

第 1 章 绪 论

1.1 先进陶瓷材料的现状与研究进展

有机高分子材料、金属材料、无机非金属材料(即广义的陶瓷材料)、复合材料是当代国民经济建设中的四大基础材料,而无机非金属材料中的先进陶瓷材料是不可缺少的一类重要材料。先进陶瓷通常分为功能陶瓷和结构陶瓷两大类。随着科学技术的发展,又出现了生物陶瓷材料,人们有时将生物陶瓷单独列为一类(黄勇,2000;张立同,2005;师昌绪,2004)。

1.1.1 功能陶瓷

功能陶瓷是指利用电、磁、声、光、热等直接效应及其耦合效应所提供的一种或多种性质来实现某种使用功能的先进陶瓷。功能陶瓷是当前先进陶瓷材料研究领域中最具活力、最有发展前景的组成部分,是电子、信息、计算机、通信、激光、医疗、机械、汽车、自动化、航天、核技术和生物技术等行业或技术领域中的关键材料。

电子信息技术的集成化、微型化和智能化发展趋势,推动着电子元件日益向微型、轻量、多功能、高可靠性和高稳定方向发展。功能陶瓷元器件的多层化、多层元件片式化、片式元件集成化、集成元件模块化和多功能化,已成为今后的发展总趋势。

陶瓷传感器向集成化、微型化、智能化方向发展,兼具传感和驱动(执行)功能于一体的灵巧或机敏(smart)材料,以及具有自诊断、自调整、自恢复、自转换和自协调功能的智能陶瓷体系的研究十分活跃。

信息功能陶瓷薄膜特别是铁电薄膜的研制与开发空前活跃,由此引发的软化学制备技术、微组装技术、自组装技术、精细复合技术、纳米材料与纳

米技术、生物矿化技术以及量子点材料技术等成为功能材料乃至材料科学与工程学科的发展前沿。

微波介质材料作为近代信息技术的关键基础材料,在微波介质谐振器、滤波器、振荡器以及微波电容器等方面,得到了广泛应用,而且上述部件在火箭制导、雷达、移动电话、卫星电视直播等方面具有重要的作用。

功能陶瓷元件具有体积小、品种多、系列化的特点,这类材料技术含量高、市场容量大、升级换代频繁,涉及多项基础研究和应用基础研究,包括:

- 电子陶瓷的尺寸效应;
- 功能陶瓷膜的制备技术;
- 高介电常数、低损耗、低温度特性、大容量、超薄型、片式化多层陶瓷电容器的材料研究与制备技术;
- 高性能压电陶瓷和驱动陶瓷的研究与应用;
- 超高频、超低损耗、高品质因数的微波介质陶瓷材料与器件的研究;
- 高性能半导体敏感陶瓷材料及元件的研究;
- 高性能、多功能组合的陶瓷器件制备技术,等等。

1.1.2 结构陶瓷

结构陶瓷主要是指发挥材料机械、热、化学、生物等效能的一大类先进陶瓷,也称之为精细陶瓷、高性能陶瓷或高技术陶瓷。由于结构陶瓷材料在耐高温、耐磨损、耐腐蚀、高强度、抗氧化等一系列性能方面,都具有其他材料(有机材料、金属材料等)所不能比拟的优异性能,因而,它们不仅是某些新兴产业和传统工业改造的关键性支撑材料,而且是新兴产业和某些高技术发展的先导材料。作为重要的结构材料,结构陶瓷在能源、航空航天、机械、汽车、冶金、化工、电子和生物等方面具有广阔的应用前景,因而受到世界各国的高度重视,成为近 20 年来发展极为迅速的领域之一。

1. 结构陶瓷的研究进展

结构陶瓷是新材料发展中的一个越来越重要的门类,它包括碳化物(SiC 、 B_4C 、 WC 、 TiC 等)、氮化物(Si_3N_4 、 BN 、 TiN 等)、硼化物(B_4C 、 BN 等)、氧氮化物(Sialon 或赛隆等)及氧化物(Al_2O_3 、 ZrO_2 、莫来石(mullite)等)陶瓷,以及以结构陶瓷为基体的复合材料。由于结构陶瓷固有的脆性,其具有灾难性破坏的致命弱点,使用可靠性较差,因此,改善陶瓷材料的韧

性就成为直接关系到陶瓷材料在高技术领域中的应用的关键。近 20 年来,围绕陶瓷材料强韧化这一关键性问题,已经进行了大量、深入的基础研究,取得了不少突破性的进展。这方面的进展主要有:

(1) 发展了高纯、超细、均质的陶瓷粉体制备技术。陶瓷粉体的质量直接影响着陶瓷材料最终的性能,为了得到高性能的结构陶瓷材料,要求陶瓷的粉体必须高纯、超细、均质、无团聚。因此,人们相继开发了化学法、激光法、水热法、化学气相法等方法合成高纯、超细、均质的陶瓷粉体,并提出了一系列陶瓷粉体的表征和评价技术。

(2) 发展了一些实用新型的成型工艺。在传统的干压成型、等静压成型、注浆成型等基础上,相继发展出了流延法成型、轧膜成型、注射成型、挤制成型等塑法成型工艺,特别是近年来出现的胶态成型新工艺更是给复杂形状陶瓷制品的成型工艺带来了突破性的进展,可以实现低成本、高性能、净尺寸的复杂形状陶瓷部件的成型。胶态成型包括直接凝固成型(directly coagulation casting,简称 DCC)、凝胶注模成型(gel-casting)等。

(3) 发展了热压烧结、热等静压烧结、气压烧结、微波烧结、自蔓延高温合成、等离子放电烧结等烧结新技术。在烧结热力学、动力学、烧结机理等理论方面也取得了重要的突破,为获得致密、高性能的结构陶瓷提供了制备技术和理论上的保证。

(4) 基础研究有较大突破。在相平衡、反应热力学、动力学、胶体化学、表面和界面科学、烧结机理、增韧机理等方面均取得了不少突破性的新进展。人们对结构陶瓷及复合材料的组成、结构和性能之间的关系有了更进一步的了解,进而可以对结构陶瓷及复合材料进行组成和结构的设计,以及服役行为的分析和评价。

(5) 对结构陶瓷的强韧化进行了深入的研究,取得了突出的进展。陶瓷材料的强韧化有多种途径,一般采用在陶瓷材料中引入增韧相,如长纤维增韧、晶须增韧、颗粒弥散强化与增韧、相变增韧等,有时将几种增韧机制组合起来,产生协同增韧的效果。各种增韧手段在制备工艺和增韧效果上又各有特点,其中相变增韧在室温下具有很好的效果,但在高温(1000 °C 以上)条件下增韧失效;颗粒弥散增韧制备工艺简单,但效果有限,而且延性颗粒(金属)增韧的陶瓷高温性能较差;陶瓷纤维(或晶须)补强增韧陶瓷基复合材料在室温和高温下都具有优良的力学性能,而且晶须作为增韧相的制备工艺更加简单,因此被认为是高温结构陶瓷的一种最有效的增韧方法。此外,近年来,人们受生物界生物材料结构与性能关系的启发,进行陶瓷材

料的仿生结构设计,如仿造竹木结构制成 $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{BN}$ 纤维独石结构陶瓷材料,仿造贝壳珍珠层结构制成 $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{BN}$ 层状结构陶瓷材料,通过仿生结构设计,材料的断裂韧性高达 $28\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$,可以与某些铸铁相媲美。因此,进行陶瓷材料的仿生结构设计,实现高强高韧兼备的先进陶瓷也是今后的发展趋势。

(6) 在结构陶瓷及复合材料研究的基础上,人们也进行了结构陶瓷应用的开发和研究。目前,先进陶瓷正在以往使用金属的领域中得到应用,如刀具、耐磨部件、磨球、轴承、高温喷嘴、热交换器、发动机零部件等。在航空航天及军事装备制造方面结构陶瓷也有了新的用途。随着制备技术的改进、使用可靠性的提高以及成本的降低,结构陶瓷及复合材料必将得到越来越广泛的应用。

(7) 在对结构陶瓷及复合材料进行基础研究的同时,人们还积极探索和开展新的材料体系的研制。近年来,人们以极大的兴趣开展了纳米材料、超塑性、低膨胀系数、对缺陷不敏感等材料体系的研究。20 世纪 90 年代先进陶瓷开始步入纳米陶瓷阶段,纳米陶瓷的出现将引起陶瓷工艺、陶瓷科学、陶瓷材料的性能和应用的变革性发展。近年来,人们逐步认识到一类新型层状碳化物和氮化物材料如 Ti_3SiC_2 、 Ti_3GeC_2 (312 相) 和 M_2BX (H 相, 如 Ti_2AlC , Ti_2AlN , Ti_2GeC) 研究的重要性。这类材料主要有 Ti_3SiC_2 、 Ti_3GeC_2 (312 相) 和 M_2BX (H 相, 如 Ti_2AlC , Ti_2AlN , Ti_2GeC) 两大类。这类材料兼具陶瓷和金属的优点,具有耐高温、抗氧化、抗热震、高导电、高导热、高温下塑性变形等优异的综合性能,是非常有前途的新一代陶瓷材料,是当前国际上陶瓷材料研究的热点之一。

2. 结构陶瓷的发展趋势

结构陶瓷的发展趋势可以归纳为以下六个方面:

(1) 向多相复合陶瓷方向发展

传统陶瓷是多组分的晶粒相和晶界相为主的复相结构材料,到先进陶瓷阶段,开始趋向于单组分的晶粒相和细微的晶界相组成的体系。后来,随着研究工作的深入,又因单相组分材料制备上和使用上的局限性,使陶瓷材料又趋向于多相复合体系。这种多相复合体系不是盲目复合,而是向着可控可设计方向发展,必须考虑两个(或多个)相之间的化学相容性、物理相容和显微结构特征等。

多相复合陶瓷研究体系有:

——纤维(晶须)补强陶瓷基复合材料。它是以陶瓷为基体,以不同种类的纤维(或晶须)作为增强体所组成的多相结构的复合材料;

——颗粒弥散型复合陶瓷。它是在陶瓷基体中加入不同化学组成的第二相颗粒所组成的复相陶瓷;

——两种晶型复合的复相陶瓷。它是同一种化学组成的物质,为达到自补强目的而通过不同工艺得到的不同晶型和不同晶粒形貌的复相陶瓷;

——梯度复合材料,也称为功能梯度材料(functional gradient materials)。这类陶瓷材料的组成、结构和相应的性能从一端到另一端呈梯度变化,因而具有特殊的功能。例如,它一面具有陶瓷的功能,另一面具有金属功能,金属与陶瓷之间有一成分梯度变化的过渡层,形成的这种新材料称为功能梯度材料或梯度复合材料;

——金属和陶瓷复合的复相陶瓷,也称为金属陶瓷。它是将金属相颗粒加入到陶瓷基体中形成的复相陶瓷;

——有机和无机复合的复相陶瓷。

(2) 向纳米陶瓷方向发展

从微米陶瓷到纳米陶瓷是科技的进步。所谓纳米陶瓷是指显微结构中的物相具有纳米级尺度的陶瓷材料,它包括晶粒尺寸、晶界宽度、第二相尺度、气孔尺寸、缺陷尺寸等都是在纳米量级的水平上。广义上讲,多相多晶陶瓷中只要有一相的尺度在纳米级,即可称之为纳米陶瓷。陶瓷中晶粒尺寸减小一个数量级,则晶粒的表面及晶界的体积亦以相应的倍数增加。如晶粒尺寸为 $3\sim 6\text{ nm}$,晶界厚 $1\sim 2\text{ nm}$,晶界体积约占整个体积的 50% 。由于晶粒细化引起表面积急剧增加,因而将引起其他物理化学性质的变化,这将导致整个陶瓷工艺和陶瓷学研究的变革。首先,要制备纳米尺寸粉体,并要求高纯、颗粒尺寸分布狭窄、几何形状归一、晶型稳定且无团聚;其次,要研究新烧结技术,以便获得超细晶粒结构的纳米陶瓷;再次,还要研究开发新功能效应。纳米陶瓷的出现,将引起整个陶瓷研究领域的扩展,从陶瓷的工艺、陶瓷学的研究到陶瓷的性能及应用,都将产生新的变化。

(3) 加强陶瓷材料的剪裁与设计

按使用性能要求设计材料是材料工作者追求的目标。陶瓷材料因组成复杂,制备工艺控制要求严格,要达到按需要性能制备出合格优质的先进陶瓷,难度很大。这方面的研究主要包括两个方面:一是组成和微观结构的设计。希望形成的显微结构,最终体现出所要求的性能;二是进行制备工

艺的设计,使材料符合使用要求,在经济上又具有竞争力。

先进陶瓷的剪裁与设计仍然是今后研究的方向。陶瓷相图的研究为材料的组成与显微结构设计提供了具有指导性意义的科学信息;陶瓷晶界应力设计的目的是利用两相或晶界相在物理性能上的差异,在晶界区域及其周围产生一定应力,使它与外加应力进行某种作用而转移、吸收或消耗外加能量,这样就在陶瓷内部造成了一个内在机制来削弱外来能量对它的作用。这样做一方面有望提高陶瓷材料的力学性能,另一方面则有可能从根本上解决陶瓷的脆性问题。

在复合陶瓷的设计中,人们更倾向于多种强化与增韧机理的配合,目的就是产生叠加和协同作用。此外,受生物界生物材料结构与性能关系的启发,人们发现高强高韧材料往往是单一成分的,但又具有复杂的结构。经过长期的演化,生物体内形成了不同层次、不同尺度的复杂结构,如贝壳珍珠层、牙齿、木材等,因此,进行陶瓷材料的仿生结构设计,进而获得高强高韧的先进陶瓷也是今后的发展趋势。

(4) 新型层状碳化物和氮化物陶瓷

近年来,人们以极大的兴趣关注新型层状碳化物和氮化物材料的研究。这类材料主要有 Ti_3SiC_2 , Ti_3GeC_2 (312 相) 和 M_2BX (H 相, 如 Ti_2AlC , Ti_2AlN , Ti_2GeC) 两大类, 它们的结构特征是具有很大的 c/a 比, 在晶体结构上 B 族元素 (Si, Ge, Al 等) 形成的密排面将过渡元素的碳化物或氮化物八面体分隔开, 因而在晶体结构上属于微观层状结构。这种独特的结构赋予这种材料非常独特的性能, 能够融金属和陶瓷材料的优点于一体: 一方面这种材料具有高导电、导热、可加工、高温下塑性变形等金属材料的特性, 另一方面又具有耐高温、抗氧化、抗抗震等陶瓷材料的特性。目前, 这类材料的研究重点是: 高纯块体材料的合成和制备技术、性能的评价和表征、材料的内在特性研究, 以及由这类材料衍生出的新材料体系和应用的研究等。

(5) 低成本、高性能先进陶瓷的制备工艺技术

先进结构陶瓷的研究已经达到相当水平, 但普遍存在的问题仍然是制造成本高, 产品性能一致性、稳定性和可靠性差, 因此很难实现产业化。因此, 各国都很重视制备工艺技术研究, 并取得很大进展。这方面工作的主要内容是: ①低成本、高性能的粉体制备技术, 特别是常用粉体如 Al_2O_3 、 ZrO_2 、 Si_3N_4 、 SiC 、莫来石等的制备技术; ②净尺寸、无有害缺陷制品的成型技术, 这是获得高性能陶瓷的核心工艺; ③先进陶瓷的复合技术研究

和生产装备的研制开发。

(6) 先进陶瓷的性能评价及标准化

先进陶瓷要实现产业化、在实际工程中得到应用,必须建立一套完善的质量评价体系和标准。随着越来越多的先进陶瓷的成熟和实际应用,积极开展无损检测技术、寿命评价技术、性能测定标准化等研究是十分重要的。

1.2 多相复合陶瓷的出现和发展前景

材料、能源、信息和环境是当代科学技术关注的热点领域。随着材料科学的发展,各种优良的新材料不断出现,并得到广泛应用。同时,科学技术的进步对材料性能又提出了更高的要求,如要求材料具有高强、高韧、高硬、轻质,而且应尽量具有较低的制造成本等。要满足上述要求,一方面可以在传统材料上进行改进,另一方面就是采用多相复合,设计并制备出新型的材料。

自古以来材料就是人类文明程度和社会进步的标志。人类的历史曾以当时使用的代表性材料命名,如“石器时代”、“青铜器时代”、“铁器时代”等。人类社会发展的历史证明,材料是人类生存和发展的物质基础,也是人类社会现代化的重要支柱,是科学技术发展的基础与先导。从现代科学技术发展史可以看到,每一项重大的新技术发现,往往都有赖于新材料的发展。材料科学技术的每一次重大突破,都会引起生产技术的革命,大大加速社会发展的进程,并给社会生产和人们生活带来巨大的变化。可以说“材料发展的历史就是人类的历史,人类的历史也是材料发展的历史”。图 1-1 展示了人类、材料与科技的发展史。

长期以来,材料研究和制造主要是靠经验的思维方式进行的。到了 19 世纪,材料科学学科在其他基础科学发展的基础上逐步形成,材料研究可以借助于材料科学理论的指导,在一定程度上达到知其然和知其所以然,因而大大提高了材料研究的水平并缩短了新材料研究的周期,这是材料研究走上科学发展的标志。材料从多相材料到单相材料,又发展到更深意义上的多相材料,这种波浪式的前进完全符合事物发展的规律,因此,这也是材料发展的必然趋势。

由两种或两种以上的物相所组成的材料就是多相材料,这里所指的物相有广泛的含义,它们可以是同类的,也可以是不同类的。多相复合陶瓷是近年来在复相陶瓷基础上发展起来的,是涉及复合组分类型更宽、工艺与结

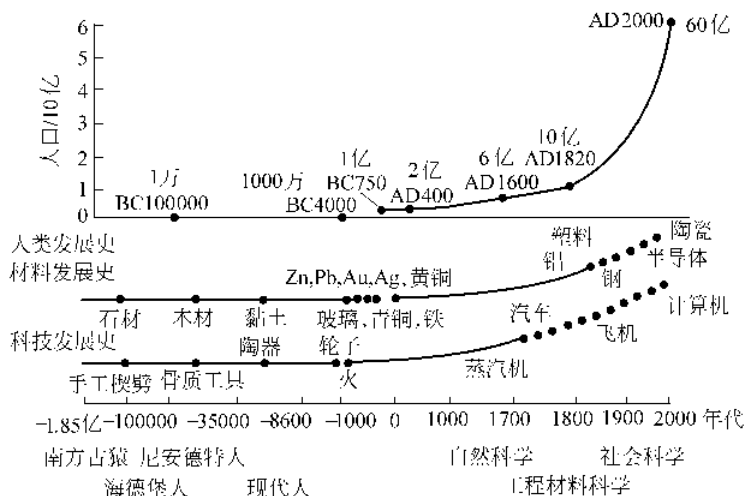


图 1-1 人类、材料与科技的发展史(Kostorz,1989; 谢征芳,2000)

(图上 BC 表示公元前,AD 表示公元)

构可调控、优势性能可协同挖潜的一类新型实用的多相材料,也是一种广义的陶瓷基复合材料。对多相复合陶瓷的主要要求是:首先,要求所制得的材料能满足实际使用的需要;其次,要求性能的高稳定性;第三是低成本的制作,这才是材料的生命力所在。多相复合陶瓷由于其组成和结构的可调性,因而更容易满足低成本的制作工艺要求并保证性能的稳定性。

在多相复合陶瓷材料系统的研究和应用中,应该着重考虑下面几个问题:①对两相间的结合状态和相容性应如何考虑?是强结合好还是弱结合好?②对两相间的反应是利用这些反应还是避免或抑制它?③第二相的引入是以连续相为佳还是非连续相为好?第二相是哪一种形态为好?是粒状、针状、板状还是纤维状?④采用新工艺新技术降低制造成本是否有可能?之所以考虑这些问题,是因为材料研究的最终目的是为了应用。只求实用而不一定要求其完善,以满足使用上的要求为目的,这是符合经济之道的。相反,盲目地追求材料的高性能与完善,不仅是浪费,有时还可能弄巧成拙。而理论研究则尽可能求其严密,但也不忽视它的应用范畴。

复合材料是由基体组元和增强体经一定的工艺制备而成的材料。基体组元是有机高聚物材料的复合材料称为树脂基复合材料;基体组元为金属材料的复合材料称为金属基复合材料;基体组元为陶瓷材料(无机非金属材料)的复合材料称为陶瓷基复合材料。增强体可以是有机高分子材料、金属

材料或无机非金属材料,其形态可以是长纤维、短纤维、晶须、晶片或颗粒等。广义地讲,基体组元为无机非金属的复合材料称为无机非金属基复合材料。

陶瓷基复合材料是多相复合陶瓷中的一种,但不是全部。多相复合陶瓷可以是加入第二相对基体进行补强增韧的陶瓷基复合材料;也可以是两种不同功能的基体相复合而同时具有两种功能,如 $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ 具有高强度但硬度低,而 $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$ 具有高硬度但强度低,这两相复合后即可获得既高强又高硬的复合陶瓷;也可以通过结构设计和特殊工艺将两种物相复合为层状陶瓷或梯度功能陶瓷;还可以是两种基体相复合时发生化合作用并产生某些新相,进而构成的新型多相复合陶瓷等。

多相复合陶瓷由于具有耐高温、耐磨、抗高温蠕变、低热膨胀系数、耐化学腐蚀等优点,因此,随着高技术的发展,多相复合陶瓷成为结构复合材料中最为活跃的研究领域,在 20 世纪 80 年代以后得到迅速发展。多相复合陶瓷主要用作机械加工材料、耐磨材料、高温发动机燃烧室及连接杆、航天器保护材料、轻型装甲材料、分离和过滤材料等。但是,多相复合陶瓷的研究和应用的历史还比较短,加之其所涉及的学科领域和专业知识面很广,因而有很多理论问题和工艺技术问题尚需深入研究。

在材料研究的系统中,多相材料并不局限于单一类材料,它可以是不同类型材料的组合,有很宽的选择余地,诸如陶瓷/金属、陶瓷/聚合物、金属/聚合物等系统。在 20 世纪已经有多相组合陶瓷材料的研究报道,形成了一大类多相复合材料,它们都表现出较之单相材料更为优异的性能。在多相材料的研究中,可以将 21 世纪的热点领域作为重点研究的对象,如信息领域、能源领域、生物领域和环保领域都会涉及不同性能要求的材料。由于多相材料在组分和结构上具有可调性,因而易于实现性能可调,可以按照使用性能的要求制作出适宜的材料。材料的多功能或特异功能,正是多相材料受到人们青睐的原因所在,相信多相材料必将在 21 世纪的发展中崭露头角,展示它的光芒!

1.3 本书的主要内容

本书内容共有 7 章,第 1 章为绪论。

第 2 章介绍多相复合陶瓷的定义和分类方法,介绍构成多相复合陶瓷的两大类主要原材料,即基体材料和增强体材料的种类和基本特性;总结多相复合陶瓷的强韧化机理及进一步研究方向;分析并提出多相复合陶瓷

的几种显微结构设计模型。

第3章论述晶须补强增韧多相复合陶瓷。在这一章里,首先介绍陶瓷晶须增强体的种类及其特性,描述晶须补强增韧多相复合陶瓷的增韧机理及其影响因素;继而提出晶须补强增韧多相复合陶瓷的设计要点,阐述晶界和界面的设计和调控方法;接着重点介绍这类陶瓷的制备工艺,提出了晶须方位角与增韧机理的关系模型及晶须定向排布的工艺方法;最后介绍常见的几种晶须补强增韧多相复合陶瓷材料及其主要应用。

第4章阐述颗粒弥散增韧多相复合陶瓷。本章介绍了颗粒弥散强化增韧多相复合陶瓷的设计思想和要点,以及颗粒弥散强化增韧的机理;阐述了多颗粒、多层次微观复合内应力表征与强韧化设计以及断裂分形微观韧化的理论;分析了颗粒弥散强韧化多相复合陶瓷的制备工艺及其优化;论述了颗粒弥散强化增韧多相复合陶瓷的组成、结构优化设计及性能分析;最后给出了几种应用实例。

第5章讨论 ZrO_2 相变增韧陶瓷。本章介绍了氧化锆的结构和基本性质,重点介绍了 ZrO_2 超细粉体的制备方法;阐述了 ZrO_2 相变增韧机理及几种典型的氧化锆相变增韧陶瓷;重点分析了氧化锆相变增韧陶瓷的特异性能,如形状记忆效应和伪弹性特性;总结了氧化锆相变增韧研究中具有开创性的相变力学研究,提出了陶瓷增韧力学中的相变准则;最后给出了几种相变增韧陶瓷的应用实例。

第6章是对仿竹木结构的纤维独石复合陶瓷进行的分析。本章介绍了纤维独石结构复合陶瓷的概念和设计要点,讨论了这种陶瓷的制备工艺;重点阐述了一维定向排布、二维片层垂直交叉排布及 $0^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ/0^\circ$ 排布的 $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{BN}$ 纤维独石复合陶瓷的结构与性能,包括 $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{BN}$ 纤维独石结构复合陶瓷的阻力曲线行为和高温性能,以及 $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{BN}$ 纤维独石结构复合陶瓷的抗热震、抗蠕变性质及其断裂模型。

第7章介绍仿贝壳珍珠岩结构的层状复合陶瓷。本章内容包括:仿贝壳珍珠岩结构的层状复合陶瓷的设计思想及设计要点;这种材料的制备工艺技术;介绍层状结构复合陶瓷的结构和性能;讨论 $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{BN}$ 层状结构复合陶瓷的高温力学性能、高温氧化行为、抗蠕变性及机理;介绍 $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{BN}$ 层状结构复合陶瓷界面韧性的测试和表征; $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{BN}$ 层状结构复合陶瓷断裂模型及性能预测;介绍其他几种类型的层状结构复合陶瓷。