



工程材料应用技术丛书

工程陶瓷 及其应用

樊新民 张骋 蒋丹宇 编著

机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



工程材料应用技术丛书

工程陶瓷及其应用

樊新民 张 骋 蒋丹宇 编著



机械工业出版社

本书主要介绍了工程陶瓷材料的类型、性能特点及其应用。内容包括：工程陶瓷的性能、氧化物陶瓷、非氧化物陶瓷、金属陶瓷，以及工程陶瓷材料在机械工业、发动机和化工行业中的应用。本书叙述简明扼要、层次清晰、内容丰富翔实，是一本应用性强、技术新的工程陶瓷应用技术图书。

本书可供机械、化工等领域的工程技术人员、管理人员及购销人员使用，也可供相关专业的在校师生和研究人员参考。

图书在版编目（CIP）数据

工程陶瓷及其应用/樊新民等编著. —北京：机械工业出版社，2006. 6
（工程材料应用技术丛书）
ISBN 7 - 111 - 19208 - 7

I. 工... II. 樊... III. 陶瓷 - 工程材料
IV. TB321

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2006）第 052352 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037）
责任编辑：陈保华 版式设计：张世琴 责任校对：姚培新
封面设计：马精明 责任印制：洪汉军
北京京丰印刷厂印刷
2006 年 7 月第 1 版 · 第 1 次印刷
169mm × 239mm · 5.125 印张 · 196 千字
0 001—4 000 册
定价：18.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换
本社购书热线电话（010）68326294
编辑热线电话（010）68351729
封面无防伪标均为盗版

前 言

陶瓷是一种古老的材料。传统陶瓷采用石英、长石和粘土等无机非金属天然矿物为原料,经粉碎、混合、磨细、成形、干燥、烧成等传统工艺制成。传统陶瓷由于具有优良的耐蚀性和耐老化性,长期以来主要被用做日用器皿和建筑、卫生制品。现代的先进陶瓷采用各种微米级或亚微米级高纯人工合成的氧化物、碳化物、氮化物、硼化物、硅化物、硫化物等无机非金属物质为原料,采用精密控制的成形与烧结工艺制成,性能远远优于传统陶瓷。

陶瓷材料与金属材料、高分子材料三足鼎立,并称为三大材料。它们具有各自的性能特点。在选用材料时,只有充分了解每种材料的性能特点,才能够充分发挥它们各自的长处,做到量材使用。工程陶瓷具有高硬度、高熔点、高弹性模量、低密度、低热膨胀系数、抗腐蚀和抗氧化等特点,还具有优良的耐磨性和耐热性、高温强度高及环境耐久性优良的特点。它们在机械、化工、汽车、冶金以及航空、航天等领域得到愈来愈广泛的应用。工程陶瓷的最大缺点是韧性低,塑性变形能力差,不宜成形加工,使其在工程方面的应用受到一定限制。因此,陶瓷材料的韧化是陶瓷材料的重要研究方向之一。

本书系统地介绍了工程陶瓷材料的主要类型、性能特点及其应用。内容包括:工程陶瓷的性能、氧化物陶瓷、非氧化物陶瓷、金属陶瓷,以及工程陶瓷材料在机械工业、发动机和化工行业中的应用。本书叙述简明扼要、层次清晰、内容丰富翔实,是一本应用性强、技术新的工程陶瓷应用技术图书。希望本书能够使读者在认识和了解陶瓷的基础上,更好地应用陶瓷。本书可供从事设计和选材工作的工程技术人员及相关的管理和购销人员使用,也可供相关专业的大专院校师生和研究人员参考。

本书第1、4章由南京理工大学樊新民教授撰写,第3、5、7章由上海应用技术学院张骋教授撰写,第2、6章由中国科学院上海硅酸盐研究所蒋丹宇研究员撰写,全书由樊新民统稿。在本书的撰写中,参考了国内外许多学者的专著和论文,在此特向有关作者表示感谢。

作 者
2006年6月

目 录

前言

第1章 工程陶瓷的性能	1
1.1 先进陶瓷与传统陶瓷	1
1.2 陶瓷材料的力学性能	4
1.2.1 弹性模量	4
1.2.2 强度	7
1.2.3 硬度	10
1.2.4 摩擦与磨损	10
1.2.5 断裂韧性	11
1.3 陶瓷材料的热性能	11
1.3.1 熔点与最高使用温度	11
1.3.2 热导率	13
1.3.3 线膨胀系数	15
1.3.4 抗热震性	15
1.4 陶瓷材料的化学性能	17
1.5 陶瓷材料的电性能	18
1.5.1 导电陶瓷	18
1.5.2 介电陶瓷或绝缘体陶瓷	18
1.5.3 半导体陶瓷	21
1.5.4 超导陶瓷	21
第2章 氧化物陶瓷	23
2.1 氧化铝陶瓷	23
2.1.1 氧化铝陶瓷的类型	23
2.1.2 氧化铝陶瓷的性能	24
2.1.3 氧化铝陶瓷的制备方法	27
2.1.4 氧化铝陶瓷的应用	29
2.2 氧化锆陶瓷	33
2.2.1 氧化锆陶瓷的性能	33
2.2.2 氧化锆陶瓷的制备方法	36
2.2.3 氧化锆陶瓷的应用	38
2.3 其他氧化物陶瓷	41
2.3.1 莫来石陶瓷	41

2.3.2 氧化镁陶瓷	42
2.3.3 氧化铍陶瓷	43
2.4 复相氧化物增韧陶瓷	46
2.4.1 氧化锆增韧氧化铝陶瓷	46
2.4.2 金属间化合物增韧氧化铝	46
2.4.3 氧化锆增韧补强羟基磷灰石生物陶瓷复合材料	47
2.4.4 氧化锆与铁铝间化合物陶瓷复合材料	47
第3章 非氧化物陶瓷	49
3.1 氮化物陶瓷	49
3.1.1 氮化硅陶瓷	49
3.1.2 氮化铝陶瓷	59
3.1.3 氮化硼陶瓷	62
3.2 碳化物陶瓷	65
3.2.1 碳化硅陶瓷	65
3.2.2 碳化硼陶瓷	69
3.2.3 碳化钛陶瓷	71
3.3 其他非氧化物陶瓷	73
3.3.1 二硼化锆陶瓷	73
3.3.2 赛隆 (Sialon) 陶瓷	74
3.3.3 二硅化钼陶瓷	76
第4章 金属陶瓷	77
4.1 金属陶瓷的特点	77
4.2 氧化物基金属陶瓷	79
4.2.1 氧化铝金属陶瓷	80
4.2.2 氧化镁金属陶瓷	81
4.2.3 氧化锆金属陶瓷	82
4.3 碳化物基金属陶瓷	82
4.3.1 碳化钛金属陶瓷	82
4.3.2 碳氮化钛基金属陶瓷	83
4.3.3 其他碳化物金属陶瓷	84
4.4 氮化物基金属陶瓷	84
第5章 陶瓷材料在机械工业中的应用	86
5.1 陶瓷刀具的类型与特点	86
5.1.1 陶瓷刀具的发展	86
5.1.2 陶瓷刀具材料的种类	87
5.1.3 陶瓷刀具的性能特点	88
5.2 氧化铝陶瓷刀具	88

VI 工程陶瓷及其应用

5.2.1 纯氧化铝陶瓷刀具	88
5.2.2 氧化铝基陶瓷刀具	89
5.2.3 碳化硅晶须增韧氧化铝复合陶瓷刀具	91
5.2.4 氧化锆增韧氧化铝陶瓷刀具	92
5.2.5 铁-铝/氧化铝陶瓷复合刀具	93
5.2.6 其他氧化铝陶瓷刀具	94
5.3 氮化硅基陶瓷刀具	95
5.3.1 氮化硅陶瓷刀具	95
5.3.2 氮化硅/碳化钛复合陶瓷刀具	96
5.3.3 赛隆陶瓷刀具	97
5.3.4 晶须增韧氮化硅陶瓷刀具	98
5.4 新型陶瓷刀具	99
5.4.1 梯度功能陶瓷刀具	99
5.4.2 陶瓷-硬质合金复合刀片	99
5.4.3 粉末表面涂层陶瓷刀具	100
5.5 金属陶瓷刀具	100
5.5.1 氧化铝-碳化物金属陶瓷刀具	100
5.5.2 氧化铝-氮化物金属陶瓷刀具	101
5.5.3 碳化钛基金属陶瓷刀具	102
5.5.4 碳氮化钛基金属陶瓷刀具	103
5.5.5 硼化物基金属陶瓷刀具	106
5.6 工程陶瓷轴承	107
5.6.1 陶瓷轴承的类型与特点	107
5.6.2 陶瓷轴承的应用	111
5.7 其他陶瓷部件	115
5.7.1 陶瓷模具	115
5.7.2 陶瓷量具	120
5.7.3 拉丝机陶瓷部件	120
第6章 陶瓷材料在发动机中的应用	124
6.1 概述	124
6.2 陶瓷材料在往复式发动机中的应用	126
6.2.1 应用概况	126
6.2.2 陶瓷活塞	128
6.2.3 陶瓷活塞顶	129
6.2.4 陶瓷活塞销	129
6.2.5 陶瓷电热塞	129
6.2.6 陶瓷涡轮增压器转子	130
6.2.7 陶瓷预燃烧室	131

6.2.8 陶瓷气门和气门座	131
6.2.9 陶瓷气缸套	133
6.2.10 陶瓷排气道衬里	133
6.2.11 陶瓷挺柱和挺柱滚轮	133
6.2.12 陶瓷涡流室镶块	134
6.2.13 陶瓷喷油嘴针阀	135
6.3 陶瓷材料在燃气轮机中的应用	135
6.3.1 陶瓷涡轮叶片	137
6.3.2 陶瓷涡轮转子	137
6.3.3 陶瓷喷油嘴	138
6.3.4 陶瓷换热器	138
6.3.5 其他燃气涡轮陶瓷零部件	138
第7章 工程陶瓷材料在化工行业中的应用	140
7.1 陶瓷磨介	140
7.1.1 概述	140
7.1.2 氧化锆陶瓷磨介的制备	141
7.2 陶瓷内衬	141
7.2.1 陶瓷研磨罐内壁	141
7.2.2 陶瓷管道内衬	141
7.3 陶瓷阀门与泵	142
7.3.1 陶瓷阀门	142
7.3.2 陶瓷泵	143
7.4 多孔陶瓷在化工行业中的应用	146
7.4.1 多孔陶瓷简介	146
7.4.2 蜂窝陶瓷催化剂载体	147
7.4.3 泡沫陶瓷过滤器	149
7.4.4 多孔陶瓷在硝酸过滤上的应用	151
7.5 陶瓷换热器	151
参考文献	154

第 1 章 工程陶瓷的性能

1.1 先进陶瓷与传统陶瓷

陶瓷是人类生活和生产中不可缺少的、历史悠久的一种材料。陶瓷材料可分为传统陶瓷和先进陶瓷。传统陶瓷采用石英、长石和粘土等自然界中存在的矿物为原料,经粉碎、混合、磨细、成形、干燥、烧成等传统工艺制成。传统陶瓷包括陶瓷器、玻璃、水泥和耐火材料,化学组成均为硅酸盐类,因此亦称为硅酸盐材料。先进陶瓷采用微米级或亚微米级高纯人工合成的氧化物、碳化物、氮化物、硼化物、硅化物、硫化物等无机非金属材料为原料,采用精密控制的成形与烧结工艺制成,其性能远优于传统陶瓷。近年来先进陶瓷取得了很大发展,备受人们重视,由于这类陶瓷在原料、工艺及性能上均与传统陶瓷有很大的差异,于是出现了许多新名词称呼这类陶瓷,以区别于传统陶瓷,如先进陶瓷(Advanced Ceramics)、新型陶瓷(New Ceramics)、特种陶瓷(Special Ceramics)、工程陶瓷(Engineering Ceramics)、现代陶瓷(Modern Ceramics)、高技术陶瓷(High Technology Ceramics)、高性能陶瓷(High Performance Ceramics)、精细陶瓷(Fine Ceramics)等。各种文献和著作中的名称均不统一,但从本质上来说,所有这些术语具有相同或相近的含义。

先进陶瓷与传统陶瓷主要有以下区别:

1) 在原料上,突破了传统陶瓷以粘土为主要原料的界限,一般以高纯人工合成的氧化物、氮化物、硅化物、硼化物、碳化物等为主要原料。

2) 在成分上,传统陶瓷的组成由粘土的成分决定,不同产地和炉窑的陶瓷有不同的质地。先进陶瓷的原料是纯化合物,成分由人工配比决定,其性质的优劣由原料的纯度和工艺,而不是由产地决定。

3) 在制备工艺上,成形采用热压铸、压力浇注、干压、冷等静压、注射成形、流涎、气相沉积、浸渍等新工艺,烧成上突破了传统陶瓷以炉窑为主要生产手段的界限,广泛采用热压烧结、无压烧结、反应烧结、气氛加压烧结、真空烧结、重烧结、热等静压烧结、微波烧结、自蔓延燃烧烧结、等离子烧结等手段,使烧成材料的晶粒处于微米级水平。

4) 在加工上,传统陶瓷一般不需要二次加工。先进陶瓷烧成后能够进行切割、打孔、磨削、研磨,以及抛光等精密加工和镀膜等处理。

2 工程陶瓷及其应用

5) 在性能上, 先进陶瓷具有不同的特殊性质和功能, 如高强度、耐腐蚀、导电、绝缘, 以及在磁、电、光、声、生物工程各方面具有的特殊功能, 使其在高温、机械、电子、宇航、医学等方面得到广泛的应用。

陶瓷材料按化学成分分为氧化物陶瓷和非氧化物陶瓷, 按用途分为结构陶瓷和功能陶瓷。

氧化物陶瓷种类繁多, 在陶瓷家族中占有非常重要的地位。最常用的氧化物陶瓷是 Al_2O_3 、 SiO_2 、 MgO 、 ZrO_2 、 CeO_2 、 CaO 、 Cr_2O_3 及莫来石 ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) 和尖晶石 (MgAl_2O_4) 等。陶瓷中的 Al_2O_3 和 SiO_2 相当于金属材料中的钢铁和铝合金一样被广泛应用。表 1-1 中列出了一些氧化物陶瓷, 硅酸盐 (如 ZrSiO_4 、 Ca-SiO_3 等)、复合氧化物 (如 BaTiO_3 、 CaTiO_3 等) 亦属此类。

非氧化物陶瓷包括碳化物陶瓷、氮化物陶瓷、硼化物陶瓷等。碳化物陶瓷一般具有比氧化物更高的熔点, 最常用的是 SiC 、 TiC 、 WC 、 B_4C 、 TiC 等。碳化物陶瓷在制备过程中应有气氛保护。氮化物中应用最广泛的是 Si_3N_4 , 它具有优良的综合力学性能和耐高温性能。另外, TiN 、 BN 、 AlN 等氮化物陶瓷的应用也日趋广泛。最近刚刚出现的 C_3N_4 , 其性能可望超过 Si_3N_4 。硼化物陶瓷的应用并不很广泛, 主要是作为添加剂或第二相加入其他陶瓷基体中, 以达到改善性能的目的, 最常用的有 TiB_2 、 ZrB_2 等。

表 1-1 陶瓷按化学成分分类

氧化物陶瓷	Al_2O_3 、 SiO_2 、 MgO 、 Cr_2O_3 、 BeO 、 ZrO_2 、 TiO_2 、 V_2O_5 、 B_2O_3 、 $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 、 Y_2O_3 、 CaO 、 CeO_2 、 $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ 、 BaTiO_3 、 CaTiO_3 、 PbZrTiO_3 、 ZrSiO_4
碳化物陶瓷	SiC 、 TiC 、 WC 、 ZrC 、 B_4C 、 HfC 、 TaC 、 Be_2C 、 UC 、 VC 、 NbC 、 Mo_2C 、 MoC
氮化物陶瓷	Si_3N_4 、 TiN 、 BN 、 AlN 、 C_3N_4 、 ZrN 、 VN 、 TaN 、 NbN 、 ScN
硼化物陶瓷	TiB_2 、 ZrB_2 、 Mo_2B 、 WB_6 、 LaB_6 、 HfB 、 WB 、 ZrB

结构陶瓷作为结构材料用来制造结构零部件, 主要利用其力学性能, 如强度、韧性、硬度、模量、耐磨性、耐高温性能 (高温强度、抗热震性、耐烧蚀性) 等。上面讲到的按化学成分分类的四种陶瓷大多数均为结构陶瓷, 如 Al_2O_3 、 Si_3N_4 、 ZrO_2 都是力学性能优越的代表性结构陶瓷材料。表 1-2 列出结构陶瓷的分类、特性和用途。

功能陶瓷作为功能材料用于制造功能器件, 主要利用其物理性能, 如电性能、磁性能、热性能、光性能、生物性能等。例如铁氧体、铁电陶瓷主要利用其电磁性能, 用来制造电磁元件; 介电陶瓷用来制造电容器; 压电陶瓷用来制作位移或压力传感器; 固体电介质陶瓷利用其离子传导特性, 可以制作氧探测器; 生物陶瓷用来制造人工骨骼和人工牙齿等。高温超导材料和玻璃光导纤维也属于功

能陶瓷的范畴。表 1-3 列出功能陶瓷的分类、特性和用途

表 1-2 结构陶瓷的分类、特性和用途

分 类		材 料	特 性	用 途
氧化物陶瓷		Al_2O_3 、 MgO 、 ZrO_2 、 SiO_2 、 BeO 、莫来石	高强度、高硬度、高韧性、高导电性、耐磨性	各种受力构件、机床零件、拉丝模具、刀具、测量工具
非氧化物陶瓷	碳化物	SiC 、 B_4C 、 TiC	耐高温、超硬性、抗热震、抗氧化	汽车发动机零件、燃气轮机叶片、高温润滑材料、耐磨材料、耐火材料
	氮化物	Si_3N_4 、 BN 、 AlN		
	硅化物	MoSi_2 、 TiSi_2		
	硼化物	ZrB_2 、 TiB_2		
纳米陶瓷		纳米氧化物、非氧化物	超塑性、高韧性	各种高性能结构零件
低膨胀陶瓷		堇青石、锂辉石、钛酸铝	$\alpha < 2 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	耐急冷、急热结构零件

表 1-3 功能陶瓷的分类、特性和用途

功能	分类	材料	特性	用途
电子陶瓷	绝缘陶瓷	Al_2O_3 、 BeO 、 MgO 、 AlN 、 BN 、 SiC	高绝缘性	集成电路基片、装置瓷、真空瓷、高频绝缘瓷
	介电陶瓷	TiO_2 、 LaTiO_7 、 MgTiO_3	介电性	陶瓷电容器、微波陶瓷
	铁电陶瓷	BaTiO_3 、 SrTiO_3	铁电性	陶瓷电容器
	压电陶瓷	PZT、PT、LNN、 $(\text{PbBa})\text{NaNb}_3\text{O}_{15}$	压电性	换能器、谐振器、滤波器、压电变压器、压电电动机、声纳、点火元件
	热释电陶瓷	PbTiO_3 、PZT	热电性	探测红外辐射计数和温度测定
	敏感陶瓷	热敏	半导性 传感性	热敏电阻（温度控制器）、热保护器
		气敏	传感性	气体传感器、氧探头、气体报警器
		湿敏	传感性	湿度测量仪、湿度传感器
		光敏	传感性	光敏电阻、光传感器、红外光敏元件
		压敏	传感性	压力传感器
	磁性陶瓷	软磁	软磁性	记录磁头、磁芯、电波吸收体
		硬磁	硬磁性	铁氧体磁石
	导电陶瓷	LaCrO_3 、 ZrO_2 、 $\text{Na}-\beta\text{-Al}_2\text{O}_3$ 、 SiC 、 MoSi_2	离子导电性	钠硫电池固体电解质、氧传感器、发热元件
	超导陶瓷	Re-Ba-Cu-O 、 Ca-Sr-Ba-Cu-O 、 Bi-Pb-Sr-Ca-Cu-O	超导性	电力系统、磁悬浮、选矿、探矿、电子

4 工程陶瓷及其应用

(续)

功能	分类	材料	特性	用途
热学、光学 功能陶瓷	耐热陶瓷	Al_2O_3 、 ZrO_2 、 MgO 、 SiC 、 Si_3N_4	耐热性	耐火材料
	隔热陶瓷	氧化物纤维、 ZrO_2 空心球	隔热性	隔热材料
	导热陶瓷	BeO 、 AlN 、 SiC	导热性	基板、散热器件
	透明陶瓷	Al_2O_3 、 MgO 、 BeO 、 Y_2O_3 、 ThO_2 、PLZT	透光性	高压钠灯、红外输出窗材料、激光元件、光存储元件、光开关
	红外辐射陶瓷	SiC 系、 Zr-Ti-Re 系、 Fe-Mn-Co-Cu 系	辐射性	SiC 红外辐射器、红外医疗仪、水活化器、生物助长器
	发光陶瓷	ZnS ： $\text{Ag}/\text{Cu}/\text{Mn}$	光致发光 电致发光	路标标记牌、显示器标记、装饰、电子工业
生物、抗菌 陶瓷	生物惰性	Al_2O_3 、单晶、微晶	生物相容性	人工关节
	生物活性	HAP、TCP	生物吸收性	人工骨材料
	医用陶瓷	压电、磁性、光纤	诊断传感性	用于内科、外科、妇产科、皮肤科的诊断仪器，超声波治疗、诊断、检测器
	银系	沸石载银、磷酸锆载银	抑制和杀灭细菌	抗菌日用瓷、抗菌建筑卫生瓷
	钛系	$\text{TiO}_2 + \text{Re}$	光催化杀菌	抗菌陶瓷制品、抗菌涂料
多孔化学 陶瓷	化学载体	$\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 、堇青石	吸附载体性	固定酶载体、催化剂载体、生物化学反应控制装置
	蜂窝	堇青石、钛酸铝	催化载体性	汽车尾气净化器用催化载体、换热器
	泡沫	高铝、低膨胀材料	过滤用网络多孔性	金属铝液、镁合金液体过滤、轻质隔热材料

1.2 陶瓷材料的力学性能

1.2.1 弹性模量

陶瓷材料多为具有离子键、共价键或混合键的化合物，键合牢固并且有明显

的方向性，其晶体结构复杂而表面能小，因此具有高熔点、高硬度、高刚度、高绝缘性和高耐蚀性，但很难产生塑性变形，脆性大、裂纹敏感性强。陶瓷材料的结构决定了陶瓷材料为脆性材料，在室温下承载时几乎不能产生塑性变形，在弹性变形范围内就产生断裂破坏。陶瓷材料在弹性范围内的应力与应变关系服从胡克定律，拉伸变形时正应力 σ 与应变 ϵ 的关系为

$$\sigma = E\epsilon \quad (1-1)$$

式中， E 为弹性模量。

剪切变形时剪应力 τ 与剪切应变 γ 的关系为

$$\tau = G\gamma \quad (1-2)$$

式中， G 为剪切模量。

受静水压力压缩时，压缩应力 σ 与体积应变 ϵ_V 的关系为

$$\sigma = K\epsilon_V \quad (1-3)$$

式中， K 为体积弹性模量。

E 、 G 、 K 之间的关系如下：

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (1-4)$$

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (1-5)$$

式中， ν 为泊松比。

陶瓷的弹性变形实际上是在外力的作用下，原子在平衡位置产生微小位移的结果。弹性模量反映的是原子间距的微小变化所需外力的大小。弹性变形所需的外力与原子间结合力及结合能有关，因此影响弹性模量的重要因素是原子间结合力，即化学键。表 1-4 列出由单晶的试验数据计算得到的一些多晶陶瓷材料的弹性常数值。表 1-5 列出常见结构陶瓷的弹性模量。由弹性模量的数据可以看出，金刚石具有最高的弹性模量，表明金刚石的结合键（共价键）是所有材料中最强的；其次是以共价键为主的碳化物陶瓷；再其次是氮化物陶瓷；相对较弱的是以离子键为主的氧化物陶瓷。

表 1-4 一些多晶陶瓷材料的弹性常数

材料	晶体类型	E/GPa	G/GPa	K/GPa	ν
C	立方	1022	468	417	0.092
SiC	立方	402	170	210	0.181
TaC	立方	300	118	217	0.270
TiC	立方	437	182	242	0.199
ZrC	立方	407	170	223	0.196
Al_2O_3	立方	402	163	251	0.233

6 工程陶瓷及其应用

(续)

材料	晶体类型	E/GPa	G/GPa	K/GPa	ν
$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{MgO}$	立方	271	107	195	0.268
$\text{BaO} \cdot \text{TiO}_2$	四方	178	67	177	0.332
BeO	四方	397	165	224	0.204
CoO	立方	186	70	185	0.332
$\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	立方	230	91	162	0.263
Fe_2O_3	三方	212	93	98	0.140
MgO	立方	300	128	154	0.175
$2\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$	斜方	201	81	128	0.239
MnO	立方	173	66	154	0.313
SrO	立方	143	59	82	0.210
$\text{SrO} \cdot \text{TiO}_2$	立方	538	266	183	0.010
TiO_2	四方	287	113	206	0.268
UO_2	立方	230	87	212	0.319
ZnO	六方	122	45	143	0.358
$\text{ZrO}_2 \cdot 12\text{Y}_2\text{O}_3$	立方	233	89	204	0.310
SiO_2	三方	95	44	38	0.082
CdS	六方	42	15	59	0.38
PbS	立方	84	33	62	0.27
ZnS	立方	87	33	78	0.31
PbTe	立方	56	22	41	0.27
BaF_2	立方	65	25	57	0.31
CaF_2	立方	108	42	88	0.29
SrF_2	立方	90	35	70	0.29
CsBr	立方	23	8.8	16	0.26
CsCl	立方	25	10	18	0.27
CsI	立方	18	7.1	13	0.27
KCl	立方	25	10	18	0.27
LiF	立方	116	48	67	0.21
NaBr	立方	28	11	19	0.26
NaCl	立方	38	15	25	0.25
NaF	立方	77	31	49	0.24
NaI	立方	20	8.5	15	0.27
RbCl	立方	21	7.5	16	0.29

表 1-5 常见结构陶瓷的弹性模量

材料	E/GPa	材料	E/GPa
金刚石	1000	ZrO_2	160 ~ 241
WC	400 ~ 600	莫来石	50 ~ 145
TaC	310 ~ 550	堇青石	150
WC-Co	400 ~ 530	尖晶石	260
NbC	340 ~ 520	Pyrex 玻璃	69
SiC	450	AlN	310 ~ 350
自结合 SiC	345	$\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$	90
Al_2O_3	390	BN	84
BeO	380	MgO	250
热压 B_4C (气孔率 5%)	289	多晶石墨	10
TiC	379	烧结 MoSi_2 (气孔率 5%)	407
Si_3N_4	220 ~ 320	石墨 (气孔率 20%)	9
SiO_2	94	TiO_2	29

物质熔点的高低反映其原子间结合力的大小。一般来说,弹性模量与熔点成正比。弹性模量一般随温度的升高而降低。另外,陶瓷材料的致密度对其弹性模量影响很大,随着气孔率的增加,陶瓷材料的弹性模量急剧下降。

1.2.2 强度

陶瓷材料的键合特点决定了陶瓷材料在室温下几乎不能产生塑性变形,在受到拉应力作用时,断裂前几乎没有塑性变形,破坏方式为脆性断裂。陶瓷材料常用的强度指标是抗弯强度、抗拉强度和抗压强度。

抗弯强度由弯曲试验测定,它是评定陶瓷材料强度的主要试验方法,分为三点弯曲试验和四点弯曲试验。弯曲试样为矩形断面的长棒状,试样数量最好在 10 个以上。抗拉强度也是设计陶瓷零件的重要判据之一。由于陶瓷材料的脆性大,在拉伸试验时易在夹持部位断裂。此外,夹具与试样轴心不一致时会产生附加弯矩,因而往往测不出陶瓷材料真正的抗拉强度。陶瓷材料的抗弯强度比抗拉强度高 20% ~ 30%。陶瓷材料的抗压强度远大于抗拉强度,两者相差 10 倍左右,因而陶瓷材料特别适合于制造承受压缩载荷作用的零件。表 1-6 列出一些陶瓷材料的力学性能。表 1-7 列出陶瓷材料的抗拉强度、抗压强度及两者的比值。

表 1-6 一些陶瓷材料的强度数值

材料	弹性模量/GPa	抗弯强度/MPa	抗压强度/MPa	抗剪强度 (1000℃)/MPa
Al_2O_3	350 ~ 400	300 ~ 400	280 ~ 350	150
BeO	300	150 ~ 200		150

(续)

材料	弹性模量/GPa	抗弯强度/MPa	抗压强度/MPa	抗剪强度 (1000℃)/MPa
MgO	200 ~ 300	160 ~ 280	500 ~ 600	100
SiO ₂	70	50 ~ 100	700 ~ 1900	100
TiO ₂	100 ~ 200	70 ~ 170	280 ~ 840	120
稳定 ZrO ₂	150 ~ 200	180 ~ 800	1000 ~ 3000	140
单斜 ZrO ₂	250	180 ~ 800	1000 ~ 3000	
高强度 ZrO ₂	200	1000 ~ 1500		
莫来石 (3Al ₂ O ₃ ·2SiO ₂)	50 ~ 150	110 ~ 190	400 ~ 600	850
尖晶石 (MgO·Al ₂ O ₃)	260	150 ~ 170	1700	
堇青石	150	120	350 ~ 680	350
α-SiC	400 ~ 600	450 ~ 800	600 ~ 4200	
TiC (25%孔隙)	300 ~ 400		760 ~ 1380	140
B ₄ C		340	1800 ~ 2900	
WC	700	350 ~ 850	2700 ~ 3600	
六角 BN	50 ~ 80	50 ~ 80	70 ~ 100	
Si ₃ N ₄	300 ~ 400	500 ~ 1000	500 ~ 800	

表 1-7 陶瓷材料抗拉强度、抗压强度及两者的比值

材料	抗拉强度/ MPa	抗压强度/ MPa	抗拉强度/抗压强度
化工陶瓷	30 ~ 40	250 ~ 400	1/8.3 ~ 1/10
透明石英玻璃	50	200	1/4
莫来石	125	1350	1/10.8
烧结尖晶石	134	1900	1/14
99%烧结氧化铝	265	2990	1/11.3
烧结 B ₄ C	300	3000	1/10

陶瓷材料的强度随材料的纯度、微观组织结构和表面粗糙度的变化而变化。陶瓷材料通常用烧结的方法制造，在晶界上大多存在着气孔、裂纹和玻璃相等，而且在晶内也存在着气孔、孪晶界、层错、位错等缺陷。陶瓷的强度除取决于材料的种类外，上述微观组织因素对强度也有显著影响，其中气孔率与晶粒尺寸是两个最重要的影响因素。

气孔是绝大多数陶瓷的主要组织缺陷。气孔明显地降低了材料的强度，同时也是引起应力集中的地方。多孔陶瓷的强度随气孔率的增加按指数规律下降（图 1-1）。陶瓷强度与晶粒尺寸的关系与金属类似，室温断裂强度随晶粒尺寸的减小而增加。

陶瓷材料的高温强度比金属高得多。当温度 $T < 0.5T_m$ (T_m 为熔点) 时, 陶瓷材料的强度基本保持不变; 当温度高于 T_m 时, 才出现明显的降低。图1-2示出陶瓷材料的抗弯强度随温度的变化曲线。

陶瓷材料显微结构存在着不均匀性, 因此陶瓷材料的强度在同样载荷条件下测试的数据分散性大。用这些数据来考虑实际强度时, 一般采用韦伯 (Weibull) 统计法。在考虑陶瓷材料平均强度的同时, 用韦伯模数 m (或称为韦伯模量) 作为陶瓷材料强度均匀性的度量。 m 值越高, 陶瓷材料平均强度值的可信度越高, 强度值分布的离散性越小, 材料使用的可靠性越高。目前常压烧结 Si_3N_4 的 m 值为 10~15, 高温时的 m 值大于常温时测得的 m 值。用于高温热机的陶瓷, m 值应在 20 以上, 以保证可靠性。

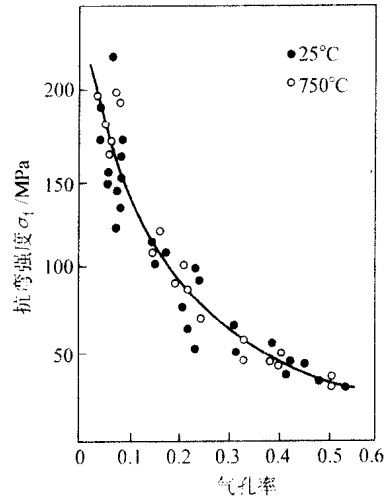


图 1-1 Al_2O_3 陶瓷的强度随气孔率的变化

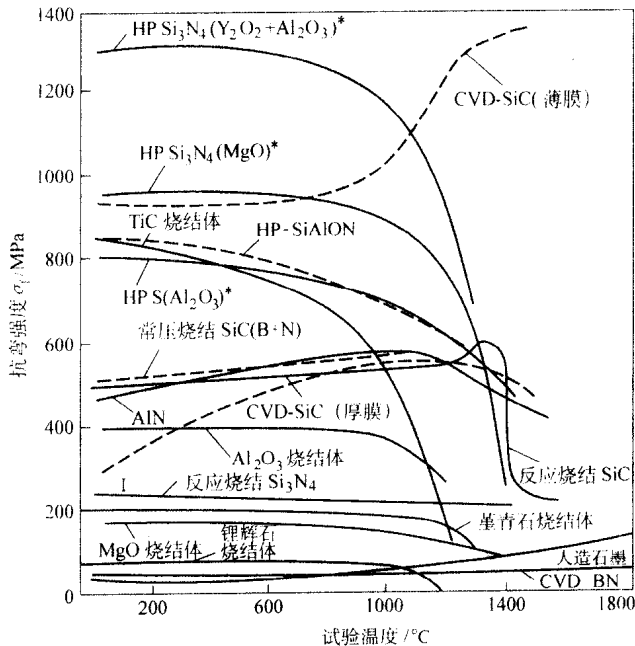


图 1-2 陶瓷材料的抗弯强度随温度的变化