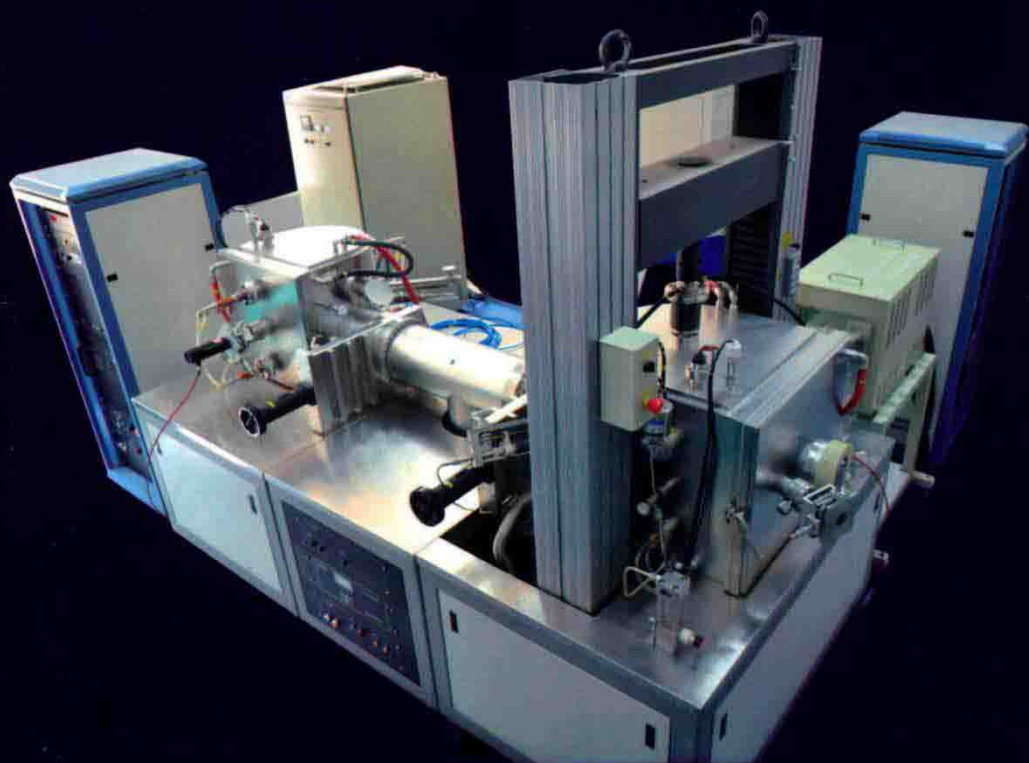


先进陶瓷力学性能 评价方法与 技术

包亦望◎著



中国建材工业出版社

先进陶瓷力学性能 评价方法与技术

包亦望 著



中国建材工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

先进陶瓷力学性能评价方法与技术/包亦望著. --
北京: 中国建材工业出版社, 2017. 6
ISBN 978-7-5160-1820-0

I. ①先… II. ①包… III. ①陶瓷—力学性能—评价—研究 IV. ①TQ174. 1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 069453 号

内 容 简 介

本书共分为 10 章, 系统地介绍了先进陶瓷材料及陶瓷基复合材料的力学性能评价技术, 特别是一些非常规性能的评价与表征技术和技巧。包括陶瓷的损伤容限、脆性、能量耗散、超高温极端环境下的力学性能特征和测试方法、陶瓷材料寿命预测、陶瓷损伤与强度的时间空间效应。对于一些无法用常规方法检测的材料性能, 提出一种间接法技术——相对法, 较好地解决了陶瓷材料高温力学性能和陶瓷涂层性能等疑难问题的评价。

本书可作为陶瓷和玻璃领域的研究人员和研究生以及无机非金属材料领域的检测和试验人员的教材, 亦可作为从事陶瓷和脆性材料的设计、研制、开发与生产工作的工程技术人员的参考资料。

先进陶瓷力学性能评价方法与技术
包亦望 著

出版发行: 中国建材工业出版社

地 址: 北京市海淀区三里河路 1 号

邮 编: 100044

经 销: 全国各地新华书店

印 刷: 北京雁林吉兆印刷有限公司

开 本: 787mm×1092mm 1/16

印 张: 21

字 数: 520 千字

版 次: 2017 年 6 月第 1 版

印 次: 2017 年 6 月第 1 次

定 价: 98.00 元

本社网址: www.jcbs.com 微信公众号: zgjcgycbs

本书如出现印装质量问题, 由我社市场营销部负责调换。联系电话: (010) 88386906

序 言

陶瓷,作为中华民族的一个骄傲元素为世人所知。人类社会的进步与陶瓷材料的革新发展密切相关,且经历了一个从粗糙到精细、从无釉到施釉、从低温到高温的过程。近几十年来,先进陶瓷材料,亦称之为精细陶瓷,包括结构陶瓷和功能陶瓷,已成为许多高技术领域发展的关键材料,在航空航天、机械、冶金、化工、电子、国防、生物医学等领域得到越来越广泛的应用。一方面,其优良的力学、热学性能和化学稳定性,如高比强、高硬度、耐高温、耐磨损、耐腐蚀,使得结构陶瓷成为极端环境下服役的重要首选材料;另一方面,功能陶瓷的能量转换、信息传递和存储、环境改善以及热敏、光敏、气敏等特殊效应使得它成为传感器、新能源和环境改善等领域的重要材料。先进陶瓷的应用涉及力、热、电、光、磁、声、化学等诸多方面,其中力学性能是陶瓷材料及构件安全应用和功能特性得以发挥的基础。

陶瓷力学性能是衡量材料在不同的受力状态下抵抗破坏的能力和构件安全设计的重要指标,是决定其能否安全服役的关键。由于陶瓷的本征脆性,力学性能不足或对其认识不准确,则容易导致使用中突发性甚至灾难性事故的发生。因而,陶瓷力学性能的评价对于先进陶瓷的发展和陶瓷构件的设计与安全应用非常重要。

对于先进陶瓷材料常规力学性能测试,已经建立了一系列的国际、国家标准或行业标准体系,但先进陶瓷在很多特殊条件下的评价存在着常规方法无法解决的技术难题,例如陶瓷与其他固体材料的界面结合强度的评价、陶瓷涂层的物理性能以及热应力评价、超高温极端环境下的强度和刚度以及服役构件的非破坏性评价等。功能陶瓷的结构功能一体化问题和使用寿命问题也离不开力学性能评价与表征技术。因此,针对陶瓷发展中出现的评价难题和空白研究领域,建立新的评价技术和测试方法,并制订相关测试方法的评价标准是先进陶瓷发展与应用中势必解决的重要问题。

该书作者数十年来一直从事脆性材料力学性能评价与表征技术的研究,在陶瓷材料力学性能测试技术、评价方法和仪器设备研发等方面积累了丰富的理论和实践经验。特别是在高温和超高温极端环境下陶瓷力学性能测试技术、复合结构中陶瓷局部性能的评价、异形陶瓷构件的力学性能测试等方面取得多项成果。作者已有6项创新测试技术和方法被制定成了国际标准,十多项技术被制定为国家标准。将这些测试方法和技术编著成书,必将对我国先进陶瓷材料的发展、质量保障和安全应用起到积极作用,同时对从事材料性能评价、检测以及材料与结构设计的工作人员或研究人员有重要的参考价值。

中国工程院院士
哈尔滨工业大学校长



前言

现代工业、国防、航空航天、智能化技术的发展离不开先进陶瓷材料的发展,而陶瓷材料的发展和性能提高依赖于评价与表征技术的发展。虽然陶瓷材料具有脆性大、抗冲击性能差等弱点,但它具有高强度、高模量、高硬度、耐高温、耐腐蚀、耐磨损等众多优点,使得它在很多特殊领域成为无可替代的材料。尤其是它具有很高的比强度(强度与密度之比)和比模量(弹性模量与密度之比),在航天和航空领域显得非常重要。先进陶瓷不仅包含能在特殊条件下保持良好力学性能的结构陶瓷,也包含各种应用于能量转换、信息处理、环境改善的功能陶瓷。无论何种陶瓷材料,结构功能一体化和使用安全性都是至关重要的。在陶瓷部件的设计和使用中,必须对材料的力学性能和服役可靠性有充分的了解,才能保证这类脆性材料构件在使用中的安全,防止突发性和灾难性的事故发生。因此,陶瓷力学性能测试与评价在工程应用中越来越重要。

近几十年来,随着先进陶瓷在国内外的快速发展,陶瓷材料常规力学性能测试技术也得到了相应的发展,并制定了一系列国际和国内标准。但是在实际工程和材料研发中还是存在一些空白和薄弱环节,特别是对于特殊环境下的陶瓷材料和陶瓷涂层的性能评价等领域,基本上属于研究空白,例如陶瓷与其他固体材料的界面结合强度的评价,陶瓷异形构件的性能评价,陶瓷构件在服役状态下的残余性能评价,超高温极端环境下材料力学性能的评价,陶瓷涂层的模量、强度、界面结合强度以及涂层残余应力等评价与测试均为薄弱环节甚至空白。

作者几十年来一直从事脆性材料力学性能表征与评价研究工作,对于陶瓷材料的力学性能进行了较广泛的研究,从静态到动态力学性能,从常温到高温再到超高温环境以及多因素耦合环境的力学性能测试与相关仪器设备的研发,在测试技术和方法上积累了较丰富的经验,并制定了一系列的国际标准和国家标准。为尽快与行业专家以及科技工作者共享陶瓷测试领域的新技术,本书力求对非常规或非标的力学性能评价新技术和技巧给予重点介绍,例如采用相对法评价和测试极端环境的材料力学性能和陶瓷涂层的性能具有事半功倍的效果,特别是对于工程实际中一些过去无法解决的性能评价问题具有实用价值。

本书在笔者长期研究的基础上,结合现行国家标准和规范,系统地介绍了先进陶瓷的力学性能评价技术以及特殊条件下的检测和预测技巧。这些工作也聚集了中国建材检验认证集团中央研究院同事和研究生们的心血,感谢他们辛苦的编辑工作和对本书的贡献。在书稿内容的研究、编辑和整理过程中得到研究院的万德田、刘小根、田远、邱岩、王艳

萍、潘瑞娜等同事的大力支持，同时，研究生聂光临、马德隆等人做了大量的编辑稿件工作，特别是博士生聂光临同学，花费大量精力对全稿进行了认真细致的整理、编辑和校对工作，同时也参考了早期毕业研究生苏盛彪、卜晓雪的学位论文。为此向他们致以衷心的感谢。

为了反映国内外相关研究动态，本书参考和采用了不少公开发表的论文、标准和书籍等资料，在此对这些资料的作者表示感谢。作者知识面、能力及时间有限，书中难免出现错误及疏漏之处，诚恳希望读者在阅读和使用过程中予以批评指正，以达到共同的进步。

作者
2017年5月

目 录

第 1 章 概论	1
1.1 陶瓷材料的基本特性	1
1.2 陶瓷的力学性能与服役安全	5
1.2.1 陶瓷材料的强度	5
1.2.2 陶瓷的高温耐久性	6
1.2.3 耐磨性与基本性能的关系	8
1.2.4 陶瓷材料的抗冲击性	8
1.2.5 陶瓷材料特殊条件下的力学性能	9
1.3 陶瓷及玻璃的弹性与脆性	10
1.3.1 陶瓷与玻璃的弹性	10
1.3.2 陶瓷与玻璃的脆性	11
1.4 性能评价技术与技巧	12
1.4.1 相对法技术	12
1.4.2 痕迹法	14
1.4.3 推测法	15
1.4.4 高通量测试技术	17
参考文献	18
第 2 章 陶瓷的常规力学性能及其评价方法	20
2.1 抗拉强度	20
2.2 抗压强度	22
2.3 抗弯强度	23
2.4 弹性模量	25
2.4.1 弯曲法测试弹性模量	26
2.4.2 脉冲激励法测试弹性模量	28
2.5 冲击强度及冲击韧性	30
2.6 断裂韧性	31

2.7	抗热震性	33
2.8	硬度	34
2.9	损伤容限	36
2.10	磨损	38
2.11	疲劳及寿命计算	39
2.11.1	静疲劳	39
2.11.2	动疲劳	40
2.11.3	寿命预测	40
2.12	蠕变	41
2.12.1	弯曲蠕变	41
2.12.2	拉伸蠕变	41
2.13	Weibull 模数评价	42
	参考文献	44
第3章	尺寸与时间对样品力学性能的影响	46
3.1	陶瓷与玻璃强度的时间与空间效应	46
3.1.1	钢化玻璃的内应力分析	46
3.1.2	陶瓷与玻璃破坏的空间效应与临界颗粒尺寸	47
3.1.3	断裂强度的时间效应	51
3.2	强度的尺寸效应	57
3.2.1	长度效应	57
3.2.2	厚度效应	58
3.2.3	宽度效应	62
3.3	超小截面试样的力学性能评价	63
3.3.1	细纤维的强度与弹性模量测试	63
3.3.2	超薄试样的弯曲强度	65
3.4	陶瓷材料断裂韧性的测试及影响因素	67
3.4.1	断裂韧性测试方法与试件尺寸要求	67
3.4.2	SENB 方法中 K_{IC} 的修正与尺寸效应	75
3.4.3	断裂韧性测试的影响因素	79
3.5	双向应力作用下的阻力特性	82
3.5.1	双向应力对裂纹扩展的影响	82
3.5.2	应变控制断裂理论分析	84

3.6 陶瓷的蠕变和应力松弛	86
3.6.1 陶瓷的蠕变	86
3.6.2 陶瓷的应力松弛	88
3.6.3 陶瓷的应力松弛与蠕变的关系	91
参考文献	91
第4章 陶瓷涂层的力学性能	94
4.1 相对法与压痕评价技术	94
4.1.1 相对法的提出	95
4.1.2 相对法的基本概念	96
4.1.3 相对法应用于涂层力学性能评价	96
4.1.4 压痕评价技术	97
4.2 涂层的弹性模量	97
4.2.1 单层涂层的弹性模量	99
4.2.2 多层涂层弹性模量的评价	102
4.2.3 涂层的高温弹性模量	108
4.3 涂层硬度与厚度效应	112
4.3.1 Jönsson and Hogmark (J-H) 模型	113
4.3.2 Lesage and Chicot (L-C) 模型	114
4.3.3 新模型	117
4.4 涂层的常温与高温弯曲强度	119
4.5 陶瓷涂层残余应力评价	121
4.5.1 陶瓷涂层残余应力相对法评价	121
4.5.2 Stoney 公式法	124
4.5.3 微观测量法	127
4.6 陶瓷涂层密度及热膨胀系数的相对法评价	130
4.6.1 陶瓷涂层密度的相对法评价	130
4.6.2 陶瓷涂层热膨胀系数的评价	133
参考文献	136
第5章 陶瓷基复合材料的力学性能	140
5.1 绪论	140
5.2 颗粒增强陶瓷复合材料	140

5.2.1	颗粒分布模型	141
5.2.2	颗粒尺寸效应	143
5.2.3	颗粒增强陶瓷的内应力	144
5.2.4	颗粒增强陶瓷内应力对强度及断裂韧性的影响	148
5.3	层状陶瓷复合材料的应力分析与设计	154
5.3.1	层状陶瓷复合材料的强韧化机制	154
5.3.2	层合材料的残余应力分析	156
5.3.3	层合材料的优化设计准则	167
5.3.4	强界面延/脆性夹层陶瓷复合材料的变形及损伤行为	173
5.3.5	预应力陶瓷设计	180
5.4	纤维增强陶瓷基复合材料	185
5.4.1	纤维增强陶瓷基复合材料的强度	185
5.4.2	纤维增强陶瓷基复合材料的蠕变行为	186
5.4.3	纤维增强陶瓷基复合材料的增韧机理	187
5.5	复合材料的拉/压/弯/剪试验	190
5.5.1	复合材料的拉伸试验	190
5.5.2	复合材料的压缩试验	191
5.5.3	复合材料的弯曲试验	192
5.5.4	复合材料的剪切试验	192
	参考文献	196
第6章	陶瓷的表面性能与评价技术	198
6.1	接触理论和压痕技术的发展	198
6.2	普通压痕与位移敏感压痕技术	199
6.2.1	位移敏感压痕技术的提出	199
6.2.2	位移敏感压痕技术的理论基础	200
6.2.3	位移敏感压痕测试设备	203
6.3	弹性恢复与能量耗散率评价	204
6.3.1	E_r 和 H 间的理论关系	204
6.3.2	恢复阻力 R_s 和能量耗散的关系	208
6.4	硬度与弹性模量的痕迹法评价	210
6.5	表面局部强度与局部性能	213
6.5.1	应力梯度和接触应力的均强度准则	213

6.5.2 临界问题与局部强度 215

6.5.3 脆性材料局部强度测定 217

6.5.4 脆性材料残余应力测评 218

6.5.5 球压法做强度保证实验 219

6.6 摩擦磨损性能 220

6.6.1 摩擦磨损试验机 220

6.6.2 万能材料试验机 222

参考文献 223

第7章 陶瓷的界面性能与评价技术 227

7.1 界面及界面结合力 227

7.1.1 界面及其力学性能的重要性 227

7.1.2 界面结合力 228

7.2 界面结合力的测量方法 230

7.2.1 拉伸法 230

7.2.2 弯曲法 231

7.2.3 双切口剪切法 232

7.2.4 其他方法 232

7.3 十字交叉法测量界面拉伸强度和剪切强度 233

7.3.1 十字交叉法介绍 234

7.3.2 十字交叉法评价陶瓷涂层的界面结合强度 237

7.3.3 改进十字交叉法评价涂层界面剪切强度 238

7.4 界面疲劳与界面蠕变 239

参考文献 241

第8章 高温及超高温极端环境下的力学性能与测试技术 243

8.1 高温弹性模量的评价 244

8.1.1 相对法评价高温弹性模量 244

8.1.2 脉冲激励法评价高温弹性模量 247

8.1.3 高温压缩模量 248

8.2 超高温弹性模量的评价 249

8.2.1 缺口环法简介 249

8.2.2 相对缺口环法评价超高温弹性模量 252

8.2.3 冲击压痕迹法	255
8.3 超高温强度的评价	257
8.3.1 局部受热同步加载法	258
8.3.2 缺口环法评价超高温弯曲强度	263
8.4 多因素耦合条件下的性能评价	265
8.4.1 力、电、热多场耦合测试	265
8.4.2 力、电、磁多场耦合测试	267
8.4.3 热、力、氧多因素耦合测试	269
参考文献	271
第 9 章 陶瓷冲击阻力和热震阻力	274
9.1 陶瓷的抗冲击阻力与脆性	274
9.1.1 脆性的定量化	274
9.1.2 冲击模量	275
9.1.3 脆性改善判据	276
9.2 冲击强度	277
9.2.1 三点弯曲梁的冲击响应	278
9.2.2 冲击时间与冲击物特性的关系	278
9.2.3 冲击失效临界条件评价	279
9.2.4 冲击速度与冲击强度	280
9.3 陶瓷表面的颗粒冲击损伤	282
9.3.1 颗粒冲击损伤	282
9.3.2 等效冲击方法	285
9.4 热震特性与抗热震设计	289
9.4.1 抗热冲击断裂性能	289
9.4.2 抗热冲击损伤性	290
9.4.3 提高抗热震性的措施	291
9.5 纳米层状陶瓷的抗热震性能	291
参考文献	294
第 10 章 陶瓷的可靠性评价与寿命预测	296
10.1 强度的离散性与 Weibull 统计分析	296
10.1.1 Weibull 分布函数	297

10.1.2 Weibull 模数的评价	298
10.2 裂纹扩展模型进行寿命预测的疑问	301
10.3 性能退化模型与寿命预测	302
10.3.1 强度衰减与失效评价	302
10.3.2 寿命的简单计算方法	305
10.3.3 疲劳试验预测寿命	305
10.4 失效分析与现场检测	306
10.4.1 失效分析	306
10.4.2 现场检测技术	308
10.5 陶瓷的性能预测与安全设计	310
10.5.1 基于威布尔模量的可靠性设计	311
10.5.2 材料的强度设计	313
10.5.3 材料的增韧设计	314
10.5.4 性能的测试误差分析	315
参考文献	316
陶瓷力学性能表征与测试方法索引	317

第1章 概 论

1.1 陶瓷材料的基本特性

先进陶瓷材料,包括结构陶瓷和功能陶瓷,是现代经济建设和国防建设中的一类重要材料。陶瓷材料的化学键大都为离子键和共价键,键合牢固并有明显的方向性,相比其他固体材料,陶瓷具有耐高温、耐腐蚀、耐磨损、高强度、高硬度等优点^[1],同时,由于它的脆性,这类材料也最容易发生突发事故,是最不安全的材料。脆性构件在服役中的破坏和失效绝大部分是由于冲击、动态疲劳载荷或环境腐蚀几种因素导致强度衰减所引起。例如汽车、火车和飞机的挡风玻璃,陶瓷发动机以及航空航天器的表面损伤和破坏,陶瓷部件和陶瓷涂层的破裂与失效等往往源于三种形式:1)机械载荷或热应力导致粉碎性破坏;2)硬颗粒小能量冲击产生表面微裂纹或因环境腐蚀而使部件强度和寿命缩减;3)动态疲劳载荷或者热疲劳下材料中的微裂纹扩展或强度衰减而导致的破坏。随着无机非金属材料在国防和国民经济建设中越来越广泛的应用,对陶瓷材料的静态与动态力学性能及影响动态服役功能的关键科学问题的研究显得更加紧迫和重要。在我国高科技新产品开发进程中,要求材料不仅要有高强度,更要有高抗冲击性和高可靠性。现代科技产品的发展很大程度上受制于材料的可靠性。在很多情况下,玻璃也被归到陶瓷一类材料,例如微晶玻璃制品既含有非晶态的玻璃,也含有多晶陶瓷相,固也称之为玻璃陶瓷。

严格意义上的陶瓷是指在高温下煅烧原料粉末制备的无机非金属多晶固体,且陶瓷材料在烧成的过程中会发生一系列的物理化学变化。由于化学成分、组织结构以及性质的不同,陶瓷本身具有很广的分类,一般可分为传统陶瓷和特种陶瓷。传统陶瓷即普通陶瓷,是以黏土类及其他天然矿物原料(如长石、石英等)经过粉碎混练、成型、煅烧等工艺制成的。制品包括日用陶瓷、建筑卫生陶瓷、化学化工陶瓷、电瓷等。特种陶瓷也称为新型陶瓷、精细陶瓷、先进陶瓷、高技术陶瓷、工程陶瓷、高性能陶瓷等,是以精制的高纯天然无机物或人工合成的无机化合物为原料,采用精密控制的制造加工工艺烧结,具有优异特性,在电子、机械、航空、航天、生物医学等领域具有广泛的用途,可分为结构陶瓷和功能陶瓷两大类。我们通常所谓的陶瓷是普通陶瓷与特种陶瓷的总称。而在美国和日本,陶瓷不仅包括我们所谓的陶瓷,也包括耐火材料、水泥、玻璃与搪瓷^[2]。

其中结构陶瓷是指用于各种结构部件,主要发挥其力学、热学等功能的高性能陶瓷,具有优越的强度、硬度、绝缘性、热传导、耐高温、耐氧化、耐腐蚀、耐磨耗、高温强度等特性。因此,可在非常严苛的环境或工程应用条件下服役,并展现出较高的稳定性与优异的机械性能,在材料工业上已备受瞩目,其使用范围亦日渐扩大,已广泛应用于能源、

空间技术、石油化工等领域。功能陶瓷是指那些可利用电、磁、声、光等功能性质或其耦合效应以实现某种使用功能的先进陶瓷，且功能陶瓷材料在服役过程中也要承受一定的载荷作用，因此其力学性能是保证其功能性得以正常发挥的前提。综上，研究先进陶瓷的力学性能对保障其服役安全和促进陶瓷材料的进一步发展至关重要。

现代工业中大量使用的先进陶瓷分为氧化物陶瓷和非氧化物陶瓷两类。氧化物陶瓷是完全由一种氧化物或这种氧化物占主体制备的具有优良性能的陶瓷材料，主要包含氧化铝、氧化锆、氧化镁、氧化铍等。非氧化物陶瓷包括碳化物、氮化物、硼化物等以及可加工陶瓷，碳化硅和氮化硅是较为常见的具有良好高温使用特性的陶瓷。

近几十年，先进陶瓷和陶瓷基复合材料在世界范围内显示了巨大的应用前景和潜力。但另一方面，结构陶瓷的产业化和实用化受到了材料性能本身以及使用者对其认识不够等因素的制约。目前，陶瓷材料的微观组织结构和微区成分的分析方法可借鉴一般工程材料的测试手段，已有较为成熟的表征方法，且被许多高校建设为材料和热加工专业的公共技术基础课程。^[3]而结构陶瓷材料能否广泛应用于工程实际取决于我们能否对它的力学性能及可靠性有深刻了解，其中最关键的就是它的服役性能和动态可靠性。换句话说，若没有先进的材料评价技术和测试方法的配合发展，结构材料的研究和应用就无法得到安全保障。如何评价脆性材料在不同服役条件和不同载荷形式下的材料性能及其变化规律，并由此分析构件的可靠性和耐久性，预测构件的残余寿命，这对于无机非金属材料在国民经济建设中的广泛且安全的应用，对于材料和工程质量的在线检测，对于构件的可靠性评估以及材料研究中降低成本等方面均具有重要的理论意义和巨大的实用价值。显然，只要无机脆性材料的应用需求还在，脆性构件的服役性能和寿命评价等条件保障性的研究就成为紧迫而重要的工作。

实际上陶瓷材料或构件的力学性能具有很大的随机性，它们随载荷形式、结构的形状和尺寸、环境和温度等多种因素的变化而变化。许多状态是实验室和标准方法无法完全等效和实施的。因此有必要建立和开发新的材料性能评价与表征方法以及无损在线性能测试的方法和仪器，为材料研究或构件在给定使用条件下的服役可靠性和耐久性评价等服务提供系列手段。

对于工程应用而言，更重要的是要将各种理论和研究结果综合并转化为简单易懂、便于操作、准确有效的性能评价手段和规范，并为材料设计和结构设计提供理论指导。材料强度理论和评价方法研究的最终目的是为了有效地指导工程实践。通常，寿命预测理论需要知道构件内部的裂纹情况，而服役过程中的脆性构件通常表面没有明显缺陷和裂纹，也无从知道缺陷的发展过程如何。在这种情况下，寿命预测往往可以通过在一定条件下强度的衰减规律来进行估测。对于工程上的实际构件，残余寿命预测是非常重要的。而残余寿命的估测又跟无损、在线测试是分不开的。如果能够测出现场构件的残余刚度、残余强度等参数以及它们随时间的变化，则可预测材料的使用寿命和残余寿命。值得注意的是，无损在线性能测试与传统的无损探伤不是一回事，前者是测出现场构件的材料性能，后者是检测构件内部的缺陷分布及其尺寸大小。显然，如果能把无损测试与无损探伤结合起来，则可更精确地评价构件的可靠性和寿命。在很多特殊工作环境下，例如，太空环境、高温环境、海底环境等，无法利用常规的实验室方法对服役材料的性能进行测试和评价，就需要用模拟的方法和残余痕迹的方法进行估测。另外，根据材料不同的脆度、强度和弹性模

量等参数以及它们对断裂阻力的影响，研究在特定使用目标下的复相材料的最优配置，使其达到工程应用的要求，对推动新材料的发展具有实际意义。

传统陶瓷和工业陶瓷的基本性能通常具有较大的离散性，但是在规律上是变化不大的，下面列举几种陶瓷的一般性能。

表 1-1 硅酸盐陶瓷的一些性质^[4]

	硬瓷	高铝瓷	滑石瓷	堇青石	耐火土
密度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	2300~2500	2450~2650	2600~2800	2600~2800	1900~2300
热导 ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	1.2~1.6	1.2~1.6	2.0~2.8	2.0~2.6	1.4~1.5
热膨胀系数 ($\times 10^{-6} \text{K}^{-1}$)	4~6	4~6	6~8	2~3	4~7
使用最大温度 ($^{\circ}\text{C}$)	1100	1100	1000	1000	1200~1500
弹性模量 (GPa)	70~80	120~160	70~100	100	30~100
泊松比	0.17	0.17	0.24	0.24	0.25
弯曲强度 (MPa)	40~100	130~200	80~140	50~100	—
压缩强度 (MPa)	300~550	300~550	850~950	200	10~50

注：普通耐火土的拉伸强度以及弯曲强度很低，所以未测得其弯曲强度。

表 1-2 一些氧化物陶瓷的性质^[4]

	85%~95% Al_2O_3	99.5% Al_2O_3	ZrO_2	MgO	BeO
密度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	2600~3300	3980	5400	2500~3200	2900
热导 ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	5~10	10	2	30	200
热膨胀系数 ($\times 10^{-6} \text{K}^{-1}$)	5~6	8.5	10	13.5	8.5~9
使用最大温度 ($^{\circ}\text{C}$)	1600	1800	2000	2000	1800
弹性模量 (GPa)	200~400	400	150~210	200~300	300~400
泊松比	0.23	0.27	0.27	0.17	0.34
弯曲强度 (MPa)	200~300	300~400	100~200	100	100
1200 $^{\circ}\text{C}$ 弯曲强度 (MPa)	50~100	100~150	80	60	10~20
压缩强度 (MPa)	2000~3000	3000~4000	2000	1400	800

注：上述 ZrO_2 陶瓷是指纯氧化锆陶瓷，部分氧化锆的弯曲强度值是其几倍大小。

表 1-3 一些非氧化物陶瓷的性质^[4]

	重结晶 SiC	反应烧结 SiC	热压 SiC	反应烧结 Si_3N_4	热压 Si_3N_4
密度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	2600	3120	3200	2600	3200
热导 ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	20~25	50~80	50~100	15~25	15~30
热膨胀系数 ($\times 10^{-6} \text{K}^{-1}$)	4.5	4.3	3.2~4.5	2.7~3.2	3.2~3.5
使用最大温度 ($^{\circ}\text{C}$)	1700	1700	1800	1400	1600
弹性模量 (GPa)	240	400	380~440	140~220	210~310
泊松比	0.24	0.24	0.24	0.27	0.27
弯曲强度 (MPa)	100~300	400~500	500~700	200~250	600~800
1200 $^{\circ}\text{C}$ 弯曲强度 (MPa)	100~300	400	500~600	200~250	300~400
压缩强度 (MPa)	500~800	2000~3000	3000~4000	1000	3000~4000

注：表 1-1 至表 1-3 中的使用最大温度均是在不承受载荷时测得的。

表 1-4 一些硅酸盐玻璃性能参数^[4]

	石英玻璃	钠钙玻璃	硼玻璃	铝玻璃	铅玻璃
密度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	2200	2500	2230	2680	3000
热导 ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	1.38	1.00	1.05	1.03	0.75
热膨胀系数 ($\times 10^{-6} \text{K}^{-1}$)	0.6	8.5	3.3	5.2	9.4
软化温度 ($^{\circ}\text{C}$)	980	520	470	590	390
弹性模量 (GPa)	73	70~72	64	83	58
泊松比	0.16	0.22	0.2	0.24	0.21

注：soda-lime 玻璃为普通窗玻璃；铅玻璃中含有 28%氧化铅。

表 1-5 典型三元层状可加工陶瓷的性能^[5]

化合物	密度 (g/cm^3)	电导率 $\times$ ($10^8 \Omega^{-1}$ $\cdot \text{m}^{-1}$)	室温热容 [$\text{J}/(\text{mol}$ $\cdot \text{K})$]	热导率 [$\text{W}/(\text{m}$ $\cdot \text{K})$]	热膨胀 系数 $\times$ ($10^{-6}/\text{K}$)	硬度 (GPa)	体模量 (GPa)	杨氏 模量 (GPa)	剪切 模量 (GPa)	抗弯 强度 (MPa)	抗压 强度 (MPa)	断裂韧性 ($\text{MPa} \cdot$ $\text{m}^{1/2}$)
Ti ₂ AlC	4.1	4.4	78	46	8.2	2.8	144	270	116	275	540	—
Cr ₂ AlC	5.21	1.4	84	17.9	8	3.5	138	285	121	494	625	—
V ₂ AlC	4.03	4	—	48	9.4	2.8	152	235	116	—	603	5.7
Nb ₂ AlC	6.44	3.4	86	20	8.1	4.5	165	294	117	481	—	5.9
Ta ₂ AlC	11.46	3.91	94	28.4	13.3	4.4	—	292	121	360	804	7.7
Ti ₂ AlN	4.31	4	—	5.9	8.2	4.3	—	286	124	371	612	—
Ti ₃ AlC ₂	4.21	2.9	—	40	9	3.5	165	297	124	340	764	7.2
Ti ₃ SiC ₂	4.53	9.6	110	37	9.1	4	206	333	134	450	900	7
Ti ₃ GeC ₂	5.03	3.5	—	38	—	2.2	169	323	142	—	467	—
Cr ₂ TiAlC ₂	5.04	—	—	—	—	5.55	—	315	133	486	1394	6.08
Ti ₄ AlN ₃	4.6	0.5	150	12	9.7	2.5	216	310	127	350	475	—
Nb ₄ AlC ₃	6.97	1.33	158	13.5	7.2	2.6	214	306	127	346	515	7.1
β -Ta ₄ AlC ₃	13.28	2.59	185	38.4	8.2	5.1	261	324	132	372	821	7.7
Zr ₂ Al ₃ C ₄	4.73	0.91	157	15.5	8.1	10.1	195	362	152	405	—	4.2
Zr ₃ Al ₃ C ₅	5.02	0.69	193	14.3	7.7	12.5	202	374	157	488	—	4.68
Zr ₂ Al(Si) ₄ C ₅	4.44	0.74	199	12	8.1	11.7	188	361	153	302	—	3.88
Zr ₃ Al(Si) ₄ C ₆	4.81	1.16	214	14.7	7.7	12.4	191	367	156	312	—	4.62
Hf ₂ Al(Si) ₄ C ₅	6.68	—	230	11	8.2	15.5	196	368	155	296	—	3.52
Hf ₃ AlN	11.2	0.69	124	11.7	7.6	6.3	149	246	100	159	—	3.2
Al ₃ BC ₃	2.58	—	—	—	—	11.1	123	163	64	185	—	2.3

由表 1-1~表 1-5 可知，先进陶瓷（氧化物陶瓷和非氧化陶瓷）的弹性模量、弯曲强度、最大使用温度、热导率要比普通陶瓷（硅酸盐陶瓷）和玻璃高得多。其中陶瓷材料的显著特点是具有较高的脆性，即在外载荷的作用下，陶瓷材料会发生突然断裂破坏。而新型制备的三元层状陶瓷的断裂韧性较好，具备一定的加工性能，可改善其脆性。