

高等学校教材

粉末冶金与 陶瓷成型技术

刘军 余正国 编
戈晓岚 审



化学工业出版社
教材出版中心

高等学校教材

粉末冶金与陶瓷成型技术

刘 军 余正国 编
戈晓岚 审



化学工业出版社
教材出版中心

· 北 京 ·

(京) 新登字 039 号

图书在版编目(CIP)数据

粉末冶金与陶瓷成型技术/刘军, 余正国编. —北京:
化学工业出版社, 2005. 7
高等学校教材
ISBN 7-5025-7238-4

I. 粉… II. ①刘…②余… III. ①粉末冶金-高等
学校-教材②陶瓷-成型-高等学校-教材 IV. ①TF12
②TQ174. 6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 077019 号

高等学校教材
粉末冶金与陶瓷成型技术

刘 军 余正国 编

戈晓岚 审

责任编辑: 杨 菁 陈 丽

文字编辑: 徐雪华

责任校对: 战河红

封面设计: 潘 峰

化学工业出版社
教材出版中心 出版发行

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

购书咨询: (010) 64982530

(010) 64918013

购书传真: (010) 64982630

[http:// www cip com. cn](http://www.cip.com.cn)

*

新华书店北京发行所经销

北京市兴顺印刷厂印装

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 10 字数 237 千字

2005 年 8 月第 1 版 2005 年 8 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-7238-4

定 价: 18.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

前 言

粉末冶金和陶瓷材料都属于粉末烧结材料，是现代工程材料的重要组成部分，在国民经济中占有举足轻重的地位。用粉末冶金和陶瓷材料制备产品时，需要通过成型将粉体制备成一定的形状，再进行烧结。因此，成型技术对粉末冶金和陶瓷材料的制备非常重要。

本书以粉末冶金和工程陶瓷材料为对象，系统介绍了这两种材料的各种成型技术。在内容编排上，先介绍了粉末烧结材料的概况、特点及粉体的基本性能，再详细介绍各种具体成型方法的原理和工艺，包括压制成型、轧制成型、挤压成型、注浆成型、热压注成型、注射成型等。在介绍传统、经典的成型方法的同时，注意介绍了成型技术的最新进展，如原位凝固成型技术和快速成型技术，使读者对成型技术的前沿领域有所了解。对于粉末冶金和工程陶瓷材料这两种既有共同点又有显著区别的材料，在介绍时不仅注重其共性问题，而且阐述了两者在成型过程中的不同特点，尽量满足分别从事粉末冶金和工程陶瓷材料学习、研究和生产的人员需求。

在本书的写作过程中，参考了国内外有关教材、专著、文章及其他文献，并在每章之后列出了主要参考文献。由于工作疏漏，可能还有一些文献未能列出。在此，谨向各位参考文献的作者致以衷心的感谢，向未能列出的其他文献的作者们致以深深的歉意。

本书由江苏大学刘军和余正国负责编写。具体分工为：刘军负责编写第一章、第三章、第五章、第七章和第六章的第二节；余正国负责编写第二章、第四章和第六章的第一节。全书由戈晓岚教授负责审稿。由于作者水平有限，加之将粉末冶金材料和工程陶瓷材料的成型技术作为一个统一的体系综合加以介绍是一种新的尝试，文中一定存在许多疏漏及不妥之处，恳请读者批评指正。

编 者

2005 年 6 月

内 容 提 要

本书介绍了粉末烧结材料的特点，系统阐述了粉末冶金材料和陶瓷材料的成型技术，包括压制成型、轧制成型、挤压成型、注浆成型、热压注成型、注射成型等成型方法。同时介绍了近年来发展起来的一些成型新技术，如原位凝固成型技术、快速成型技术等。并对纳米材料成型技术的进展作了简介。本书可以作为高等院校相关专业的教材或教学参考书，也可供从事粉末冶金材料和陶瓷材料研究与生产工作的工程技术人员参考之用。

目 录

第一章 粉末烧结材料	1
第一节 粉末烧结材料的基本概念.....	1
一、粉末烧结材料的定义.....	1
二、粉末烧结材料的制备过程.....	1
三、粉末烧结材料的特点.....	2
四、粉末烧结材料的应用.....	2
第二节 粉末烧结材料的显微结构特点.....	3
一、粉末烧结材料显微结构的形成.....	3
二、材料的烧结过程.....	3
三、粉末烧结材料显微结构的特征及对性能的影响.....	4
第三节 粉体及其特性.....	6
一、粉体的几何特性.....	6
二、粉体的物理化学特性	10
三、粉体的工艺性能	11
参考文献	13
第二章 粉末冶金与陶瓷成型概述	14
第一节 成型方法的分类	15
一、按粉末材料的类别分类	15
二、按坯料的特性分类	15
三、按成型的连续性分类	16
四、按有无模具分类	16
第二节 成型与成型前后工艺的关系	16
一、成型坯体的结构与性质	16
二、成型工艺对成型前坯料的要求	17
三、成型工艺对成型后续工艺的影响	20
四、成型对机械加工的影响	24
第三节 粉末冶金材料与陶瓷材料成型特点的比较	25
一、金属粉末与陶瓷粉末的特性比较	26
二、粉末冶金成型工艺与陶瓷成型工艺的特点的比较	28
参考文献	30
第三章 压制成型	32
第一节 压制成型原理	32

一、粉末压制过程	32
二、压制过程力的分析	33
三、粉末压制理论	36
第二节 压制成型工艺	42
一、压制方法	42
二、压制压力和压坯密度的关系	43
三、复杂零件的压制成型	44
四、压制成型模具	45
第三节 影响压制成型的因素	46
一、粉体性能的影响	46
二、润滑剂和塑化剂的影响	47
三、工艺参数的影响	49
四、加压方式的影响	50
第四节 等静压成型	51
一、等静压成型原理	51
二、等静压成型工艺	52
三、等静压成型模具	54
参考文献	55

第四章 轧制成型	56
第一节 轧制成型原理	56
一、粉末轧制中的变形	56
二、粉末轧制的咬入角与主要变形系数	57
三、粉末在轧制时的流动与不均匀变形	59
第二节 轧制成型工艺	61
一、冷轧制成型	61
二、热轧制成型	67
第三节 影响轧制成型的因素	69
一、粉末性能的影响	69
二、工艺参数和工艺条件的影响	71
第四节 轧制成型的應用	77
一、轧制金属及其合金的致密板、带材	78
二、轧制金属及其合金的多孔板、带材	81
三、轧制复合材料和特殊性能材料	83
第五节 轧膜成型	88
一、轧膜成型原理	88
二、轧膜成型工艺	88
三、轧膜成型影响因素	90

四、轧膜成型的应用	92
参考文献	93
第五章 挤压成型与注浆成型	94
第一节 挤压成型	94
一、坯料的可塑性	94
二、挤压成型原理	95
三、挤压成型影响因素	96
第二节 注浆成型	99
一、料浆的制备	99
二、注浆成型方法	102
三、注浆成型模具	104
四、注浆成型影响因素	105
参考文献	107
第六章 热压注成型与注射成型	108
第一节 热压注成型	108
一、热压注成型原理	108
二、热压注成型工艺	108
三、脱脂处理	110
四、热压注成型影响因素	111
五、热压注成型的应用	112
第二节 注射成型	113
一、注射成型原理	113
二、喂料的制备	114
三、注射过程	116
四、脱脂过程	118
五、注射成型的应用	120
参考文献	120
第七章 成型技术新进展	121
第一节 原位凝固成型	121
一、原位凝固成型原理	121
二、直接凝固成型 (DCC)	122
三、凝胶注模成型	124
第二节 快速成型	128
一、快速成型技术概述	128
二、快速成型过程	128

三、典型的快速成型工艺.....	129
四、粉末材料选择性烧结成型技术.....	130
五、喷墨打印成型技术.....	132
六、熔化沉积成型技术.....	133
七、分层实体制造技术.....	134
第三节 其他成型方法.....	135
一、电泳沉积成型.....	135
二、自蔓延技术.....	138
第四节 纳米材料的成型技术.....	143
一、纳米材料的工艺特点.....	143
二、超高压成型法.....	144
三、冷等静压成型法.....	145
四、橡胶等静压成型法.....	145
五、原位加压成型法.....	146
六、离心注浆成型法.....	147
七、凝胶注模成型法.....	147
参考文献.....	147

第一章 粉末烧结材料

第一节 粉末烧结材料的基本概念

一、粉末烧结材料的定义

粉末烧结材料是以粉末为原料，经过成型和烧结制得的金属、无机非金属材料或复合材料。根据所制备材料的种类可以选择金属粉末、无机非金属（陶瓷）粉末或两者的复合粉末。常见的粉末烧结材料有金属类的粉末冶金材料和非金属类的陶瓷材料。

二、粉末烧结材料的制备过程

粉末烧结材料的制备过程是从粉体到致密烧结体的工艺过程，其工艺流程如图 1-1 所示。



图 1-1 粉末烧结材料的制备过程

1. 粉体的制备

粉体制备和处理是粉末烧结材料制备的基础。粉末冶金材料和陶瓷材料的制备需要符合其工艺特性的粉体，具体内容在本章第三节讨论。粉体的制备有多种方法，最简单的方法是购买现成的工业产品进行机械粉碎，如球磨、气流粉碎等，以达到所需的粒度。除此之外，还可以用液相法（如沉淀或共沉淀法、溶胶-凝胶法、电解法等）、气相法（如气相沉积法等）制备粉体。制备粉末烧结材料的粉体应具有较高的纯度，较小的颗粒度，较窄的粒径分布和良好的流动性。

2. 成型

成型是将粉体按一定方法制备具有一定形状、尺寸、强度和孔隙率的坯体。成型的方法有很多种，每种方法有其不同的特点和适用范围。常用的成型方法有压制成型（如单、双向压制和等静压成型）、可塑法成型（如轧制成型、挤压成型）、胶态成型（如注浆成型、热压注成型、注射成型）等。在成型之前，针对每种成型方法的特点和成型粉体的特性，要对粉体进行处理。如陶瓷粉体的干压成型要进行造粒，注浆成型前要制备高固相含量、低黏度的料浆。在粉体的处理过程中往往要加入一定量的水和添加剂，如黏结剂、润滑剂、分散剂等，这些添加剂在成型后要在一定温度下排除掉，以防止在高温烧结过程中由于成型添加剂的挥发形成缺陷。

3. 烧结

烧结是将成型件在一定的温度和气氛下进行热处理，使坯体发生颗粒黏结、孔隙率下降、强度提高的过程。从本质上看，烧结是由于固态中的分子或原子相互吸引，通过加热体产生颗粒黏结，经过物质迁移使粉末体产生强度并导致致密化和再结晶的过程。在烧结过程中，一些材料还伴随着固相反应、相变和局部熔融。通过烧结，材料的强度、硬度等性能达到了设计的要求，再经过加工后即成为最终产品。

三、粉末烧结材料的特点

粉末烧结材料的最大特点是用粉末成型的方法将粉末直接制成产品的形状,不需要进行后续加工或后续加工量大大减少。对于陶瓷制品而言,由于陶瓷材料是脆性材料,硬度很高,无法进行传统的切削加工,而绝大部分陶瓷又不导电,不能进行电加工,因此,用粉末烧结的方法制造陶瓷产品是陶瓷行业的基本工艺方法。对于金属材料,则有多种加工手段,但用粉末烧结的方法制造金属产品的方法即粉末冶金方法许多优点,主要如下。

(1) 由于粉末冶金制品不需要进行后续切削加工或后续加工量很少,大大节省了原材料,降低了产品的物料成本。在物质资源和能源日趋紧张的今天,这一点显得尤其重要。

(2) 连续式成型技术和烧结技术的应用使粉末烧结材料的生产具有较高的生产效率,劳动力成本相对节约。

(3) 粉末烧结法能生产普通熔炼法无法生产的一些特殊材料。这些材料包括需要控制制品孔隙率的多孔材料,如多孔含油轴承;多种金属按不同比例组合的功能材料,如钨-铜假合金型电触头材料;金属和难熔化合物、陶瓷复合的多相材料,如硬质合金材料,金属-陶瓷复合材料等。在这些复合材料中,可以是不同相之间的颗粒复合,也可以是颗粒与纤维、晶须之间的复合。

(4) 与普通熔炼法相比,粉末烧结法生产出来的某些材料性能更好。如钨、钼等难熔金属,由于用粉末冶金的方法制造的产品纯度高、晶粒细,在实际生产中多用该方法;粉末冶金法制备的高速钢、超合金制品组织结构亦更加均匀,性能更好。

当然,粉末冶金制品也存在着韧性相对较低,制品的大小、形状受到一定限制等缺点。这些问题,随着技术的不断进步正在逐步解决。

四、粉末烧结材料的应用

陶瓷材料作为一种粉末烧结材料已有几千年的应用历史。近年来,随着科学技术的发展,特种陶瓷的应用愈来愈广泛。其中,高温结构陶瓷在发动机零部件、切削工具及其他耐磨损零部件、耐高温、耐腐蚀产品方面的应用越来越多;功能陶瓷在介电、铁电、压电功能方面,磁性功能方面,光电功能及生物功能等方面的开发亦在飞速发展,被广泛应用于机械电子工程、信息工程、航空航天工程、生物工程等领域。

表 1-1 粉末冶金材料应用

应 用 领 域	应 用 举 例
机械制造与加工	硬质合金,陶瓷刀具,粉末高速钢
汽车制造	机械零件,多孔含油轴承,摩擦材料,过滤器
采矿	硬质合金,金刚石-金属组合钻头材料
造船	机械零件,多孔含油轴承
电气与电子	电触头材料,电真空电极材料
精密仪器	仪表零件,磁性材料
电机制造	多孔含油轴承,铜-石墨电刷
无线电和电视	磁性材料
计算机	记忆元件
化工	过滤器,防腐零件,催化剂
石油	过滤器
航空	摩擦片,过滤器,防冻用多孔材料,粉末超合金
航天	纤维强化材料,难熔金属及合金
原子能	核燃料元件,反应堆结构材料,控制材料
军事	穿甲弹头,炮弹箍,军械零件

粉末冶金材料的应用发展同样很快。表 1-1 列出了粉末冶金材料的一些应用领域，可以看出，几乎在每一个工业领域都有粉末冶金材料的身影。

第二节 粉末烧结材料的显微结构特点

一、粉末烧结材料显微结构的形成

任何材料都具有一定的显微结构。材料的显微结构是指借助光学显微镜和电子显微镜所能观察到的材料的内部组织结构，包括各种组织（包括缺陷）的类型、形状、数量、分布及特征等。材料显微结构的形成过程是自由能降低的过程，它和材料的组成、原料的种类、粒径分布及处理、成型工艺，以及固相反应和烧结过程中的物理化学变化等许多因素有关，材料的显微结构是由烧结过程最终决定的，材料制备的每一个工艺步骤都对最终显微结构的形成起着一定作用。而材料的显微结构又决定了材料的各种性能。

二、材料的烧结过程

1. 烧结的定义与特征

烧结是制备的一个重要工序，其目的是把粉状物料转变为致密体。烧结过程最终确定了材料的显微结构。从宏观上看，一种或多种固体粉末冶金和陶瓷粉末经过成型，在加热到一定温度后开始收缩，在低于熔点温度下变成致密、坚硬的烧结体的过程称为烧结。从微观上看，烧结过程是由于固态中分子（或原子）的相互吸引，通过加热，使粉末体产生颗粒黏结，经过物质迁移使粉末体产生强度并导致致密化和再结晶的过程。

粉料成型后形成具有一定外形的坯体。由于粉体的堆积特性，坯体并不致密，一般包含百分之几十的气体，而颗粒之间只有点接触。将成型坯体（又称生坯）在高温下进行加热，会发生如下变化：颗粒间接触面积扩大，颗粒聚集，颗粒中心距逼近，逐渐形成晶界，气孔形状变化，体积缩小，最后大部分甚至全部气孔从坯体中排除。烧结过程中发生的这些变化随烧结温度的升高而逐渐推进。同时，粉末压块的性质也随着烧结过程的进行而出现坯体收缩、气孔率下降、致密度提高、强度增加、电阻率下降等变化（图 1-2）。

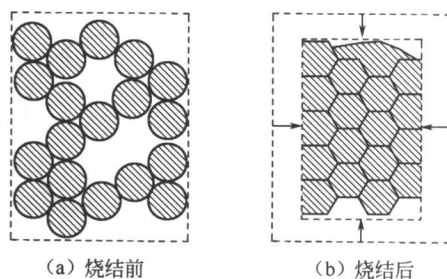


图 1-2 成型坯体烧结前后的变化

2. 烧结的推动力

粉料在粉碎与研磨过程中消耗的机械能以形式贮存在粉体中。一般微米级以上的粉体表面积在 $1 \sim 10 \text{ m}^2/\text{g}$ ，随着粉体粒度降低，表面积增大，粉体表面能增大，活性提高。粉末体与烧结体相比是处在能量不稳定状态。任何系统降低能量是一种自发趋势。近代烧结理论认为，粉体的表面能大于多晶烧结体的晶界能，这就是烧结的推动力。粉体烧结后，晶界能取代了表面能，是多晶材料稳定存在的原因。

固体的表面能一般不等于其表面张力，但当界面上原子排列无序或在高温下烧结时，这两者仍可当作数值相同来对待。粉末体紧密堆积以后，颗粒间仍有很多细小气孔通过，在这些弯曲的表面上由于表面张力的作用而造成的压力差为：

$$\Delta p = \frac{2\gamma}{r} \quad (1-1)$$

式中 γ ——粉末体表面张力；

r ——粉末的球形半径。

若为非球形曲面，可用两个主曲率半径 r_1 和 r_2 表示：

$$\Delta p = \frac{\gamma}{\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}} \quad (1-2)$$

以上两个公式表明，弯曲表面上的附加压力与球形颗粒（或曲面）的曲率半径成反比，与粉料表面张力成正比。由此可见，粉料愈细，由曲率而引起的烧结动力愈大。

3. 烧结机理

烧结过程实际上是物质迁移，填充颗粒间气孔的过程。根据物质迁移的方式，烧结可分为蒸发-凝聚、扩散传质、流动传质、溶解-沉淀传质等。前两种机制没有液相参加，为固态烧结；后两种机制由于发生了部分物质的熔融，有液相参与，属液相烧结。在液相烧结过程中，液相在冷却时常常转变为玻璃相存在于显微结构中。

G. C. Kuczynski 把粉体颗粒看成是等径球体，认为粉末压块是等径球体的堆积体。随着烧结的进行，各球体接触点处开始形成颈部，并逐渐扩大，最后烧结成一个整体。由于各颈部所处的环境和几何条件相同，所以只需确定两个颗粒形成的颈部的成长速率，就基本代表了整个烧结初期的动力学关系（图 1-3）。

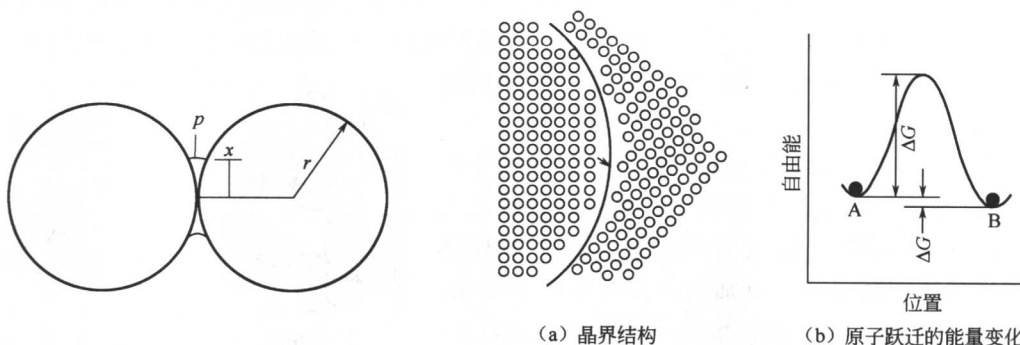


图 1-3 粉体烧结的双球模型

图 1-4 晶界移动示意图

在烧结后期，颈部的成长已基本完成，粉体颗粒间的接触变成了晶粒间的面接触，形成了晶界。由于弯曲晶界两边物质的吉布斯自由能存在差异，使界面向曲率中心移动（图 1-4），产生晶粒生长，小晶粒生长为大晶粒，界面面积和界面能降低。

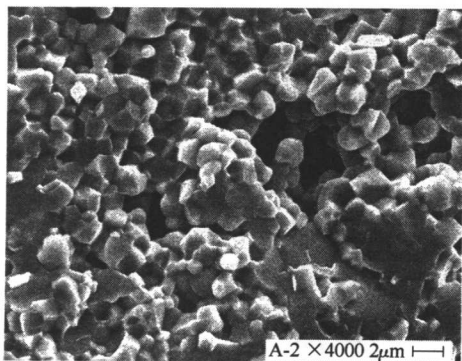


图 1-5 含有晶相、气孔和玻璃相的陶瓷显微结构照片

如果成型时生坯密度高，粉体颗粒间接触紧密，则有利于物质的迁移和颈部的填充，有利于气孔的排除和坯体的致密化。

三、粉末烧结材料显微结构的特征及对性能的影响

粉末烧结材料的显微结构主要包括晶相、晶界、玻璃相及气孔几种组织结构，如图 1-5 所示。每种组织具有不同的结构和特征，对材料的性能起着不同的作用。

1. 晶相

晶相是粉末烧结材料显微结构中最重要的部

分。粉末冶金材料和陶瓷材料都是多晶材料，显微结构的基本组成是无数个微小的小晶体，即晶粒。由于各种材料组成、原料和制备工艺的不同，晶粒形成和生长时的物理化学条件各有不同，导致所形成的晶相种类、形状及数量差异很大。有的晶粒发育完整，而有的晶粒则发育部分完整或不完整。对于晶体结构为各向异性的材料，晶粒的取向一般是随机的。

粉末冶金材料和陶瓷材料中晶相的性质决定了材料的基本性质，如锆钛酸铅陶瓷中四方相钙钛矿结构的晶胞自发极化决定了该材料具有铁电性能，碳化硅材料中碳化硅的强共价键晶体结构决定了碳化硅材料优良的高温力学性能。

粉末冶金材料和陶瓷材料中，晶粒的尺寸和分布对材料的性能有很大影响。尺寸均匀分布的细晶结构对材料的性能是非常有利的，可以提高材料的强度、韧性及其他性能。

为了形成均匀的细晶结构，需要对制备材料的原料和工艺进行严格的控制。粉体原料应当有很细的粒度和较窄的粒度分布；成型时坯体各部分的密度应当均匀；烧结过程中应对温度进行控制，并加入晶粒生长抑制剂，防止晶粒的过分长大和二次再结晶。同时，应防止晶粒内包裹气孔和夹杂物。

2. 晶界

晶粒的接触界面即为晶界。晶粒愈小则晶界所占比例愈大（图 1-6）。按晶界两边原子的连贯性可将晶界分为共格晶界、半共格晶界和非共格晶界三种。共格晶界两边的原子排列是连续的，半共格晶界两边的原子排列是部分连续的，而非共格晶界两边的原子排列是混乱和不连续的。晶界往往是杂质的富集区域，晶界上杂质的存在形式有三种，即分散沉积、扩散沉积和粒状沉积，其特征和厚度如图 1-7 所示。晶界相可以是晶相，也可以是玻璃相。

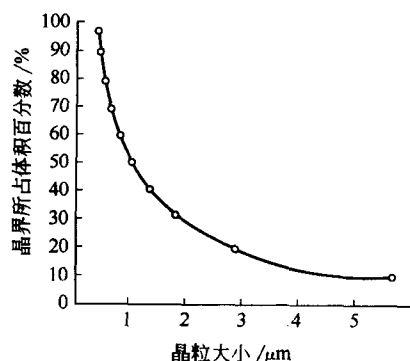


图 1-6 晶粒大小与晶界的关系

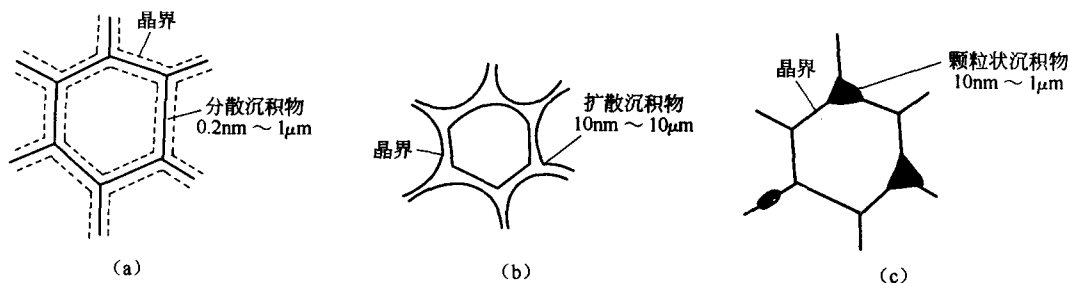


图 1-7 晶界杂质特征

晶界相虽然很薄，却有与晶相不同的一系列特点。

首先，由于晶界处原子的排列比较疏松，晶界处原子的扩散和传质比晶粒内部快得多。因此，晶界是原子扩散和气孔排除的快速通道。

其次，由于晶界相和晶相的结构不同，两者的热膨胀系数亦不同。这一差异使晶界产生应力。对于多相材料，由于不同晶相的热膨胀系数不同，两相之间的界面上晶界应力尤其重要。过大的晶界应力会造成材料力学性能的下降甚至开裂。

此外，离子晶体点阵中的缺陷浓度和晶界上过剩的离子数使晶界上存在空间电荷，晶界玻璃相的存在使得晶界的熔融温度低于晶粒。

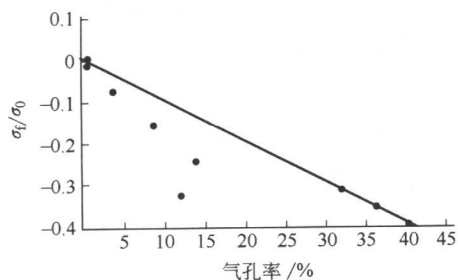


图 1-8 透明氧化铝陶瓷材料断裂强度与气孔率的关系

非晶态物质即为玻璃相。玻璃相可以是包裹在晶粒周围的很薄一层，即晶界玻璃相；也可以是连续和大片地分布在显微结构中。玻璃相在高温下黏度的下降会降低材料的高温力学性能，而它的低介电常数和高介质损耗对材料的电学性能也是不利的。因此，在材料的制备中，应当尽量避免产生玻璃相或尽可能少地产生玻璃相。当材料在高温烧结过程中产生玻璃相时（如氮化硅材料），可通过适当的热处理使玻璃相晶化。

4. 气孔

粉末冶金材料和陶瓷材料烧结后，大部分气孔被排出体外，材料致密度大大提高，但烧结体中不可避免地还存在着少量未被排除的气孔。气孔分为开口气孔和闭口气孔，开口气孔又分为连通气孔和不连通气孔。气孔的数量有时虽然很少，但对材料的性能却有很大影响。

气孔的存在对材料的性能是极为不利的，图 1-8 是透明氧化铝陶瓷材料断裂强度与气孔率的关系。图 1-9 是铁基粉末冶金材料弹性模量和气孔率的关系，可见随着气孔率的增加，材料的弹性模量急剧下降。

也有一些多孔材料是利用材料的气孔实现某些功能，这时需要对材料的气孔率进行调控，使气孔的种类、分布、数量等满足要求。如保温材料要求材料中有大量的闭口气孔，而过滤用材料则要求材料中的气孔是连通的，其气孔大小和分布与被过滤物有关。

多孔材料中气孔的形成不仅与烧结工艺有关，还与成孔剂的种类和数量、成型工艺等因素有关。

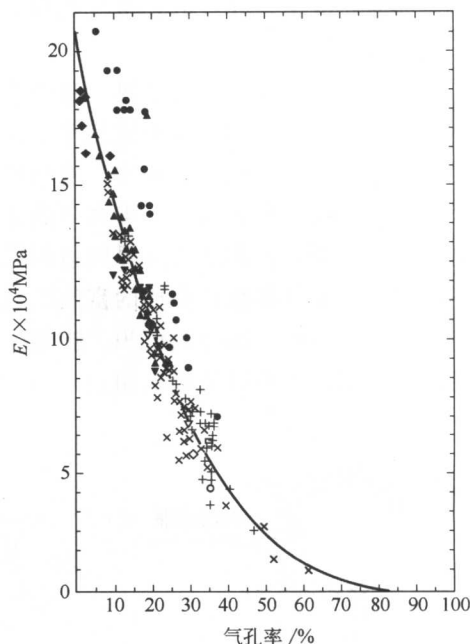


图 1-9 铁基粉末冶金材料弹性模量和气孔率的关系

由于晶界的以上特点，使它对材料性质产生很大的影响。如钛酸钡陶瓷，通过掺杂和工艺调整调节晶界的电性能，可以使之具有不同的结构和性能，用于制备晶界层电容器和正温度系数热敏电阻（PTC）等不同用途。改善材料的晶界性能可以提高材料的整体性能。

3. 玻璃相

陶瓷材料中常常存在着非晶态物质，即玻璃相。玻璃相是材料的某些组分和烧结添加剂形成的低共熔物，在高温下形成液相，液相冷却后形成的

第三节 粉体及其特性

一、粉体的几何特性

1. 粒径

粒径是颗粒在空间范围所占大小的线性尺度。球形颗粒的直径就是粒径。非球形颗粒的

粒径则可用球体、立方体或长方体的代表尺寸表示。其中，用球体的直径表示不规则颗粒的粒径应用得最普遍，称为当量直径或相当径。当量直径与颗粒的各种物理现象相对应。多颗粒系统由大量的单颗粒所组成，其中包括粉体、雾滴和气泡群。在多颗粒系统中，一般将颗粒的平均大小称为粒度。习惯上可将粒径和粒度二词通用。粒度和粒径是颗粒几何性质的一维表示，是最基本的几何特性。

非球形颗粒的粒径表示方法很多，最常用的有三轴平均径、投影径、球当量直径、筛分径及颗粒投影的其他径等。

以颗粒的长度 l 、宽度 b 、高度 h 定义的粒度平均值称为三轴平均径，其计算式及物理意义列于表 1-2。

表 1-2 三轴平均径计算式及物理意义

序号	计 算 式	名 称	物 理 意 义
1	$\frac{l+b}{2}$	二轴平均径	平面图形的算术平均
2	$\frac{l+b+h}{3}$	三轴平均径	算术平均
3	$\frac{3}{\frac{1}{l} + \frac{1}{b} + \frac{1}{h}}$	三轴调和平均径 ^①	与外接长方体有相同比表面积的球体直径
4	$\sqrt{lb}$	二轴几何平均径	平面图形的几何平均
5	$\sqrt[3]{lbh}$	三轴几何平均径	与外接长方体有相同体积的立方体的一边长
6	$\sqrt{\frac{2lb+2bh+2hl}{6}}$	三轴等表面积平均径	与外接长方体有相同表面积的立方体的一边长

① 长方体的比表面积 $S_w = 2(lb+lh+hb)/(\rho_p lbh) = b/(\rho_p d)$ ，由此可求粒径 d 。

利用显微镜测量颗粒的粒径时，可观察到颗粒的投影。此时颗粒以最大稳定度（重心最低）置于一平面。可按其投影的大小定义粒径，称投影径。投影径的分类见图 1-10 所示。

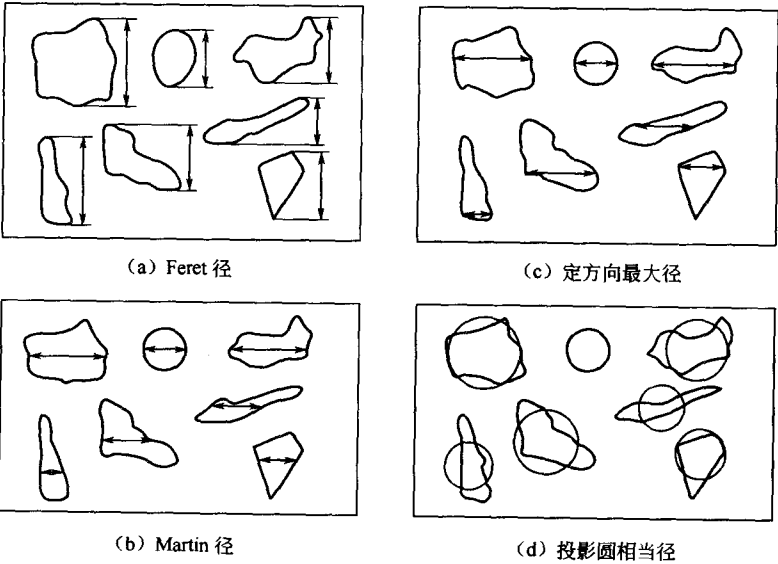


图 1-10 投影径的分类

2. 粒径分布

如果颗粒系统的粒径相等,则可用单一粒径表示其大小,这类颗粒称为单粒度体系。但实际应用的粉体中大都由粒度不等的颗粒组成,这种体系被称为多粒度体系。多粒度体系的粒径无法用单一粒径表示其大小,而必须用各种粒径颗粒的数量分布情况来表示,即粒径分布。粒径分布又称粒度分布,是指用简单的表格、绘图和函数形式表示颗粒群粒径的分布状态。

颗粒粒径分布常用微分分布和积分分布表示。微分分布又称频率分布,表示各个粒径相对应的颗粒百分含量;积分分布又称累积分布,表示小于或大于某粒径的颗粒占全部颗粒的百分含量与该粒径的关系。百分含量的基准可以是颗粒的个数、体积、质量及长度和面积等。图 1-11 是粉体的微分分布和积分分布图。

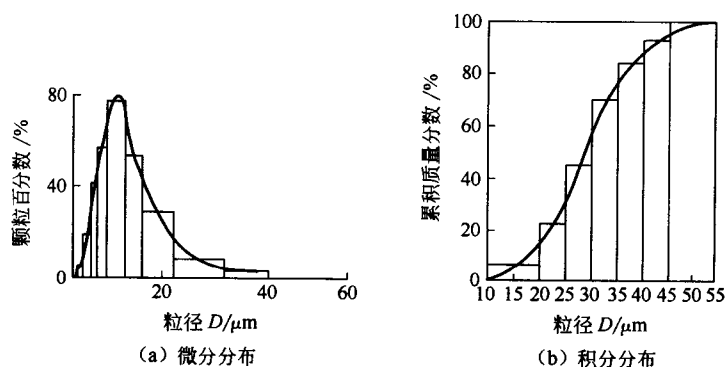


图 1-11 粉体的粒度分布图

3. 平均粒径和比表面积

若颗粒的粒径分布符合对数正态分布,可计算颗粒的平均粒径和比表面积。平均粒径的计算方式如表 1-3 所示。

表 1-3 平均粒径的计算方式

序号	名称	符号	个数基准	计算公式
1	个数平均径	D_{nL}	$\frac{\sum(nd)}{\sum n}$	$D_{50} \exp(0.5 \ln^2 \sigma_g)$
2	长度平均径	D_{LS}	$\frac{\sum(nd^2)}{\sum(nd)}$	$D_{50} \exp(1.5 \ln^2 \sigma_g)$
3	面积平均径	D_{SV}	$\frac{\sum(nd^3)}{\sum(nd^2)}$	$D_{50} \exp(2.5 \ln^2 \sigma_g)$
4	体积平均径	D_{SM}	$\frac{\sum(nd^4)}{\sum(nd^3)}$	$D_{50} \exp(3.5 \ln^2 \sigma_g)$
5	平均表面径	D_{nS}	$\sqrt{\frac{\sum(nd^2)}{\sum n}}$	$D_{50} \exp(\ln^2 \sigma_g)$
6	平均体积径	D_{nV}	$\sqrt[3]{\frac{\sum(nd^3)}{\sum n}}$	$D_{50} \exp(1.5 \ln^2 \sigma_g)$
7	体积长度平均径	D_{LV}	$\sqrt{\frac{\sum(nd^3)}{\sum(nd)}}$	$D_{50} \exp(2.0 \ln^2 \sigma_g)$
8	质量矩平均径	D_w	$\sqrt[4]{\frac{\sum(nd^4)}{\sum n}}$	$D_{50} \exp(3.0 \ln^2 \sigma_g)$
9	调和平均径	D_h	$\frac{\sum n}{\sum(n/d)}$	$D_{50} \exp(-0.5 \ln^2 \sigma_g)$