

材料科学与技术丛书

R. W. 卡恩 P. 哈森 E. J. 克雷默 主编

(第17A卷)

陶瓷工艺

(第 I 部分)

(英) 理查德 J. 布鲁克 主编

科学出版社



DF20/02
材料科学与技术丛书(第 17A 卷)

R. W. 卡恩 P. 哈森 E. J. 克雷默 主编

陶 瓷 工 艺

(第 I 部分)

[英] 理查德 J. 布鲁克 主编

清华大学新型陶瓷与精细
工艺国家重点实验室 译

黄 勇 等 审校



科学出版社

1999

图字:01-97-1629 号

图书在版编目(CIP)数据

陶瓷工艺 [英] 理查德 J. 布鲁克主编; 清华大学新型
陶瓷与精细工艺国家重点实验室译. -北京: 科学出版社,
1999. 6

(材料科学与技术丛书: 第 17A 卷)

书名原文: Processing of Ceramics Part I

ISBN 7-03-007136-0

I. 陶… II. ①布… ②清… III. 陶瓷-生产工艺 IV. TQ174

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (98) 第 35070 号

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号
邮政编码: 100717

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1999 年 6 月第一版 开本: 787×1092 1/16
1999 年 6 月第一次印刷 印张: 24 1/2
印数 1—2 500 字数: 558 000

定价: 55.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换(新欣))

2
7122
6.12.6

《材料科学与技术》丛书 中文版编委会

主编

- | | |
|----------|-------------|
| 师昌绪 | 国家自然科学基金委员会 |
| 柯俊 | 北京科技大学 |
| R. W. 卡恩 | 英国剑桥大学 |

成员 (以姓氏笔画为序)

- | | |
|-----|-----------------|
| 丁道云 | 中南工业大学 |
| 干福熹 | 中国科学院上海光机研究所 |
| 叶恒强 | 中国科学院金属研究所 |
| 刘嘉禾 | 北京钢铁研究总院 |
| 朱逢吾 | 北京科技大学 |
| 朱鹤孙 | 北京理工大学 |
| 吴人洁 | 上海交通大学 |
| 闵乃本 | 南京大学 |
| 周邦新 | 中国核动力研究设计院 |
| 柯伟 | 中国科学院金属腐蚀与防护研究所 |
| 施良和 | 中国科学院化学研究所 |
| 郭景坤 | 中国科学院上海硅酸盐研究所 |
| 徐僊 | 四川大学 |
| 徐元森 | 中国科学院上海冶金研究所 |
| 黄勇 | 清华大学 |
| 屠海令 | 北京有色金属研究总院 |
| 雷廷权 | 哈尔滨工业大学 |
| 詹文山 | 中国科学院物理研究所 |
| 颜鸣皋 | 北京航空材料研究院 |

总 译 序

20 世纪 80 年代末,英国剑桥大学的 R. W. 卡恩教授、德国哥丁根大学的 P. 哈森教授和美国康乃尔大学的 E. J. 克雷默教授共同主编了《材料科学与技术》(Materials Science and Technology)丛书。该丛书是自美国麻省理工学院于 80 年代中期编写的《材料科学与工程百科全书》(Encyclopedia of Materials Science and Engineering)问世以来的又一部有关材料科学和技术方面的巨著。该丛书全面系统地论述了材料的形成机理、生产工艺及国际公认的科研成果,既深刻阐述了有关的基础理论,具有很高的学术水平,又密切结合生产实际,实用价值较强。

该丛书共 19 卷(23 分册),分三大部分:第 1~6 卷主要阐述材料科学的基础理论;第 7~14 卷重点介绍材料的基本性能及实际应用;第 15~19 卷则着重论述材料的最新加工方法和工艺。

该丛书覆盖了现代材料科学的各个领域,系统而深入地对材料科学和技术的各个方面进行了精辟的论述,并附以大量图表加以说明,使其内容更加全面、翔实,论述也比较严谨、简洁。

有 400 余名国际知名学者、相关领域的学术带头人主持或参加了该丛书的撰写工作,从而使该丛书具有很高的权威性和知名度。

该丛书各卷都附有大量参考文献,从而为科技工作者进一步深入探讨提供了便利。

随着我国科学技术的飞速发展,我国从事与材料有关研究的科技人员约占全部科技人员的 1/3,国内现有的有关材料科学方面的著作远远满足不了广大科技人员的需求。因此,把该丛书译成中文出版,不但适应我国国情,可以满足广大科技人员的需要,而且必将促进我国材料科学技术的发展。

基于此,几年前我们就倡议购买该丛书的版权。科学出版社与德国 VCH 出版社经过谈判,于 1996 年 10 月达成协议,该丛书的中文版由科学出版社独家出版。

为使该丛书中文版尽快与广大读者见面,我们成立了以师昌绪、柯俊、R. W. 卡恩为主编,各分卷主编为编委的中文版编委会。为保证翻译质量,各卷均由国内在本领域学术造诣较深的教授或研究员主持有关内容的翻译与审核工作。

本丛书的出版与中国科学院郭传杰研究员的帮助和支持是分不开的,他作为长期从事材料科学研究的学者,十分理解出版本丛书的重大意义,购买本

丛书版权的经费问题就是在他的大力协助下解决的，特此对他表示感谢。另外，本丛书中文版的翻译稿酬由各卷主编自筹，或出自有关课题组和单位，我们对他们给予的支持和帮助表示衷心的感谢。

我们还要感谢中国科学院外籍院士、英国皇家学会会员 R. W. 卡恩教授，他以对中国人民的诚挚友谊和对我国材料科学发展的深切关怀，为达成版权协议做出了很大努力。

材料是国民经济发展、国力增强的重要基础，它关系着民族复兴的大业。最近几年，我国传统材料的技术改造，以及新型材料的研究正在蓬勃展开。为适应这一形势，国内科技界尽管编著出版了不少材料科学技术方面的丛书、工具书等，有的已具有较高水平，但由于这一领域的广泛性和迅速发展，这些努力还是不能满足科技工作者进一步提高的迫切要求，以及我国生产和研究工作的需要。他山之石，可以攻玉。在我国造诣较深的学者的共同努力下，众煦漂山，集腋成裘，将这套代表当代科技发展水平的大型丛书译成中文。我们相信，本丛书的出版，必将得到我国广大材料科技工作者的热烈欢迎。

为了使本丛书尽快问世，原著插图中的英文说明一律未译，各卷索引仍引用原著的页码，这些页码大致标注在与译文相应的位置上，以备核查。

由于本丛书内容丰富，涉及多门学科，加之受时间所限，故译文中难免存在疏漏及不足之处，请读者指正。

师昌绪

柯俊

1998年3月于北京

译者序

本书为《材料科学与技术》丛书之一。本书全面、系统地介绍了先进陶瓷的各种制造工艺及过程和这一领域的最新发展,包括陶瓷的显微结构特征,陶瓷制造过程中的加工工艺控制,粉体的化学制备,颗粒与粉体表征,模压和等静压,注浆成型和压滤成型,流延成型,注射成型,单晶、坯体显微结构及其表征等。本书不但是陶瓷材料科学工作者及工程师的重要参考资料,也是高校教师及研究生的优秀读物。

本书由清华大学材料系、新型陶瓷与精细工艺国家重点实验室黄勇教授组织翻译。清华大学材料系的谢志鹏、杨金龙、汪长安、潘伟、关振铎、司文捷、齐龙浩、蔡胜友、陈健、赵结、唐建新、许许等人参与了翻译与校对工作。湖南大学唐绍裘、山东工业陶瓷设计研究院王树海对某些章节进行了翻译与校对。国家建材研究院樊启晟、李懋强,清华大学桂治轮、崔福斋、刘元鹤、鹿安理和曾照强参加了校对工作。此外,清华大学翁端对前言部分提出了修改意见。周龙捷、向军辉、代建清、刘晓林等人参加了部分整理工作。最后,全书由黄勇进行校对、统稿。

本书的翻译工作得到湖南电力电瓷电器厂特种陶瓷厂杨昌桂厂长的热情支持与赞助,也得到许多同行专家的关心与支持,在此一并致以衷心谢意。

由于翻译工作量大,涉及知识面宽,加之时间仓促,书中不妥之处在所难免,敬请读者批评指正。

丛书序

材料是多种多样的,如金属、陶瓷、电子材料、塑料和复合材料,它们在制备和使用过程中的许多概念、现象和转变都惊人地相似。诸如相变机理、缺陷行为、平衡热力学、扩散、流动和断裂机理、界面的精细结构与行为、晶体和玻璃的结构以及它们之间的关系、不同类型材料中的电子的迁移与禁锢、原子聚集体的统计力学或磁自旋等的概念,不仅用来说明最早研究过的单个材料的行为,而且也用来说明初看起来毫不相干的其它材料的行为。

正是由于各材料之间相互有机联系而诞生的材料科学,现在已成为一门独立的学科以及各组成学科的聚集体。这本新的丛书就是企图阐明这一新学科的现状,定义它的性质和范围,以及对它的主要组成论题提供一个综合的概述。

材料技术(有时称材料工程)更注重实际。材料技术与材料科学相互补充,主要论及材料的工艺。目前,它已变成一门极复杂的技艺,特别是对新的学科诸如半导体、聚合物和先进陶瓷(事实上对古老的材料)也是如此。于是读者会发现,现代钢铁的冶炼与工艺已远超越古老的经验操作了。

当然,其它的书籍中也会论及这些题目,它们往往来自百科全书、年报、专题文章和期刊的个别评论之中。这些内容主要是供专家(或想成为专家的人)阅读。我们的目的并非贬低同行们在材料科学与技术方面的这些资料,而是想创立自己的丛书,以便放在手边经常参考或系统阅读;同时我们尽力加快出版,以保证先出的几卷与后出的几卷在时效方面有所衔接。个别的章节是较之百科全书和综述文章讨论得更为详细,而较之专题文章为简略。

本丛书直接面向的广大读者,不仅包括材料科学工作者和工程师,而且也针对活跃在其它学科诸如固体物理、固体化学、冶金学、建筑工程、电气工程和电子学、能源技术、聚合物科学与工程的人们。

本丛书的分类主要基于材料的类型和工艺模式,有些卷着眼于应用(核材料、生物材料),有些卷则偏重于性能(相变、表征、塑性变形和断裂)。有些题材的不同方面有时会被安排在两卷或多卷中,而有些题材则集中于一专卷内(如有关腐蚀的论述就是编在第7卷的一章中,有关粘结的论述则是编在第12卷的一章中)。编者们特别注意卷内与卷间的相互引证。作为一个整体,本丛书完成时将刊出一卷累积的索引,以便查阅。

我们非常感谢VCH出版社的编辑和生产人员,他们为收集资料并最后出

书,对这样繁重的任务作出了大量而又高效的贡献。对编辑方的 Peter Gregory 博士和 Deborah Hollis 博士、生产方的 Hans-Jochen Schmitt 经济学工程师表示我们的特别谢意。我们亦感谢 VCH 出版社的经理们对我们的信任和坚定的支持。

R. W. 卡恩 (Cambridge)

P. 哈森 (Göttingen)

E. J. 克雷默 (Ithaca)

我们的朋友和主编 P. 哈森教授,在今年五月份生病,并于 10 月 18 日在哥丁根 (Göttingen) 逝世,时年 66 岁。直到临终的最后一段时间,由于意志的驱使和对科学的热爱,他一直从事与我们合作的事业和参与有关的编辑工作。他的逝世对他的深为他热爱的家庭,他的同事们,他的教会,以及对全世界与他有密切联系的、从事金属物理和物理冶金方面研究的同行们是巨大的损失。

哈森博士为哥丁根大学的金属物理教授逾 30 年,直到近来退休,他的名字传递了大西洋两岸。在他的祖国,他智慧的箴言,在公众界和学生间将会留下巨大的影响。他是《金属材料杂志》(Zeitschrift für Metallkunde) 的编辑,曾是哥丁根艺术与科学院 (Göttingen Academy of Arts and Sciences) 主席,Deutsche Gesellschaft für Metallkunde 理事会的中心人物,欧洲科学院院士,美国工程院院士。

1986 年,他首先倡议而最终导致出版《材料科学与技术》丛书前 18 卷,他亲自编著的关于相变方面的第 5 卷《材料的相变》于 1991 年出版,并获赞誉。我们感谢他对这一伟大事业的贡献,并以成功地完成这一事业作为对他的纪念。

R. W. 卡恩 (Cambridge)

E. J. 克雷默 (Ithaca)

1993 年 10 月

前 言

陶瓷工艺这一主题似乎常常构成材料科学与工程中一个颇为突出的矛盾体。一方面,它被认为是陶瓷学赖以进一步发展的基础,正如机械强度与制造过程中留在材料内部的缺陷形态及尺寸之间的格里菲斯(Griffith)关系一样,性能对工艺过程有着明显的依赖性,这表明工艺是确定陶瓷材料是否能够推向预期市场的决定因素。另一方面,与工艺的重要性这一普遍认识相反,要找到有关这一主题的系统文献确实存在困难。目前,有一些论述关于陶瓷物理学及诸如磁学、压电学或力学矢量等专门性能的优秀教科书,然而除少数之外,几乎没有向希望了解陶瓷工艺方法全貌的读者提供有用知识和科学的指导。

这一困难可能有几种原因,首先陶瓷工艺常常仅仅根据实用准则来评价。一个制品的成功更多的是由最后质量来衡量,而很少通过其形成过程构思的精巧或论证的严谨来体现。假如这种材料的力学性能不够优异,那么原来的构思就会轻易被否定。这种主题目标的定位很难发展并实现像描述材料结构与性能关系那样获得一种共性的系统工艺的学科。

工艺过程的第二个困难是出于专利制度的因素,那些在追求最终目标方面不甚成功的人总是愿意谈及自己的经验,而那些达到目标的人已转向专利或者一直保持沉默。在该研究主题中这种倾向可能会使人们感到自己是在读一部空洞的文献,其中关键的信息已被删除殆尽。

第三个困难在于工艺过程造成结果的离散性质。我们面临的多变量问题导致的结果常常取决于局部因素甚至非可控的因素。一种材料的性能可能会被报道成具有很好的预期性,重复的实验可以产生重复的结果,但与工艺过程有关的某些文章却给人相反的感觉,即所报道的结果可能是特指某日某种气候条件下在某一实验室获得的结果(因而制造商便不轻易改变其稳定的生产工艺)。试图通过减少变量数来消除离散性从而能够很快减少与实验工艺条件的关联。

最后一个困难在于工艺技能通常是由技术诀窍来表示的,而不是用建立成熟的系统学科理论来表示。读者除了理解之外还在征求如何去做的意见。对结晶学或热力学,编写出优秀的教科书是可能的,并且许多人已经做了,但是关于工艺过程的教科书却要求作者本身拥有大量的经验。技术诀窍是无价的,但是在一本正规的教科书中描述它有时却惊人的简单。

针对这些困难,我们在本卷第一部分及第二部分中做了很大的努力,充分地、符合逻辑地展示陶瓷工艺过程的最新知识。本卷编著者均为其相关领域的

专家,但是,他们仍充分地警觉到有关工艺过程及其描述的困难。毫无疑问,最后一点使得他们成功地将他们从经验中得来的技术诀窍与基本科学理论联系起来,从而使读者综合地了解真实情况,并同时读者予以指导。

本卷章节的组织是按陶瓷工艺过程从开始到结束的顺序编排的。我们希望这样的编排形式会有利于读者。陶瓷工艺过程本身很容易分成两个大部分,第一部分为高温热处理前或烧成前各步骤,第二部分为各个步骤与陶瓷粉体的预成型转化或固化产品的烧成相关过程。本卷这两部分的总体安排就是按这一划分编排的。烧成前各工序在本卷第一部分讨论,烧成过程在本卷第二部分讨论。

对烧成前的陶瓷工艺过程,我们关心的是各种添加剂,这些添加剂会使粉体颗粒聚集团结为我们所希望的各种形状的部件并且实现部件内部结构无缺陷。章节的编排根据制造部件的工序。第1章涉及能够区分不同陶瓷类型的显微结构特征。人们希望知道部件的结构目标以便可以设计工艺过程顺序。当部件制造的要求提高时,显微结构特征就越复杂,这特征不仅涉及显微结构,即结构组元如晶粒、气孔、粒间相、界面等在细节水平上详细排列,而且也涉及宏观结构(如复合材料),即部件内部不同结构区的组织。

接下这一章是涉及陶瓷制造的工艺控制,除了用来保证设计的工艺模式是可行和可控的方法论之外,可以把这章看作是是整个工艺过程的综述评论。因此,对其它章节和在上下文里设置每一种特殊的介绍都是很好的引言。

随后几章集中在从粉体原料到烧成前坯体各工序中的每一个步骤。最近几年更强调应用精细化学法来制备粉体,并使粉体在颗粒尺寸、尺寸分布、内部结构和特性等方面都可能是均匀的。第3章介绍化学法的概况,为获得优异的均匀粉体,这个方法已得到研究和开发。对已制备好的粉体,表征它们的特性是很重要的,可以采用的各种方法在第4章中描述。

一旦制备好粉体,下一步骤是把粉体成型为所希望的部件,而且有许多不同方法可以选用。在第5章中,用单轴向模压和更先进的等静压技术,来描述干压法成型部件。这是在坯体中非常容易形成缺陷的步骤之一,掌握与控制这种工艺技术是至关重要的。第二种方法是注浆成型。这种方法是把粉体制成悬浮体,然后将料浆注入模具。关于悬浮体的稳定性,在第6章中介绍。注浆成型的优点是当采用熟练的技术时可以使注浆的部件获得好的均匀性。与注浆成型有特殊关联的是在基板上薄涂层的成型,然后涂层可以分离、堆叠和切成分立元件。第7章主要介绍流延工艺,这种工艺对先进的介电元件的制造是很重要的。最后一种方法是注射成型,这种方法是将陶瓷悬浮体注射到成型模具中,这与高聚物系统注射成型方法完全一样。这种特殊的成型工艺为低价制造大体积部件提供非常有前景的制备方法,很可能这种方法的使用在未来的几

年将会得到实质性发展。

粉体工艺过程的最后一个步骤是对已制备好的部件进行评价。表征坯体显微结构的各种方法在第10章中已作介绍。在烧成工艺情况下要去除坯体微观结构中的缺陷是有限的,所以对有缺陷部件的辨别在这个工序中特别严格。

第9章是单独一章,与粉体工艺过程不同,这章涉及到单晶的各种制备方法。对已知具有重要意义的成分特别是钙钛矿系统给予重视。

最后,我要向参加本卷写作的作者们表示敬意,他们面对的任务就其本质而言,必然是复杂的。我对他们让读者能够积极了解这个学科主题的知识所表现的能力和才华感到欣慰。由于作者们的奉献和协作,使本卷各章既围绕主题又具有连续性,对此我深表谢意。同时还要感谢 VCH 编委 Deborah Hollis 和 Peter Gregory 有效地协调了 Weinheim 的编辑和出版工作。

最后,我还想感谢 R. W. 卡恩教授在编辑第17卷(A, B)所起的重要作用。他与他的同事共同负责指导《材料科学与技术》整套丛书的编辑工作。但是在本卷中他所做的工作远远超出指导的范围。在本卷中我自己的工作是建立编写的框架,以及从三个方面来认识和发现作者群,即识别专家,真诚、形象、实际的介绍专家的能力,确立承担任务的意愿。随着编辑工作的进行,原来的写作班子发生了一些变化。这些变化也给 R. W. 卡恩教授带来许多麻烦,因为由他负责对这些作者们进行训练、指导、建议、鼓励,甚至有时进行慰问。他的编辑经验在修改论文时得到了充分体现,而且编辑加工诀窍也是促进本卷顺利完成的关键因素。

理查德 J. 布鲁克

Oxford, 1995 年 8 月

目 录

1 陶瓷的显微结构特征	(1)
2 陶瓷制造过程中工艺控制	(23)
3 粉体的化学制备	(56)
4 颗粒和粉体表征	(82)
5 模压和等静压	(106)
6 注浆成型和压滤成型	(130)
7 流延成型	(161)
8 注射成型	(227)
9 单晶	(269)
10 坯体显微结构及其表征	(296)
索引	(335)

1 陶瓷的显微结构特征

Roger Morrell

National physical laboratory, Teddington, Middlesex, U. K.

(关振铎 译 桂治轮 黄 勇 校)

目 录

1.1 引言	3
1.2 可控气孔率	4
1.2.1 宏观多孔体	4
1.2.2 显微气孔体	5
1.2.3 纳米级气孔体	6
1.3 室温力学强度	6
1.3.1 杨氏模量	7
1.3.2 缺陷尺寸	7
1.4 断裂能	9
1.5 抗高温变形性	12
1.6 热震阻力	13
1.7 硬度及抗磨损性	13
1.7.1 硬度	13
1.7.2 滑动抗磨损性	13
1.8 热导率	14
1.8.1 高值热导率	15
1.8.2 最低热导率	15
1.9 热膨胀	15
1.10 光学功能	17
1.10.1 透明度及半透明度	17
1.10.2 色彩	17
1.10.3 发射率	17
1.10.4 特殊光学功能	17
1.11 特殊的电功能	18
1.12 磁学功能	19
1.13 抗腐蚀性	19
1.14 连接能力	20
1.15 总结性注解	20
1.16 参考文献	21

符号与缩语表

A	常数
c	裂纹尺寸
E	杨氏模量
γ_i	韧性或断裂功
σ_f	最终破坏应力
YAG	钇铝石榴石

1.1 引言

工业制造的陶瓷产品仅保证几个性能指标,包括:

- 材料的几种性能;
- 产品的特征;
- 零件的尺寸形状,要求的尺寸公差;
- 产品的成本。

其中前两项主要取决于所采用的化学成分,以及获得的显微结构;而后两项则是与工厂设备的选择、制备方法的可靠性以及总的工艺有效成本等问题有关。除了主要的餐具和装饰瓷以外(虽然对这种除外还有争议),大多数陶瓷都具有一些技术功能,其中包括某些特殊性能的要求。要满足上述各项要求,必须对获得理想的显微结构特征依次进行化学成分的选择、原材料的选用以及优化所使用的工艺。本章企图讨论所应具有显微结构特征。在某种程度上讲,这是一个非常复杂又很难统一的问题,但是有一些导向性物理原则,可用以描述材料形成的细节。

为此,本章从下列特性要求或所需性能角度来考虑这些显微结构特征:

- 可控的气孔率;
- 室温力学强度;
- 韧性;
- 高温下抵抗形变或蠕变的阻力;
- 热震阻力;
- 硬度、滑动磨损或摩擦阻力;
- 热导率的控制;
- 热膨胀的控制;
- 光学功能;
- 特殊电学功能;
- 特殊磁学功能;
- 抗腐蚀性。

上面所列的主要技术特性判据,用以判断在具体应用时陶瓷的适应性。我们设想是针对多晶体陶瓷而言的,而这种多晶体陶瓷是由粉料或其它合适的制造途径制成,而不是指单晶而言。

很清楚,确定陶瓷内部的各种相,最主要的是化学成分,因而显示其各种性能,但我们仅举一些化学成分的例子来说明产品的具体类型,此时,在技术产品中所指的是已具有优化了的显微结构。这样,我们即能讨论不被过多而有趣的实际细节所混淆了的各种本质问题。

在论述上述每种性能指标以前必须先要看看陶瓷显微结构的基本特性。当我们取一

1) 为原著页码,仅供参考。——译者注

种或几种氧化物或非氧化物粉料,成型后经高温工艺固结成瓷时,坯体中单个粒子由热力学的(以及如采用热压工艺,加上力学的)作用,促进其本身产生重排,并连结而成固体,通常这个过程是在有或没有液相存在下由离子移动来完成的。最终结果很少是由近乎等

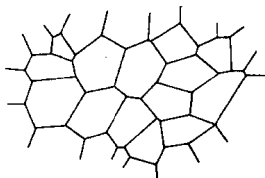


图 1-1 典型单相多晶陶瓷结构,由规则的多面体晶粒组成

尺寸的多面体颗粒的典型规则排列(图 1-1),而是受许多因素控制,包括:

• p. 4 •

- 粉料的化学性质以及总组成,
- 粉料的表面化学,
- 颗粒形貌(表面积,颗粒尺寸及形状),
- 成型工艺以及所用压力大小,
- 固结成瓷所用的热循环,
- 以及可以被下列显微结构特征所描述:
- 每一相的化学成分,

- 每一相的尺寸及形状,
- 每一相的择优取向(织构),
- 煅烧前成型体(生坯)中作为未填充的间隙而存在的气孔率的减小程度。

客观世界的千变万化给陶瓷制造商制造各种产品提供广阔的选择机会,优化陶瓷显微结构特征的研究成果给陶瓷找到其应用并开拓市场。

1.2 可控气孔率

采用粉体制备工艺来制造陶瓷时,通常在显微结构中会存在残余气孔率。烧结不适当以及晶粒生长工艺过程限制气孔率的完全消失,烧结和晶粒生长工艺都是力图减少外露表面以及晶界的总表面积。然而对某些力学性能来说,完全消除气孔则是所希望的目标。但这未必适合其它材料,例如过滤器、薄膜、催化剂载体,以及抗热震性材料和低热导率材料等一系列其它应用场合,然而,粉体工艺允许我们在固结工艺阶段慎重地避免气孔的去除来控制气孔率。

1.2.1 宏观多孔体

由非规则的相同尺寸颗粒组成的堆积体,留下很大的孔隙体积分数,形成可让流体渗透或含有空气的不规则形状的许多通道。多年来这一原理曾经用于可控过滤或隔热。凡是需要制成坚硬的陶瓷过滤器(Muilwijk 和 Tholen, 1989),都是由大尺寸的颗粒粘结而成,其间的接触点用陶瓷粘结剂粘结,而这里的陶瓷粘结剂本质上可以是无定型体的,也可以是晶体[图 1-2(a)]。粘结相的数量控制了材料的强度,但用少量的粘结相时并不影响过滤器的特性。

用于动力厂或燃烧工厂的陶瓷除尘器是一个有趣的例子(Morrell 等, 1990)。一粗糙而多孔的块体用作过滤器壁,并在穿过材料厚度的方向上给予一个低的压力降,当然在使用情况下,此材料应具有足够的强度以支持本身的力学要求。这样,细的尘粒被阻挡住,并

• 4 •