

铁基粉末冶金 结构零件

制造·设计·应用

TIEJI FENMO YEJIN JIEGOU LINGJIAN
ZHIZAO SHEJI YINGYONG

韩凤麟 编著



化学工业出版社

铁基粉末冶金 结构零件

制造·设计·应用

韩凤麟 编著



化学工业出版社

·北京·

图书在版编目 (CIP) 数据

铁基粉末冶金结构零件: 制造·设计·应用/韩凤麟
编著. —北京: 化学工业出版社, 2014. 11
ISBN 978-7-122-21619-9

I. ①铁… II. ①韩… III. ①粉末冶金铁基结构零
件 IV. ①TF125.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 189504 号

责任编辑: 黄 滢
责任校对: 王素芹

文字编辑: 冯国庆
装帧设计: 王晓宇

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)
印 刷: 北京永鑫印刷有限责任公司
装 订: 三河市宇新装订厂
787mm×1092mm 1/16 印张 15¼ 字数 391 千字 2015 年 1 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899
网 址: <http://www.cip.com.cn>
凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 88.00 元

版权所有 违者必究

前言

Foreword

结构零件是一类用于制造各种机械设备的重要零件，这类零件都是由钢铁材料，用切削加工制成。20 世纪 50 年代粉末冶金出现后，发现用粉末冶金工艺，以铁粉为基本原料制造结构零件，省工、省料，经济效益好，但是，鉴于当时生产的零件，力学性能低，只能用于电风扇、缝纫机之类的轻负荷零件。因此，早期铁基粉末冶金结构零件的主要应用市场是传统的家电产品。之后，随着粉末冶金技术的改进和材料性能的提高，铁基粉末冶金结构零件的应用领域日益扩大，相继依序进入了自动化办公设备、摩托车、农业机械、医疗与牙科用品、兵工、汽车零件等的应用市场。进入 20 世纪 80 年代以后，鉴于汽车的产量大、发展快，逐渐成为了铁基结构零件的主要应用市场。现在，生产的铁基粉末结构零件中，90% 左右是供给汽车市场的。可是，我国的情况有所不同，由于种种原因，虽然 2013 年我国汽车的产销量分别达到了 2211 万辆与 2198 万辆，但是，其中用的粉末冶金结构零件，却大部分是由在中国的独资或合资外企供应的。因此，对我国的粉末冶金零件企业来讲，除了生产汽车零件之外，还应积极开发一些非汽车领域的市场。现在，中国的这些市场都已发展到了相当大的规模，诸如，中国 2011 年生产的摩托车为 2700.52 万辆、拖拉机为 283.7 万辆、单缸柴油机为 800 万台、电冰箱为 8699 万台、家用洗衣机为 6607 万台、缝纫机为 1709 万架、电风扇为 1.706 万台等。这些机电产品都是传统的铁基粉末冶金结构零件应用市场，不但容易开发，而且经济效益巨大。为此，这本书重点介绍了近 50 年来，北美、日本等先进工业化国家与地区在这些方面积累的经验，供国内相关单位与企业参考。本书将重点介绍以下六个方面的应用：

- ① 摩托车制造中使用的粉末冶金零件；
- ② 粉末冶金零件在兵器制造中的应用；
- ③ 日用电器与机具中用的粉末冶金零件；
- ④ 粉末冶金零件在农业机械、草地及园艺机械中的应用；
- ⑤ 粉末冶金零件在液压系统中的应用；
- ⑥ 粉末冶金在医疗与牙科中的应用。

若能在这些产品中大量推广应用粉末冶金零件，利国利民，其经济效益是十分巨大的。

本书可供相关部门、有关企业和粉末冶金零件生产厂家设计、生产、管理人员参考，也可作为相关科研人员与理工院校有关专业师生的参考书。

由于编著者水平有限，书中不足之处在所难免，请广大读者批评指正。

编著者

第 1 章 铁基粉末冶金结构零件材料生产概要	1
1.1 概述	1
1.2 铁的特性	2
1.2.1 结晶学	2
1.2.2 晶体缺陷	3
1.3 铁基粉末冶金结构零件生产用预混合粉材料	4
1.3.1 铁基粉末冶金结构零件生产用的铁粉	5
1.3.2 粉末冶金结构零件材料的合金化	5
1.4 结束语	9
第 2 章 铁基粉末冶金结构零件制造工艺	10
2.1 铁基粉末冶金结构零件制造工艺	11
2.2 铁基结构零件制造工艺的比较与选择准则	14
2.2.1 粉末冶金和铸造相比较	14
2.2.2 粉末冶金工艺和热模锻及板料冲裁工艺相比较	16
2.2.3 粉末冶金工艺和切削加工相比较	17
2.3 铁基粉末冶金结构零件的技术-经济特点	18
第 3 章 粉末冶金铁基结构零件设计	21
3.1 粉末冶金结构零件设计	22
3.1.1 粉末冶金结构零件的大小与形状	22
3.1.2 粉末冶金结构零件设计的限制	23
3.1.3 齿轮、棘轮及凸轮	27
3.1.4 尺寸公差	28
3.2 粉末冶金结构零件的切削加工	29
3.3 粉末冶金零件材料密度的影响	29
3.4 热膨胀系数与断裂韧度	30
3.4.1 热膨胀系数	30
3.4.2 断裂韧度	30
3.5 化学组成与力学性能	31
3.5.1 烧结碳钢	31
3.5.2 烧结铜铁合金与烧结铜钢	31

3.5.3	烧结镍铁合金与烧结镍钢	32
3.5.4	粉末冶金铁基零件的热处理	32
3.5.5	铜熔渗处理的烧结铁与烧结钢	34
3.5.6	由预合金化低合金钢粉制作的结构零件	34
3.5.7	烧结不锈钢结构零件	34
3.6	常用粉末冶金铁基结构零件材料的技术规范	35
3.6.1	编写技术规范的方法	35
3.6.2	关于粉末冶金铁基结构零件材料的化学成分与力学性能标准	36
第 4 章	粉末冶金结构零件在汽车制造中的应用	44
4.1	概述	44
4.2	常规粉末冶金结构零件在汽车中应用的进展	46
4.2.1	粉末冶金零件的固有优势	47
4.2.2	常规粉末冶金零件应用进展	48
4.3	手动变速器同步器系统的粉末冶金零件	53
4.3.1	粉末冶金同步器齿毂	54
4.3.2	粉末冶金同步器锁环	54
4.3.3	粉末冶金滑动齿套	56
4.3.4	粉末冶金齿轮	57
4.3.5	结论	58
第 5 章	摩托车制造中用的粉末冶金零件	60
5.1	我国摩托车制造中用的粉末冶金零件	60
5.2	日本生产的摩托车中的粉末冶金零件	64
5.3	用粉末冶金工艺生产摩托车零件的技术经济效果	68
5.4	结束语	71
第 6 章	粉末冶金零件在兵器产业中的应用	72
6.1	钛基粉末冶金零件	72
6.2	铁基粉末冶金零件	75
6.2.1	弹带	76
6.2.2	迫击炮弹弹体	77
6.2.3	机枪加速器	78
6.2.4	导弹的导向舵	80
6.3	动能穿甲弹	81
6.3.1	制造工艺	82
6.3.2	杀伤弹	85
6.4	军用车辆中的粉末冶金齿轮	85
6.5	用 MIM 工艺生产的兵器零件	87
6.5.1	电子封装	87
6.5.2	步枪后夜视装置	87
6.5.3	步枪的夹箍	88

6.5.4	枪产业的安全杆	88
6.5.5	导弹弹头安全装置中的转子	88
第 7	章 家用电器与机具中的粉末冶金零件	89
7.1	家用电器中的粉末冶金零件	89
7.1.1	自动洗衣机中的粉末冶金零件	89
7.1.2	电扇中的粉末冶金零件	91
7.1.3	小型制冷压缩机中的粉末冶金零件	92
7.2	电动工具中的粉末冶金零件	95
7.2.1	手电钻	97
7.2.2	线锯	98
7.2.3	修枝剪	100
7.2.4	冲击螺丝刀	101
7.2.5	冲击锤	101
7.2.6	气动马达	102
7.2.7	小结	102
7.3	缝纫机中的粉末冶金零件	102
7.3.1	引言	102
7.3.2	台湾粉末冶金零件市场的启示	103
7.3.3	缝纫机中的粉末冶金零件	103
7.3.4	充分利用粉末冶金技术特点, 获取最大经济效益	104
7.3.5	典型零件	105
第 8	章 粉末冶金零件在农业机械、草地及园艺机械中的应用	115
8.1	农业机械中使用的粉末冶金零件	115
8.1.1	拖拉机	115
8.1.2	摘棉机	117
8.1.3	播种机	118
8.1.4	谷物条播机	119
8.1.5	联合收割机	121
8.2	草地与园艺机械中的粉末冶金零件	122
8.2.1	Deere & Co 生产的草地与园艺拖拉机中使用的粉末冶金零件	122
8.2.2	粉末冶金零件在 Amsted Industries, Inc. 的 Burgess-Norton Mfg. Co. Div. 生产的 园艺机械中的应用	125
8.2.3	割草机用粉末冶金零件的进展	128
第 9	章 粉末冶金零件在液压系统中的应用	131
9.1	齿轮泵	133
9.1.1	概况	133
9.1.2	创新	134
9.1.3	使用的粉末冶金零件实例	138
9.2	转子泵	142

9.2.1 日本三菱材料公司开发的一种新齿形高效油泵转子	142
9.2.2 转子泵的改进与创新	145
9.2.3 粉末冶金零件使用实例	147
9.3 月牙形齿轮泵	150
9.4 直列活塞泵	151
9.5 阀门与阀板	152
9.5.1 阀板	152
9.5.2 阀体总成	153
9.5.3 压缩机阀板	154
9.6 叶片泵	154
9.6.1 侧板	155
9.6.2 凸轮环	156
9.7 扭矩马达	157
9.8 结束语	157
第 10 章 粉末冶金在医疗与牙科中的应用	158
10.1 多孔性矫形植入物	159
10.1.1 粉末	160
10.1.2 生产工艺	160
10.1.3 力学性能	161
10.1.4 耐腐蚀性	162
10.2 用骨质向内生长固定植入物的多孔性涂层	162
10.3 牙科用汞齐合金	164
10.3.1 粉末	164
10.3.2 力学性能与粉末变量	164
10.4 通过长久固定植入物的多孔性涂层	165
10.5 金属注射成形零件在医疗与牙科中的应用	166
10.5.1 腹腔镜外科手术剪刀	167
10.5.2 Metzebaum 内窥镜剪刀	167
10.5.3 针推进器与末端吊钩	168
10.5.4 腹腔镜夹爪	168
10.5.5 缝合夹爪	169
10.5.6 静脉注射泵活门	169
10.5.7 活体组织检查仪	170
10.5.8 伞齿轮	170
10.5.9 口腔正畸颊系带系列	170
10.5.10 牙科修复支架	171
10.5.11 口腔正畸装置托架、滑块及吊钩	171
10.5.12 Carrière Distalizers 矫治器	172
10.5.13 连接装置	172
10.5.14 销管套	173

第 11 章 铁基粉末冶金结构零件的生产工艺	174
11.1 常规压制成形	174
11.1.1 混合	174
11.1.2 润滑	175
11.1.3 金属粉末在压力作用下的性状	177
11.1.4 密度分布	179
11.1.5 生坯强度	180
11.1.6 压坯内的应力分布	181
11.1.7 压坯缺陷	181
11.1.8 成形模具的零件	182
11.1.9 压机	186
11.1.10 模具零件的结构和间隙	187
11.2 金属注射成形	188
11.2.1 金属注射成形和常规粉末冶金零件生产的比较	188
11.2.2 金属注射成形用的粉末的选择	188
11.2.3 金属注射成形用的黏结剂	189
11.2.4 金属注射成形中金属粉末与黏结剂的混合	189
11.2.5 金属注射成形的设备	189
11.2.6 金属粉末注射成形的温度	190
11.2.7 脱黏	190
11.3 烧结工艺与基本原理	191
11.3.1 烧结工艺的基本类型	191
11.3.2 烧结过程	192
11.3.3 烧结的基本理论	197
11.3.4 合金的烧结	200
11.4 烧结炉与烧结气氛	205
11.4.1 带有保护气氛的连续炉	205
11.4.2 带有保护气氛的间歇式炉	208
11.4.3 真空烧结炉	208
11.4.4 烧结炉的温度控制	209
11.4.5 烧结气氛	210
11.4.6 烧结气氛与压坯的反应	213
附录	217
附录 1 常用数据表	217
附录 2 元素周期表	218
附录 3 元素的物理性能表	219
附录 4 ISO 5755: 2001 (E) (GB/T 19076—2003) 烧结金属材料规范	222
参考文献	232

第1章

铁基粉末冶金结构零件材料生产概要

1.1 概述

在所有工程材料中，钢是最重要的，全球每年消耗的钢多达 7.5 亿吨。按照重量，钢是应用最广的一类材料，而依据体积，现今用量最大的工程材料是塑料。钢与塑料都容易变形，而且价格适中，因此都是制造汽车的主要材料。

大部分钢都制成了长、大型材。这些型材需要经过加工后才能用作结构材料。例如加工成薄钢板材后，才能用冲裁制成汽车的车身覆盖件。但是，用钢材制造形状复杂的零件，诸如齿轮、带轮等就困难多了！因此，要想将钢铁这类用连续作业生产，如像连续铸造、转换成单件产品的成形生产，产品的生产成本必然会大大增高。

在这种情况下，材料质量损耗小，成形速度快，适于生产用量大、形状复杂的、具有特定性能的单个零件的铁基粉末冶金零件生产工艺就显示出了绝对优势。

据瑞典 Höganäs AB 的资料，现在全球每天生产的粉末冶金零件超过了 4000 万件，每年乘用车、载货车、电动工具、白色家电、空调器、计算机、器具、泵等所用的金属粉末超过了 90 万吨，其中全球生产的铁粉与钢粉 80% 以上用于生产这些零件。如图 1-1 所示为全球金属粉末的产量，如图 1-2 所示为粉末冶金材料的市场分布，如图 1-3 所示为北美的粉末冶金零件的市场分布。

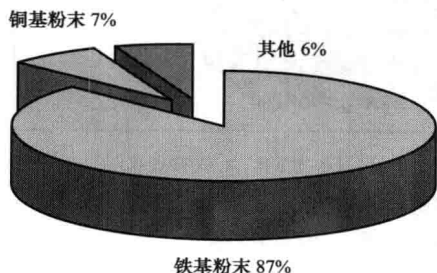


图 1-1 全球金属粉末的产量
(资料来源：EPMA)

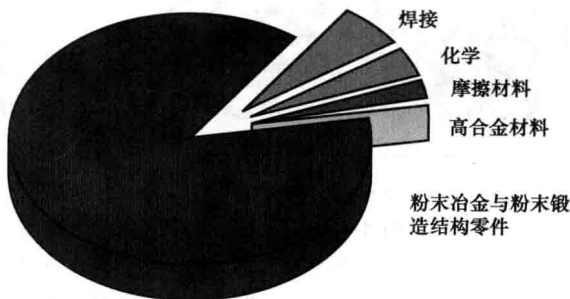


图 1-2 粉末冶金材料的市场分布 (资料来源：MPIF)

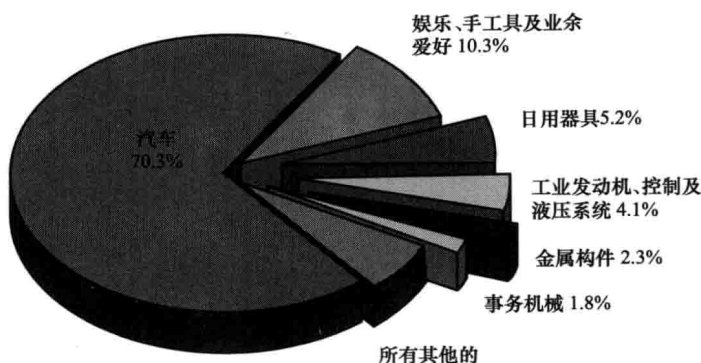


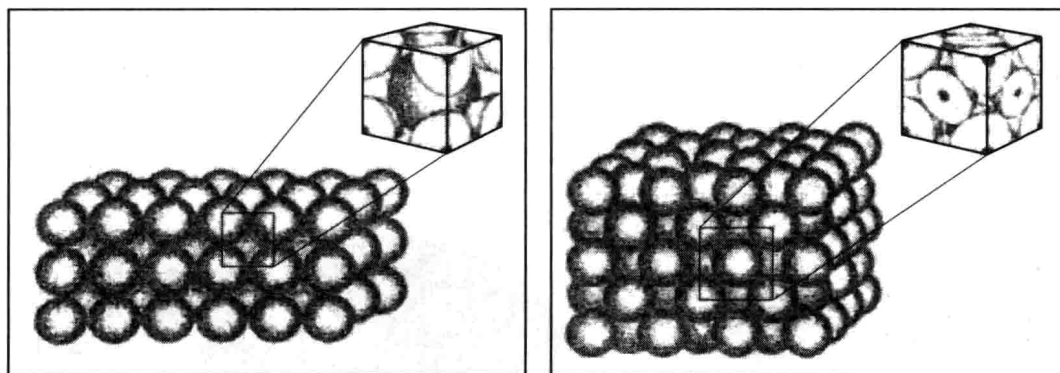
图 1-3 北美的粉末冶金零件的市场分布 (资料来源: MPIF)

钢是以铁为基本材料生产的，而铁基粉末冶金结构零件的生产是以铁基粉末为基本原料，将其与其他金属粉末和添加剂混合后，经烧结制成烧结钢零件的。因此，可以说，铁基粉末冶金零件生产也是从铁开始，以制成烧结钢零件结束的。要想深入理解铁基粉末冶金零件材料的生产过程，需要先了解铁的特性。

1.2 铁的特性

1.2.1 结晶学

铁是一种非合金化元素，呈固体状态，也就是说铁是一种结晶物质。其原子皆呈周期性结构排列，如图 1-4 所示。已用数学分析法证明，原子在晶体结构中有 14 种基本排列方式。铁的晶体一般有两种类型。通常，在特定的转变温度下，铁的这两种晶体类型会发生变化。但是，可用合金化与快速冷却来控制这些温度。鉴于通过加热与冷却可控制晶体结构，从而可显著改变钢的性能，因此，了解热处理也很重要。



(a) 体心立方, α -铁(铁素体)

(b) 面心立方, γ -铁(奥氏体)

图 1-4 原子近似于球体。作为固体，铁形成两种晶体类型中的一种。

在晶体结构中，原子相互间皆位于特定的关系位置。小晶胞一次次重复堆砌就形成了大容积晶体，叫做晶粒

合金化不仅可增高强度与改进耐蚀性，而且可改变稳定的晶体结构与性能。铁的两种晶体结构是体心立方体与面心立方体，如图 1-4 所示。体心立方结构是在每个顶角有一个原子

和立方体中心有一个原子。铁的这种晶体结构也叫做铁素体或 $\alpha\text{-Fe}$ ；另外一种晶体结构是奥氏体或 $\gamma\text{-Fe}$ ，其由同样的顶角原子组成，但在每一个表面的中心都有一个原子。对于纯铁，一直到 910°C ，以及从 1392°C 到熔化温度 1537°C ，铁的晶体结构都是稳定的体心立方结构，也就是处于 α -铁状态，但是，将高温的体心立方结构称为 δ -铁。在 $910\sim 1392^{\circ}\text{C}$ 之间，铁的晶体结构都处于稳定的面心立方体状态。通常，将这种晶体结构因温度而发生的变化，叫做同素异构转变。铁是一种多晶型元素。具有多晶型转变特性的其他元素还有：钴、铀、钛、锰、锡及碳（石墨与金刚石）。晶体结构的变化会影响材料的性能。因此，在讨论钢的热处理时，合金化就特别重要。

另外，铁是一种铁磁性物质，其磁性变化和晶体结构无关，但与电子结构相关。一直到约 770°C ，纯铁都是有磁性的，而铁的晶体结构却都是体心立方体。以前，曾将体心立方体的顺磁性形态叫做 β -铁，但这个术语现在已很少用了。从磁性转变为非磁性的温度叫做居里温度，其是永磁体的最高使用温度的决定性因素。

1.2.2 晶体缺陷

晶体并不是完美的，它们有的缺少原子，有的有额外的原子挤进到裂缝、空隙、表面，甚至在原子排列的线与面中也有缺陷。在铁基粉末冶金零件材料生产中，这些缺陷每一种都具有重要作用。缺少原子处留下的位置叫做晶格空位（注意，这里讲的空位和粉末冶金产品中存在的大量孔隙不同，其尺寸远大于空位）；而挤进晶格中的额外原子，一般称为填隙原子。空位对于烧结重要，而填隙原子则对于材料强化很重要。一种叫做位错的线缺陷控制着铁粉的压制与强度。如图 1-5 所示为简单晶体结构中的两种典型的位错移动。其中一种叫做刃型位错，它是在应力作用下，晶体的一部分相对于另外一部分出现一个额外的半原子面，这个额外半原子面如同切入晶体的刀片，刀片的刃口线即为位错线，因此，将这种线缺陷称为刃型位错。另外一种螺型位错，其是晶体的某一部分相对于其余部分发生滑移时，原子平面沿着一根轴线盘旋上升，每绕轴线一周，原子平面上升一个原子间距，在中央轴线处即产生一个螺型位错。

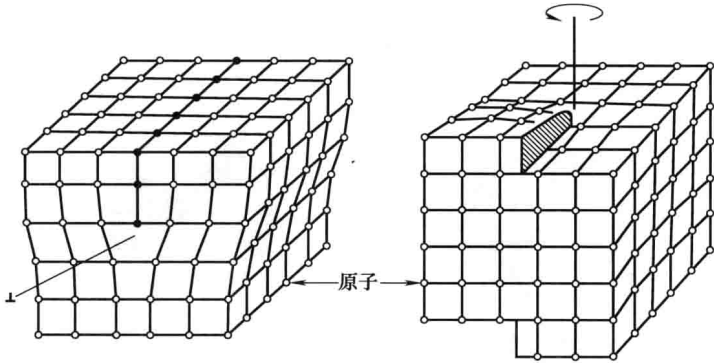


图 1-5 位错是在应力作用下移动的晶体中产生的线缺陷。用小圆圈表示原子的位置。位错有两种：刃型位错与螺型位错。刃型位错表现为有额外的部分原子平面挤进了结构中；而螺型位错是原子平面盘旋上升的支点。屈服强度一般和处于受力状态下的位错移动处相关

当施加的应力足以使与邻近的原子间断开时，这两种位错就会移动。位错通过晶体移动的启动决定强度。位错的奇妙之处在于仅几个原子连接断开就可使晶体的形状（位错邻近的那些原子连接）发生变化。在屈服强度下，位错开始通过晶体进行移动，产生叫做滑移的原

子面滑动。通常,使位错移动的应力皆低于使钢断裂所需的应力。在断裂应力下,横穿试验试样的所有原子连接都将断裂。因此,除非材料没有韧性外,材料的屈服强度皆低于抗拉强度。

当两个晶体连接在一起时,有一个将原子连接分开的表面,叫做晶界。晶界是杂质最适宜的聚集处。鉴于杂质一般都降低晶界的强度,因此,偏聚于晶界的杂质会使钢脆化。晶粒细小意味着晶界的面积数量大,可弱化杂质偏聚的作用。于是,晶粒大小对力学性能,特别是延性与韧性有影响。孔隙在粉末冶金钢中是最常见的。它们都是固结工艺遗留下的大量缺陷。通常孔隙度增高时,强度与其他性能都将减低。

1.3 铁基粉末冶金结构零件生产用预混合粉材料

近 50 年来,铁基粉末冶金产业的发展,最引人注意的是,已证明粉末冶金是替代切削加工、铸造、冲压、锻造及其他类似金属加工技术的一种生产成本较低的生产技术。粉末制造与其生产工艺、合金开发及零件生产方法的不断改进都促进了铁基粉末冶金零件产业的发展。

粉末冶金零件市场一直在不断变化。对铁基粉末冶金零件产业来说,迄今,在汽车中的应用一直处于举足轻重的地位。可是,非汽车领域的应用正变得日益重要,其主要有手工工具、家用与草坪器械以及工业马达/控制与液压系统。

粉末冶金零件的发展取决于能提供比现今的零件材料密度更高的生产技术。如图 1-6 所示为依据密度分布零件的发展情况。密度的提高,迄今主要靠的是粉末制造与压制工艺的改进。未来的进展好像主要依靠的是对烧结工艺的改进。粉末冶金零件的特点在于密度、化学成分及显微组织。对于某一给定的零件,都需要尽量使这 3 个参数最佳化。

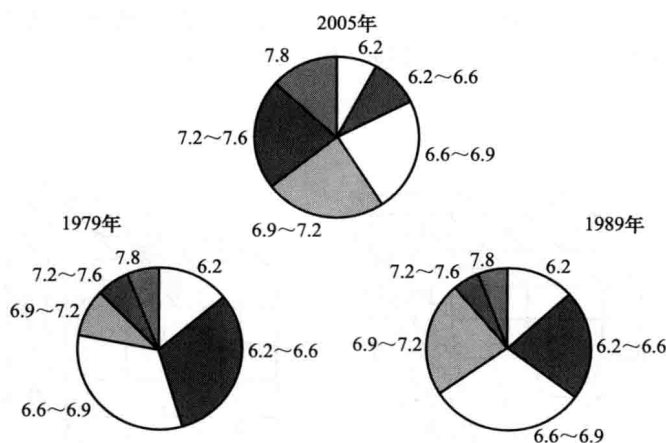


图 1-6 依据密度分布零件的发展情况 (单位: g/cm^3)

预混合粉材料的烧结和后续热处理都要使其形成能满足使用性能要求所必需的显微组织。一般来说,在粉末冶金零件产业中使用的预混合粉材料有 4 种: ①在铁粉中混合以合金化成分 (诸如 C、Cu、Ni 及 P); ②在以 Mo 或 Mo 与 Ni 预合金化的铁粉中混合以 C; ③在以 Mo、Ni 及 Cu 部分预合金化的铁粉中混合以 C; ④将①、②及③进行各种组合的混合粉材料系统。现在全球的主要铁粉与钢粉供应商如 Höganäs AB 等都不仅生产铁粉与钢粉,主要是供给粉末冶金零件生产厂家各种预混合粉,见表 1-1。所有这些预混合粉都含有润滑剂。在许多场合,为防止由于扬尘等使材料组成发生变化,还含有黏结剂。在烧结和后续的

任何热处理之前都要将预混合粉材料压制成近终形。通常，压制工艺确定的最终密度变动范围为设计密度的1%~2%，其余部分取决于烧结工艺。

1.3.1 铁基粉末冶金结构零件生产用的铁粉

据文献 [5] 统计，2004 年全球用粉末冶金铁基粉末（包括不锈钢粉在内）的出货量为 85.3 万吨，其中用水雾化法生产的占 60%~70%。

现在粉末冶金结构零件生产用的铁粉主要是由固体炭还原法与水雾化法生产的，它们的性能见表 1-1。还原铁粉由于粉末颗粒是多孔性的，因此其压缩性比颗粒密实的水雾化铁粉低，如图 1-7 所示。

铁粉的另外一项重要性能是生坯强度，其是在烧结以前，生压坯在运送与贮存中保持压坯的尺寸与形状的能力。另外，生坯强度对于压制成形时减小产生裂纹的可能性和使压坯的棱边与薄截面不会开裂与毁坏也都是很重要的，特别是对于高密度、形状复杂的零件。如图 1-8 所示为还原铁粉与水雾化铁粉的生坯强度与压制压力的关系。由图 1-8 可看出，水雾化铁粉的生坯强度明显高于还原铁粉。

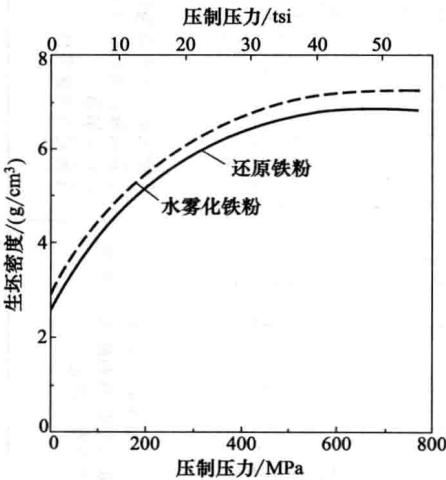


图 1-7 还原铁粉与水雾化铁粉压缩性的比较

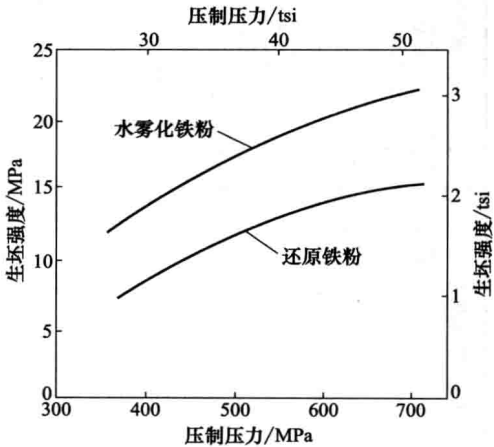


图 1-8 还原铁粉与水雾化铁粉的生坯强度与压制压力的关系

鉴于水雾铁粉的压缩性好与生坯强度较高，同时松装密度较高，流速较快（表 1-1），因此在高密度、高强度结构零件生产中，大多采用水雾化铁粉。

1.3.2 粉末冶金结构零件材料的合金化

铁基粉末冶金结构零件材料实际上都是由多种元素粉末按合金成分的要求配制与混合均匀后使用的，通常将这种混合粉叫做预混合粉。对于常规压制用的预混合粉，为了减小压制成形时压坯与阴模壁间的摩擦与粉末颗粒之间的摩擦，都必须添加适量的润滑剂，一般约为 1%（质量分数）。

在铁基粉末冶金结构零件生产中，对于铁粉与石墨粉的预混合粉生产的铁基零件，只涉及铁与碳两种元素。大量生产经验证明，使用一定粒度组成的铁粉，无论是还原铁粉还是水雾化铁粉，与石墨粉混合均匀和压制成压坯，在 1120℃ 烧结 30min，都可得到令人满意的铁-碳合金烧结钢零件。这表明，在足够高的烧结温度下，碳原子可以均匀地扩散到铁中，形成奥氏体固溶体。因此一般铁基粉末冶金结构零件材料可用元素粉混合法，即预混合粉生产。

表 1-1 制造粉末冶金零件用的铁粉与钢粉 (Höganäs AB)

粉末性能	海绵铁粉牌号			水雾化铁粉牌号						水雾化预合金化粉末牌号										D. 扩散合金化粉末牌号				
	NC100.24	SC100.26	MN80.23	AHC100.29	ASC100.29	ABC100.30	A	B	85Mo	Mo	CrL	CrM	LH	AB	AE	DC	DH	HP						
松装密度/(g/cm ³)	2.43	2.68	2.30	2.99	2.99	3.02	3.00	3.00	3.00	3.00	2.85	2.78	3.00	3.04	3.04	3.05	3.03	3.08						
流速/(s/cm ²)	31	29	34	24	24	24	25	25	25	25	27	27	26	24	24	25	25	25						
化学组成																								
Ni/%							1.90	0.45					0.90	1.75	4.00	2.00		4.00						
Mo/%							0.55	0.60	0.85	1.50	0.20	0.50	0.90	0.50	0.50	1.47	1.47	1.41						
Cu/%														1.50	1.50		2.00	2.00						
Mn/%							0.20	0.30					0.20											
Cr/%											1.50	3.00												
生坯性能																								
0.8%硬脂酸锌													0.6% (K-lube)											
生坯密度(600MPa) /(g/cm ³)	7.00	7.11	6.75	7.15	7.20	7.26	6.97	7.09	7.15	7.10	7.03	6.95	7.07	7.17	7.18	7.10	7.10	7.08						
生坯密度(4.2t/cm ³) /(g/cm ³)			6.28																					
生坯强度(600MPa) /MPa	21	15	29	13	14	13	11	10	13	13	17	15	20	13	14	13	12	13						
烧结性能							烧结硬化(dT/dt=2.5℃/s), 于200℃回火30min										dT/dt=1.5℃/s							
C(烧结件)/%	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.7	0.8	0.6	0.6	0.45	0.65	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5						
Cu/%	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	—	1.5	—	—	—	—	—						
烧结件密度/(g/cm ³)	6.80	6.90	6.67	6.96	7.02	7.02	6.89	6.90	7.05	7.00	6.92	6.90	—	7.12	7.10	7.10	7.02	7.08						
尺寸变化/%	0.12	0.17	-0.05	0.10	0.10	0.11	0.30	0.32	0.33	0.30	0.21	-0.12	0.25	-0.08	-0.16	-0.22	0.12	-0.15						
HV ₁₀	170	180	155	180	185	185	380	330	390	415	370	400	35HRC	180	200	190	210	250						
屈服强度/MPa	410	395	360	450	460	470	720	690	720	910	810	920	945	375	420	510	500	530						
抗拉强度/MPa	530	520	440	570	585	590	840	750	845	1025	850	1030	1075	620	750	720	660	890						
面缩率/%	2.0	2.5	1.9	1.8	2.0	2.4	0.3	0.3	0.4	0.4	0.3	0.3	0.3	3.0	2.8	2.5	1.8	2.3						
冲击能量/J							12	11	14	18	10	14	16	27	30	30	14	26						
应用	①低至中等密度零件 ②自润滑轴承,特别是MH80.23与NC100.24 ③几何形状复杂的零件,用于需要高生坯强度,又要避免生坯开裂的场合 ④减振器零件、轴承						①中等至高密度零件 ②软磁应用,特别是ABC100.30 ③离合器与带轮						①烧结的中等至高强度零件 ②烧结硬化时的高强度与耐磨零件 ③粉末锻造 ④齿轮与油泵零件						①烧结状态的高强度应用 ②烧结硬化时的高强度与耐磨性,特别是D.DC与D.DH ③尺寸控制好,是关键的零件 ④齿轮、同步器与油泵零件					

注:典型数据——在 $p=600\text{MPa}$ 、 $T=1120^\circ\text{C}$ 、 $t=30\text{min}$ 、烧结气氛 $=90/10(\text{N}_2/\text{H}_2)$ 、 $dT/dt=0.8^\circ\text{C/s}$ 下的烧结件性能。

铁基粉末冶金结构零件材料的力学性能与显微组织以及所含孔隙的数量、大小、分布和形态密切相关。为改进铁基粉末冶金材料的力学性能和增高其在热处理状态的淬透性或韧性，扩大粉末冶金零件的应用，研制出了各种合金化添加剂与合金化方法。当前，对于铁基粉末冶金结构零件材料，依据组成合金的方法，主要有四种合金化方法，如图 1-9 所示。

(1) 混合法

将元素粉末或铁合金粉，以合金添加剂的形式，直接混合于基粉铁粉中，这是一种最常用与最便宜的合金化方法。鉴于混合粉末在压制时，仍保持着铁粉的压缩性，但在烧结温度下，其合金化程度受到合金元素与铁相互扩散的限制，因此，最终形成的显微组织在化学性质上是不均一的。而且，这种混合粉在输送与压制时，会产生扬尘与偏聚。

为解决混合粉扬尘与偏聚的问题，美国 Hoeganaes Corp 采用了用有机黏结剂处理预混合粉的工艺，即所谓的 ANCORBOND 工艺。1988 年采用的第一代 ANCORBOND 工艺，使用的材料除加入预混合粉的润滑剂外，还加入了黏结剂。即在润滑剂含量不变的条件下，还另外加入了一种黏结剂。添加的黏结剂是另外一种低密度添加剂，从而减小了混合粉的无孔隙密度。因此，第一代 ANCORBOND 材料可达到的密度受到了限制，但重要的是这种最初的材料满足了市场需要，改进了流动性，增高了压制速率（最高达 25%），减小了零件间的变动性。第一代 ANCORBOND 预混合粉的松装密度比常规预混合粉高。

为了解决生产高密度零件的需要，必须减小添加于预混合粉中的润滑剂与黏结剂的总含量，增高 PFD。最好的办法是利用聚合物黏结剂同时兼具黏结与润滑两种特性。20 世纪 80 年代末，Hoeganaes Corp 开发出了新润滑剂——黏结剂系统，其可减小预混合粉的有机物的总含量，使零件密度增高到 7.1g/cm^3 。这个第二代 ANCORBOND 工艺的好处是生坯密度与常规混合粉相同，但是增高了生坯强度与减小了脱出力。另外，这种第二代材料的密度与低至中等压力下压制的密度相同，但在 $550\sim690\text{MPa}$ 的压制压力下，表明生坯密度的增高可高达 0.1g/cm^3 。表 1-2 列出了 ANCORBOND 混合粉的性能。第二代黏结剂处理的预混合粉，其和未黏结处理的材料同样都具有较高的松装密度，但是由于对处理作业的不改进，使按配方制备的改型的预混合粉可用于现有的充填高度固定的阴模。在最初的 ANCORBOND 工艺中原有的增高压制速率、改进粉末流动性及增高材料一致性的好处都仍然保留在第二代材料中，另外，还有将生坯密度增高到了 7.1g/cm^3 的好处。

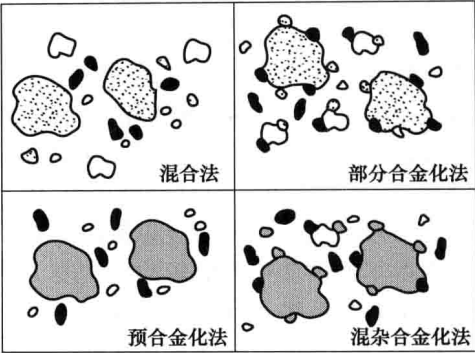


图 1-9 粉末冶金零件材料的合金化方法

表 1-2 ANCORBOND 混合粉的性能

材 料	松装密度 /(g/cm ³)	流速 /(m/s)	生坯密度 /(g/cm ³)	生坯强度 /MPa	生坯胀大 /%	脱开压力 /MPa	脱出压力 /MPa	烧结件 密度 /(g/cm ³)	尺寸变化 /%	横向断裂强度 /MPa	表观 硬度 /HRA
预混合粉	3.06	35.6	7.21	15.4	0.15	34.2	18.9	7.23	0.06	961	44
ANCORBOND	3.21	27.6	7.20	20.0	0.15	28.8	15.1	7.16	0.06	961	44
ANCORMAX 200	3.33	25.5	7.34	26.3	0.11	29.2	17.7	7.35	0.08	1023	46
ANCORDENSE 450	3.28	26.2	7.47	33.9	0.22	22.8	22.8	7.49	0.11	1100	41

注：ANCORMAX 含有 0.40%（质量分数）石墨，使 PFD 减小。

最近，开发出了用一次压制/一次烧结可达到较高密度的方法，其标志是 ANCORMAX

200™, 这种工艺只需要将阴模加热 (60~95℃), 而不需要对任何粉末进行预热。和温压工艺相似, 为使密度比常规预混合粉增高 0.05~0.15g/cm³, 这种工艺也需要将黏结剂与润滑剂结合起来 (表 1-2)。和温压相似, 除了增高生坯密度与烧结件密度之外, ANCOR-MAX 200 工艺还减小了合金偏聚, 减小了扬尘, 流动性优异, 并可增大阴模的充填量。利用这些因素可制造出较均一与质量较高的粉末冶金零件。

加热粉末/加热阴模的工艺一般叫做温压, 为便于在 120~150℃ 范围内压制, 利用的是用含有独特的黏结剂与润滑剂的预混合的铁粉或低合金钢粉末。将预混合粉与压制模具都加热到这个温度范围。通过温度诱发的压缩屈服强度减低与伴随着润滑剂软化, 在阴模中形成的冷等静压状态, 使密度接近 PFD, 从而达到较高的密度。温压使用的润滑剂含量一般为 0.6%, 从而比常规压制可达到较高 PFD。已证明, 用温压压制可使整个零件的密度更均匀, 这一般可使和粉末冶金相关的中和区最小化。这种中和区减小是最理想的, 因为密度均一意味着零件内使用性能较均一。表 1-2 为 ANCORDERSE 450™ 混合粉 (温压) 得到的结果。这个黏结系统表明, 生坯强度、生坯密度与烧结件密度及脱出特性 (脱开压力与滑动压力) 都有所改进。应该注意, 所有 ANCORBOND 系统都有黏结的炭 (耐扬尘性), ANCORBOND 产品的黏炭都 >90%。因此, 要根据压制条件与需要的密度来选择 ANCORBOND 系统。

(2) 部分合金化法 (扩散合金化法)

在预混合粉的制备过程中, 常见的问题之一是如何将铁粉与添加的合金元素粉末混合均匀。例如, 如何解决颗粒粗大 (粒度达 150μm) 的铁粉与颗粒细小的镍粉 (5~7μm) 和铜粉 (40μm) 混合时的偏聚问题。Höganäs AB 在 1974 年提出了部分预合金化法, 其生产方法是将铁粉与合金元素粉混合均匀后, 在还原性气氛中进行热处理。热处理时各种合金元素扩散到铁粉中, 铁粉与合金元素粉颗粒之间形成部分连接。这种材料的显微组织, 是由合金化程度较高的合金颗粒黏结处形成的连续网络和合金化程度较小的颗粒心部组成。

这种处理方法的好处如下。

① 可将很细的合金元素粉 (10μm) 均匀地混合于粗得多的铁粉 (粒度达 150μm) 中。这使混合粉在运送与以后的加工过程中不会产生偏聚: 消除成分偏聚, 增高烧结件尺寸的一致性, 从而使生产的烧结零件较易保持精密尺寸公差。

② 合金元素颗粒部分黏结于铁粉颗粒上, 这可避免形成含有 (或没有) 润滑剂的粉末团块或颗粒堆集体。因此, 合金元素在粉末压坯中分布较均匀, 能较有效地增高粉末冶金零件烧结件的力学性能。

③ 这一类合金铁粉主要由纯铁 (铁素体) 组成, 所以压缩性和纯铁粉几乎一样高, 这对于用压制-烧结工艺制造高密度、高强度零件是十分重要的。

现在 Höganäs AB 生产的扩散合金化粉末组成与性能见表 1-1。

(3) 预合金化法

为解决部分合金化材料中合金化添加剂均一的问题, 开发了预合金化法, 即在用水雾化法生产粉末时, 将合金化添加剂 (除碳外) 添加到钢熔体 (钢液) 中, 使钢液合金化。这样由雾化合金钢粉制造的零件材料, 显微组织均一, 甚至连微小压痕度都均一。但是, 由于合金添加剂使生产的粉末颗粒固溶强化, 因此, 其可压缩性与混合的及部分合金的材料相比有所减小。但是, 用钼作为合金添加剂的预合金化粉末的压缩性和铁粉相近。

Höganäs AB 生产的水雾化预合金化粉末的组成与性能见表 1-1。

(4) 混杂合金化法

随着高压塑性预合金化粉末的出现, 开发出了以这种预合金化 (诸如含 Mo 的) 为基