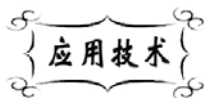


中图分类号: TH161  
文献标识码: A

文献编号: 1005-1198 (2020) 05-0331-10  
DOI: 10.16253/j.cnki.37-1226/tq.2020.05.008



## 工业陶瓷精密加工技术的研究现状

邢政鹏<sup>1</sup>, 朱 杉<sup>2</sup>, 孙增光<sup>1</sup>, 姜立平<sup>1</sup>, 王长征<sup>1</sup>, 谢青松<sup>1</sup>, 胡春玲<sup>1</sup>, 王世博<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 山东工业陶瓷研究设计院有限公司, 山东 淄博 255000

<sup>2</sup> 空军装备部驻济南地区军事代表处, 济南 250023

**摘要:** 工业陶瓷具有高强度、高硬度、耐高温和抗腐蚀等优异性能, 在机械电子、航空航天、军事国防等领域有着广泛的应用。陶瓷产品存在高脆性的特点, 在工业陶瓷加工时会出现裂纹和崩溃等问题。在过去几十年中, 改善传统机械加工技术、应用新型特种加工技术以及研究复合加工技术方法成为一个共同关注的问题, 研究成果在提高工业陶瓷的加工效率、保证陶瓷产品表面完整性方面发挥出了积极的作用。本文总结了工业陶瓷精密加工技术研究进展。

**关键词:** 精密加工; 机械加工; 特种加工; 复合加工; 工业陶瓷

## Research Progress in Precision Processing Technologies for Industrial Ceramics

XING Zheng-Peng<sup>1</sup>, ZHU Shan<sup>2</sup>, SUN Zeng-Guang<sup>1</sup>, JIANG Li-Ping<sup>1</sup>,  
WANG Chang-Zheng<sup>1</sup>, XIE Qing-Song<sup>1</sup>, HU Chu-Ling<sup>1</sup>, WANG Shi-Bo<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Shandong Industrial Ceramics Research and Design Institute, Zibo 255000, China

<sup>2</sup> Military Representative Office of the Air Force Equipment Department in Jinan, Jinan 250023, China

**Abstract:** Industrial ceramics exhibit excellent properties such as high strength, high hardness, high temperature resistance, corrosion resistance, etc., and have been widely used in mechanical, electronic, aerospace, military and defense fields. Due to their intrinsic brittleness, precision processing of ceramic products faces the problems such as cracks and collapse. During the past decades, research attentions have been paid on improving traditional mechanical processing technology, developing new special processing technology and composite processing technology, to enhance processing efficiency and ensuring the surface integrity of ceramic products. In this paper, a review of precision processing technologies for industrial ceramics is carried out.

**Keywords:** Precision machining; Mechanical processing; Special processing; Compound processing; Industrial ceramics

收稿日期: 2020-04-17

收到修改稿日期: 2020-08-28

第一作者: 邢政鹏 (1979-), 男, 山东青岛人, 高级工程师。E-mail: xingzp@163.com。

通讯作者: 孙增光 (1992-), 男, 山东淄博人, 硕士研究生。E-mail: su907441478@qq.com。

陶瓷产品一般是通过将粉末状原料在模具中成型, 而后经高温烧结而成<sup>[1]</sup>。陶瓷坯体在烧结过程中会发生不同程度的收缩, 因此无法保证烧结后产品的尺寸精度。此外, 陶瓷产品具有高硬性和高脆性的特点, 在后续的加工过程很难保证其形位尺寸精度和表面质量。因此, 研究陶瓷精密加工技术、提高精密加工的效率 and 精度具有十分重要的意义。

传统的工业陶瓷精密加工技术主要有车削、铣削和磨削等机械加工法, 其工艺简单, 加工效率高, 但难以加工形状复杂、尺寸精度高的陶瓷产品<sup>[2]</sup>。随着科学技术的发展, 陶瓷精密加工技术不断改善, 出现了一些特种加工技术和复合加工技术。目前, 关于工业陶瓷精密加工技术的研究主要包括以下几个方面: 通过改进传统机械加工技术来提高工业陶瓷的加工质量及加工效率; 针对结构尺寸复杂的陶瓷产品, 研发新型特种加工技术; 对于难加工的工业陶瓷, 结合多种加工方法复合加工技术等。本文将对这些研究进行简要的综述。

### 1 机械加工技术

机械加工技术一般包括车削加工技术、铣削加工技术和磨削加工技术等, 分述如下。

**车削加工技术:** 车削加工技术的原理是: 首先使用金刚石刀具进行粗加工, 然后改用天然单晶金刚石刀具, 以微车削方式进行精车<sup>[3]</sup>。图 1 所示为车削加工工作示意图, 其中  $V_c$  为切削速度,  $f_n$  为切削进给率,  $a_p$  为切削深度。

由于陶瓷材料的硬度和脆性非常大, 传统车削加工时难以保证其精度要求, 且加工效率低。此外, 要提高车削加工的精密程度, 还需要多采用硬质合金刀具, 在车削过程中选用合理的刀具参数和车削参数, 并使用合适的车削液进行冷却。

目前, 有一种加热辅助车削的陶瓷精密加工技术得到了较为广泛的应用, 它是对待加工的陶瓷部件的局部或者整体进行加热, 使车削表面层达到合适温度后进行车削加工。局部加热可以改变陶瓷材料的硬度和强度, 从而改善材料的可加工性, 实现以塑性车削的方式车削陶瓷材料, 进而提高车削效率和精度。

**铣削加工技术:** 铣床是一种用途广泛的机床, 它可以加工平面、沟槽、螺旋形表面及各种曲面, 它还可用于对回转体表面、内孔加工及进行切断工作等<sup>[4]</sup>。铣削加工的工作原理是: 工件装在工作台上, 铣刀旋转为主运动, 辅以铣头的进给运动, 工件即可获得所需的加工表面。图 2 为铣削加工工作示意图, 其中  $V_c$  为铣削速度,  $f_r$  为铣削进给量。

由于铣削是多刃断续切削, 因而铣床在加工陶瓷时生产率较高, 但是在陶瓷精密加工过程中,

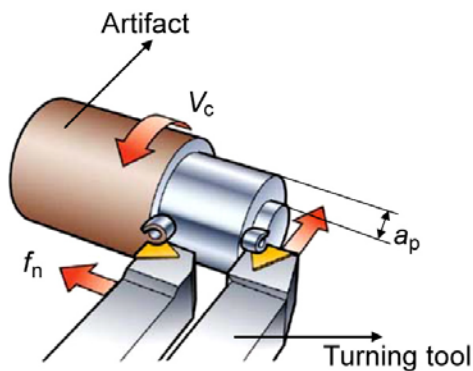


图 1 车削加工工作示意图  
Figure 1 Schematic diagram of turning work

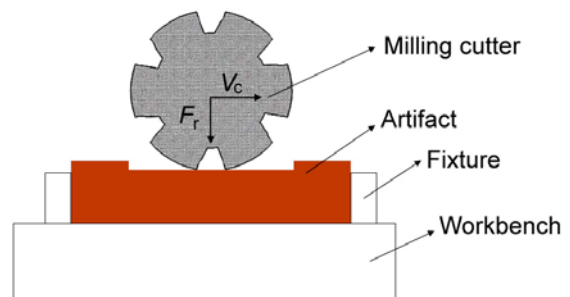


图 2 铣削加工工作示意图  
Figure 2 Schematic diagram of milling work

陶瓷表面会在机械应力作用下产生凹坑和表层微裂纹等缺陷。目前,主要通过研究新型刀具、选择合适切削液、优化切削进给速度和进给量等工艺参数手段来提高陶瓷精密加工的质量。

**磨削加工技术:**磨削加工技术占到陶瓷加工的 80%。磨削加工主要选用金刚石砂轮,加工时磨粒切削刃前方的材料因受到挤压而剥落从而完成磨削<sup>[5]</sup>。图 3 为磨削加工工作示意图,其中  $V_c$  为砂轮进给速度,  $f_a$  为砂轮的磨削用量。

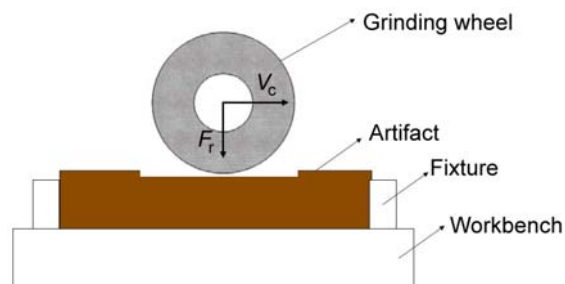


图 3 磨削加工工作示意图  
Figure 3 Schematic diagram of grinding work

磨削加工的缺点是:当压力值过大时,陶瓷材料可能会因压溃而形成碎屑。此外,磨削加工过程中的压应力和摩擦热的作用会导致陶瓷材料产生局部塑性流动,形成变形层。磨削加工过程中的切屑不易排除,会导致加工效率低,砂轮磨损严重,加工成本也变高。

为了提高磨削加工的效率 and 精度,多在磨削工艺、磨料和研磨液方面进行研究与探索。通常会选用碳化硼、碳化硅和金刚石微粉作为磨料,也选用多晶金刚石研磨液和磁流研磨液。

通过对工业陶瓷机械加工技术的研究发现,传统的机械加工技术很难满足工业陶瓷的精度要求和加工效率要求,传统机械加工技术的未来发展方向列于表 1。

表 1 机械加工技术的发展方向

Tab.1 The development direction of machining technology

Machining technology	Direction of development
Turning	Carbide knife; Turning fluid; Turning parameters
Milling	New tool; Milling amount; Tool parameters
Grinding	Grinding process; Slurry; Compound grinding

机械加工技术的未来发展方向主要包括:(1)车削加工时采用硬质合金刀具,选用合适刀具参数、优化车削参数,并且使用合适的车削液进行冷却;(2)铣削加工时通过研发新型刀具、选择合适切削用量、优化铣刀具工艺参数来提高铣削能力;(3)磨削加工时通过优化磨削工艺参数,配置合适研磨液,研究先进复合磨削加工技术,来提高传统机械加工的精度和效率。

## 2 特种加工技术

工业陶瓷特种加工技术不是利用传统的机械加工方法来切除多余陶瓷材料,而是直接利用电能、热能、光能或者化学能对陶瓷材料进行加工<sup>[6]</sup>。特种加工技术对于复杂形状、精密微细的特殊零件有较大的适用性和发展潜力。

根据所使用的能量不同,工业陶瓷特种加工技术可以分为电火花特种加工、激光特种加工、超声特种加工和微波特种加工等。研究特种加工技术,不仅可以提高工业陶瓷表面质量和加工精度,也能提高生产效率。

**电火花特种加工:**电火花特种加工的原理是:通过导电工件与工具电极之间的脉冲性火花放电,产生局部和瞬间高温,使工件熔化,形成电腐蚀现象,以去除多余材料,达到零件尺寸要求和形状表面质量要求<sup>[7]</sup>。在电火花加工时,工具电极和工件分别接电源的两极,并浸入工作液中,通过自

动调节装置控制工具电极向工件进给, 当电极间隙达到一定距离时, 产生电火花放电<sup>[8]</sup>。图 4 为电火花特种加工示意图。

电火花加工的优点是: 可以加工形状较复杂的陶瓷, 加工时无机械力, 不会产生毛刺和划痕等缺陷, 使用电能加工也便于实现自动化。

电火花加工时要求陶瓷材料必须导电, 对于导电性能较好的陶瓷可以直接采用电火花加工。而大部分陶瓷材料都是绝缘的, 不能作为电极, 这给电火花加工带来了较大的困难。目前, 采用电火花进行工业陶瓷加工时多采用辅助电极法, 即用金属盘或金属网覆盖于陶瓷绝缘体表面作为辅助电极, 也可以通过改变陶瓷材料导电性, 即加入适当的成分使其具有导电性, 从而实现电火花加工<sup>[9]</sup>。

**激光特种加工:** 激光特种加工是利用激光作为加工热源, 利用激光的聚光性和高能量密度直接辐照在陶瓷的加工部位, 这样陶瓷被加工部位会在激光辐照下快速升温, 使被加工部位材料局部点熔融或汽化, 从而实现陶瓷的精密加工<sup>[10]</sup>。

目前, 有一种激光辅助机械复合加工技术得到了较为广泛的应用, 它由激光辅热系统、数控车床和切削刀具组成。激光辅热装置组成, 如图 5 所示。

进行激光特种加工时, 首先使用激光瞬时加热, 使陶瓷表面局部软化, 再用刀具进行切削, 从而获得连续切屑并降低切削力<sup>[11]</sup>。图 6 为激光特种加工的工作图。这种激光辅助机械加工技术对刀

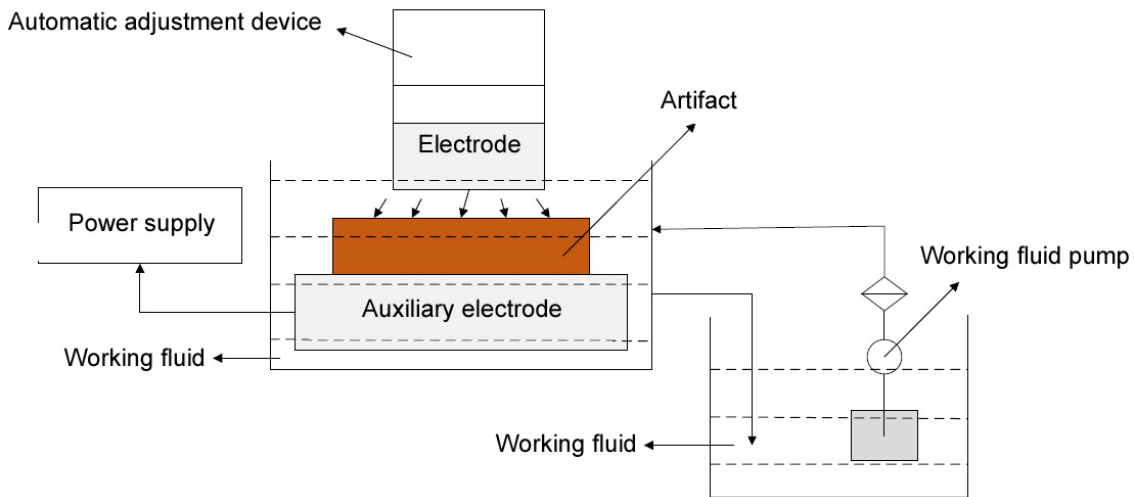


图 4 电火花特种加工  
Figure 4 EDM special machining

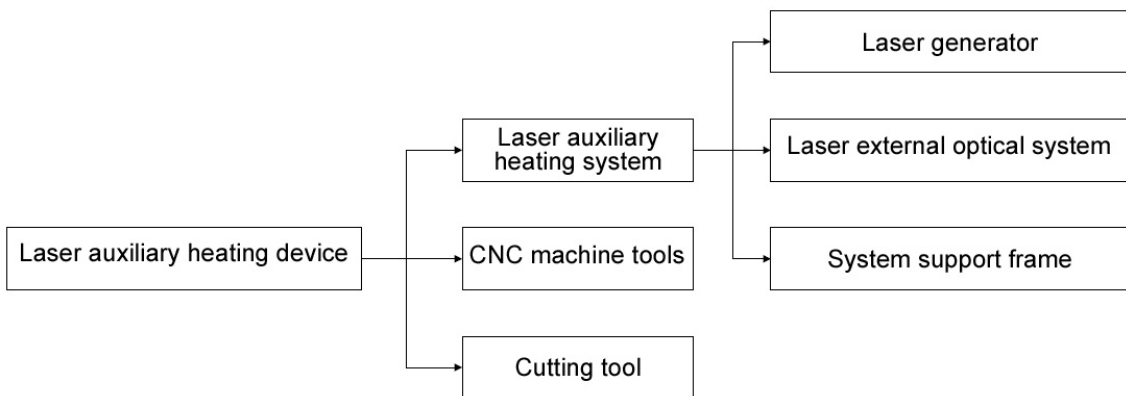


图 5 激光辅热加工装置  
Figure 5 Laser auxiliary heat processing device



图 6 激光辅助机械加工  
Figure 6 Laser assisted machining

刃的热影响较小，不仅能改善陶瓷表面质量，也能提高刀具的耐用度。

**超声特种加工：**超声特种加工是指在加工工具或加工材料上施加超声波振动，在工具与工件之间加入研磨液，并以较小的压力使工具与工件相贴压<sup>[12]</sup>。加工时，超声振动的存在会迫使研磨液中悬浮的磨粒以很大的速度不断撞击被加工表面，从而产生材料去除效果，实现陶瓷的精密加工。图 7 为超声特种加工示意图。

在工业陶瓷加工时辅以超声加工技术，可有效地控制成本，提高加工效率，确保陶瓷工件具有良好的性能与质量水平。

**微波特种加工：**微波加工是使用电磁波能量穿透介质材料，并传送到陶瓷内部，从而使物体内各分子互相碰撞和摩擦，使物体发热、熔融甚至汽化，进而实现陶瓷材料的去除<sup>[13]</sup>。图 8 为微波加工示意图。

微波加热具有热应力小、效率高、加热速度快的特点，广泛地应用于陶瓷刻蚀和精密加工。利用微波特种加工陶瓷时，通常首先通过微波产热使陶瓷材料局部熔融，再辅助刀具切削装置进行机械加工，从而提高陶瓷的可加工性，实现精密加工。

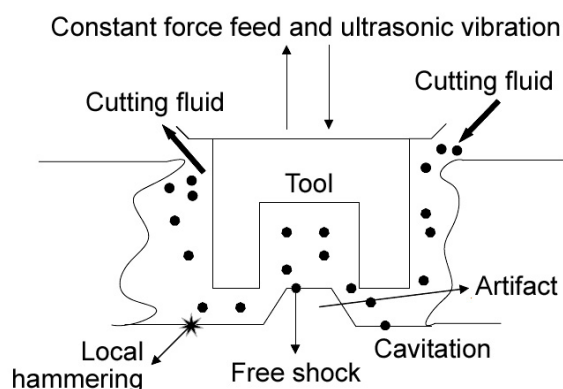


图 7 超声特种加工示意图  
Figure 7 Schematic diagram of ultrasonic special processing

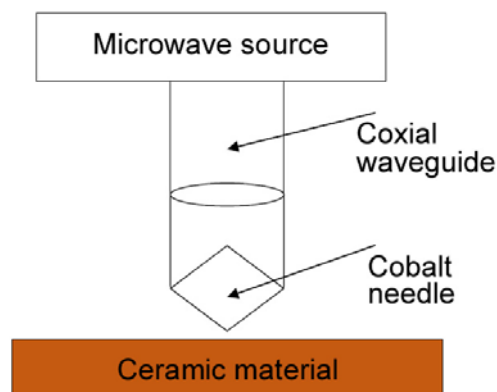


图 8 微波加工示意图  
Figure 8 Schematic diagram of microwave processing

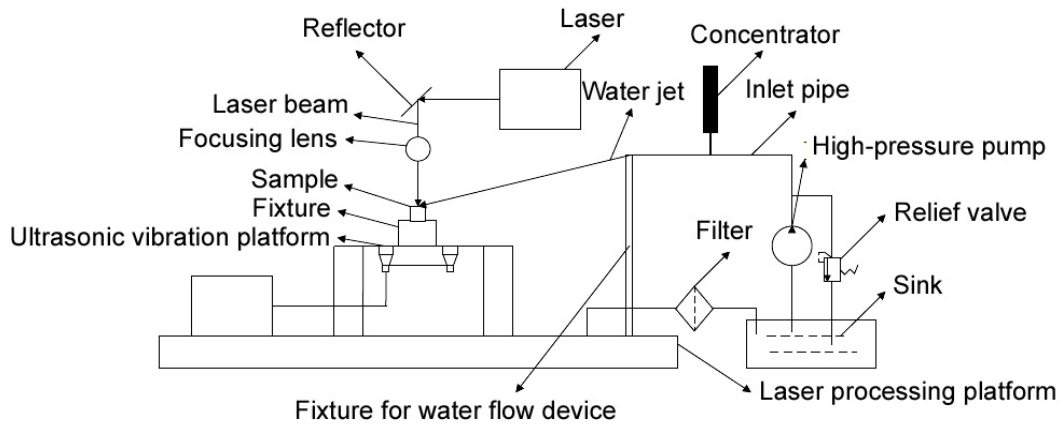


图 9 水射流辅助激光精密加工  
Figure 9 Water jet assisted laser precision machining

### 3 复合加工技术

随着对工业陶瓷加工质量的需求不断提高, 要求陶瓷加工可以实现微细加工或者纳米加工, 而传统的加工技术存在尺寸精度低、表面光洁度差等缺陷, 因此复合加工技术应运而生。复合加工技术能获得较好的加工质量和较高的加工效率, 现已成为工业陶瓷加工技术的发展主流<sup>[14]</sup>。目前, 应用比较成熟的工业陶瓷复合加工技术有水射流辅助激光精密加工技术、电解电火花复合加工技术和高温化学腐蚀加工技术。

**水射流辅助激光精密加工:** 安徽建筑大学姚燕生等人于 2018 年研发了一种水射流辅助激光精密加工的技术<sup>[15]</sup>。他们搭建了旁轴射流与超声振动辅助激光复合加工系统, 开展了多种参数下氮化硅水射流辅助激光刻槽对比试验。图 9 为其试验装置结构图。

这套复合加工技术的工作原理是: 采用激光烧蚀陶瓷材料时, 由于激光穿越水层会使刻蚀深度有所降低; 同时又由于水层的存在改变了加工区域能量分布, 使得槽口变宽。复合加工时辅以超声高频振动能够促进产物的抛出和水解反应, 提高了刻蚀速率。试验结果表明: 在激光作用下陶瓷会发生水解效应, 材料蒸汽和熔融粒子会沿水流动方向被带走, 有利于表面质量的提高, 其综合效果良好。

**电解电火花复合加工:** 电解电火花复合加工不同于传统的电火花加工放电机理, 它通常使用含有电解质的工作溶液, 在电极之间加上脉冲电压, 使阴极表面会产生氢电子迁移, 形成氢气气泡,

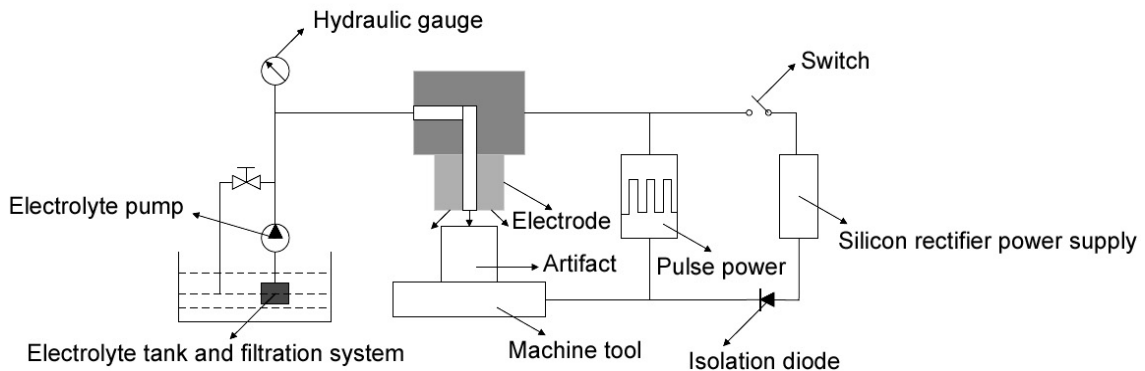


图 10 电解电火花加工装置示意图  
Figure 10 Schematic diagram of electrolytic EDM equipment

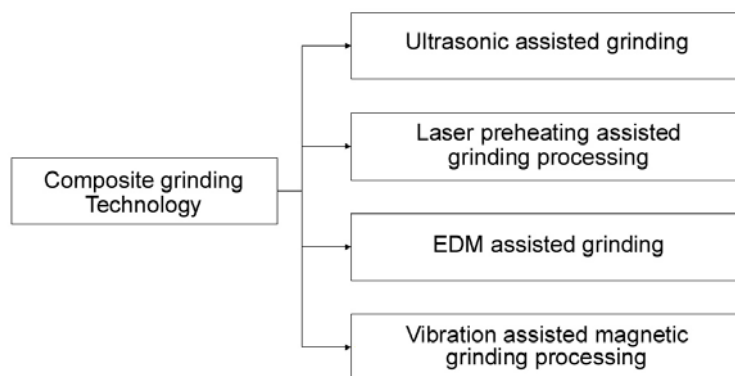


图 11 复合磨削加工技术  
Figure 11 Composite grinding technology

生成放电通道<sup>[16]</sup>。当场强超过气泡耐压强度时，气泡被击穿而产生放电现象，产生的电火花使阳极电蚀加工。图 10 为电解电火花复合加工装置示意图。

电解电火花复合加工技术具有生产率高、加工精度高、表面质量较好等特点，通过控制电火花放电强度可以实现不同类型的加工。在进行电解电火花复合加工时，要求工具电极和辅助电极分别接电源的负极和正极，电解液在导电作用和电化学反应下形成火花放电，以此来达到放电电蚀除材料的目的<sup>[17]</sup>。

**高温化学腐蚀复合加工：**青岛理工大学刘善勇等人研究了一种高温化学腐蚀复合加工技术，它具有设备简单，加工过程不引入残余应力，无热缺陷和热影响区等优点<sup>[18]</sup>。这种复合加工的工作原理是：选用 KOH/K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 碱溶液在不同的条件下加工 SiC 陶瓷材料；SiC 陶瓷的高温化学腐蚀先以表面玻璃相黏结剂和杂质为主，能够快速降低样品粗糙度；随着化学反应的进行，SiC 颗粒表面的缓慢腐蚀以渗透为主，通过控制腐蚀时间和溶液浓度，来实现陶瓷表面的精密加工。

这种高温化学腐蚀加工技术与机械加工试样相比，高温化学加工后的样品不会出现裂纹，表面经简单清洗后没有反应物残留。

#### 4 复合磨削加工技术

陶瓷加工时多采用磨削加工，然而传统的磨削加工存在加工效率低，砂轮磨损严重等缺陷。随着先进加工技术的发展，出现了多种方式的复合磨削加工技术<sup>[19]</sup>。其中应用最广的主要有超声辅助磨削、激光预热辅助磨削、复合磨削加工技术、电火花磨削加工和振动辅助磁力研磨等。常用的复合磨削加工技术如图 11 所示。

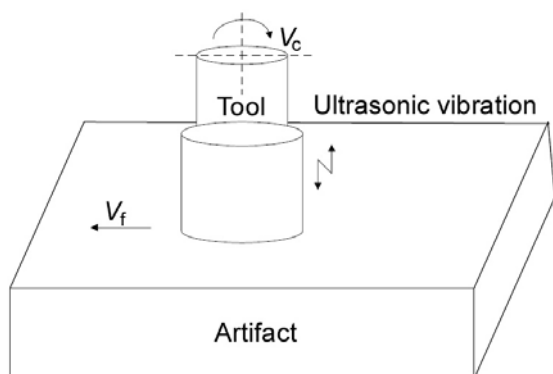


图 12 超声辅助磨削加工  
Figure 12 Ultrasonic assisted grinding

**超声辅助磨削加工：**超声辅助磨削加工是超声振动加工与磨削加工相结合的复合加工技术，其工作原理是（图 12）：在传统磨削加工的基础上，对工具或工件施加超声振动，利用砂轮的磨削作用和超声振动产生撞击来实现材料的去除，完成陶瓷表面的精密加工<sup>[20]</sup>。

这种超声辅助磨削加工技术与普通的磨削

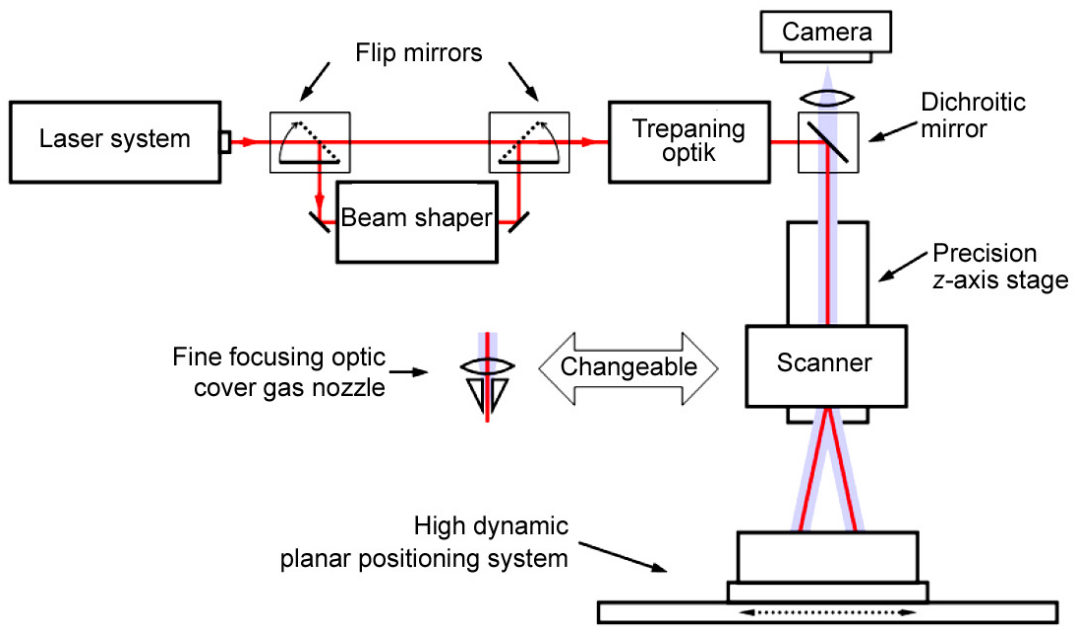


图 13 激光预热加工系统  
Figure 13 Laser preheating processing system

相比, 超声振动有效降低了磨削力, 产生的热量小、加工精度高、加工效率高且能保证较好的加工表面质量。

**激光预热辅助磨削加工:** 激光预热辅助磨削的工作原理是: 利用高能激光束对陶瓷表面进行局部预热来提高陶瓷的断裂韧性, 从而实现由脆性破坏向塑性去除的转变<sup>[21]</sup>。激光预热加工系统的原理图见图 13。

激光系统由振荡器和放大器组成, 激光由振荡器产生, 再经过放大器进行放大, 得到较高功率的激光脉冲, 激光脉冲从放大器输出后, 通过光路系统传输到加工平台, 经过聚焦系统的物镜聚焦到待加工样品上进行加工<sup>[22]</sup>。激光预热磨削不仅可以减小磨削过程中温度的影响作用, 还能降低陶瓷的硬度, 增加去除量, 且不会引起磨削裂纹。

**电火花磨削加工:** 电火花磨削加工的工作原理是: 加工区域在通电的状态下形成电火花放电, 电火花会产生瞬时高温, 在烧蚀放热的效应下使陶瓷材料表面可以加热至熔融状态, 磨轮在机械磨削作用下进行精密磨削加工作业<sup>[23]</sup>。电解电火花的工作示意图见图 14。

电火花加工时, 通常选用煤油为磨削工作液, 利用瞬间产生的局部高温, 使煤油热分解出碳元素。磨轮工作时溅射出金属元素, 金属元素与碳元素在绝缘陶瓷表面形成新的导电层, 从而在绝缘陶瓷表面与磨轮之间形成持续放电的回路, 使电火花磨削加工能连续进行。

该方法的优点是可以使陶瓷表面软化而易于加工, 部分电烧蚀热量也会传递到磨轮表面, 可以保持磨轮的精度和自锐性, 降低磨轮的磨削

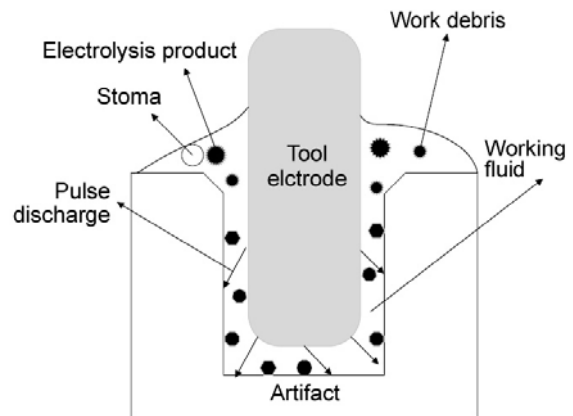


图 14 电火花磨削加工工作示意图  
Figure 14 Schematic diagram of EDM grinding work



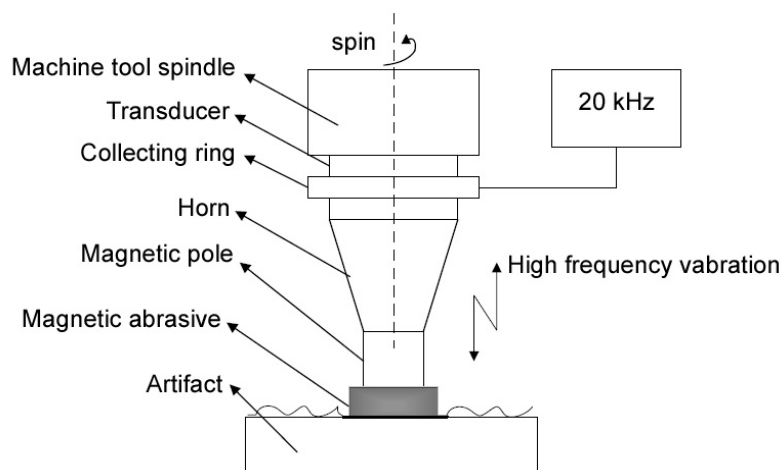


图 15 振动辅助磁力研磨加工示意图

Figure 15 Schematic diagram of vibration-assisted magnetic grinding processing

力，提高陶瓷材料的蚀除效率。

**振动辅助磁力研磨加工：**振动辅助磁力研磨加工是将振动研磨和磁力研磨相结合的一种复合加工技术，它是指在磁力研磨的过程中通过对工件附加振动，在磁场力作用下形成磁刷来去除多余的陶瓷材料，改善表面质量<sup>[24]</sup>。图 15 为振动辅助磁力研磨的加工示意图。

附加振动可以改善研磨压力分布，促进磨粒回转运动和跳跃运动。磨粒的翻滚促使工作间隙内的磨粒切削刃周期性变化，实现工业陶瓷的高效加工。

对复合磨削技术进行的研究发现：当加工具有形状复杂型孔、型腔的陶瓷材料时可以选择超声辅助加工，加工过程受力小，无残余应力，加工精度高。激光预热辅助加工可以通过控制激光的光斑尺寸改变工艺参数来改变能量的大小，通过改变加热位置可以实现复杂曲面、盲孔和沟槽的加工。采用电火花加工时，根据加工要求控制电极与加工表面的间隙和加工参数，可以实现特殊零件与结构的个性化陶瓷加工。选择磁力研磨加工时几乎不受工件几何尺寸约束，可以加工平面、圆管内面和内球面，它的自锐性好，切削能力强，易于实现自动化加工。

## 4 结 论

对多种新兴加工技术研究的不断深入有利地推动了工业陶瓷加工技术的发展。本文对陶瓷机械加工技术、特种加工技术和复合加工技术方面的研究成果进行了回顾，提出工业陶瓷加工技术的研究方向为：优化传统的机械加工工艺参数，提高加工质量及效率；针对结构复杂难加工的陶瓷工件，综合运用特种加工技术和复合加工技术，来实现工业陶瓷的加工。

## 参考文献

- [1] 谢志鹏, 刘伟. 高技术陶瓷产品的精密注射成型制备技术的应用与发展[C] // 中国硅酸盐学会陶瓷分会 2010 年学术年会, 2010.
- [2] 杨俊飞, 田欣利, 吴志远, 等. 结构陶瓷材料加工技术的新进展[J]. 兵工学报, 2008, (10): 1249-1255.
- [3] 蒋瑞斌, 廉良冲, 鄢铨. 激光加热辅助车削工程陶瓷的工艺性能分析[J]. 机床与液压, 2010, 38 (9): 12-14.
- [4] 薛建勋. 工程陶瓷切削加工技术研究[J]. 中国陶瓷, 2012, 48 (7): 54-56.

- [5] 陆国栋. 金刚石砂轮磨削碳化硅陶瓷砂轮磨损的试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学硕士学位论文, 2014.
- [6] 张文武, 张天润, 焦健. 陶瓷基复合材料加工工艺简评[J]. 航空制造技术, 2014, (6):45-49.
- [7] 唐健, 张彦, RASJEDUL-ISLAM MD, 等. 电火花-电解复合加工的低电极损耗机理研究[J]. 机械制造与自动化, 2019, 48 (6): 18-21.
- [8] 杨俊飞, 田欣利, 吴志远, 余安英. 结构陶瓷材料加工技术的新进展[J]. 兵工学报, 2008, (10): 1249-1255.
- [9] 周兰凤. 绝缘陶瓷辅助电极法电火花加工的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学硕士学位论文, 2002.
- [10] 胡晓冬, 李元龙, 白少状, 等. 激光在材料去除加工中应用的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2020: (待发表).
- [11] 刘广新. 氧化锆陶瓷的激光辅助切削加工工艺研究[D]. 淄博: 山东理工大学硕士学位论文, 2019.
- [12] 赵波. 超声加工技术的研究现状和发展方向简介[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2020, 40 (1): 1-4.
- [13] 刘玮钦. 工程陶瓷微波辅助塑性加工的研究[D]. 武汉: 华中科技大学硕士学位论文, 2007.
- [14] 庄召鹏, 崔仲鸣, 王也, 等. 超精密磨粒加工新发展及应用[J]. 内燃机与配件, 2020, (13): 102-106.
- [15] 姚燕生, 陈庆波, 汪俊, 等. 氮化硅陶瓷水射流辅助激光精密加工[J]. 光学精密工程, 2018, 26 (11): 2723-2731.
- [16] 孙永兴, 曲馨, 王引真, 等. 工艺参数对电火花电解复合加工过程的影响规律[J]. 机床与液压, 2019, 47 (11): 124-128.
- [17] 魏志远. 超声振动辅助微细电解电火花加工技术研究[D]. 济南: 山东大学硕士学位论文, 2019.
- [18] 刘善勇, 王玉玲, 孙树峰, 等. 高温化学腐蚀加工多孔碳化硅陶瓷的表征及机理[J]. 航空材料学报, 2019, 39 (2): 16-24.
- [19] 丁凯, 李奇林, 苏宏华, 等. 硬脆材料超声辅助磨削技术研究现状及展望[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2020, 40 (1): 5-14.
- [20] 康仁科, 赵凡, 鲍岩, 等. 超声辅助磨削  $\text{SiC}_f/\text{SiC}$  陶瓷基复合材料[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2019, 39 (4): 85-91.
- [21] 李美艳, 蔡春波, 韩彬, 等. 预热对激光熔覆陶瓷涂层温度场和应力场影响[J]. 材料热处理学报, 2015, 36 (12): 197-203.
- [22] 李苏, 张占辉, 韩善果, 等. 激光技术在材料加工领域的应用与发展[J]. 精密成形工程, 2020, 12 (4): 76-85.
- [23] 饶小双, 张飞虎, 刘立飞, 等. 电火花机械复合磨削反应烧结  $\text{SiC}$  陶瓷的表面特征[J]. 光学精密工程, 2016, 24 (9): 2192-2199.
- [24] 孙岩, 兰勇, 杨海吉, 等. 双向复合振动辅助磁力研磨加工的试验研究[J]. 表面技术, 2018, 47 (7): 125-131.