

高密度粉末冶金 汽车零件生产工艺

新材料·新技术·新工艺

GAOMIDU FENMO YEJIN QICHE LINGJIAN SHENGCHAN GONGYI

XINCAILIAO XINJISHU XINGONGYI

韩凤麟 编著



化学工业出版社

高密度粉末冶金 汽车零部件生产工艺

新材料·新技术·新工艺

GAOMIDU FENMO YEJIN QICHE LINGJIAN SHENGCHAN GONGYI
XINCAILIAO XINJISHU XINGONGYI

韩凤麟 编著



化学工业出版社

本书对 20 世纪 90 年代以来在制造高密度、高强度、复杂形状粉末冶金汽车零件方面已采用与正在研发的一些新材料、新技术及新工艺进行了系统的介绍。

本书可供汽车产业、粉末冶金零件相关企业、机电产业和相关部门的设计、生产、管理人员参考,也可作为相关科研人员和理工院校有关师生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

高密度粉末冶金汽车零件生产工艺——新材料·新技术·新工艺/韩凤麟编著. —北京:化学工业出版社, 2013. 4

ISBN 978-7-122-16524-4

I. ①高… II. ①韩… III. ①粉末冶金制品-汽车-零部件-生产工艺 IV. ①U463

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 027655 号

责任编辑:黄 滢

责任校对:边 涛

文字编辑:陈 喆

装帧设计:尹琳琳

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:三河市万龙印装有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张 15½ 字数 411 千字 2013 年 7 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:68.00 元

版权所有 违者必究

京化广临字 2013—10 号





安徽省桐城市汽车部件有限公司

桐城市汽车部件有限公司座落在风景秀丽、文风凝重的历史文化名城“桐城派故里”——中国安徽桐城市。

历经30余年的成长，公司已发展成为集设计、生产、检验、研发、销售为一体的专业发动机零配件制造企业。中国内燃机工业协会会员单位，安徽省铸造协会会员单位，中国机械协会粉末冶金分会会员单位，上海内燃机研究所气门座圈、气门导管试制试验基地，国家高新技术企业。



◆ 产品及适用范围

主要产品：气门座圈、气门导管、气门。服务国内外主机及售后维修市场。

产品适用范围：日韩车系、欧美车系、国产轿车、微型汽车、重柴车、叉车、摩托车、农用汽车、船用及工程机械等，承接新产品开发或来样（图纸）加工。适用无铅汽油、柴油、特殊燃料机（甲醇、乙醇、CNG\LNG\LPG）。

产品荣誉：获得安徽省重点新产品的称号。

◆ 研发

行业内率先进行发动机气门、气门座圈、气门导管不同材料在高温环境下摩擦副最佳匹配性实验，并将研究成果积极应用于生产。

公司自主研发：温压—模壁润滑含稀土粉末冶金发动机气门座及其制造方法，离心铸造含稀土高耐磨发动机气门座圈、气门导管及其制造方法，获两项国家发明专利及科技创新奖。

与上海内燃机研究所合作，起草《内燃机气门座技术条件（产品执行标准）》、《粉末冶金气门导管技术条件（产品执行标准）》等四个行业标准。

与合肥工业大学、武汉理工大学等国内著名高校合作，并且与德国、美国、日本著名粉末冶金专家进行技术合作，尤其是在大功率柴油机和特殊燃料机（甲醇、乙醇、CNG\LNG\LPG）上有世界一流的研究成果和运用。



◆ 质量体系

2004年通过ISO9001:2000质量体系认证

2010年通过ISO/TS16949:2009质量体系认证

安徽省卓越绩效奖、标准化AAAA企业

◆ 销售网络

产品与国内二十多家主机厂配套，出口欧美、中东、东南亚等多个国家和地区。

电话：86-0556-6540098, 6543922 传真：86-0556-6543979, 6541439

联系人：袁春 15155082678

地址：中国安徽省桐城市经济技术开发区高桥工业园 邮编：231400

E-mail: 15155082678@163.com

网址: <http://www.ah-st.com>



扬州市海力精密机械制造有限公司

YANGZHOU HAILI PRECISION MACHINERY CO.,LTD



扬州市海力精密机械制造有限公司是国内专业制造全自动机械式粉末成型压机和精整机的国家高新技术企业。公司科研、技术人员占公司35%，公司通过与大专院校、科研机构和日本粉末成型专家进行技术合作，系统开发了广泛适用于粉末冶金、硬质合金、磁性材料、电子陶瓷和电碳等领域的HPP-P、HPP-S、HPP-T、HPP-N、HPP-F、HPP-H、HSP等系列全自动粉末成型机和精整机。粉末成型机吨位从0.5吨-800吨，粉末精整机吨位从0.8吨-200吨。现拥有实用型专利27项，发明专利5项。公司提供粉末成型解决方案和成型机智能控制软件等服务，承接各种机械式粉末成型机的大修业务。

精心的设计、精湛的制造、精益的管理，全方位的服务和“我们共同发展让世界更美好”的理念得到了用户的认可和良好的社会信誉。争创一流品牌，东睦集团、重庆华孚、湖北东风、东磁集团、日本浦和、保来得、厦门东金电子、香港裕丰、株硬集团、自贡科瑞特、飞达集团、株洲欧科亿等众多著名企业都成为海力的合作伙伴。近几年公司加快了国际化的步伐，产品通过了CE认证，为进一步做大高端业务和国际业务市场开辟了道路。

公司将继续大力发扬“锐意进取、励精图治、勇往直前、追求卓越”的企业精神，坚持技术创新、产品创新、管理创新、服务创新、合作共赢，大力推进产品精品化和市场国际化。通过世界上领先的理论和技术、精良的设备和检测仪器、科学的管理和全体员工的不懈努力为粉末冶金、电子元件等相关行业提供优质的产品 & 配套服务。我们真诚欢迎来自各行业的领导、专家、客商来海力精机考察、指导、洽购。

项目	型号	HPP-200P	HPP-200PS	HPP-500P	HPP-600P	HPP-800P	HPP-1000P	HPP-1600P	HPP-2600P	HPP-5000P
最大压制力 (kN)		200	200	500	600	800	1000	1600	2600	5000
最大脱模力 (kN)		100	50	250	400	400	500	800	1300	2200
上模冲行程 (mm)		130	90	160	170	180	200	200	200	200
上模冲调节行程 (mm)		60	40	80	80	100	100	100	100	120
最大装粉高度 (mm)		100	45	110	120	120	150	140	150	150
最大出模行程 (mm)		70	30	70	75	80	100	100	100	120
最终加压行程 (mm)		0-10	0-10	0-10	0-10	0-10	0-10	0-10	0-10	0-10
过 (欠) 装料行程 (mm)		5	5	5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5
阴模面位置调整量 (mm)		±5	±5	±5	±7.5	±7.5	±7.5	±7.5	±7.5	±7.5
成型速度 (r/mm)		10~40	20~80	6~16	8~24	8~24	6~20	6~20	6~20	6~18
主电动机功率 (kW)		5.5	7.5	7.5	15	22	22	30	37	50
机器重量 (kg)		2000	2500	6500	9500	12000	13000	18000	30000	59000

电话：0514-83838366

传真：0514-83838399

联系人：栾长平 13805270716

地址：江苏省扬州市西区盘古工业园区

邮编：211407

网址：www.hailijixie.com

E-mail:lcp@hailimachine.com

高压水雾化MIM用粉



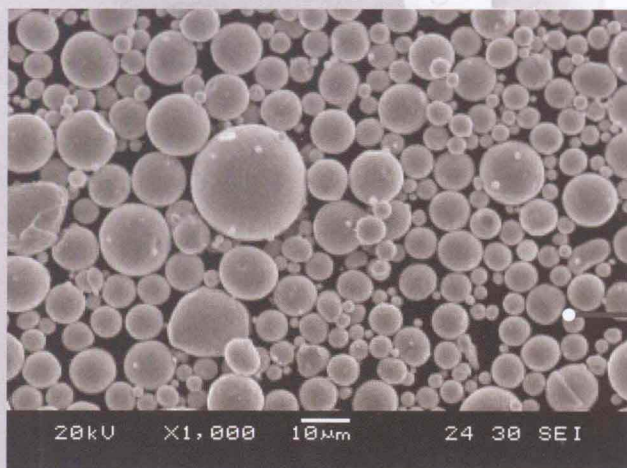
金属注射成形 (MIM) 零件

MIM用雾化合金粉末

雾化超细合金粉末

年产能 **4000** 吨

超细雾化合金粉末：不锈钢、低合金钢、
Ni/Co基合金、高温合金、高速钢和软
磁合金



气雾化MIM用粉

联系方式：

安泰科技股份有限公司 粉末冶金事业部

北京市海淀区学院南路76号

电话：010-62187201/62443881

传真：010-62443881

Email: cuixiaobo@atmcn.com

<http://www.atmcn.com>

前言

Foreword

据美国 MPIF (金属粉末工业联合会) 发布的调查报告“粉末冶金零件目标”(截至 2008 年), 在汽车中单独使用的粉末冶金零件有 300 多项, 总数超过了 750 件, 其中发动机零件 99 项, 变速器等的零件 116 项, 车身、底盘等 90 项。鉴于调查仍在进行中, 估计汽车中使用的粉末冶金零件总数可能会达到 1000 件左右。

据统计, 一辆中档轿车的重量为 1.5~2.0t, 按照北美平均每辆汽车的粉末冶金零件用量, 2006 年最高为 19.5kg, 这就是说, 依照重量, 在北美生产的汽车中粉末冶金零件占 1.0%~1.3%。

依据中国机械通用零部件工业协会粉末冶金分会的统计, 中国(大陆)生产的汽车中, 平均每辆汽车中使用的国产粉末冶金零件不超过 4kg, 这相当于北美 2006 年平均每辆汽车粉末冶金零件用量的 20%。

粉末冶金汽车零件在汽车中的应用, 从 1940 年算起, 迄今已有 73 年, 在这 73 年中, 1990 年以前, 汽车制造中使用的粉末冶金零件基本上都是用常规的压制-烧结工艺生产的密度 $< 6.9\text{g/cm}^3$ 的零件。进入 20 世纪 90 年代以后, 由于粉末原料、压制成形工艺与设备及烧结技术与后续处理工艺的不断改进和深入开发, 研发并生产出了大量的高密度、高强度、形状复杂的粉末冶金汽车零件, 从而使粉末冶金汽车零件生产成为了汽车产业中的一个不可或缺的节材、省能、减排及保护生态环境的绿色产业。

本书对 20 世纪 90 年代以来在制造高密度、高强度、复杂形状粉末冶金汽车零件方面已采用与正在研发的一些新材料、新技术及新工艺进行了系统的介绍。

本书可供汽车产业、粉末冶金零件相关企业、机电产业和相关部门的设计、生产、管理人员参考, 也可作为相关科研人员和理工院校有关师生的参考书。

本书在编写过程中, 得到了郭瑞金博士、亓家钟教授、于洋博士、申小平高级工程师、荆慧主任等的大力帮助与热情支持, 在此表示衷心感谢。

由于编者水平有限, 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 高密度粉末冶金汽车零件的主要生产工艺	1
1.1 熔渗铜	2
1.2 二次压制 / 二次烧结工艺	2
1.3 粉末锻造	4
1.4 温压	4
1.5 温模压制工艺	5
1.6 模壁润滑	5
1.7 选择性表面致密化	5
1.8 金属注射成形 (MIM) 工艺	6
1.9 烧结钎焊工艺	7
1.9.1 方法	9
1.9.2 结果与讨论	9
参考文献	14
第 2 章 高密度复杂形状粉末冶金零件压制成形工艺	15
2.1 粉末冶金零件成形压机进展	16
2.1.1 混合式压机	16
2.1.2 液压式压机	17
2.1.3 模架	18
2.1.4 压制成形工艺进展的几个实例	19
2.2 用 CNC 压机压制成形的几个实例	22
2.2.1 常规粉末成形压机与 CNC 压机的问题与性能比较	23
2.2.2 用 CNC 压机压制成形复杂形状零件实例	23
2.3 防止压制成形压坯产生裂纹的措施	28
2.3.1 在零件设计阶段	29
2.3.2 在模具设计与组装阶段	30
2.3.3 材料选择与运送	35
2.3.4 零件压坯的捡拾与运送方法	35
参考文献	36
第 3 章 制造高密度、复杂形状汽车零件的温压工艺	37
3.1 概要	37
3.2 ANCORDERSE™ 温压工艺	38
3.3 温压的理论基础	40

3.4	温压过程的温度控制	43
3.5	温压用粉末成形压机与附加装置	44
3.5.1	粉末加热器	44
3.5.2	槽式加热器	45
3.5.3	装粉靴	47
3.5.4	模架的加热、冷却及绝缘	49
3.5.5	温压作业中的故障与排除措施	51
3.6	温压模具设计	54
3.6.1	温压时加热和维持适当作业温度所需的功率	54
3.6.2	温压用模具实例	55
3.6.3	对温压用模具实例和所需功率计算的简要说明	60
3.6.4	工作间隙与冷缩配合	60
3.6.5	冷缩配合阴模的计算	61
3.7	温压与常规粉末冶金工艺制造的高密度铁基材料性能的比较	64
3.7.1	试验程序	65
3.7.2	结果与讨论	65
3.8	用温压制造高密度粉末冶金材料的关键参数	72
3.8.1	试验程序	72
3.8.2	实验室特性	73
3.8.3	生产工艺参数对密度的影响	73
3.8.4	混合粉的生产耐用性与生产能力	77
3.9	温压的发展——温模压制	79
3.9.1	温压	79
3.9.2	AncorMax 200™ 温压 (温模压制)	79
3.10	用温压生产的汽车零件实例	82
3.10.1	自动变速器涡轮毂	82
3.10.2	汽车变速器输出轴毂	87
3.10.3	温压的同步器齿毂	91
3.10.4	直喷汽油 (DIG) 汽车发动机无声链条系统用温压——高温烧结粉末冶金 链轮的开发	92
	参考文献	94

第 4 章 汽车发动机连杆的粉末锻造工艺

4.1	粉末锻造零件	95
4.1.1	粉末锻造的特点	95
4.1.2	铁基粉末锻造零件生产工艺	96
4.1.3	粉末锻造铁基材料的力学性能	100
4.1.4	预成形坯设计	102
4.1.5	粉末锻造的经济性与应用实例	108
4.1.6	粉末锻造汽车连杆的生产与应用	111
4.2	粉末锻造连杆	113
4.2.1	断裂剖分工艺	113
4.2.2	可断裂的 C-70 钢	114
4.2.3	粉末锻造与 C-70 钢锤锻连杆的竞争	115

4.3 粉末锻造连杆用 Fe-Cu-C 材料的改进	120
4.3.1 粉末锻造连杆 Fe-Cu-C 合金的力学性能	120
4.3.2 粉末锻造连杆 Fe-Cu-C 合金的开发	121
4.3.3 高强度材料研究的新进展	125
4.3.4 粉末锻造连杆与传统锤锻钢连杆材料比较	128
参考文献	129
第 5 章 制造高负载汽车变速器粉末冶金齿轮的表面致密化工艺	131
5.1 表面致密化是改进粉末冶金齿轮使用性能的一种有效工艺	131
5.1.1 材料的选择及工艺过程	131
5.1.2 表面致密化效果及烧结齿轮性能的测定	134
5.1.3 利用表面致密化技术研发新型烧结齿轮的实例及成本比较	136
5.2 螺旋齿轮与直齿齿轮的表面致密化	142
5.2.1 试验	143
5.2.2 结果	145
5.2.3 讨论	147
5.2.4 结论	149
5.3 表面致密化齿轮的滚动接触疲劳	149
5.3.1 齿轮齿接触应力	149
5.3.2 表面下的应力分布	150
5.3.3 表面致密化齿轮的齿	151
5.3.4 滚动接触疲劳破裂方式	152
5.3.5 剪切应力分布与剪切强度分布	152
5.3.6 汽车齿轮	154
5.3.7 渐开线曲率	155
5.3.8 滚动接触疲劳试验	156
5.4 表面致密化工艺	159
5.4.1 DensiForm® 工艺	161
5.4.2 DensiForm® 零件的力学使用性能	161
5.4.3 DensiForm® 零件的尺寸精度	164
5.4.4 DensiForm® 应用实例	164
5.5 表面致密化粉末冶金齿轮的性能	166
5.5.1 试验	166
5.5.2 特性记述	168
5.5.3 结果	168
5.6 高负载粉末冶金齿轮选择性表面致密化	170
5.6.1 粉末冶金齿轮的优势	171
5.6.2 粉末冶金齿轮的改进	173
5.6.3 高负载粉末冶金齿轮的开发	174
5.6.4 选择性表面致密化工艺	175
5.7 高密度粉末冶金螺旋齿轮的开发	179
5.7.1 AncorMax D™ 工艺	180
5.7.2 AncorMax D FLN2-4405 的性能	181
5.7.3 螺旋齿轮原型的生产	182

5.7.4	改进粉末冶金零件物理性能的方法	183
5.7.5	表面致密化齿轮生产	184
5.8	轿车变速器粉末冶金齿轮	187
5.8.1	试验	187
5.8.2	特性	189
5.8.3	结果	190
5.8.4	3轴总成的成对台架试验	194
5.8.5	结论	194
	参考文献	195
第 6 章	制造粉末冶金汽车零部件的金属注射成形 (MIM) 工艺	196
6.1	金属注射成形——21 世纪的金属零件成形工艺	196
6.1.1	MIM (金属注射成形) 工艺	197
6.1.2	生产过程概述	197
6.1.3	MIM 零件的应用场合	198
6.1.4	设计准则	200
6.2	用金属注射成形制造的汽车零件	205
6.2.1	金属注射成形工艺过程	205
6.2.2	MIM 汽车零件实例	206
6.3	美国 MPIF 标准 35《金属注射成形零件材料标准》(2007 年版)	211
	参考文献	223
附录	近年来开发与应用的粉末冶金汽车零件	224
附录 1	发动机零件	224
附录 2	变速器零件	229
附录 3	其他零件	235

第1章

高密度粉末冶金汽车零件的主要生产工艺



所谓高密度粉末冶金汽车零件，一般是指密度高于 6.9g/cm^3 的零件。由图 1-1 可看出，在 1979 年以前生产的粉末冶金零件中，密度低于 6.9g/cm^3 者约占 80%，这主要是由于当时使用的铁基粉末的基粉是还原铁粉。进入 20 世纪 80 年代后，由于水雾化低碳钢粉的开发与生产，以及 20 世纪 90 年代中期以预合金化 Mo 钢粉为原料的低合金钢粉的开发与生产，到 2005 年，在生产的粉末冶金零件中，高密度零件增长到了 60% 以上。

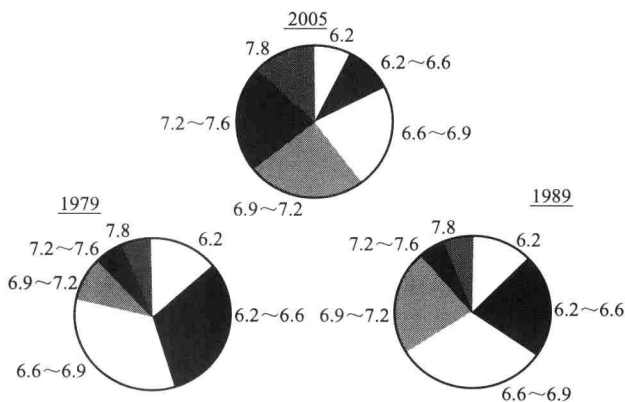


图 1-1 粉末冶金零件密度的提高进程 (单位: %)

在 21 世纪以前，制造高密度粉末冶金汽车零件的生产工艺主要是熔渗铜、二次压制/二次烧结、粉末锻造及温压。表 1-1 列出了这些生产工艺的优势与缺欠。图 1-2 表明了这些生

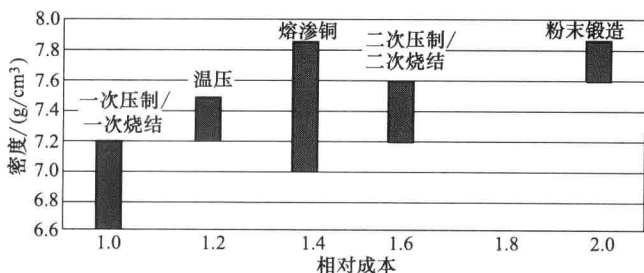


图 1-2 粉末冶金零件的生产工艺、密度与相对成本的关系

表 1-1 高密度粉末冶金零件生产工艺

生产工艺名称	优 势	缺 欠
熔渗铜	压力密封 只一道工序 可选择 和零件形状无关	不能填充大孔隙 尺寸变化大 强度较低 多相显微组织 增加零件的处理作业
二次压制/二次烧结	零件密度高 不需要熔渗铜 尺寸变化小 力学性能好	零件形状较简单 增加工序 需要第二副模具 需要低温退火
粉末锻造	100%无孔隙密度 力学性能与锻钢相当	形状复杂程度受限制 锻件与模具磨损 没有压制/烧结的零件尺寸精密 资金密集型工艺 零件的生产成本高
温压	烧结件密度 $>7.25\text{g/cm}^3$ 尺寸好控制 生产成本较低 不需要特殊的烧结炉与压机 可生产大型零件	有时需要对粉末与模具进行预热 粉末的加热设备与费用要求高 预混合粉压坯的无孔隙密度为 98%

产工艺可达到的密度与相对生产成本之间的关系。可以看出，用一次压制/一次烧结生产的零件成本最低。对于高密度零件，温压生产的零件生产成本较低。下面对这几种生产工艺予以简要说明。

1.1 熔渗铜

用铜或铜合金熔渗铁或铁碳合金压坯中的连通孔隙，在粉末冶金零件生产中已应用了多年。熔渗铜的结构零件密度可达到 7.4g/cm^3 或更高。因此，熔渗铜的结构零件力学性能好。

熔渗铜的零件可用于需要压力密封者，如液压泵的零件，较小的孔隙可被熔渗材料填充，较大的孔隙趋向于只能部分填充，除非采用真空处理，才能达到较充分的填充。为增强某些零件的局部使用性能，可采用选择性局部熔渗，例如熔渗汽车分动器行星齿轮架的花键。鉴于这种工艺会增高材料与加工的成本，因此，制造的零件生产成本较高，而且，在熔渗片与粉末冶金坯件接触处会产生“铜蚀”现象，另外，尺寸精度不如压制/烧结的零件好。

但是，用熔渗铜工艺可制造韧性能与可锻铸铁零件相竞争的大型铁基粉末冶金零件。

1.2 二次压制/二次烧结工艺

在利用现有设备的条件下，提高零件压坯密度的较现实的方法是二次压制/二次烧结工艺。对于较软的烧结材料，这种工艺颇为有效。表 1-2 为采用二次压制/二次烧结工艺时烧结铁的孔隙度变化。注意，在二次压制/二次烧结工艺中，预烧结的目的是烧除润滑剂，消除内应力，使材料软化，以便二次压制时提高密度。

表 1-2 二次压制/二次烧结时烧结铁孔隙度的变化

工序与工艺制度	孔隙度/%	孔隙度的变化/%
第一次压制:压制压力 6tf/cm ²	13.1	100
预烧结:850℃×1h	12.6	96.1
第二次压制:压制压力 6tf/cm ²	7.8	55.7
烧结:1250℃×2h	6.3	49.0

图 1-3 为烧结件密度与抗拉强度、伸长率及硬度的关系。鉴于二次压制/二次烧结工艺的优势，在 20 世纪 90 年代以前，汽车变速器的输出轴毂就早已采用二次压制/二次烧结工艺大量生产与应用了！这个零件见图 1-4，其用于满负荷后轮驱动车辆的变速器中，将动力直接传递给输出驱动轴。为保证结构的完整性，技术条件规定，其径向的压溃负荷为 18.4kN、轴向压溃负荷为 43.1kN。制造这个零件的预混合粉组成（FN-0205）见表 1-3。

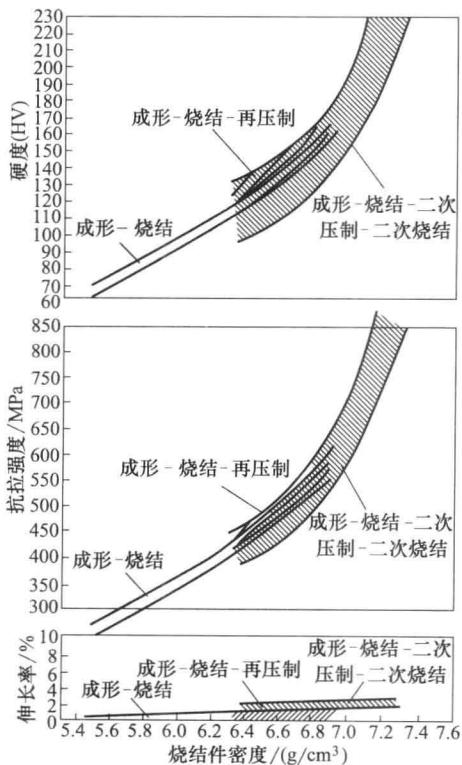


图 1-3 烧结件密度和硬度、抗拉强度及伸长率的关系

化学组成：化合碳 0.7%～0.8%，Cu2.5%，杂质（P、S、Mn、SiO₂）2.5%，Fe 余量；
原料粉：还原铁粉（MH100），天然石墨粉，电解铜粉；
处理条件：成形压力 2～8tf/cm²；烧结（850～1150℃）×60min；压制压力 4～8tf/cm²；二次烧结（1150～1250℃）×60min；炉内气氛 H₂ 或分解氨

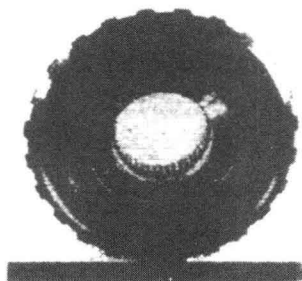


图 1-4 变速器输出轴毂

表 1-3 用二次压制/二次烧结制造输出轴毂的预混合粉组成（质量分数） %

基粉	Ni 粉	石墨粉	润滑剂
Fe	2.5	0.60	0.75

1.3 粉末锻造

粉末锻造跨接了常规粉末冶金结构零件与钢锻件间的空白。粉末锻造是将加热的粉末预成形件在闭合模具中进行一次锤击。粉末锻造有两种基本方式：镦锻与再压缩锻造。镦锻时材料是在径向产生流动，而再压缩锻造时材料主要是产生轴向流动。镦锻会造成模具磨损较大，而且和再压缩锻造相比，较难达到要求的尺寸精度。用再压缩锻造进行致密化，需要较大的压力，但尺寸较好控制。

粉末锻造的应用有自动变速器零件、凸轮轴凸角及连杆。对于变速器零件，一般使用水雾化的预合金化粉末，这些零件一般要进行淬火或渗碳。对于粉末锻造连杆，通常采用铜钢，同时，连杆是在锻造状态下使用的。

1.4 温压

增高粉末冶金成形压坯密度的另外一种工艺是在压制之前，将粉末与模具进行加热，因此，这种工艺叫做温压。

大多数温压工艺都是依靠热固性聚合物将粉末颗粒黏在一起，粉末的轻微软化与热黏结有助于密度略增高与达到较高的生坯强度，粉末与模具的加热温度通常为 120~150℃，压制压力一般为 700MPa。

温压用的预混合粉都是由适量的黏结剂-润滑剂系统与铁粉或低合金钢粉组成的。起初，温压是将预混合粉与模具都加热到 120~150℃，在这个温度范围内，由于铁的压缩屈服强度减小，伴随着润滑剂软化，在接近无孔隙密度（pore-free density）时，在阴模内产生近似静压作用，从而使压坯达到较高密度。值得注意的是，一般添加的润滑剂为 0.6%（质量分数），因此，可达到较高的无孔隙密度（PDF）。

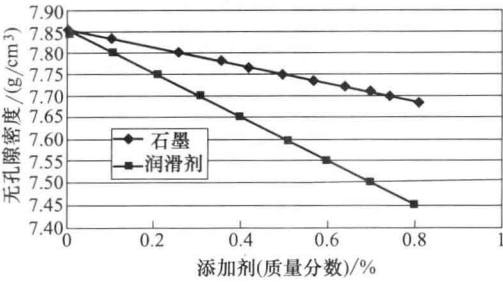


图 1-5 石墨、润滑剂的添加量与 F-0000 的 PDF 的关系

PDF（无孔隙密度）的定义是材料中所有孔隙都消除时的材料密度。对于锻轧的钢材，其 PDF 为 7.85g/cm³。实际上，这个密度取决于合金的组成与显微组织的特征。铁基粉末冶金材料的原料是由铁粉、添加的合金元素粉及润滑剂组成的复杂混合物，这种预混合粉的无孔隙密度（PDF）是不同的。式（1-1）为材料的 PDF 与预混合粉组分的关系。表 1-4 为各种合金化元素的典型密度。

重要的是，石墨与润滑剂都是低密度组分，它们都会显著降低材料的 PDF，如图 1-5 所示。

$$PDF = \sum \frac{\text{组分的质量百分数}}{\text{组分的密度}} \quad (1-1)$$

表 1-4 组分材料的密度

材料名称	密度/(g/cm³)	材料名称	密度/(g/cm³)
Ancorsteel 1000B	7.841	Inco Nickel 123	8.846
Ancorsteel 4600V	7.844	石墨	2.295
Distaloy 4800A	7.896	润滑剂	0.90~1.15
雾化 Copper	8.047		

对于一次压制/一次烧结工艺,最重要的是,使预混合粉中的润滑剂与石墨的添加量最小化。在用刚性模具压制时,需要考虑另外一个问题,即压坯脱出后的回弹。倘若对零件施加的压力过高,回弹可能使压坯内部产生微小裂纹。已经证明,从阴模中脱出后,材料的PFD实际上限是98%,超过这个值,成形的压坯内部将开始出现分层。预混合粉的组成也会影响回弹;润滑剂会使回弹的水平增高。

1.5 温模压制工艺

用温压工艺生产的高密度零件虽然在增多,但需要将预混合粉与模具同时加热到130℃左右,毕竟在作业上有一定难度。随着黏结剂与润滑剂技术的研制进展,开发出了只需要将模具加热到60~70℃的生产工艺,即所谓的“温模压制工艺”。现在开发出的温模压制材料AncorMax 200中只添加了0.4%(质量分数)润滑剂,在压制压力760~830MPa下,用温模压制,就能将压坯密度增高到7.4g/cm³。

当前,适于用温模压制工艺生产的零件质量不大于700g,壁厚不大于19mm,高度不超过32mm。

温模压制的优势在于,可增高密度(0.05~0.15g/cm³),附属设备较少,可减少粉末损耗。不足之处是,由于传递给粉末的热量有限,润滑剂的添加量较少,零件高度受到一定限制。

1.6 模壁润滑

如上所述,减少添加于预混合粉中润滑剂的数量,对增高粉末冶金零件生坯密度与烧结件密度都有重大影响。理论上,最需要添加润滑剂的地方是阴模模壁处。一直在研究与开发可靠的模壁润滑系统,模壁润滑不是一个新观念,过去使用水基或溶剂基系统的研究,在装粉之前都需要一个干燥过程。静电系统的开发消除了干燥过程,并使其内部润滑剂的总含量减小到0.2%~0.4%(质量分数),这可将压坯的密度增高0.15%~0.25%(质量分数),同时生坯与烧结件的强度也相应增高。

模壁润滑的优势还有,需要除去的内部润滑剂含量较少,从而烧结时的排放物相应减少。需要注意的是,生坯密度不可能大于7.4g/cm³,模壁润滑要被产业接受,其喷涂技术必须可靠并能够用倾注法装粉。

1.7 选择性表面致密化

增高粉末冶金零件芯部密度的好处在于可增高齿轮的拉伸性能、改进弯曲疲劳耐久性及增高滚动接触疲劳(RCF)强度。鉴于粉末冶金零件的选择性致密化可改进RCF耐久性和尺寸精度,其日益受到关注。早期的试验工作表明了这个工艺是如何适用于大量生产粉末冶金零件的。这种工艺还能成形齿轮的导程与轮廓的拱起,为最终用户提供的齿轮成品不需要进行后续加工。重要的是,选择性致密化与高的芯部密度相结合,制造出来的粉末冶金零件的拉伸、弯曲疲劳性能和锻钢零件的性能相同。采用选择性致密化工艺时,其RCF性能也和锻钢的相同。这为用粉末冶金齿轮替代高负载汽车变速器齿轮提供了可能。表1-5为用高密度生产工艺加工的FLN 2-4405的性能和经淬火/回火处理的AISI 8620锻钢的比较。

AISI 8620钢疲劳与冲击性能两者都有明显的方向性。拉伸试验的结果表明,除了伸长率外,AISI 8620钢并没有同样程度的方向性。所有试验都是用切削加工的圆形试棒进行的。

表 1-5 淬火与回火的 AISI 8620、FLN 2-4405 的力学性能

性 能	AISI 8620		FLN 2-4405 在 7.40g/cm ³ 条件下
	纵向	横向	
屈服强度/MPa	1075	1070	1240
极限抗拉强度/MPa	1355	1330	1445
拉伸伸长率/%	8.0	6.1	1.0
硬度(HRA)	70.6	69.3	81
冲击值(有凹口)/J	37	14	
冲击值(无凹口)/J	312	227	18
渗碳的疲劳耐久极限/MPa	490	370	405

疲劳强度与冲击韧性值的变化都是纵向大、横向小。淬火/回火的疲劳试样的纵向比横向的值约高 35%，有凹口冲击试样的纵向比横向的值大 50%，而无凹口试样的纵向和横向的值相差很小，只有 1.5%。

许多齿轮（例如直齿轮）的负载都垂直于主工作方向，因此，材料的方向性很重要。螺旋齿轮是在两个方向负载，其取决于齿轮的螺旋角，例如，20%螺旋齿轮的负载大部分是在横向。在文献数据库中，往往引用的是纵向力学性能，而很少列出横向性能。粉末冶金材料是各向同性的，由于中和区的密度减小，因此，在零件的中和轴上性能略有减小。可是，采用先进的粉末冶金零件生产工艺，可将中和区的密度减小显著压缩。依据表 1-5，粉末冶金零件的屈服强度、抗拉强度和锻钢相似，但伸长率、冲击值和锻钢相比，则明显减小。通过正确地选择合金材料与生产工艺条件，可得到同样的 RCF 性能。

1.8 金属注射成形 (MIM) 工艺

金属注射成形 (MIM) 也叫粉末注射成形 (PIM) 工艺，用这种工艺可以生产范围广泛的高性能、复杂形状零件，用这种工艺生产的汽车零件已有几十种，被誉为 21 世纪金属零件成形工艺。

MIM 使用的粉末极细小（有时 $\leq 10\mu\text{m}$ ），将细小粉末与黏结剂相混合，制成成形用的注射料。成形工艺和塑料的注射成形相似，将注射料成形为模型的形状，而不进行压制。成形零件的金属填充量约为 60%（质量分数），烧结时零件的收缩率为 15%~20%（体积分数）。若固体金属的填充量是均匀的，则烧结时的收缩将是均匀一致的。使用的金属粉末粒度非常细小，可将成形的零件烧结到 PFD 超过材料的 95%（质量分数）。

用 MIM 工艺制造的零件可与用精密铸造方法制造的形状复杂的零件相竞争。当前，MIM 工艺可生产尺寸约为 25mm、质量约为 8g 的零件。鉴于 MIM 工艺在脱黏工序将排放出大量的有机材料，其尺寸大小受到一定限制。

上面介绍了一些制造高密度粉末冶金汽车零部件的已在应用的生产工艺。实际上，利用高速压制、高压/冷压、高温烧结、液相烧结、活化烧结、热压、热等静压、挤压等工艺都能制造出高密度甚至完全致密的粉末冶金材料。问题不在于如何制造出高密度粉末冶金材料，关键在于如何制造出市场需要的、生产潜力大的、生产成本有竞争力的、尺寸公差精密、形状复杂、产品性能一致性好的高密度粉末冶金汽车零部件。以这种观点来看，当前与近期最值得关注的生产工艺是温压、表面致密化、粉末锻造及 MIM。