

碳化硅基复合陶瓷喷砂嘴的性能优化与工业应用分析

孟文字

上海效宇机电设备研究院, 上海

收稿日期: 2026年8月17日; 录用日期: 2026年9月19日; 发布日期: 2026年9月28日

摘要

针对传统陶瓷喷砂嘴在极端工况下易脆断与制造成本高的问题, 本文系统剖析了碳化硅与碳化硼复合体系的材料设计与性能优化路径。通过构建微观多相协同增韧机制, 该复合陶瓷在保持高硬度的同时改善了断裂韧性, 并实现了复杂流道结构的近净成型。工程应用跟踪表明, 其在降低综合制造成本的同时可适配多种高强度冲击磨料, 可为表面处理行业的降本增效提供参考, 并为高附加值领域耐磨构件的开发提供潜在的材料选择。

关键词

碳化硅复合陶瓷, 喷砂嘴, 协同增韧

Performance Optimization and Industrial Application Analysis of Silicon Carbide-Based Composite Ceramic Sandblasting Nozzle

Wenyu Meng

Shanghai Xiaoyu Mechanical and Electrical Equipment Research Institute, Shanghai

Received: August 17, 2026; accepted: September 19, 2026; published: September 28, 2026

Abstract

Aiming at the problems of brittle fracture and high manufacturing cost of traditional ceramic

sandblasting nozzle under extreme working conditions, this paper systematically analyzes the material design and performance optimization path of silicon carbide and boron carbide composite system. By constructing a microscopic multiphase synergistic toughening mechanism, the composite ceramics improved fracture toughness while maintaining high hardness, and realized near-net molding of complex flow channel structure. Engineering application tracking shows that it can adapt to a variety of high-strength impact abrasives while reducing the comprehensive manufacturing cost, which can provide reference for reducing costs and increasing efficiency in the surface treatment industry and provide potential material selection for the development of wear-resistant components in high value-added fields.

Keywords

Silicon Carbide Composite Ceramics, Sandblasting Nozzle, Synergistic Toughening

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

表面处理技术在现代工业制造中不可或缺,其中喷砂工艺利用压缩空气将磨料颗粒(如石英砂、刚玉、钢砂等)高速喷射至基材表面,从而实现表面清洁、粗糙化或塑形等物理改性。在此气固两相流冲刷系统中,喷砂嘴作为加速与导向磨料的核心执行元件,其内衬材料的耐磨极限与稳定状态直接决定了整体生产工艺的连续性与经济效益[1]。

在极端工况下,传统单一材质喷嘴暴露出显著的物理本征局限。高纯氧化铝硬度相对较低且脆性较大,难以抵御高强度磨料的持续冲击;碳化硼耐磨性优异,但断裂韧性较低,在强冲击介质下易发生脆性断裂;碳化钨断裂韧性较高,但长周期耐磨性相对不足。此外,热压碳化硼等组件的制备工艺复杂且成本高昂。这些材料学局限迫使终端用户必须针对不同工况采购各类材质耗材,不仅增加了供应链管理难度,也推高了工业运营成本[2]。

为缓解单一材料性能相互制约的瓶颈,研发兼顾高硬度与高韧性的新型复合体系成为重要的研究方向。通过引入碳化硅与碳化硼的复合相结构设计,新型陶瓷材料能够协同发挥碳化硼的高耐磨性与接近碳化钨的断裂韧性。该复合体系不仅能有效抵御复杂强冲击磨料的侵蚀,还突破了传统热压工艺对复杂几何工件的成型限制,其制造成本不足传统热压碳化硼的一半。系统性探究该复合陶瓷的微观机制与应用表现,可为表面处理行业的降本增效提供理论参考与工程借鉴,并为航空航天等领域耐磨构件的潜在应用开发提供材料基础。

2. 碳化硅基复合陶瓷的体系设计与制备工艺优化

2.1. 极端工况驱动的组分改良策略

面向高强度气固两相流冲刷环境,单一陶瓷相的脆性断裂是导致喷嘴失效的核心机制。为克服这一缺陷,开展了以碳化硼与碳化硅为核心基元的材料体系定制化设计。该改良策略的底层逻辑在于构建多相协同增强机制,使得最终合成的复合陶瓷材料兼具碳化硼的高硬度特征与碳化钨的较高断裂韧性。这种基于终端严苛工况需求的组分复合设计,为缓解传统高硬度陶瓷材料难以适配高强度磨粒冲击的问题提供了材料基础。

2.2. 复合相引入与微观结构演化

复合陶瓷宏观力学性能的提升,本质上源于微观组织结构的演化与相界调控。在高温烧结反应中,碳化硅与碳化硼复合相的均匀分散有效抑制了单相晶粒的异常长大。基体内部形成的交错多相网络,能够在受到外部高动能冲击时,诱发裂纹偏转与晶粒桥联等能量耗散效应。这种微观尺度的应力缓冲与分散机制,显著增强了材料抵抗裂纹扩展的能力,改善了该体系的综合力学性能。合理控制相界面处的化学热力学反应,是确保材料兼顾硬度与韧性的核心微观基础[3]。

2.3. 制备成型与烧结工艺参数优化

传统碳化硼喷嘴的制造高度依赖热压成型工艺,该工艺不仅设备与运行成本较高,且无法满足各种复杂形状工件的生产需求。为突破这一制造限制,对碳化硅基复合陶瓷的成型与烧结路径进行了系统性工艺重构。通过优化粉体级配与烧结助剂体系,提升了复合材料的烧结活性,实现了无压或低压条件下的高致密化。优化后的成型工艺突破了传统热压碳化硼的几何形状限制,能够实现各种复杂异形结构喷嘴的规模化生产。这一工艺改进拓宽了材料的成形能力,为其在石化等行业耐磨复杂构件中的应用提供了制造基础;在航空航天等高温、强磨损场景中的应用则可作为潜在方向进一步探索。

在原料与组分设计方面,B4C-SiC复合陶瓷通常以商用B4C粉(中位粒径 d_{50} 约 $2\sim 3\text{ }\mu\text{m}$)与亚微米级SiC粉(d_{50} 可低至 $0.1\text{ }\mu\text{m}$)为原料,SiC质量分数一般在 $1\%\sim 50\%$ 范围内调控:少量SiC($\leq 10\text{ wt}\%$)即可在保持碳化硼硬度的同时改善断裂韧性,SiC含量增至 $50\text{ wt}\%$ 时复合材料仍可获得 30 GPa 以上的维氏硬度。反应烧结路线则采用B4C粉(d_{50} 约 $1.9\text{ }\mu\text{m}$)与纳米炭黑(d_{50} 约 22 nm)按质量比约 $9:1$ 混合成型,通过熔融硅在约 1600°C 保温 30 min 的条件下原位生成SiC粘结相,实现近净尺寸致密化。

在烧结助剂与烧结程序方面,碳质助剂(炭黑或有机碳前驱体,添加量约 $1.5\sim 2.5\text{ wt}\%$)可与B4C、SiC粉体表面的 B_2O_3 、 SiO_2 氧化层反应,促进固相致密化; Al_2O_3 - Y_2O_3 等氧化物助剂(约 $10\text{ vol}\%$)则通过液相烧结降低致密化温度。典型烧结工艺窗口为:热压烧结温度 $2000^\circ\text{C}\sim 2200^\circ\text{C}$ 、压力 $20\sim 40\text{ MPa}$ 、保温 $15\sim 60\text{ min}$ 、真空或惰性气氛;无压烧结通常在氩气氛中于 $2050^\circ\text{C}\sim 2250^\circ\text{C}$ 保温 $30\sim 60\text{ min}$;放电等离子烧结可在 1950°C 、 50 MPa 下保温约 5 min 实现全致密;反应熔渗烧结温度最低(约 $1450^\circ\text{C}\sim 1600^\circ\text{C}$),且尺寸变化小,适合复杂形状构件的近净成型。上述参数为公开文献报道的典型范围,可为该复合体系喷嘴的制备工艺优化提供参照。

3. 复合陶瓷喷砂嘴的性能验证与磨损机制

3.1. 气固两相流工况下的冲蚀特征

喷砂表面处理技术在运行阶段,磨料介质在极高压力的压缩空气驱动下,于喷砂嘴内腔形成高度湍流化的气固两相流。在这一复杂流体力学过程中,不同种类与物理属性的磨料介质,涵盖石英砂、刚玉、石榴石、玻璃珠、钢砂以及核桃壳等,以较高的初始动能穿透喷嘴流道。这些颗粒在加速过程中,不仅沿流体轴向产生剧烈的滑动摩擦,还会因流场扰动对陶瓷内壁造成高频次、多角度的微观法向冲击。不同材料材质的喷嘴在与上述介质发生高频摩擦与碰撞后,其表面材料剥离速率与宏观使用寿命表现出极大的差异性。在气动冲蚀动力学框架下,内衬陶瓷不仅需要抵抗磨粒微切削引发的体积流失,还需承受由高速颗粒反复撞击带来的交变接触应力。这种复合侵蚀工况要求材料表层具备较高的能量耗散能力,单一的硬度指标或韧性指标已无法全面刻画材料在此类苛刻流场中的抗冲蚀能力。

3.2. 抗冲击与耐磨性能的协同增强机理

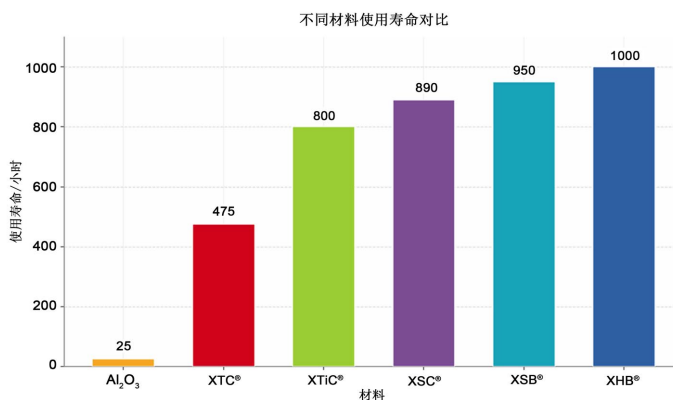
为解析新型复合材料体系在此类苛刻工况下的优越性,必须从多相晶体学的本征力学属性切入。传

统氧化铝陶瓷因本征硬度相对受限且表现出显著脆性，在应对刚玉或石榴石等高强度、高磨损介质时，极易发生表层晶粒的解理断裂与大面积剥落。碳化硼虽具备最高等级的耐磨特性，其次为碳化硅，但二者的极度脆性阻碍了其在高强度介质(如钢砂)冲击下的应用，易诱发贯穿性宏观裂纹。相对而言，碳化钨材料展现出极高的断裂韧性，能够适配钢砂等高冲击磨料，然而其基础耐磨性却不及碳化硼与碳化硅。

几类典型喷嘴内衬材料的室温性能差异显著：99%氧化铝陶瓷的密度约 $3.85\sim 3.92\text{ g/cm}^3$ 、维氏硬度约 $15\sim 18\text{ GPa}$ 、断裂韧性约 $3.5\sim 4.5\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ；热压碳化硼的密度约 $2.51\sim 2.52\text{ g/cm}^3$ 、维氏硬度可达 $30\sim 35\text{ GPa}$ ，但断裂韧性仅约 $2.2\sim 3.2\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ；碳化硅的密度约 3.21 g/cm^3 、维氏硬度约 $25\sim 30\text{ GPa}$ 、断裂韧性约 $3\sim 4\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ；WC-Co 硬质合金(以 WC-10Co 为例)的密度约 $14.5\sim 15.0\text{ g/cm}^3$ 、维氏硬度约 $13.8\sim 14.5\text{ GPa}$ ($1376\sim 1454\text{ HV}_{30}$)、断裂韧性可达 $8.7\sim 9.8\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 。B4C-SiC 复合陶瓷的典型性能介于碳化硼与碳化硅之间并有所改善：热压 B4C-10wt%SiC 复合陶瓷的密度约 2.58 g/cm^3 、维氏硬度约 29.9 GPa 、断裂韧性约 $3.1\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 、抗弯强度约 605 MPa ；反应烧结 B4C-SiC 复合材料的密度约 2.6 g/cm^3 、维氏硬度约 22 GPa 、断裂韧性可达 $4.6\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 、抗弯强度约 470 MPa ；商用 B4C + SiC 复合喷嘴材料的典型值为密度 $2.6\sim 2.8\text{ g/cm}^3$ 、硬度 $28\sim 31\text{ GPa}$ 、断裂韧性 $3.4\sim 4.0\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 。总体来看，复合体系在密度接近碳化硼的同时，断裂韧性较单相碳化硼提高约 $25\%\sim 80\%$ ，与碳化硅相当或略优，但仍低于 WC-Co 硬质合金。

在冲蚀磨损的定量表征方面，ASTM G76 标准规定了以气体射流携带固体颗粒冲蚀试样的试验方法，通过控制磨料种类、粒径、粒子速度、流量与冲击角度，测定单位质量磨料所造成的体积损失(体积冲蚀率)。脆性陶瓷的冲蚀率通常随冲击角度增大而升高，并在 90° 法向冲击时达到最大；高纯氧化铝陶瓷在固粒冲蚀下的稳态体积冲蚀率约为 $1.4\times 10^{-5}\sim 2.8\times 10^{-5}\text{ cm}^3/\text{g}$ (90° 冲击角)。材料的冲蚀抗力与硬度、断裂韧性及显微组织均相关，单一指标无法完整预测其冲蚀行为。

面对这一材料学界经典的力学倒置难题，碳化硼与碳化硅相复合的新型耐磨材料实现了综合性能的改进。该复合体系在微观尺度上构建了强韧并济的交错晶界网络，使得宏观材料在保持接近碳化硼的高硬度的同时，获得了优于单相碳化硼与碳化硅的断裂韧性。通过对不同材料喷砂嘴最长使用寿命的对比分析，如图 1 所示，在相同测试条件下，氧化铝喷嘴的最长使用寿命约 30 h ，而新型碳化硅基复合陶瓷喷嘴可达约 $800\sim 1000\text{ h}$ ，展现出较好的综合寿命表现。尽管其理论极限寿命较传统热压碳化硼喷嘴下降了至多 20% ，但其凭借不到后者一半的制造成本，以及可适配多种高强度研磨介质的韧性表现，在工程经济性与材料适用性方面具有综合优势。



注： Al_2O_3 为氧化铝；XTC®为碳化钨(WC-Co 硬质合金)；XTIC®为含碳化钛的碳化钨；XSC®为碳化硅；XSB®为常压烧结碳化硼；XHB®为热压碳化硼；其中 XTC®、XTIC®、XSC®、XSB®、XHB®均为商用喷嘴材料牌号。

Figure 1. Life comparison of sandblasting nozzle

图 1. 喷砂嘴寿命对比

3.3. 长期运行过程中的失效模式演变

在长达数千小时的工业运行周期内，复合陶瓷喷砂嘴的宏观失效模式呈现出与单相脆性陶瓷不同的特征。依托于复合相界面的强耦合效应，材料在承受初始气固两相流轰击时，表层微观应力能够沿着碳化硅与碳化硼的相界进行有效分散。当高动能钢砂或刚玉颗粒撞击管壁产生初始微裂纹时，复合晶界网络能够激发裂纹偏转、晶粒桥联以及微裂纹分叉等多重增韧机制，强制消耗裂纹尖端的扩展驱动力。

随着运行时间向生命周期中后期推进，磨损行为由初始的疲劳微裂纹萌生，逐渐过渡为稳态的表层微切削与纳米级晶粒的逐层消耗。这种微观结构层面的协同增韧，抑制了传统高脆性陶瓷在受强冲击时发生整体爆裂失效的风险。渐进且高度可控的内径磨损演变路径，不仅延长了喷嘴的运行时长，更确保了喷砂流场在整个作业周期内的几何对称性与喷射动能的稳定性，为最终表面处理工艺的均一性提供了基础保障[4]。

4. 复合陶瓷喷砂嘴的工业应用与综合效益评估

4.1. 特殊流体通道的定制化设计与工程实践

新型复合陶瓷在成型工艺上的改进，为其在复杂流体力学工况下的定制化通道设计奠定了制造基础。相较于传统热压成型技术在制造复杂异形结构时面临的严苛限制，碳化硼与碳化硅相复合的新型工艺能够高效生产各类复杂形状的工业构件。在实际的表面处理工程实践中，为满足特定基材的特殊喷涂或清洁角度需求，流体通道的几何形貌设计至关重要。以一项典型的海外工程实践为例，利用该复合材料工艺专门定制的扁口喷砂嘴，在美国阿肯色州的工业终端实现了长达三年的连续稳定运行。长周期的工程追踪数据表明，该定制化喷嘴在严酷的冲蚀环境中展现出良好的可靠性与流场稳定性，终端用户对其长效运行性能反馈良好。这表明该材料体系在突破标准件限制、实现非标定制化工业应用方面具有工程潜力[5]。

4.2. 外围结构件的高分子材料替代与降本优化

复合陶瓷喷砂嘴作为整体防护与喷射装备的核心耗件，其工程总成本不仅取决于内部陶瓷耐磨层，更与外部支撑与防护结构的选材密切相关。面对全球范围内金属原材料成本的持续上升周期，对喷嘴外围结构进行材料学重构成为提升工业竞争力的关键路径。在最新的系统性优化方案中，已成功引入高性能高分子材料来替代原本依赖传统金属加工的喷嘴外套及其相关附件。结合具体的产品结构演进，采用高分子复合套取代纯金属外套的创新结构，在维持装备整体机械强度与外围抗冲击性能的前提下，降低了装备自重与产品的综合制造成本。这种核心陶瓷耐磨层与外围轻量化高分子材料的协同工程设计，为极端工况防护装备的轻量化与低成本化提供了新的解决思路。

4.3. 整体防护装备全生命周期技术经济学分析

从系统工程与全生命周期管理的宏观视角审视，碳化硅基复合陶瓷喷嘴展现出较好的技术经济学价值。传统表面处理行业受限于材料的物理倒置，被迫根据不同硬度的磨料介质采购不同材质的耗件，这无形中导致供应链管理极其冗杂，大幅拖累了用户的成本效率。新型复合陶瓷体系凭借同时兼容强韧磨料的全工况适应能力，简化了耗材管理，实现了单品类替代。

在核心的经济学量化评估中，尽管新型复合材料的最长运行寿命较热压碳化硼产品有最大约 20% 的缩减，但前者的生产制造成本却不到后者的一半。这种非对称的性价比优势，叠加外围高分子材料替代带来的二次降本效应，使得整体防护装备的单次作业成本显著下降。综合来看，该材料体系与相关工程装备的结合，不仅为欧洲乃至全球的表面处理制造基地提供了切实可行的降本增效方案，也为石化及航

空航天等领域耐磨构件的低成本化提供了潜在的技术与工程路径。

5. 结论

5.1. 碳化硅基复合体系的性能优化理论总结

针对极端冲蚀工况下的表面处理需求,本文系统论述了碳化硅与碳化硼复合相陶瓷的材料组分设计与制备工艺演变。研究与工程验证表明,该复合体系缓解了传统单一陶瓷材料硬度与韧性相互制约的力学瓶颈。通过微观尺度的相界调控与多相协同增韧机制,新型复合材料在保留较高耐磨性的基础上,获得了能够适配高冲击磨料介质的断裂韧性。在制造加工层面,该体系突破了传统热压成型对复杂几何形状的限制,实现了异形流体通道构件的近净成型与定制化生产。核心评估指标证实,即便复合陶瓷喷嘴的理论极限寿命较热压碳化硼材料有至多约 20% 的折损,但其凭借不到后者二分之一的制造成本,改善了耐磨耗材领域的技术经济性。

5.2. 先进陶瓷在极端工况领域的规模应用展望

新型复合陶瓷在表面处理核心耗材中的成功应用,为严苛运行环境下的装备防护技术提供了具有参考价值的工程案例。在系统级装备优化方向上,以外围高性能高分子材料系统性替代传统金属承力结构,进一步体现了防护装备轻量化与低成本化的发展趋势。展望材料科学的未来宏观布局,这种兼具多项力学优势与良好成型加工潜力的复合陶瓷体系,其应用范围有望拓展至其他冲刷与磨损场景。该材料体系及配套工艺与航空航天及石化行业对耐高温、抗磨损复杂构件的需求具有潜在匹配性,未来有望在上述领域开展应用验证与推广。

参考文献

- [1] 张绍千, 安立周, 谭业发, 等. 碳化硅陶瓷冲蚀磨损行为与机理[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2005, 6(2): 176-180.
- [2] 刘冠杞. 过渡金属化合物对碳化硼复相陶瓷烧结行为及其组织性能影响[D]: [博士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2023.
- [3] 杨涵. 碳化硅陶瓷高温力学性能的晶界工程调控[J]. 冶金与材料, 2025, 45(5): 183-185.
- [4] 冯岩. 碳化硅复合陶瓷耐磨性能研究[J]. 材料开发与应用, 2017, 32(3): 22-26.
- [5] 谢志鹏, 苗赫濯. 精密陶瓷部件近净成型技术的发展[J]. 真空电子技术, 2002(3): 10-14.