

计算机仿真技术在工程陶瓷加工中的革新应用

秦伟伟, 逯潇, 王泽阳

山东工程职业技术大学, 山东 济南 250200

DOI: 10.61369/TACS.2025080023

摘 要 : 工程陶瓷耐高温、耐磨损、耐腐蚀, 其被广泛的应用在航天、汽车、生物医学等领域。但是, 其在加工的过程中, 工序较多、工艺复杂, 传统的加工方法效率低、难度大。计算机仿真技术能够对工程陶瓷加工过程进行模拟和优化, 提高产品的质量和生产效率。基于此, 文章系统阐述计算机仿真技术的内涵, 分析其在工程陶瓷加工中的应用优势, 重点探讨计算机仿真技术在工程陶瓷加工中的创新应用, 并展望未来与人工智能、大数据融合的发展方向, 期望为工程陶瓷加工技术升级提供参考。

关 键 词 : 计算机仿真技术; 工程陶瓷; 加工革新; 工艺流程模拟; 3D 打印仿真

Innovative Applications of Computer Simulation Technology in Engineering Ceramics Processing

Qin Weiwei, Lu Xiao, Wang Zeyang

Shandong University of Engineering and Vocational Technology, Jinan, Shandong 250200

Abstract : Engineering ceramics, featuring high temperature resistance, wear resistance and corrosion resistance, are widely used in aerospace, automotive, biomedicine and other fields. However, their processing involves multiple procedures and complex technologies, and traditional processing methods are inefficient and difficult. Computer simulation technology can simulate and optimize the processing process of engineering ceramics, improving product quality and production efficiency. Based on this, the article systematically expounds the connotation of computer simulation technology, analyzes its application advantages in engineering ceramics processing, focuses on discussing the innovative applications of computer simulation technology in engineering ceramics processing, and prospects the future development direction of integration with artificial intelligence and big data, aiming to provide references for the upgrading of engineering ceramics processing technology.

Keywords : computer simulation technology; engineering ceramics; processing innovation; process flow simulation; 3D printing simulation

引言

工程陶瓷是一种高性能结构材料, 其力学、热学、化学性能高于传统金属材料, 其在机械制造、航天工业等领域被广泛应用。在我国高端产业迅猛发展的背景下, 工程陶瓷的加工制造工艺面临更高的要求。计算机仿真技术的应用能够优化其生产工艺、缩短产品的研发周期, 提升产品的品质。因此, 本文围绕计算机仿真技术在工程陶瓷加工中的革新应用展开讨论, 期望为工程陶瓷产业的转型发展提供有效参考。

一、计算机仿真技术概述

计算机仿真技术是依托控制理论、相似原理、计算机技术与信息处理技术发展而来的交叉学科。其以计算机及物理效应设备为工具, 构建与真实系统具有相似属性的虚拟模型, 借助模拟运行开展参数分析、性能预判与方案优化, 最终为实际生产的决策制定提供科学可靠的依据^[1]。

工程陶瓷具有高硬度、高脆性的特性, 传统的加工方式容易导致陶瓷加工过程中出现裂纹、崩边等问题, 且试错成本较高。计算机仿真技术可以构建精准的陶瓷材料本构模型、切削力学模

型, 提前模拟不同加工参数下的切削过程, 预测加工应力分布与表面质量, 为优化陶瓷加工过程中的各种参数提供数据支撑^[2]。同时, 计算机仿真技术能够虚拟测试加工工艺的可行性, 缩短工艺研发周期, 降低生产损耗。

二、计算机仿真技术在工程陶瓷加工中的应用优势

(一) 大幅提升实验研究效率

计算机仿真技术通过计算机软件和模型来模拟实验过程, 不需要实际的实验设备和材料, 研究人员通过计算机便可以完成操

作。这样可以减少实验数量，缩短实验时间，提升实验效率^[3]。同时，计算机仿真技术还支持实现多元化的实验，模拟不同参数、不同条件下的实践，获得更多、更准确的实验结果和数据。

（二）显著降低加工成本

工程陶瓷加工材料成本较高，而传统工艺下实物实验会造成一定的材料浪费。虚拟仿真实验不需要真实的陶瓷原料，仅通过数据建模就可以验证工艺的可行性，降低实验投入成本。此外，传统加工中，如果刀具的参数设置错误，就有可能导致陶瓷崩坏并损伤机床部件，而仿真技术可以提前模拟刀具的切削，加工前提前调整好参数，延长设备的使用寿命，间接降低设备维护与更换成本^[4]。

（三）精准优化工艺参数

计算机仿真技术可以模拟实验过程，而技术人员可以根据仿真结果调整工艺参数，优化工艺条件。传统的加工需要依赖人工经验调整参数，参数的准确性会影响工程陶瓷的性能。计算机仿真技术的应用可以通过量化模拟，精准优化参数^[5]。以陶瓷炉烧制的虚拟仿真实验为例，可以利用仿真技术模拟陶瓷烧制时的温度梯度，提前发现坯体因内外温差过大导致的开裂风险，调整升温速度。

三、计算机仿真技术在工程陶瓷加工中的革新应用实践

（一）模拟工程陶瓷工艺流程全周期

工程陶瓷加工流程包括原料制备、成型、烧制和检测四大环节，每个环节的工艺出现问题都有可能造成成品报废。计算机仿真技术可以依托数字孪生、虚拟现实等方式进行系统衍生与过程优化^[6]。

1. 原材料分析与配方优化

计算机仿真技术可以模拟和分析长石、黏土等不同类型原材料的化学元素含量，并预测其性能和效果^[7]。依托该功能搭建原材料数据库，整合黏土、长石、石英等常用原料的核心参数，仿真系统能根据目标陶瓷的性能需求，自动完成配方筛选与优化，有效规避加工过程中可能出现的工艺问题，提升生产效率。

2. 陶瓷泥料可塑性与流动性测试

泥塑的可塑性指陶瓷泥料在外力作用下产生变形而不开裂，去除外力后仍能保持形变的性能，其决定陶瓷最终的成型效果。流动性指陶瓷泥料在外力作用下，能够流动并均匀填充空间的特性，是衡量泥料成型适配性的指标之一，对一些复杂结构、薄壁或异形陶瓷部件的成型质量起决定性作用。

计算机仿真技术可模拟陶瓷泥料的物理性质，评估其可塑性和流动性。例如，仿真技术可以模拟泥料在模具型腔中的填充路径，在此过程中可能会发现因流动性不足导致有些区域缺料，进而调整泥料的水分含量或添加增塑剂，帮助生产人员预测泥料的可塑性和流动性，选择更加合适的成型工艺和设备。

3. 原材料温度适应性模拟

陶瓷烧制对温度要求严苛，原料需具备1350℃以上的耐火性

能。仿真技术可模拟烧制过程中的传热规律与化学反应，预判不同温度条件下陶瓷的性能与外观状态^[8]。例如，针对石英在573℃的晶型转变现象，提前调整升温速度，规避坯体因体积突变产生的开裂问题。

这种基于仿真的温度适应性预测，可以使烧制工艺调控更具精准性，减少高温烧制阶段的试错损耗，保障成品合格率。

4. 烧制过程物理化学釉色窑变反应可视化

陶瓷烧制涉及复杂的物理和化学反应，且易受到多种因素的影响。仿真技术可对该过程进行模拟，以可视化的方式呈现窑变过程^[9]。例如，模拟釉料中金属离子在不同温度、气氛下的扩散反应、生成釉色分布热力图，直观呈现窑炉各区域的釉色差异，据此技术人员可以优化窑炉通风结构，提升同批次产品的釉色均匀度。

5. 烧制制度阶段数据分析

陶瓷烧制分为升温、保温、冷却三个阶段，每个阶段的参数相互影响，传统加工难以量化各阶段的关联作用。仿真技术通过大数据分析各阶段参数的耦合效应，优化烧制工艺。

基础仿真技术可分析不同阶段参数对陶瓷性能的影响权重，如通过回归分析发现，保温时间对致密度的影响权重达40%，冷却速度对断裂韧性的影响权重达35%；此外，还可以动态调整多阶段参数，如模拟发现升温过快导致坯体内部应力过大时，自动延长中温区的保温时间，释放应力。

（二）模拟陶瓷烧制过程显微组织

陶瓷的显微组织，如晶粒大小、气孔分布直接决定其力学性能，传统加工中需通过切片、电镜观察等方式检测显微组织，无法提前调整工艺。计算机仿真技术通过介观尺度建模，能够提前预测与调整显微组织。

依托元胞自动机（CA）与相场法（Phase Field），仿真技术可动态模拟陶瓷烧制过程中显微组织的演变。模拟晶粒生长过程、模拟气孔消除机制。通过显微组织仿真优化的烧制工艺，可提升陶瓷致密度和断裂韧性。

陶瓷烧制受温度、压力、气氛、保温时间等多因素影响，传统实验难以隔离单一因素的作用，而仿真技术可通过控制变量法，量化各因素的影响。如模拟温度、压力等单一因素变化的影响。或是模拟温度、压力等多因素的耦合效应，如同时调整温度（1600℃/1650℃）与压力（10MPa/20MPa），预测显微组织的综合变化。

（三）基于计算机仿真的工程陶瓷3D打印革新

传统3D打印存在层间结合差、易开裂等问题，计算机仿真技术可以对3D打印全流程的模拟，进而有效破解这些技术难题^[10]。

在模型设计阶段，基于三维图像重现技术构建的仿真模型，可提前锁定打印件烧制阶段的收缩变形规律，提前进行尺寸补偿，从源头规避成品尺寸超差问题；针对光固化3D打印工艺，借助蒙特卡洛方法的仿真能力，能还原激光在陶瓷浆料中的传播与散射轨迹，预判固化轮廓，为激光功率、扫描速度等参数的调试提供数据支撑。对于半导体封装用复杂陶瓷基板等高端场景，仿真技术的应用可以优化支撑结构设计与打印路径解决微小孔洞、

薄壁结构的成型难题，让高精度复杂构件的打印成为可能。

而打印与烧结一体化仿真的落地，更打破了两大核心环节的割裂壁垒，在设计打印参数时便同步考量烧结过程的变形影响，实现全流程工艺的协同优化。这种系统性的仿真解决方案，能够提升工程陶瓷3D打印的稳定性与成品合格率，同时也加速了其在高端制造领域的产业化渗透。

四、计算机仿真技术在工程陶瓷加工中的发展趋势展望

（一）人工智能深度融合，实现自主决策

人工智能的飞速发展，正在推动工程陶瓷加工仿真迈入自主决策的全新发展阶段。随着技术的发展与升级，未来的仿真系统不仅可以更加精准的优化工艺参数，还能够通过大量的加工数据自主学习材料性能与工艺参数之间的关联，系统可自动筛选原料配方、设计加工流程，生成智能化工艺方案。

（二）数字孪生技术普及，实现虚实闭环

在实体加工设备上部署传感器，收集温度、压力、转速等运行数据，并同步到虚拟仿真模型，技术人员可以在虚拟环境中预测调整参数后的加工效果。这样可以减少实体设备因参数试错产

生的损耗，提升工艺调整的效率。

（三）跨领域协同仿真，推动产业链整合

随着新技术的更新迭代，未来工程陶瓷加工仿真可以形成跨领域的协同仿真体系，打破工程陶瓷加工各环节的壁垒。例如，原材料供应商可将材料性能数据接入公共仿真平台，设备制造商可在平台上传设备的虚拟模型，加工企业依托这些共享资源开展工艺仿真。这种覆盖工程陶瓷加工全环节的信息的互通和资源的共享，能够缩短工程周期，使工程陶瓷产业链向一体化、高效化协同发展。

五、结语

工程陶瓷是高端制造业的核心材料，其加工技术的革新会影响我国高端装备产业的竞争力。计算机仿真技术能够突破传统加工模式，重构研发逻辑、降低资源消耗、精准控制质量，全方位革新工程陶瓷加工流程。随着人工智能、数字孪生技术的融合，该技术将进一步释放革新潜力，推动工程陶瓷产业向更高精度、更高效率、更低能耗的方向发展，为我国航空航天、生物医学、高端装备等领域的升级提供关键材料支撑。

参考文献

- [1] 何宇程. 虚拟现实技术在陶瓷艺术创作中的应用探索 [J]. 佛山陶瓷, 2024, 34(11): 73-75.
- [2] 程诗婧, 李伟. 基于虚拟现实技术的陶瓷雕塑交互性研究 [J]. 美与时代 (上), 2024, (05): 107-110.
- [3] 高扬, 陈鹏屹. 陶瓷艺术与数字技术: 探索工艺与现代创新的交叉点 [J]. 陶瓷, 2024, (03): 91-93.
- [4] 魏明君, 贾舒涵. 计算机仿真技术在工程陶瓷加工技术中的应用 [J]. 佛山陶瓷, 2024, 34(01): 69-71.
- [5] 王红娟. 计算机仿真技术在工程陶瓷加工技术中的应用 [J]. 佛山陶瓷, 2023, 33(05): 68-70.
- [6] 余会. 计算机仿真技术在陶瓷釉料工艺中的应用 [J]. 陶瓷科学与艺术, 2023, 57(02): 71.
- [7] 王崇. 工程陶瓷高速磨削温度的有限元仿真分析 [D]. 湖南大学, 2021.
- [8] 谢晋全. 氧化铝陶瓷材料电火花加工仿真与试验研究 [D]. 广西大学, 2020.
- [9] 冯运亨. 传统陶瓷激光加工工艺及优化 [D]. 景德镇陶瓷大学, 2020.
- [10] 修世宇. 基于面成型3D打印技术的陶瓷材料加工工艺研究 [D]. 中国石油大学 (华东), 2019.