模具手册之一

粉末冶金模具设计手册

第 2 版

印红羽　张华诚　主编

机 械 工 业 出 版 社

需要全本请访问 www.ertongbook.com

为了总结和推广我国在模具设计和制造方面的先进经验和先进技术，本套手册第2版是在组织有关专家对第1版大部分的技术内容进行了必要的删除、增补和修改等工作后完成的。

这套模具手册按下述六个专题手册分别出版：

粉末冶金模具设计手册、塑料模具设计手册、压铸模具设计手册、冷冲模具设计手册、锻模设计手册和模具制造手册。

本手册共分十三章。第一章粉末冶金工艺及制品简介；第二章粉末冶金压坯设计；第三章粉末冶金模具设计基本原理；第四章粉末成形设备及其模架；第五章成形模具结构设计；第六章精整模具结构设计；第七章模具结构示例；第八章模具零件设计；第九章模具主要零件的尺寸计算；第十章粉末冶金模具的材料选择和制造；第十一章模具常见损伤和压坯缺陷分析；第十二章粉末冶金模具计算机辅助设计/制造（CAD/CAM）技术简介；第十三章金属注射成形（MIM）模具设计简介。

本手册主要供从事粉末冶金模具设计的工程技术人员、机械设计制造和汽车、摩托车设计制造等技术人员使用，并可作为高等院校机械制造、汽车制造、粉末冶金等专业的补充教材。

图书在版编目（CIP）数据

粉末冶金模具设计手册/印红羽，张华诚主编．—2版．
—北京：机械工业出版社，2002.1
（模具手册之一）
ISBN 7-111-09719-X

Ⅰ.粉… Ⅱ.①印… ②张… Ⅲ.粉末冶金模具-设计-技术手册
Ⅳ.TF37—62

中国版本图书馆CIP数据核字（2001）第096009号

机械工业出版社（北京市百万庄大街22号 邮政编码100037）
责任编辑：刘彩英 版式设计：张世琴 责任校对：程俊巧 姚培新
封面设计：姚 毅 责任印制：路 琳
北京京丰印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行
2002年4月第2版·第1次印刷
787mm×1092mm 1/16·33.5印张·3插页·831千字
31 001—36 000册
定价：56.00元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换
本社购书热线电话（010）68993821、68326677-2527

第 2 版前言

《粉末冶金模具设计手册》第 1 版系原机械工业部组织编写的六本模具手册之一，由主编单位北京粉末冶金研究所倪明一及副主编单位上海粉末冶金厂张华诚、徐联华负责编写并最后审定。参加编写的人员还有（按姓氏笔划）：卞锦顺、冯国光、龙炳强、朱巧根、张颂钏、陈淑华、韩凤麟和蒋祖福。手册自 1978 年出版以来已历经 20 余年，对这个时期粉末冶金行业的发展，特别是对那些技术力量较薄弱的中、小型企业的作用是很显著的。在此，我们深切缅怀原手册主编倪明一教授，他为我国第一部粉末冶金专用技术手册的出版作出了不可磨灭的贡献。

近年来，粉末冶金行业迅猛发展，粉末冶金学科的基础理论日臻完善，新工艺、新技术不断涌现，我国较为系统、完整的粉末冶金行业标准体系已建立起来。随着我国改革开放，国内很多企业还引进了国外先进的粉末冶金设备，所用原料的品种和质量亦有很大的变化和提高，目前我国粉末冶金零件（不含硬质合金及磁性材料）生产产量已达 3 万 t，居亚洲第二位，产品应用领域已从以农机为主导产品转向汽车、摩托车、家用电器、电动工具及办公机械等行业。粉末冶金行业的整体技术水平和生产、设计能力有了很大提高。为满足行业发展的需要，出版社委托我们重新编写了这本手册。

手册第 2 版在继承第 1 版模具设计的系统性、实用性的原则上，对大部分技术内容进行了修改和增补，充分汲取了 20 余年来国内外粉末冶金零件成形的新技术，删除了第 1 版陈旧的内容，补充了粉末冶金零件材料的选择、国外最先进的新型粉末成形机及国内、外常见模架结构介绍；复杂形状零件的分类及其补偿装粉示例、模具结构方案示例；调整并增加了大量的成形及精整模具结构实例；充实了模具主要零件及辅助零件的设计内容；新增了模具材料选择及其制造、金属注射成形（MIM）技术简介、以及粉末冶金模具计算机辅助设计（CAD/CAM）技术简介，并通过对 5 种不同类型的粉末冶金零件的模具设计实例，以启迪查阅本手册模具设计的程序及数据和资料的方法。同时，还增添了与粉末冶金零件制造及模具设计相关的标准等附录。

本手册第 2 版由北京粉末冶金研究所印红羽和上海粉末冶金厂张华诚主编。手册第一章由印红羽、韩凤麟编写，第二、三章由印红羽编写，第四、五、六章由张华诚编写，第七、八、九章由张华诚、徐鸿昶编写，第十章由苏学宽、印红羽编写，第十一章由韩凤麟编写，第十二章由印红羽、贾成厂编写，第十三章由毕景维编写，附录由印红羽、张华诚和韩凤麟编写，全书最后由印红羽和张华诚统一审定。

由于我们水平有限，难免存在不足，惠请读者批评指正。

编者

目　录

第 2 版　前言

第一章　粉末冶金工艺及制品简介 …… 1

第一节　粉末冶金概述 …… 1

第二节　粉末冶金零件的制造工艺过程 …… 2

一、金属粉末 …… 2

二、传统粉末冶金零件制造工艺 …… 5

三、金属注射成形（MIM） …… 9

四、粉末锻造 …… 10

五、温压工艺 …… 12

六、传统粉末冶金工艺、金属注射成形和粉末锻造几种工艺之间的比较 …… 12

第三节　粉末冶金零件制造工艺与常见金属成形工艺的比较 …… 13

一、粉末冶金工艺和铸造工艺相比 …… 13

二、粉末冶金工艺和热模锻及板料冲裁工艺相比 …… 14

三、粉末冶金工艺和切削加工相比 …… 15

第二章　粉末冶金压坯设计 …… 17

第一节　粉末冶金制品的材料和密度的选择 …… 18

一、烧结金属含油轴承 …… 18

二、铁基结构零件材料（烧结钢和烧结不锈钢） …… 22

三、有色金属烧结材料 …… 32

四、磁性材料及电工合金 …… 36

五、金属注射成形（MIM）零件材料简介 …… 41

第二节　压坯密度分布 …… 43

一、压坯的密度分布 …… 43

二、压坯的壁厚与密度分布 …… 44

三、用凸凹状模冲成形压坯的密度分布 …… 45

第三节　粉末冶金压坯形状的确定 …… 45

一、压坯形状分类 …… 45

二、压坯形状设计 …… 46

三、对一些特殊形状设计的说明 …… 53

四、利用组合成形法简化压坯的复杂形状 …… 56

五、压坯尺寸限制 …… 58

六、金属注射成形（MIM）零件成形坯形状设计简介 …… 59

第四节　压坯尺寸精度和位置精度的确定 …… 63

一、压坯的尺寸精度 …… 63

二、压坯的位置精度 …… 65

三、烧结制品表面粗糙度 …… 66

四、烧结齿轮的尺寸精度、位置精度和表面粗糙度 …… 67

第三章　粉末冶金模具设计基本原理 …… 69

第一节　模架和模具的基本构造与动作 …… 69

一、模架和模具的基本构造 …… 69

二、模架和模具的基本动作 …… 69

第二节　压制过程和精整过程中力的分析 …… 70

一、压制压力 …… 70

二、侧压力和剩余侧压力 …… 71

三、脱模压力 …… 73

四、精整压力 …… 74

五、压力中心 …… 76

第三节　等高（无台阶面）压坯密度分布与压制方式的关系 …… 78

一、压坯密度分布规律 …… 78

二、无台阶面柱状实体类压坯的压制方式与密度分布 …… 80

三、带孔无台阶面柱体类压坯的压制方式与密度分布 …… 84

四、压制方式的选择 …… 89

第四节　不等高（轴向带台阶面）压坯成形模的设计原理 …… 92

一、粉末充填系数相同或相近 …… 92
二、压缩比相同或相近 …… 93
三、压制速率相同 …… 94
第五节 组合模具设计原理 …… 94
一、多台阶面压坯的组合模冲设计 …… 94
二、斜面压坯的组合模冲设计 …… 96
三、曲面压坯的组合模具设计 …… 97
四、斜齿轮压坯的压模设计 …… 98
第六节 粉末冶金模具尺寸设计原则 …… 99
一、决定模具尺寸的步骤 …… 99
二、模具变形量 …… 100
第四章 粉末成形设备及其模架 …… 103
第一节 粉末成形设备基本要求及选择依据 …… 103
一、基本要求 …… 103
二、选择依据 …… 104
第二节 粉末成形设备规格及技术参数 …… 106
一、国内常见粉末成形压机规格及技术参数 …… 106
二、国外常见的粉末成形压机规格及技术参数 …… 117
第三节 普通可倾式压力机（冲床）自动化改造 …… 124
一、凸轮机构 …… 124
二、拉杆（钩）机构 …… 130
三、送粉机构 …… 133
第四节 常见粉末冶金成形模架 …… 136
一、粉末成形模架基本类型 …… 136
二、普通压机用的成形模架 …… 137
三、专用粉末成形机用成形模架 …… 140
四、精整模架示例 …… 145
第五章 成形模具结构设计 …… 148
第一节 压坯形状分类及补偿装粉 …… 148
一、压坯形状分类 …… 149
二、补偿装粉 …… 151
第二节 成形模具结构方案 …… 155
一、成形模具结构基本方案 …… 155
二、特殊动作的成形模具结构方案 …… 163
第三节 成形模具主要零件连接方式 …… 166
一、阴模的连接 …… 166
二、上模冲的连接 …… 168
三、下模冲的连接 …… 169
四、芯棒的连接 …… 170
五、导柱与模板的连接 …… 171
第四节 浮动结构 …… 172
一、弹簧浮动 …… 172
二、气压浮动 …… 179
三、液压浮动 …… 182
第五节 辅助机构 …… 183
一、脱模复位结构 …… 183
二、调节装粉结构 …… 185
第六章 精整模具结构设计 …… 188
第一节 精整方式的选择 …… 188
第二节 精整模具结构基本方案示例 …… 190
第三节 送料机构 …… 194
一、装料机构（料斗） …… 194
二、贮料机构（料仓） …… 198
三、供料机构 …… 201
第七章 模具结构示例 …… 207
第一节 成形模具结构示例 …… 207
一、Ⅰ类零件压坯的成形模具 …… 207
二、Ⅱ类零件压坯的成形模具 …… 215
三、Ⅲ类零件压坯的成形模具 …… 225
四、Ⅳ类零件压坯的成形模具 …… 239
五、Ⅴ类零件压坯的成形模具 …… 247
六、特殊形状类零件压坯的成形模具 …… 253
第二节 精整模具结构示例 …… 273
一、通过式精整模具 …… 273
二、全精整式精整模 …… 275
第八章 模具零件的设计 …… 288
第一节 模具主要零件设计 …… 288
一、对模具主要零件的一般要求 …… 288
二、成形阴模的形式及技术要求 …… 289
三、成形芯棒形式及技术要求 …… 291
四、成形模冲和精整模冲形式及技术要求 …… 291
五、精整阴模形式及技术要求 …… 295
六、精整芯棒形式及技术要求 …… 297
第二节 辅助零件的设计 …… 298
一、辅助零件的结构形式和技术要求 …… 298
二、斜楔机构的形式及其设计 …… 304
三、模板形式及其计算 …… 313

高等教育出版社 www.hep.edu.cn

第三节　模具零件的通用化 …… 317
一、模板类零件 …… 317
二、导柱、导套类零件 …… 322
三、压盖、压垫类零件 …… 324
第九章　模具主要零件的尺寸计算 …… 327
第一节　尺寸计算方法 …… 327
一、径向尺寸的计算 …… 327
二、轴向尺寸的计算 …… 330
第二节　与模具设计有关的工艺参数 …… 332
一、金属粉末的松装密度及其影响因素 …… 332
二、压坯的回弹率及其影响因素 …… 333
三、烧结收缩率及其影响因素 …… 334
四、精整余量和回弹量及其影响因素 …… 335
五、复压装模间隙和压下率 …… 336
第三节　阴模与模套的强度和刚度计算 …… 337
一、强度计算 …… 337
二、刚性计算 …… 348
三、阴模壁厚推荐数据 …… 353
第四节　模具设计实例 …… 353
一、气门导管零件模具设计示例 …… 353
二、活塞零件模具设计示例 …… 357
三、齿轮零件模具设计示例 …… 360
四、连杆零件（无需精整）模具设计示例 …… 364
五、同步器齿毂零件的模具设计示例 …… 366
第十章　粉末冶金模具的材料选择和制造 …… 373
第一节　模具材料的选择和热处理 …… 373
一、模具制造的一般要求 …… 373
二、模具材料的选择 …… 374
三、模具材料的热处理 …… 376
第二节　模具主要零件制造 …… 378
一、模具主要零件的加工工艺流程 …… 378
二、模具主要零件加工的关键工艺 …… 378
三、模具零件的典型加工工艺举例 …… 386
第十一章　模具常见损伤和压坯缺陷分析 …… 393
第一节　模具常见损坏的原因和改进措施 …… 393
第二节　压坯裂纹的形成原因与对策 …… 398
一、粉末混合料中润滑剂含量对裂纹形成的影响 …… 398
二、模具设计、制造和安装对裂纹形成的影响 …… 398
三、在压制过程中可能产生的压坯裂纹与缺陷及对策 …… 399
第三节　粉末移送机构和模冲速度对压坯缺陷的影响 …… 405
一、粉末移送机构对压坯缺陷的影响 …… 405
二、模冲加压速度不当引发压坯中的裂纹 …… 407
三、拉下式压机模架系统的设计 …… 408
第十二章　粉末冶金模具计算机辅助设计/制造（CAD/CAM）技术简介 …… 411
第一节　CAD/CAM 技术简介 …… 411
一、CAD/CAM 基本概念 …… 411
二、CAD/CAM 系统硬件及软件 …… 413
第二节　粉末冶金模具 CAD/CAM 系统简介 …… 416
一、模具 CAD/CAM 系统的结构与功能 …… 416
二、粉末冶金产品图形输入 …… 418
三、根据产品工艺性进行压坯设计 …… 419
四、结合工艺方案的选择进行成形工艺参数计算 …… 419
五、压机的选择 …… 420
六、模具结构设计与优化 …… 421
七、装配图的生成 …… 422
八、图形的输出 …… 422
九、CAD/CAM 一体化 …… 422
第十三章　金属注射成形（MIM）模具设计简介 …… 423
第一节　金属注射成形模具设计 …… 424
一、金属注射料的特点 …… 424
二、金属注射成形模具的基本结构与形式 …… 425
三、模具设计 …… 427
第二节　带外侧凹制品的模具设计 …… 446

一、瓣合模…… 446
二、侧向抽芯模具…… 452
第三节 带内侧凹制品的模具设计 …… 453
第四节 金属注射成形模具的材料选择与设计实例 …… 457
一、金属注射成形模具的材料选择…… 457
二、金属注射成形模具设计实例…… 458
附录 …… 461
附录 A 粉末冶金结构零件常用原、辅材料的标准与规格 …… 461
一、铁粉…… 461
二、合金钢粉与不锈钢粉…… 463
三、铜粉…… 470
四、镍粉…… 472
五、石墨…… 473
六、润滑剂…… 473
七、精整用油及防锈油…… 474
附录 B 铁基结构材料密度孔隙对照表和压缩比计算表 …… 474
附录 C 粉末冶金含油轴承与结构零件的 ISO（国际标准化组织）技术标准介绍 …… 475
一、粉末冶金轴承材料［ISO 5755：2000（E）］ …… 477
二、用于粉末冶金结构零件的烧结铁、烧结碳钢和烧结铜钢［ISO 5755：2000（E）） …… 478
三、用于粉末冶金结构零件的烧结合金钢［ISO 5755：2000（E）］ …… 478
四、用于粉末冶金结构零件的铜熔渗烧结钢［ISO 5755：2000（E）］ …… 485
五、用于粉末冶金结构零件的烧结不锈钢［ISO 5755：2000（E）］…… 485
六、用于粉末冶金结构零件的烧结铜合金［ISO 5755：2000（E）］…… 487
附录 D 美国 MPIF 标准 35“粉末冶金结构零件材料标准”2000 年版介绍…… 487
一、烧结铁与烧结碳钢…… 487
二、烧结铁铜合金和烧结铜钢…… 488
三、烧结铁镍合金和烧结镍钢…… 490
四、烧结低合金钢…… 491
五、烧结硬化钢…… 493
六、扩散合金化钢…… 494
七、烧结渗铜铁和烧结渗铜钢…… 495
八、烧结不锈钢—300 系列合金 …… 496
九、烧结不锈钢—400 系列合金 …… 498
十、烧结黄铜、烧结青铜及烧结锌白铜…… 499
附录 E 模具制造常用工程数据与资料…… 500
一、常用模具材料技术标准…… 500
二、常用面积、体积的计算方法…… 508
三、表面粗糙度（GB1031—1995） …… 512
四、标准公差…… 519
参考文献 …… 528

第一章　粉末冶金工艺及制品简介

第一节　粉末冶金概述

粉末冶金既是制取金属材料的一种冶金方法，又是制造机械零件的一种加工方法。作为特殊的冶金工艺，可以制取用普通熔炼方法难以制取的特殊材料；作为少无切削工艺之一，可以制造各种精密的机械零件。

粉末冶金从制取金属粉末开始，将金属粉末与金属或非金属粉末（或纤维）混合，经过成形、烧结、制成粉末冶金制品——材料或零件。根据需要，对粉末冶金制品还可进行各种后续处理。如熔浸、二次压制、二次烧结和热处理、表面处理等工序。此外，当制造复杂形状零件时，可以采用金属注射成形（MIM）、温压工艺；当制造大型和特殊制品时，可以采用挤压成形、等静压制、热压制、电火花烧结；对于带材，还可以采用粉末轧制。

粉末冶金工艺之所以能够在机械制造、汽车、电器、航空等工业中获得广泛的应用，主要是基于这种工艺的如下特点：

1. 可制取多组元材料

可制取合金与假合金，发挥每种组元各自的特性，使材料具有良好的综合性能。由于各组元密度或熔点相差悬殊，用熔炼方法制取时，易产生偏析或低熔点组元大量挥发等问题，以至难以制成。粉末冶金采用混料方法，材料成分均匀，烧结温度低于熔炼温度，基体金属不熔化，防止了密度偏析。低熔点组元的液相，被均匀地吸附在多孔基体骨架内，不致大量流失，常见的多组元材料有：

（1）铁基、铜基结构零件材料　当选用较高的密度时，其力学性能与碳钢相当。

（2）摩擦材料　以金属组元作基体（如铁、铜），加入提高摩擦系数的非金属组元（如氧化铝、二氧化硅、铸石粉）以及抗咬合、提高耐磨性能的润滑组元（如铅、锡、石墨），制成有良好综合性能的摩擦材料，用作动力机械的离合器片和制动片。

（3）电工触头材料　将高熔点的组元作为耐电弧的基体（如钨、石墨），加入电导率高的组元（如铜、银），做成有良好综合性能的触头材料。用于电器开关中的触头。

（4）烧结铜铅减磨材料　用预合金铜铅粉或混合粉，经松装烧结到钢背上并轧制，或经压制成形并加压烧结扩散焊接到钢件上，制成双金属轴瓦、侧板和柱塞泵缸体，可显著减少材料中铅的偏析，提高材料的减磨性能。

（5）金刚石——金属工具　用金属粉末（如钴、镍、铜、铁、钨或碳化钨等）作为胎体，孕镶金刚石颗粒或粉末，做成各种金刚石工具。

（6）纤维增强复合材料　用金属纤维、碳纤维、单晶须等，与金属粉末混合后，经成形（压制或轧制）、烧结制成复合材料，使材料的强度及耐磨性显著提高。

2. 可制取多孔材料

熔炼材料通常是致密的，有时存在不可控制的气孔、缩孔，它们是材料的缺陷，无法利

用。而粉末冶金工艺制造的零件材料，基体粉末不熔化，粉末颗粒间的空隙可以留在材料中，且分布较均匀。通过控制粉末粒度和颗粒形状、成形压力及烧结工艺，可获得预定的孔隙大小及孔隙度的多孔材料。

(1) 过滤材料　利用预定孔径及孔隙度的多孔材料，过滤各种流体，根据过滤介质的要求，选用不同的金属粉末。常用的有青铜、不锈钢、镍、钛等多孔金属过滤元件。

(2) 热沉材料　利用材料空隙，从零件内部连续渗透冷却液体，或事先渗入低熔点金属，在高温工作条件下，渗入的液体或低熔点金属从零件表面蒸发，带走大量热量，以冷却高熔点基体材料制成的零件，这类材料可用作燃气轮机叶片、钨浸铜火箭喷管等。

(3) 减摩材料　利用孔隙浸渍润滑油、硫或聚四氟乙烯，做成有良好自润滑性能的材料，如含油轴承及金属塑料轴承、密封环、活塞环、导向环等。

此外，利用孔隙还可制成减振、消声、绝热、阻焰、催化等材料。

3. 可制取硬质合金和难熔金属材料

钨、钼、钽、铌、锆、钛及其碳化物、氮化物等材料的熔点一般在 1800℃ 以上，用熔炼方法，会遇到熔化和制备炉衬材料困难，用粉末冶金工艺，可利用压坯自身电阻加热，在真空或保护气氛中烧结，避免了制备耐高温炉衬材料的困难。因此，粉末冶金工艺是制取难熔金属及合金的最佳方法。

(1) 硬质合金　用高熔点、高硬度的钨、钛、钽、铌的碳化物为基体，用钴、镍、铁等作粘结相，做成各种牌号的硬质合金，用作刀具、模具、凿岩工具及耐磨零件等。

(2) 难熔金属材料、钨、钼材料可做电热元件，极板及耐高温材料。利用钨的高密度，可做自动手表中的摆锤、手机中的振子等高密度制品。利用钽的大电容量，可做成体积小、电熔量大的电熔器。

4. 是一种精密的少、无切削加工方法

用粉末冶金方法来制造机械零件，在材料性能符合使用要求的同时，制品的形状和尺寸已达到或接近最终成品的要求，无需或只需少量切削加工。与切削加工工艺相比，粉末冶金工艺优点是：

(1) 生产效率高　一台粉末冶金专用压机，班产量通常为 1000～10000 件。

(2) 材料利用率高　通常材料利用率在 90％以上。

(3) 节约有色金属　在减摩材料领域里，相当多的情况下，多孔铁可取代青铜及巴氏合金。

(4) 节省机床　节约切削加工机床及其占地面积。

第二节　粉末冶金零件的制造工艺过程

粉末冶金是一门制造金属粉末和以金属粉末(包括配入非金属粉末者)为原料，用成形-烧结法制造材料与制品的技术，广义而言，它也包括以氧化物、氮化物、碳化物等非金属化合物粉末为原料，用成形-烧结法制造材料和制品的技术。

一、金 属 粉 末

金属粉末的生产方法分为物理化学法和机械法两大类。

物理化学法是借助物理的或化学的作用，改变原材料的聚集状态或成分而制得粉末。机

械法是利用机械外力（固体、液体或气体的力）将原材料（固体或溶液）粉碎成粉末，其成分基本不发生变化。有时为改善粉末性能或因生产上的需要，将两种方法结合起来应用，如用电解法制得某些脆性金属沉积物，或用氢化法处理获得的金属（或合金）氢化物，然后再用机械法粉碎。

金属粉末是粉末冶金的原料，其性能和制造过程与粉末冶金制品的性能密切相关。因此，严格控制金属粉末的性能是十分重要的。

应该注意到，即使同一种粉末，制造方法不同时，其性能也不一样（见表 1-1）。一般来说，对金属粉末制造的基本要求是粉末性能适合于粉末冶金生产要求、质量稳定及均匀、价格便宜。

表 1-1　常用金属粉末的制造方法及其特点

制造方法	原材料	粉末种类	主要金属含量（质量分数%）	颗粒形状	粒度/（μm）	应用范围
气体还原	氧化物、矿石、有机化合物（如草酸盐）	W、Mo、Fe、Ni、Co、Cu	97.5～98.5	多角状、针状、复杂形状的凝集体	0.1～10	硬质合金、灯丝、触头、复合材料、永磁合金及其他
固体碳还原	氧化物、矿石	Fe	97.5～98.5	多角状	20～400	机械零件等
水溶液电解	Fe、Cu、Pb、Sn 等的盐类	Fe、Cu、Pb、Sn	99～99.5	树枝状、针状	0.1～30	轴承、硬磁合金、电刷、高密度零件
涡旋研磨	脆性合金及延性金属的丝、小块及切屑	Fe、Ni、Fe-Ni、Co、Cu、Al、Ag、Fe-Al-Ti 等	与原材料相同	皿状	20～400	含油轴承、弹带、磁芯、硬磁合金、电刷、机械零件等
用水蒸汽与空气雾化法	延性金属及合金的溶液	Al、Fe、Cu	96～98	带球形的飞散状	20～400	机械零件、多孔性制品、电刷、复合材料、磁芯等
用空气、水和同时进行机械粉碎的雾化法	延性金属及合金的溶液	Fe、Ni、Cu、Al、Ag、青铜、黄铜、不锈钢等				
羰基法	金属羰基化合物	Ni、Fe	99.5～99.7	球状	0.1～5	永磁合金、磁芯、高纯度合金等

粉末的性能大体可分为五类：

（1）几何尺寸　颗粒形状、粒度、粒度分布及比表面。

（2）物理性能　颗粒密度、颗粒内孔隙、显微组织、硬度、加工硬化性、塑性变形能、表面状态及表面张力等。

（3）力学性能　松装密度、振实密度、流动性、压制性及成形性等。

（4）化学性能　纯度、可还原氧及氢中失重等。

(5) 特殊性能　电磁性能、摩擦特性、导热性、耐热性、抗氧化性及耐腐蚀性等。

对粉末冶金机械零件来说，对粉末要求的主要性能是颗粒形状、粒度、粒度分布、松装密度、压制性、成形性、流动性及化学成分等。

1. 颗粒形状

粉末颗粒形状因粉末的制造方法而异，有不规则状、片状、多面体状、皿状、树枝状、粒状、球状、滴状及纤维状等。颗粒形状对松装密度、流动性、成形及烧结性等都有影响，是粉末的主要性能之一。

球形颗粒难以搭桥，故流动性好，松装密度大，但可充填空隙小，成形性差。树枝状及不规则形的颗粒，由于比表面大，故成形性好，利于烧结，但流动性差，松装密度小。片状颗粒成形性和烧结性能均差，不宜用于制造粉末冶金结构零件。

2. 粒度

粉末冶金所用的金属粉末，其颗粒大小约为 0.1～500μm。很多颗粒是由许多更小的颗粒堆集而成的。这种更小的颗粒叫做一次颗粒。因此，我们常说的颗粒是指一次颗粒的集合体。

颗粒大小通常用平均直径来表示。粒度测定方法较多，最简便的是广泛应用的筛分法。

3. 粒度分布

充填粉末时，颗粒间空隙越少，压坯强度越好，同时也越容易烧结。适当地选择粒度分布可减少孔隙。

一般说来，粒度分布范围宽的粉末，松装密度高，成形性和烧结性好，零件的力学性能也好。粉末中细粉含量高时，可提高压坯棱角的强度，并改进烧结性，但是减低松装密度，使压制性变坏。

4. 松装密度与振实密度

按规定的方法，使粉末轻轻地流入一容器，流满后刮平，求得单位体积的粉重，叫做粉末的松装密度。由于粉末在轻轻流入容器时，颗粒间由于摩擦而形成拱桥现象，因此，若施以振动，则拱桥崩散，细粉充填于粗粉颗粒间，粉末所占的体积减小，这时粉末单位体积的重量叫做振实密度。

粉末的松装密度对模具设计有直接的关系，特别在自动压制时，采用容积法装粉，松装密度的变化直接影响压件重量。就同一制品来说，粉末松装密度越大，阴模高度可设计得越小。

5. 流动性

这是指粉末流经倾斜面的速度。通常以 50g 粉末，从圆锥角为 60°和出口孔径为 2.5mm 的流速漏斗中流出的时间来表示。流出的时间越短，即粉末流动性越好。

粉末的种类、粒度与粒度分布、颗粒形状、松装密度、吸收的流体（水或油）和气体，以及颗粒的移动方法等，都与流动性有很大的关系。此外，磁性对铁磁性粉末的流动性也有影响。

无论是为了压坯密度均匀，还是为了自动压制快速装粉，都需要粉末有良好的流动性。一般来说，细粉的流动性差，为此，可适当加入粘结剂，将细粉粘结成较大的球形颗粒，以改善粉末的流动性。

6. 压缩性与成形性

需要全本请访问 www.ertongbook.com

压缩性是指粉末在一定单位压力下，可压缩的程度，以压坯密度表示。相同的单位压力下，密度越高，表明粉末的压缩性越好。

成形性是指粉末压坯强度的高低。在相同单位压力下，或在相同密度情况下，用压坯抗弯强度的大小来表示粉末的成形性。

粉末的压缩性和成形性统称为压制性。压制性与粉末的粒度、粒度分布、颗粒形状、表面状态，以及塑性有关，粉末中添加少量的石蜡、硬脂酸锌，以及其他润滑剂和掺入塑性好的粉末，可改善粉末的成形性。

7．杂质与含氧量

粉末中的杂质，因制造方法而异。羰基粉末和电解粉末的杂质含量最少，还原粉末中的氧化物（包括酸不溶物）较多，雾化粉末根据不同的工艺，颗粒表面含有不同程度的氧化物。

粉末中含有的固体杂质，大体可分为四类：

（1）无关杂质颗粒　主要来源于原料。例如，由矿石制成的粉末中，往往残留 SiO_2、Al_2O_3、MgO 等。

（2）粉末颗粒内伴生的杂质　如 Fe 中的 Mn，Cu 中的 Pb，Co 中的 Ni 等。

（3）颗粒表面的杂质　如表面的氧化物。

（4）颗粒内呈化合物或固溶状态的杂质。

这些杂质，固然有有益的，如铁粉中的 Mn，但尤应注意有害的，如 SiO_2、Al_2O_3 等杂质，质量分数即使仅 1%，都将是有害的。因这些氧化物坚硬，既会擦伤压模的模壁，又对制品性能不利，固溶性杂质，将使粉粒变硬，有碍于粉末的压制性，并且影响电磁制品的性能。颗粒表面的氧化物，对粉末的压制性不利，并且是含碳合金烧结时脱碳的重要原因之一。

二、传统粉末冶金零件制造工艺

传统粉末冶金工艺的生产工序和烧结后的后续加工工序示于图 1-1。首先，将配制的高纯度的混合粉或合金粉装于模具中，于一定压力下压制成形，随即将之从模具中脱出，然后将压坯于有保护气氛的烧结炉中，在低于基体材料熔点的温度下进行烧结（加热），以使粉末颗粒之间形成冶金结合。

1．粉料的混合（或制备）

包括金属粉末的制取，粉料（金属粉末及填加剂等）的混合及其他预处理，如掺加成形剂、增塑剂、制粒、烘干、过筛等。

粉末混合可分为干式、半干式和湿式。干式用于各组元粉末密度相近和均匀性要求不高的情况，半干式即在粉料中加入少量（体积分数约 0.1%～0.5%）的液体（如机油）减轻粉料密度偏析，湿式是在粉料中加入大量易发挥的液体（如汽油、酒精），并伴以球磨（滚动或振动），这样不仅混合均匀，而且增加组元间的粉粒接触面，改善烧结性能。

粉料的其他处理有：为改善粉末的成形性和可塑性，在粉料中加汽油橡胶溶液或石蜡等增塑剂；为改善粉料的流动性，对细粉末进行制粒处理；湿粉烘干并回收液体；混合体的过筛等。

2．成形

成形是使粉料成为具有一定形状、尺寸和密度的型坯，成形方法见表 1-2。

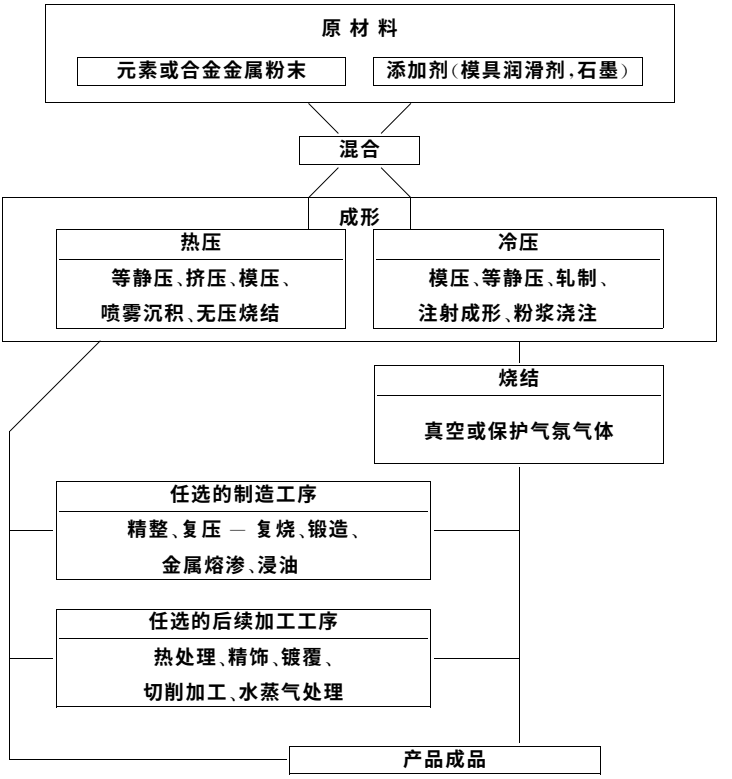


图 1-1　传统粉末冶金工艺流程

表 1-2　金属粉末成形方法

成形方法		简　要　说　明	应　用　举　例
常温加压	钢模压	粉末在刚性封闭模中,通过模冲对粉末加压成形。压坯密度较高,生产效率高。不宜压制过大、过长、过薄、锥形及难以脱模的制品	铁基、铜基、不锈钢及硬质合金等中小柱状类制品。宜大批生产
	弹性模压	粉末置于弹性模(用塑料或橡胶)型腔中,弹性模放在刚性模中,模冲压力通过弹性模将粉末压实成形	成形单位压力较小的硬质合金锥、球等制品
	挤压	将拌以润滑剂的粉末放入挤压筒内,通过压柱对粉末加压,粉料被压出挤压嘴成形	各种截面的条、棒或麻花钻类螺旋条棒
	液等静压	粉末放入弹性(用塑料或橡胶)包套中,包套放入等静压机的高压容器内,通过高压液体压实套内粉末	各种棒材、管材及其他大型制品
	粉末轧制	将粉末送入两个相对转动的轧辊之间,靠摩擦力将粉末连续咬入辊缝压实成带(片)材	多孔、摩擦、硬质合金、复合材料等带材
	爆炸成形	将粉末放在塑料包套内,包套放入高压容器中,引爆炸药,产生高压冲击波,通过容器中的水,将包套内的粉末压实成形	成形性很差的各种粉末的棒材、管材
加温加压	温压	将混合粉末加入特种润滑剂和填加剂后,把原料粉末和模具加热到 130～150℃ 范围内成形	主要用于成形复杂形状的机械零件

（续）

成形方法		简 要 说 明	应 用 举 例
加温加压	热压	粉末或预制坯放在模具中，经传导、自身电阻或感应等方式加热，在低于基体熔点下加压，用小压力可获得致密制品。模具材料有石墨、陶瓷、高镍铬合金及高速钢等	硬质合金、金属陶瓷、金刚石工具等制品
	热锻	将粉末预制坯加热，放入锻模中进行无飞边锻造，获得致密并接近成品要求的零件	铁基高强度齿轮、链轮、连杆等结构件
	热挤压	将粉末装入金属包套内，抽真空后封口。包套及粉末加热后，在模壁有润滑剂的挤压模内挤压成材	钢结硬质合金及粉末高速钢的型材
	热等静压	将粉末装入金属包套内，抽真空后封口，粉末被压机内高温高压气体压实	硬质合金、粉末高速钢等大型制品
无压成形	松装烧结成形	粉末装入模具中振实，连同模具一起放入炉内烧结，使粉末成形	多孔过滤元件及多孔浸渍材料
	松装烧结成形	芯板放在模腔下，模腔中装满粉末刮平，取出模具，芯板连同一层均匀松装粉末入炉烧结，使粉末成形，并牢固的焊接在芯板上，经复压或轧制，达到所需的密度	摩擦片及同铅轴瓦等双金属材料
	粉浆浇注	粉末与加有粘结剂的水调成粉浆，注入石膏模内，干燥后使粉末成形	高合金、精细陶瓷等形状复杂制品
	冷冻浇注	将加有水的粉末，注入金属模内，冷冻后成形，埋入细填料中，经干燥后烧结成零件	高合金、精细陶瓷等形状复杂零件
	无压浸渍	将基体粉末装入石墨模中，注入可浸润或可形成化合物、固溶体的熔融金属，利用毛细现象进入孔隙，冷却后使粉末成形	金属陶瓷材料

3．**烧结**

烧结时，粉末颗粒间发生还原、扩散、熔焊、化合、溶解和再结晶等物理化学过程，使粉末制品获得所需要的各种性能。

常用的烧结方式见表 1-3。

4．**后处理**

烧结后，可根据需要进行一系列的后续处理见表 1-4。

表 1-3 常用的烧结方式

烧结方式		简 要 说 明	应 用 举 例
按防氧化条件分类	填料保护烧结	用碳（石墨、木炭、焦炭）、氧化铝、石英砂等作填料，工件埋入其中烧结	无保护气体时烧结铁、铜基制品
	气体保护烧结	用还原性的氢、一氧化碳、分解氨及高纯度氮等气体保护工件下烧结	铁、铜、不锈钢、硬质合金等制品
	真空烧结	用真空条件，防止工件氧化	硬质合金、不锈钢、铝、钛等易氧化制品

（续）

烧结方式		简 要 说 明	应 用 举 例
按烧结方式分类	连续烧结	工件依次连续通过炉子的预热带、保温带及冷却带，完成烧结过程，热利用率及生产率高	大批量生产时用，通常用保护气体，亦可真空
	间歇烧结	工件随炉升温、保温和降温，完成烧结过程	小批生产或试验时用
	半连续烧结	工件装入容器中，在热炉中升温、保温、炉外冷却	摩擦片生产
特殊烧结方式	加压烧结	烧结时对工件加压，以提高制品密度，防止变形，使工件与钢背粘结牢固	摩擦片、双金属减摩材料
	浸渗烧结	工件端部（上或下）放置低熔点金属片（或块），烧结时，低熔点金属熔化并渗入多孔骨架中	铜钨、铁铜等合金的致密零件
	电阻烧结	工件自身作为电热体，利用自身电阻发热烧结	钨、钼等难熔金属
	活化烧结	用物理方法（振动、循环温度）或化学方法（加卤族化合物、预氧化、加低熔点组元、用氢化钛保护）加快烧结过程，改善产品质量	铁、铜、不锈钢、金刚石工具等
	电火花烧结	粉末体通过直流电流及脉冲电流，使粉末间产生电弧进行烧结，同时逐渐加压	双金属、摩擦片、金刚石工具、钛合金

表 1-4 后 处 理

处理方法		简 要 说 明	应 用 举 例
压力加工	精整	工件在精整模中受压，校正烧结变形，提高产品精度，减小表面粗糙度	铁、铜基制品
	复压	工件在复压模中受压，可提高密度 5%～20%	铁、铜、不锈钢制品
	精压（整形）	工件在精压模中受压，改变工件形状，并提高密度	需改变形状的塑性零件
	滚挤压	工件受滚轮或标准齿轮对滚挤压，提高齿轮或工件的尺寸精度、密度	齿轮、球面轴承、钨钼管
浸渗	浸油	多孔零件的孔隙吸入润滑油，改善自润滑性能并防锈	铁、铜基减摩零件
	浸塑料	多孔零件的孔隙吸入聚四氟乙烯分散液，经热固化后，实现无油润滑	金属塑料减摩零件
	浸硫	多孔零件的孔隙吸入熔融硫，起润滑及封孔的作用	减摩件、需封孔的结构件
	浸熔融金属	多孔零件的孔隙吸入熔融金属，以提高强度及耐磨性	铁基零件浸铜或铅
热处理	整体淬火	需在保护气氛下加热，孔隙的存在可减小内应力，一般可不回火，其余工艺参数与致密材料相近	不受冲击而要求耐磨的铁基零件
	表面淬火	通常用感应加热，工艺与致密材料相近	要求外硬内韧的铁基零件
	渗碳淬火	碳易由孔隙渗透，应根据孔隙度大小，适当减少渗碳时间；或经硫化封孔后再渗碳，其余工艺要求同致密材料	要求外硬内韧的低碳铁基零件
	碳氮共渗	经硫化封孔或高密度工件，用一氧化碳和分解氨为介质，在较高温度进行碳氮共渗，比单纯渗碳硬度高，速率快	要求外硬内韧的低碳铁基零件

（续）

处理方法		简 要 说 明	应 用 举 例
热处理	渗硼	将铁基件浸入熔融脱水硼砂与氟化钠中 2～2.5h、渗层达 0.8～1mm，浸毕于 10%氢氧化钠水溶液中洗净	要求提高表面硬度，耐磨，堵塞孔隙并能防锈的铁基零件
	硫化处理	经浸硫的工件，在氢气保护下，于 720℃ 保温 0.5～1h 生成硫化铁的润滑组元	铁基减摩材料
表面处理	蒸汽处理	铁基零件在 550～600℃ 温度下，通入过热蒸汽，使工件及孔隙表面生成坚固的氧化膜	要求防锈、耐磨及封孔以防高压渗漏的铁基零件
	电镀	经封孔并表面净化（喷砂）后的工件，按传统工艺电镀	表面防锈、美观及耐磨的零件
	渗锌	将工件埋入锌与氧化铝混合添料中，在 400～420℃ 下渗 1～2h。若工件与填料在旋转筒中加热渗锌，工件表面质量更佳	表面防锈的仪表零件、锁芯等铁基零件
机械加工	切销加工	粉末冶金材料均可磨削及电加工。除硬质合金等超硬材料外，大多粉末冶金材料可进行车、铣、刨、钻等加工	铁、铜、镍、铝、钨、钼等制品均可切削加工，为提高精度和改变形状时用
	锻压	钨钼镍可压延锻打，钢结硬质合金可热自由锻，锻后均需退火	需改变致密材料形状时使用
	焊接	铁基材料可对焊，不锈钢、钛合金用氩弧焊，硬质合金用铜焊，金刚石工具用银焊，铜基件用锡焊	粉末冶金材料与致密材料需要连接时用

三、金属注射成形（MIM）

金属注射成形与传统粉末冶金成形工艺相比，可以制造形状更为复杂的零件，从而扩大了粉末冶金工艺制造复杂形状零件的能力。金属注射成形工艺是将金属粉末与粘结剂的混合料注射到模腔内，所用的粉末与粘结剂都是为这种工艺专门配制的。该工艺和塑料注射成形与金属高压压铸很相似，可制造的零件形状和特点也大体上相同。成形与脱粘（排除粘结剂）后，将零件成形坯进行烧结，以获得接近铸造状态的材料性能。金属注射成形的工艺流程示于图 1-2。

金属注射成形零件材料的孔隙度很低，其材料的密度大于 96%理论密度，材料的力学性能与成分类似的精铸件相同。表 1-5 列出了金属注射成形零件烧结态的力学性能。

金属注射成形工艺的生产费用虽然比传统粉末冶金工艺高，但用这种工艺可制造较小的、形状很复杂的制品。如果这些零件用其它任何金属成形工艺制造，都需要大量的精切削加工或组装作业。

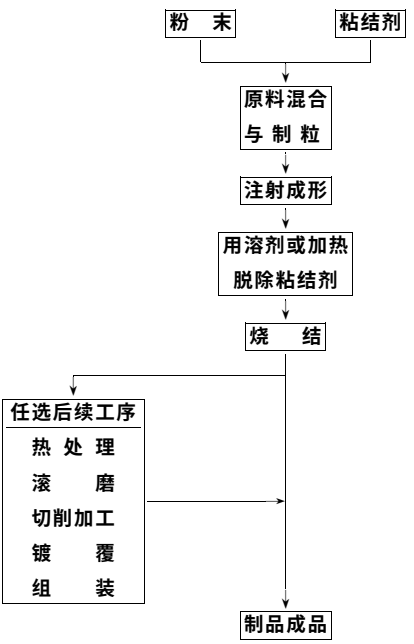


图 1-2 金属注射成形的工艺流程

表 1-5　金属注射成形零件材料的性能

合　金		奥氏体不锈钢 316L		时效处理不锈钢 17-4PH①		镍基高温合金 In-100①		低膨胀钢 Invar 36①②		高磁导率合金 Hy-Mu 80①		硅　钢 Fe-2.5Si	
特　性	单　位	Me③④ I-18 MIM Bar		Mil-MIM Hdbk H1000 H1000		Me 2-40 MIM Cast		ASTM MIM A658		Me 2-35 MIM 80Ni		MIM	
密度	g/cm^3	7.95	8.03	7.63	7.79	7.70	7.75	7.91	8.14	8.38	8.74	7.50	7.65
抗拉强度	MPa	690	552	1.034	1.089	1.083	1.014	552	552	524	545	310	338
屈服强度	MPa	310	207	965	1.013	903	848	255	241		152		
伸长率	%	56	60	12	11	12	9	29	30	37	64		
硬度	Rs	99	79						80		62	70	
热膨胀系数	$10^{-6}/℃$							0.33	1.26				13.24
饱和磁化	T									0.78	0.78		2.06
	G									7.800	7.800		20.600
矫顽力	A/cm									0.10	0.016		0.56
	Oe									0.13	0.02		0.70
最大磁导率	Wb/A·cm									>3.02	12.56	0.427	0.484
		耐蚀，可焊接		用于制作航空航天、船舶零件		用于制作透平叶片				用于制作磁屏蔽、变压器铁心等		用于制作转子、继电器等	

① 仅能由粉末冶金工艺制作。

② 有 Allog　42。

③ Materials Eng. 1984. Mat. Selector-Dec. 1983。

④ 左侧之值是注射成形材料。

四、粉末锻造

粉末锻造是将预成形坯装在闭合模具中热锻成最终形状，而预成形坯是用传统粉末冶金工艺制作的。粉末锻造材料中已不存在微小孔隙，因此，粉末锻造材料的韧性、冲击能量及疲劳强度都比传统粉末冶金材料高得多。预成形坯的材料重量接近于成品零件的重量，粉末锻造零件实际上没有飞边，并具有精密的尺寸公差。图 1-3 为最常用的粉末锻造工艺流程。

粉末锻造零件的力学性能取决于其制造工艺参数、材料的化学成分和显微组织（相应的热处理工艺）。表 1-6 列出了几种粉末锻造铁基结构零件材料的典型力学性能。

www.ertongbook.com