</sup>。

微细加工技术是传统加工工艺向微观尺度的扩展, 在微加工领域具有重要的作用, 尤其适用于三维零件及微结构的加工, 其具有加工精度高、能耗小等优点, 包括微磨削、微铣削、微车削、微钻削等多种加工方法。由于微小尺寸零件对振动的敏感特性, 微细加工或介观尺度加工时, 仅依赖工艺系统刚性来提高加工精度是十分困难的, 且微加工硬脆材料时, 同时存在加工效率低、切削热量大、微刀具易磨损等缺陷。已有研究表明, 微加工与超声辅助振动相复合的加工技术可有效降低切削力、切削温度, 增大脆性材料脆-塑转变临界切削深度, 改善加工表面质量等。因而超声振动辅助微加工技术被认为是一种可有效解决微加工现存缺陷的技术。

## 5 结语

超声振动辅助加工是先进制造领域的重要进展之一。在加工过程中, 刀具以超声频率和微小幅值振动。超声振动改变了已加工零件的表面创成机理和表面微观形貌特征, 显著改善了其表面微结构特性, 提高了加工表面质量, 并延长了刀具的使用寿命。

文中总结了超声振动辅助加工表面微结构特性研究时通常采用的试验研究、表面微结构理论建模、实验回归分析和计算机仿真等方法。试验研究往往采用超声振动实验与传统实验对比的方式, 通过设计正交实验或者单因素实验研究各工艺参数对表面微观结构影响的显著性; 理论建模则着眼于超声振动方式下零件三维表面的创成机理, 以运动学和切削理论分析为基础进行研究; 实验回归建模是在提取大量的表面微观形貌实验数据后, 建立超声加工过程中的若干个主要参数与表面微结构的预测模型。然而各种研究

方法最终都致力于通过工艺参数的优化来控制零件加工表面微结构性能。

加工表面形貌特征及表面粗糙度的研究在精密制造中意义重大, 尤其针对典型难加工材料的大量使用以及超声振动复合加工先进工艺的广泛应用。国内目前对超声振动加工方式下表面微观结构特性的研究尚处于起步阶段, 尤其在超声振动表面微结构理论建模方面, 尚未形成系统的研究, 超声振动参数和切削参数等对加工表面微观结构特性的影响有待进一步研究和探讨。另一方面, 超声振动应用于特定可再生表面织构加工和微细尺度表面结构加工等新工艺中的优势较其他加工方法显著突出。因此深入研究超声振动加工过程中的表面微观结构特性以及建立其预测模型有利于零件加工表面性能的控制和改善。

## 参考文献:

- [1] ULUTAN D, OZEL T. Machining induced surface integrity in titanium and nickel alloy: A review[J]. International journal of machine tools and manufacture, 2011, 51(3): 250-280.
- [2] ARUNACHALAM R M, MANNAN M A, SPOWAGE A C. Residual stress and surface roughness when facing age hardened inconel 718 with CBN and ceramic cutting tools[J]. International journal of machine tools and manufacture, 2004, 44(9): 879-887.
- [3] 赵振业. 高强度合金抗疲劳应用技术研究与发展[J]. 中国工程科学, 2005, 7(3): 90-94.  
ZHAO Zhen-ye. Investigation and development status of the application technology to improve fatigue behavior of high strength alloys[J]. Engineering science, 2005, 7(3): 90-94.
- [4] KO J H, SHAW K C. The effect of one directional ultrasonic vibration assistance in high speed meso-scale milling process[J]. Key engineering materials, 2010, 447-448: 41-45.
- [5] 何柏林, 邓海鹏. 表面完整性研究现状及发展趋势[J]. 表面技术, 2015, 44(9): 140-152.  
HE Bo-lin, DENG Hai-peng. Research status and development trend of surface integrity[J]. Surface technology, 2015, 44(9): 140-152.
- [6] URBKAIN G, LOPEZ LACALLE L N. Modelling of surface roughness in inclined milling operations with circle-segment end mills[J]. Simulation modelling practice and theory, 2018, 84: 161-176.
- [7] HESSAINIA Z, BELBAH A, YALLESE M A. On the prediction of surface roughness in the hard turning based on cutting parameters and tool vibrations[J]. Measurement, 2013, 46: 1671-1681.
- [8] BARADIE M A. Computer-aided analysis of a surface roughness model for turning[J]. Process technology, 1991, 26: 207-216.
- [9] AZOUZI R, GUILLOT M. Online prediction of surface finish and dimensional deviation in turning using neural network based sensor fusion[J]. Machine tools manufac-

- ture, 1997, 37(9): 1201-1217.
- [10] CEMAL C M, ENSARIOGLU C, DEMIRYAK I. Mathematical modeling of surface roughness for evaluating the effects of cutting parameters and coating material[J]. Journal of materials processing technology, 2009, 209: 102-109.
- [11] MOAZ H A, BASIM A, KHIDHIR B. FEM to predict the effect of feed rate on surface roughness with cutting force during face milling of titanium alloy[J]. HBRC journal, 2013(9): 263-269.
- [12] BISWAJIT D A, SUSMITA R, RAIC R N. Studies on effect of cutting parameters on surface roughness of Al-Cu-TiC MMCs: An artificial neural network approach[J]. Procedia computer science, 2015, 45: 745-752.
- [13] 杜随更, 吕超, 任军学, 等. 钛合金 TC4 高速铣削表面形貌及表层组织研究[J]. 航空学报, 2008, 29(6): 1710-1715.
- DU Sui-geng, LV Chao, REN Jun-xue, et al. Study on surface morphology and micro-structure of titanium alloy TC4 under high-speed milling[J]. Acta aeronautica et astronautica sinica, 2008, 29(6): 1710-1715.
- [14] 李锋, 李涌泉, 李文科. 碳纤维/树脂基复合材料铣削表面粗糙度及表面形貌研究[J]. 表面技术, 2017, 46(9): 264-269.
- LI Feng, LI Yong-quan, LI Wen-ke. Surface roughness and surface morphology of milled carbon/epoxy composite surface[J]. Surface technology, 2017, 46(9): 264-269.
- [15] 张为, 程晓亮, 郑敏利. 切削加工表面完整性建模现状与发展趋势[J]. 沈阳工业大学学报, 2014, 36(5): 519-524.
- ZHANG Wei, CHENG Xiao-liang, ZHENG Min-li. Status and development trend of surface integrity modeling in metal cutting[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2014, 36(5): 519-524.
- [16] LIN W S, LEE B Y, WU C L. Modeling the surface roughness and cutting force for turning[J]. Journal of materials processing technology, 2001, 108: 286-293.
- [17] 姚倡锋, 武导侠, 靳淇超. TB6 钛合金高速铣削表面粗糙度与表面形貌研究[J]. 航空制造技术, 2012(21): 90-97.
- YAO Chang-feng, WU Dao-xia, JIN Qi-chao. Research on surface roughness and surface topography of high-speed milling TB6 titanium alloy[J]. Aeronautical manufacturing technology aeron manufacture technology, 2012(21): 90-97.
- [18] 马辉, 赵波, 谢萍. 纳米复相陶瓷超声磨削频率与表面质量关系的实验研究[J]. 上海交通大学学报, 2010, 44(12): 1763-1766.
- MA Hui, ZHAO Bo, XIE Ping. Research on the relation between ultrasonic grinding frequencies and surface quality for  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$  Nano-composite ceramics[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2010, 44(12): 1763-1766.
- [19] 赵波, 张明, 贺子杏. 二维超声磨削纳米复相陶瓷表面变质层特性研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2008, 37(S1): 832-835.
- ZHAO Bo, ZHANG Ming, He Zi-xing. Characteristics of surface deterioration layer of micro-nanocomposited ceramics under two dimensional ultrasonic vibration grinding[J]. Rare metal materials and engineering, 2008, 37(S1): 832-835.
- [20] ZHAO B, WU Y. The study on ductile removal mechanisms of ultrasonic vibration grinding nano- $\text{ZrO}_2$  ceramics[J]. Key engineering materials, 2006, 304-305: 171-175.
- [21] ZHAO B, GAO G F. Research on micro characteristics of surface and subsurface layer in two dimensional ultrasonic grinding nano-composite ceramics[J]. Key engineering materials, 2008, 375-376: 395-400.
- [22] ZHAO B, WU Y. Research on micro-mechanism of nano-composite ceramic in two dimensional ultrasound grinding[J]. Key engineering materials, 2008, 359-360: 344-348.
- [23] BIAN P Y, ZHAO B, LI Y. Study on the edge quality control in grinding engineering ceramics[J]. Key engineering materials, 2011(455): 682-685.
- [24] 卞平艳, 赵波, 李瑜. 超声激励 ZTA 陶瓷压痕裂纹扩展特性试验研究[J]. 人工晶体学报, 2013, 42(9): 1945-1949.
- BIAN Ping-yan, ZHAO Bo, LI Yu. Experimental research on the crack propagation of ZTA ceramics under ultrasonic excitation[J]. Journal of synthetic crystals, 2013, 42(9): 1945-1949.
- [25] ZHAO M L, ZHAO B, WANG Y Q, et al. High efficient mechanism of material removal in two-dimensional ultrasonic grinding from the locus perspective[J]. Key engineering materials, 2009, 416(1): 609-613.
- [26] 李勋, 张德远. 不分型超声椭圆振动切削试验研究[J]. 机械工程学报, 2010, 46(19): 177-181.
- LI Xun, ZHANG De-yuan. Experimental study on the unseparated ultrasonic elliptical vibration cutting[J]. Journal of mechanical engineering, 2010, 46(19): 177-181.
- [27] 魏冰阳, 邓效忠, 杨建军. 超声研齿的材料去除机理与试验研究[J]. 中国机械工程, 2006, 17(10): 995-999.
- WEI Bing-yang, DENG Xiao-zhong, YANG Jian-jun. Study on material removal mechanism and experiments of ultrasonic lapping of gears[J]. China mechanical engineering, 2006, 17(10): 995-999.
- [28] BREHL D E, DOW T A. Review of vibration-assisted machining[J]. Precision engineering, 2008, 32: 153-172.
- [29] 蔡晓江, 张余升. 超声振动钻削  $\text{SiC}_p/\text{Al}$  的表面形成机理研究[J]. 2014(2): 116-118.
- CAI Xiao-jiang, ZHANG Yu-sheng. Research on surface formation mechanism in ultrasonic drilling  $\text{SiC}_p/\text{Al}$ [J]. Machinery design and manufacture, 2014(2): 116-118.
- [30] 隈部纯一郎. 精密加工振动切削(基础与应用)[M]. 北京: 机械工业出版社, 1979.
- KUMABE J. Precision vibration cutting(foundation and application)[M]. Beijing: China Machine press, 1979.
- [31] SILBERSCHMIDTA V V, MAHDYB S M A, GOUDAB M A. Surface-roughness improvement in ultrasonically assisted turning[J]. Procedia CIRP, 2014(13): 49-54.
- [32] NESTLER A, SCHUBERT A. Surface properties in ultrasonic vibration assisted turning of particle reinforced aluminium matrix composites[J]. Procedia CIPR, 2014 (13): 125-130.
- [33] TIAN C X, CHEN X X, LI De-xin. Analysis of surface formation of rotary ultrasonic milling of quartz glass based on nano-indentation experiment[J]. Procedia Engineering, 2017, 174: 470-476.



- neering, 2017, 174: 470-476.
- [34] SUI H, ZHANG X Y, ZHANG De-yuan. Feasibility study of high-speed ultrasonic vibration cutting titanium alloy[J]. Journal of materials processing technology, 2017, 247: 111-120.
- [35] 高国富, 马星辉, 董小磊. 超声振动铣削碳纤维复合材料表面特征研究[J]. 现代制造工程, 2009(9): 86-89.  
GAO Guo-fu, MA Xing-hui, DONG Xiao-lei. Research on the surface characteristics in ultrasonic milling of CFRP[J]. Modern manufacturing engineering, 2009(9): 86-89.
- [36] 栾晓明, 胡斌梁, 周知进. 7075-T6 铝合金单向超声振动车削表面质量及形貌特征[J]. 湖南科技大学学报, 2014, 29(2): 27-30.  
LUAN Xiao-ming, HU Bin-liang, ZHOU Zhi-jin. Research on unidirectional ultrasonic vibrations turning 7075-T6 aluminum alloy surface quality and morphology[J]. Journal of Hunan University of Science and Technology, 2014, 29(2): 27-30.
- [37] 赵云峰, 张建华, 沈学会. 超声振动铣削 2A12 表面粗糙度实验研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2011(1): 22-25.  
ZHAO Yun-feng, ZHANG Jian-hua, SHEN Xue-hui. Experimental study on surface roughness by ultrasonic vibration assisted milling 2A 12[J]. Modular machine tool & automatic manufacturing technique, 2011(1): 22-25.
- [38] NI C B, ZHU L D, LIU C F. Analytical modeling of tool-workpiece contact rate and experimental study in ultrasonic vibration-assisted milling of Ti-6Al-4V[J]. International journal of mechanical, 2015, 77: 643-651.
- [39] MADARKAR R, AGARWAL S, ATTAR P. Application of ultrasonic vibration assisted MQL in grinding of Ti-6Al-4V[J]. Materials and manufacturing processes, 2018, 33(13): 1445-1452.
- [40] GUO B, ZHAO Q L. Ultrasonic vibration assisted grinding of hard and brittle linear micro-structured surfaces[J]. Precision engineering, 2017, 48: 98-106.
- [41] ZHANG Q L, HU Z Q, SU W W. Microstructure and surface properties of 17-4PH stainless steel by ultrasonic surface rolling technology[J]. Surface & coatings technology, 2017, 321: 64-73.
- [42] ZHAO B, REN G Y, YAO J G. Research on surface residual stress of Nano-ZrO<sub>2</sub> ceramic after ultrasonic vibration grinding[J]. Advanced science letters, 2012, 7(15): 294-298.
- [43] 黄于林, 唐进元, 陈海峰. 45 钢超声辅助干磨削工艺参数与表面性能参数实验研究[J]. 制造技术与机床, 2013(12): 27-31.  
HUANG Yu-lin, TANG Jin-yuan, CHEN Hai-feng. Experiment study on processing parameters and surface properties of ultrasonic assisted dry grinding of 45 steel[J]. Manufacturing technology and machine tool, 2013(12): 27-31.
- [44] 吴雁, 孙爱国. 二维超声振动磨削机理与试验研究[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2007, 28(6): 486-490  
WU Yan, SUN Ai-guo. Grinding mechanism of two-dimensional ultrasonic vibration and experimental study[J]. Journal of North University of China, 2007, 28(6): 486-490.
- [45] JEREZ-MESA R, LANDON Y, TRAVIESO-RODRIGUEZ J A. Topological surface integrity modification of AISI 1038 alloy after vibrationassistedball burnishing[J]. Surface and coatings technology, 2018, 349: 364-377.
- [46] LI L, KIM M, LEE S. Influence of multiple ultrasonic impact treatments on surface roughnessand wear performance of SUS301 steel[J]. Surface and coatings technology, 2016, 307: 517-524.
- [47] 李礼, 朱有利, 吕光义. TC4 钛合金超声深滚表面强化技术的研究[J]. 材料工程, 2008(11): 68-74.  
LI Li, ZHU You-li, LV Guang-yi. Study on ultrasonic deep rolling surface mechanical enhancement technique of TC4 titanium alloy[J]. Journal of materials engineering, 2008(11): 68-74.
- [48] 张勤俭, 王会英, 刘月明. 30Cr Mo A 车轴材料超声表面挤压强化技术研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2015(23): 177-183.  
ZHANG Qin-jian, WANG Hui-ying, LIU Yue-ming. The research of 30CrMoA axle material by ultrasonic surface extrusion strengthening processing[J]. Journal of basic science and engineering, 2015(23): 177-183.
- [49] 何全茂, 罗傲梅. 纵扭复合振动超声深滚加工表面形貌研究[J]. 制造技术与机床, 2015(10): 121-124.  
HE Quan-mao, LUO Ao-mei. Study on surface morphology by ultrasonic deep rolling with longitudinal-torsional vibration[J]. Manufacturing technology and machine tool, 2015(10): 121-124.
- [50] 吕光义, 朱有利, 李礼. 超声深滚对 TC4 钛合金表面形貌和表面粗糙度的影响[J]. 中国表面工程, 2007, 20(4): 38-41.  
LV Guang-yi, ZHU You-li, LI Li. The effect of ultrasonic deep rolling (UDR) on Surface topography and surface roughness of TC4 titanium alloy[J]. China surface engineering, 2017, 20(4): 38-41.
- [51] 张勤俭, 王会英, 刘月明. 30CrMoA 车轴材料超声表面挤压强化技术研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2015, 23: 177-183.  
ZHANG Qin-jian, WANG Hui-ying, LIU Yue-ming. Research on ultrasonic surface extrusion strengthening technology for 30CrMoA axle materials[J]. Journal of basic science and engineering, 2015, 23: 177-183.
- [52] ARIZMENDI M. Model for surface topography prediction in peripheral milling considering tool vibration[J]. CIRP annals manufacturing technology, 2009, 58(1): 93-96.
- [53] 王素玉. 高速铣削加工表面质量的研究[D]. 山东: 山东大学, 2006.  
WANG Su-yu. Study on the surface quality of high speed milling[D]. Shandong: Shandong University, 2006.
- [54] TEIMOURI R, AMINI S, BAGHERI A B. Evaluation of optimized surface properties and residual stress in ultrasonic assisted ball burnishing of AA6061-T6[J]. Measurement, 2018, 116: 129-139.
- [55] KUMAR V, SINGH H. Regression analysis of surface roughness and micro-structural study inrotary ultrasonic drilling of BK7[J]. Ceramics international, 2018, 44(14): 16819-16827.
- [56] TEIMOURI R, AMINI S, BAMI A B. Evaluation of optimized surface properties and residual stress in ultrasonic assisted ball burnishing of AA6061-T6[J]. Measurement, 2018, 116: 129-139.

- [57] 王明海, 姜庆杰, 刘大响. 超声扭转振动铣削 C/SiC 复合材料表面粗糙度研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2015(6): 12-16.  
WANG Ming-hai, JIANG Qing-jie, LIU Da-xiang. Study on surface roughness by ultrasonic torsional vibration milling C/SiC composites[J]. Modular machine tool and automatic manufacturing technique, 2015(6): 12-16
- [58] 王晓强, 荣莎莎, 刘佳. 超声滚挤压轴承套圈表面粗糙度响应曲面预测模型[J]. 塑性工程学报, 2018, 25(3): 54-59.  
WANG Xiao-qiang, RONG Sha-sha, LIU Jia. Surface roughness response prediction model of ultrasonic roll extrusion bearing ring[J]. Journal of plasticity engineering, 2018, 25(3): 54-59.
- [59] ROQUES C C, BODIN N, MONTEIL G, et al. Description of rough surface using conformal equivalent structure concept part 1: stereological approach[J]. Wear, 2001, 248(1/2): 82-91.
- [60] 王洪祥, 董小瑛, 董申. 金刚石车削表面微观形貌形成机理的研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2002, 34(4): 509-512.  
WANG Hong-xiang, DONG Xiao-ying, DONG Shen. Study on formation mechanism of surface micro-topography in diamond turning[J]. Journal of Harbin institute of technology, 2002, 34(4): 509-512.
- [61] CHEN H F, TANG J Y. A model for prediction of surface roughness in ultrasonic-assisted grinding[J]. The international journal of advanced manufacturing technology, 2015, 77: 643-651.
- [62] BORNER R, WINKLER S, JUNGE T. Generation of functional surfaces by using a simulation tool for surface prediction and micro structuring of cold-working steel with ultrasonic vibration assisted face milling[J]. Journal of materials processing technology, 2018, 255: 749-759.
- [63] SAJJADYA S A, ABADI NOURI HOSSEIN H, AMINI S. Analytical and experimental study of topography of surface texture in ultrasonic vibration assisted turning[J]. Materials and design, 2016, 93: 311-323.
- [64] 张洪丽, 张建华. 超声振动磨削运动学分析[J]. 制造技术与机床, 2006(6): 63-66.  
ZHANG Hong-li, ZHANG Jian-hua. Kinematics analysis on ultrasonic vibration grinding[J]. Manufacturing technology and machine tool, 2006(6): 63-66.
- [65] 何玉辉, 唐楚, 唐进元. 轴向超声振动辅助磨削的表面残余应力建模[J]. 振动与冲击, 2017, 36(22): 185-191.  
HE Yu-hui, TANG Chu, TANG Jin-yuan. Modeling of grinding surface residual stress assisted with axial ultrasonic vibration[J]. Journal of vibration and shock, 2017, 36(22): 185-191.
- [66] 李虎, 陆忠东. 超声磨削表面三维形貌建模与试验研究[J]. 电子科技, 2018, 31(3): 56-60.  
LI Hu, LU Zhong-dong. 3D Surface topography modeling and research for ultrasonic grinding[J]. Electronic Science and technology, 2018, 31(3): 56-60.
- [67] 王秋燕, 梁志强, 王西彬. 超声振动螺旋线磨削表面微观形貌建模与仿真研究[J]. 机械工程学报, 2017, 53(19): 83-88.  
WANG Qiu-yan, LIANG Zhi-qiang, WANG Xi-bin. Research on modeling and simulation of surface micro-topography in ultrasonic vibration spiral grinding[J]. Journal of mechanical engineering, 2017, 53(19): 83-88.
- [68] XU P, LEE R. Feedrate optimization based on hybrid forward-reverse mappings of artificial neural networks for five-axis milling[J]. International journal of advanced manufacturing technology, 2016, 87(9-12): 3033-3049.
- [69] WEN L, LI X, GAO L, et al. Surface roughness prediction in end milling by using predicted point oriented local linear estimation method[J]. International Journal of advanced manufacturing technology, 2016, 84(9-12): 2523-2535.
- [70] JING J T, FENG P F, WEI S L, et al. Investigation on surface morphology model of Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ceramics for rotary ultrasonic grinding machining based on the neural network[J]. Applied surface science, 2017, 396: 85-94.
- [71] 王晓斌. 基于人工神经网络的超声加工表面粗糙度预测[J]. 机械研究与应用, 2011(4): 75-77.  
WANG Xiao-bin. The surface roughness prediction of ultrasonic machining based on artificial neural network[J]. Mechanical research & application, 2011(4): 75-77.
- [72] YANG C B, DENG C S, CHIANG H L. Construction of processing prediction model and parameter optimization model for ultrasonic assisted turning[J]. Journal of the Chinese Society of Mechanical Engineer, 2013, 33(6): 497-505.
- [73] 苏玉珍, 聂孟辉. 基于神经网络的超声无磨料外圆抛光加工建模与仿真[J]. 矿山机械, 2009, 37(10): 23-26.  
SU Yu-zhen, NIE Meng-hui. Modeling and simulation of ultrasonic external circle polishing without abrasive based on neural network[J]. Mining & processing equipment, 2009, 37(10): 23-26.
- [74] ZHANG C, SHI G L, EHMANN K F. Investigation of hybrid micro-texture fabrication in elliptical vibration-assisted cutting[J]. International journal of machine tools & manufacture, 2017, 120: 72-84.
- [75] ZHANG R, STEINERT P, SCHUBERT A. Microstructuring of surfaces by two-stage vibration-assisted turning[J]. Procedia CIRP, 2014, 14: 136-141.
- [76] TAO Guo-can, ZHANG Jian-hua, SHEN Xue-hui. Feasibility study on ultrasonic vibration assisted milling for squamous surface[J]. Procedia CIRP, 2016, 42: 847-852.
- [77] 白利娟, 张建华, 陶国灿. 振动辅助铣削加工仿生表面研究[J]. 中国机械工程, 2016, 27(9): 1229-1242.  
BAI Li-juan, ZHANG Jian-hua, TAO Guo-can. Vibration assisted milling for bionic surface manufacturing[J]. China mechanical engineering, 2016, 27(9): 1229-1242.
- [78] 沈学会, 张建华, 邢栋梁. 超声振动辅助微细铣削加工尺寸精度实验[J]. 农业机械学报, 2011, 42(3): 229-233.  
SHEN Xue-hui, ZHANG Jian-hua, XING Dong-liang. Effects of the ultrasonic vibration on dimensional accuracy in micromilling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(3): 229-233.
- [79] 朱永伟, 王占和, 范仲俊. 摩擦副表面微结构及其超声复合电加工技术研究[J]. 中国机械工程, 2008, 19(24): 2965-2971.  
ZHU Yong-wei, WANG Zhan-he, FAN Zhong-jun. Micro-structures on friction unit working surfaces and their ultrasonic combined electrical micro-machining[J]. China mechanical engineering, 2008, 19(24): 2965-2971.