



清华大学学术专著

高性能多相复合陶瓷

Multiphase Composite Ceramics with High Performance

黄勇 汪长安 等 著

HUANG Yong, WANG Chang-an et al.



清华大学出版社

内 容 简 介

本书是对过去 20 多年有关多相复合陶瓷材料研究的系统性总结,内容包括:晶须补强增韧的多相复合陶瓷材料,颗粒弥散增韧的多相复合陶瓷材料,相变增韧的多相复合陶瓷材料,仿竹木结构的纤维独石多相复合陶瓷,仿贝壳珍珠岩结构的层状多相复合陶瓷,多相复合陶瓷材料的应用等。

本书可供材料科学与工程领域的科技工作者参考,也可供材料科学与工程领域的研究生和本科生参考。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13501256678 13801310933

图书在版编目(CIP)数据

高性能多相复合陶瓷/黄勇,汪长安等著. —北京:清华大学出版社,2008.2
(清华大学学术专著)

ISBN 978-7-302-16003-8

I. 高… II. 黄… III. 复合陶瓷—研究 IV. TQ174.75

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 133526 号

责任编辑:黎强

责任校对:刘玉霞

责任印制:王秀菊

出版发行:清华大学出版社 地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

<http://www.tup.com.cn> 邮 编:100084

c-service@tup.tsinghua.edu.cn

社总机:010-62770175 邮购热线:010-62786544

投稿咨询:010-62772015 客户服务:010-62776969

印装者:北京铭成印刷有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:153×235 印 张:31.25 字 数:525 千字

版 次:2008 年 2 月第 1 版 印 次:2008 年 2 月第 1 次印刷

印 数:1~3000

定 价:75.00 元

本书如存在文字不清、漏印、缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话:(010)62770177 转 3103 产品编号:023486-01



作者简介

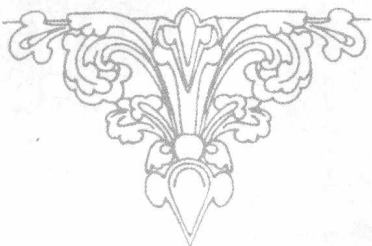


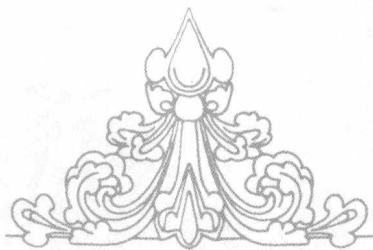
黄 勇 男，清华大学教授，博士生导师。1937年出生于福建。1962年毕业于清华大学并留校工作；1959—1961年，在南京化工学院研修硅酸盐专业。曾先后在美国密歇根大学、麻省理工学院、瑞士联邦技术学院、澳大利亚Monash大学等担任访问学者或进行短期高访、讲学与合作研究。

曾任清华大学材料科学与工程系主任、清华大学材料科学与工程研究院常务副院长、第六和第七届全国自然科学基金委员会学科评审组成员、S-863计划软课题专家组成员、国家“八五”科技攻关计划陶瓷发动机专家组成员等，现任中国硅酸盐学会常务理事和特种陶瓷分会理事长、《硅酸盐学报》主编等。

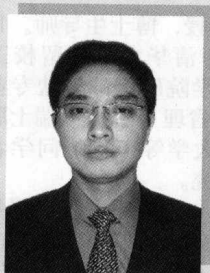
长期从事无机非金属材料的教学与科研工作，在先进陶瓷的组成结构与性能以及高性能陶瓷的制备科学、陶瓷的强化与韧化机理等方面有精深的研究。近十多年里，主持并完成国家自然科学基金重大与重点项目、国家863高技术计划、国家重大基础研究计划(973计划)、国际合作项目等十多项研究课题，研究成果达到国际先进水平，其中胶态注射成型新工艺达到国际领先水平。有些成果已获得转化和应用，获得了良好的社会效益和经济效益。培养博士、硕士和博士后等60余人。先后荣获国家技术发明二等奖1项，省部级发明和科技进步奖9项。累计完成科技鉴定(成果)19项，获国家级优秀教材、建设部优秀科技图书、国家建材优秀教材等奖励，申请中国发明专利48项(已授权25项)、实用新型专利6项(均已授权)。

编写各种教材、专著、手册共计16种。近十多年来发表论文400多篇，其中SCI收录244篇，SCI网络版他引434次；在国内期刊发表论文205篇，他引865次。获北京市优秀教师称号和国务院特殊津贴证书，3次被评为国家863高技术计划先进工作者。多次参加国际学术会议，并担任国际学术委员会主席、分会场主席和国际顾问委员会成员，应邀作大会报告或宣读学术论文等。





作者简介



汪长安 男 1969年出生于安徽。1997年在清华大学材料科学与工程系获工学博士学位并留校任教，2005年晋升为教授。

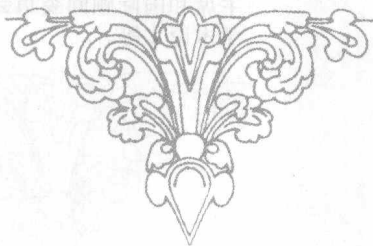
2001—2002年，在美国佐治亚理工学院从事博士后研究。2007年7月，前往中国台湾成功大学讲学交流，并担任客座教授。除教学科研工作外，还担任系学生工作组组长、系党委副书记等职务。现为美国陶瓷学会会员。

承担“材料科学基础”和“无机复合材料”两门专业课程的教学工作。

主要研究方向：结构陶瓷和陶瓷基复合材料。作为负责人，承担了国家高技术发展计划(863计划)、国家自然科学基金、教育部新世纪优秀人才资助计划、教育部优秀青年教师资助计划、北京市科技新星计划、清华大学基础研究基金等多个项目的研究工作；作为研究骨干和主要人员，分别参加了国家重大基础研究计划(973计划)、“863计划”、国家自然科学基金重大项目与重点项目、创新研究群体项目等多项课题的研究工作。

迄今为止，在国内外学术期刊、会议上发表论文160多篇，被SCI收录80余篇，论文累计他引150多次。申请中国发明专利4项，其中有3项已授权。获得教育部科技进步二等奖1项、北京市科学技术二等奖3项、清华大学科研成果推广应用效益显著奖1项、第五届中国硅酸盐学会青年科技奖1项。

先后获得“清华之友—优秀教师奖励金”一等奖、清华大学“一二·九”优秀辅导员、林枫优秀辅导员、北京高校优秀辅导员等奖励。



序

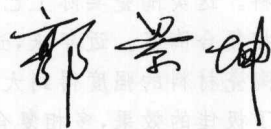
复合材料这个名词已经广为人知。我国在很早以前就用纸筋石灰作为建筑材料。20世纪中叶,出现了用玻璃纤维作为增强剂,以聚合物为基体的复合材料,这就是人们熟悉的“玻璃钢”。它具有质量轻、强度高、加工方便、性能可设计等优点,因而受到人们的青睐,在很多场合得到广泛的应用。随着晶须的应用,又出现了以晶须为增强剂的复合材料。从此,复合材料得到迅速发展。

增强剂有长纤维、短纤维和晶须、颗粒等,基体材料有树脂、金属、陶瓷(包括玻璃)等。人们根据基体材料的种类把复合材料分为树脂基复合材料、金属基复合材料和陶瓷(玻璃)基复合材料等。对于陶瓷基复合材料来说,纤维和晶须的引入,不仅着眼于对材料强度的提高,更重要的是期望达到弥补陶瓷材料脆性大的固有缺点。为此,在复合材料研究中特别采用了“补强”两个字来强调材料的特点,称之为纤维(或晶须)补强陶瓷基复合材料。事实证明,陶瓷基复合材料确实表现出了极大的增强效果,更令人兴奋的是,这种复合材料的断裂功提高了至少一个数量级。这就意味着这种陶瓷材料已经不是想象中那么脆了,因此,它可以承受极大的热冲击和机械冲击。再加上陶瓷材料本身具有的极好的耐腐蚀行为,这种陶瓷基复合材料得到广泛的重视和应用。但是,由于纤维或晶须加入到陶瓷材料中,两者在形态上有明显的差异,要达到均匀分布是很困难的,因此,“原位生长”具有一定长径比的第二相物质,进而形成补强剂的思路就被提了出来,按照这种思路即可得到原位自补强多相复合材料。随后,人们按照复合的思路,采用多种工艺方法,相继研制出了第二相颗粒弥散构成的多相复合陶瓷、层状复合陶瓷、功能梯度复合陶瓷和氧化锆相变增韧复合陶瓷、多种增韧机制协同作用的复合陶瓷等新型材料。这类陶瓷实际上已经超出原先陶瓷基复合材料的概念,是名副其实的多相复合陶瓷。近年来,这类陶瓷材料的研究取得了令人振奋的成果,不仅使陶瓷材料的强度得到大幅度的提高,而且在克服陶瓷材料的脆性方面也获得了极佳的效果,多相复合陶瓷因此获得了更加广泛的应用。这种复合材料不仅可以用作高温动态负荷下运转的陶瓷发动机的零部件,还可以用作具

有高耐磨性能的高温轴承材料。此外,由于具有很好的化学稳定性,因而陶瓷材料在化工领域特别是具有腐蚀性的环境中也可以大显身手。

清华大学黄勇教授及其课题组在过去 20 多年里,先后承担了数十项与多相复合陶瓷相关的研究项目,包括国家“973”重大基础研究项目、国家自然科学基金重大或重点项目、国家“863”高技术研究计划项目等;他们的研究工作取得了大量的成果,包括获得多项省部级以上科技奖励、获得国家多项发明专利等;他们的研究成果有些已经得到转化,在实际应用中取得了显著的经济与社会效益。由于具有比较丰厚的基础,黄勇教授和汪长安教授可以通过《高性能多相复合陶瓷》一书的编写,对以往的研究工作进行比较系统的总结,进而为今后进一步的深入研究提供有益的借鉴,因此,这是一件很有意义的工作。

作者在《高性能多相复合陶瓷》一书中的主要贡献可以集中表述为这样三点:首先,作者把复相陶瓷的概念扩展到多相复合陶瓷,将多相复合陶瓷的内涵从陶瓷材料的范围扩展到陶瓷与其他材料之间的组合,运用各种先进工艺包括纳米材料工艺技术,形成了广泛意义上的多相复合陶瓷材料,这种材料集各类材料之所长,又能够避免其他材料的弱点,堪称为一种全新的材料;第二,作者将材料学和力学紧密结合,在晶须补强增韧的多相复合陶瓷材料和颗粒弥散增韧的多相复合陶瓷研究中,引入颗粒、晶须补强增韧的力学模型,合理地阐述颗粒和晶须补强增韧机理;在相变增韧的多相复合陶瓷研究中,介绍了相变增韧陶瓷研究中发现的形状记忆和伪弹性等特异性能,引入相变力学描述相变增韧陶瓷的力学行为,总结并提出了多重增韧机理和协调作用机理;第三,作者通过引入仿生结构设计思路,论述了仿竹木结构的纤维独石结构多相复合陶瓷和仿贝壳珍珠岩结构的层状结构多相复合陶瓷材料的制备工艺和性能表征,这种设计思路可以使陶瓷材料的断裂韧性得到大幅度的提高。因此可以说,这本书在一定程度上反映了我国材料学界在多相复合陶瓷方面的研究水平和现状,我对黄、汪两位教授多年来的工作和努力深表敬佩,衷心希望这本高水平学术著作的出版,能帮助更多的研究者和读者深入了解多相复合陶瓷材料的研究和应用工作,进而提高我国材料科学研究的水平。



2007年4月10日

前 言

复合材料是采用两种或两种以上异质、异形、异性的材料通过适当的工艺复合而成的一种新材料,属于多相材料。自然界的天然材料如木、竹、骨骼、贝壳等几乎无一例外地属于复合材料。通常复合材料的增强剂有长纤维、短纤维或晶须、颗粒等,基体材料有高聚物(树脂)、金属、陶瓷(包括玻璃)等,人们根据不同基体而把复合材料分为树脂基复合材料、金属基复合材料和陶瓷(玻璃)基复合材料等。

对于陶瓷基复合材料来说,纤维和晶须等增强剂的引入,不仅只着眼于提高材料的强度,更重要的是期望克服陶瓷材料脆性大的固有缺点。事实证明,陶瓷基复合材料确实表现出了不仅在陶瓷材料强度上有极大的增强效果,而且可以大幅度地提高陶瓷材料的断裂功,再加上陶瓷材料本身又具有极好的耐腐蚀、耐高温性能,因此陶瓷基复合材料得到了广泛的重视和应用。随着科学技术的发展和进步,人们又相继开发出颗粒弥散强韧化复合陶瓷、层状复合陶瓷、功能梯度复合陶瓷、氧化锆相变增韧复合陶瓷、多种增韧机制协同作用的复合陶瓷等。这类陶瓷实际上已经超出原先陶瓷基复合材料的概念,是名副其实的多相复合陶瓷。总之,多相复合陶瓷材料由于具有高强、高韧,优异的耐磨性,卓越的抗腐蚀能力以及很好的抗烧蚀性,可以在高温动态高负荷的工况以及磨损和腐蚀的环境中服役,因而受到关注并得到迅速的发展。

广义地讲,陶瓷是无机非金属材料同义词,因此多相复合陶瓷应包含所有无机非金属材料作为基体所制备的多相材料,即无机非金属材料基多相材料,如陶瓷基复合材料、玻璃基复合材料、水泥基复合材料、碳基复合材料以及两种以上的基体相构成的层状结构、梯度结构或机械混合的多相材料等,这类材料统一称为多相复合陶瓷(multiphase composite ceramics),简称为复合陶瓷。

与其他复合材料一样,多相复合陶瓷也是一种可设计性强的非均质材料。通过对原材料的选择、各组分布的设计和工艺条件的保证等,可以使

各种原组分材料的优点产生互补作用,从而得到综合性能优异的新型材料。

在过去 20 年间,我们课题组先后承担了十多项与多相复合陶瓷相关的国家重点基础研究发展规划项目(“973”项目)、国家自然科学基金重大或重点项目、国家“863”高技术研究计划项目等研究工作,积累了丰富的研究成果,获得了多项省部级以上科技奖励,有些成果已得到实际应用并取得了显著的经济与社会效益。为了总结以往的研究成果,促进今后的研究和应用向纵深发展,我们撰写了这本学术专著,目的就是希望通过这本书的出版,能够让更多的科技人员、高校师生和管理人员增进对这个领域的了解,进而推动多相复合陶瓷的研究和应用。

本书由黄勇和汪长安主笔并负责统稿、定稿,曾在本课题组从事博士后研究的徐利华教授撰写第 4 章,翟洪祥教授撰写第 3 章的 3.7 节并对整章内容进行了校对,清华大学力学系蔡乾煌教授撰写第 5 章的 5.7 节并校对全章内容,戚建强帮助绘制部分图表。

书稿完成后,郭景坤院士、张立同院士等对书稿提出了宝贵意见,郭景坤院士还为本书欣然作序。我们特别邀请陶瓷领域的专家对书稿内容进行了审阅:第 1 章由欧阳世翕教授审阅,第 2 章由郭景坤院士审阅,第 3 章由宋慎泰教授审阅,第 4 章由郑元善教授审阅,第 5 章由余寿文教授审阅,第 6 章由翟洪祥教授审阅,第 7 章由李敬峰教授审阅。在此,我们谨对上述合作者和审阅专家一并表示衷心的感谢!

由于我们水平有限,书中如有疏漏或错误之处,敬请读者不吝指正。

黄 勇 汪长安

2007 年 5 月于北京清华园

符号表

a, b, c 晶格常数	e^T 热应力失配引起的应变
A_{II} 椭球体表面积	E^I 桥联相弹性模量
A^{el} 不考虑摩擦时裂纹面上桥联相所占面积百分数	f_p 第二相颗粒含量
A^{fb} 考虑摩擦时裂纹面上桥联相所占面积百分数	f_v 空洞的体积分数
A^{PO} 裂纹面上拔出相所占面积百分数	f_w 架桥晶须横截面积与裂纹面面积之比
B 裂纹通过单位长度区域时的裂纹前沿长度	F 晶须定向度
C 或 c 立方相	$f(\theta)$ 晶须方位角为 θ 的概率
C 裂纹尺寸; 常数; 柔度	$F(\theta)$ 晶须方位角分布函数
c 裂纹半长	G 剪切模量; 断裂能; 自由能
c_0 平衡空位浓度	G_C 复合材料的应变能释放率
c^* 裂纹扩展极限长度	G_{crit} 裂纹扩展的临界应变能释放率
C_0 压痕裂纹初始半长	G_i 纤维内的界面应变能释放率
$C_{拉}$ 受拉晶界的空位浓度	G_{IC} 或 G_{Ic} 界面应变能释放率
$C_{压}$ 受压晶界的空位浓度	G_m^c 复合材料中基体的应变能释放率
D 或 d 粒度; 晶粒尺寸; 纤维上两个缺陷之间的距离, 裂纹桥长度; 界面解离长度	\bar{G} 微裂纹区的剪切模量
d_f 分维	h 裂纹(微裂纹区)尺寸; 晶须埋入深度
D_B 桥联(架桥)区域的长度	H 摩尔比; 试件高度; 材料的名义硬度
D_f Hausdorff 维数	H_V 维氏硬度
$dK_c^{P \cdot 0}$ 总的增韧效果	I 单位宽度面积的惯性矩
$dU_{P \cdot 0}$ 单根晶须的拔出所引起的应变能变化	I_{111} $\{111\}$ 衍射峰强度
E 弹性模量(杨氏模量)	I_{220} $\{220\}$ 衍射峰强度
E_c 复合材料弹性模量	I_{db} 桥联相与基体界面键分离长度
E_m 基体弹性模量	k_1 架桥晶须刚度系数
E_w 晶须弹性模量	k_2 晶须的拔出刚度系数
	k_d 晶须拔出的初始约束系数
	K 平衡常数
	K_0 基体材料的断裂韧性
	K_a 应力强度因子

K_{IC} 或 K_{Ic} 断裂韧性(临界断裂阻力)	S 与基体裂纹面法向平行作用于晶须上的拉力; 刚度
K_{th} 阻力曲线门槛值	S_{pl} 晶须拔出过程中拉力
K_R 复合材料的断裂韧性	$S(u)$ 架桥纤维应力的函数关系
K^C 复合材料的断裂韧性	T 或 t 四方相
K^c 基体的临界应力强度因子	T 温度
K^M 基体的断裂韧性	T_g 转变温度
K_{IC}^* 临界断裂韧性	u 晶须变形引起的裂纹张开位移
L 或 l 材料或试件的长度; 晶须长度	u_e 裂纹尖端后方尾流区末端的最大裂纹张口位移
l_c 晶须的半长度	u_n 沿晶须径向的裂纹张开位移
l_i 晶须拔出长度的分量	u_{pl} 晶须拔出部分的裂纹张开位移
L_0 晶须的平均长度	u_l 沿晶须长度方向的裂纹张开位移
L_d 架桥晶须的埋入深度	u_w 晶须变形拉长部分的裂纹张开位移
L_{db} 解离长度	U 单位横截面的应变能
l_{PO} 拔出相长度	U_{b0} 使晶须破断所需要的最小裂纹张口位移
l_{sb} 横向裂纹在界面层中扩展长度	V_f 纤维(或晶须)的体积分数
m 晶粒尺寸指数	V_m 基体的体积分数
m_w 晶须拔出个数	V_w 晶须的体积分数
M 或 m 单斜相; 基体	w_0 断裂功
n_w 晶须破坏个数	W 断裂功
N_w 架桥晶须个数	W_{act} 裂纹扩展实际吸收功
P 压力; 载荷	W_p 拔出功
$P_b(u)$ 破断概率	x 横坐标值(位移)
$P_m(u)$ 基体损坏概率	y 纵坐标值(位移)
$P_{ml}(u/ld)$ 基体损坏概率	z 电阻率
$P_p(u)$ 晶须拔出的边缘概率分布	Z 复阻抗
$P_{pl}(u/ld)$ 晶须拔出概率	α 热膨胀系数
Q 蠕变活化能	α_m 基体的热膨胀系数
Q_c 蠕变活化能	α_w 晶须的热膨胀系数
r_f 纤维半径	σ 应力
R 气体常数; 第二相颗粒的长径比	σ_B 室温的弯曲强度
R 或 r 材料或试件的直径	σ_i 室温强度; 断裂应力
R (或 K_R) 裂纹扩展阻力	σ_L 晶须轴向所受残余热应力
R_m 基体等效电阻	
R_w 晶须等效电阻	
R^I 抗热震断裂参数	
R^II 抗热震损伤参数	

σ_m	基体所受应力	ϵ_f	断裂应变
σ_{mc}	σ_m 的破坏临界值(强度)	ϵ_m	最大应变
σ_{wc}	σ_w 的破坏临界值(强度)	ϵ_r	晶须与基体的失配应变
σ_n	垂直于界面的应力	$\dot{\epsilon}_{ss}$	稳态蠕变速率
σ_r	径向应力, 晶须径向热应力	ϵ_f^f	纤维断裂应变
σ_t	切向应力, 拉伸应力	ϵ_f^m	基体断裂应变
σ_w	晶须所受应力	γ_0	本征断裂能
σ^c	闭合应力	γ_c	临界断裂能
σ_f^l	桥联相拉伸强度	γ_i	界面的应变能释放率, 界面断裂功
σ_f^m	基体的断裂强度	γ_{int}	与微开裂相关的断裂能
σ_f^w	晶须的断裂强度	γ_m	基体的应变能释放率
$\sigma(u)$	架桥应力	γ_s	表面能
ρ	密度	γ_{sb}	界面层上单位面积的断裂表面能
μ	动摩擦系数; 压缩系数(旋转椭球体的短轴与长轴之比)	γ^l	桥联相断裂能
ΔC	裂纹扩展量	γ^i	界面键分离能
ΔC^*	裂纹扩展容限	ω	晶须/基体界面层静摩擦系数
ΔJ^{fb}	由摩擦桥联引起的断裂能上升	ω_2	晶须/基体界面的动摩擦系数
ΔJ^{eb}	纯粹弹性桥联引起的断裂能上升	Σ	梁刚度
ΔJ^{lb}	桥联引起的断裂能变化	Φ	直径
ΔJ^{lf}	拔出引起的断裂能变化	$\Gamma(*)$	伽马(Gamma)函数
ΔJ^{PO}	拔出引起的断裂能上升	Ψ	相位角
ΔK_{IC}^w	晶须的增韧值	χ_r	残余应力系数
ΔT	温(度)差	Ω	空位体积
ΔT_c	临界抗热震温差	g	气体
Δu	裂纹开口位移增量	l	液体
τ_c	τ 的破坏临界值(强度)	s	固体
τ_d	摩擦阻力	M	金属
τ_i	摩擦阻力, 界面剪切强度	Me	金属
θ	失配应变; 方位角; 晶须轴向与 S 方向的夹角	$\%(\text{mol})$	摩尔分数(或摩尔比, 等同于 mol%)
ν	泊松比	$\%(\text{vol})$	体积分数(或体积比, 等同于 vol%)
ν_m	基体的泊松比	$\%(\text{wt})$	质量分数(或质量比, 等同于 wt%)
ν_w	晶须的泊松比		
$\bar{\nu}$	微裂纹区的泊松比		
ϵ	应变		

下角标

- c 立方相; 复合材料; 临界(参数)
- f 纤维; 断裂
- i 界面
- m 单斜相; 基体; 最大
- t 四方相; 沿长度方向; 沿拉伸方向
- (w) 晶须
- (p) 颗粒
- (n) 纳米
- R, r 径向

- T, t 切向
- db 解离, 分离
- b 断裂; 架桥(桥联); 晶界(处)
- n 径向; 垂直于长度方向
- p 晶须拔出
- pl 晶须拔出
- e 内(晶)的
- s Si_3N_4

目 录

序	I
前言	III
符号表	V
第 1 章 绪论	1
1.1 先进陶瓷材料的现状与研究进展	1
1.1.1 功能陶瓷	1
1.1.2 结构陶瓷	2
1.2 多相复合陶瓷的出现和发展前景	7
1.3 本书的主要内容	9
参考文献	11
第 2 章 多相复合陶瓷	12
2.1 多相复合陶瓷的定义	12
2.2 多相复合陶瓷的分类	16
2.3 多相复合陶瓷的原材料及其特性	19
2.3.1 基体材料及其特性	19
2.3.2 增强体材料及其特性	24
2.4 多相复合陶瓷的强韧化机制	28
2.4.1 陶瓷材料的脆性本质及其强韧化类型	28
2.4.2 多相复合陶瓷常见的强韧化机制及其影响因素	31
2.4.3 强韧化机理的发展	36
2.5 多相复合陶瓷的显微结构设计	37
2.5.1 非相变型的多相复合陶瓷增韧的微观结构模型	37
2.5.2 相变型显微结构设计	40
参考文献	41

第3章 晶须补强增韧多相复合陶瓷	44
3.1 概述	44
3.2 晶须	45
3.3 晶须的增韧机理及其影响因素	46
3.3.1 晶须的增韧机理	46
3.3.2 晶须增韧作用的影响因素	56
3.4 晶须补强增韧多相复合陶瓷的设计	58
3.4.1 概述	58
3.4.2 晶须与基体之间的物理匹配	59
3.4.3 晶须和基体之间的化学相容性	60
3.5 晶须补强增韧多相复合陶瓷的制备	61
3.5.1 SiC 晶须的分散工艺	62
3.5.2 烧结致密化工艺	63
3.6 晶界和界面的设计与调控	64
3.6.1 助烧剂的选择和优化	65
3.6.2 晶须的处理和表面状态	68
3.6.3 晶界与界面的结晶化热处理	70
3.7 晶须增韧行为分析模型	71
3.7.1 尾流区与晶须分布	71
3.7.2 尾流区晶须补强基本模式	76
3.7.3 晶须的力学行为	77
3.7.4 架桥应力分析	83
3.7.5 R 曲线行为	94
3.8 晶须定向排布与复合材料的性能	99
3.8.1 定向排布的 SiC _(w) /Si ₃ N ₄ 复合材料的制备工艺	100
3.8.2 晶须定向度的表征方法	102
3.8.3 晶须定向排布对 SiC _(w) /Si ₃ N ₄ 复合材料烧结 性能的影响	104
3.8.4 晶须定向排布对 SiC _(w) /Si ₃ N ₄ 复合材料的 力学性能的影响	110
3.8.5 晶须定向排布对 SiC _(w) /Si ₃ N ₄ 复合材料 电学性能的影响	114

3.9	常见的晶须补强增韧多相复合陶瓷	120
3.9.1	晶须补强增韧 Al_2O_3 陶瓷基复合材料	120
3.9.2	晶须补强 Si_3N_4 陶瓷基复合材料	121
3.9.3	晶须补强 ZrO_2 陶瓷基复合材料	122
3.9.4	晶须补强莫来石陶瓷基复合材料	123
3.9.5	晶须补强增韧石英玻璃基复合材料	124
3.9.6	晶须增强玻璃基复合材料	125
	参考文献	126
第4章	颗粒弥散增韧多相复合陶瓷	131
4.1	颗粒弥散增韧多相复合陶瓷的设计	131
4.2	颗粒弥散增韧多相复合陶瓷的增韧机理	133
4.2.1	非相变颗粒弥散复合陶瓷的增韧机理	134
4.2.2	多颗粒多层次微观复合陶瓷的内应力 表征与强韧化设计	139
4.2.3	颗粒弥散复合陶瓷断裂分形的微观韧化理论	151
4.3	颗粒弥散增韧多相复合陶瓷的制备	160
4.3.1	颗粒弥散复合陶瓷的先进制备工艺	160
4.3.2	纳米复合陶瓷的制备工艺	164
4.4	颗粒弥散增韧陶瓷的优化设计与性能分析	166
4.4.1	概述	166
4.4.2	复合陶瓷的组分优化与设计	167
4.4.3	非相变与相变颗粒复合陶瓷的组分 设计与性能分析	169
4.4.4	纳米-微米颗粒复合陶瓷组分与性能的 量化分析	170
4.4.5	硬质颗粒混合增强陶瓷的分阶段优化设计	175
4.4.6	高组元颗粒弥散复合陶瓷的群相优化设计	179
4.4.7	复合陶瓷粉体合成过程中的工艺优化	184
4.5	颗粒弥散增韧耐磨复合陶瓷的应用	187
4.5.1	耐磨复合陶瓷的系统化设计	188
4.5.2	耐磨性评估与实验验证	191

4.5.3	新型耐磨复合陶瓷系列产品的开发应用	192
	参考文献	193
第5章	ZrO₂相变增韧陶瓷	198
5.1	概述	198
5.2	ZrO ₂ 的结构与性能	200
5.2.1	ZrO ₂ 的晶体结构类型及其特性	200
5.2.2	ZrO ₂ 的稳定性	203
5.2.3	氧化锆中的m-t马氏体相变	206
5.3	ZrO ₂ 超细粉体的制备	209
5.3.1	ZrO ₂ 超细粉体是制备高性能ZrO ₂ 相变增韧陶瓷的基础	209
5.3.2	陶瓷超细粉体制备工艺	211
5.3.3	共沉淀法制备超细ZrO ₂ 粉体	213
5.3.4	微乳液法制备超细球形ZrO ₂ 粉体	215
5.3.5	其他常用的超细ZrO ₂ 粉体制备工艺	229
5.4	ZrO ₂ 相变增韧机理	233
5.4.1	应力诱导相变增韧	233
5.4.2	相变诱发微裂纹增韧	234
5.4.3	裂纹偏转和弯曲增韧	236
5.4.4	裂纹分叉增韧	236
5.4.5	表面相变增韧	236
5.5	ZrO ₂ 相变增韧陶瓷的类型	238
5.5.1	概述	238
5.5.2	部分稳定氧化锆陶瓷	240
5.5.3	四方相氧化锆多晶体陶瓷	243
5.5.4	氧化锆增韧陶瓷	244
5.6	ZrO ₂ 相变增韧陶瓷的特异性能	247
5.6.1	Ce-TZP陶瓷的形状记忆效应	247
5.6.2	Ce-TZP材料形状记忆效应分析	249
5.6.3	Ce-TZP陶瓷铁弹性畴转及伪弹性增韧机理	252
5.6.4	Ce-TZP陶瓷在应力作用下的相变特性	259
5.7	ZrO ₂ 相变增韧陶瓷的增韧力学行为与相变准则	263

5.7.1	裂纹尖端高应力引发相变增韧的力学行为	263
5.7.2	相变多晶体细观本构理论与增韧研究	265
5.7.3	陶瓷增韧力学中的相变准则	267
5.8	ZrO ₂ 相变增韧陶瓷的应用	272
5.8.1	在发动机、内燃机中的应用	273
5.8.2	在磨介和磨具领域的应用	273
5.8.3	其他领域的应用	275
5.8.4	在国内的应用展望	277
	参考文献	278
第 6 章	仿竹木结构的纤维独石复合陶瓷	284
6.1	概述	284
6.2	纤维独石结构复合陶瓷的设计要点	286
6.2.1	材料体系的选择和优化	286
6.2.2	工艺参数、结构参数和几何参数的优化	287
6.3	纤维独石结构复合陶瓷的制备工艺	288
6.3.1	基体纤维坯体的成型	288
6.3.2	界面分隔层的形成	290
6.3.3	纤维的排布	291
6.3.4	排胶和烧结	292
6.4	一维定向排列的纤维独石结构复合陶瓷的 结构与性能	293
6.4.1	Si ₃ N ₄ /BN 纤维独石结构复合陶瓷的结构	293
6.4.2	Si ₃ N ₄ /BN 纤维独石结构复合陶瓷的特殊性能	293
6.4.3	影响纤维独石结构复合陶瓷性能的主要因素	296
6.5	二维片层垂直交叉排布的纤维独石结构复合陶瓷的 结构与力学性能	303
6.5.1	二维片层垂直交叉排布的 Si ₃ N ₄ /BN 纤维独石结构复合陶瓷的结构	303
6.5.2	二维片层垂直交叉排布的 Si ₃ N ₄ /BN 纤维独石结构复合陶瓷的力学性能	304
6.5.3	二维片层垂直交叉排布的 Si ₃ N ₄ /BN 纤维独石结构复合陶瓷的断裂机制	306