



高等学校“十一五”规划教材

粉末冶金教程

Fenmo Yejin Jiaocheng

李长青 张俊才 董胜敏 蒋礼林 主编

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

高等学校“十一五”规划教材

粉末冶金教程

主编 李长青 张俊才
董胜敏 蒋礼林

主审 王振廷

中国矿业大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

粉末冶金教程/李长青等主编. —徐州:中国矿业大学出版社,2010.9

ISBN 978 - 7 - 5646 - 0748

I. ①粉… II. ①李… III. ①粉末冶金—高等学校—教材 IV. ①TF12

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第172216号

书 名 粉末冶金教程
主 编 李长青等
责任编辑 潘俊成 李 敬
出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司
(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)
营销热线 (0516)83885307 83884995
出版服务 (0516)83885767 83884920
网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com
排 版 中国矿业大学出版社排版中心
印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司
开 本 787×1092 1/16 印张 13.5 字数 337 千字
版次印次 2010年9月第1版 2010年9月第1次印刷
定 价 28.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

粉末冶金教学是为了使学生进一步巩固和运用所学的材料科学与工程方面的基本理论,掌握粉末制备、粉体表征和成形及烧结等基本理论知识,提高学生的理论水平和综合素质,为合理地设计材料、生产材料和应用材料打下一定的基础。

随着现代科学技术的发展,无机非金属材料工程领域所需要的人才已由单一的专业性向着全面、系统地掌握无机非金属材料科学与工程领域基本专业知识的综合性方向转变。为了适应这一转变,要求各有关院校调整人才培养模式,深化教学改革,加强课程建设。目前国内有许多高校开办了无机非金属材料工程专业,由于专业设置背景、办学基础和历史的不同,这些学校无机非金属材料工程专业的教学重点和特色各不相同。

粉末冶金是为非粉末冶金专业的粉末冶金课程而编写的教学参考书,主要目的是较全面而系统地向学生介绍粉末冶金的概貌,它涉及机械、化学化工、冶金、材料、环境等领域的许多工程问题。编写一本适合本专业特点的教材,可以帮助学生对粉体工程基本原理和工艺有较为深入和全面的理解,并为后续课程的学习奠定良好的基础,同时也为从事粉体冶金制备工程的专业技术人员提供参考。为此,黑龙江科技学院、大连橡胶塑料机械股份有限公司、贺州学院、济源职业技术学院、临沂师范学院、哈尔滨师范大学等单位一些长期从事粉体工程教学、科研的教师和研究人员根据自己的工作积累,并结合相关院校的教学实际共同编写了本教材。

本教材由黑龙江科技学院李长青、张俊才和大连橡胶塑料机械股份有限公司董胜敏和贺州学院蒋礼林主编,并由济源职业技术学院苑成友、临沂师范学院贾瑞宝、哈尔滨师范大学牛丽、黑龙江科技学院高丽敏作为参编给予了很大的帮助。具体编写分工为:张俊才编写第1章,李长青编写第2、3章;董胜敏编写第5章;蒋礼林编写第4章;苑成友编写第6章。贾瑞宝、牛丽、高丽敏对本书的文献和理论知识进行了审核和校稿,并由黑龙江科技学院王振廷教授主审,全书由李长青博士统稿。

由于编者水平所限,书中难免有错误和疏漏之处,恳请使用本教材的读者多提宝贵意见,以便进一步修改和完善。

编 者

2010年7月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 粉末冶金工艺	1
1.3 粉末冶金的发展简史	2
1.4 粉末冶金的发展趋势	3
1.5 粉末冶金的特点	5
1.6 粉末冶金材料的分类	6
1.7 粉末冶金学和粉末冶金制备发展方向	7
第 2 章 粉末的制取	9
2.1 概述	9
2.2 制粉方法	10
第 3 章 粉末的性能及其测定	44
3.1 概述	44
3.2 粉末及粉末性能	44
3.3 金属粉末的取样和分样	46
3.4 粉末的比表面及其测定	69
3.5 金属粉末工艺性能测试	74
第 4 章 成形	86
4.1 概述	86
4.2 成形前原料的准备	86
4.3 金属粉末压制过程	89
4.4 压制压力与压坯密度的关系	93
4.5 压制过程中力的分析	96
4.6 压坯密度及其分布	102
4.7 成形剂	106
4.8 压制废品分析	108

4.9	影响压制过程和压坯质量的因素	110
4.10	特殊成形	114
第5章	烧结	125
5.1	概述	125
5.2	烧结过程的热力学基础	126
5.3	烧结中的物质迁移	130
5.4	混合粉末的烧结	148
5.5	强化烧结	159
5.6	全致密工艺	162
5.7	烧结气氛和烧结炉	169
5.8	烧结体的性能	173
第6章	粉末冶金材料和制品	183
6.1	金属粉末的直接应用	183
6.2	粉末冶金多孔材料	187
6.3	粉末冶金摩擦材料	188
6.4	粉末冶金机械零件	189
6.5	粉末冶金工具材料	190
6.6	粉末冶金磁电和功能材料	193
6.7	难熔金属及其合金材料	200
6.8	原子能工程材料	203
6.9	金属陶瓷与陶瓷材料	205
参考文献		207

第1章 绪 论

1.1 概 述

粉末冶金是用金属粉末(或金属粉末与非金属粉末的混合物)作为原料,经过成形和烧结制造金属材料、复合材料以及各种类型的制品的工艺过程。粉末冶金法与生产陶瓷有相似的地方,因此也叫金属陶瓷法,它是冶金和材料科学的一个分支学科。粉末冶金产品的应用范围十分广泛,从普通机械到精密仪器、从五金工具到大型机械、从电子工业到电机制造、从民用工业到军事工业、从一般技术到尖端技术,均能见到粉末冶金工艺的身影。

史前时代就有了以粉末形态制成的金属,如古埃及人已用海绵铁锻造工具;远在哥伦布发现新大陆之前,欧洲人就已获得了用粉末加工金属铂的技术,但这仅仅是粉末冶金发展的萌芽时期。1910年,粉末可锻钨的出现,标志着近代粉末冶金技术的诞生,在其后的30年间,粉末冶金逐渐走上工业生产和应用的阶段。在这个时期,发展了各类粉末烧结制品,如钨、钼丝,金属过滤器,烧结摩擦片,硬质合金,铜—钨、银—钨等假合金,以及青铜含油轴承,烧结金属磁体和铁氧体,铁基烧结油泵齿轮等机械零件。到第二次世界大战结束时,粉末冶金已成为具有一定规模的独立的工业部门。

第二次世界大战后,粉末冶金的发展是以金属陶瓷、复合材料、弥散强化合金、烧结铝和钛的合金以及后来的粉末高速工具钢、不锈钢和高温合金为特征。这些材料用一般的熔铸加工法往往难以制造,它们的出现既推动了粉末冶金新工艺和装备的发展,又是其必然结果,例如以惰性气体雾化为代表的制造高纯、高合金预合金化的技术以及各种全致密(包括热成形)技术的出现,使得制造高性能的粉末材料成为可能。粉末冶金与传统的热机械加工方法结合,又使得现代技术所不可缺少的许多结构材料有可能由粉末直接生产出来,而且其性能大大超过熔铸材料。

1.2 粉末冶金工艺

粉末冶金工艺的第一步是制取金属粉末、合金粉末、金属化合物粉末以及包覆粉末,第二步是将原料粉末通过成形、烧结及烧结后处理制得成品。粉末冶金的工艺发展已远远超过此范畴而日趋多样化。粉末冶金材料和制品的工艺流程举例如图1-1所示。

粉末的制取方法是多种多样的,将在后面详细加以讨论。成形前要进行物料准备。物料准备包括粉末的预先处理(如粉末加工、粉末退火)、粉末的分级、粉末的混合和粉末的干燥等。

成形的目的是制得一定形状和尺寸的压坯,并使其具有一定的密度和强度。成形方法

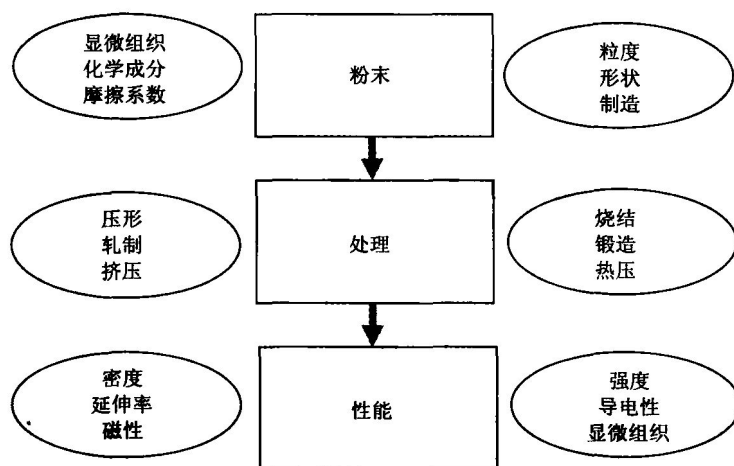


图 1-1 粉末冶金材料和制品的工艺流程图

基本上分为加压成形和无压成形两类。加压成形中用得最普遍的是模压成形,简称压制。其他加压成形方法有等静压成形、粉末轧制、粉末挤压等。粉浆浇注是一种无压成形。烧结是粉末冶金的关键工序,成形后的压坯或坯块通过烧结可得到所要求的物理机械性能。烧结分单元系烧结和多元系烧结。不论单元系还是多元系的固相烧结,其烧结温度都比所含金属与合金的熔点低;而多元系的液相烧结,其烧结温度比其中难熔成分的熔点低,但高于易熔成分的熔点。一般来说,烧结是在保护气氛下进行的。除了普通烧结方法外,还有松装烧结、将金属渗入烧结骨架中的熔浸法、压制和烧结结合在一起进行的热压等。

根据产品的不同要求,烧结后的处理有多种方式,如精整、浸油、机加工、热处理(淬火、回火和化学热处理)和电镀等。此外,一些新的工艺,如轧制、锻造可应用于粉末冶金材料烧结后的处理。总之,粉末冶金工艺是多种多样的。

1.3 粉末冶金的发展简史

粉末冶金是一项新兴技术,但也是一项古老技术。根据考古学资料,远在公元前 3 000 年左右,埃及人就在一种风箱中用碳还原氧化铁得到海绵铁,经高温锻造制成致密块,再用锤锻打成铁器件。公元 3 世纪时,印度的铁匠用此种方法制造“德里柱”,重达 6.5 t,如图 1-2 所示。19 世纪时,相继在俄罗斯和英国出现将铂粉经冷压、烧结,再进行热锻得到致密铂,并加工成铂制品的工艺,19 世纪 50 年代出现了铂熔炼法后,这种粉末冶金工艺便停止应用,但它对现代粉末冶金工艺打下了良好的基础。

直到 1909 年库利奇(W. D. Coolidge)的电灯钨丝问世后,粉末冶金工艺才得到了迅速的发展。现代粉末冶金发展中出现了三个重要的标志时代。



图 1-2 印度的德里柱

第一是克服了难熔金属(如钨、钼等)熔铸过程中产生的困难。1909年制造电灯钨丝(钨粉成形、烧结、再锻打拉丝)的方法为现代粉末冶金工业迈出的第一步,从而推动了现代粉末冶金的发展。1923年又成功地制造了硬质合金,硬质合金的出现被誉为机械加工工业的革命。

第二是20世纪30年代用粉末冶金方法制取多孔含油轴承取得成功。这种轴承很快在汽车、纺织、航空等工业上得到了广泛的应用。继之,发展到生产铁基机械零件,发挥了粉末冶金无切屑、少切屑工艺的特点。

第三是向更高级的新材料、新工艺发展。20世纪40年代,新型材料如金属陶瓷、弥散强化材料等不断出现。60年代末到70年代初,粉末高速钢、粉末超合金相继出现,粉末冶金锻造已能制造高强度零件。

现代粉末冶金制品的发展史如表1-1所列。

表 1-1 现代粉末冶金制品的发展史

粉末冶金材料和制品	出现时间
钨	1909
难熔化合物	1900~1914
钨钴硬质合金	1923~1925
烧结摩擦材料	1929
多孔青铜轴承	1921~1930
多孔铁轴承	1936
机械零件	1936~1946
烧结铝	1946
金属陶瓷	1949
粉体高速钢	1968
粉末超合金	1969

1.4 粉末冶金的发展趋势

粉末冶金工艺具有原材料利用率高(达95%)、制造成本低、材料综合性好、可近净成形、产品精度高且稳定等优点。此外,粉末冶金还可制造传统铸造方法和机械加工方法无法制备的材料和难以加工的零件,因此备受人们的青睐。随着全球工业化的蓬勃发展,粉末冶金行业发展迅速,粉末冶金技术已被广泛应用于交通、机械、电子、航空等领域,尤其在汽车制造领域。汽车工业的快速发展极大地推动了粉末冶金在汽车零部件制备中的应用,使汽车行业成为粉末冶金零部件的最大应用领域之一。现在,一些大型汽车公司建立了自己的配套粉末冶金零件加工公司,如美国的福特、通用,日本的丰田、三菱、本田等汽车公司均有自己的粉末冶金事业部。如图1-3所示为应用到汽车上的粉末冶金零件情况。

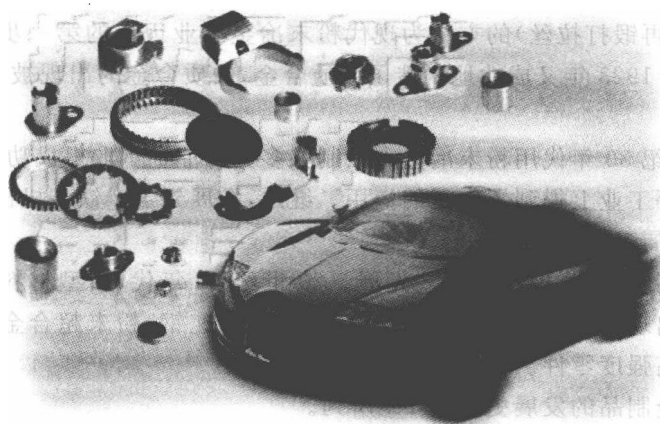


图 1-3 汽车上的粉末冶金零件

一些地区粉末冶金工业近几年发展的状况简述如下。

1.4.1 北美洲

在过去的十年内,北美洲的粉末冶金工业得到了长足的发展,这主要得益于北美洲的粉末冶金技术的发展和提高、生产设备和生产工艺的革新以及粉末冶金制品在汽车中的应用不断增加等因素。2003 年,北美洲金属粉末的货运量比 2002 年提高了 2%,达到 494 000 t。其中,铁、不锈钢、镍以及锡等的货运量较 2002 年都有所提高,而铜、铝、钨、碳化钨等的货运量与 2002 年基本持平;2003 年,铁粉的货运量为 40 000 t,比 2002 年提高了 2%;2004 年铁粉的货运量继续保持增长,增长幅度最高为 3%~4%。

1.4.2 欧洲

欧洲是继北美洲之后的第二大粉末冶金生产工业区,生产技术先进,管理体制较完善。为了促进和推动粉末冶金工业的发展,欧洲也采取了一系列的措施:1990 年,欧洲成立了粉末冶金协会,赞助了一些基础研究课题;举办了一系列的粉末冶金评奖活动;加强与国际间的交流与合作;建立粉末冶金信息网等。半个世纪以来,欧洲铁粉每年的增长率在 4%~8%。

意大利是目前欧洲粉末冶金发展最快的国家之一,其金属粉末货运量位居欧洲第三位。1983 年,意大利成立了粉末冶金委员会用于促进粉末冶金技术的发展。在过去的十几年中,意大利的粉末冶金技术得到了很快的发展。2002 年,意大利铁基粉末冶金产品的产量达到 24 000 t,超过了 2001 年;铜基粉末冶金产品的产量与 2001 年几乎持平,为 2 200 t;不锈钢粉末冶金产品估计有 300 t。和其他国家相比,意大利粉末冶金工业分配领域有所不同,它的粉末冶金产品并不主要局限于汽车行业,在最近几年里,用于汽车中的粉末冶金零件占总的粉末冶金产品的 50%左右。

1.4.3 亚洲

与欧美相比,亚洲粉末冶金工业的整体水平比较落后,但从历史的角度来看,亚洲粉末冶金工业历史较长,并且具有一定的生产基础,发展速度快。现在一些亚洲的粉末冶金制品已打入欧洲及北美洲市场。

日本的粉末冶金工业发展在亚洲一直处于领先地位,这与日本政府的扶持和有效管理是分不开的。从1999~2000年,日本经济产业省对制造业的16个产业领域制定了产业技术战略,其中粉末冶金与铸造、锻造等一起归入机械类的原材料领域。日本的粉末冶金行业一直处于上升趋势。在汽车行业,日本生产的每部轿车中粉末冶金制品的平均使用量也一直处于上升趋势。

和日本相比,印度粉末冶金的历史悠久,冶金工业基础较强,再加上近年来粉末冶金界对外经济、技术交流的加强,印度的粉末冶金工业得到了飞快发展。目前在印度的跨国公司主要有GKN、FMC、HISGANIS等。从过去几年的发展情况来看,印度汽车行业增长喜人。每辆典型轿车中粉末冶金零件的用量为5.5 kg,每辆客车中粉末冶金零件的用量为4.5 kg,实际数值可能要高出一数值,因为一些专用零件也含有粉末冶金零部件。目前,用于交通运输行业的粉末冶金零部件的量占据了粉末冶金制品总产量的65%,电器占了8%。

中国是亚洲另一粉末冶金工业发展较快的国家,近年来,中国粉末冶金产品的总产量已位居亚洲第二,仅次于日本。

1.5 粉末冶金的特点

粉末冶金在技术上和经济上具有一系列的特点。从制取材料方面来看,粉末冶金方法能生产具有特殊性能的结构材料、功能材料和复合制料。

(1) 粉末冶金法能生产用普通熔炼法无法生产的具有特殊性能的材料:

① 能控制制品的孔隙度,例如,可生产各种多孔材料、多孔含油轴承等。

② 能利用金属和金属、金属和非金属的组合效果,生产各种特殊性能的材料,例如,钨—铜假合金型的电触头材料、金属和非金属组成的摩擦材料等。

③ 能生产各种复合材料,例如,由难熔化合物和金属组成的硬质合金和金属陶瓷、弥散强化复合材料、纤维强化复合材料等。

(2) 粉末冶金方法生产的某些材料,与普通熔炼法生产的材料相比,性能优越。

① 高合金粉末冶金材料的性能比熔铸法生产的好,例如,粉末高速钢、粉末超合金可避免成分的偏析,保证合金具有均匀的组织 and 稳定的性能,同时,这种合金具有细晶粒组织,热加工性能大为改善,在制备高性能稀土永磁材料、稀土储氢材料、稀土发光材料、稀土催化剂、高温超导材料、新型金属材料(如耐热铝合金、超合金、粉末耐蚀不锈钢、粉末高速钢、金属间化合物高温结构材料等)方面具有重要的作用。

② 生产难熔金属材料或制品,一般要依靠粉末冶金法,例如,钨、钼等难熔金属,即使用熔炼法能制造,也比粉末冶金的制品的晶粒要粗,纯度要低。

③ 可以制备非晶、微晶、准晶、纳米晶和超饱和固溶体等一系列高性能非平衡材料,这些材料具有优异的电学、磁学、光学和力学性能。

④ 可以容易地实现多种类型的复合,充分发挥各组元材料各自的特性,是一种低成本生产高性能金属基和陶瓷复合材料的工艺技术。

⑤ 可以生产普通熔炼法无法生产的具有特殊结构和性能的材料和制品,如新型多孔生物材料、多孔分离膜材料、高性能结构陶瓷和功能陶瓷材料等。

⑥ 可以实现净近成形和自动化批量生产,从而可以有效地降低生产的资源和能源

消耗。

⑦ 可以充分利用矿石、尾矿、炼钢污泥、回收废旧金属做原料,是一种可有效进行材料再生和综合利用的新技术。

从制造机械零件方面来看,粉末冶金法是一种少切屑、无切屑的新工艺,可以大量减少机器加工量,节约金属材料,提高劳动生产率。

总之,粉末冶金法既是一种能生产具有特殊性能材料的技术,又是一种制造廉价优质机械零件的工艺。但粉末冶金在应用上也有不足之处,例如,粉末成本高、粉末冶金制品的大小和形状受到一定的限制、烧结零件的韧性较差等。但是,随着粉末冶金技术的发展,这些问题正在逐步解决中,例如,等静压成形技术已能压制较大的和异形的制品,粉末冶金锻造技术已能使粉末冶金材料的韧性大大提高等。图 1-4 所示为 1996 年的粉末冶金大赛的获奖产品。



图 1-4 1996 年的粉末冶金大赛的获奖产品

1.6 粉末冶金材料的分类

粉末冶金材料,又称为粉末烧结材料,是用途广泛的一类工程材料。材料按其使用要求,包括结构材料和功能材料两大类。前者指各种工程结构用的材料,主要使用它的力学性能(强度、硬度和韧性等);后者系指主要利用其特殊的物理性能(光、电、磁、声、热等)的材料,如磁性材料、电气材料、超导材料、半导体材料、储氢材料、催化剂材料等。粉末冶金材料多属于机械工程(结构)材料,但也有一部分属于功能材料,它们在现代的通讯、电子、计算机、自动控制以及航天空间技术等领域发挥了巨大的功效,因此可以说,没有粉末冶金技术,就没有现代的文明。

粉末冶金材料,按其特性和用途可以分为七个基本类型。

1.6.1 多孔材料及制品

① 金属过滤器:由青铜、镍、不锈钢、钛及合金等粉末烧结而成的多孔板、管、盘等过滤元件,孔隙度都在 20% 以上;② 热交换(冷却)材料:由镍、镍—铬合金以及钛的粉末烧结成孔隙度为 15%~30% 的多孔材料,利用孔隙储存冷却液和透过流体的性质,起发汗冷却和交换热量的作用;③ 泡沫金属:孔隙度极高的发泡金属,利用其易变形的性质作减震和隔音的材料。

1.6.2 机械材料和零件

① 减摩材料:以铁、铜、铝为基本组分,添加其他金属或非金属和固体润滑成分的组合材料,包括多孔含油轴承和致密减摩轴瓦材料、金属—塑料复合材料,它们具有低的摩擦系数和高的耐磨性,应用于汽车、机车、农机、船舶、各种机床等作耐磨部件;② 摩擦材料:以铜、铁为基本组分,添加固体润滑和耐磨成分的组合材料,具有高的摩擦系数和低的磨损性,用于飞机、汽车、军车、船舶作制动或离合器的元件;③ 结构零件:代替熔铸和机械加工制造

的各种机械和仪表的承力零件,包括铁、铜、铅的烧结合金制品。

1.6.3 电接触材料

① 电触头合金:难熔金属与钢、银以及银与氧化物或石墨等粉末烧结成的假合金或组合材料,用于电器、开关和仪表;② 集电材料:烧结的金属—石墨电刷,用于电机和集电滑块。

1.6.4 硬质工具材料

① 硬质合金:以难熔金属碳化物为基体,和钴、镍等为黏结金属烧结成的金属陶瓷刀具和模具,用于金属切削、压力加工及地质钻探;② 复合工具材料:用金属或硬质合金黏结的金刚石或碳化硼制成的工具,包括刀具和磨削工具;③ 粉末高速钢:以预合金化高速钢粉末为原料,通过热成形和致密化而得到的一种优质高速钢工具材料;④ 钢结硬质合金:碳化钛或碳化钨用钢黏结的金属陶瓷材料,主要用于耐磨部件和模具。

1.6.5 粉末磁性材料

① 烧结软磁体:纯铁、铁合金、坡莫合金等粉末烧结的导磁元件;② 烧结硬磁体:烧结磁体、稀土—钴烧结磁体;③ 铁氧体材料:包括铁氧体硬磁、软磁及矩磁等元件,用于电子、通讯、计算机等。

1.6.6 耐热材料

① 难熔金属及其合金:钨、钼、钽、铌、锆及其合金;② 氧化物弥散强化材料:以氧化物硬质点弥散于金属合金基体,起强化作用的一类复合材料,具有好的高温力学性能;③ 粉末高温合金:以镍、铁、钴为基并添加钨、钼、钛、铬、钒,以金属间化合物为沉淀强化相的高合金,具有好的高温力学性能,用于航空发动机及汽轮机的耐高温部件;④ 难熔化合物基金属陶瓷:以碳化物、硼化物、硅化物以及氧化物、氮化物为基的复合材料,用做耐热部件和原子反应堆;⑤ 纤维强化材料:金属或化合物纤维增强的金属复合材料。

1.6.7 原子能工程材料

① 核燃料:铀、钍、钚的复合材料;② 中子减速与控制材料;③ 屏蔽材料;④ 反射材料。

1.7 粉末冶金学和粉末冶金制备发展方向

1.7.1 粉末冶金学科发展方向

(1) 发展粉末制取新技术、新工艺及其过程理论。重点是超细粉末和纳米粉的制备技术,快速冷凝制备非晶、准晶和微晶粉末技术,机械合金化技术,自蔓延高温合成技术,粉末粒度、结构、形貌、成分控制技术。总的趋势是向超细、超纯、粉末特性可控方向发展。

(2) 建立以“净近成形”技术为中心的各种新型固结技术及其过程和过程理论,如粉末注射成形、挤压成形、喷射成形、温压成形、粉末锻造等。

(3) 建立以“全致密化”为主要目标的新型固结技术及其过程模拟技术,如热等静压、拟热等静压、烧结—热等静压、微波烧结、高能成形等。

(4) 粉末冶金材料设计、表征和评价新技术。粉末冶金材料的孔隙特性、界面问题及强化机理的研究。

1.7.2 粉末冶金材料和制品的今后发展方向

(1) 具有代表性的铁基合金,将向大体积的精密制品、高质量的结构零部件发展。

- (2) 制造具有均匀显微组织结构的、加工困难而完全致密的高性能合金。
- (3) 用增强致密化过程来制造一般含有混合相组成的特殊合金。
- (4) 制造非均匀材料、非晶态、微晶或者亚稳合金。
- (5) 加工独特的和非一般形态或成分的复合零部件。

第2章 粉末的制取

2.1 概 述

钨粉末冶金的生产工艺是从制取原材料——粉末开始的。这些粉末可以是纯金属,也可以是非金属,还可以是化合物。制取粉末的方法很多,它的选择主要取决于该材料的特殊性能及制取方法的成本。粉末的形成是依靠能量传递到材料而制造新表面的过程。例如一块 1 m^3 的金属可制成大约 2×10^{18} 个直径 $1\text{ }\mu\text{m}$ 的球形颗粒,其表面积大约为 $6 \times 10^6\text{ m}^2$,比 857 个标准的足球场的面积还要大。要形成这么大的表面积,所需的能量是很大的,如图 2-1 所示。

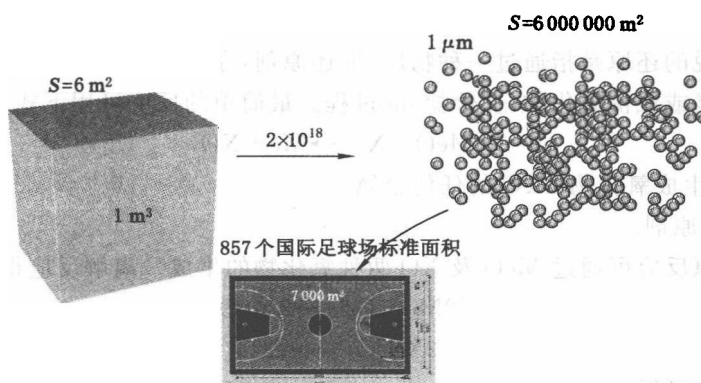


图 2-1 粉体表面积对比示意图

为了满足对粉末的各种要求,也就要有各种各样生产粉末的方法,这些方法不外乎使金属、合金或者金属化合物从固态、液态或气态转变成粉末状态。

(1) 从固态下制备粉末的方法包括:从固态金属与合金制取金属与合金粉末的机械粉碎法和电解法;从固态金属氧化物及盐类制取金属与合金粉末的还原法;从金属和非金属粉末、金属氧化物和非金属粉末制取金属化合物粉末的还原—化合法。

(2) 在液态下制备粉末的方法包括:从液态金属与合金制取金属与合金粉末的雾化法;从金属盐溶液置换和还原制取金属、合金以及包覆粉末的置换法、溶液氢还原法;从金属熔盐中沉淀制取金属粉末的熔盐沉淀法;从辅助金属浴中析出制取金属化合物粉末的金属浴法;从金属盐溶液电解制取金属与合金粉末的水溶液电解法;金属熔盐电解制取金属法;金属化合物粉末的熔盐电解法。

(3) 在气态下制备粉末的方法包括:从金属蒸气冷凝制取金属粉末的蒸气冷凝法;从气

态金属羰基物离解制取金属、合金以及包覆粉末的羰基物热离解法；从气态金属卤化物气相还原制取金属、合金粉末以及金属、合金涂层的气相氢还原法；从气态金属卤化物沉积金属化合物粉末以及涂层的化学气相沉积法。

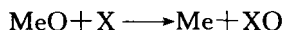
但是，从过程的实质来看，现有制粉方法大体上可归纳为两大类，即机械法和物理化学法。机械法是将原材料机械地粉碎，而化学成分基本上不发生变化；物理化学法是借助化学的或物理的作用，改变原材料的化学成分或聚集状态而获得粉末的。在粉末冶金生产实践中，机械法和物理化学法之间并没有明显的界限，而是相互补充。例如，可使用机械法去研磨还原法所制得的成块海绵状金属；应用还原退火法可将涡旋研磨或雾化所得粉末消除应力、脱碳以及减少氧化物。粉末的生产方法很多，从工业规模而言，应用最广泛的是还原法、雾化法和电解法；而气相沉积法和液相沉淀法在特殊应用时亦很重要。

2.2 制粉方法

2.2.1 还原法

用还原剂还原金属氧化物及盐类来制取金属粉末是一种广泛采用的制粉方法。还原剂可呈固态、气态或液态，被还原的物料也可以采用固态、气态或液态物质。

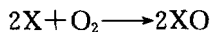
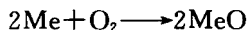
工艺上所说的还原是指通过一种物质，即还原剂，夺取氧化物或盐类中的氧（或酸根）而使其转变为元素或低价氧化物（低价盐）的过程。最简单的反应可用下式表示：



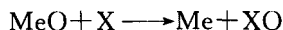
式中 Me——生成氧化物 MeO 的任何金属；

X——还原剂。

上述的还原反应可通过 MeO 及 XO 两种氧化物的生成—离解反应得出：



用两式的差可得：



根据化学热力学原理，化学反应在等压条件下，只有系统的自由能 G 减小的过程才能进行，也就是说， $\Delta G < 0$ 时还原反应才能进行，如果参与的反应彼此不形成溶液或化合物，其反应的标准自由能变化分别为：

$$\Delta G_1 = RT \ln P_{\text{O}_2}(\text{MeO}) \quad \Delta G_2 = RT \ln P_{\text{O}_2}(\text{XO})$$

式中 $P_{\text{O}_2}(\text{MeO})$ ——金属氧化物的离解压；

$P_{\text{O}_2}(\text{XO})$ ——还原剂氧化物的离解压；

R ——气体常数。

还原反应向生成金属方向进行的条件：

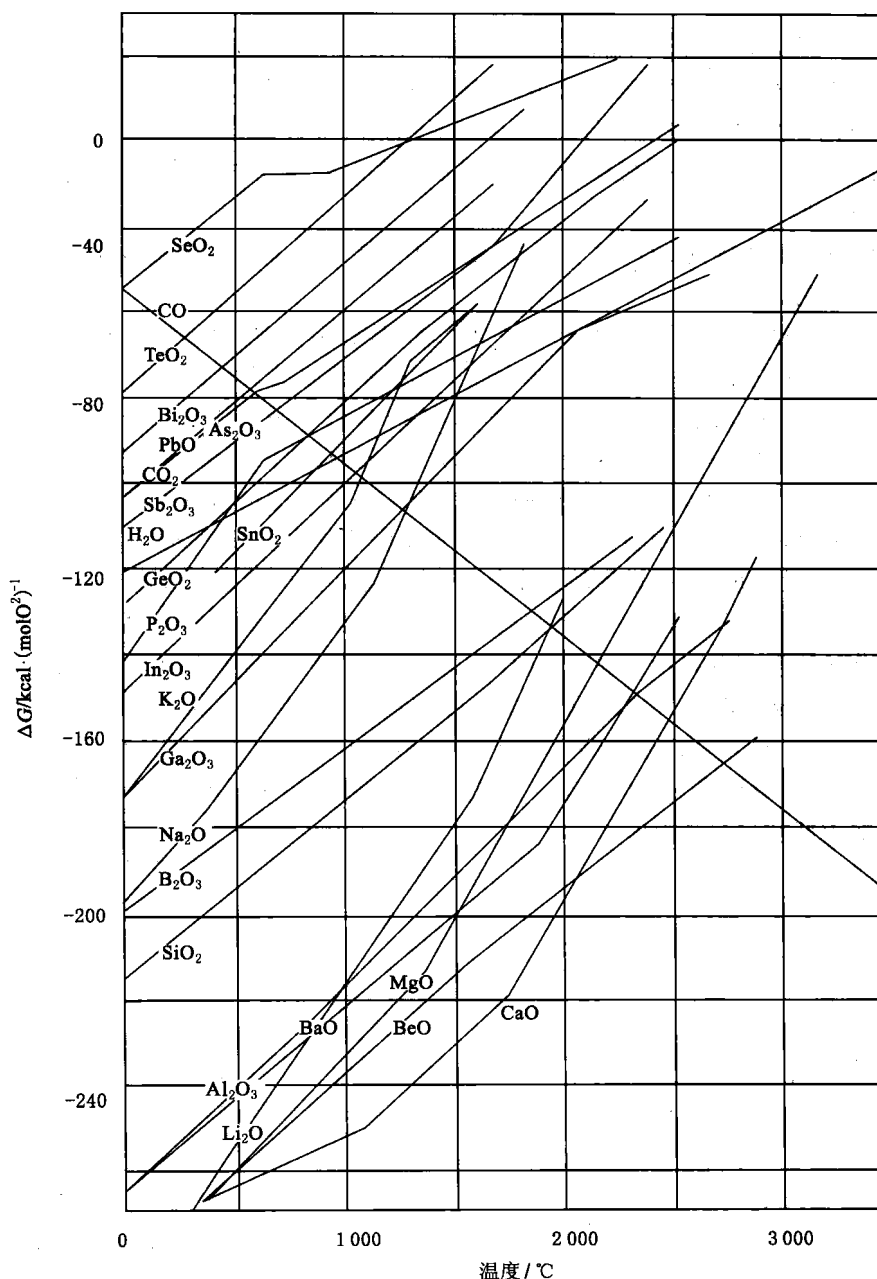
$$\Delta G = (\Delta G_2 - \Delta G_1) / 2 < 0$$

即

$$\Delta G_2 < \Delta G_1$$

由此可见，还原反应向生成金属方向进行的热力学条件是还原剂氧化反应的自由能变化小于金属的氧化反应的自由能的变化，还原剂才能从金属氧化物中还原出金属来，也就是说，还原剂氧化生成的氧化物应该比被还原的金属氧化物稳定。因此，凡是对氧的亲合力比

被还原的金属对氧的亲合力大的物质,都能作为该金属氧化物的还原剂。这种关系可以从氧化物图 $\Delta G-T$ 中得到说明。随温度的变化,各金属氧化物的 $\Delta G-T$ 近似符合 $\Delta G=a+bT$ 的关系,以 ΔG 作纵坐标,以温度 T 为横坐标,得出图 2-2,各种金属对氧的亲合力大小不同,所以各种氧化物生成反应的 $\Delta G-T$ 直线在图 2-2 中的位置高低不一样,其中直线的位置越高,相应的金属的氧化能力越弱,越不易氧化。

图 2-2 氧化物的 $\Delta G-T$ 图