

郑凤麟 主编



粉末冶金机械零件

机械工业出版社

粉末冶金机械零件

韩凤麟 编著



机械工业出版社

粉末冶金机械零件也叫做烧结机械零件,是指用粉末冶金法制造的机械结构零件、滑动轴承及摩擦材料制品。近三十年来,粉末冶金机械零件的生产一直在迅速发展,在飞机、汽车、农机、工程机械、通用机械、仪器仪表、电动工具、微电机、录音机、录象机、洗衣机、缝纫机、电风扇、电冰箱等制造中都得到了广泛应用。

为使机械制造工业中的广大工程技术人员系统地了解粉末冶金机械零件的设计、材料性能、制造工艺及使用特点,本书分四篇十四章对粉末冶金机械结构零件、烧结金属轴承及烧结金属摩擦材料制品进行了比较系统的论述。

第一篇共四章,论述了粉末冶金机械零件在机械制造工业中的作用,制造粉末冶金机械零件所用的原料粉末,以及粉末冶金机械零件的制造过程和后续加工。

第二篇共三章,论述了粉末冶金齿轮、凸轮、链轮、棘轮等机械结构零件的设计、材料性能及应用。

第三篇共三章,论述了多孔性自润滑轴承、钢—铜铅合金双金属轴承、DU轴承以及金属石墨轴承等烧结金属轴承的设计原理、材料性能、润滑理论及使用特点。

第四篇共四章,论述烧结金属摩擦材料制品(其中包括铁基与铜基摩擦材料)的制造工艺、材料性能、设计原理和应用。

本书可供生产、使用、研究粉末冶金机械结构零件、烧结金属轴承及烧结金属摩擦材料制品的技术人员参考,也可供高等学校机械制造、汽车制造、农机制造、金属材料、粉末冶金等专业的师生作为机械零件的补充教材。

粉末冶金机械零件

韩凤麟 编著

责任编辑:张绪江

封面设计:郭景云

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南里一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

中国农业机械出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 787×1092 1/16·印张 33 1/4·插页 2·字数 819 千字

1987年12月北京第一版·1987年12月北京第一次印刷

印数 0,001—2,510·定价:10.20 元

统一书号:15033·6526

前 言

粉末冶金是一门重要的材料制造技术。现代科学技术发展中的多种重要材料都是用粉末冶金制造的。

粉末冶金将材料制造-加工-制品(或零件)制造巧妙地结合了起来。在制造材料的同时,赋予了材料以各种机械零件的形状,如齿轮、凸轮、链轮、球面轴承等。因此,粉末冶金和铸造、锻造一样,也是制造机械零件成品或半成品的一门金属成形技术。

在粉末冶金制品中产量最大,应用面最广的是机械零件,通常称之为粉末冶金机械零件或烧结机械零件。本书所讲的粉末冶金机械零件包括粉末冶金机械结构零件、烧结金属滑动轴承(多孔性自润滑轴承、双金属轴承、DU轴承等)及烧结金属摩擦材料制品。

粉末冶金机械结构零件也可用其它金属成形方法制造,但用粉末冶金法生产时,节约资源、节省能源、降低成本、经济效益显著。因此,粉末冶金机械结构零件的生产近三十年来得到了迅猛发展,并在机械制造工业中,特别是汽车工业中得到了广泛应用。

烧结金属含油轴承是一类只能用粉末冶金法制造的特殊材料制品。含油轴承是录音机、录象机、洗衣机、电风扇等家用电器和音响机械的关键零件,年消耗量数以亿件计。

烧结金属摩擦材料是制造离合器、制动器的关键材料。这类材料只能用粉末冶金制造。现在飞机中的盘式制动器全部是用烧结金属摩擦材料制造的。此外,在工程机械、重型车辆、船舶、农机、锻压设备中也得到广泛应用。

虽然,粉末冶金机械零件在机械制造工业中应用十分广泛,但我国的机械制造工业中应用却不多。其中一个重要原因是机械制造工业中的广大工程技术人员对粉末冶金机械零件缺乏系统的了解。

近三十年来,各工业先进国家对粉末冶金机械零件的生产、材料性能、设计方法、应用试验进行了大量的研究试验,全世界每年发表的论文、资料、专利数以千篇计,这些文献资料散见于各国的杂志、专利、会议论文集及专著中。为适应我国机械工业迅速发展的需要,使广大工程技术人员能较快地、较系统地了解粉末冶金机械零件,为此编写这本书。书中对粉末冶金机械结构零件、烧结金属滑动轴承、烧结金属摩擦材料制品的设计原则、制造工艺、材料性能、检验方法、应用状况及发展前景等都较系统地进行了论述。

本书可供生产、使用、研究粉末冶金机械结构零件、烧结金属轴承及烧结金属摩擦材料制品的技术人员参考,也可供高等工科院校机械制造、金属材料、粉末冶金等专业的师生作为补充教材。

本书初稿承蒙北京钢铁学院赖和怡教授修改和审阅,特致以衷心谢意。由于作者学识粗浅,谬误不当之外,敬请指正。

编著者1984年12月于北京

基本符号

A ——断面收缩率(%)	T ——温度($^{\circ}\text{C}$);壁厚(mm)
A_i ——冲击功(kgf·m)	T_r ——反应温度($^{\circ}\text{C}$)
A_p ——接触面积、面积(cm^2, mm^2)	t ——时间(s, min, h)
a ——偏心量(cm)	U ——比压极限(kgf/ cm^2);热膨胀系数
b ——轴承宽度、齿宽(mm)	V ——体积(mm^3, cm^3);滑动速度(m/s, m/min)
C ——接触热容量(J/ $\text{cm}^3\cdot^{\circ}\text{K}$)	v ——速度(m/s, m/min)
C_n ——摆动频率(次/min)	W ——断面面积(cm^2, mm^2);功(kgf·m)
c ——半径间隙(mm)	y ——齿形系数
D ——直径(mm)	z ——齿数
d ——直径、节径(mm)	α ——压力角($^{\circ}$)
d_o ——接触密度	α_A ——接触面积率(%)
d_L ——熔液密度(g/cm^3)	α_i ——冲击韧性(kgf·m/ cm^2)
E ——弹性模量、正弹性系数(kgf/ mm^2)	$\alpha_{\text{稳}}$ ——摩擦力矩稳定性, 摩擦系数稳定性
E_A ——吸附能(cal/ cm^2)	β ——体积膨胀系数
E_o ——间隙值(mm)	γ ——密度(g/cm^3)
F_o ——摩擦功(kgf·m)	Δ_s ——Sommerfeld数
F ——摩擦力(kgf)	δ ——延伸率(%)
F_o ——过盈量(mm)	ϵ_s ——容许接触应力(kgf/ mm^2)
f ——力(kgf);挠度(mm);系数	ϵ ——材料利用率(%);偏心率
g ——重力加速度(m/s^2)	ϵ_s ——应变量
H ——压入硬度(kgf/ mm^2)	η ——粘度(P, CP);多片效率
H_s, HB_s ——烧结铁的硬度(kgf/ mm^2)	θ ——温度
h ——油膜厚度(mm)	θ ——孔隙度(%)
I ——惯性力矩(kgf·m· s^2)	λ ——热导性或电导性, 热导率(cal($\text{cm}\cdot\text{s}$ · $^{\circ}\text{C}$))]
i ——磨损($\mu\text{m}/\text{km}, \text{g}/\text{h}, \text{mm}, \text{mm}/\text{h}$);磨损 率、比磨损($\text{mm}^3/\text{kW}\cdot\text{h}, \text{mm}^3/\text{HP}\cdot\text{h}$)	μ ——摩擦系数
L ——距离(mm);长度(mm)	ν ——波松比(无量纲)
l_o ——厚度(mm);长度(mm)	ρ ——电阻率($\mu\Omega\cdot\text{cm}$);相对密度(%)
M ——扭矩(kgf·m)	σ ——材料强度(kgf/ mm^2)
M_J ——摩擦力矩(kgf·m)	σ_b ——抗拉强度(kgf/ mm^2)
M_g ——滑动力矩(kg·m)	σ_{bb} ——抗弯强度(kgf/ mm^2)
m ——模数、系数	σ_{bo} ——抗压强度(kgf/ mm^2)
N, n ——转速(r/min)	σ_s ——安全应力(kgf/ mm^2)
P ——负荷、重量(kgf)	σ_w ——疲劳强度(kgf/ mm^2)
P_D ——径节	σ_r ——屈服应力(kgf/ mm^2)
P_m ——流动压力(kgf/ mm^2)	$\sigma_{\text{液-气}}$ ——液相—气相界面处液体的表面张力(dyn / cm^2)
P_A ——压入负荷(kgf)	τ ——剪切强度(kgf/ mm^2)
p ——比压(kgf/ $\text{mm}^2, \text{kgf}/\text{cm}^2$)	ϕ ——透过性(darcy)
R, r ——半径(mm)	ω ——角速度($^{\circ}/\text{s}$)
S ——安全系数	ψ ——多孔性因子—无量纲量
S_A ——接触面积(cm^2)	

目 录

基本符号

第一篇 烧结机械零件生产概论

第一章 概论	1
第一节 烧结机械零件的基本制造过程	3
第二节 粉末冶金发展简史	4
第三节 我国粉末冶金工业的发展	7
第四节 粉末冶金在机械制造业中的作用	8
参考文献	10
第二章 金属粉末	11
第一节 金属粉末的主要制造方法	11
第二节 金属粉末的性能	15
第三节 粉末性能的测定	20
参考文献	25
第三章 烧结机械零件的制造过程	26
第一节 粉末的调整与混合	26
第二节 压制成形	38
第三节 烧结	63
参考文献	79
第四章 烧结机械零件生产中的后续加工	80
第一节 复压、热锻及热复压	80
第二节 热处理	82
第三节 水蒸汽处理	91
第四节 表面处理	97
第五节 联接	103
第六节 机械加工	107
参考文献	113

第二篇 烧结机械结构零件

第五章 烧结机械结构零件的经济性与应用	115
第一节 烧结结构零件的发展与现状	115
第二节 烧结结构零件的经济性	124
第三节 烧结结构零件的应用	131
参考文献	147
第六章 烧结机械结构零件材料	149
第一节 残留孔隙与材料性能的关系	150
第二节 烧结铁基材料中的合金元素与合金化方法	153

第三节 预混合粉制烧结铁基结构材料	159
第四节 预合金粉制烧结铁基结构材料	188
第五节 渗铜烧结钢	203
第六节 烧结有色金属与合金	207
参考文献	223
第七章 烧结机械结构零件的形状与尺寸设计	225
第一节 零件的形状、尺寸及尺寸精度设计	225
第二节 烧结齿轮设计	233
第三节 烧结链轮设计	251
第四节 烧结棘轮设计	255
第五节 烧结凸轮设计	258
第六节 烧结啮合离合器设计	264
参考文献	266

第三篇 烧结金属轴承

第八章 绪论	267
第一节 烧结金属轴承在机械制造中的作用	267
第二节 烧结金属轴承的发展与现状	269
第三节 摩擦、磨损与润滑	273
第四节 烧结金属含油轴承的润滑理论	287
参考文献	298
第九章 烧结金属轴承材料	300
第一节 烧结铁基轴承材料	300
第二节 烧结青铜基轴承材料	328
第三节 烧结金属石墨轴承材料	340
第四节 钢—烧结轴承合金复合材料	347
第五节 烧结铝基轴承材料	362
参考文献	369
第十章 烧结金属轴承设计	371
第一节 烧结金属含油轴承设计	371
第二节 金属石墨轴承设计	382
第三节 钢背—铜铅合金轴承设计	388
第四节 DU干摩擦轴承设计	406
参考文献	413

第四篇 烧结金属摩擦零件

第十一章 概论	414
第一节 烧结金属摩擦材料的发展史	415
第二节 对摩擦材料的要求	417
第三节 摩擦材料的摩擦与磨损	419
第四节 烧结金属摩擦材料与其制造工艺的现状和发展方向	425
参考文献	428

第十二章 烧结金属摩擦零件的制造过程.....	430
第一节 原料粉末.....	430
第二节 原料粉末的混合.....	435
第三节 支承钢板的制备.....	437
第四节 压制成形.....	439
第五节 烧结.....	442
第六节 后续处理.....	459
第七节 质量检验.....	461
第八节 两种特殊制造方法.....	465
参考文献.....	471
第十三章 烧结金属摩擦材料.....	473
第一节 烧结金属摩擦材料的组份.....	473
第二节 干式烧结金属摩擦材料.....	484
第三节 湿式烧结金属摩擦材料.....	492
第四节 制造对偶件用的材料.....	495
参考文献.....	498
第十四章 烧结金属摩擦零件的设计与应用.....	500
第一节 摩擦零件的形状与尺寸.....	500
第二节 表面油沟花纹的选择.....	505
第三节 对偶片设计.....	508
第四节 铜基烧结摩擦片设计.....	509
第五节 烧结金属摩擦材料的应用.....	515
参考文献.....	519
附 录	520

第一篇 烧结机械零件 生产概论

第一章 概 论

粉末冶金是一门制造金属粉末和用金属粉末成形与烧结制造金属材料和技术学科。

用粉末冶金法制造的机械零件叫做粉末冶金机械零件,简称粉末冶金零件或烧结零件。

烧结机械零件是机械制造业中的一大类通用性基础零件。一般说来,它包括结构零件、减摩零件及摩擦零件。

烧结机构零件基本上可分为两类,一类是用其他方法不能制造的,如含油轴承、摩擦零件、多孔性金属制品、硬质合金与难熔金属制品等,因为这些烧结零件或制品只能用粉末冶金法制造,所以其技术经济效益是无法估量的;另一类是烧结机械结构零件,它们虽可用铸、锻、冲压、机械加工等工艺制造,但用粉末冶金法制造较经济。

烧结机械零件的基本生产过程,是混合金属粉末(有时加入非金属粉末),于压模中,在高压下将粉末混合物压制成形,然后在可控气氛中烧结成形的压坯。与其它方法不同,烧结零件是用精密压模直接由粉末混合物压制成形的;而铸件是由熔融金属铸造成形,锻轧金属零件是用热或冷塑性变形或用机械加工由锻轧金属材料成形的。烧结机械零件生产中没有熔炼过程。

烧结机械结构零件是粉末冶金工业中产量最大、应用面最广的一类产品。这类零件在二次世界大战时才崭露头角,在六十年代以后得到了飞速发展。图1-1示北美烧结铁基机械零件的生产发展状况,和图1-2示一些金属成形工艺在日本的发展概况。烧结机械零件之所以能

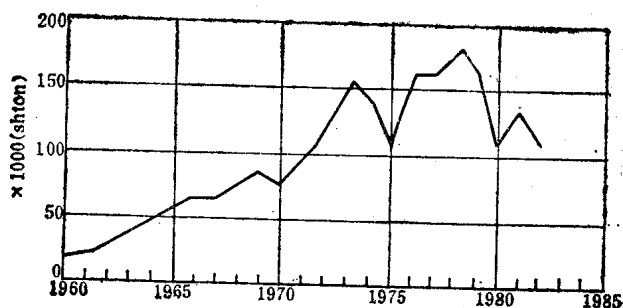


图1-1 1960~1980年北美烧结铁基零件生产发展状况⁽¹⁾

注: 1 sh-ton=907.185kg

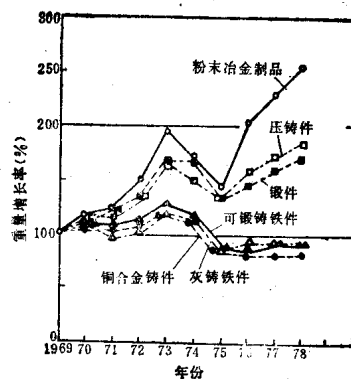


图1-2 一些金属成形工艺在日本的发展概况⁽²⁾

获得高速增长，主要因为它是一种经济的、生产速率高的制造精密零件的少、无切削制造技术。必要时，可用整形、精压、复压使烧结零件具有精密尺寸公差；还可浸以油、塑料或低熔点金属，以赋予烧结零件以特殊性能，如自润滑性。烧结零件也可进行热处理、电镀及机械加工。烧结机械零件压制成形时的生产速率一般为每小时几百件至几千件。

早期的烧结机械零件形状较简单，如含油轴承、垫圈之类。经过四十多年发展，现在用粉末冶金法已能经济地制造形状复杂、强度较高的零件。用粉末冶金法制造的齿轮，凸轮，带凸缘、带毂、有通孔或盲孔的异形件（图1-3）在汽车、摩托车、农机、业务机械、缝纫机等零件中都得到了广泛应用。

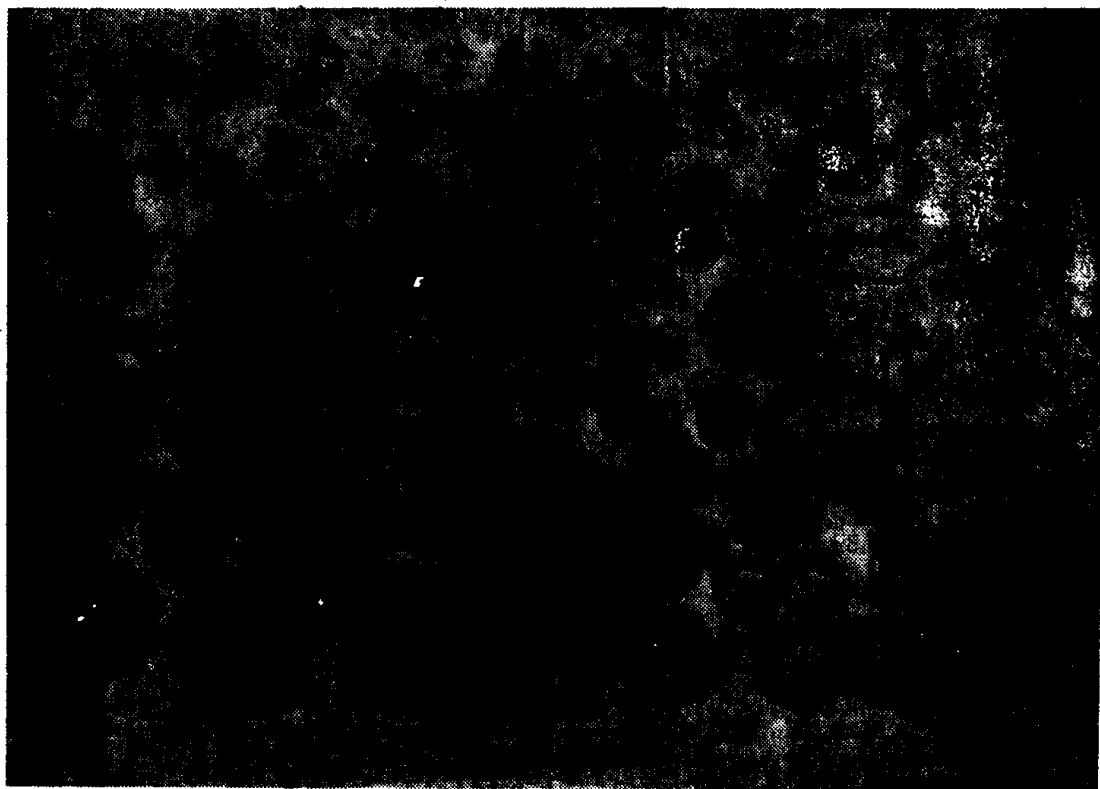


图1-3 烧结机械零件例

用传统粉末冶金法制造的烧结零件重量最高达15.87kg^[3]。用冷、热等静压制技术制造之烧结高速钢锭已重达1.8 t。可是，大多数烧结零件的重量不大于2.3kg，重量最小者仅0.2g左右。

烧结机械零件可用各种金属与合金制造，其中包括不能用熔铸法制造的复合材料等。用粉末冶金法可将多种金属与合金制成具有规定密度的零件（从密度低的多孔性零件至高密度结构零件）；也可制造机械性能能与铸、锻金属零件相比拟的烧结零件。

虽然，粉末冶金法较适合于大批量生产，零件批量愈大，用粉末冶金法生产愈经济，但是，在下列场合下，尽管零件的生产批量不大，用粉末冶金法制造在经济上仍然是适宜的，例如，模具费用较低、形状较简单的零件，根据粉末冶金工艺特点设计的零件，可将补充加工减少到最低限度的零件，全套或部分模具可用于制造几种零件。

鉴于粉末冶金技术的灵活性，正用它制造数以千计的工业产品中的各种机械零件，其中包括飞机、汽车、农机、工程机械、机床、业务机械、家用电器、日用机械、纺织机械、食品机械、电动工具、液压件、兵器等。

第一节 烧结机械零件的基本制造过程

金属粉末是制造烧结零件的基本原料。由于为制造烧结零件专门设计和生产了各种金属粉末，从而才能制造具有各种使用性能的烧结零件。

烧结零件的主要制造工序（图1-4），是粉末混合、压制成形及烧结。

混合是将金属或合金粉末与润滑剂（一般是金属硬脂酸盐）相混合，以获得各种组份均匀分布的粉末混合物。一般不加入粘结剂。润滑剂有助于金属粉末的压制成形和压坯的脱模；烧结时它将被挥发掉。

第二道工序是将一定量的粉末混合物装于精密压模中压制成形。这通常是在室温，于 $1.4\sim 8.4\text{tf/cm}^2$ 压力下进行的。形状简单的零件的成形过程，是将粉末混合物装于压模中，用上下模冲同时压制装于阴模中的粉末，上模冲退出，下模冲将压坯从阴模中顶出，将压坯移开，准备下一个压制循环（图1-5）。

下一道工序是烧结，就是于保护气氛炉中将压坯加热到较高温度（通常约为主要组份绝对熔点(K)的 $2/3$ ）。烧结基本上是一种固态扩散过程，使粉末颗粒间产生冶金结合，从而赋予烧结零件以需要的物理—机械性能。

某些烧结零件烧结后就可使用了。但是，许多零件需要进行补充加工，以使烧结零件具有规定的形状、尺寸精度及使用性能。烧结零件可进行复压，以增高密度与物理—机械性能；可熔渗以熔点较低的金属（如铜），以获得完全密实的结构；可含浸以塑料或润滑

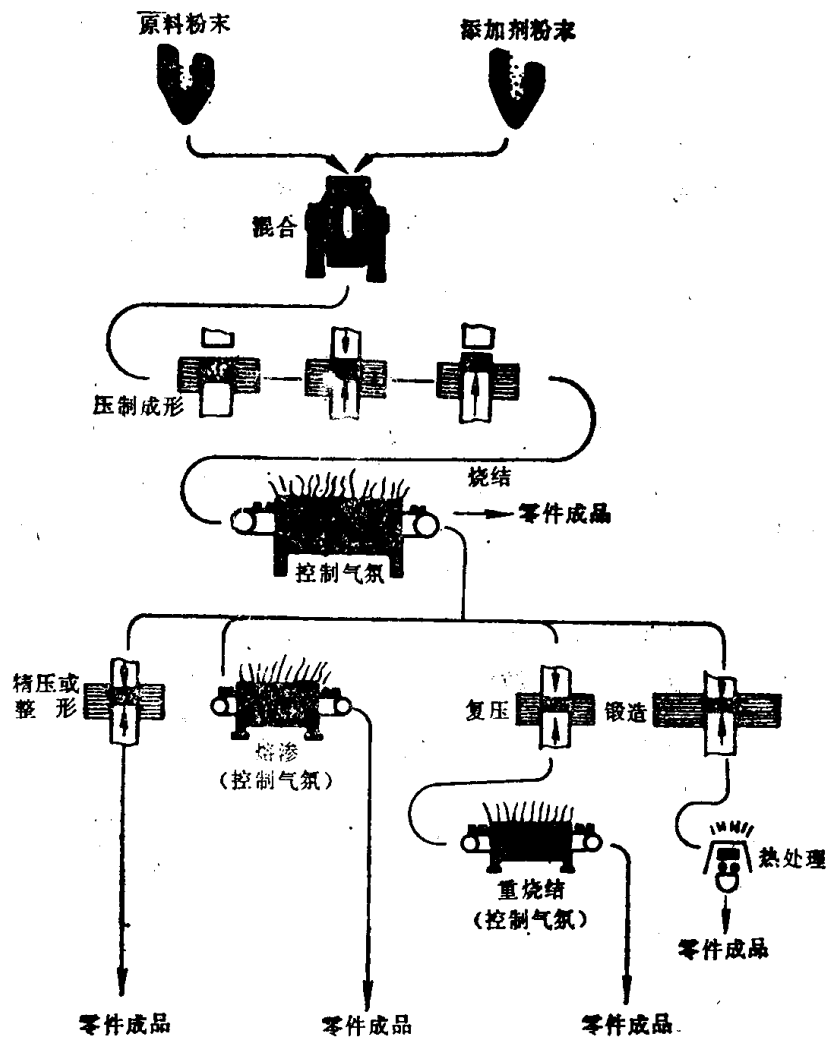


图1-4 传统粉末冶金工艺的主要生产过程

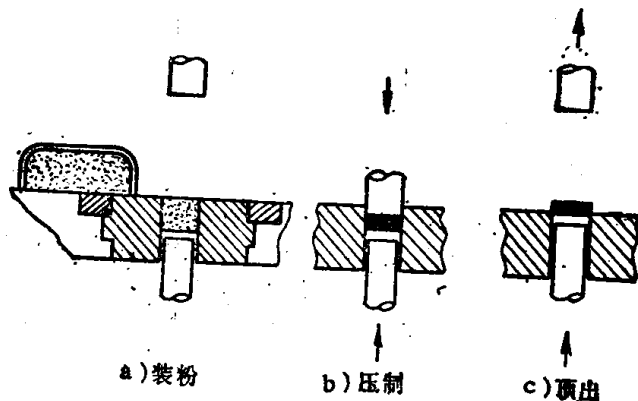


图1-5 压制成形过程

油, 堵塞烧结零件中的微孔或使之具有自润滑性; 可用普通方法进行机械加工、滚磨、表面处理及热处理。

第二节 粉末冶金发展简史

在人类社会生产力发展的不同阶段, 粉末冶金作为制造金属材料与制品的重要手段都作出过重大贡献。

早在六千多年前, 也就是原始社会后期(仰韶文化与龙山文化时期), 制陶技术就相当成熟了。对这个时期的陶器进行的重烧实验表明, 灰陶、红陶, 黑陶的烧成温度大约在 $950\sim 1050^{\circ}\text{C}$ 的范围内。当时已采用陶窑, 而不是露天烧成。灰色陶器是在还原焰中烧成的。

甘肃齐家文化遗址(距今四千年, 属于原始社会解体时期)中发现了多件红铜、青铜制成的小件器物, 有刀、锥、凿、环和其它铜器的碎片。出土的红铜器多数都是锻打的, 个别铜器是经过熔化铸造成的。对这批铜器用电子探针检验的结果表明, 它们可能是人工冶炼的红铜。这表明, 四千年以前, 我们的祖先就已认识了铜, 可以制造红铜和青铜等铜合金了^[4], 而当时并不具备冶炼红铜的物质技术条件。

由上述不难看出, 早在 $6000\sim 4000$ 年前, 随着制陶技术的发展, 当时已具备了在陶窑中, 于还原焰中, 在 $600\sim 800^{\circ}\text{C}$ 左右的温度下, 还原氧化铜或氧化铜与氧化锡的混合物的物质技术条件, 但不可能用冶炼法制出红铜。因此, 作者提出了一种设想, 认为, 这一时期的红铜或青铜器物可能是按下述方法制造的。根据经验选择氧化铜矿与氧化锡矿; 将矿石粉碎成细粒状; 将氧化铜矿粒或将它与氧化锡矿粒的混合物置于陶器中, 在矿粒中掺以木炭粒或在矿粒上覆盖以木炭粒, 然后将其置于陶窑中, 于还原焰 $600\sim 800^{\circ}\text{C}$ 下还原成铜粒或青铜粒。冷却后, 将铜粒或青铜粒清理干净, 用石锤锻打成各种器物。这实际上是粉末冶金的雏型。之后, 经过若干年的实践, 我们的祖先才逐渐掌握了青铜的熔炼和铸造技术, 从而为进入青铜器时代创造了必要条件。

我国最早人工制造的铁器约出现于公元前六世纪, 即春秋末期。我国古代劳动人民在烧陶、制铜等生产实践中, 经过长期反复摸索, 使铁矿石在炉中与木炭接触而炼出了铁, 创造了块炼铁(海绵铁)的技术。对春秋末期和战国初期的锻造铁器检验表明, 所用原料就是块炼铁^[4]。

块炼铁是铁矿石在较低温度(1000°C 左右)下, 用木炭还原的产物。这也是现代还原海绵铁粉的基本生产工艺。所不同的是, 古代的块炼铁都是经反复锻打制成了铁器, 而现在生产的海绵铁是破碎成粉末后, 用作制造烧结机械零件的原料。

一千六百年前印度制造的重 6.5t 的德里铁柱和更大的铁制品, 也都是用上述方法制造的。

René Gardi在1954年出版的“Der Schwarze Hephästus”一书中, 曾描述过他在非洲探险时, 在北喀麦隆偏远的孤立的 Mandara 山中所看到的制造铁器的情景^[6]。这些北喀麦隆人在河滩上收集由磁铁矿冲积而成的铁矿砂, 用豆粒大小的木炭在炉中将它们还原成海绵铁。将海绵铁破碎成豆粒大小, 在一定程度上除去残留的木炭、炉渣、石英等。然后, 用石器将海绵铁粒捣碎成粉; 进一步纯化, 并将不规则状和片状的海绵铁颗粒分开。将砂粒大小的铁粉颗粒装于粘土罐中, 尽量装密实。覆盖以粘土, 并用粘土溜缝; 之后, 置于木炭火的

还原气氛中烧结。烧结后，将罐打碎，取出烧结铁块，于木炭火中，一边加热一边用大石锤锻打。经反复退火与锻打，就制成了兵器、工具及装饰品等。

据认为这就是人类在能够获得足以用来炼铁高温之前，普遍采用的制造铁器制品的方法。这实质上是一种粉末冶金过程。

铂的发展史与铁一样，铂首先是用粉末冶金法制造的，当1885年熔炼铂的方法发明后，才改用熔炼法。

十七至十九世纪，在欧洲粉末冶金主要用于制造 Au、Ag及Pt 制品。在延性铂制造中作出重要贡献的是 W. H. Wollaston^[6]。他的关于制造延性铂的著作发表于1829年，其主要要点，是由稀释的氯铂化铵溶液中析出氯铂化铵，将它们粉碎和洗净，然后于适当温度下加热，使之缓缓分解，即制得纯的海绵状铂粉；再将它们用木制研钵轻轻地研碎成细粉。用水将细Pt粉洗净后，将湿Pt粉装入长17.145cm，顶部直径为2.844cm和底部直径3.1242cm的带拔梢的黄铜模中，模子底部用铁塞堵住。

用手以木塞压缩粉末，然后覆以铜板和置于精巧的简单的肘节式压机(图1-6)上进行压制。压坯脱出后，为除去其中的水份，用炭火非常缓慢地将它们进行干燥和加热到发红。然后，再置于干净的石英砂上，用耐火罐罩住，于风炉中进行第二次加热，即烧结。风炉从点火时起约烧20 min(烧的是焦炭)，最后4.5 min保持“微风加热”。将烧结

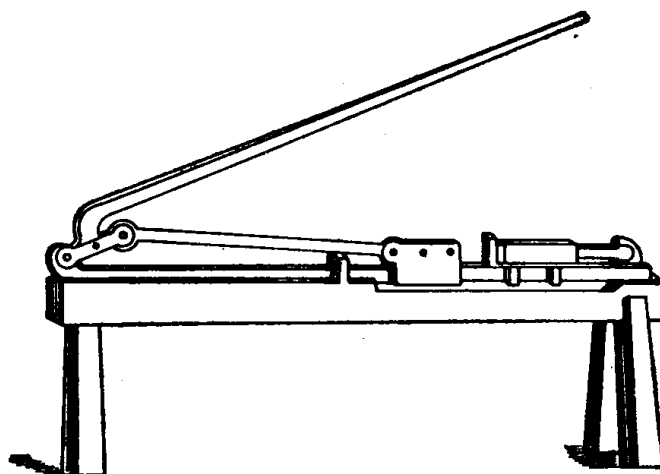


图1-6 肘节式压机^[6]

体从炉中取出，趁热以重锤进行顶锻。这样一来，烧结体被充分固结，并可进一步进行锻造。

一般皆以上述铂的制造方法作为现代粉末冶金之启端。

有趣的是，1826年，俄国圣—彼得堡造币厂已在利用П.Г.Соболевский研究出的方法在制造铂币了^[7]。制造过程与Wollaston的方法基本上相同。

由上述不难看出，红铜、青铜、铁及铂都是先制成粉状，再用粉末冶金法制成各种武器、工具及器具的。随着熔炼冶金技术的发展，粉末冶金逐渐被淘汰。这时，粉末冶金就又被用于制造当时用熔铸法无法生产的“特殊”金属制品了。

值得注意的是，很多金属元素都是首先以粉末状制出的^[8]。下列31种或更多的金属都是首先或在刚发现的几年内是以粉末状制造的：B、Be、Mg、Al、Si、Ca、Ti、V、Cr、Mn、Fe、Co、Ni、Zr、Nb、Mo、Ru、Rh、Pd、Ba、Ce、La、Nd、Dy、Ta、W、Os、Ir、Pt、Th及U。

1870年，美国的S. Gwynn取得了用金属粉末制造自润滑轴承的专利^[8]。他将用锉刀锉得的锡屑与石油焦按99:1配好，一面加热一面混合；混合均匀后，装于模具中用水压机加压，制成轴承。或将组成为93%Cu-6%Sn-1%Pb(或Zn)的青铜粉与弹性橡胶按98:2配好，用与上述相同的方法制成轴承。这种轴承摩擦系数小，使用时不需要补加油或其它润滑剂。这也是现在制造烧结金属含油轴承的基本观点。

十九世纪末爱迪生发明白炽灯后，如何制造长寿命的白炽灯灯丝就成了当时的重大课题。

1897年, 奥地利的Auer Von Welsbach发明了白炽灯用Os丝, 并获得了美国专利^[6]。他是将用作粘结剂的糖浆加入用化学沉淀法制得的细Os粉中。搅拌均匀, 制成糊状, 通过模具将它们挤压成细线坯。干燥后, 加热, 使糖浆分解; 蒸发以除去其余杂质。然后, 将线坯直接通以电流, 使残留的C变成CO或CO₂除去, 同时进行烧结, 即制成了金属Os丝。这个方法最早采用了粉末冶金烧结法, 对以后白炽灯丝的发展有重大影响。

1898~1900年, Os丝灯泡实用化。但是, 这种Os丝较脆弱, 同时Os丝灯泡寿命短。

1903~1911年, Ta丝代替Os丝广泛地用于白炽灯泡。Ta丝与Os丝的制造方法一样。还用这种方法制成了Zr、V及W等的细丝。这些金属丝的一大缺点是没有韧性。经过种种研究后, 认为用W作白炽灯丝最适宜。美国通用电气公司(General Electric Co)的W. D. Coolidge 1909年取得了制造延性钨的专利。他是将钨粉压制成条坯, 在低于钨的熔点下, 于保护气氛中进行烧结; 之后, 于高温下进行旋锻; 钨条随着横断面缩小, 延性增大; 一直旋锻到钨于室温下变成延性的和可被拉成丝为止。Coolidge的这项发明使粉末冶金以现代工业初次问世^[6]。1910年5月17日, P. Schwarzkopf在AIEE的演讲会上发表了Coolidge的论文“延性钨的制造”, 因此, 以这一天为近代粉末冶金的生日。Coolidge的工作与Wollaston一样, 是粉末冶金发展史上的一个重要里程碑。

拉制W丝必须用模具, 由于钢模不耐磨, 因此, 拉细W丝就不得不用金刚石模具。但是, 金刚石价格昂贵, 因此不得不寻找代用品。为此, 1923~1925年, 德国柏林Osram Lamp Works的Karl Schroter研究出了可用来取代金刚石的硬质合金。

1927年, 德国Krupp公司开始生产、销售硬质合金, 商品名称为Widia(类似金刚石之意)。初期, 硬质合金仅用于制造拉丝模, 随即用于金属切削加工。硬质合金的出现引起了金属切削技术的革命性变革。

1870~1916年期间, Gwynn创制的金属含油轴承, 经过近三十多年许多人的创造性劳动, E. G. Gilson 1916年取得了制造青铜含油轴承的专利。他第一个明确指出了可制造含浸以润滑油的多孔性轴承, 即含油轴承。他是将氧化铜粉、氧化锡粉与石墨相混合, 成形后, 进行烧结。烧结时, 以石墨还原金属氧化物, 并使还原的铜和锡通过扩散形成合金。剩余的石墨均匀分布于组织内。制造之青铜含油轴承的含油率可高达5(重量)%。这种含油轴承由美国通用电气公司实现了工业生产, 并在汽车工业中得到了广泛应用, 随即推广到了其他工业部门。这是粉末冶金工业的一项重大发展。

青铜含油轴承的生产与应用, 推动了铁基含油轴承与烧结机械零件的发展。其主要目的在于节省机械加工工时和材料, 从而获得更大的经济利益。1940年, 美国一个大汽车制造公司使用的油泵齿轮就已全部改用粉末冶金法制造了^[9]。

铁基含油轴承的研究与发展为制造炮弹弹带创造了必要的技术物质条件。二次世界大战期间, 德国用粉末冶金技术制造了大量的烧结铁弹带, 以取代铜弹带。1943年与1944年德国烧结铁弹带的产量约为20000 t。据说1944年某月产量曾高达4000 t以上。

与此同时, 德国还用粉末冶金法制造了大量的烧结铁轴套和低密度烧结铁基机械零件, 推动了高强度、高密度、高韧性烧结钢的研究与发展。

以上仅仅略述了粉末冶金的重要(远非全部)历史发展。由上述可看出:

1. 在人类社会的各个发展阶段, 粉末冶金总是与发展当时的新的“特殊金属”材料和制品密切相关的;

2. 随着生产力的高度发展, 在二十世纪三十年代末期, 粉末冶金作为一种快速、大量制造机械零件的成形技术, 就已开始进入金属成形技术的行列。

3. 粉末冶金过去、现在和将来都是一种有效且重要地制造特殊性能材料和制品的技术手段。

第三节 我国粉末冶金工业的发展

我国的粉末冶金工业是解放后开始建立的。1948年大连钢厂开始试制和少量地生产硬质合金制品。

1952年上海灯泡厂试制成功了钨丝并组织了生产, 并少量生产了硬质合金、银钨合金及铜钨合金。

1954年中国科学院冶金陶瓷研究所发表了关于青铜含油轴承的研究成果。

1953年, 上海中国纺织机械厂试制成功雾化6-6-3青铜粉, 并用这种粉末制成了青铜含油轴承并组织了生产。

1956年华北无线电器材联合厂的汉麦塔克法(涡流研磨法)制工业纯铁粉、镍粉、钴粉和烧结铝镍磁钢, 以及铁氧体磁性元件的生产线投产。

1956年以后, 中南矿冶学院等开始组建粉末冶金专业; 上海材料研究所、北京钢铁研究院等开始开展粉末冶金方面的研究。

1957年北京电子管厂的钨、钼丝生产线投产。

1957年底华北无线电器材联合厂首先研制成功铁基含油轴承。

1958年株州硬质合金厂投产。

1961年我国第一个铁基粉末冶金制品专业厂——北京天桥粉末冶金厂诞生。这是我国铁基粉末冶金工业摆脱困境、走向繁荣的重要一步。

1964年杭州齿轮箱厂粉末冶金摩擦片车间投产。

1965年上海合金轴瓦厂的含油轴承车间分出, 以此为基础建立了上海粉末冶金厂。同年, 该厂建立的我国第一条隧道窑还原铁粉生产线投产。

1964~1977年, 我国粉末冶金工业发展迅速, 生产厂、点和粉末冶金铁基零件的产量急剧增加。据不完全统计, 铁基粉末冶金专业厂, 1961年1个, 1963年5个, 1964年8个, 1965年22个; 铁基粉末冶金厂、点1966年59个, 1977年约为300个。这个时期(据不完全统计)

表1-1 1964-1977年我国铁粉与粉末冶金铁基零件产量

年 份	铁 粉 产 量 (t)	粉 末 冶 金 铁 基 零 件 产 量 (万件)
1964	284	302
1965	735	687
1966	2400	1975
1967	3466	2952
1971	7000	6600
1973	10000	12000
1974	12000	15000
1977	16518	20274

的铁粉与粉末冶金铁基零件的产量列于表1-1。铁粉几乎全部是用固体碳还原的海绵铁粉。

1978年铁粉与粉末冶金铁基零件的产量略高于1977年。从1979年开始, 由于调整国民经济, 粉末冶金生产厂、点有所减少, 铁粉与粉末冶金铁基零件的产量大幅度下降。1981年以后, 逐年回升, 但铁粉、粉末冶金铁基零件及硬质合金生产都呈现出明显的集中生产的趋势,

在粉末冶金工业发展的同时, 粉末冶金热锻、冷、热等静压制, 粉末高速钢等新技术, 新材料的研制都取得了很大进展。

第四节 粉末冶金在机械制造业中的作用

现代机械制造业和仪器仪表工业的主要发展趋势是, 创制新型的工作参数指标高的机械、机构及仪表, 和寻求经济效益最大、生产效率最高的生产方法。

粉末冶金在很大程度上可促进解决这些与科技发展密切相关的任务。

用粉末冶金法大量地制造机械零件与仪器仪表零件时, 生产效率高、能耗低、材料省、价格低廉。例如, 计算分析机中的许多小型复杂形状零件, 用粉末冶金法制造时, 可将劳动量减少到用机械加工法制造时的 $\frac{1}{10} \sim \frac{1}{20}$ 。初步计算表明, 每使用1000 t 烧结机械零件, 平均可节约2000~3000 t 金属, 腾出约100台机床及约80名工人。表1-2示用粉末冶金法制造机械与仪表零件的经济效果实例。

表1-2 用粉末冶金法制造机械与仪表零件的经济效果实例^{〔10〕}

零 件 名 称	1 t 零件的金属消耗量 (t)		相 对 劳 动 量		1000个零件的相对成本	
	机 械 加 工	粉 末 冶 金	机 械 加 工	粉 末 冶 金	机 械 加 工	粉 末 冶 金
油泵齿轮	1.8~1.9	1.05~1.10	1.0	0.3	1.0	0.5
钛制固紧螺帽	1.85~1.95	1.10~1.12	1.0	0.5	1.0	0.5
黄铜制滚珠轴承保持架	1.75~1.85	1.15~1.13	1.0	0.45	1.0	0.35
飞机导线用铝合金固定夹	1.85~1.95	1.05~1.09	1.0	0.35	1.0	0.40

现代机械制造的发展要求创制能在高速、高负荷下工作的, 摩擦系数小的新型减摩材料。飞机与汽车制造需要干摩擦自润滑减摩材料, 这种材料的使用可大大简化机械结构和提高工作的可靠性。化学、核能及其它技术部门皆需要能在像水、酸、碱、熔融金属、赤热气体之类腐蚀性介质中工作的减摩材料。火箭与低温技术需要能在高真空和接近绝对零度的温度下工作的减摩材料。燃气轮机制造和其它技术部门需要能在较高温度下工作的减摩材料。

在上述种种减摩材料的研制中, 粉末冶金起着主要作用。因为, 粉末冶金可将各种原料固有的珍贵性能集结于一种材料之中, 每一种原料单独都满足不了对减摩材料提出的综合性要求。例如, 氟塑料干摩擦时摩擦系数小(0.05~0.10), 化学稳定性好, 热稳定性较高和磨合性好, 但导热性差, 热膨胀系数大及机械强度差。用粉末冶金将球形青铜粉烧结于钢背上, 在烧结青铜层中浸以氟塑料与铅的混合物, 即制成了在干摩擦条件下可进行自润滑的氟塑料金属复合材料。这种复合材料在飞机、汽车、工程机械、火箭、核能、桥梁等中都得到了广泛应用。

要解决快速和超快速飞机在较短距离内的着陆问题, 在飞机制动装置中必须采用特制的

制动盘。现代飞机中使用的制动装置，制动时摩擦副工作表面的瞬时温度可达1100℃以上。这时摩擦材料的问题，实质上是一个在特殊条件下工作的耐热材料问题。这种摩擦材料只能用粉末冶金法制造。

现代航空工业对材料提出的要求非常苛刻，而且这些要求还在不断提高。例如，制造飞机喷气式发动机涡轮盘用的材料应具有持久热强性：在750℃下100h的强度 $\sigma_{750^\circ\text{C}}^{100\text{h}}$ 不小于70~80kgf/mm²， $\sigma_{1100^\circ\text{C}}^{100\text{h}}$ 不小于11~12kgf/mm²。预计，对这些要求在最近几年内还会有所提高。用传统的普通冶金方法，即用进一步在合金中添加合金元素的方法，实际上已不能满足这些要求，因为现在使用的高温合金工艺性能已经很差。进一步添加合金元素将使其工艺性能进一步恶化。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材料。

现在喷气式发动机的零件，它们的生产成本半数以上耗费于材料和机械加工。但是，以钛合金或其它高温合金粉末为原料，用真空热压或热等静压(HIP)制成所谓的接近最终形状的成形坯件时，生产成本可大大降低。这项节约是由于省掉了机械加工费用；其次是因为消除或减少了材料的切屑损失。当然，这些都是粉末冶金技术的传统利益。可是，高温合金皆属于高合金系统，加工既昂贵又困难，粉末冶金在这方面的好处远远大于经济上的利益。

粉末冶金在高合金系统材料的制造方面正变得日益重要，因为它使高合金材料在组织结构与使用性能方面都有重大的改进。例如，由于不用熔炼与铸造，而是以金属粉末为原料制造材料或零件，所以，可获得远为均匀的几乎无成份偏析的显微组织结构。这就使材料的性能较均匀，从而大大改善了材料的可机加工性和使用性能。同时，为控制质量提供了较好的超声穿透性，这在制造宇航零件中是一个很重要的因素。

宇航器中各种部件的许多零件都是用粉末冶金制造的。如苏联第一个“月球号”宇航器中就曾使用过用特殊组份制造的轴承。

粉末冶金在核能工业中也具有重大意义。如散热元件或生物防护装置元件等的一些重要零件，在大多数情况下，都是用粉末冶金材料制造的。

特别值得注意的是，烧结机械结构零件在机械制造中的作用。七十年代以前，烧结机械结构零件的发展主要是取代用其它金属成形技术制造的零件。进入七十年代后，由于压机设计的进步，高压缩性粉末的出现及粉末冶金知识在机械设计人员中的普及，越来越多的烧结结构零件都是根据粉末冶金工艺特点直接设计制造的。这时，在大多数场合下，在节约与降低生产成本的同时，还可获得同等或更重要的其它好处。这些烧结结构零件已经难以或往往不能用其它方法制造了。例如，由棘轮、齿轮、小齿轮及凸轮组成的一个组合件，它们通常需要分别生产，然后组装而成。可是，对组合件的设计稍加修改，用粉末冶金法可以一次成形，再经烧结就基本制成了。

粉末冶金与其它金属成形方法相比，是一种节能、省料的有效方法。据估计，用粉末冶金法制造高合金制品时，与普通成形工艺相比，至少节能40%。一些汽车零件从用圆钢机械加工改为用粉末冶金法制造时，可节约材料64%和节能50%以上，制造1kg钢零件约耗能77140~132240BTU[⊖]，而同样制品用粉末冶金法制造时，仅耗能17632~44080BTU。

粉末冶金是一种在生态学上清洁的方法，这一点正变得日益重要。粉末冶金生产不产生任何需要处理的有毒物质，也不会对我们的生态系统增添任何污染物质。对工人或工厂邻居

⊖ 英国热量单位。