

粉末冶金 机械结构零件 设计与应用

北京天桥粉末冶金机床配件厂编

第一机械工业部情报所

前 言

粉末冶金技术是一门新兴的冶金—机械加工技术，国内外都很重视。粉末冶金制品应用越来越广。如：三十三万伏安高压电站断路器的触头、重型机械中的离合器片、金属切削用的硬质合金刀具等等，目前还只能用粉末冶金法制造。机械设备中的中小型齿轮、轴承、凸轮、衬套等结构零件，目前也有一部分已采用粉末冶金法制造。

粉末冶金技术的迅速发展，与它具有的一系列优点是分不开的：（1）制造粉末冶金制品的主要材料是铁粉，而铁粉的原材料是轧钢铁鳞或废铁屑等，原材料资源丰富；（2）粉末冶金制品的制造工艺比较简单，占用设备少；（3）粉末冶金制品性能好；（4）粉末冶金制品的材料利用率高，可实现少无切削加工，从而可节约大量材料以及大量加工设备和工时。总之，推广采用粉末冶金技术，可取得显著的技术经济效益。

我国粉末冶金技术是在一九五八年发展起来的。十几年来，在毛主席革命路线指引下，在无产阶级文化大革命和批林批孔运动推动下，发展很快。一九七四年铁粉产量达一万二千万吨，铁基粉末冶金制品产量达一亿五千万件，在农机、汽车、机床、仪表、机车、船舶、纺织、电机电器、日用五金等行业，都有了一定应用，取得了显著技术经济效益。

为了进一步推广粉末冶金技术，更好地为社会主义革命和建设事业服务，系统地向广大工人、干部和技术人员介绍粉末冶金的基础知识和发展成就是十分必要的。为此，编写了“粉末冶金机械结构零件设计与应用”一书。

本书扼要地介绍了国内外机械工业中常用的粉末冶金材料的性能、粉末冶金机械结构零件的设计要点、制造过程和使用特点，并具体分析了粉末冶金齿轮、链轮、棘轮、凸轮、啮合离合器等结构零件的材料选择和设计要点。以国内经验为主。有关粉末冶金轴承、过滤器、摩擦零件、磁性零件、电触头和特殊制品的材料选择和设计要点等，将另行介绍。

由于水平有限，收集资料不全，书中缺点错误难免，请批评指正。

作 者

1975年9月

目 录

第一章 概论	(1)
第二章 粉末冶金材料及其性能	(9)
第一节 粉末冶金铁基材料	(9)
第二节 热处理的粉末冶金铁基材料	(43)
第三节 粉末冶金有色金属合金材料	(54)
第三章 粉末冶金机械结构零件的制造过程	(68)
第一节 原料粉末	(68)
第二节 粉末的调整与混合	(69)
第三节 成形	(70)
第四节 烧结	(76)
第五节 加工与后续处理	(80)
第四章 粉末冶金零件的形状、尺寸及尺寸精度设计	(89)
第一节 零件形状的限制	(89)
第二节 尺寸限制	(95)
第三节 尺寸精度	(95)
第五章 粉末冶金齿轮设计	(97)
第一节 用粉末冶金法制造齿轮的优点	(97)
第二节 材料选择	(98)
第三节 粉末冶金齿轮强度设计	(101)
第四节 粉末冶金齿轮的精度	(107)
第五节 粉末冶金齿轮的磨损与噪音	(109)
第六节 粉末冶金齿轮应用实例	(111)
第七节 粉末冶金齿轮设计实例	(113)
第六章 链轮与棘轮设计	(124)
第一节 链轮设计	(124)
第二节 棘轮设计	(128)
第七章 凸轮与啮合离合器设计	(132)
第一节 凸轮设计	(132)
第二节 啮合离合器设计	(141)
主要参考文献	(144)

第一章 概 论

所谓机械结构零件，系指具有相当严格的尺寸精度，承受机械运转，除与其它零件相摩擦外，还承受拉伸、压缩、扭曲等负荷的零件。目前，这些零件多半还是由钢铁或其它金属材料，经过铸、锻成形、切削加工制成。

在工业上，用粉末冶金法制造各种机械结构零件（或称烧结零件），在第二次世界大战后，特别是六十年代以来，有了迅速发展。这是由于粉末冶金机械结构零件具有下列优点：

- （1）不需或只需少量切削加工，即可制成零件，材料利用率高；
- （2）零件表面光洁，尺寸精度高，质量好；
- （3）生产效率高，适合大量生产；
- （4）零件具有较高的力学性能；
- （5）可制造具有特殊性能的复合材料制品。

目前生产的粉末冶金机械结构零件多为小型零件，如齿轮、凸轮、环、活塞、导体、支承件、螺母、球座等。较大型的零件，如汽车的链轮、离合器毂等也已开始生产、使用。这

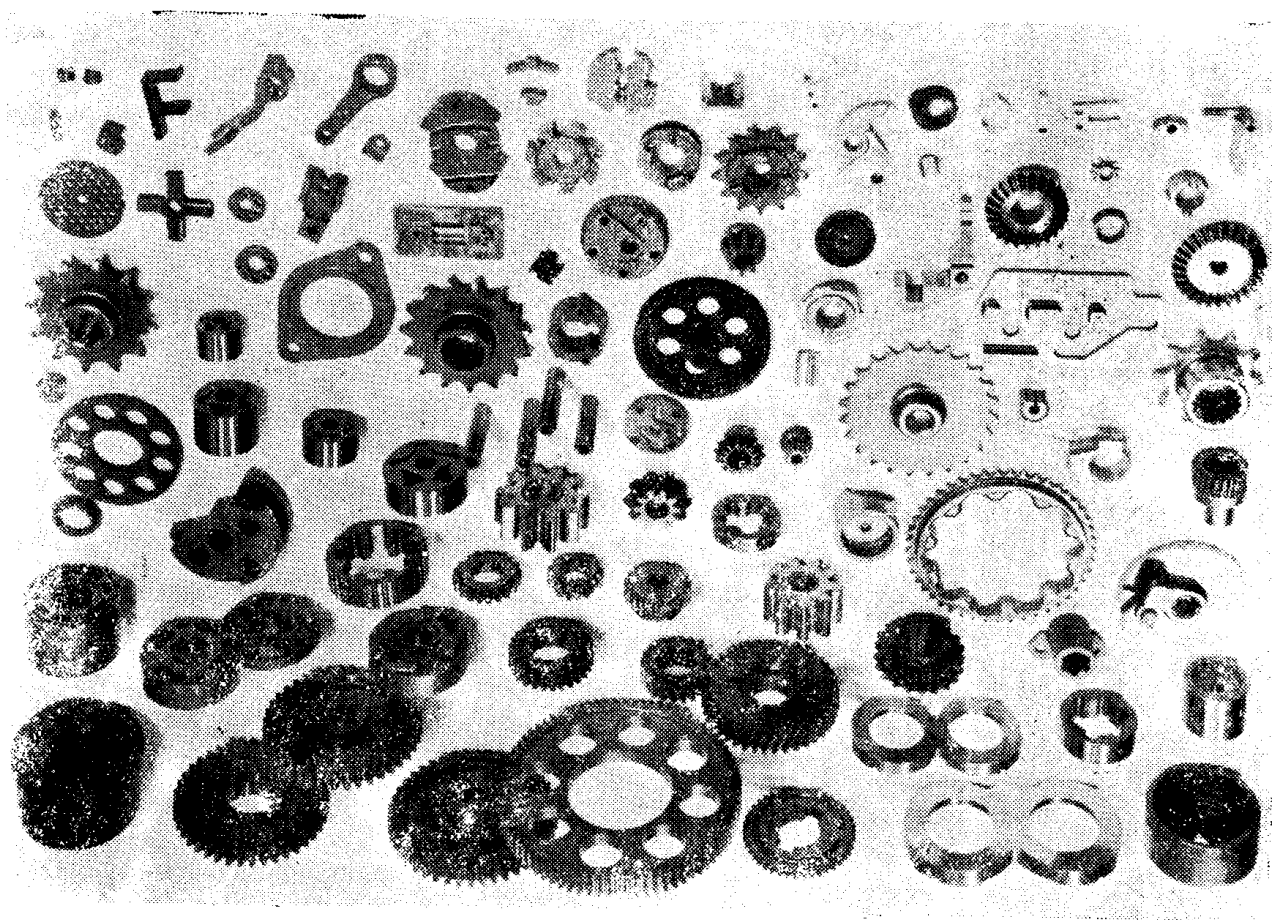


图1-1 粉末冶金机械结构零件

些零件已广泛地应用在汽车、摩托车、农业机械、机床、仪器仪表、纺织机械、缝纫机等方面。图 1-1 是各种粉末冶金机械结构零件。图 1-2 是仪表中用的粉末冶金结构零件。

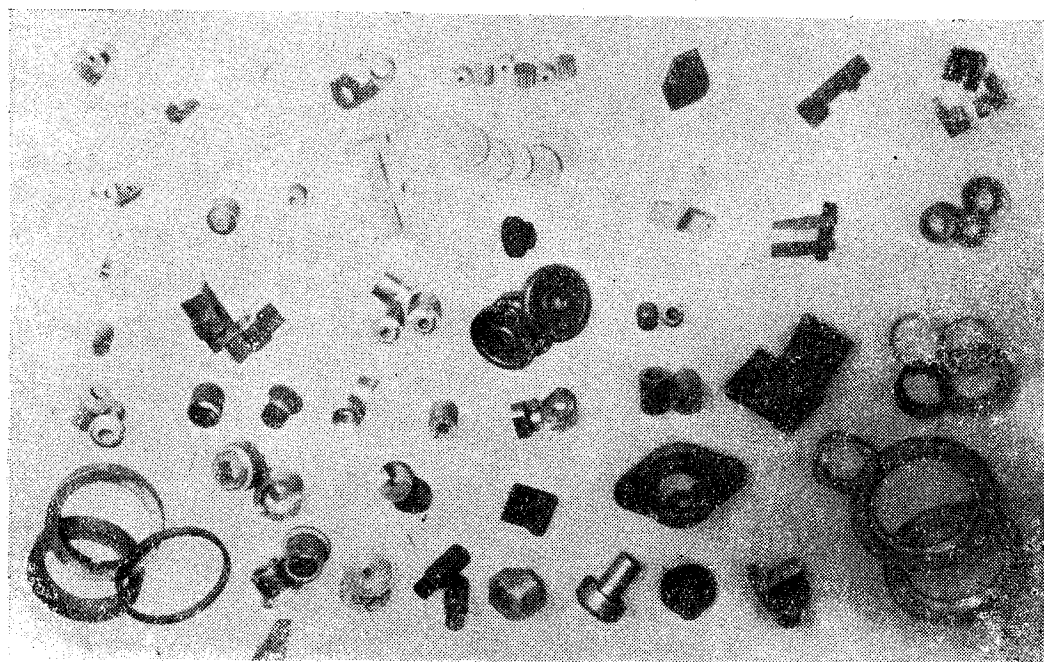


图1-2 仪表中用的粉末冶金结构零件

粉末冶金机械结构零件的制造过程见图 1-3。将按比率配合-混合好的粉末装在压模中，压成压坯，将压坯在非氧化性气氛中烧结（必要时，经后续处理），即可制成成品零件。当要求零件具有较高的力学性能时，有时还需采用二次压制-二次烧结、熔浸、热锻或滚压等特殊工艺。为了提高零件的硬度与强度，有时还需进行渗碳、淬火、回火等热处理。

粉末冶金机械结构零件，除用铁粉或铁合金粉制造外，根据需要还在用黄铜粉、镍黄铜粉、铝合金粉等制造。

粉末冶金机械结构零件应用实例：

1. 齿轮类零件

用粉末冶金法生产齿轮，成本低外，技术上还具有下列特点：

- (1) 省掉了铸、锻、切削加工等工序，节省材料；
- (2) 大量生产时，精度较高，尺寸偏差较小，有利于质量管理；
- (3) 可含浸 5~20% 润滑油，具有自润滑性能，耐磨性好；
- (4) 噪音比普通机械加工的齿轮小；
- (5) 可将齿轮与轴、凸轮或棘轮等一体化设计制造，降低成本；
- (6) 有时，用粉末冶金法易于生产形状复杂难以切削加工制造的齿轮。

当前，用粉末冶金法生产齿轮存在的主要问题是：①齿轮的尺寸大小受到压机容量的限制，②粉末冶金齿轮冲击强度较低。这些问题可望随着大型压机的采用以及粉末锻造、烧结件滚压等新工艺的发展而逐步获得解决。

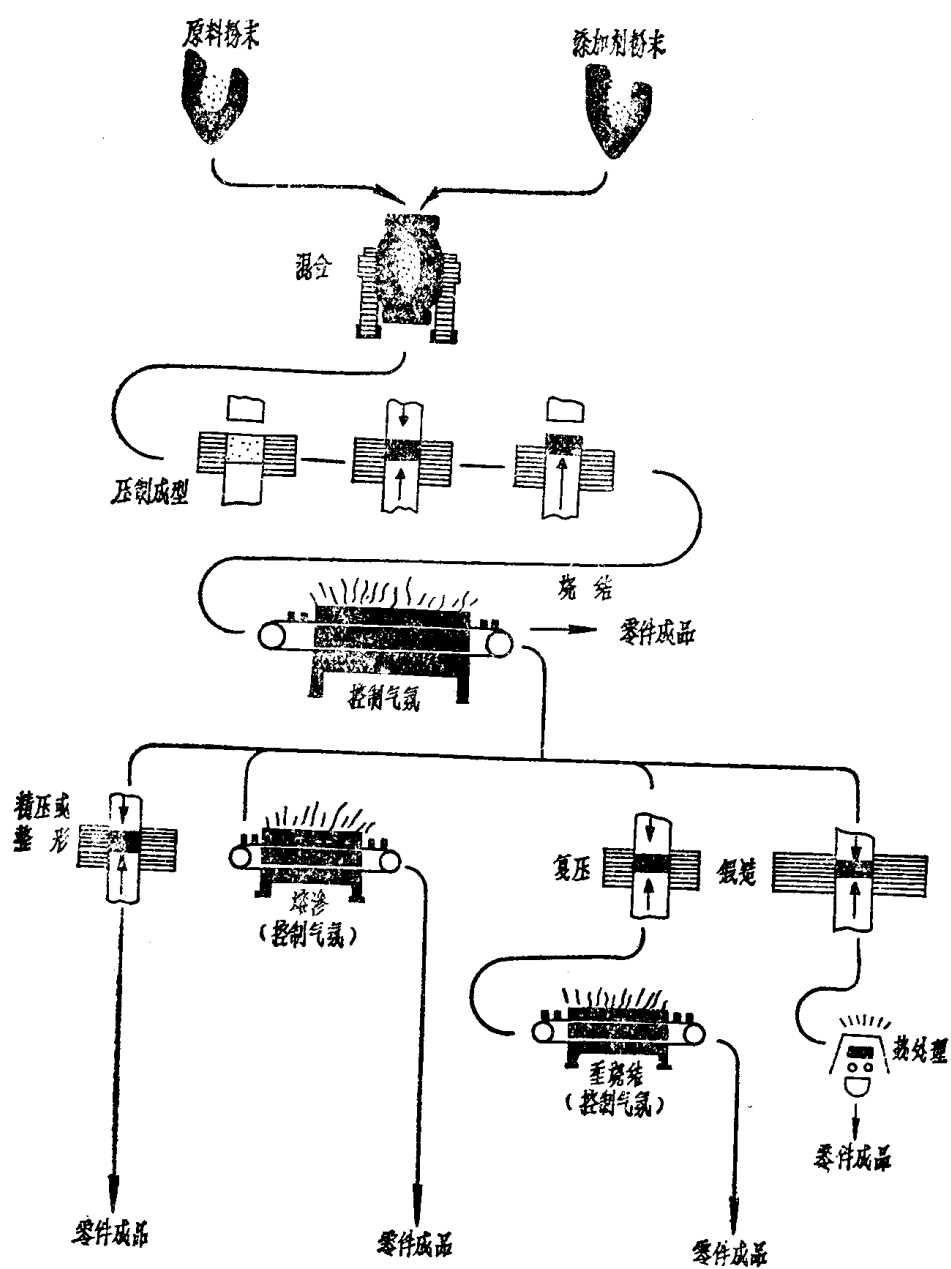


图1-3 粉末冶金机械结构零件制造过程示意图

例1. 次摆线油泵的内、外转子：见图1-4。

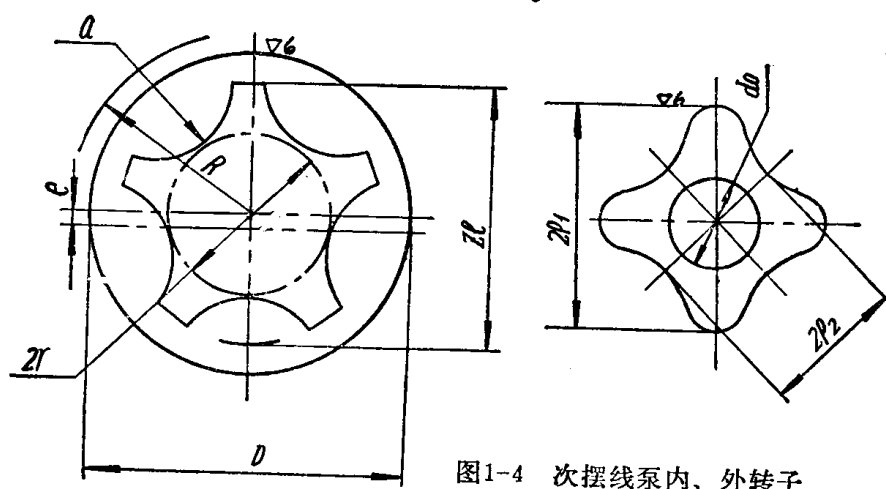


图1-4 次摆线系内、外转子

我国生产的次摆线泵内外转子系列型结构参数

型号	内转子 一齿扫 过面积 (Δ 厘米 ²)	转 厚 度 (h 毫米)	设计排量 (Q/rpm 升/分)	偏心距 (e 毫米)	创成 半径 (R 毫米)	外转子 齿型半 径 (a 毫米)	限制圆 直 径 (Z 毫米)	外转子齿型 内切圆半径 ($2r$ 毫米)	外转子外径 (D 毫米)	内转 子半 径 (P_1 毫米)	内转 子半 径 (P_2 毫米)	内转子孔径 (d_0 毫米)	推荐适用机型
JZX0515	0.5	$15d_c - 0.016$ -0.033	4/1500 6.5/2500	2.2 ± 0.015	16.95	$8.8d_3$ -0.015	$+0.28$ $25.1 + 0.20$	$+0.075$ $16.3 + 0.040$	$29d_c - 0.06$ -0.095	$10.35 + 0.01$ -0.03	$5.95 + 0.01$ -0.03	$8GC + 0.004$ $+0.012$	单缸65、75、85、 90、95 3~12马力 内燃机和车床
JZX1018	1.0	$18d_c - 0.016$ -0.033	6/1000 18/3000	2.8 ± 0.02	23.32	$11.27d_3$ -0.018	$+0.30$ $35 + 0.20$	$+0.084$ $24.10 + 0.040$	$41d_c - 0.075$ -0.115	$14.85 + 0.01$ -0.04	$9.25 + 0.01$ -0.04	$13GC + 0.005$ $+0.014$	二、三、四缸85、 90、95、一、二缸 105 18~50 马力 内燃机、汽车、摩 托车、飞机、机床
JZX1025		$25d_c - 0.020$ -0.040	8.2/1000 24.5/3000										
JZX1425	1.4	$25d_c - 0.020$ -0.040	11.5/1000 34.5/3000	3.5 ± 0.02	28	$14.5d_3$ -0.018	$+0.32$ $41 + 0.20$	$+0.084$ $27 + 0.040$	$50d_c - 0.095$ -0.145	$17 + 0.01$ -0.04	$10 + 0.01$ -0.04	$14GC + 0.005$ -0.014	三、四缸100、 105、110、115、120 30~80马力内燃 机、船舶、汽车、 坦克、飞机、机床
JZX1435		$35d_c - 0.025$ -0.050	16/1000 48.5/3000										
JZX2525	2.5	$25d_c - 0.020$ -0.040	21/1000 62.5/3000	4.5 ± 0.03	37	$18d_3$ -0.021	$+0.32$ $56 + 0.20$	$+0.12$ $38 + 0.06$	$67d_c - 0.095$ -0.145	$23.5 + 0.01$ -0.04	$14.5 + 0.01$ -0.04	$18D$ $+0.023$	六、八缸100、 105、110、115、 120、四、六缸135 70~180 马力内燃 机、船舶、汽车、 飞机、坦克
JZX2535		$35d_c - 0.025$ -0.050	29/1000 87/3000										
JZX4030	4.0	$30d_c - 0.025$ -0.050	41.5/1000 124/3000	6 ± 0.03	48	$24d_3$ -0.021	$+0.32$ $72 + 0.20$	$+0.12$ $48 + 0.06$	$85d_c - 0.120$ -0.175	$30 + 0.01$ -0.04	$18 + 0.01$ -0.04	$20D$ $+0.023$	六、八缸140 8V135、四、六、 八缸160、320马力 内燃机、机床
JZX4040		$40d_c - 0.025$ -0.050	55/1000 166/3000										

化 学 成 分 %			物 理 - 力 学 性 能		
Fe	Cu	C	密 度 (克/厘米 ³)	硬 度 (HRB)	抗 拉 强 度 (公斤/毫米 ²)
96.2	3.0	0.8	6.10	36.0~37.1	26.5~30.5

外转子的外圆与内外转子的两端面要进行磨加工。

例2. 丰收 10 型喷粉器的斜齿轮：见图 1-5。

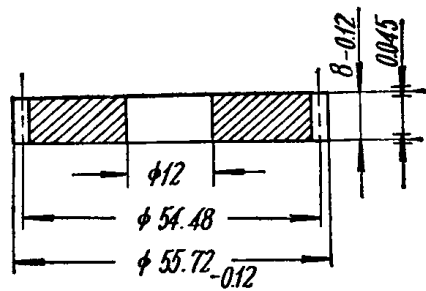


图1-5 45°斜齿轮

齿 轮 参 数

齿 形	渐开线		公法线长度	14.13 ^{-0.056} (5 齿)
齿 数	38		分度圆直径	53.74
模 数	1 (法面)		全 齿 高	2.24 (法面)
压 力 角	20°		分度圆厚度	1.57 (法面)
螺 旋 角	45°		螺旋方向	左

化 学 成 分 %			物 理 - 力 学 性 能			
Fe	Cu	C	密 度 (克/厘米 ³)	硬 度 (HB)	含 油 率 ((容积)%)	金 相 组 织
97	2	1	>6.3	>90	>10	铁素体 + 珠光体 (>65%) + 渗碳体 (<8%)

两端面要进行磨加工。

例3. 带轴齿轮：见图 1-6。

这种齿轮过去都是将齿轮部与轴分别制造，然后组装为一体，而用粉末冶金法可整体制造，不需要切削加工。

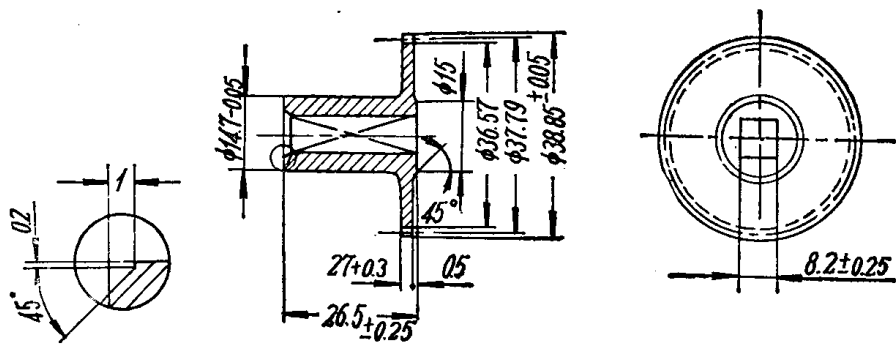


图1-6 带轴齿轮

齿 轮 参 数

径 节	48	齿 高	1.14
压 力 角	20°	公法线长度	12.144 ^{±0.04} (8 齿)
齿 数	72	修正系数	-0.239

化 学 成 分 %			物 理 - 力 学 性 能			
Cu	C	Fe	密 度 (克/厘米 ³)	硬 度 (HV)	抗拉强度 (公斤/毫米 ²)	延 伸 率 (%)
2~5	0~1	余量	6.2~6.4	>70	>20	>3

注：① 齿顶圆对 8.2×8.2 内径的跳动应小于 0.1 毫米；
 ② 齿轮部端面对 8.2×8.2 内径的跳动应小于 0.25 毫米。

例4. 内齿轮：见图 1-7。

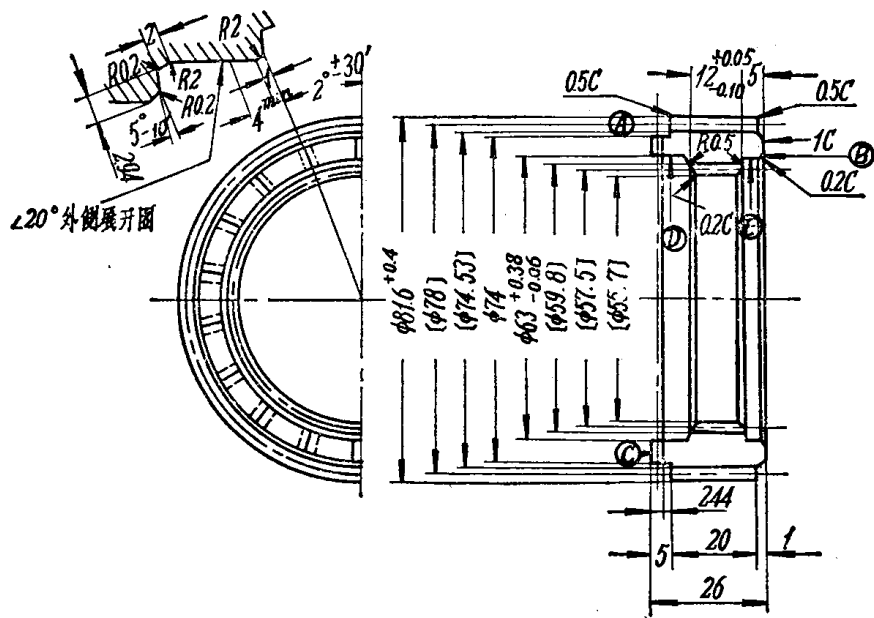


图1-7 内齿轮

齿 轮 参 数

	内 齿	外 齿		内 齿	外 齿
齿 形	渐 开 线	渐 开 线	修正系数	0.25	0
模 数	1	1.5	修 正 量	+ 0.25	0
齿 数	57	52	齿 高	2.05	3.536
压 力 角	20°	20°	公法线长度		25.447(6 齿)

说明：① φ55.7 与 φ81.6 部对 φ63 内径之跳动要小于 0.20(0.15)；
 ② B 面对 A 面的平行度小于 0.10(0.05)；
 ③ 切削加工时，需将 C 面与 φ55.7 内径对正后切削 B、E，A、D 及 φ74 必须对正 B、E 后进行切削；
 ④ [] 内示参考尺寸。

化 学 成 分 (%)			物 理 - 力 学 性 能		
Fe	Cu	C	密 度 (克/厘米 ³)	抗拉强度 (公斤/毫米 ²)	硬 度 (HRC)
余 量	18~25	0.3~0.9	7.2~7.6	50~60	20~40

硬度是渗碳、淬火后测定的。

2. 凸轮类零件

凸轮形状不规则，加工复杂，但用粉末冶金法可非常经济的大量生产。

例1. 8毫米电影放映机胶卷传送装置的凸轮：见图1-8。

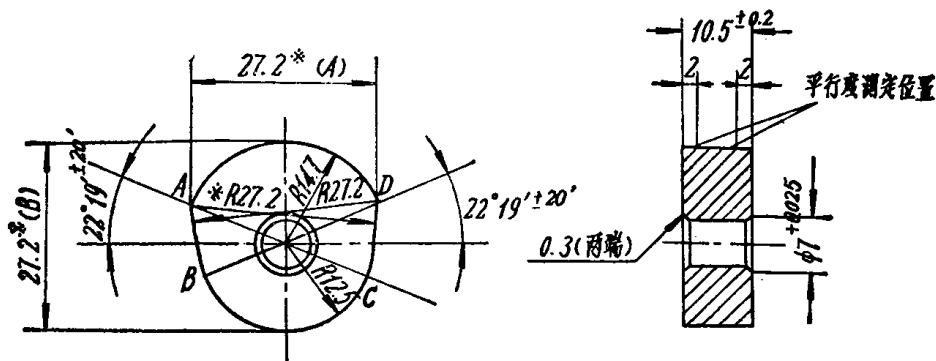


图1-8 8毫米电影放映机凸轮

注：①外周对 $\phi 7$ 内径的平行度小于0.02；②两端面对 $\phi 7$ 内径的跳动小于0.05，③R14.7对 $\phi 7$ 内径的跳动小于0.03；④R12.5对 $\phi 7$ 内径的跳动小于0.03；⑤R14.7与R12.5之差（冲程）为 2.2 ± 0.035 ；⑥从A点至CD，从D点至AB及从AD径中心线至BC的标称尺寸为 27.2 ± 0.02 ；但是，就各个制品而言，若(A) > (B)，则其差应小于0.015；⑦凸轮面不得有凸起、刻痕。

化 学 成 分 (%)			物 理 - 力 学 性 能			
Fe	Cu	C	密 度 (克/厘米 ³)	抗拉强度 (公斤/毫米 ²)	延 伸 率 (%)	硬 度 (HV)
余 量	1~3	0~1.5	6.2~6.4	>15	>1	>60

3. 其它零件

例1. 凿岩机螺旋螺母：见图1-9。

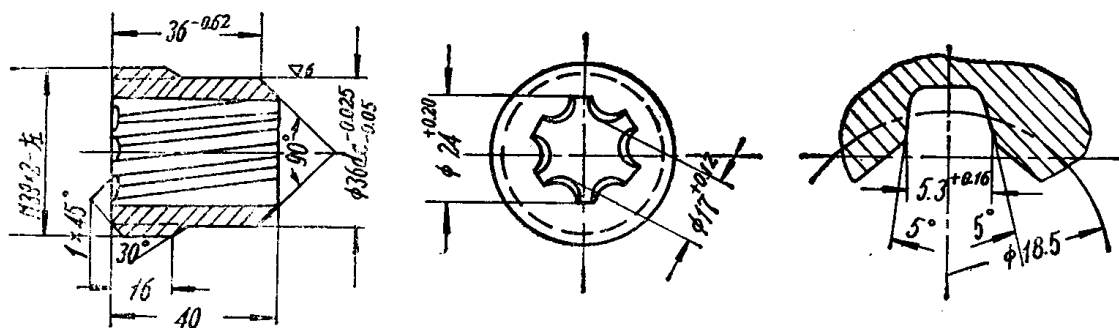


图1-9 凿岩机螺旋螺母

化 学 成 分 (%)				物 理 - 力 学 性 能		
Fe	Cu	Mo	C	密 度 (克/厘米 ³)	抗拉强度 (公斤/毫米 ²)	硬 度 (HRC)
余 量	2.5	0.50	1	≥6.5	60	15~35

注：抗拉强度与硬度都是热处理后测定的。

例2. 叶片泵配油盘：见图 1-10。

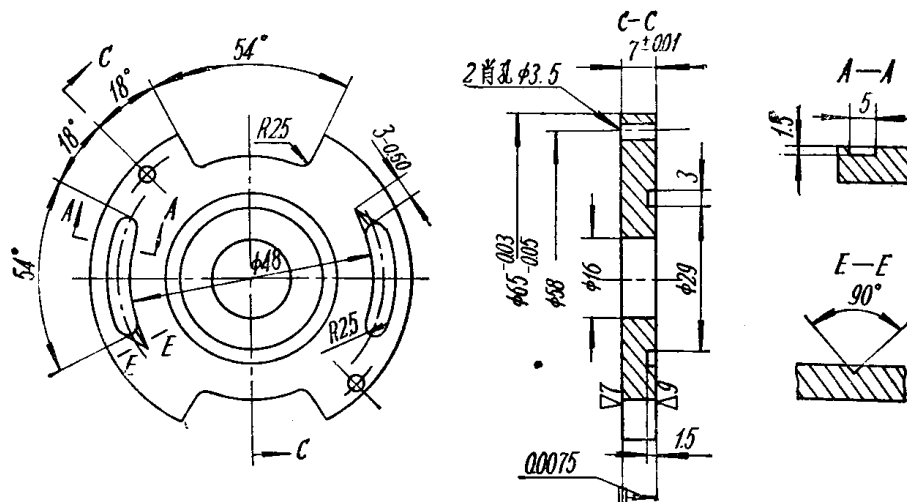


图1-10 叶片泵配油盘 (左)

化 学 成 分 (%)		物 理 - 力 学 性 能	
Fe	C	密 度 (克/厘米 ³)	硬 度 (HB)
98.5	1.5	6.3	160~180

例3. 6000 千瓦汽轮机隔叶筋: 见图 1-11。

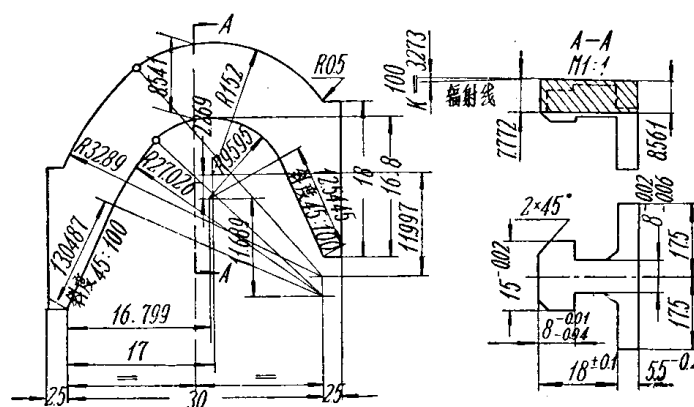


图1-11 汽轮机隔叶筋

化 学 成 分 (%)		物 理 - 力 学 性 能			
Fe	Cu	密 度 (克/厘米 ³)	抗拉强度 (公斤/毫米 ²)	硬 度 (HB)	冲 击 值 (公斤·米/厘米 ²)
余 量	15~25	7.4~7.5	>40	>140	>2

铜是用熔浸法加入的。

第二章 粉末冶金材料及其性能

由于粉末冶金工艺的特点，粉末冶金零件内部或多或少有一定的孔隙，因此，与化学成分相同的铸、锻材料相比，力学性能较低。其减低的程度取决于孔隙率的高低。图 2-1 是几种金属与合金的抗拉强度与孔隙率的关系。由此可见，各种粉末冶金材料都具有相同的变化倾向，即抗拉强度随着孔隙率减小而增高。图 2-2 是粉末冶金纯铁的密度与硬度和延伸率的关系。硬度大体上与材料密度成比例的增高。而延伸率当密度低于 6.2 克/厘米^3 左右时，增长较慢；高于 6.2 克/厘米^3 时，急剧增高。因此，零件的多孔性，一方面具有含油性这一有利的一面，另一方面又有降低力学性能这一本质性的缺点。粉末冶金机械结构零件制造中的一个长期的重大课题就是怎样减少或消除残留孔隙，提高材料的力学性能。关于这一点下面将予以叙述。

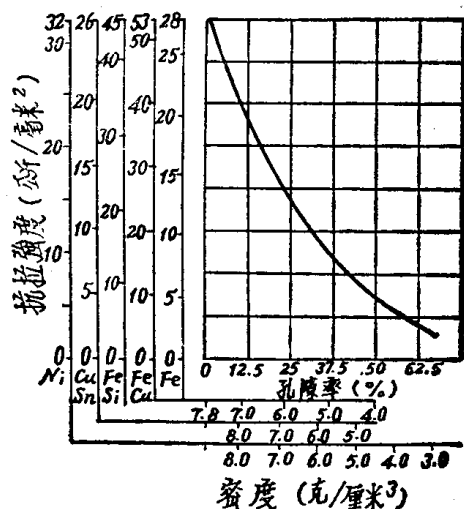


图2-1 孔隙率与抗拉强度的关系

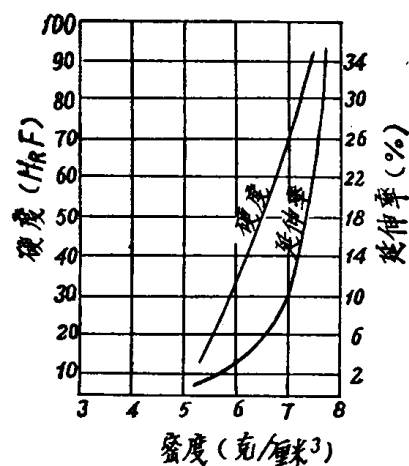


图2-2 材料密度与硬度和延伸率的关系

第一节 粉末冶金铁基材料

现在，粉末冶金铁基材料依据其使用的原料粉末和制造工艺，可大致分为预混合粉制烧结材料、预合金粉制烧结材料及熔浸烧结材料三类，分别叙述如下。

1. 预混合粉制烧结材料

目前使用最多的是预混合粉制烧结材料。所谓预混合粉，系指将各种元素粉末，如：石墨粉、铜粉、镍粉、钼粉等一种或几种同时混入铁粉中，配制成的混合粉。

(1) 烧结铁: 烧结铁系指由纯铁粉制造之烧结材料。性能与纯铁相似, 强度不高。多用于低密度的含油轴承与高密度的磁芯。用于制造普通机械结构零件时, 因硬度偏低, 需经渗碳-淬火后使用。图 2-3 是烧结铁的密度与抗拉强度、硬度及延伸率的关系。图 2-4、图 2-5、图 2-6 是烧结铁的密度与杨氏模数、横弹性模数、泊松比的关系。表 2-1 是烧结铁的密度与冲击强度的关系。表 2-2 是烧结铁的密度与疲劳强度(弯曲)的关系。烧结铁的热

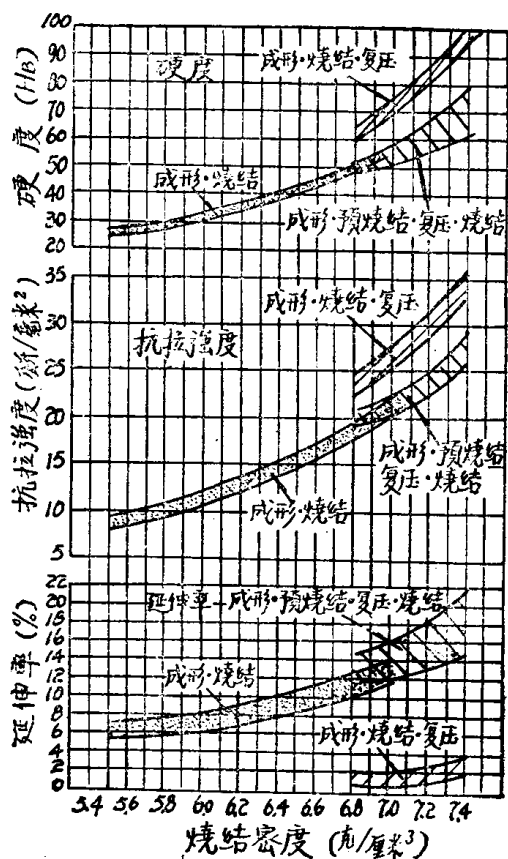


图2-3 烧结铁的密度与抗拉强度、硬度及延伸率的关系

材料的化学成分：化合碳 $<0.1\%$ ，其它(S、P、Mn、 SiO_2) $<2.5\%$ ，余量Fe。

原料粉末：还原铁粉。

处理条件：成形压力 $2\sim 8$ 吨/厘米²；预烧结 $850\sim 1150^\circ\text{C}$ ，60分钟；二次压制压力 $4\sim 8$ 吨/厘米²，烧结 $1150\sim 1250^\circ\text{C}$ ，60分钟；烧结气氛， H_2 或 NH_3 分解气体。

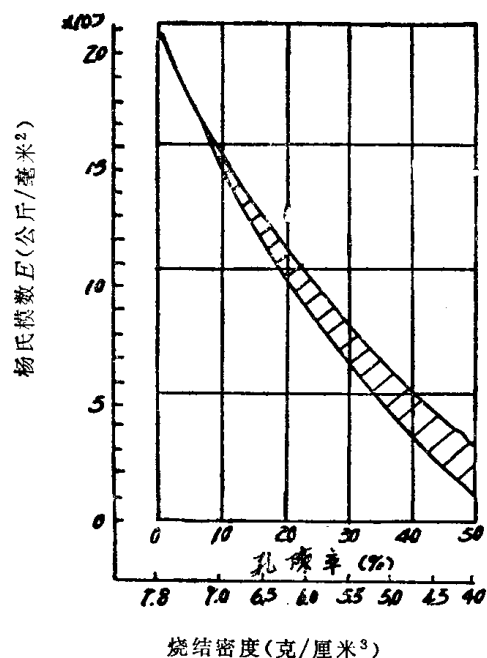


图2-4 烧结铁的密度与杨氏模数的关系

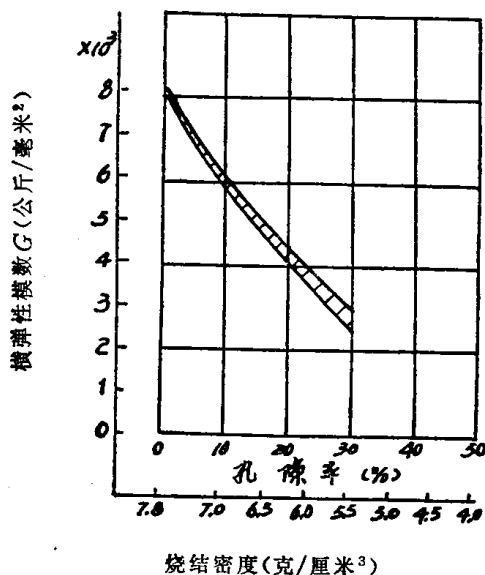


图2-5 烧结铁的密度与横弹性模数的关系

表2-1 烧结铁的密度与冲击强度的关系

化 学 组 成 (%)	密 度 (克/厘米 ³)	冲击强度(夏比值 公斤-米/厘米 ²)
化合碳小于0.1	5.7~6.1	<1.0
杂质(S、P、Mn、 SiO_2)小于2.5	6.1~6.5	<1.5
Fe 余量	6.5~6.9	<2.5
	6.9~7.6	3.0~10.0

导率，当密度为 $5.8\sim 6.2$ 克/厘米³时，为 $0.074\sim 0.096$ 卡/厘米 $\cdot^\circ\text{C}\cdot$ 秒（普通纯铁为 $0.120\sim 0.142$ 卡/厘米 $\cdot^\circ\text{C}\cdot$ 秒）；热膨胀系数在 $0\sim 100^\circ\text{C}$ 间为 $12\sim 13\times 10^{-6}$ ，与材料密度几乎无关。图2-7是密度为 6.8 克/厘米³时烧结铁的显微组织。

表2-2 烧结铁的密度与弯曲疲劳强度和抗拉强度的关系

材料名称	密度 (克/厘米 ³)	疲劳强度 σ_w (公斤/毫米 ²)	抗拉强度 σ_b (公斤/毫米 ²)	耐久极限比 $\frac{\sigma_w}{\sigma_b}$	备 注
烧 结 铁	6.1	4.7	13.5	0.35	原料粉末: 还原铁粉 成形压力: 3~5吨/厘米 ² 烧 结: 1150°C, 60分钟, H ₂ 中
	6.4	5.6	14.7	0.38	
	6.9	8.1	18.2	0.44	原料粉末: 还原铁粉 成形压力: 5吨/厘米 ² 预 烧 结: 1000°C, 30分, H ₂ 中 复压压力: 5~9吨/厘米 ² 烧 结: 1150°C, 60分, H ₂ 中
	7.2	10.3	20.5	0.50	
低碳钢(0.13~0.19%C)	—	19~20	27~29	0.44~0.49	
普通铸铁(3.5%C, 2.0%Si, 0.6%Mn, 0.5%P)	—	6.5	28	0.23	
特种铸铁	—	14	24	0.55	

注: ① 试验机为1800~3600循环/分钟的疲劳(弯曲)试验机;

② 疲劳强度为10⁷的交变负荷。

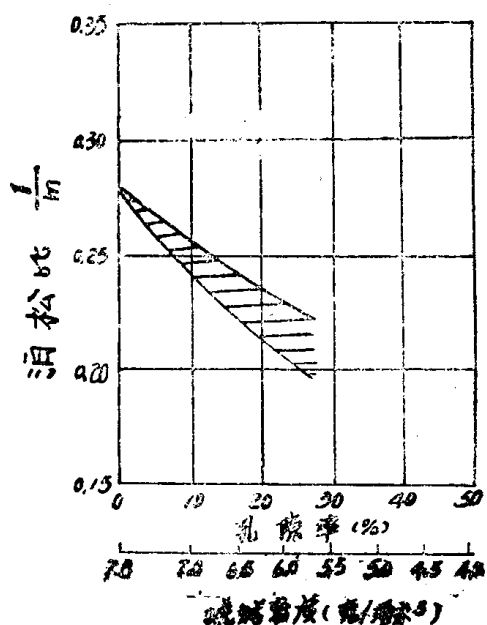


图2-6 烧结铁的密度与泊松比的关系

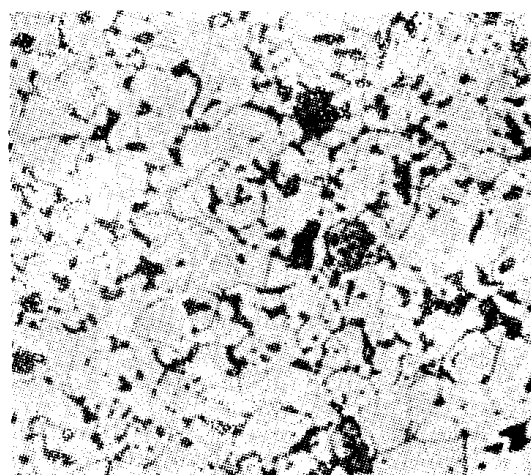


图2-7 烧结铁的显微组织 ×200

材料密度: 6.7克/厘米³;

烧结条件: 1150°C, 60分钟, H₂中;

(黑点是孔隙)

由上述知, 烧结铁的物理-力学性能与材料密度密切相关, 要想增高烧结铁的力学性能, 就必须增高密度或减小孔隙率, 但这在工业上是有一定限度的。图 2-8 是还原铁粉的成形压力与压坯密度的关系。由此可见: 成形压力为 4 吨/厘米² 时, 压坯密度约为铁的理论密度值的 78%。成形压力为 8 吨/厘米² 时, 约为理论密度值的 90%。在工业生产中, 考虑到压模的强度与寿命, 一般皆将成形压力限制在 4~6 吨/厘米², 不高于 7 吨/厘米²。因此, 铁粉压坯的密度一般为 6.0~6.6 克/厘米³ 左右。虽在烧结时, 可借增高烧结温度来强化烧结收缩, 也能获得高于 6.6 克/厘米³ 的密度, 但由于工业烧结炉结构上的限制, 也是不现实的。因此, 在利用现有设备的条件下, 提高压坯密度的比较现实的方法是二次压制-二次烧结法。这个方法是

将压制成形-预烧结的压坯，装于压模中进行第二次压制（或复压），然后进行高温烧结。对于较软的烧结材料这是一种颇为有效的方法。表 2-3 是二次压制-二次烧结时，烧结铁的孔隙率的变化。表 2-4 是烧结铁的性能与密度和制造工艺的关系。

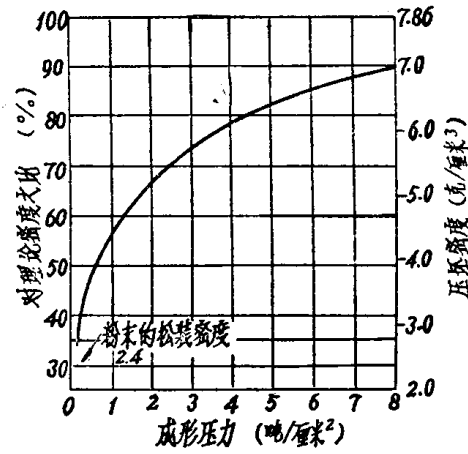


图2-8 还原铁粉的成形压力与压坯密度的关系

表2-3 二次压制-二次烧结时
烧结铁的孔隙率的变化

工 序 与 工 艺 制 度	孔隙率(%)	孔隙率的变化
第一次压制， 压力 6 吨/厘米 ²	13.1	100
预 烧 结， 850℃，1 小时	12.6	96.1
第二次压制， 压力 6 吨/厘米 ²	7.8	55.7
烧 结， 1250℃，2 小时	6.3	49.0

表2-4 烧结铁的性能与密度和制造工艺的关系

密 度 (克/厘米 ³)	压制和于1150℃下烧结			压制—于1150℃烧结—二次压制			二 次 压 制 与 烧 结		
	抗拉强度极限 (公斤/毫米 ²)	延 伸 率 (%)	硬 度 (HB)	抗拉强度极限 (公斤/毫米 ²)	延 伸 率 (%)	硬 度 (HB)	抗拉强度极限 (公斤/毫米 ²)	延伸率 (%)	硬 度 (HB)
5.5	9	6~7	27	—	—	—	—	—	—
6.3	14	8~10	38	—	—	—	—	—	—
6.8	17	10~12	46	23	1~2	62	21	12~15	50
7.0	19	11~13	50	27	1~2	73	23	13~15	58
7.3	—	—	—	32	1~2	94	25	13~15	59
7.4	—	—	—	33	1~1.5	96	28	20~22	76

由表 2-4 可看出，密度相同，但制造工艺不同时，烧结铁的性能也不同。二次 压 制-二 次 烧 结 者 的 力 学 性 能 都 比 一 次 压 制、烧 结 时 高，这 一 点 应 予 以 注 意。

（2）烧结铁—碳合金：在普通钢中，碳是一种最重要的合金元素。在粉末冶金铁基零件制造中，适量地加入碳，使之扩散形成铁—碳合金，也能大大提高材料的力学性能。

烧结铁—碳合金的制造方法，大体上有三种，即预混合法、预合金化法及渗碳法。

① 预混合法：预混合法，是将铁粉与适量的石墨粉或炭黑粉或铸铁粉配制混合成适当组成的混合粉，压制成形后，在保护气氛中烧结，以制成铁—碳合金制品。

在工业上，多以铁—石墨的混合粉为原料制造烧结铁—碳合金制品。这时，铁粉的含碳量应很低且稳定；石墨粉的纯度要高，粒度应小于 100 微米。

低负荷烧结铁—碳合金零件，如：垫圈、衬套、链轮等的制造工艺^[12]是，在铁粉中混入 1.5% 铅笔石墨粉，于 7~8 吨/厘米² 下压制成形，在掺有 0.5~1% 天然气的吸热性煤气中、于 1050℃ 烧结 2 小时。零件的孔隙率为 20~25%。

负荷较高的烧结铁—碳合金零件，系以 99.5% 铁粉，0.5% 铅笔石墨粉为原料粉，按照

上述工艺进行第一次压制和烧结后，再于 10 吨/厘米² 下进行复压，最后，在水中淬火。其力学性能如表 2-5 所示。

表2-5 烧结铁—碳合金的力学性能

化学成分*(%)		密 度 (克/厘米 ³)	抗拉强度 (公斤/毫米 ²)	抗弯强度 (公斤/毫米 ²)	抗压强度 (公斤/毫米 ²)	冲 击 值 (公斤-米/厘米 ²)	硬 度 (HB)	延 伸 率 (%)
铁	石 墨							
98.5	1.5	6.0	20~24	—	75~80	0.3~0.4	50~70	—
99.5	0.5	7.0	28~33	60~70	—	0.9~1.0	—	0.9~1.2

* 指预混合粉的组成。

图 2-9 与图 2-10 是加入 1.1% 与 1.5% 石墨粉的烧结铁—碳合金的抗拉强度、延伸率及硬度与材料密度的关系。表 2-6 是不同密度时的冲击强度的概略值。图 2-11 与图 2-12 分别是密度 6.6 克/厘米³ 的烧结铁-1.1% 碳合金与铁-1.5% 碳合金的金相组织。

工业上，虽然正在以铁粉与石墨粉的预混合粉为原料粉，大量地生产烧结铁-碳合金制品。但是，到目前为止，在生产条件下还很难保证制造的材料组织稳定。这主要表现为材料

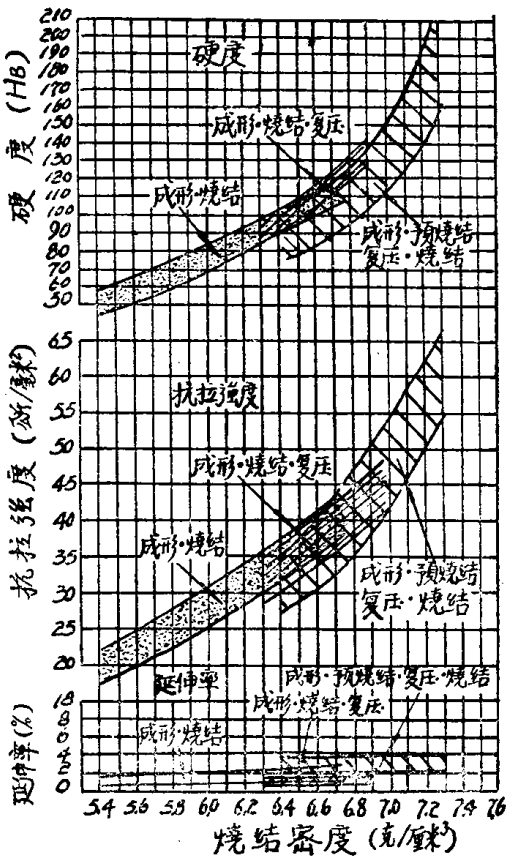


图2-9 铁-1.1% 碳烧结合金的密度与抗拉强度、延伸率及硬度的关系

化学组成：C_{化合}0.7~0.8%，杂质（S、P、Mn、SiO₂等）<2.5%，余量Fe。

原料粉末：还原铁粉，天然石墨粉。

处理条件：成形压力 2~8 吨/厘米²，预烧结 850~1150℃，60 分钟；复压压力 4~8 吨/厘米²，烧结 1150~1250℃，60 分钟。烧结气氛 H₂ 或 NH₃ 分解气体。

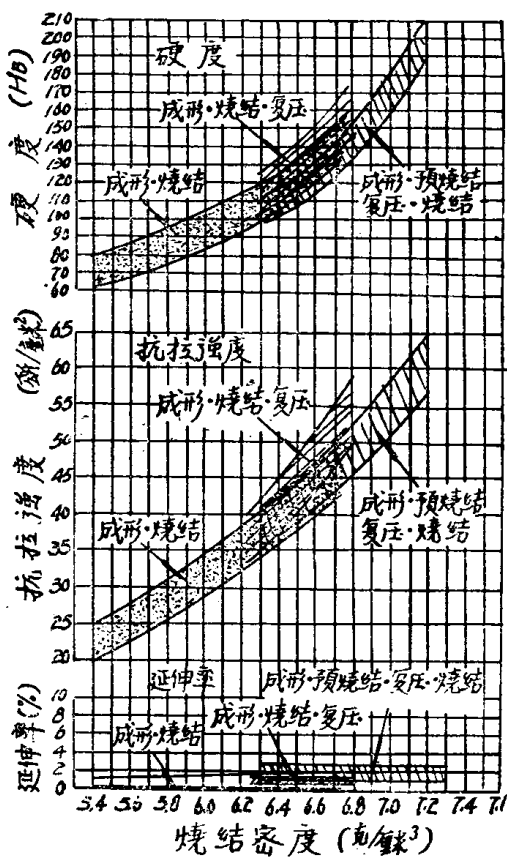


图2-10 铁-1.5% 碳烧结合金的密度与抗拉强度、延伸率及硬度的关系

化学组成：C_{化合}1.1~1.2%，杂质（S、P、Mn、SiO₂等）<2.5%，余量Fe。

原料粉末：还原铁粉，天然石墨粉。

处理条件：成形压力，2~8 吨/厘米²，预烧结 850~1150℃，60 分钟；复压压力 4~8 吨/厘米²，烧结 1150~1250℃，60 分钟。烧结气氛 H₂ 或 NH₃ 分解气体。

表2-6 烧结铁-碳合金的冲击强度

化 学 成 分 (%)	材 料 密 度 (克/厘米 ³)	冲 击 强 度 (夏比值, 公斤-米/厘米 ²)
C _{化合} 0.7~1.2	5.7~6.1	<1.0
杂质(S、P、Mn、SiO ₂) <2.5	6.1~6.5	<1.5
Fe 余量	6.5~6.9	<2.0
	6.9~7.6	2.5~5.0



图2-11 铁-1.1%碳烧结合金的
显微组织 ×400

材料密度: 6.6克/厘米³

烧结条件: 1150°C, 60 分钟, H₂ 中 (基体珠光体组织, 黑点是孔隙)

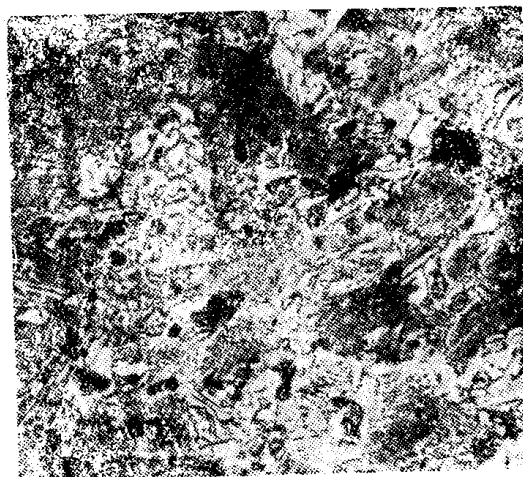


图2-12 铁-1.5%碳烧结合金的
显微组织 ×100

材料密度: 6.6克/厘米³

烧结条件: 1150°C, 60 分钟, H₂ 中 (晶界有 Fe₃C 存在的珠光体组织, 黑点是孔隙)

组织中的珠光体、铁素体及游离石墨的比率不一样, 和有游离渗碳体出现。这是由于铁与石墨的比重相差大, 预混合粉组成不均匀, 铁粉的含氧量高且不稳定, 烧结时烧结气氛的脱碳作用, 烧结时的温度与等温烧结时间及其它因素所致。图 2-13 是在组成为 28%CO 与 72% H₂ 的气氛中烧结时, 石墨加入量与烧结合金的含碳量的关系。由图可见: 即使在 CO 含量这样高的气氛中烧结, 石墨加入量多时, 烧结合金的含碳量也只有石墨加入量的 60%左右;

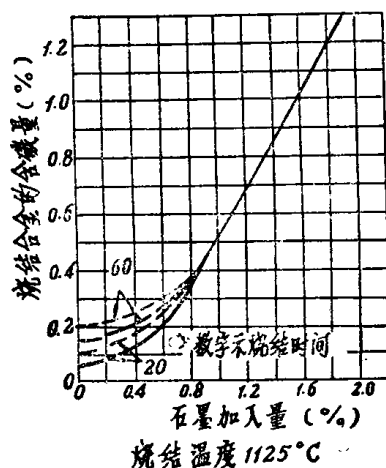


图2-13 石墨加入量与烧结合金的含碳量的关系

石墨加入量少时, 烧结合金的含碳量波动相当大。

为消除铁-石墨混合粉中石墨的比重偏析, 研究了以铸铁粉取代石墨粉的方法^[12]。铸铁粉采用白口铁粉, 化学成分为: C_总 3.2~3.4%; C_{游离} <0.5%; Mn 0.4~0.5%; Si 1.4~1.8%; P <0.1%, S <0.1%。白口铁粉的粒度应小于 150 微米。

以铁粉与白口铁粉的预混合粉, 制造中等负荷零件的工艺过程是: 按 20~30% 白口铁粉与 80~70% 铁粉配制混合预混合粉。为了改善混合粉的压制性, 混合粉中可加入 0.4~0.6% 硬脂酸锌或 1% 机油。于 5~6 吨/厘米² 压力下成形, 在露点 -30°C 的保护气氛中、于 680~700°C 下预烧结 1~2 小时。再在 8~9 吨/厘米² 压力下复压, 最后,