

碳化硅陶瓷精密工件加工难点分析及复合工艺路径研究

周继光 肖双勇 高亚辉 刘杰 刘勋

国机金刚石(河南)有限公司

DOI:10.32629/jsse.v4i1.19084

[摘要] 碳化硅(SiC)陶瓷因其卓越的高温强度、高硬度、优异的耐磨耐腐蚀性及良好的热导率,在航空航天、半导体制造、新能源及高端装备制造等领域扮演着不可替代的角色。然而,其固有的高硬度、高脆性和低断裂韧性给精密加工带来了巨大挑战。本文系统剖析了碳化硅陶瓷在机械加工过程中面临的核心难点——材料去除困难与边缘崩裂风险。在此基础上,深入探讨了激光加工、喷砂(磨料水射流)加工及超精密CNC磨削三种主流技术的原理、适用场景及其局限性。重点提出并论证了“激光粗/精切割+CNC超精密磨削+喷砂去应力/光整”的复合加工工艺路径。研究表明,通过合理规划各工序的工艺参数与衔接逻辑,该复合模式能有效平衡加工效率、尺寸精度、表面完整性与成本控制,为复杂形状、高精度要求的碳化硅陶瓷工件提供了一套切实可行的制造解决方案。

[关键词] 碳化硅陶瓷; 激光加工; 喷砂加工; CNC磨削; 复合制造; 脆性材料

中图分类号: TB484.5 **文献标识码:** A

Research on Processing Difficulties and Composite Process Pathways for Precision Silicon Carbide Ceramic Components

Jiguang Zhou Shuangyong Xiao Yahui Gao Jie Liu Xun Liu

Sinomach Diamond (Henan) Co., Ltd.

[Abstract] Silicon Carbide (SiC) ceramics, owing to their exceptional high-temperature strength, extreme hardness, superior wear and corrosion resistance, and good thermal conductivity, play an irreplaceable role in aerospace, semiconductor manufacturing, new energy, and high-end equipment manufacturing. However, its inherent properties of high hardness, high brittleness, and low fracture toughness pose significant challenges to precision machining. This paper systematically analyzes the core difficulties in the mechanical processing of SiC ceramics—namely, the difficulty of material removal and the risk of edge chipping. Building upon this, it delves into the principles, applicable scenarios, and limitations of three mainstream technologies: laser processing, abrasive waterjet (sandblasting) processing, and ultra-precision CNC grinding. The paper focuses on proposing and validating a composite processing pathway: "Laser Rough/Precision Cutting + CNC Ultra-Precision Grinding + Abrasive Blasting for Stress Relief/Finishing." The research indicates that by rationally planning the process parameters and sequencing logic of each step, this composite approach effectively balances machining efficiency, dimensional accuracy, surface integrity, and cost control, providing a practical and feasible manufacturing solution for complex-shaped, high-precision SiC ceramic components.

[Key words] Silicon Carbide Ceramics; Laser Machining; Abrasive Blasting; CNC Grinding; Hybrid Manufacturing; Brittle Materials

引言

碳化硅(SiC)陶瓷凭借其卓越的综合性能——包括极高的硬度与高温强度、优异的耐磨耐腐蚀性以及出色的热导率,已成为航空航天、半导体制造、新能源等国家战略性新兴产业中不可或缺的关键结构材料。然而,其固有的高硬度、高脆性及低断裂韧性等物理特性,也使其在向精密化、复杂化方向发展的过程

中遭遇了严峻的加工瓶颈。传统的单一加工方法,如机械磨削、激光切割或磨料水射流,均难以在材料去除效率、几何精度、表面完整性及成本控制之间取得理想平衡,往往顾此失彼。因此,探索并构建一种能够有效整合多种工艺优势的复合制造路径,成为突破碳化硅陶瓷精密加工技术壁垒的核心课题。本文旨在系统剖析碳化硅陶瓷的加工难点,深入比较主流加工技术的机

理与局限,并在此基础上提出并论证一种“激光-CNC-喷砂”协同的复合工艺方案,以期为高精度、高可靠性碳化硅陶瓷构件的高效、稳定制造提供切实可行的技术支撑。

1 碳化硅陶瓷精密工件加工的核心难点分析

1.1 材料的极端物理特性

碳化硅是典型的共价键化合物,其莫氏硬度高达9.2-9.5,仅次于金刚石和立方氮化硼,弹性模量可达410-450 GPa,远高于普通金属和合金。这种极高的硬度和刚度使得常规刀具(如硬质合金、高速钢)在接触瞬间即发生严重磨损甚至崩刃,几乎无法进行有效切削。同时,碳化硅属于典型的脆性材料。在外部载荷作用下,材料内部或表面的微小缺陷极易成为裂纹源,在应力集中处迅速扩展,导致灾难性的脆性断裂而非塑性变形。

1.2 加工过程中的崩边与微裂纹

在任何涉及机械力的加工过程中,碳化硅工件都面临着严峻的崩边(Chipping)和微裂纹(Micro-cracking)问题。无论是磨削、铣削还是钻孔,刀具或磨粒对工件的作用本质上是通过产生局部压应力和拉应力来实现材料去除。当局部拉应力超过材料的抗拉强度时,便会引发微裂纹。这些微裂纹不仅会沿晶界扩展,还会向材料内部延伸,形成亚表面损伤层(Subsurface Damage Layer)。该损伤层会显著降低工件的疲劳强度、抗热震性和长期服役可靠性。对于薄壁、窄槽或带有尖锐内角的精密结构件,崩边现象尤为突出,常常导致整个工件报废。

1.3 尺寸精度与表面质量的矛盾

高端应用领域(如半导体光刻机的镜座、卫星反射镜基板)对碳化硅工件的面形精度(PV值)、表面粗糙度(Ra值)和亚表面完整性提出了纳米级的要求。传统的磨削工艺虽然可以达到较高的尺寸精度,但难以避免引入微裂纹;而一些非接触式加工方法(如早期的激光烧蚀)虽能减少机械应力,却往往伴随着较大的热影响区(HAZ)和较差的表面粗糙度。如何在保证高材料去除率的同时,获得无损伤、高光洁度的表面,是碳化硅精密加工领域长期存在的核心矛盾。

2 碳化硅陶瓷精密工件主流加工技术的原理与极限

针对上述难点,行业已发展出多种加工技术,各有其适用边界。

2.1 激光加工技术

激光加工是一种非接触式的热能束加工方法,利用高密度激光束照射工件表面,使材料瞬间熔化、汽化或发生化学分解,从而实现切割、打孔或表面改性。

2.1.1 优势

(1) 无机械力作用,理论上可完全避免崩边;(2) 加工柔性高,可轻松处理任意二维或三维轮廓;(3) 加工速度快,尤其适合大批量、简单轮廓的粗加工。

2.1.2 局限与挑战

(1) 热影响区(HAZ):激光作用区域会产生高温,导致材料局部重结晶、相变或产生残余热应力,形成一个性能劣化的HAZ。对于要求高可靠性的结构件,HAZ的存在是致命的。(2) 重铸层与微

裂纹:熔融的SiC在快速冷却过程中会形成一层非晶态或微晶态的重铸层,其力学性能远低于基体,且常伴有贯穿性微裂纹。(3) 精度限制:受衍射极限和等离子体屏蔽效应影响,激光焦点尺寸有限,难以实现亚微米级的超高精度加工。此外,切割缝宽(Kerf Width)通常在几十到上百微米,材料浪费较大。

2.1.3 技术演进

为克服上述问题,超短脉冲激光(皮秒、飞秒激光)技术被引入。其作用时间极短,热量来不及向周围传导便已完成材料去除,从而将HAZ和重铸层降至最低,甚至实现“冷加工”效果。然而,其设备成本高昂,加工效率相对较低,目前多用于高附加值产品的精修或微细加工。

2.2 喷砂(磨料水射流)加工技术

喷砂加工,特别是高压磨料水射流(Abrasive Waterjet Machining, AWJM),利用高速水流携带硬质磨料(如石榴石、碳化硅颗粒)冲击工件表面,通过磨粒的微切削、冲击破碎和水楔作用共同去除材料。

2.2.1 优势

(1) 同样为非接触式加工,无热影响区,能有效避免因热应力导致的开裂;(2) 可加工任何硬度的材料;(3) 切缝窄,锥度小;(4) 环保,无化学污染。

2.2.2 局限与挑战

(1) 表面粗糙度:加工后的表面呈典型的“喷砂”状,粗糙度较高(Ra通常在几微米以上),无法满足光学或高密封性表面的要求。(2) 加工精度:受限于射流的发散性和滞后效应,其尺寸精度和重复定位精度不如CNC磨削,尤其在加工深槽或复杂内腔时,精度控制难度大。(3) 边缘效应:在工件入口和出口处,由于射流动能的变化,容易产生喇叭口或倒锥现象。

2.2.3 应用场景

AWJM在碳化硅加工中,更适合作为粗加工或半精加工手段,用于快速去除大量余量,或用于切割厚板、异形件。此外,低压喷砂也常被用作一种表面处理工艺,以消除工件表面的微裂纹或残余应力。

2.3 超精密CNC磨削技术

CNC磨削是目前实现碳化硅陶瓷高精度、高质量表面最成熟、最可靠的加工方法。它采用金刚石或立方氮化硼(CBN)作为磨料,将其固结在砂轮上,在高刚性、高稳定性的CNC机床上,通过精确控制砂轮与工件的相对运动来实现微量、可控的材料去除。

2.3.1 优势

(1) 可获得极高的尺寸精度(可达微米甚至亚微米级)和优异的表面质量(Ra可优于 $0.1\mu\text{m}$);(2) 工艺成熟,自动化程度高,一致性好。

2.3.2 局限与挑战

(1) 加工效率低:为避免脆性断裂,必须采用极小的磨削深度(通常在微米量级)和较低的进给速度,导致加工周期长。(2) 砂轮磨损:尽管使用了超硬磨料,但在加工SiC这种高硬度材料

时, 砂轮仍会发生磨损, 需要定期修整, 增加了成本和工序复杂性。(3)冷却与排屑: 高效的冷却液系统对于带走磨削热、防止工件热损伤和及时排出磨屑至关重要, 但同时也增加了系统的复杂性。

2.3.3 关键技术

为提升效率和质量, 行业内广泛采用ELID(在线电解修整)磨削、超声辅助磨削等先进技术。ELID能实时保持砂轮的锋利度, 而超声振动则有助于减小磨削力, 促进脆-塑性转变, 从而抑制微裂纹的产生。

3 复合加工工艺路径的构建与优化

单一加工技术难以兼顾效率、精度、质量和成本。因此, 构建一条优势互补的复合加工工艺路径是解决碳化硅精密加工难题的关键。

3.1 “激光-CNC-喷砂”复合路径的提出

基于对各工艺优缺点的深刻理解, 我们提出以下三阶段复合加工路径:

(1)第一阶段: 激光粗/精切割。利用纳秒或皮秒激光, 根据最终轮廓预留0.3-0.5mm的均匀余量进行切割。此阶段的目标是快速成形, 将大部分余量去除, 同时将热影响区控制在后续可被完全磨除的范围内。(2)第二阶段: CNC超精密磨削。将激光切割后的工件装夹在高精度CNC磨床上, 利用金刚石砂轮对所有关键功能面进行精密磨削。此阶段的核心任务是精确保证最终的尺寸公差、形位公差和表面粗糙度, 并彻底去除激光加工产生的HAZ和重铸层。(3)第三阶段: 低压喷砂光整。在CNC磨削完成后, 对工件进行低压、细粒度磨料的喷砂处理。此步骤的目的并非进一步改变尺寸, 而是通过可控的微冲击, 钝化表面可能存在的微小毛刺和潜在裂纹尖端, 释放表层残余应力, 从而提高工件的整体可靠性和服役寿命。

3.2 工艺参数协同优化

该复合路径的成功实施, 依赖于各工序间工艺参数的精细匹配。

表1 碳化硅陶瓷主要加工方法对比

项目	传统金刚石磨削	激光加工	磨料水射流(AWJM)	复合加工路径
材料去除率	低	中-高	高	高(整体)
尺寸精度	优($\pm 1-5 \mu\text{m}$)	中($\pm 20-50 \mu\text{m}$)	中($\pm 10-30 \mu\text{m}$)	优($\pm 1-5 \mu\text{m}$)
表面粗糙度(Ra)	优($< 0.1 \mu\text{m}$)	差($> 5 \mu\text{m}$)	差($> 2 \mu\text{m}$)	优($< 0.1 \mu\text{m}$)
热影响区(HAZ)	无	有(严重)	无	无(最终)
边缘崩裂风险	中	低	低	极低
适用场景	精密平面、外圆	粗加工、异形切割	厚板切割、去余量	高精度、复杂件全流程

(1)激光工序: 需严格控制激光功率、扫描速度和脉冲频率, 以最小化HAZ深度。通常, HAZ深度应小于CNC磨削总余量的1/2。(2)CNC磨削工序: 砂轮的选择(粒度、结合剂、浓度)、线速度、

进给速度、磨削深度等参数需根据SiC的具体牌号(如反应烧结SiC、无压烧结SiC)进行优化。对于无压烧结SiC, 因其致密度更高、硬度更大, 需采用更细粒度的砂轮和更低的磨削参数。(3)喷砂工序: 磨料类型(常用白刚玉或玻璃珠)、粒径(通常在80-220目)、喷射压力(0.2-0.4 MPa)和角度($45^\circ-60^\circ$)是关键。过高的压力或过粗的磨料会重新引入损伤, 而过低的压力则达不到去应力的效果。

4 结语

碳化硅陶瓷的精密加工是一项系统工程, 单纯依赖某一种“万能”技术是不现实的。激光加工、喷砂加工与CNC磨削各有其独特的物理机制和能力边界。通过科学地构建“激光-CNC-喷砂”复合加工路径, 并对各环节的工艺参数进行协同优化, 能够扬长避短, 有效化解高硬度、高脆性材料带来的加工困境。未来, 随着智能传感、在线监测和自适应控制技术的融入, 复合加工路径将变得更加智能化和自主化, 为我国高端装备制造业所需的核心陶瓷部件提供更强大的制造保障。

[参考文献]

- [1]张联盟, 黄新友, 曾令可. 先进陶瓷工艺学[M]. 武汉理工大学出版社, 2018.
- [2]李志强, 陈日耀. 超短脉冲激光加工碳化硅陶瓷的热影响区研究[J]. 光学精密工程, 2022, 30(4): 891-899.
- [3]刘志峰, 赵剑峰. 碳化硅陶瓷超声振动辅助磨削表面完整性研究[J]. 机械工程学报, 2020, 56(17): 210-217.
- [4]Hashish, M. A model for abrasive waterjet machining of brittle materials[J]. Journal of Engineering Materials and Technology, 1991, 113(1): 24-30.
- [5]Bhandarkar, U.P., Nagalingam, A., & Sundaram, M.M. State-of-the-art review of design of experiments for powder bed fusion additive manufacturing[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 107: 1799-1820.

作者简介:

周继光(1989-), 男, 汉族, 河南省新密市人, 本科, 国机金刚石(河南)有限公司中级工程师, 研究方向: 机械设计制造及自动化。

肖双勇(1977-), 男, 汉族, 广东省韶关市人, 本科, 国机金刚石(河南)有限公司中级工程师, 研究方向: 机械制造。

高亚辉(1987-), 男, 汉族, 河南通许人, 本科, 郑州新亚复合超硬材料有限公司助理工程师、政工师, 研究方向: 复合超硬磨具制造。

刘杰(1984-), 男, 汉族, 河南原阳人, 本科, 国机金刚石(河南)有限公司中级工程师, 研究方向: 结构陶瓷与高温材料的性能测试、标准制定与质量控制。

刘勳(1992-), 男, 汉族, 河南滑县人, 硕士研究生, 国机金刚石(河南)有限公司中级工程师, 研究方向: 金属类材料精密加工。