

中华人民共和国机械工业部统编

机械工人技术培训教材

粉末冶金工艺学



科学普及出版社

76.13
186
C.2

中华人民共和国机械工业部统编
机械工人技术培训教材

粉末冶金工艺学

(初中级合用本)

2001/59

科学出版社

内 容 提 要

本书是中华人民共和国机械工业部统编机械工人培训教材,它是根据机械工业部《工人技术等级标准》和教学大纲编写的。文字通俗易懂,内容浅显,可作工人技术培训的教科书,也可作为职工业余自学用书。结合职工培训的特点,在选材中注意到理论联系实际,深入浅出。

本书内容包括粉末冶金工艺的全部基本知识。

本书由刘传习、周作平、解子章、陈希圣主编,由韩凤麟主审。参加编写的有:江国源、王金龙、和存正、钱德贤、顾国财、陈明朝、应忠亮、朱子康、唐耀才、张颂钢、邢嘉斌、李玉文。

中华人民共和国机械工业部统编 机械工人技术培训教材

粉 末 冶 金 工 艺 学

(初中级合用本)

责任编辑:宋 守 今

科学普及出版社出版(北京海淀区白石桥路32号)
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售
北京四季青印刷厂印刷

开本: 787×1092毫米 1/16 印张: 27.25 字数: 644千字

1987年9月第1版 | 1987年9月第1次印刷

印数: 1—14,150册 定价: 4.75元

统一书号: 15051·1185 本社书号: 1239

对广大工人进行比较系统的技术培训教育，是智力开发方面的一件大事，是一项战略性的任务。有计划地展开这项工作，教材是关键。有了教材才能统一培训目标，统一教学内容，才能逐步建立起比较正规的工人技术教育制度。

教材既是关键，编写教材就是一件功德无量的事。在教材行将出版之际，谨向为编写这套教材付出辛勤劳动的同志们致以敬意！

机械工业部第一副部长 **杨 铎**

一九八二年五月

前 言

为了更好地落实中共中央、国务院《关于加强职工教育工作的决定》，对工人特别是青壮年工人进行系统的技术理论培训，以适应四化建设的需要。现确定按初级、中级、高级三个培训阶段，逐步地建立工人培训体系，使工人培训走向制度化、正规化的轨道，以期进一步改善和提高机械工人队伍的素质。一九八一年，根据机械工人队伍的构成、文化状况及培训的重点，我们组织了四川省、江苏省、上海市机械厅（局）和第一汽车厂、太原重型机器厂、沈阳鼓风机厂、湘潭电机厂，编写了三十个通用工种的初级、中级的工人技术培训教学计划、教学大纲及其教材，作为这些工种工人技术理论培训的统一教学内容。

编写教学计划、教学大纲及其教材的依据，是原一机部颁发的《工人技术等级标准》。初级技术理论以二、三级工“应知”部分为依据，是建立在初中文化基础上的。它的任务是为在职的初级工人提供必备的基础技术知识，指导他们正确地使用设备、工装卡具、量具，按图纸和工艺要求进行正常生产。中级以四、五、六级工“应知”部分为依据，并开设相应的高中文化课，在学完了初级技术理论并具有一定实践经验的工人中进行。它的任务是加强基础理论教学，使学员在设备、工装卡具、结构原理、工艺理论、解决实际问题的能力上有所提高（高级以七、八级工“应知”部分为依据，这次未编）。编写的教材计有：车工、铣工、刨工、磨工、齿轮工、镗工、钳工、工具钳工、修理钳工、造型工、化铁工、热处理工、锻工、模锻工、木模工、内外线电工、维修电工、电机修理工、电焊工、气焊工、起重工、煤气工、工业化学分析工、热工仪表工、锅炉工、电镀工、油漆工、冲压工、天车工、铆工等工艺学教材和热加工的六门基础理论教材：数学、化学、金属材料及其加工工艺、机械制图、机械基础、电工基础。一九八四年，我们又组织编写了值班电工、划线工、机械性能试验工、金相试验工、粉末冶金工艺学教材，冷加工四门基础理论教材：机械基础、电工基础、机械加工工艺基础、金属材料及热处理和电工类的电工基础。

在编写过程中，注意了工人培训的特点，坚持了“少而精”的原则。既要理论联系生产实际，学以致用，又要有理论的高度和深度；既要少而精，又要注意知识的科学性、系统性、完整性；既要短期速成，又要循序渐进；在教学计划中对每个工种的培养目标，各门课程的授课目的，都提出了明确的要求，贯彻了以技术培训为主的原则。文化课和技术基础课的安排，从专业需要出发，适当地考虑到今后发展和提高的要求，相近工种的基础课尽量统一。

这套教材的出版，得到了有关省、市机械厅（局）、企业、学校、研究单位和科学普及出版社的大力支持，在此特致以衷心的感谢。

编写在职工人培训的统一教材，是建国三十年来第一次。由于时间仓促，加上编写经验不足，教材难免还存在不少缺点和错误，我们恳切地希望同志们试行中提出批评和指正，以便进一步修改、完善。

机械工业部工人技术培训教材编审领导小组

一九八五年三月

绪 论

粉末冶金是一门研究制造各种金属粉末和以粉末为原料通过压制成形、烧结和必要的后续处理制取金属材料 and 制品的科学技术。用这种技术制造的材料和制品，或者具有优异的组织 and 性能，或者表现出显著的技术经济效益。

粉末冶金工艺能够生产许多用其它方法所不能生产的材料和制品。如许多难熔材料，至今还只能用粉末冶金方法来生产。还有一些特殊性能的材料，如由互不溶解的金属或金属与非金属组成的假合金（铜—钨、银—钨、铜—石墨），这种假合金具有高的导电性能和高的抗电蚀稳定性，是制造电器触头制品不可缺少的材料。再如，粉末冶金多孔材料，能够通过控制其孔隙度、孔径大小获得优良的使用特性等等。

粉末冶金还是一门制造各种机械零件的重要而又经济的成形技术。由于粉末冶金工艺具有获得最终尺寸和形状的零件，不需要或需要很少机械加工这一特性，可以大量节省金属原材料，节省工时，节约能源等，因而，具有突出的经济效益。

综上所述，粉末冶金既是制造具有特殊性能材料的技术，又是一种能降低成本、大批量制造机械零件的无切削、少切削加工工艺。

目前采用粉末冶金工艺可以制造板、带、棒、管、丝等各种型材，以及齿轮、链轮、棘轮、轴套等各种零件；可以制造重量仅百分之几克的小制品，也可以用热等静压法制造近两吨重的大型坯料。粉末冶金工艺已成为当今世界各工业发达国家都十分重视的课题。

粉末冶金典型的工艺过程是，原料粉末的制备；粉末物料在专用压模中加压成形，得到一定形状和尺寸的压坯；压坯在低于基体金属熔点的温度下加热，使制品获得最终的物理机械性能。

现代粉末冶金工艺的发展已经远远超过此范畴而日趋多样化，如同时实现粉末压制和烧结的热压及热等静压法；粉末锻造；多孔烧结制品的浸渍处理、熔渗处理；精整或少量切削加工处理；热处理等。

粉末冶金技术起源于远古，一些国家的考古学资料表明，早在纪元前，人们在原始的炉子里用碳还原铁矿，得到海绵铁块，再行锤打，制成各种器件。十九世纪初叶，用粉末冶金法制得海绵铂粉，经冷压，再在铂熔点温度的三分之二左右进行加热处理，然后进一步锻打成各种铂制品。以后，随着冶金炉技术的发展，十九世纪中叶出现了熔炼法制造各种金属材料。由于熔炼法能大批量生产钢铁和有色金属，加上机械加工工业的不断发展，经典的粉末冶金工艺逐渐被熔铸法取代。于是，在相当长一段时间内，这种传统工艺被人们淡漠而变得陌生起来。到了二十世纪初，粉末冶金工艺又重新受到重视，并且在本世纪得到了十分迅速的发展。如果从1909年到1910年用粉末冶金工艺制造电灯钨丝的成功算起，迄今已有七十多年的历史，在这期间有三个重要阶段标志着现代粉末冶金技术不断地向更高水平，更广阔的领域开拓，而成为当今工农业生产和科学技术发展所不可缺少的一个领域。

第一个重要阶段的标志是，二十世纪初，由于电气技术的迅速发展，迫切地寻求各种新的电光源材料。1880年爱迪生发明电灯采用的炭丝光源有严重缺陷，直至用粉末冶金工艺解决了钨丝的制造技术，使电灯真正地给人类带来光明，从而使粉末冶金的传统工艺重又获得了新生。随后，许多难熔金属材料如钨、钼、钽、铌的生产，粉末冶金工艺成为唯一的方法。二十世纪二十年代，又用这一种工艺技术成功地制造了硬质合金。硬质合金刀具比工具钢制作的切削刀具，无论其切削速度，还是刀具寿命，都提高了几倍至几十倍，并使一些难加工的材料有可能进行加工。因此，硬质合金的出现曾被誉为机械加工工业的一次革命性变革。现代粉末冶金工艺正是由于难熔金属和硬质合金的生产，奠定了它在材料领域中的地位。

第二个重要阶段的标志是，本世纪三十年代采用粉末冶金工艺制造多孔含油轴承获得成功，先是青铜多孔含油轴承，接着采用廉价的铁粉制成铁基含油轴承，这种含油轴承很快地在汽车工业、纺织工业等方面得到广泛应用。随着生产方法的改进，铁粉产量和质量大幅度提高，使得铁基制品又进一步向高密度、高强度和形状复杂的结构零件方向发展，从而使粉末冶金工艺成为高效益的无切削，少切削的新兴加工工艺，并得到了非常迅速的发展。

第三个重要标志是，粉末冶金新工艺新材料在近二三十年来，不断地向高水平新领域方面开拓。热等静压、粉末锻造等新工艺出现；金属陶瓷，弥散强化材料，纤维强化材料、粉末高速钢等新型材料相继问世；所有这些，都更加展示出粉末冶金工艺的广阔美好的前景。

我国粉末冶金工业是在解放后才发展起来的，经过三十来年的努力，硬质合金的生产规模已居世界前沿；钨、钼、钽、铌等难熔金属生产已有一定基础；永磁合金、铁氧体磁性元体也早已生产；还原铁粉，雾化铜粉，铁、铜基含油轴承和各种结构零件，多孔过滤材料、摩擦材料等均已具有较大的批量生产能力；测试技术日臻完善。国内为发展这一工艺技术，成立了许多研究机构和学术团体，高等学校设置了专业，每年为国家输送专门技术人才。这一切说明，我国粉末冶金工业从无到有，已经初具规模，成为国民经济的有机组成部分。充分发挥粉末冶金工艺突出的高效，优质、低耗的优势，以及投资省，扩大再生产快，适于研制各种新材料，新产品等特点，我国粉末冶金工业今后必将以更快的速度向前发展。

目 录

第一篇 金属粉末

第一章 概 述.....	1
第一节 机械粉碎法生产金属粉末	2
第二节 物理化学法制备金属粉末	5
第三节 铁粉生产概况及应用	11
第二章 还原法生产铁粉.....	14
第一节 固体碳还原法生产铁粉的基本原理	14
第二节 原料及其处理	20
第三节 固体碳还原法生产铁粉工艺	23
第四节 隧道窑的基本结构及其操作	32
第五节 铁粉的二次精还原	36
第三章 雾化法生产金属粉末.....	41
第一节 雾化法生产金属粉末的基本原理	41
第二节 雾化法生产铜合金粉	49
第三节 雾化法生产铁粉和钢粉	51
第四章 金属粉末性能和检测.....	60
第一节 金属粉末的性能	60
第二节 粉末性能的检测	67

第二篇 成 形

第五章 压制原理.....	86
第一节 压制压力和压坯密度、强度的关系.....	86
第二节 压制过程中力的分布.....	88
第三节 压坯密度的分布.....	91
第四节 其它成形方法	102
第六章 压制工艺	105
第一节 压制前的准备	105
第二节 压制工艺	109
第三节 压制过程和压模结构图例	117
第四节 压制工艺对压坯质量的影响	130
第五节 压制废品分析	133
第七章 成形模设计的基本知识	135
第一节 压坯的正确设计	135
第二节 模具主要零件和附件的设计	145
第三节 压模参数选择及零件的尺寸计算	149

第四节	初压模图例	155
第五节	模具材料的选择及热处理	161
第六节	通用模架	165
第八章	压制设备	169
第一节	概述	169
第二节	压机的分类	170
第三节	自动送料机构	173

第三篇 烧 结

第九章	烧结的基本原理	176
第一节	烧结概述	176
第二节	压坯烧结中的变化及其本质	176
第三节	铁基材料的烧结过程及组织转变	180
第十章	烧结工艺	185
第一节	烧结前的准备	185
第二节	烧结工艺参数及其对铁基制品性能的影响	186
第三节	组合烧结法	193
第四节	烧结废品分析	195
第五节	铜基制品的烧结工艺	198
第十一章	烧结炉	201
第一节	烧结炉的基本结构	201
第二节	推杆式烧结炉	207
第三节	其它烧结炉	209
第四节	烧结炉的操作及维护	213
第十二章	烧结气氛	215
第一节	烧结气氛的作用和种类	215
第二节	发生炉煤气和转化气	216
第三节	可控碳势气氛	222
第四节	分解氨	225
第五节	氢气	230
第十三章	烧结制品的检测	233
第一节	物理性能的检测	233
第二节	机械性能的检测	236
第三节	金相组织的检验	243

第四篇 粉末冶金制品的烧结后处理

第十四章	粉末冶金制品的精整和切削加工	247
第一节	精整的基本概念	247
第二节	精整模具及设备	249
第三节	精整中常见的质量问题及解决方法	270
第四节	粉末冶金制品的切削加工	273

第十五章	粉末冶金制品的热处理	277
第一节	粉末冶金制品热处理的特点	277
第二节	粉末冶金制品的淬火和回火	278
第三节	粉末冶金制品的渗碳处理	288
第四节	粉末冶金制品的渗铬、渗锌处理	292
第十六章	粉末冶金制品表面处理及其它处理	295
第一节	蒸汽处理	295
第二节	粉末冶金制品的电镀处理	299
第三节	粉末冶金制品的其它处理	302

第五篇 粉末冶金材料及制品

第十七章	铁基粉末冶金减摩材料	305
第一节	铁基含油轴承的优点及应用	305
第二节	铁基含油轴承的特点及自润滑原理	307
第三节	铁基含油轴承的性能	309
第四节	影响铁基含油轴承性能的因素	311
第五节	铁基含油轴承的生产工艺	314
第十八章	铁基结构材料及制品	319
第一节	铁基结构材料的应用及其性能的要求	319
第二节	密度对铁基结构材料性能的影响及提高密度的途径	322
第三节	常用合金元素对铁基结构材料性能的影响	334
第四节	铁基结构零件的生产工艺	340
第十九章	铜基粉末冶金材料及制品	347
第一节	铜基含油轴承	347
第二节	铜基结构零件	355
第二十章	其它粉末冶金制品及材料	364
第一节	粉末冶金摩擦材料	364
第二节	粉末冶金电工材料	376
第三节	粉末冶金磁性材料	383
第四节	粉末冶金工具材料	390
第五节	粉末冶金多孔材料及制品	403
附录1	中华人民共和国国家标准UDC 粉末冶金用还原铁粉GB	408
附录2	各国采用不同工艺生产的粉末制品用铁粉牌号及性能	412
附录3	各国主要低合金钢粉牌号及性能	413
附录4-1	中华人民共和国国家标准 滑动轴承GB2685-81 粉末冶金筒形轴承型式、尺寸与公差	414
附录4-2	中华人民共和国国家标准 滑动轴承GB2686-81 粉末冶金带挡边筒形轴承型式、尺寸与公差	416
附录4-3	中华人民共和国国家标准 滑动轴承GB2687-81 粉末冶金球形轴承型式、尺寸与公差	418
附录4-4	中华人民共和国国家标准 滑动轴承GB2688-81 粉末冶金轴承技术条件	420

第一篇 金属粉末

第一章 概述

制取金属粉末是粉末冶金的第一步。目前，在粉末冶金材料和制品的生产中不仅使用金属粉末，也使用合金粉末。不同的材料和制品对粉末的性能要求是不一样的。为了满足粉末冶金材料对粉末性能的各种要求，研究出了各种制粉方法。

粉末的制造方法通常分为两大类，即物理化学法和机械粉碎法（见表1-1），工业上应用最广的是还原法，雾化法和电解法。铁粉的制造方法见表1-2。其中还原法制造的铁粉价格低廉，用途广泛，其性能可满足一般粉末冶金零件生产的要求。因此，当前工业用铁粉的大部分仍是用还原法生产的。

金属粉末制备方法

表 1-1

生 产 方 法		原 材 料	粉 末 产 品 举 例		
			金 属 粉 末	合 金 粉 末	金属化合物粉末
物理化学法	还 原	碳 还 原 气体还原	Fe、W、 W、Mo、Fe、Ni、Co、 Cu	— Fe-Mo、W-Re	— —
		金属热还原	Ta、Nb、Ti、Zr、Th、U	Cr-Ni	—
		碳化或碳与金属氧化物作用	—	—	碳化物
		硼化或碳化硼法	—	—	硼化物
		硅化或硅与金属氧化物作用	—	—	硅化物
化学法		氮化或氮与金属氧化物作用	—	—	氮化物
	气相还原	气相氢还原	W、Mo	Co-W、W-Mo或 Co-W涂层石墨	—
		气相金属热还原	Ta、Nb、Ti、Zr	—	—
	气相冷凝或离解	金属蒸气冷凝 羰基物热离解	Zn、Cd Fe、Ni、Co	— Fe-Ni	— —
	液相沉淀	置 换 溶液氢还原 从溶盐中沉淀	Cu、Sn、Ag Cu、Ni、Co Zr、Be	— Ni-Co —	— — —
电 解		水溶液电解	Fe、Cu、Ni、Ag	Fe-Ni	—
		熔盐电解	Ta、Nb、Ti、Zr、 Th、Ce	Ta-Nb	碳化物 硼化物 硅化物

续表

生 产 方 法			原 材 料	粉 末 产 品 举 例		
				金 属 粉 末	合 金 粉 末	金属化合物粉末
机 械 粉 碎 法	电化腐蚀	晶间腐蚀 电 腐 蚀	不 锈 钢 任何金属和合金	— 任何金属	不 锈 钢 任何金属	— —
	机械粉碎	机械研磨	脆性金属和合金 人工增加脆性的 金属和合金	Sb、Cr、Mn、高碳铁	Fe-Al、Fe-Si Fe-Cr等铁合金	— —
		涡流研磨	金属和合金	Sn、Pb、Ti	—	—
		冷气流粉碎	金属和合金	Fe、Al Fe	Fe-Ni、钢 不锈钢、超合金	— —
	雾 化	气体雾化	液态金属和合金	Sn、Pb、Al、Cu、Fe	黄铜、青铜、合金 钢、不锈钢、 黄铜、青铜、合金钢	— —
		水 雾 化	液态金属和合金	Cu、Fe		

铁 粉 的 制 备 方 法 和 一 般 特 征

表 1-2

制 备 方 法	铁粉的一般特征	主 要 用 途	价 格
铁鳞还原法	粉末颗粒为不规则状，中等松装密度，纯度高，压缩性好，压坯强度较高、烧结性好	结构零件 焊 条 金属切割	便 宜
铁矿还原法	粉末颗粒为不规则状，松装密度较低，杂质含量较高，压缩性稍差	结构零件 焊 条 金属切割	便 宜
雾 化 法	粉末颗粒接近球状，松装密度高，流动性好，压坯强度较高	高密度结构零件 粉末锻造零件，过滤器，焊条	比还原铁粉贵15%左右
电 解 法	粉末颗粒为树枝状或片状，松装密度高、纯度好、压制性好	高密度结构零件	比雾化法铁粉贵
羰基法	粉末颗粒呈球状，非常细，纯度很高	电子材料	比电解铁粉贵

第一节 机械粉碎法生产金属粉末

机械法制造金属粉末是用机械将金属或合金原料粉碎成粉末，粉碎过程中，其化学成份基本上没有变化。雾化法也属于机械粉碎法，只不过被粉碎的不是固体而是熔融液体。雾化法已在很多国家获得广泛采用，并已形成了较大的生产能力。关于雾化法制备金属粉末详见第三章。

机械粉碎法，是一种独立的制粉方法，也可作为某些制粉方法的补充工序。例如，用于粉碎由还原法制得的海绵铁块等。

机械粉碎是靠压碎，击碎和磨削等作用，将块状金属或合金粉碎成粉末。根据物料粉

碎的最终粒度，把粉碎过程分为粗碎和细碎。粗碎所用的设备有碾碎机，双辊滚碎机，颚式破碎机、锤式破碎机，切削破碎机等。细碎所用的设备有锤磨机、棒磨机、球磨机等。

所有金属和合金虽然都可进行机械粉碎，但实践证明，机械研磨较适用于脆性材料。塑性金属和合金可用涡流研磨和冷气流粉碎等方法进行粉碎。

一、球 磨 法

机械粉碎法中，使用最多的是球磨法，球磨法又分为滚动球磨，振动球磨及搅动球磨。其中滚动球磨机是最基本的。因此，研究滚动球磨的规律对了解球磨机的粉碎原理和正确地使用球磨机是十分重要的。

（一）球磨机内钢球的运动状态及对物料的粉碎效果

球磨机粉碎物料的作用主要取决于球和物料的运动状态，球和物料的运动又取决于球磨筒体的转速。球和物料的运动有三种基本情况，如图1-1所示。

1. 球磨机转速很慢时，球和物料沿筒体上升至自然坡度角后滚落下来，称为泻落。这种情况下，物料的粉碎主要靠球的磨擦作用。如图1-1(a)所示。

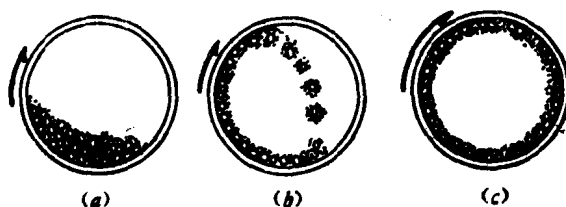


图 1-1 球磨筒内球和物料随转速不同的三种状态
(a) 低转速；(b) 适宜转速；(c) 临界转速

2. 球磨机的转速较高时，球在离心力的作用下，随筒体上升至比第一种情况更高的高度层后在重力的作用下掉落下来，称之为抛落。这时物料的粉碎除靠球与球之间的摩擦作用外，还靠球落下的冲击作用，其效果最好，

3. 继续增加球磨机转速，至离心力超过球的重力时，球将紧靠筒体衬板壁并和筒体一起回转。在这种情况下，物料的粉碎作用就停止了。称这种转速为临界转速，如图1-1(c)所示。

临界转速可由下面公式求出：

$$n_{\text{临}} = \frac{42.4}{\sqrt{D}} \text{ 转/分}$$

式中 D ——球磨机筒体直径，米。

（二）影响球磨效果的因素

1. 球磨筒的转速 前已指出，球的运动状态是随筒体的转速而变化的。实践证明，当球磨机的工作转速 $n_1 = 0.70 \sim 0.75 n_{\text{临}}$ 时，球体发生抛落；当 $n_1 = 0.6 n_{\text{临}}$ 时，球体发生滚动；当 $n_1 < 0.6 n_{\text{临}}$ 时，球体以滑动为主。球处在不同运动状态时物料的粉碎作用是不同的。生产实践中采用 $n_1 = 0.6 n_{\text{临}}$ 使钢球产生滚动以粉碎较细的物料。对于物料较粗，性脆而

需要冲击时，则宜采用 $n_1 = 0.70 \sim 0.75 n_{\text{临}}$ 的转速。

2.装球量 在一定范围内增加装球量能提高粉碎效果。当转速固定时，如果装球量过少，球在倾斜面上主要呈滑动状态，使粉碎效率降低，但是，装球量过多，球层之间干扰大，破坏了球的正常循环，粉碎效率也会降低。装球量的多少和球磨机筒体的容积有关。装球体积与筒体容积之比，叫做装填系数。一般球磨机的装填系数以 $0.4 \sim 0.5$ 为宜，随着转速的增大，可略有增加。

3.球料比 在球磨过程中如果装料太少，则球与球间的碰撞加多，球的磨损增大；如装料过多，则磨削面积不够，在这种情况下，要将物料磨细，则需要很长的研磨时间。研磨时间长，能量消耗增大，生产率下降。球也不能装得过满，否则球磨筒体上部空间变小，球的运动发生阻碍，球磨效率也下降。当球体的装填系数为 $0.4 \sim 0.5$ 时，装料量以填满球间的空隙并稍掩盖住球体表面为原则。也有人建议装料量为球磨筒体容积的20%。

4.球的大小 球的大小对物料的粉碎有很大影响。球的直径小，则球的重量轻，球对物料的冲击力弱；球的直径太大，则球的个数减少，因而撞击次数也减少，并且磨削面积也变小，使球磨效率降低。

生产中，都是将大小不同的球搭配起来使用，球的直径（ d ）按下列范围选用。

$$d \leq \left(\frac{1}{18} \sim \frac{1}{24} \right) D$$

式中 D ——球磨机筒体直径。

物料原始粒度大，或材料硬度高，应选用较大的球。生产实践中，球磨铁粉选用15~25毫米大小的钢球；而球磨硬质合金混合料时，则选用5~10毫米大小的硬质合金球。研磨硬质合金粉末时还宜采用液体（酒精、汽油、丙酮等）作研磨介质，以防止粉末氧化；铁粉的球介质则是空气。

在研磨过程中，粉末颗粒的表面被磨平，氧化层剥落，以及内孔隙减少等，可促使粉末的松装密度增大。工厂常用球磨来调整粉末的松装密度。

为了提高球磨效率，强化球磨过程，可采用振动球磨机代替滚动球磨机。振动球磨机结构示意图见图1-2。

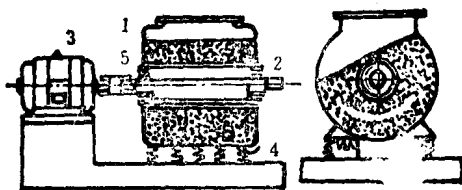


图 1-2 振动球磨机示意图

1—筒体； 2—偏心轴； 3—马达；
4—弹簧； 5—弹性联轴节

振动球磨的主要原理是由偏心轴旋转产生的惯性使安装在支撑弹簧上的筒体产生激烈振动，除筒体整体运动外，每个钢球还有自转运动，而且振动频率愈高，球的自转愈激烈。故随振动频率的增高，各球层间的相对运动增加，并且外层运动速度大于内层的运动速度。当球层空隙越

大，球几乎处于悬浮状态，球体在内部也会离开筒体发生抛射，因而对物料产生较大的冲击力。

振动球磨机在单位时间内的振动频率传给球体的总冲击次数，可用下面的经验公式计算。

$$m = V \cdot K \cdot B \cdot n \cdot Z \cdot E \quad \text{次/分}$$

式中 m ——单位时间内球体的总冲击次数；

V——振动球磨机容积，一般采用200立升；

K——每立升中可容纳球的数量；

B——装填系数；

n——主轴每分钟转速；

Z——主轴每转一周由筒体传给球体的冲击数；

E——主轴每转一周由邻近的球体传给每个球体的补充冲击数。

设 $K = 1250$ 个/立升，（平均直径为10毫米） $B = 0.8$ ， $n = 1500$ 转/分， $Z = 1$ ， $E = 1$ ， $V = 200$ 立升，将上述假设值代入公式（1-3）得：

$$m = 200 \times 1250 \times 0.8 \times 1500 \times 1 \times 1 = 3 \times 10^8 \text{ 次/分。}$$

振动球磨机每分钟传给球体的冲击次数如此之大，说明球磨的效率是很高的。

二、涡流粉碎法

一般机械粉碎只适用于粉碎脆性金属和合金，而涡流粉碎法可用于粉碎较软的塑性金属，如用于粉碎纯铁粉。涡流粉碎机也称汉米塔克研磨机，其结构如图1-3所示。

涡流法粉碎的原理是：在机壳内装有两只旋转方向相反的螺旋桨，它们各以3000转/分的高速运转，形成两股相对的气流，气流带动物料颗粒自相撞击，同时物料与机壳，螺旋桨之间也有撞击，从而达到粉碎的目的。涡流法粉碎的金属粉末较细，为防止粉末氧化，一般需向粉碎室通入惰性气体或还原性气体。

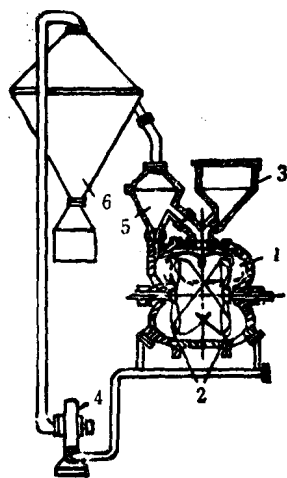


图 1-3 旋涡研磨机结构示意图

- 1—研磨室； 2—涡旋桨；
3—料斗； 4—泵；
5—集分箱； 6—空气分离器

第二节 物理化学法制备金属粉末

制备金属粉末的物理化学法是通过化学的或物理的作用，改变原料的化学成分或聚集状态而获得粉末的工艺过程。目前应用最广、产量最高的是还原法。常见的还有电解法，羰基法，沉淀法，冷凝法，置换法等。还原法制取铁粉在第二章中予以专门叙述。这里就其它几种常用的物理化学法作一些简要的介绍。

一、电 解 法

电解法在粉末生产中占有一定的地位，其生产规模在物理化学法制备金属粉末中仅次于还原法。

由于电解法耗电量较多，电解粉的成本通常比还原粉和雾化粉要高。因此，电解法在粉末总产量中所占比重较小。电解法可分为水溶液电解法和熔盐电解，还有有机电解质电解和液体金属阴极电解等。用得较多的是水溶液电解法，而熔盐电解法主要用于制取一些稀有难熔金属粉末。水溶液电解法可以制取铜、镍、铁、锡等金属粉末，在一定的条件下

也可以使几种元素同时沉积而制得Fe-Ni, Fe-Cr等合金粉末。电解法制得的粉末纯度高, 形状为树枝状, 压制性能好。

(一) 电解法生产铜粉

电解法是工业生产中制取铜粉的主要方法之一, 它有如下优点: 首先可通过调节工艺过程获得不同性能的粉末; 再有电解法是一个提纯过程, 因此, 能生产特殊用途的高纯铜粉;

电解法生产的铜粉, 颗粒为树枝状见图1-4, 粉末的成形性好, 压坯强度高。



图 1-4 电解铜粉的照片

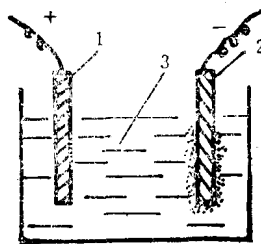


图 1-5 电解过程示意图

1—阳极; 2—阴极; 3—电解液

最后一点是粉末的粒度和松装密度变化范围广。

缺点是这种方法能耗大, 成本较高, 粉末活性大, 容易氧化, 不易贮存。

1. 水溶液电解法生产铜粉的工艺。

当直流电通过硫酸铜水溶液时, 在电极上发生电化学反应。

在阳极, 主要是铜失去电子变成铜离子进入溶液: $\text{Cu} \rightarrow \text{Cu}^{+2} + 2\text{e}$

在阴极, 主要是铜离子放电而析出金属铜:

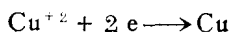


图1-5为电解过程示意图。电解法生产铜的工艺流程如图1-6所示。表1-3为电解铜粉生产的工艺条件。

在工业上, 电解法生产铜粉的条件, 国内多数采用高的铜离子浓度, 高电流密度和高电解液温度, 欧美各国多采用低铜离子浓度, 低电流密度和低电解液温度。二者各有利弊。欧美各国采用的电解条件特点是, 电耗小, 酸雾少, 但生产效率低。采用高电解液温度、高铜离子浓度则可容许较大的电流密度, 生产效率高, 缺点是电流效率低, 电耗大, 酸雾较大, 劳动条件较差。

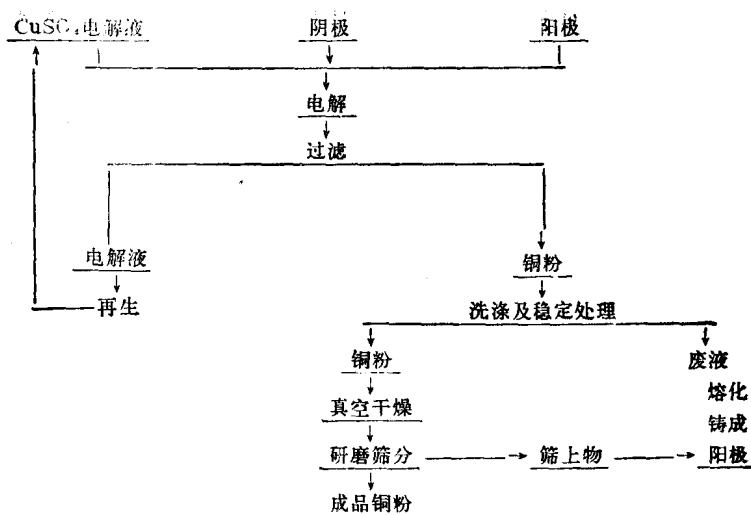


图 1-6 电解法制备铜粉工艺流程

电解生产铜粉的工艺条件

表 1-3

工 艺 条 件 方 案	铜离子(Cu^{2+}) 浓度(g/l)	H_2SO_4 浓度 (g/l)	电流密度 (A/dm^2)	电解液温度 ($^{\circ}\text{C}$)	槽 电 压 (V)
I	12~14	120~150	25	50	1.5~1.8
II	10	140~175	8~10	30	1.3~1.5

电解法生产铜粉过程中，电流效率和电能效率是电解中两项重要技术指标。

所谓电流效率是指电解时电量的利用情况，即一定电量电解出的产物实际重量与理论上应电解出的产物重量之比。由于在电解时有副反应而多消耗一部分电量，所以，一般电流效率为90%，好的可达95%~97%。为了提高电流效率，在电解过程中应尽量减少副反应的发生，并防止电解槽漏电。

所谓电能效率是指电能的利用情况，即在电解过程中生产一定重量的产物，在理论上所需的电能与实际消耗的电能量之比。有时也用生产单位重量金属（如1公斤或1吨）所消耗的电能千瓦小时）来计算。例如每吨铜粉的电能消耗约为2700~3500千瓦小时。降低槽电压可以降低电能消耗，是提高电能效率的主要措施。

2. 影响铜粉粒度和电流效率的因素

(1) 金属离子浓度的影响 在能析出粉末的金属离子浓度范围内， $[\text{Cu}^{2+}]$ 浓度愈低，粉末颗粒愈细，如果提高 $[\text{Cu}^{2+}]$ 浓度，则相应地扩大了致密沉积物区域，使粉末变粗。

从图1-7可知，随着 $[\text{Cu}^{2+}]$ 浓度增加，电流效率也增加。因此，欲得到细粉末，则电流效率将降低。提高电流效率，则粉末变粗。因此要综合考虑铜离子浓度对粉末粒度和电流效率的影响，适当控制有关参数。

(2) 酸度的影响 酸度对电解铜粉末粒度和电流效率的影响比较复杂，要针对不同的电解条件加以分析，这里不作详述。