

陶瓷碳化物：材料界的“硬汉”

作者：Paul Everitt 和 Ian Doggett，
顾特服（宾州科拉波利斯市）公司顾特服陶瓷与玻璃事业部技术专家

碳化硅(SiC) 和碳化硼 (B₄C) 是世界上已知的最硬材料，用于从喷砂设备喷嘴到太空镜的一系列苛刻的工业应用中。但是，对于这些材料界的“硬汉”，它们拥有的不只是坚硬而已——这两种陶瓷碳化物的诸多特性在一系列广泛应用中非常重要，值得为其打造新的研究与产品设计项目。

碳化硅

这种高密度、高强度材料的用途已从高温应用为主演变为一系列工程学应用。碳化硅的特性包括：

- 高导热性
- 低热膨胀系数
- 出色的抗热冲击性
- 极其坚硬
- 半导体特性
- 折射率大于金刚石

尽管许多人都熟悉这种高级陶瓷的一般属性（见表1），但一个重要却常被忽视的因素是：可以通过更改最终压实方法来改变碳化硅的特性。此类更改有助于经验丰富的工程师在性能方面进行微调，从而有可能对组件成品的功能产生重大影响。

例如：在两个类型的碳化硅制造工艺（烧结和反应键合）中，不同的压实方法导致材料成品具备各种优缺点。其中一个例子是：通过用熔融硅浸渍碳化硅和游离碳的多孔骨架，可以生成一种反应键合型硅渗透碳化硅（SiSiC）。这将创建一个碳化硅键合矩阵，并留下某些非键合形式的硅。该材料在致密化过程中不会收缩，所导致的尺寸稳定性有助于制造大型部件和复杂形状。而它的缺点在于：游离硅会将操作温度限制在大约1380℃。

表1：
碳化硅（热压片）的典型性能

耐化学腐蚀性

酸，浓缩	良好
酸，稀释	良好
碱	良好-差
卤素	良好-差
金属	一般

电学性能

介电常数	40
25°C体积电阻率 (Ohm-cm)	10 ³ -10 ⁵

力学性能

抗压强度 (MPa)	1000-1700
硬度-维氏(kgf mm ⁻²)	2400-2800
剪切强度(MPa)	210-380
拉伸模量(GPa)	200-500

物理性能

表观孔隙率 (%)	0
密度(g cm ⁻³)	3.15

热学性能

20-1000°C热膨胀系数 (x10 ⁻⁶ K ⁻¹)	4.5
熔点(°C)	2650-2950
25°C比热 (J K ⁻¹ kg ⁻¹)	670-710
20°C导热系数 (W m ⁻¹ K ⁻¹)	90-160
最高连续使用温度(°C)	1500-1650

其他压实方法可以制造出无压烧结碳化硅 (SSiC)、热压或热等静压碳化硅 (HPSiC/HIPSiC)、重结晶碳化硅(RSiC)和液相烧结碳化硅 (LPSiC)。这些方法会以不同方式改变孔隙率、强度、耐久性、耐腐蚀性、抗热剥落性或断裂韧性。

碳化硅的应用

碳化硅的应用范围很广，但都是基于这种材料的异常韧性。一些最常见的应用包括：

- 汽车零部件和密封端面，要求具有出色的耐磨性和抗热冲击性，并能延长车辆的使用寿命
- 机械密封，要求具有出色的耐腐蚀、抗磨损和减震性能
- 喷砂和喷雾设备的喷嘴，要求具有出色的耐磨性，重量轻且使用寿命长（碳化硅的使用寿命比碳化钨的使用寿命长50%）
- 加工业阀门应用，要求具有出色的耐腐蚀性（尤其是在酸中）
- 半导体制造，要求具有极高的耐磨性和耐腐蚀性，从而减少维护量和部件回收率

美国国家航空航天局的格伦研究中心一直致力于开发碳化硅，将其用作先进半导体电子设备的材料。在太空计划中，碳化硅材料的使用具有极高的性价比。与传统硅基电子产品的350℃上限相比，基于碳化硅的电子产品和传感器可以在高达600℃的温度下运行。对于在极高温度下操作的运载火箭和飞机引擎而言，这可能是一个显著的优势。

在与航天器有关的较低工作温度下，基于碳化硅的电子设备将能适应一个较为紧凑的航天器电力系统，并且不需要像传统的硅基电子设备那样，通过航天器的散热器进行过度冷却。因此此类散热器的外形可以更轻巧，从而减轻整体重量并降低成本。此外，在核动力航天器上使用耐高温、抗辐射的碳化硅基电路不需要太多防护，从而达到进一步减重的目的。

形态服务于功能

碳化硅和碳化硼会以多种形态存在，用于推动新产品和新应用的开发。

纤维	棒材
泡沫	片材
颗粒	溅射靶
单丝	瓦
粉末	管材

注意：并非所有形态都可用于碳化硅和碳化硼。



美国国家航空航天局的格伦研究中心一直致力于开发碳化硅，将其用作先进半导体电子设备的材料，在太空计划中，碳化硅材料的使用具有极高的性价比。

供图：美国国家航空航天局/Sandra Joseph 和 Kevin O’Connell

碳化硼

碳化硼的硬度仅次于金刚石、立方氮化硼和氧化硼（见表2）。碳化硼难以烧结至高密度，通常需要添加烧结助剂（如细碳或碳化硅）方能制备。碳化硼的典型特征是：

- 极高的硬度
- 低导热率
- 高弹性模量
- 高抗压强度
- 良好的核性能
- 低密度

碳化硼的应用

除了耐磨性和高强度的应用之外，其他应用也可以利用碳化硼的独特性能。以下就这种陶瓷碳化物的广泛应用略举数例：

- 磨料，要求极高硬度，用于抛光和研磨应用、金刚石修整工具以及水刀切割
- 喷嘴，要求耐磨性和抗磨损，用于泥浆泵送、喷砂处理和水刀切割
- 核应用，由于天然硼的20%是10B同位素，因此碳化硼可用作核电站中子辐射的吸收剂
- 防弹，要求硬度、抗压强度、高弹性模量和低比密度达到临界平衡

近年来，碳化硼在防弹衣领域的应用急剧增加，陶瓷碳化物迅速成为军事和执法人员的首选材料。这种先进陶瓷以板状或“瓦状”形式插入防弹衣中，可减重大约50%，防护性能等于或大于原装防弹衣。具备贴身效果的新工艺可改善性能，也有助于挽救更多生命。

前景

鉴于其独特性能和久经考验的多功能性，碳化硅和碳化硼为研究人员和设计工程师提供了探索此类先进陶瓷更多用途的机会。材料界“硬汉”还有更多潜能等待挖掘。

有关陶瓷碳化物的更多信息，请联系作者
paul.everitt@goodfellow.com 或 ian.doggett@goodfellow.com。

表2：
碳化硼（热压片）的典型性能

化学性能	
酸-浓缩	一般
酸-稀释	良好
碱	一般
卤素	一般
金属	一般
电学性能	
25°C体积电阻率 (Ohm-cm)	0.1-10
力学性能	
抗压强度 (MPa)	1400-3400
硬度-努氏(kgf mm ⁻²)	2800-3500
硬度-维氏 (kgf mm ⁻²)	3200
剪切强度 (MPa)	210-380
拉伸模量 (GPa)	440-470
物理性能	
表观孔隙率 (%)	< 3
密度 (g cm ⁻³)	2.45-2.52
热学性能	
20-1000°C热膨胀系数 (x 10 ⁻⁶ K ⁻¹)	5.6
熔点(°C)	2450
25°C比热 (J K ⁻¹ kg ⁻¹)	950
20°C导热系数 (W m ⁻¹ K ⁻¹)	30-90
最高连续使用温度 (°C)	600-800



近年来，碳化硼在防弹衣领域的应用急剧增加，陶瓷碳化物迅速成为军事和执法人员的首选材料。