



工程烧结材料

Спеченные
материалы
в технике

冶金工业出版社

工程烧结材料

冶金工业出版社

〔苏〕B.C.拉科夫斯基 编

杨凤环 谭益钦 译

齐洁 李沐山 校

冶金工业出版社

冶金工业出版社

内 容 简 介

本书介绍了现代粉末冶金制品的一般特点, 论述了这些制品的最重要的性能及其制造工艺特点与应用范围, 详细地讨论了减摩、摩擦、电工、多孔、工具和热强材料及其他制品。

本书可供冶金、机械制造及仪表制造工厂以及科研与设计单位的广大工程技术人员和工人阅读, 也可供有关大专院校材料及加工专业师生参考。

在翻译过程中, 对原书中明显的谬误作了修正。

工 程 烧 结 材 料

(苏) B.C.拉科夫斯基 编

杨凤环 谭益钦 译

齐 洁 李沐山 校

*

冶金工业出版社出版

(北京灯市口74号)

新华书店北京发行所发行

冶金工业出版社印刷厂印刷

*

787×1092 1/32 印张 7 1/8 字数 153 千字

1982年4月第一版 1982年4月第一次印刷

印数 00,001~2,700 册

统一书号: 15062·3791 定价0.76元

前 言

近些年来，粉末冶金得到了十分迅速的发展，其产品——各种烧结材料和制品日益广泛地应用于冶金、化工、仪表制造、机械制造、电器、无线电工程等各个工业部门。

苏联已经出版了相当数量粉末冶金方面的各种书籍，但是，所有这些书或者是专论理论方面问题的，或者是论述粉末冶金的一般工艺问题的，或者是介绍某些类型的粉末冶金产品的。至于汇集有关所有或几乎所有类型粉末冶金产品性能、工艺和使用特性的详细资料的书籍，目前在苏联尚未出现。

本书是填补这一空白并使各工业部门的工程技术人员有可能在某种程度上详细地了解粉末冶金的现代成就及其主要产品的初次尝试。

本书概括了国内外的新经验以及作者与其他一些研究工作者合作完成的研究成果。由于本书是第一次作这样广泛概括的尝试，难免存在一些缺点，因此，对读者的所有批评意见表示衷心接受。作者对曾为原稿提供许多宝贵意见的评阅者P.A.安德利耶夫斯基表示感谢。

目 录

前言

绪论	1
1. 概述	1
2. 粉末冶金的技术经济价值	2
3. 粉末冶金在现代工业中的作用	4
4. 各国粉末冶金发展现状	5
5. 粉末冶金产品的简介与分类	11
6. 粉末冶金工艺的基本原理	11
第一章 减摩材料	16
1. 概述	16
2. 减摩制品的制造工艺	17
3. 自润滑效应的理论基础	20
4. 铁石墨系多孔轴承	23
5. 有色金属基多孔轴承	33
6. 不锈钢基多孔轴承	35
7. 金属塑料减摩制品	35
8. 金属玻璃减摩制品	36
9. 层状轴承制品	38
10. 高温下使用的粉末轴承制品	38
11. 密封制品	39
12. 减摩烧结制品的应用	40
第二章 烧结摩擦制品	42
1. 概述	42
2. 摩擦制品工作条件的特点	43
3. 摩擦制品制造工艺特点	46

4. 铁基摩擦制品	47
5. 铜基摩擦制品	51
6. 摩擦制品的应用	53
第三章 烧结电工制品	55
1. 概述	55
2. 触头	55
3. 电刷	61
4. 磁体	62
第四章 多孔材料及制品	78
1. 概述	78
2. 多孔及高孔隙材料的制造工艺	78
3. 多孔制品的物理、化学及机械性能	84
4. 多孔制品的使用性能	89
5. 多孔及高孔隙制品的应用	94
第五章 烧结难熔金属	100
1. 概述	100
2. 钨及其合金的烧结制品	101
3. 钼及其合金的烧结制品	107
4. 铬及其合金的烧结制品	110
5. 锆	113
6. 钽及铌	116
7. 钛及其合金	117
第六章 难熔化合物基材料的烧结制品	125
1. 概述	125
2. 难熔化合物的性能	126
3. 难熔化合物合金	128
4. 非金属难熔化合物	130
5. 难熔化合物基材料致密制品的制取	137
6. 难熔化合物制品的应用	139

第七章 烧结工具制品	144
1. 概述	144
2. “经典”硬质合金	144
3. 无钨碳化物硬质合金	155
第八章 烧结钢	162
1. 概述	162
2. 烧结碳素钢制品	166
3. 烧结高速钢制品	167
4. 其他牌号合金钢烧结制品	170
第九章 粉末热强材料	174
1. 概述	174
2. 标准型粉末热强材料镍基材料	174
3. 弥散强化热强材料	179
第十章 机器与仪表结构零件	191
1. 概述	191
2. 形状复杂的零件制造	194
3. 零件大批生产的稳定性	197
4. 粉末冶金的经济问题	199
第十一章 粉末冶金及其产品应用的发展趋势	202
1. 概述	202
2. 完善现有工艺并研制新工艺	202
3. 创制新材料	205
4. 粉末冶金在各个部门的发展途径	208
参考文献	210

绪 论

1. 概 述

所谓烧结材料是指用粉末冶金的方法由粉末制造的材料。这种材料在二十年代首先以金属陶瓷为名获得了应用。金属陶瓷这一词十分确切地表达了这种材料的实质，即使用粉末状的金属作为原料，而制品的制造工艺则与陶瓷制品的制造工艺极为相似。1970年苏联颁布了关于粉末冶金术语的国家标准，其中把用粉末冶金方法制造的制品称为“烧结”制品。

粉末冶金是一个特殊的工业部门，其实质在于用各种方法制取各种金属及其合金粉末，并由这些粉末经致密化制取各种半成品和成品。

这种方法起源于远古，如在古代埃及法老王^①的葬墓内就发现了表面涂有金粉和银粉的武器、家庭用具及各种装饰品。不久以前，在苏联也有类似的发现，证明早在基辅露西时代就已经使用了粉末及其制品。但是，现代粉末冶金工业的起步却相当晚。

1827年，俄国学者 П.Г. 索包列夫斯基 (П.Г. Соболевский) 曾提出一种用海绵铂制取致密制品的方法，即将海绵铂冷压成致密制品并在铂熔点 $2/3$ 左右的温度下进行处理。该工序被称作“烧结”。烧结制品随后进一步进行压力加

① 古埃及皇帝的称号。——译者注

工。

这种方法（目前已成为经典的方法）后来在许多国家得到了蓬勃发展。П.Г.索包列夫斯基在世时，这种工艺在俄国曾小规模地应用于生产——在彼得格勒造币厂曾组织生产铂制品。这种生产方法持续了几年，但在П.Г.索包列夫斯基去世后不久，由于当时已掌握铂的熔炼技术而被废止。俄国的粉末冶金只有在伟大的十月社会主义革命之后才得到了复兴。П.Г.索包列夫斯基研制的这种方法，在英、美、法、加拿大、瑞典等许多国家得到了进一步的发展。

目前粉末冶金已从П.Г.索包列夫斯基在世年代那种普遍看不起的方法，变成了机械制造和仪表制造的最重要工艺方法之一，并且在许多工业部门中得到了广泛的应用。

2. 粉末冶金的技术经济价值

粉末冶金方法可以制造用其他方法所不能制得的材料和制品，诸如飞机制动装置用的铁基摩擦制品、钨基假合金制的触头制品、金属粉末制的过滤材料、烧结铝类型的弥散强化材料以及许多其他材料。

应用这些材料和产品可以解决很多重要的且在许多场合下是新的技术课题。例如，在飞机制动装置中采用摩擦制动片就可以有效地解决快速和超快速飞机在较短距离内的着陆问题；利用金属玻璃复合物基减摩制品，可以解决轴承在高真空中的使用问题。这样的例子还可举出很多。此外，粉末冶金方法还有可能更便宜地和以更小的劳动量来制造用其他方法也可以制得的制品。采用粉末冶金方法的这种技术经济效果主要表现在制造各种零件及仪器方面。表1列举了应用粉末冶金方法的这种技术经济效果的某些例子。

表 1 采用粉末冶金方法制造机器与仪表零件的经济效果实例

零 件	1 吨零件的金 属消耗, 吨		相对劳动量		1000个零件的 相对成本	
	机械加工	粉 末 冶金法	机械加工	粉 末 冶金法	机械加工	粉 末 冶金法
泵齿轮	1.8~1.9	1.05~ 1.10	1.0	0.3	1.0	0.5
钛制的固紧螺帽	1.85~ 1.95	1.10~ 1.12	1.0	0.5	1.0	0.5
黄铜制的滚珠轴承 保持架	1.75~ 1.85	1.15~ 1.18	1.0	0.45	1.0	0.35
飞机导线用铝合金 制的固定夹	1.85~ 1.95	1.05~ 1.09	1.0	0.35	1.0	0.40

初步计算表明, 每使用1000吨烧结制品, 平均可节约2000~3000吨金属, 腾出约100台机床及约80名工人。关于粉末冶金的经济问题, 我们在第十一章中还要谈及。

采用粉末冶金方法可以制造出一系列性能高于用普通传统方法生产的材料。这对合金钢和热强合金(如镍基热强合金)或钛合金尤其典型。这些材料的粉末通常是用雾化法制取的, 而在雾化时微铸锭(粉末颗粒)的结晶速度要比普通工艺时的大铸锭的结晶速度高许多倍, 其结果是使粉末颗粒及其制品的结构具有极为高的均匀度和分散度。这本身就会显著地改善材料的塑性、工艺性能及其强度, 至于较高的热强性则可通过相应的热处理方法来达到。

近五、六年来, 瑞典、美国、加拿大、英国及比利时的粉末冶金已开始沿着这个方向特别迅速地发展。从1973年起, 苏联在这方面取得了蓬勃的发展。

同时必须指出, 粉末冶金也难免有些缺点, 如不能制造太大的制品或形状很复杂的制品; 在许多情况下粉末冶金按产品的纯度尚不如铸造。然而随着粉末冶金的发展, 上述这些缺点及其他一些缺点, 将逐渐地得到克服, 即使不是全

部，也会是很大一部分。

3. 粉末冶金在现代工业中的作用

现代机器制造业和仪器制造业值得注意的主要发展趋势就是创制新型的具有高指标工作参数的机器、机构及仪表以及寻求经济效益最大、生产效率最高的生产方法。

粉末冶金在很大程度上将促进解决这些与科学技术革命的迅速发展密切相关的任务。现在我们来分析一下工业各个部门的一些典型的例子作为对上述的补充。

现代航空工业对材料提出非常苛刻的要求，而且这些要求还在不断提高。例如，制造飞机喷气发动机涡轮盘用的材料应该具有持久热强性：在 100°C 下100小时的强度 $\sigma_{100}^{750^{\circ}\text{C}}$ 不小于700~800兆帕（70~80公斤/毫米²）， $\sigma_{100}^{1100^{\circ}\text{C}}$ 不小于100~120兆帕（11~12公斤/毫米²）。可以预料，这些要求在最近几年内还会显著提高。用传统冶金的普通方法，即用在合金中进一步添加合金元素的方法来满足这些要求，实际上已不可能，因为现有的和正在使用的合金其工艺性能已经很低，再添加合金元素就会导致其工艺性能的恶性下降。这就需要求助于粉末冶金，因为粉末冶金可以创制出具有优异性能的各种弥散强化材料或晶须强化的金属合金基材料。

在航空工业中，采用其孔隙可以通过相应冷却液的多孔制品来冷却各种部件。这种方法已在航空工业中用来防止机翼的结冰。防冰液通过固定在翼缘上的多孔板流出并蒸发，从而达到防冰的目的。近几年来，粉末冶金在原子能工业中也有了重大的意义。诸如散热元件或生物防护装置元件等一些重要的部件就是基于在大多数情况下唯有用粉末冶金的方法才能制造的材料。

粉末冶金在宇航技术中也得到了应用，如离子发动机或磁流体发电机是很有前途的。离子发动机的主要元件之一就是某些金属蒸汽通过的由钨制的多孔板。在磁流体发电机中最重要的元件是电极，而该电极的最有效的制取方法是粉末冶金方法。宇航器中的各种部件的许多零件是用粉末冶金法制造的，如在苏联的第一个“月球号”中就曾使用过用特殊组分的粉末制造的轴承。

在诸如无线电技术、电子技术及电话通讯技术等部门中广泛地采用各种含有钴、镍及其金属与非金属组元的铁基及其合金基的磁性材料。这种具有最大技术经济效果的磁性材料可用粉末冶金的方法来制取。

将热能直接转化为电能是一项非常复杂而又非常重要的任务。这项任务可成功地借助于半导体来完成。半导体的品种繁多，但其中许多可用粉末冶金方法来制取。

专业的仪表制造业和机械制造业的各个分支正获得广泛的发展，如计算分析机的生产。在这种机器中就采用许多各种细小的、几何形状复杂的零件。应用粉末冶金方法就可大大地减少制造这些零件的劳动量（减少到 $\frac{1}{10} \sim \frac{1}{20}$ ）。烧结硬质合金很早就在各种工业部门中广泛地用来对金属进行切削加工或压力加工，从而可大大地提高劳动生产率和降低产品成本，甚至在一系列的情况下还可改善产品的质量（如在采用浸铜的烧结钨制的挤压工具挤压钛合金薄壁管时）。上述的例子远不能概括粉末冶金应用的一切可能性。

4. 各国粉末冶金发展现状

粉末冶金以工业规模的发展开始于三十年代，而且是以

表 2 某些国家粉末冶金的生产特点

粉末冶金产品的总产量 千吨	生 产 概 况
约 300, 其中 200 为铁基制品或材料	美 国 有近 200 家公司设有专门的企业或车间从事粉末冶金制品的生产, 这些制品在几乎所有的工业部门得到广泛的应用; 还有近 20 家公司生产粉末冶金专用设备
约 200	加 拿 大 有 24 家工厂生产各种金属粉末及其制品; 以工业规模生产各种铁基及有色金属基粉末制品, 其中包括硬质合金, 过滤器, 触头, 难熔金属制品等
约 200	瑞 典 有 3 家主要公司从事粉末冶金; 主要产品是硬质合金, 合金钢; 主要方向是颗粒冶金
50~60	西 德 具有广泛代表性的是硬质合金及铁基材料各种制品的生产; 有专业化的硬质合金工厂及生产其他产品的车间
8~10	日 本 有几家公司生产品种较多的粉末冶金制品, 组织了专门设备, 特别是高质量自动化压机的生产, 取得了一系列非常重要的成就 (创制了小于 1 微米的精滤器, 广泛采用了电火花烧结方法等)
15~16	意 大 利 粉末冶金特别广泛地应用于汽车工业, 采用复杂形状烧结制品的仪表制造以及其他部门; 有几家公司生产粉末及其制品
约 20	奥 地 利 有 10 多家公司从事粉末及其产品的生产, 在 5 家科学中心进行研究工作; 最大的专业化企业《普兰西厂》(《Planseewercke》) 生产硬质合金、难熔金属、铁基及铜基材料产品; 在企业内设有大型实验室
约 18	英 国 1950 年开始工业生产; 从 1956 年起粉末冶金开始特别迅速的发展; 生产粉末及其制品以及专用设备的公司超过 60 家

续表 2

粉末冶金产品的总产量 千吨	生 产 概 况
约10	法 国 五十年代开始工业规模生产粉末及其制品；从事粉末及其制品生产的公司有20家
约10	捷克斯洛伐克 有3家专业化的粉末冶金工厂，生产品种繁多的粉末冶金制品，在研制和组织轴承及摩擦制品的生产方面取得了较大成就；有一个从事粉末冶金问题研究的科学研究所
约15	波 兰 有1家大型的粉末冶金联合企业，生产品种繁多的粉末制品；在联合企业中有研究所类型的大型实验室
约25	东 德 有3家专门化的粉末冶金工厂，其中包括1家硬质合金厂；有一个研究所（德雷斯登），其主要研究课题与粉末冶金有关

难熔金属产品的生产开始发展起来的（钨、钼），稍后一些便开始了硬质合金的生产。到四十年代又开始生产一系列其他制品。苏联硬质合金的产量居世界首位。除硬质合金以外，还生产许多种金属粉末与几乎所有类型的粉末产品；建立了一系列专门化的粉末冶金工厂和车间，在许多科学技术单位的专业化实验室里广泛地开展了科学研究工作。粉末冶金产品在汽车、电器及其他许多工业部门（化工、冶金、石油、拖拉机、航空、造船及农机制造等）中得到了特别广泛的应用。

粉末冶金在美国、加拿大、瑞典、西德、日本、比利时、英国、奥地利、意大利、法国、东德、波兰、捷克斯洛伐克也得到了发展。所有这些国家中都大量生产各种粉末及品种繁多的粉末制品。

表 3 烧 结 制 品 的 分 类

制品类别	制 品 特 征	应 用 范 围
摩擦部件的材料和制品		
减摩制品	由铁基，铜基，铝基及某些难熔化合物基材料制的各种多孔轴承（环、套筒等）。这些材料除了基体组元之外还含添加的金属元素和起固体润滑剂作用的非金属组元（石墨、硫化物等）。这类制品的特征是具有充油的孔隙、低的摩擦系数及高的耐磨性	在汽车、拖拉机、飞机、机床、铁路运输工具及其他机械内的各种摩擦部件中作轴承用
摩擦制品	由铁基或铜基材料制的各种板片（垫片），这些材料除了基体金属和合金元素之外，还含有各种起固体润滑剂作用的非金属组元（石墨、硫化物、硫酸盐等）和能提高耐磨性及摩擦系数的非金属组元（难熔碳化物、氧化物、石棉等）。这类产品的特征是具有高的耐磨性及高的摩擦系数	飞机、挖掘机的轮子的各种制动部件；汽车、坦克及其他机械液压传动系统的各种制动部件；在干式摩擦、油介质及其他液体介质的条件下应用
密封制品	添加有铬、硅及其他元素并含有石墨、氮化硼和其他组元的铁基和镍基材料制的各种平垫片及环。这类材料具有低的摩擦系数	燃气涡轮轮箍、喷气式飞机发动机轮箍的密封件
电器用材料和制品		
触 头	由难熔金属（W、Mo）与银或铜组成的假合金以及镍和某些其他金属与 CdO 和其他非金属组元组成的合金材料制的小圆柱、圆环和弧形片。由石墨或炭与银或铜组成的假合金基材料制的制品也属于这一类	在各种仪表或电机中用作放电器、集电器及其他零件
磁 体	纯铁及其与镍和钴的合金（软磁材料）以及铁与铝、硅、镍、钴、铜及其他元素组成的合金（硬磁材料）制的制品。制品形式有薄片、圆环、套筒、小圆柱及其他制品	用于各种通讯设备的部件及医疗器械中电机集电器

续表 3

制品类别	制 品 特 征	应 用 范 围
多孔及高孔材料和制品		
过滤器	青铜基、铁基、镍基、钛基、铬基、铝基和难熔化合物基材料 and 不锈钢制的板片、圆柱套筒。这些材料，是由球状及片状粉末制取的，其孔隙度 $<50\%$	净化液体或气体，除去混浊在其中的固体颗粒
“发汗”材料	类似于过滤器的制品，但主要是由镍基、镍铬合金及钛基材料制得的，其孔隙度波动于 $15\sim30\%$ 之间	用于以冷却液体或气体冷却飞行器的发热部件，用作机翼翼缘防冻元件
纤维多孔制品	多半是由金属纤维（镍、铜、镍铬合金及不锈钢纤维等）制的板片及套筒，孔隙度可达 $70\sim80\%$	减震垫片板消音元件
工具材料及制品		
烧结硬质合金	以钴或镍粘结的碳化钨、碳化钛基合金制的各种刀片和成形工具。某些硬质合金则以碳化钛或碳化铬为基，以合金钢或镍基热强钢作粘结剂	用于金属切削加工和压力加工，钻探（地质、石油等）
复合工具制品	以难熔金属，含铜的假合金或烧结硬质合金粘结的由人造（或天然）金刚石或碳化硼颗粒组成的制品	用于钻探，修整砂轮
特殊合金		
热强合金	含有合金元素的镍、钛、铬基热强合金制的制品。这种制品多半是由雾化法制取的合金粉末制得的，与传统的熔铸法制得的合金相比，具有较高的强度、塑性及热强性	在高温条件下工作的各种零件，如涡轮盘、飞机、喷气式发动机叶片
弥散强化合金	以难熔化合物（主要是氧化物）弥散强化的铝、钛、镍、铜、铬及其他金属基材料制的制品，其特点是比纯金属具有较高的热强性及耐稳定性	在高温下工作的各种零件及部件（如叶片、燃烧室等）

续表 3

制品类别	制 品 特 征	应 用 范 围
金属陶瓷	难熔化合物（碳化物、金属间化合物）基材料制的制品。其特点是具有高的热强性和较低的塑性	在高温下工作的各种零件（如叶片）
难熔化合物基合金	难熔金属碳化物、硼化物、硅化物、氢化物、氮化物及其合金制的各种形状的多半是小型的制品，其特点是具有一系列独特的性能	原子能工程、宇航器、耐火材料
难熔金属基合金	含有镍、钴、铁及某些其他金属的某些难熔金属（主要钨和钼）基合金制的制品，其特点是具有高密度和高强度	真空设备的密封垫，放射性同位素容器及均衡器用的密度 >18 克/厘米 ³ 的高比重合金
结构零件		
—	用作各种机械和仪器的承力零件用的纯金属或其合金制的制品，这些制品没有独特的性能，且可用除粉末冶金以外的其他方法（熔铸法、毛坯切削加工法等）来制得。得到实际应用的有铁、铜、铝、镍、钛及其合金基材料制品以及碳素钢及各种牌号的合金钢制品	机器与仪器零件

在上述各国和在苏联，粉末冶金发展的基本方向是：创制在高温和高负荷下工作的材料；用热锻及冲压的方法制造机械零件；创制在高温下工作的多孔材料；制造具有最终尺寸而无须进行机械加工的零件；创建在切削加工和压力加工时具有高寿命的各种工具材料。

表2中列举了各国粉末冶金发展现状的一些数据。