

纳米功能材料丛书

NAMI GONGNENG CAILIAO CONGSHU

纳米非金属材料

● 陈 津 魏丽乔 许并社 等编著



化学工业出版社

纳米功能材料丛书
NAMI GONGNENG CAILIAO CONGSHU

纳米非金属材料

陈津 魏丽乔 许并社 等编著



化学工业出版社

· 北京 ·

全书先简要介绍了纳米非金属功能材料的特点、分类及研究进展。接着重点介绍了各种纳米非金属功能材料的特点、性能、制备方法、发展趋势及应用前景等内容,它们包括:

纳米半导体功能材料

纳米陶瓷功能材料

纳米玻璃功能材料

纳米碳纤维功能材料

纳米稀土功能材料

纳米黏土功能材料

纳米功能涂料

本书内容丰富、技术先进实用,可供相关行业技术及管理人员参考使用,也可供大专院校相关专业师生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

纳米非金属功能材料/陈津等编著. —北京:化学工业出版社, 2006.11
(纳米功能材料丛书)
ISBN 978-7-5025-9737-5

I. 纳… II. 陈… III. 纳米材料: 非金属材料-研究
IV. TB383

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 144442 号

责任编辑: 丁尚林

文字编辑: 杨欣欣

责任校对: 于志岩

装帧设计: 于 兵

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 装: 化学工业出版社印刷厂

720mm×1000mm 1/16 印张 16½ 字数 279 千字

2007 年 3 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 38.00 元

版权所有 违者必究

《纳米功能材料丛书》编委会

主 任：许并社

委 员：（按姓氏笔画排序）

卫英慧 王文先 刘旭光 许并社

李瑞丰 陈 津 贾虎生 唐 宾

梁 伟 韩培德 戴晋明 魏丽乔

丛书前言

科学技术的不断进步将人类带入了纳米科技乃至会聚技术 (Converging Technologies) 的新时代。纳米技术使人们可以直接操纵和安排原子、分子而设计新材料, 在纳米尺度范围内认识自然、改造自然, 从而为人类的进步发挥作用。

纳米功能材料是由纳米科技的进步而发展起来的新型材料。纳米功能材料以其多样的结构特征, 受到了材料学科以及其他学科的关注; 纳米功能材料又以优异的物理、化学、力学等性能, 与物理学、化学、材料学、信息和生命科学等学科相互交叉、渗透, 促进了科学技术的进步, 并使新材料自身向着更深层次和更高水平发展。目前, 我国的新材料研究, 已经从不可控的无序组合拓展到可控和高选择性的材料设计; 研究的对象已从简单体系拓展到多体系 (复合) 材料及其界面; 研究的尺度已从宏观延伸至微观乃至超微观; 研究的策略不仅兼顾了学科的自身发展, 而且重视其重大影响和国家长远发展的需要, 注重节约能源, 保护环境, 有利于健康及保护资源和可持续发展。

化学工业出版社长期以来始终关注材料学科的发展, 辛勤组织了这套反映学科发展及纳米功能材料在高新技术领域中应用的丛书, 旨在使读者进一步了解纳米功能材料的特征、制备及其应用。该丛书选题立足于前沿, 方法先进实用, 内容深入浅出。丛书包括《纳米金属功能材料》、《纳米非金属功能材料》、《纳米高分子功能材料》、《纳米信息功能材料》、《新型纳米功能材料》等分册。作者谨期望该套丛书的出版能为推动新材料的研究和发展贡献绵薄之力。

许开社

2007 年 1 月

前 言

纳米科学与技术是 20 世纪 90 年代出现的一门崭新的学科,它涉及很宽的学科领域,包括纳米物理学、纳米化学、纳米电子学、纳米材料科学、纳米机械学、纳米显微学、纳米生物学、纳米测量学和纳米制造工艺学等。

在纳米材料中,纳米非金属功能材料是一枝奇葩。它是指一类具有电导性、半导体性、光电性、压电性、铁电性、耐腐蚀性、化学吸附性、吸气性、耐辐射性等多种功能的新材料。此类材料具有技术含量高、产品更新换代快、品种繁多、附加值高、经济效益明显的特点。可以预期,纳米非金属功能材料将改变人类的生存条件和空间。在今后若干年间,该类材料将会改善人类生活的质量和现状,并将会作为下一次工业革命的推动力。

纳米非金属功能材料按材料的类别通常可分为纳米陶瓷功能材料、纳米玻璃功能材料、纳米半导体功能材料、纳米晶体功能材料、纳米氧化物无机非金属超导材料、纳米氧化物磁性材料等。

全书共分八章。先简要介绍了纳米非金属功能材料的特点、分类及研究进展;接着重点介绍了纳米半导体功能材料、纳米陶瓷功能材料、纳米玻璃功能材料、纳米碳纤维功能材料、纳米稀土功能材料、纳米黏土功能材料的分类及特性、材料制备及应用前景;最后详细介绍了多种纳米功能涂料。

本书第 1 章~第 3 章由陈津编写;第 4 章由李宝碧编写;第 5 章~第 7 章由解小玲编写;第 8 章由晏泓编写。全书由陈津修改、定稿,李宝碧校对文稿和图稿。在本书编写过程中,许并社教授和魏丽乔教授参与了书稿提纲的制定、内容讨论和复核工作,魏丽乔教授协助进行了全书的核校工作。

本书的编写得到了太原理工大学材料科学与工程学院的大力协助。本书对所引用文献的主要作者和间接作者表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,经验不足,加之该领域发展很快,书中难免有不足之处,恳请专家和广大读者批评指正。

编著者

2007 年 1 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 纳米非金属功能材料的特点与分类	1
1.1.1 纳米非金属功能材料基本性能	1
1.1.2 纳米非金属功能材料的分类	2
1.2 纳米非金属功能材料的研究进展	5
1.2.1 合成非金属纳米功能材料	5
1.2.2 天然纳微米非金属功能材料	10
参考文献	13
第 2 章 纳米半导体功能材料	14
2.1 概述	14
2.1.1 从微米半导体迈向纳米半导体	15
2.1.2 聚合物在纳米半导体材料中的作用	18
2.2 纳米半导体的特性	29
2.2.1 光学特性	29
2.2.2 光电催化特性	30
2.2.3 光电转换特性	32
2.2.4 纳米半导体粒子电学特性	33
2.3 纳米半导体器件与纳米电子学	33
2.3.1 低维半导体薄膜的特殊性能	34
2.3.2 纳米器件与纳米电子学	38
2.4 纳米半导体的制备方法、谱学特征及表征	41
2.4.1 纳米半导体的制备方法	41
2.4.2 纳米半导体粒子谱学特性及表征	44
2.5 纳米半导体应用前景	45
参考文献	46

第3章 纳米陶瓷功能材料	47
3.1 概述	47
3.1.1 普通陶瓷及其性能	49
3.1.2 纳米陶瓷及其特性	50
3.1.3 纳米结构陶瓷材料的应用与研发	51
3.2 纳米陶瓷的性能	53
3.2.1 扩散及烧结性能	53
3.2.2 纳米陶瓷的超塑性	54
3.2.3 纳米陶瓷增韧	55
3.2.4 纳米陶瓷粉体中团聚体的消除和抑制	55
3.2.5 高致密素坯的成型	56
3.2.6 纳米陶瓷烧结中晶体生长机制	56
3.3 纳米陶瓷材料的制备方法	58
3.3.1 实验研究的制备方法	59
3.3.2 产业化的生产方法	60
3.3.3 纳米陶瓷制备工艺	60
3.3.4 纳米陶瓷的一般制备技术	62
3.3.5 机械力化学法(高能球磨法)制备技术	65
3.4 纳米陶瓷粉末分散过程和机理	70
3.4.1 单相纳米粉体制备过程中的分散	70
3.4.2 纳米颗粒悬浮液配制中的分散	73
3.4.3 复合粉体制备中的分散	79
3.5 纳米陶瓷复合材料	80
3.5.1 纳米陶瓷复合材料的分类	80
3.5.2 纳米陶瓷复合材料的制备技术	81
3.5.3 纳米陶瓷复合材料的性能评价	82
3.5.4 纳米陶瓷复合材料增韧强化机理	83
3.5.5 纳米并用技术	84
3.6 热喷涂纳米陶瓷层技术	85
3.7 纳米陶瓷的应用前景	91
3.7.1 用作生物材料的纳米陶瓷	91
3.7.2 纳米陶瓷微粉在纺织印染整理中的应用	95
参考文献	98

第4章 纳米玻璃功能材料 99

4.1 概述.....	99
4.1.1 功能玻璃的种类.....	99
4.1.2 纳米功能玻璃	104
4.2 纳米玻璃的特点	106
4.2.1 自洁性	106
4.2.2 光催化性	106
4.2.3 TiO_2 纳米粉及自洁玻璃的主要参数.....	109
4.3 纳米级自洁净玻璃的制备	109
4.3.1 基本原理	109
4.3.2 TiO_2 基薄膜的溶胶-凝胶法制备	110
4.3.3 性能测试	111
4.3.4 生产工艺过程	111
4.4 光催化 TiO_2 薄膜的制备和性能	112
4.4.1 光催化 TiO_2 薄膜的制备	112
4.4.2 TiO_2 薄膜的性能及其光催化机理.....	115
4.4.3 TiO_2 薄膜的应用.....	116
4.5 纳米玻璃的特性	118
4.5.1 纳米自洁净玻璃近红外光谱特性	118
4.5.2 多孔 TiO_2 薄膜自洁净玻璃的亲水性和光催化活性	120
4.6 纳米 TiO_2 的制备方法	128
4.7 纳米玻璃发展前景	131
4.7.1 我国纳米玻璃的产业化	131
4.7.2 纳米玻璃的应用发展前景	131
参考文献.....	133

第5章 纳米碳纤维功能材料..... 134

5.1 概述	134
5.2 纳米碳纤维的性能	135
5.2.1 电镜下纳米碳纤维的显微结构	135
5.2.2 聚丙烯基纳米碳纤维复合材料结晶行为	136
5.3 纳米碳纤维的制备技术	138
5.3.1 静电纺丝技术制备纳米碳纤维	138

5.3.2	节竹状纳米碳纤维的制备	141
5.3.3	气体流动状态对纳米碳纤维制备的影响	143
5.3.4	气相生长纳米碳纤维表面化学镀镍	146
5.3.5	化学气相沉积 (CVD) 一步法制备纳米碳管	150
5.4	纳米碳纤维的应用	152
5.5	纳米碳纤维的发展前景	155
	参考文献	156
第6章	纳米稀土功能材料	157
6.1	概述	157
6.1.1	纳米晶稀土永磁功能材料的发展	157
6.1.2	纳米永磁材料的特点及性能	159
6.2	稀土永磁材料的技术磁参量	161
6.3	微磁学的理论研究	163
6.3.1	一维简化模型	163
6.3.2	二维模型	164
6.3.3	三维模型	166
6.4	纳米稀土永磁粉的制备方法	167
6.4.1	熔体快淬法	167
6.4.2	HDDR 法	169
6.4.3	机械合金化法	170
6.4.4	磁控溅射法	171
6.5	纳米稀土永磁制备工艺	171
6.5.1	添加微量元素对纳米稀土永磁性能的影响	171
6.5.2	快淬工艺对磁粉微结构和磁性能的影响	176
6.5.3	晶化热处理温度和时间对磁粉微结构和磁性能的影响	178
6.6	黏结纳米稀土永磁材料	180
6.6.1	黏结纳米复合磁体的成型工艺	180
6.6.2	胶黏剂	181
6.6.3	黏结磁体的磁性能	183
6.7	纳米土永磁材料的应用	184
6.7.1	在微波通讯技术中的应用	184
6.7.2	在电机工程中的应用	184
6.7.3	在仪器仪表与计时装置中的应用	185

6.7.4	在电声器件中的应用	185
6.7.5	在磁力机械方面的应用	186
6.7.6	在交通运输工程中的应用	186
6.7.7	在磁分离技术中的应用	187
6.7.8	在磁化技术中的应用	187
6.7.9	在磁疗与健身器械方面的应用	188
	参考文献	189
第7章 纳米黏土功能材料		191
7.1	概述	191
7.2	黏土的分类及性质	192
7.2.1	黏土的结构和特性	192
7.2.2	黏土物理特性	193
7.2.3	黏土矿物化学特性	195
7.3	黏土-聚合物纳米复合材料制备	196
7.3.1	有机黏土制备	196
7.3.2	有机插层剂	198
7.3.3	黏土-聚合物纳米复合材料制备方法	200
7.3.4	黏土-聚合物纳米复合材料热力学简析	206
7.4	黏土-聚合物纳米复合材料性能及应用	206
7.4.1	黏土-环氧树脂纳米复合材料	206
7.4.2	黏土-聚酰胺纳米复合材料	209
7.4.3	黏土-聚酯纳米复合材料	211
7.4.4	黏土-聚烯烃纳米复合材料	213
7.4.5	黏土-橡胶纳米复合材料	214
	参考文献	216
第8章 纳米功能涂料		219
8.1	概述	219
8.2	改性纳米复合涂料的制备	221
8.2.1	纳米粒子的改性	221
8.2.2	改性纳米涂料的制备	228
8.3	纳米抗菌涂料	229
8.3.1	抗菌机理	229

8.3.2 复合抗菌剂	231
8.4 纳米光催化涂料	234
8.5 纳米耐老化涂料	235
8.5.1 纳米 SiO_x 耐老化涂料	236
8.5.2 纳米 TiO_2 耐老化环保涂料	238
8.5.3 其他纳米耐老化涂料	239
8.6 纳米隐身涂料	240
8.7 纳米导电涂料	242
8.8 特殊纳米界面涂料	243
8.8.1 超双亲界面物性材料	243
8.8.2 超双疏性界面物性材料	244
8.9 其他纳米功能涂料	245
8.9.1 超顺磁性涂料	245
8.9.2 效应型纳米涂料	245
8.9.3 纳米耐高温防火涂料	246
8.9.4 高强度纳米涂料	246
8.10 纳米功能涂料的发展趋势	247
参考文献	249

第 1 章 绪 论

纳米材料一般指尺寸为 $1\sim 100\text{nm}$ ，处于原子团簇和宏观物体交接区域内的粒子。而从原子团簇制备材料的方法，称为纳米技术。纳米材料由于具有表面效应、体积效应、量子尺寸效应和宏观量子隧道效应而产生奇异的力学、电学、磁学、热学、光学和化学活性等特性，它既是一种新材料又是新材料的重要原料。

纳米技术可使许多传统产品“旧貌换新颜”，把纳米颗粒或者纳米材料添加到传统非金属材料中，形成纳米非金属材料，可改进或获得一系列的功能。例如，在化纤制品和纺织品中添加纳米微粒，可以除味杀菌；利用纳米技术生产的无菌餐具、无菌扑克牌、无菌纱布等产品已经面世；化纤布料应用纳米技术，加入少量的金属纳米微粒可以摆脱因摩擦而引起烦人的静电现象；涂料使用纳米技术，许多指标都大幅度提高，外墙涂料的耐洗刷性由原来的一千多次提高到了上万多次，老化时间也延长了两倍多；玻璃和瓷砖表面涂上纳米薄层，可以制成自洁玻璃和自洁瓷砖，任何油污在表面上的物质在光的照射下，经过纳米的催化作用，可以变成气体或者容易被擦掉的物质。

纳米非金属功能材料具有电导性、半导体性、光电性、压电性、铁电性、耐腐蚀、化学吸附性、吸气性、耐辐射性等多种功能。这一类材料品种繁多，具有技术含量高、产品更新换代快、附加值高、经济效益明显的特点。

1.1 纳米非金属功能材料的特点与分类

1.1.1 纳米非金属功能材料基本性能

纳米非金属功能材料按其显示功能的过程可分为一次功能和二次功能。

一次功能是指当向材料输入的能量和从材料输出的能量属于同种形式时，材料起能量传送部件作用，又称载体材料，主要有：a. 力学功能如惯性、黏性、流动性、润滑性、成型性、超塑性、高弹性、恒弹性、振动性和防震性；b. 声功能如吸声性、隔声性；c. 热功能如隔热性、传热性、吸热性和蓄热性；d. 电功能如导电性、超导性、绝缘性和电阻；e. 磁功能如软磁性、

硬磁性、半硬磁性；f. 光功能如透光性、遮光性、反射性、折射性、吸收性、偏振性、聚光性、分光性；g. 化学功能如催化作用、吸附作用、生物化学反应、酶反应、气体吸收；h. 其他功能如电磁波特性和（常与隐身相联系）、放射性。

二次功能是指当向材料输入的能量和输出的能量属于不同形式时，材料起能量转换部件作用，又称高次功能，主要有：a. 光能与其他形式能量的转换，如光化反应、光致抗蚀、光合成反应、光分解反应、化学发光、感光反应、光致伸缩、光生伏特效应、光导电效应；b. 电能与其他形式能量的转换，如电磁效应、电阻发热效应、热电效应、光电效应、场致发光效应、电光效应和电化学反应；c. 磁能与其他形式能量的转换，如热磁效应、磁冷冻效应、光磁效应和磁性转变；d. 机械能与其他形式能量的转换，如压电效应、磁致伸缩、电致伸缩、光压效应、声光效应、光弹性效应、机械化学效应、形状记忆效应和热弹性效应。

1.1.2 纳米非金属材料分类

纳米非金属材料种类较多，按材料的类别通常可分为：纳米陶瓷功能材料、纳米玻璃功能材料、纳米半导体功能材料、纳米晶体功能材料、纳米氧化物无机非金属超导材料、纳米氧化物磁性材料等。

(1) 纳米陶瓷功能材料

陶瓷材料是人类最早使用的材料之一，在日常生活及工业生产中起着举足轻重的作用。陶瓷是由晶粒和晶界所组成的烧结体。由于工艺上的原因，很难避免材料中存在气孔和微小裂纹，因而质地较脆，韧性、强度较差，使其应用受到了较大的限制。纳米陶瓷功能材料的产生有望克服陶瓷材料的上述缺点，使陶瓷具有像金属一样的柔韧性和可加工性。

要制备纳米陶瓷功能材料，需要解决下列问题：粉体尺寸、形貌和分布的控制；团聚体的控制和分散；块体形态、缺陷、粗糙度以及成分的控制等。

大量研究表明，纳米陶瓷功能材料具有超塑性。超塑性是指材料在一定的应变速率下产生较大的拉伸应变。其原因是在较低温度下，纳米陶瓷晶粒很小，使材料中的内在气孔或缺陷尺寸大大减少，材料不易造成穿晶断裂，有利于提高材料的断裂韧性；同时又使晶界数量大大增加，有助于晶粒间的滑移，使材料具有很高的扩散蠕变速率，当受到外力后能迅速做出反应，造成晶界方向的平移，使纳米陶瓷表现出独特的超塑性。

许多纳米陶瓷在室温或较低温度下就可发生塑性变形，如纳米 TiO_2 陶

瓷在室温下就能发生塑性形变,在 180°C 下塑性变形可达 100% ,即使是带裂纹的 TiO_2 纳米陶瓷也能经受一定程度的弯曲而裂纹不扩展。上海硅酸盐研究所研究发现,掺杂 Y_2O_3 的四方氧化锆多晶体纳米陶瓷功能材料,当晶粒尺寸为 150nm 时,材料可在 1250°C 下呈现超塑性,且起始应变速率达到 $3\times 10^{-2}\text{s}^{-1}$,压缩应变量达 380% ,并从断口侧面观察到了大量通常出现在金属断口的滑移线。对晶粒尺寸为 350nm 的 3Y-TZP 陶瓷进行循环拉伸试验,发现在室温下就已出现形变现象。纳米 Si_3O_4 陶瓷在 1300°C 下即可产生 200% 以上的形变。另外,纳米 ZnO 陶瓷也具有超塑性性能。纳米陶瓷功能材料的硬度和强度也明显高于普通材料。在 100°C 下,纳米 TiO_2 陶瓷的显微硬度为 1.275MPa (1300kgf/mm^2),而普通 TiO_2 陶瓷的显微硬度低于 0.196MPa (200kgf/mm^2)。

虽然纳米陶瓷功能材料还有许多关键技术需要解决,但其优良的室温和高温力学性能、抗弯强度、断裂韧性,使其在切削刀具、轴承、汽车发动机部件等诸多方面都有广泛的应用,并在许多超高温、强腐蚀等苛刻的环境下起着其他材料不可替代的作用,具有广阔的应用前景。

(2) 纳米高分子功能材料

纳米高分子功能材料也可以称为高分子纳米微粒或高分子超微粒。聚合物微粒尺寸减少到纳米量级后使高分子的特性发生了很大的变化,主要表现在表面效应和体积效应两方面。这两种效应反映在纳米高分子材料功能上,表现为比表面积剧增,粒子上的官能团密度和选择性吸附能力变大,达到吸附平衡的时间大大缩短,粒子的胶体稳定性显著提高。

井新利以TritonX-100为乳化剂、正己醇为助乳化剂,得到了以苯胺盐酸盐为水相、正己烷为分散介质的反相微乳液,然后再以过硫酸铵为氧化剂,合成了导电聚苯胺纳米粒子。英才和赵艺强分别用微乳液聚合法制备了粒径小于 100nm ,相对分子质量大于 10^5 的聚-4-乙烯吡啶纳米粒子和基于高分子疏水纳米粒子(PMMA和PEMA等)的物理水凝胶。

(3) 非金属纳米复合功能材料

目前,纳米复合功能材料已成为开发功能材料的主导方向,纳米微粒在光纤、压电、形状记忆、永磁材料、磁致伸缩、传导聚合物、可调介电等方面,尤其是在仿生材料的开发方面,已经显示出深厚的发展潜力。按基体不同,它可分为聚合物基纳米复合功能材料、陶瓷基纳米复合功能材料和金属基纳米复合功能材料三种。

① 聚合物基纳米复合功能材料 聚合物/无机纳米粒子复合材料的制备方法主要有溶胶-凝胶法、溶液共混法、嵌入法和熔融共混法或直接分散法

四种。

制备聚合物基纳米复合功能材料的主要目的之一是实现了对聚合物的增强增韧，它是刚性微粒增韧方法的延伸和发展。用传统的增韧材料——有机弹性体增韧材料时，在提高抗冲击性能的同时会造成诸如拉伸强度等相关性能的下降。而用纳米材料增韧改性塑料，效率高，改性效果好。一般纳米微粒的加入量在 10 份以下，冲击强度增幅最高可达 5 倍以上，而且增韧与增强同步进行。需要注意的是，纳米材料的比表面积十分大且配位严重不足，从而表现出强活性，极易凝聚，影响改性效果。为使纳米微粒在基体中分散均匀，必须加入分散处理剂。如罗忠富和刘竞超都发现，纳米微粒经表面处理剂适当处理后制得的纳米 $\text{CaCO}_3/\text{HDPE}$ 复合材料和纳米 $\text{SiO}_2/\text{环氧树脂}$ 复合材料的力学性能比未处理时要好得多。聚合物/黏土类纳米复合材料也是一类研究较为广泛的有机-无机纳米复合材料，它在无机物含量远少于常规填充复合材料的情况下就可以具有较好的力学性能、阻隔性能和热稳定性等，并且具有阻燃性和各向异性。

太阳光中 280~400nm 波段的紫外线能使高分子链断裂，使材料迅速老化。而在塑料中添加某些纳米材料，如纳米 SiO_2 与 TiO_2 适当混配的产物就能大大延缓材料的老化。在聚丙烯中加入 0.3% 的 UV-Ti/TAN-P580 纳米 TiO_2 ，经过 700h 热光照射后，其拉伸强度仅损失 10%，而未加的损失达 50%。

纳米材料的出现，也为新型功能性材料的制备提供了强有力的技术手段。如将吸收紫外线的 UV-Ti/TAN-P580 纳米 TiO_2 加入合成纤维中，就能制得抗老化的合成纤维，用它做成的服装和其他用品具有排除对人体有害的紫外光的功效。又如国家超细粉末工程中心研制的 FUMAT-T108 超细抗菌粉体，它可赋予树脂制品抗菌能力。纳米材料不仅能提高涂料的抗老化性，同时还能提高涂料的强度和光洁度。另外，还可以作为密封胶，胶黏剂的添加剂，以提高其固化速率，改善粘接效果。

② 陶瓷基纳米复合功能材料 在陶瓷基体中引入纳米分散相进行复合，可大幅度提高材料的断裂强度和断裂韧性，同时材料的硬度、弹性模量、抗热震性以及耐高温性能均有一定程度的提高。例如纳米 SiC 弥散到 Si_3N_4 基体中形成的纳米复合材料，其韧性常数 K_{ic} 为 $4.5\sim 7.5\text{MPa}^{1/2}$ ，断裂强度 σ_{S} 为 $850\sim 1400\text{MPa}$ ，最高工作温度可达 $1200\sim 1500^\circ\text{C}$ 。另据报道，用烧结技术制成的碳纤维增强 SiC-Sialon 纳米复合陶瓷材料与碳纤维增强 Sialon 微米复合材料相比，其强度和韧性也得到较大改善。

1.2 纳米非金属材料的研究进展

1.2.1 合成非金属纳米功能材料

1.2.1.1 合成非金属纳米功能材料的应用

(1) 在生物医学工程中的应用

① 在生物材料和人工器官方面 纳米碳纤维不仅具有低密度、高比模量、高比强度、高导电性等优良性能，而且还具有缺陷数量极少、比表面积大、结构致密等特点。利用纳米碳纤维材料的这些超常特性和它良好的生物相容性，可使碳质人工骨、人工齿、人工肌腱的强度、硬度、韧性等性能显著提高。纳米陶瓷材料在人工器官制造和临床应用方面也有着广泛的应用前景。

② 在免疫分析方面 载体材料的选择十分关键。而纳米聚合物粒子，尤其是那些具有亲水性表面的粒子，对非特异性蛋白的吸附量很小，已作为新型的标记物载体使用。

③ 介入性诊断治疗和药物控制释放方面 研究人员发现，构成生命要素之一的核糖核酸蛋白质复合体，其粒度在 15~20nm 之间，生物体内的多种病毒也是纳米粒子。10nm 以下的粒子比红细胞 (6~9 μ m) 小得多，可以在血管中自由运动，因此，如果将各种对机体无害的纳米粒子注入到血液中，输送到人体的各个部位，可以作为监测和诊断疾病的手段。动物实验结果表明，载有地塞米松等药物的乳酸-乙醇酸共聚物的纳米粒子，可以有效治疗动脉狭窄；用金的纳米粒子进行定位病变治疗，可以减少副作用等。若把药物复合到无毒的磁性纳米颗粒上，这种药物可在外磁场作用下集中于病灶部位，提高药效。另外，利用纳米颗粒作为载体的病毒诱导物已取得了突破性进展，现已用于临床动物实验，估计不久的将来即可服务于人类。

纳米粒子具有较高的胶体稳定性和优异的吸附性能，并能较快地达到吸附平衡，这可以直接用于生物物质的吸附分离。科研人员已经成功利用纳米 SiO₂ 微粒进行了细胞分离，磁性纳米颗粒可以分离癌细胞，成为治疗癌症有效的辅助疗法。在血液净化方面。利用纳米碳材料的高效吸附特性，可用于血液净化系统，清除某些病毒或成分。纳米微粒还为细胞染色技术提供了新途径。大大提高了观测细胞组织的分辨率。同细胞一样大小的纳米颗粒在控制分裂、发酵、分离等工程上的应用也正在开发之中。