

# SiC粉体制备及 陶瓷材料液相烧结

张 宁 茹红强 才庆魁 著



東北大學出版社  
Northeastern University Press

# SiC 粉体制备及陶瓷材料液相烧结

张 宁 茹红强 才庆魁 著

东北大学出版社

• 沈 阳 •

© 张 宁 茹红强 才庆魁 2008

图书在版编目 (CIP) 数据

SiC 粉体制备及陶瓷材料液相烧结/张宁, 茹红强, 才庆魁著. —沈阳: 东北大学出版社, 2008.3

ISBN 978-7-81102-518-7

I .S… II .①张… ②茹… ③才… III .①碳化硅陶瓷—制备②碳化硅陶瓷—液相烧结 IV .TQ174.75

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 033152 号

---

出 版 者: 东北大学出版社

地址: 沈阳市和平区文化路 3 号巷 11 号

邮编: 110004

电话: 024—83687331 (市场部) 83680267 (社务室)

传真: 024—83680180 (市场部) 83680265 (社务室)

E-mail: neuph @ neupress.com

http: //www.neupress.com

印 刷 者: 沈阳中科印刷有限责任公司

发 行 者: 东北大学出版社

幅面尺寸: 170mm×228mm

印 张: 10.125

字 数: 193 千字

出版时间: 2008 年 3 月第 1 版

印刷时间: 2008 年 3 月第 1 次印刷

责任编辑: 向 荣 牛连功

责任校对: 郎 昆

封面设计: 唐敏智

责任出版: 杨华宁

---

ISBN 978-7-81102-518-7

定 价: 32.00 元

## 前 言

陶瓷材料在国防、机械、化工、冶金、电子等领域中具有广泛的用途。在众多的陶瓷材料中,碳化硅( $\text{SiC}$ )由于其硬度高、高温稳定性好、膨胀系数低和热传导性优良,一直是世界各国材料学者研究的热点。1974年,美国科学家 S.Prochazke 首次通过无压烧结工艺成功制备出致密的  $\text{SiC}$  陶瓷材料之后, $\text{SiC}$  才真正作为陶瓷材料而得到应用。经过几十年的发展, $\text{SiC}$  陶瓷的性能在不断提高,在各行各业的应用也越来越广泛,已经成为发展迅速的几种陶瓷材料之一。但由于  $\text{SiC}$  陶瓷所固有的脆性,其使用范围并没有达到人们的预期。

最近几十年来,我国  $\text{SiC}$  陶瓷材料的研究和生产都取得了很大的发展,国内出现了许多专门从事  $\text{SiC}$  陶瓷材料研究和生产的单位,并不断有各种类型的  $\text{SiC}$  产品出现, $\text{SiC}$  陶瓷材料在国民经济建设中的作用也正在逐步显现。但目前,我国  $\text{SiC}$  陶瓷材料的制品水平和国外相比还有一定的差距。

目前  $\text{SiC}$  陶瓷材料的发展方向,一是追求  $\text{SiC}$  粉体的超细化,二是通过复合方法追求  $\text{SiC}$  陶瓷材料的高韧性,三是通过改进制备工艺,追求制品的低成本化。本书介绍了  $\text{SiC}$  粉体制备和  $\text{SiC}$  陶瓷致密化烧结的最新发展,并着重介绍了碳热还原法和湿化学制备  $\text{SiC}$  超细粉体的方法,以及液相烧结制备  $\text{SiC}$ -YAG 陶瓷复合材料的过程,可以作为从事  $\text{SiC}$  陶瓷材料研究和生产人员的参考。

本书是作者多年来在  $\text{SiC}$  陶瓷材料方面的研究积累和粗浅认识,

由于作者水平有限,难免有遗漏、错误之处,敬请各方面专家及广大读者不吝指正。

本书涉及的主要研究工作是在国家自然科学基金项目(No.50372041)的资助下完成的。龙海波,刘昊,裘荣鹏等研究生参加了部分实验。研究工作得到了沈阳大学科学技术研究中心和东北大学材料研究所的多方面帮助和支持,该书的出版也得到了沈阳大学研究生部的资助与指导,在此一并表示衷心的感谢。

作者

2008年1月

# 目 录

|                                    |    |
|------------------------------------|----|
| 第一章 SiC 的晶体结构、性能及应用 .....          | 1  |
| 1.1 晶体结构 .....                     | 1  |
| 1.2 性能及应用 .....                    | 4  |
| 本章参考文献 .....                       | 5  |
| 第二章 SiC 粉体表征及制备方法 .....            | 7  |
| 2.1 SiC 粉体特性表征 .....               | 7  |
| 2.2 SiC 粉体的制备方法 .....              | 11 |
| 本章参考文献 .....                       | 18 |
| 第三章 配料与凝胶注模成型 .....                | 21 |
| 3.1 混 料 .....                      | 21 |
| 3.2 陶瓷材料的成型 .....                  | 22 |
| 本章参考文献 .....                       | 26 |
| 第四章 SiC 陶瓷材料的致密化烧结 .....           | 29 |
| 4.1 SiC 陶瓷材料的热压烧结与热等静压烧结 .....     | 30 |
| 4.2 SiC 陶瓷材料的反应烧结 .....            | 32 |
| 4.3 SiC 陶瓷材料的无压烧结 .....            | 33 |
| 4.4 液相烧结 SiC-YAG 陶瓷复合材料的增韧机理 ..... | 37 |
| 本章参考文献 .....                       | 39 |
| 第五章 碳热还原法合成 SiC 粉体 .....           | 42 |
| 5.1 碳热还原反应 .....                   | 42 |
| 5.2 气体分压的作用 .....                  | 43 |
| 5.3 SiC 粉体合成的 TG-DSC 综合热分析 .....   | 44 |
| 5.4 反应速度 .....                     | 45 |
| 5.5 反应温度 .....                     | 46 |

|                                                                                                |           |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 5.6 催化剂的作用 .....                                                                               | 49        |
| 本章参考文献 .....                                                                                   | 49        |
| <b>第六章 稀土元素的作用 .....</b>                                                                       | <b>51</b> |
| 6.1 稀土元素 La 对合成 SiC 粉体 TG-DSC 的影响 .....                                                        | 51        |
| 6.2 稀土元素 La 的含量对 SiC 粉体纯度的影响 .....                                                             | 54        |
| 6.3 稀土元素 La 的含量对 SiC 粉体形貌的影响 .....                                                             | 55        |
| 6.4 稀土元素 La 对合成温度的影响 .....                                                                     | 56        |
| 6.5 稀土元素 La 对保温时间的影响 .....                                                                     | 57        |
| 6.6 稀土元素 Ce 的作用 .....                                                                          | 59        |
| 本章参考文献 .....                                                                                   | 60        |
| <b>第七章 湿化学法制备 SiC 粉体 .....</b>                                                                 | <b>61</b> |
| 7.1 SiC 粉体的表面改性 .....                                                                          | 61        |
| 7.2 Si 源前驱体制备及表面改性 .....                                                                       | 67        |
| 7.3 碳粉的表面改性 .....                                                                              | 77        |
| 7.4 EtOH/TEOS 体积比对产物微观形貌的影响 .....                                                              | 82        |
| 7.5 氨水浓度对产物微观形貌的影响 .....                                                                       | 82        |
| 7.6 SiC 粉体的表面改性 .....                                                                          | 84        |
| 本章参考文献 .....                                                                                   | 88        |
| <b>第八章 共沉淀包覆制备 SiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷粉体 .....</b>       | <b>92</b> |
| 8.1 SiC-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 复合粉体的表面电荷状态 .....        | 92        |
| 8.2 SiC-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 复合悬浮粒子之间的相互作用 .....      | 93        |
| 8.3 pH 值对 SiC-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 复合粉体分散性的影响 .....   | 94        |
| 8.4 分散剂对 SiC-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 复合粉体浆料流动性的影响 .....  | 95        |
| 8.5 SiC-Al(OH) <sub>3</sub> -Y(OH) <sub>3</sub> 复合粒子的包覆原理 .....                                | 97        |
| 8.6 pH 值对 SiC-Al(OH) <sub>3</sub> -Y(OH) <sub>3</sub> 复合粒子包覆性的影响 .....                         | 98        |
| 8.7 沉淀剂加入速度对 SiC-Al(OH) <sub>3</sub> -Y(OH) <sub>3</sub> 复合粒子包覆性的影响 .....                      | 100       |
| 8.8 SiC-Al(OH) <sub>3</sub> -Y(OH) <sub>3</sub> 复合粉体在煅烧过程中的物相变化 .....                          | 102       |
| 8.9 煅烧温度对 SiC-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 复合粉体分散性的影响 .....   | 104       |
| 8.10 煅烧温度对 SiC-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 复合粉体烧结性能的影响 ..... | 106       |
| 本章参考文献 .....                                                                                   | 109       |

---

|                                       |     |
|---------------------------------------|-----|
| 第九章 机械混合法制备 SiC-YAG 陶瓷复合材料 .....      | 111 |
| 9.1 实验原料及成分设计 .....                   | 111 |
| 9.2 SiC-YAG 陶瓷复合材料的性能检测 .....         | 112 |
| 9.3 SiC-YAG 陶瓷复合材料在烧结过程中的质量流失 .....   | 115 |
| 9.4 SiC-YAG 陶瓷复合材料的烧结致密性 .....        | 121 |
| 9.5 烧结温度对显微组织和力学性能的影响 .....           | 126 |
| 9.6 保温时间对显微组织和力学性能的影响 .....           | 129 |
| 9.7 铝钇摩尔比对力学性能的影响 .....               | 131 |
| 9.8 缺陷对 SiC-YAG 陶瓷复合材料力学性能的影响 .....   | 131 |
| 9.9 SiC-YAG 陶瓷复合材料的断裂韧性 .....         | 135 |
| 本章参考文献 .....                          | 139 |
| 第十章 共沉淀包覆制备 SiC-YAG 陶瓷复合材料 .....      | 142 |
| 10.1 SiC-YAG 陶瓷复合材料的质量流失 .....        | 142 |
| 10.2 共沉淀包覆 SiC-YAG 陶瓷复合材料的烧结致密化 ..... | 144 |
| 10.3 共沉淀包覆 SiC-YAG 陶瓷复合材料的力学性能 .....  | 147 |
| 10.4 共沉淀包覆 SiC-YAG 陶瓷复合材料的断裂韧性 .....  | 150 |
| 本章参考文献 .....                          | 152 |



# 第一章 SiC 的晶体结构、性能及应用

## 1.1 晶体结构

SiC 的晶体结构十分独特, C 与 Si 同属于元素周期表中的第 IV<sub>A</sub> 族, 最外层电子数均为 4 个, 其电子轨道分别为 Si(3S<sup>2</sup>3P<sup>2</sup>) 和 C(2S<sup>2</sup>2P<sup>2</sup>)。当 Si 原子和 C 原子相互结合时, Si 原子中的一个 S 轨道电子激发到 P 轨道, 这样 Si 原子在外层电子结构中有 4 个未配对的电子, 形成 SP<sup>3</sup> 杂化轨道, 此时 Si 原子外层结构中的 4 个未配对电子分别与周围的 4 个 C 原子外层的一个未配对电子形成共价键, Si 原子处于 4 个碳原子形成的四面体中心。同理, 每一个 C 原子也处于 4 个 Si 原子所构成的四面体中心, 类似于金刚石的四面体结构, 这种结构决定了 SiC 晶体具有非常高的硬度。SiC 晶格的基本结构单位是相互穿插、共价结合的 SiC<sub>4</sub> 和 CSi<sub>4</sub> 的配位四面体。这种结构可以用具有恒半径的球近似密堆积, 而较小的球占据四面体位置的 1/4, 每单位晶胞有 2 个分子式单位。如果四面体密堆积次序是 ABCABC……就形成立方闪锌矿结构, 但如果密堆积次序是 ABAB……形式, 则形成六方钎锌矿结构, 如图 1-1 和图 1-2 所示<sup>[1]</sup>。对应为 SiC 的两种晶型<sup>[2]</sup>, 即立方晶系的 β-SiC 和六方晶系(包括菱面体)的 α-SiC, 其配位数均为 4, 这些 [SiC<sub>4</sub>] 和 [CSi<sub>4</sub>] 四面体相邻层的底部可以是互相平行或反平行结合, 四面体共边形成平面层, 并以顶点与下一叠层四面体相连, 形成三维结构, 如图 1-3 所示<sup>[3]</sup>。图 1-4 和图 1-5 分别对应为模拟的 β-SiC 和 α-SiC 的微观晶体结构。

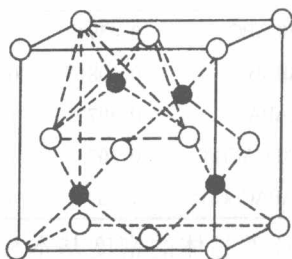


图 1-1 闪锌矿结构

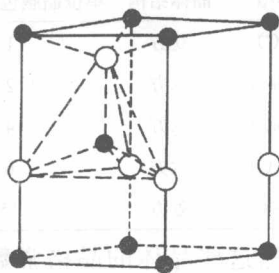
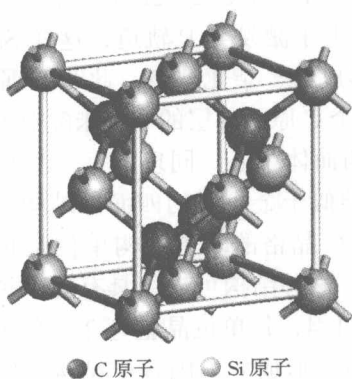
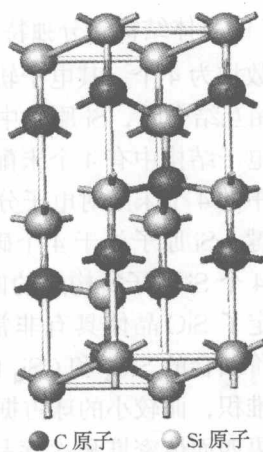


图 1-2 钎锌矿结构



图 1-3 SiC 四面体及其四面体的取向

图 1-4 模拟的  $\beta$ -SiC 微观晶体结构图 1-5 模拟的  $\alpha$ -SiC 微观晶体结构

由于这些 $[\text{SiC}_4]$ 和 $[\text{CSi}_4]$ 四面体堆积次序不同,相应有不同的晶体结构,一般采用字母C(立方)、H(六方)、R(菱方)来表示其晶格类型,用单位晶胞所包含的层数加以区别,见表1-1<sup>[3,4]</sup>。

表 1-1 SiC 常见多型体及其晶格常数

| 晶体类型                | 晶体结构 | 单位晶胞包含的层数 | 原子排列次序          | $a/\text{nm}$ | $c/\text{nm}$ |
|---------------------|------|-----------|-----------------|---------------|---------------|
| C( $\beta$ -SiC)    | 立方   | 1         | ABCABCABC       | 0.4394        |               |
| 2H( $\alpha$ -SiC)  | 六方   | 2         | ABABAB          | 0.30817       | 0.50394       |
| 4H( $\alpha$ -SiC)  | 六方   | 4         | ABACABAC        | 0.3073        | 1.0053        |
| 6H( $\alpha$ -SiC)  | 六方   | 6         | ABCACBABCACBA   | 0.3073        | 1.51183       |
| 15R( $\alpha$ -SiC) | 菱方   | 15        | ABCACBCABACBCBA | 1.269         | 3.770         |

虽然这些晶体的晶格常数各不相同,但各类晶体的密度基本相同,如 $\alpha$ -SiC 密度为 $3.217\text{g}/\text{cm}^3$ ,  $\beta$ -SiC 密度为 $3.215\text{g}/\text{cm}^3$ 。 $\alpha$ -SiC 是高温稳定相,  $\beta$ -SiC 是低温稳定相,在 $2100^\circ\text{C}$ ,立方 $\beta$ -SiC 开始向六方 $\alpha$ -SiC 发生不可逆转

变。

由 SiC 的二元平衡相图(图 1-6)<sup>[5]</sup>可知, 纯 SiC 在低于 2545℃ 时不熔化, 非常稳定, 而当温度高于 2545℃ 时, SiC 开始分解为液相和碳; 若 SiC 中含有少量杂质(如 Si), 在 1404℃ ± 5℃ 就会发生 Si 和 SiC 的低熔点共晶反应, 变成 SiC + L(少量液相), 结果使 SiC 的使用温度降低。因此, SiC 陶瓷材料中应严格限制单质硅的存在。

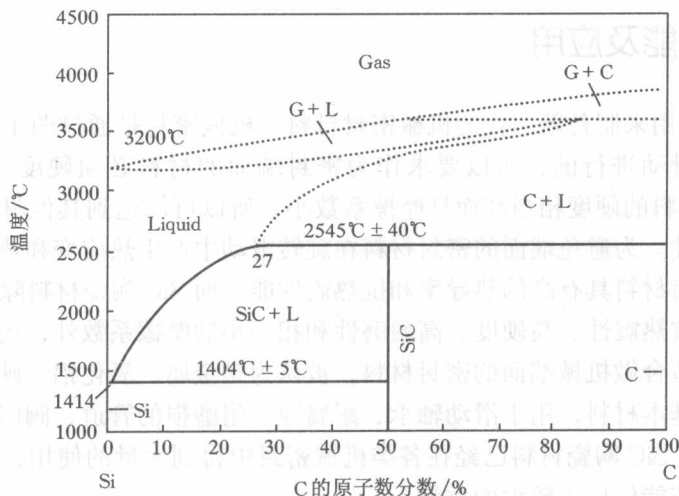
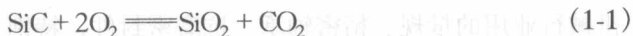


图 1-6 Si-C 二元平衡相图

SiC 除具有在 2545℃ 以下不熔化的特点外, 还具有抗高温氧化的特点。在还原性气氛或中性介质中, SiC 几乎不发生氧化, 直到 2200℃ 高温仍很稳定; 在氧化性气氛中, SiC 在高温下能被氧化, 但 SiC 的抗氧化性能在高达 1550℃ 时仍很优良。实际上, SiC 颗粒在 1140℃ 以上, 尤其在 1300℃ ~ 1500℃ 已发生显著氧化, 但此时生成的  $\text{SiO}_2$  随氧化温度的升高逐渐转化成较致密的方石英覆盖在 SiC 表面, 形成一层保护膜, 阻碍氧进一步向里扩散, 反而使 SiC 的抗氧化能力提高。所以, SiC 是所有非氧化物陶瓷中抗氧化性能最好的一种材料。但是, 1700℃ 是  $\text{SiO}_2$  固态存在的极限温度, 超过 1700℃ 时, SiC 就失去  $\text{SiO}_2$  保护膜的作用, 此时 SiC 强烈氧化分解, 其分解反应方程式如下<sup>[6]</sup>:



SiC 是 Si—C 之间化学力很强的一种典型的共价键型化合物, 但其中仍然含有少量的离子键。理论计算可知, Si—C 之间的平均键能为 300kJ/mol, 其中总能量的 78% 属于共价键, 总能量的 22% 属于离子键<sup>[7]</sup>, 而且由于 Si 原子

半径和 C 原子半径均较小, Si—C 之间的化学键很强, 所以 SiC 的共价键极强。SiC 的这种共价键极强的结构特点决定其具有一系列的优良性能, 如高强度、高硬度、耐高温、高热传导率、低热膨胀系数、优良的抗热震性、良好的化学稳定性和抗蠕变性等。此外, SiC 在高温状态下(不超过 1600℃)还仍然能够保持良好的键合强度, 强度几乎不降低, 这使其广泛应用于高温、高压、腐蚀、辐射和磨损等条件严酷的工业领域。

## 1.2 性能及应用

SiC 可用来制备新一代的机械密封材料。机械密封是通过两个密封端面材料的旋转滑动进行的, 所以要求作为密封端面的材料必须硬度高、耐磨损。SiC 陶瓷材料的硬度相当高而且摩擦系数小, 所以可以达到其他材料无法达到的滑动特性。为避免端面的密封材料在旋转滑动中产生热应变和热裂纹, 还要求端面密封材料具有高的热导率和抗热震性能。而 SiC 陶瓷材料除具有高的热导率、高抗热震性、高硬度、高耐磨性和相当小的摩擦系数外, 还具有自润滑特性, 很适合做机械端面的密封材料, 被认为是金属、氧化铝、硬质合金以来的第四代基本材料, 用于滑动轴承、耐腐蚀、耐磨损的管道、阀门和风机叶片等。目前, SiC 陶瓷材料已经在各类机械密封中得到大量的使用, 为机械设备的高效、节能作出了较大的贡献。

SiC 陶瓷材料具有的高硬度、高耐腐蚀性, 使其被广泛用做密封环、研磨介质、喷嘴、研磨盘、磁力泵的泵件和高温耐腐蚀部件等。SiC 陶瓷材料所具有的导热系数高、抗蠕变性能好和高温稳定性好等一系列的优良特点, 使其非常适合于高温结构材料和耐火材料, 因而也是制造陶瓷发动机零部件(如陶瓷活塞、活塞顶、热电塞、涡轮增压器转子、预燃烧室、气门和汽缸套等)的候选材料之一<sup>[8]</sup>。SiC 陶瓷材料用做耐火材料已有很长的历史, 在钢铁冶炼中, 用做钢包砖、水口砖、塞头砖; 在有色金属冶炼中, 用做炉衬、熔融金属的输送管道、过滤器和坩埚等; 在空间技术中, SiC 陶瓷材料可用做火箭发动机喷嘴; 在冶金行业, SiC 陶瓷材料可用做热电偶保护套、电炉盘、高温气体过滤器、烧结匣钵、垫板等。如果在比较低的温度使用, 可以有效地利用 SiC 这种材料的高弹性模量、高强度、耐磨损、高热传导、低热膨胀系数等特性, 制作机械行业用的量规、精密轴承、抗磨密封件, 特别是用做带有固体粒子冲刷的泥浆泵的密封件, 这时 SiC 陶瓷材料可显示出比硬质合金材料更优越的特性。

因为 SiC 陶瓷材料具有高的热传导率, 所以它的另一个重要用途是制作热交换器。采用 SiC 陶瓷材料制作的热交换器, 可以节省大量的燃料。

纯 SiC 是电的绝缘体, 当有杂质存在时, 电阻会大幅度下降, 但是随着温度的增加 SiC 的电导率增大, 并且具有负的温度系数, 所以 SiC 还可用于制作非线性电阻和高温发热组件。SiC 的广泛用途可概括如表 1-2<sup>[4]</sup>所列。

表 1-2 SiC 的用途

| 工业领域         | 使用环境      | 用 途                       | 主要优点              |
|--------------|-----------|---------------------------|-------------------|
| 石油化工         | 高温、高液压、研磨 | 喷嘴、轴承、密封、阀片               | 耐磨                |
| 化学工业         | 强酸、强碱     | 密封、轴承、泵零件、热交换器            | 耐磨、耐蚀、气密性         |
|              | 高温氧化      | 气化管理道、热电偶套管               | 耐高温腐蚀             |
| 汽车、拖拉机、飞机、火箭 | 发动机燃烧     | 燃烧器部件、涡轮增压器转子、燃气轮机叶片、火箭喷嘴 | 低摩擦、高强度、低惯性负荷、耐热震 |
| 汽车、拖拉机       | 发动机油      | 阀系列元件                     | 低摩擦、耐磨            |
| 机械、矿业        | 研磨        | 喷沙嘴、内衬、泵零件                | 耐磨                |
| 造纸工业         | 纸浆废液、纸浆   | 密封、套管、轴承、成形板              | 耐磨、耐蚀、低摩擦         |
| 热处理、炼钢       | 高温气体      | 热电偶套管、辐射管、热交换器、燃烧元件       | 耐热、耐蚀、气密性         |
| 核工业          | 含硼高温水     | 密封、轴套                     | 耐辐射               |
| 微电子工业        | 大功率散热     | 封装材料、基片                   | 高导热率、高绝缘          |
| 激光           | 大功率、高温    | 反射屏                       | 高刚度、高稳定性          |
| 其他           | 加工成型      | 拉丝、成型模、纺织导向               | 耐磨、耐蚀             |

由于 SiC 陶瓷材料在结构材料领域及电子材料领域中显示出优良的性能, 因而逐渐引起人们的重视。

### 本章参考文献

- [1] 周玉. 陶瓷材料学[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [2] Hidehiko T, Nobuo I. Polytypes, Grain Growth, and Fracture Toughness of Boride Particulate SiC Composites[J]. J. Am. Ceram. Soc., 1995, 78 (5): 1223-1229.
- [3] 江东亮. 精细陶瓷材料[M]. 北京: 中国物资出版社, 2000.
- [4] 王零森. 特种陶瓷[M]. 长沙: 中南工业大学出版社, 1996.
- [5] M. V. 斯温. 材料科学与技术丛书: 陶瓷的结构与性能[M]. 郭景昆, 等译. 北京: 科学出版社, 1998.

- [6] 段继光. 工程技术陶瓷[M]. 长沙: 湖南科技出版社, 1994.
- [7] 窦叔菊. 高温陶瓷工艺学[M]. 沈阳: 东北大学出版社, 1994.
- [8] Tyrone M. Silicon Carbide Platelet/Silicon Carbide Composites[J]. J. Am. Ceram. Soc., 1995, 78(1): 79-103.

## 第二章 SiC 粉体表征及制备方法

所谓粉体,即大量微小固体粒子构成的集合体系。它不同于物质存在的三种基本状态,即气体、液体和固体,而是物质存在的另一种状态。它具有很多固体物质的基本属性,如物质的结构、密度等。但它与固体物质最简单的区别在于具有触变性和流动性,如当人们用手轻轻地触及它时,它会表现出固体物质不具备的变形特性和流动性。通常,决定陶瓷材料性能的主要影响因素之一是粉体的特性。因此学习和掌握陶瓷粉体特性,有目的地通过制备、处理等手段调控陶瓷粉体的特性是至关重要的。

### 2.1 SiC 粉体特性表征

SiC 粉末的性能主要从几个方面来表征:粉末粒度、粒度分布、比表面积和颗粒形貌等。粒度分布影响陶瓷材料的成型过程、压坯密度、烧结能力和最终密度。颗粒通常不仅是单晶粒,而且包含几个晶粒。因此,用 X 射线衍射测量的尺度和用一般颗粒尺度测量法(例如沉降法或光散射技术)得到的结果有所不同。SiC 粉末也常用比表面积 BET 测量方法表征。

#### 2.1.1 粉体粒度

所谓粉体粒度,是指在物质的基本结构不发生改变的情况下,分散或细化而得到的固态基本颗粒。这种基本颗粒,一般是指没有堆积、絮联等结构的最小单元(即一次颗粒)。图 2-1 所示为 SiC 粉末前驱体单分散的一次颗粒。在实际应用的粉体原料中,往往都是在一定程度上团聚了的颗粒,即所谓的二次颗粒。尤其对于比较细的粉体,由于表面活性高,表面能大,不稳定而更易于发生一次颗粒的团聚,使粉体的表面积降低,自发向能量较低而稳定的方向发展,图 2-2 所示为 SiC 粉末前驱体团聚的二次颗粒。由图 2-1 和图 2-2 可以看出,二次颗粒尺寸明显大于一次颗粒尺寸,显然粉末的分散性对粉体特性有明显影响。提高粉体的分散性一直是粉体表面改性的主要目的之一。不论何种粉体,颗粒之间的自发团聚是客观存在的,其原因主要有以下五种:分子间的范德华引力;颗粒间的静电引力;吸附水分的毛细管力;颗粒间的磁引力;颗粒表面不平滑引起的机械纠缠力。

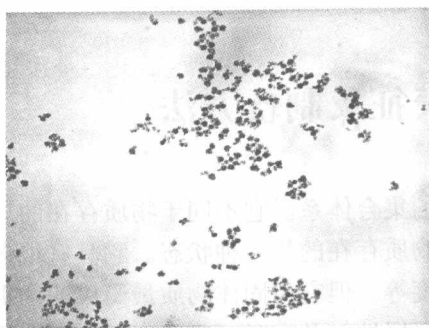


图 2-1 SiC 粉末前驱体单分散的一次颗粒

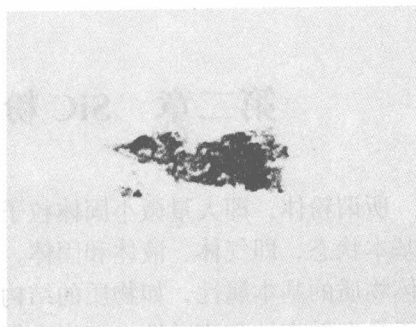


图 2-2 SiC 粉末前驱体团聚的二次颗粒

粉体粒度也是构成粉体的基本单位。粉体是具有粒度分布的大量固体颗粒的分散相，不可能用单一粉体颗粒的大小来描述，应该用构成粉体的颗粒群尺寸来表示。粉体颗粒群的平均大小定义为该粉体的粒度。

事实上，粉体的颗粒形状千差万别，有粒状、条状或棒状、多边形块状、片状和各种形状兼而有之的不同规则体。图 2-3、图 2-4、图 2-5 和图 2-6 所示分别对应为棒状 SiC、针状（或晶须状）SiC、粒状 SiC 和纤维状 SiC。

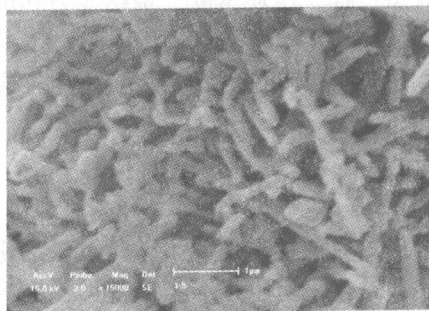


图 2-3 棒状 SiC

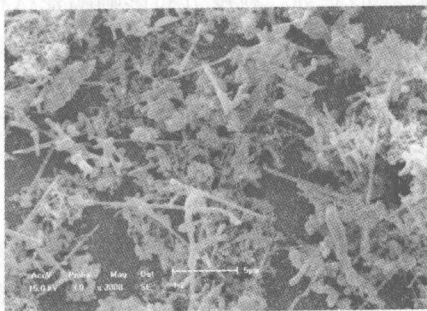


图 2-4 针状（或晶须状）SiC

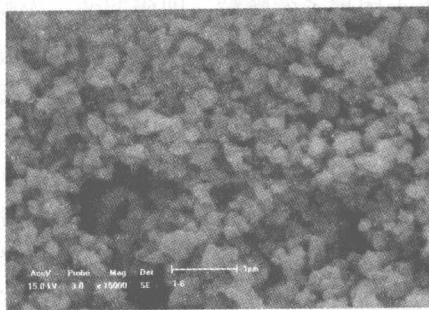


图 2-5 粒状 SiC

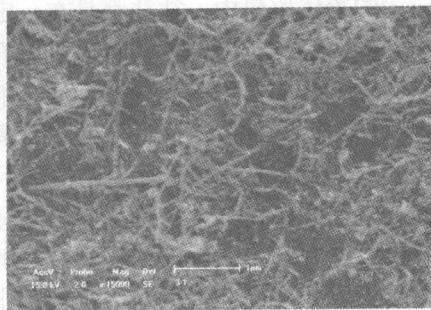


图 2-6 纤维状 SiC



SiC 粉体的形貌不同, 导致表示 SiC 粉体颗粒群的方法多种多样。球形颗粒的大小可用直径描述, 正方体颗粒的大小可用边长来表示。对于不规则形状的颗粒, 可用下面几种方法表征。

#### (1) 等体积相当径

某种颗粒所具有的体积用同样体积的球来与之相当, 这种球的直径就代表该颗粒的大小, 即等体积相当径。

#### (2) 等面积球相当径

等面积相当径是用与实际颗粒有相同表面积的球的直径来表示粒度的一种方法。显然, 当颗粒形状简单或者比较规则时, 表面积容易求得。然而实际颗粒的形状比较复杂, 不易直接求得, 一般都是通过流体透过法或吸附法等间接方法得到。

#### (3) 等沉降速度相当径

在无限大范围的黏性流体中, 沉降的球体颗粒的阻力完全由流体的黏滞力所致, 则等沉降速度相当径与沉降速度之间满足如下关系式<sup>[1]</sup>:

$$V = \frac{(\rho_s - \rho_f)g}{18\eta} \cdot D^2 \quad (2-1)$$

式中:  $V$ ——沉降速度;

$D$ ——等沉降速度相当径;

$\eta$ ——流体介质的黏度;

$\rho_s$ ——颗粒的密度;

$\rho_f$ ——流体的密度。

这里需要指出, 公式(2-1)只适用于雷诺数  $Re \leq 0.2$  的情况。利用公式(2-1), 只要测得颗粒在介质中的最终沉降速度, 就可以求得等沉降速度相当径。

#### (4) 显微镜下测得的颗粒径

显微镜方法是对颗粒唯一的既可测量、又可观察的手段。由于用显微镜可直接测定颗粒的形状、组成和大小, 目前被视为一种最有效的颗粒分析方法。

### 2.1.2 粒度分布

对于某一粉体系统, 如果组成颗粒的粒度都一样或近似一样, 就称其为单分散体系。实际粉体所含颗粒的粒度大都有一个分布范围, 常称为多分散体系。

粒度分布表征多分散体系中粉体颗粒大小的不均匀程度。粒度分布范围越窄, 粉体分布的不均匀程度越小, 集中度越高。