

陶瓷材料断裂力学

Fracture Mechanics of Ceramics

龚江宏 著

Gong Jianghong

清华大学出版社

Tsinghua University Press

(京)新登字 158 号

内 容 简 介

断裂是各类工程材料在设计、生产、使用过程中都必须加以慎重考虑的基本问题。本书主要讨论陶瓷材料的断裂问题,全面介绍适用于陶瓷材料力学行为研究的断裂力学基本理论、测试方法以及陶瓷材料中具体的断裂行为。全书共分六章,前三章重点介绍了与陶瓷材料断裂行为有关的断裂力学理论及测试技术,后三章主要讨论材料的断裂力学行为。内容包括:基本概念、基本理论、断裂韧性测试方法、陶瓷材料的压痕微开裂行为、断裂强度及其统计性质、裂纹缓慢扩展及寿命预测、显微结构对裂纹扩展行为的影响等。

全书共计约 28 万字。

书 名: 陶瓷材料断裂力学

作 者: 龚江宏 著

出版者: 清华大学出版社(北京清华大学学研大厦,邮编 100084)

[http:// www .tup .tsinghua .edu .cn](http://www.tup.tsinghua.edu.cn)

印刷者: 清华大学印刷厂

发行者: 新华书店总店北京发行所

开 本: 787×1092 1/16 印张: 18.75 字数: 315 千字

版 次: 2001 年 9 月第 1 版 2001 年 9 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 7-302-04851-7/ TB·36

印 数: 0001~3000

定 价: 60.00 元

ABSTRACTS

It is important to realize that the testing and evaluation of mechanical properties are critical for both structural and non-structural applications of brittle ceramics .During the past thirty years, there has been a strong emphasis on understanding the mechanical behavior of ceramics and on improving their strength, toughness and contact-damage resistance . This book presents a systematical review on the theoretical background and testing methods for the evaluation of the fracture behavior of ceramics and a detailed discussion on the effect of microstructure on mechanical properties .

This book consists of six chapters which may be divided roughly into two parts . The first part, Chapters 1 to 3, outlines the theoretical background . Chapters 1 and 2 introduce the basic fracture mechanics concepts and the conventional methods for measuring the fracture mechanics parameters, respectively, and Chapter 3 is a comprehensive summary of the so-called indentation fracture mechanics, which is a useful theoretical tool for studying the mechanical behavior of ceramics . Based on the theories and methods outlined in the first part, the fracture behavior of ceramics is discussed in detail in the second part, Chapters 4 to 6, with a special emphasis on the microstructural-dependence of the mechanical properties . In this part, one can find useful information on the fracture strength and its statistical properties (Chapter 4), slow crack growth and delayed failure (Chapter 5) and the effect of microstructure on toughness (Chapter 6) . At the end of each chapter, a list of selected references is given to help the readers to get a further understanding on the historical and the current developments in the field .

This book may be used as a reference text for scientists and engineers involved in the development of ceramic-based products, materials selection and mechanical design . It is also useful for the advanced undergraduate and graduate students who are studying in the field of materials science and engineering, especially the inorganic non-metallic materials .

序

龚江宏同志最近编写完成的《陶瓷材料断裂力学》一书,是结合作者多年的研究工作对陶瓷材料的断裂力学理论及其在研究陶瓷材料断裂行为方面的应用进行的较为全面、系统的总结和整理,内容丰富,深入浅出,既有理论深度又通俗易懂,其主要特色有以下几点:

一、陶瓷材料的断裂行为与金属材料有着本质的差别。因此,自 20 世纪 70 年代中期,以研究金属材料断裂行为为基础发展起来的经典断裂力学理论进入到陶瓷材料领域开始,关于断裂力学理论的适用性问题的研究就一直是陶瓷材料力学工作者共同关注的一个热点问题,并且取得了很大的进展。这些进展一方面为研究陶瓷材料断裂行为提供了可靠的理论依据,另一方面也进一步丰富发展了现有的断裂力学理论。正如本书前言中所说,一个适用于研究陶瓷材料力学行为的断裂力学理论体系已经初步形成。本书可以说是国内第一部系统总结、评述这一理论体系的专著,具有较强的学术价值。

二、断裂力学行为研究是陶瓷材料尤其是结构陶瓷材料研究的一个重要组成部分。世界一流大学材料系大多都设有专门的课题组从事陶瓷材料断裂力学行为方面的研究,并拥有一位或几位国际知名的教授主持相关的工作。我国在这一领域的研究则相对较为薄弱。在这样的背景下,本书的编写对于弥补我国在这一方向上的不足也具有一定的实际意义。

三、全书六章可以大致划分为两大部分,前三章为理论的系统阐述,后三章则为理论的具体应用。这样的安排使得读者可以在获得较为完整的理论之后,进一步通过对具体应用实例的分析加深对理论的了解。特别是,由于本书的主要读者群——从事陶瓷材料设计、研制及生产的科技工作者及大专院校无机非金属材料专业研究生——一般都不具备较为深厚的断裂力学理论基础,因此在本书理论阐述方面,作者有意识地突出强调了理论的应

用背景,而简化了繁琐的理论推导过程,这使得读者可以很容易地掌握理论中一些更为实用的结论。在具体应用方面,作者引用了大量的实验数据,着重从对具体材料的具体断裂现象出发介绍理论的应用,内容丰富,条理清晰。

四、本书的第3章——陶瓷材料压痕断裂力学——是本书最具特色的内容之一。压痕断裂力学是陶瓷材料领域独具特色的研究内容,20世纪70年代末期出现,到80年代中期逐渐形成理论体系。以压痕形变、开裂为基础发展出来的一系列断裂力学测试技术在陶瓷材料力学性能的测试与评价中发挥了尤为积极的作用。由于压痕应力场的复杂性,关于压痕断裂力学的研究往往要在设定一系列近似条件的基础上进行,因此,关于压痕断裂力学理论及其应用的研究,学术界一直就存在着争议,而压痕断裂力学理论就是在这种充满争议的环境中一步一步得到发展的。作者在对这一理论体系进行的评述中,很好地反映出了这一背景,兼顾了各种学术流派不同的学术观点,又较为明确地提出了作者自己的看法,为读者更好地了解这一理论体系并应用这一体系解决实际问题提供了帮助。

五、陶瓷材料的增韧设计是陶瓷材料研究中的一个热点,自20世纪80年代中后期以来得到了迅速的发展,关于增韧设计的断裂力学理论也相应得到了重视。由于经典断裂力学理论中可以借鉴的相关内容不多,这一方面的研究中出现了大量新的理论和方法,当然这些新的理论和方法出发点各不相同,但得到的基本结论却大同小异。本书在第6章就这一问题进行的总结和评述有一定的特色。作者从诸多的新理论和新方法中找出了最容易理解和接受的内容,加以系统的整理。读者很容易从中了解到陶瓷材料增韧设计的最基本的原理以及评价增韧效果的最基本的方法。在这一部分,作者再一次大幅度地简化了复杂的理论模型经常出现的繁琐的数学推导过程,把理论模型中最基本的思路和最实用的结论介绍给了读者,使读者更容易掌握理论的内涵及其实际应用的效果。

六、国际上陶瓷材料断裂力学方面的专门著作已经出版了一些,较有代表性的包括由R.W.Davidge编者、Cambridge大学出版社1979年出版的《Mechanical Properties of Ceramics》和由B.R.Lawn编著、Cambridge大学出版社1993年出版的《Fracture of Brittle Solids》。与这些著作相比,本书在理论阐述方面较为简单,在应用介绍方面内容更为丰富,比较适合于我国实际情况。国内同类的出版物较为少见,而且内容比较陈旧或侧重于专题性论述。相比之下,本书在理论的系统性、完整性方面有很大的进步。

鉴于本书的上述特色,预期该书出版后将作为国内从事陶瓷材料设计、研制、开发与生产工作的科技工作者以及大专院校相关专业的一本较为实用的参考书,可望在相关领域的科研、教学、生产中发挥积极的作用。

清华大学材料科学与工程研究院常务副院长 黄 勇
清华大学材料科学与工程系教授

2001年7月5日

目 录

引 言.....	1
第 1 章 基本概念和基本理论.....	4
1.1 断裂强度的微裂纹理论	5
1.1.1 固体材料的理论断裂强度.....	5
1.1.2 Inglis 应力集中理论	9
1.1.3 Griffith 能量平衡理论	12
1.1.4 Obreimoff 实验	16
1.1.5 断裂强度的微裂纹理论	18
1.2 断裂力学参数.....	19
1.2.1 裂纹系统的机械能释放率	20
1.2.2 裂纹尖端处的应力场强度	22
1.2.3 机械能释放率与应力场强度的等效性	26
1.2.4 裂纹扩展判据	28
1.3 特殊裂纹系统的应力场强度.....	29
1.3.1 均匀承载裂纹系统	30
1.3.2 非均匀承载裂纹系统	32
1.3.3 表面半椭圆形裂纹系统	34
1.4 含裂纹体的断裂判据.....	36
1.5 裂纹尖端附近的非线性区.....	39
1.5.1 Irwin-Orowan 非线性裂纹尖端模型	41
1.5.2 Dugdale-Barenblatt 裂纹尖端模型	43
1.6 J 积分概念	45
1.7 结束语.....	47
参考文献	48

第 2 章	平面应变断裂韧性及其测试	49
2.1	平面应变断裂韧性	49
2.1.1	平面应变与平面应力的比较	50
2.1.2	应力场强度的塑性区修正	53
2.2	断裂韧性常规测试方法	54
2.2.1	单边切口梁技术	55
2.2.2	山形切口技术	57
2.2.3	其他形状切口试样	60
2.3	切口钝化效应	64
2.4	测定断裂韧性的压痕弯曲梁技术	68
2.4.1	Vickers 压痕弯曲梁法	69
2.4.2	Knoop 压痕弯曲梁法	73
2.4.3	压痕预开裂弯曲梁技术	76
2.5	结束语	78
	参考文献	79
第 3 章	陶瓷材料压痕断裂力学	82
3.1	压痕裂纹的分类	83
3.1.1	按几何特征分类	83
3.1.2	按压头形状分类	84
3.2	压痕应力场	87
3.2.1	压痕应力场的弹性组元	87
3.2.2	压痕应力场的残余组元	89
3.2.3	压痕裂纹的成核位置	91
3.3	压痕过程中裂纹的成核	94
3.3.1	Lawn-Evans 中位裂纹成核模型	94
3.3.2	压痕裂纹成核的位错塞积模型	99
3.4	半饼状压痕裂纹系统的应力场强度	101
3.4.1	压痕裂纹系统应力场强度的点力近似解	101
3.4.2	半饼状裂纹的生长及其平衡条件	104
3.4.3	点力近似解对 Knoop 裂纹系统的适用性	106
3.5	压痕裂纹尺寸与断裂韧性的关系	109
3.5.1	Evans-Charles 方程及其理论修正	110
3.5.2	Niihara 方程	113

3 5 3	Lankford 经验公式	115
3 5 4	其他经验公式.....	117
3.6	结束语	121
	参考文献.....	121
第 4 章	断裂强度及其统计性质.....	125
4.1	影响断裂强度的材料参数	126
4.1.1	弹性模量及其对显微结构的依赖性.....	127
4.1.2	显微结构对断裂表面能的影响.....	130
4.1.3	裂纹尺寸与显微结构的关系.....	135
4.2	工艺缺陷及其对外力作用的响应	138
4.2.1	气孔/微裂纹系统	138
4.2.2	夹杂导致的微开裂现象.....	141
4.2.3	其他工艺缺陷.....	146
4.2.4	表面接触损伤模型及机加工损伤.....	147
4.3	弯曲断裂强度测试	151
4.4	断裂强度的统计性质	154
4.4.1	Weibull 分布的统计学特征	156
4.4.2	Weibull 模数估计值的统计性质	160
4.4.3	断裂强度的体积效应.....	162
4.5	多重裂纹分布问题	164
4.5.1	并存型裂纹分布.....	166
4.5.2	排他型裂纹分布.....	168
4.5.3	部分并存型裂纹分布.....	169
4.6	结束语	170
	参考文献.....	171
第 5 章	裂纹缓慢扩展与延迟破坏.....	175
5.1	断裂的滞后效应及其研究方法	176
5.1.1	Wiederhorn 实验	176
5.1.2	裂纹缓慢扩展 $v \sim K$ 曲线	179
5.1.3	研究裂纹缓慢扩展行为的直接方法.....	180
5.1.4	研究裂纹缓慢扩展行为的间接方法.....	183
5.1.5	实验技术的对比分析.....	187

5.2	室温裂纹缓慢扩展行为	189
5.2.1	应力腐蚀裂纹扩展及其理论分析.....	189
5.2.2	低应力作用下的裂纹缓慢扩展.....	194
5.2.3	裂纹缓慢扩展现象的断裂力学分析.....	198
5.3	高温裂纹缓慢扩展行为	199
5.3.1	高温裂纹缓慢扩展及其对强度的影响.....	200
5.3.2	低应力作用下的高温延迟断裂.....	206
5.3.3	寿命预测.....	209
5.4	陶瓷材料的蠕变断裂	211
5.4.1	蠕变损伤的发育过程.....	211
5.4.2	蠕变裂纹缓慢扩展机理.....	214
5.5	循环应力作用下的疲劳断裂	219
	参考文献.....	222
第6章	显微结构与断裂韧性.....	227
6.1	裂纹扩展路径与裂纹偏转增韧	228
6.1.1	均匀连续介质中裂纹的扩展路径.....	228
6.1.2	显微结构对裂纹扩展路径的影响.....	231
6.1.3	裂纹偏转的断裂力学分析.....	235
6.2	离散介质主导型断裂行为	238
6.2.1	两个典型的强度实验.....	238
6.2.2	断裂韧性是一个材料常数吗.....	245
6.3	裂纹尖端处的屏蔽效应	247
6.3.1	Knehans-Steinbrech 实验	247
6.3.2	裂纹面间的晶粒桥接行为.....	250
6.3.3	裂纹扩展阻力曲线.....	252
6.3.4	裂纹尖端处的过程区与桥接区.....	256
6.4	过程区增韧及其理论模型	259
6.4.1	相变增韧的理论模型.....	261
6.4.2	相变增韧机制的实验研究.....	263
6.4.3	微裂纹增韧的理论模型.....	264
6.5	晶须(纤维)增韧及其理论分析	268
6.5.1	晶须(纤维)增韧效果的理论预测.....	268
6.5.2	晶须增韧原理的实际应用.....	273

6.6	颗粒桥接增韧——应用实例	276
6.6.1	脆性颗粒导致的裂纹桥接	276
6.6.2	板状粒子增韧	277
6.6.3	延性相对陶瓷基体的增韧作用	278
6.7	结束语	279
	参考文献	280

Contents

Introduction	1
Chapter 1 Conception and Theoretical Background	4
1.1 Microcrack Theory for Fracture Strength	5
1.1.1 Theoretical fracture strength of solids	5
1.1.2 Stress concentration at cracks	9
1.1.3 Griffith energy-balance concept	12
1.1.4 Obreimoff 's experiment	16
1.1.5 Microcrack theory for fracture strength	18
1.2 Fracture Mechanics Parameters	19
1.2.1 Mechanical energy release rate for a crack system	20
1.2.2 Stress field intensity at crack tip	22
1.2.3 Equivalence of mechanical energy release rate and stress field intensity	26
1.2.4 Criterion for crack propagation	28
1.3 Stress Field Intensity for Specific Crack Systems	29
1.3.1 Crack systems in uniform applied loading	30
1.3.2 Crack systems in non-uniform applied loading	32
1.3.3 Surface semi-elliptical crack system	34
1.4 Fracture Criterion	36
1.5 Non-Linear Crack-Tip Field	39
1.5.1 Irwin-Orowan model	41
1.5.2 Dugdale-Barenblatt model	43
1.6 J -Integral	45

1 .7	Closing Remarks	47
	References	48
Chapt r 2	Plane Strain Fracture Toughness	49
2 .1	Plane Strain Fracture Toughness	49
2 .1 .1	Plane strain and plane stress	50
2 .1 .2	Plastic zone correction for stress field intensity	53
2 .2	Conventional Methods for Measuring Fracture Toughness	54
2 .2 .1	Single-edge-notched beam method	55
2 .2 .2	Techniques using chevron-notches	57
2 .2 .3	Other specimens with notches	60
2 .3	Notch Blunting Effect	64
2 .4	Indentation Bending Methods for Measuring Fracture Toughness	68
2 .4 .1	Vickers indented bending beam method	69
2 .4 .2	Knoop indented bending beam method	73
2 .4 .3	Indentation-precracked bending beam method	76
2 .5	Closing Remarks	78
	References	79
Chapt r 3	Indentation Fracture Mechanics of Ceramics	82
3 .1	Categories of Indentation-Induced Cracks	83
3 .1 .1	According to crack geometries	83
3 .1 .2	According to indenter geometries	84
3 .2	Stress Field Around the Indentation	87
3 .2 .1	Elastic component of the stress field	87
3 .2 .2	Residual component of the stress field	89
3 .2 .3	Locations for the nucleation of different cracks	91
3 .3	Crack Nucleation during Indentation	94
3 .3 .1	Lawn-Evans model for nucleation of median cracks	94

3.3.2	Dislocation pill up model	99
3.4	Stress Field Intensity for Half-Penny Crack System	
	Introduced by Indentation	101
3.4.1	Solution for stress field intensity based on point-force approximation	101
3.4.2	Evolution and equilibrium of a half-penny crack system	104
3.4.3	Applicability of point-force approximation to Knoop indentation-induced crack system	106
3.5	Relation between Length of Indentation-Induced Crack and Toughness	109
3.5.1	Evans-Charles equation	110
3.5.2	Niihara equation	113
3.5.3	Lankford's empirical equation	115
3.5.4	Other empirical equations	117
3.6	Closing Remarks	121
	References	121
Chapter 4	Fracture Strength and Its Statistical Properties	125
4.1	Material Parameters Relating to Fracture Strength	126
4.1.1	Elastic modulus and its microstructure- dependence	127
4.1.2	Effect of microstructure on fracture surface energy	130
4.1.3	Relation between crack size and microstructure	135
4.2	Processing-Related Flaws and Their Response to Applied Stresses	138
4.2.1	Pore/microcrack system	138
4.2.2	Microcracking associated with inclusions	141
4.2.3	Other kinds of processing-related flaws	146
4.2.4	Model for surface contact damages and machining damages	147
4.3	Bending Test of Fracture Strength	151

4.4	Statistical Properties of Fracture Strength	154
4.4.1	Statistical features of Weibull distribution	156
4.4.2	Statistical properties of the estimated Weibull parameters	160
4.4.3	Volume effect in fracture strength	162
4.5	Multiple Flaws Distributions	164
4.5.1	Concurrent flaw distribution	166
4.5.2	Exclusive flaw distribution	168
4.5.3	Partially concurrent flaw distributions	169
4.6	Closing Remarks	170
	References	171
Chapter 5	Slow Crack Growth and Delayed Failure	175
5.1	Approaches to Study Delayed Failure	176
5.1.1	Wiederhorn's experiments	176
5.1.2	$v \sim K$ curves for slow crack growth	179
5.1.3	Direct method to study SCG	180
5.1.4	Indirect method to study SCG	183
5.1.5	Comparisons between different experimental methods	187
5.2	SCG Behavior at Room Temperature	189
5.2.1	Stress corrosion crack growth	189
5.2.2	Slow crack growth in low load region	194
5.2.3	Fracture mechanics analysis for SCG	198
5.3	SCG Behavior at High Temperatures	199
5.3.1	Effect of SCG on strength at high temperatures	200
5.3.2	High-temperature SCG in low load region	206
5.3.3	Lifetime prediction	209
5.4	Creep Rupture of Ceramics	211
5.4.1	Evolution of creep damages	211
5.4.2	Mechanisms for crack growth due to creep	214
5.5	Fatigue and Failure under Cyclic Loading	219
	References	222

Chapter 6	Microstructure and Fracture Toughness	227
6.1	Crack Paths and Toughening due to Crack Deflection	228
6.1.1	Crack path in an isotropic homogenous solid	228
6.1.2	Effect of microstructure on crack path	231
6.1.3	Fracture mechanics analysis for crack deflection	235
6.2	Discrete to Continuum Behavior	238
6.2.1	Two typical strength experiments	238
6.2.2	Is fracture toughness a constant	245
6.3	Shielding Effects Around the Crack Tips	247
6.3.1	Knehans-Steinbrech experiment	247
6.3.2	Grain-bridging behind crack tip	250
6.3.3	<i>R</i> Curves	252
6.3.4	Process zone and bridging zone around crack tips	256
6.4	Process Zone Toughening	259
6.4.1	Theoretical model for transformation toughening	261
6.4.2	Experimental studies on transformation toughening	263
6.4.3	Theoretical model for microcracking toughening	264
6.5	Fiber/ Whisker Toughening	268
6.5.1	Theoretical prediction for the toughening due to fiber/ whisker	268
6.5.2	Applications of whisker toughening	273
6.6	Toughening due to Particle Bridging: Examples	276
6.6.1	Crack bridging associated with brittle particles	276
6.6.2	Toughening using platelets	277
6.6.3	Toughening ceramic matrix by ductile phases	278
6.7	Closing Remarks	279
	References	280

引 言

正如书名所指出的那样，本书讨论的是陶瓷材料的断裂问题。

断裂是所有工程材料在设计和使用过程中都必须加以慎重考虑的基本问题。这是因为在受力超过一定限度之后，大多数工程材料都倾向于发生断裂。根据不同材料的断裂试验结果，可以将材料的断裂粗略地分为三种类型：脆性断裂、准脆性断裂和延性断裂。这三种断裂类型的主要差别在于断裂发生之前材料所产生的残余应变的相对大小：如果材料在断裂之前所发生的残余应变极不明显，则断裂是脆性的；反之，如果材料在断裂之前发生了显著的残余应变，则断裂是延性的；介于脆性和延性之间的断裂，我们习惯地称之为准脆性断裂。

众所周知，陶瓷材料最本质的力学特性便是其固有的脆性。这是由这类材料的结构特点所决定的。陶瓷材料中的化学键以共价键和离子键为主，这两类化学键都具有较强的方向性和较高的结合强度，这就使得结构中难以发生显著的位错运动。事实上，到目前为止，我们还没有发现任何一种具有实际工程应用价值的陶瓷材料在室温下表现出明显的塑性行为；即使在高温下，位错运动变得相对较为容易了，材料中晶界玻璃相也开始软化，大多数陶瓷材料在断裂之前所发生的不可逆形变（如塑性形变、粘性流动、蠕变等）也并不十分明显。也就是说，陶瓷材料的断裂过程基本上是一个脆性断裂过程；在断裂之前，材料几乎完全处于弹性形变状态。

研究材料断裂问题的主要理论工具是断裂力学。这门新兴学科的发展历史对陶瓷材料力学工作者来说无疑具有十分强烈的挑战性：它起源于Griffith在20世纪20年代初提出的脆性断裂理论，却首先在以延性断裂为主要断裂方式的金属材料领域得到了成功的应用；而在金属材料领域中经过了近20年的发展之后再度回到脆性陶瓷材料领域时，已经较为成熟的断裂力学理论就显得不那么适用了。也许Griffith这位天才的学者当初