

国家杰出青年科学基金项目
国家自然科学基金重点项目
国家“863”高技术计划项目
广东省自然科学基金团队项目

金属粉末温压成形 原理与技术

李元元 著

华南理工大学出版社

金属粉末温压成形 原理与技术

责任编辑 王建洲 何丽云
封面设计 吴俊卿

ISBN 978-7-5623-2852-0



9 787562 328520 >

定价：30.00元

金属粉末温压成形 原理与技术

李元元 著

华南理工大学出版社

· 广州 ·

图书在版编目(CIP)数据

金属粉末温压成形原理与技术 / 李元元著. —广州: 华南理工大学出版社, 2008. 12

ISBN 978-7-5623-2852-0

I. 金… II. 李… III. 粉末成形 IV. TF124

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 018851 号

总发行: 华南理工大学出版社

(广州五山华南理工大学 17 号楼, 邮编 510640)

营销部电话: 020-87113487 87110964 87111048(传真)

E-mail: z2cb@scut.edu.cn http://www.scutpress.com.cn

责任编辑: 王建洲 何丽云

印刷者: 佛山市浩文彩色印刷有限公司

开本: 889mm×1194mm 1/32 印张: 8.5 字数: 241 千

版次: 2008 年 12 月第 1 版 2008 年 12 月第 1 次印刷

印数: 1~2 000 册

定价: 30.00 元

版权所有 盗版必究

前 言

为满足制造业结构调整、产品升级的需求，材料加工技术正朝着高性能、低成本、低能耗、短流程、高效率和近净成形的方向发展。近年来，涌现出不少集材料制备与零件成形于一体的新技术，如金属粉末的温压成形技术。金属粉末温压成形技术是通过改造传统的粉末冶金压机，采用特制的粉末加热、粉末输送和模具加热系统，将混有温压专用润滑剂/粘结剂的混合粉末加热到一个特定温度（一般 130 ~ 150 ℃）进行压制，再采用传统工艺进行烧结，以获得较高密度和性能的产品。金属粉末温压成形技术实际上是对传统的粉末一次压制/烧结工艺的创新，与其他粉末冶金零件制备技术相比，最显著的优点在于其以较低的成本制造出高密度、高精度的铁基粉末冶金结构零件，因而该技术的出现被认为是 20 世纪 90 年代以来粉末冶金领域中的一项创造性技术进步，并且为粉末冶金零部件制造在性能与成本之间找到了一个较佳的结合点。

金属粉末温压成形技术经过 10 余年的快速发展，应用范围不断扩大。但由于该技术的基础理论涉及粉末科学、聚合物科学、表面物理化学、热力学、传热学、烧结理论、计

算机数值模拟理论等多学科的交叉,到目前为止,据作者掌握的资料,还没有系统阐述温压技术的专著出版。为了促进我国粉末冶金行业的技术创新和进步,提升粉末冶金零件的制造水平,出版论述温压技术及相关理论的专著显得十分必要。

华南理工大学国家金属材料近净成型工程技术研究中心、广东省金属新材料制备与成形重点实验室10多年来一直从事金属粉末温压成形技术的研究工作,获得了国家杰出青年科学基金项目、国家自然科学基金重点项目、国家“863”高技术计划项目、国家“973”计划前期研究项目、教育部创新团队项目和广东省自然科学基金团队项目等的资助,对温压成形的理论和技术进行了系统深入的研究,在该领域已获得国家科技进步二等奖1项、广东省科学技术奖一等奖1项、中国专利优秀奖1项、国家发明专利授权20项、实用新型专利授权7项、计算机软件著作权登记3项。现将部分相关成果整理成书,希望它的出版有助于推动我国在粉末冶金工程领域的基础研究、新技术开发和新产品的应用,从而提高我国粉末冶金行业的技术创新能力和国际竞争力。

本书系统阐述了金属粉末温压成形的基本原理和技术,包括温压粉末的制备、温压成形的过程、温压成形中粉末的摩擦和塑性变形行为、温压致密化的主导机制、温压过程的三维数值模拟等,还介绍了温压成形坯的烧结技术、温压零件的机械加工技术、温压成形的精密制造系统以及温压技术在零件成形过程中的应用。本书可作为材料学、材料加工工程、冶金工程等专业的研究生教材或参考书,也可供粉末冶

金、材料、机械等领域的科研与工程技术人员参考。

本书撰写过程中得到了众多同行和专家的指导和帮助，包括黄伯云院士、钟掘院士、海锦涛教授、王尔德教授、雷源忠教授、曲选辉教授、果世驹教授、韩凤麟教授、贺跃辉教授、梁振锋教授等，在此表示衷心的感谢！

在本书的资料收集、图文编排过程中，得到了邵明教授、夏伟教授、陈维平教授、倪东惠教授、肖志瑜教授、周照耀教授、刘允中教授、屈盛官教授、李小强副教授、龙雁副教授、张文高级工程师、温利平高级工程师、杨超副研究员、吴苑标工程师、邱诚工程师、张双益博士、项品峰博士、林文松博士、陈普庆博士、赵伟斌博士、韩立发博士、汪志锋硕士、胡俊文硕士、何晖硕士、柯美元硕士、张菊红硕士等的大力支持和帮助，在此一并表示深深的感谢！

在本书撰写过程中，还借鉴或引用了一些前人的研究成果或经验，在此对相关人員也表示由衷的感谢！

书中错漏或不足之处，敬请广大读者批评指正。

作 者

2008 年 12 月

目 录

第一章 绪 论	1
1.1 金属粉末温压成形技术的特点	3
1.2 金属粉末温压成形技术的发展历程	7
1.3 金属粉末温压成形技术的发展展望	13
1.4 小 结	19
第二章 金属粉末温压成形混合粉料的制备	25
2.1 温压粉末制备	25
2.2 温压粉末的润滑剂类型、配比、加入方式	36
2.3 小 结	50
第三章 金属粉末温压成形过程及其影响因素	54
3.1 温压成形过程	54
3.2 温压成形的影响因素及其规律	76
3.3 温压成形中的模壁润滑	89
3.4 小 结	95

第四章 金属粉末温压成形的致密化机理	98
4.1 温压成形中粉末的摩擦行为	98
4.2 温压成形中粉末的塑性变形	105
4.3 温压致密化的几种主导机制	112
4.4 温压致密化的唯象分析和功效分析	114
4.5 小 结	120
第五章 金属粉末温压过程的数值模拟	123
5.1 热弹塑性力学问题的基本方程	124
5.2 椭球形屈服曲面的热弹塑性本构关系	127
5.3 热弹塑性增量有限元方法	132
5.4 粉末材料的温压特性	137
5.5 温压数值模拟的流动应力模型	144
5.6 温压典型零件的数值模拟	157
5.7 小 结	171
第六章 金属粉末温压成形坯的烧结	174
6.1 不同烧结工艺参数对温压烧结体的影响	174
6.2 温压成形坯的烧结硬化技术	185
6.3 小 结	194
第七章 金属粉末温压成形坯和烧结体的机械加工	196
7.1 温压成形坯的机械加工	197

7.2 温压烧结体的机械加工	198
7.3 温压复合材料的加工	200
7.4 小 结	220
第八章 金属粉末温压成形精密制造系统.....	225
8.1 粉末加热系统及保温设备	226
8.2 粉末输送	246
8.3 温压模具及其模架系统	248
8.4 温压成形精密压制设备及其温压零件	253
8.5 小 结	259

第一章 绪 论

粉末冶金是一项集材料制备与零件成形于一体的节能、节材、高效、近净(终)成形、无(少)污染的先进制造技术,在材料和零件制造中具有不可替代的地位和作用。密度对粉末冶金材料是至关重要的,它显著影响了粉末冶金材料的力学性能。生产高密度、高性能粉末冶金零件一直是粉末冶金行业追求的目标之一。要扩大粉末冶金零件的应用范围,必须实现制品的高性能化和低成本化,而要实现这一目标的最有效方法是使粉末材料高致密化。为此,粉末冶金界的研究者们对获得高密度、高性能、高精度、低成本的粉末冶金零部件的新技术、新方法进行了长期不懈的努力,并取得了重大进展,促进了粉末冶金工业的快速发展。金属粉末温压(warm compaction, WC)成形技术就是这样一门新型的粉末成形技术。它实际是对传统的粉末一次压制/烧结工艺的改进,即在传统粉末冶金工艺的基础上、在配料和压制两个工序上做了一些调整。传统方法是在室温下压制,而温压工艺是通过改进传统的粉末冶金压机,采用特制的粉末加热、粉末输送和模具加热系统,将混有温压专用润滑剂/粘结剂的混合粉末加热到一个特定温度(一般 $130 \sim 150\text{ }^{\circ}\text{C}$)进行压制,再用传统的烧结工艺进行烧结,以获得较高密度的产

品。温压工艺的基本过程如图 1.1 所示。

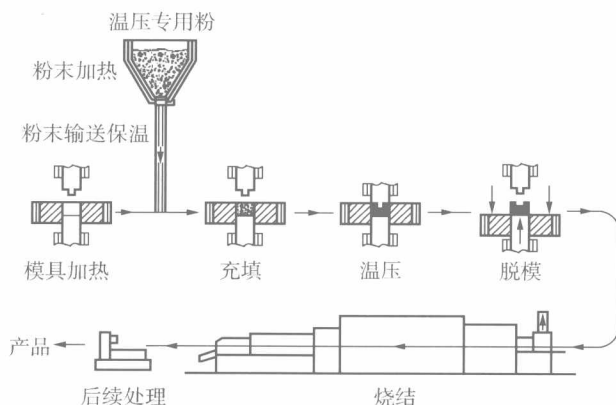


图 1.1 温压工艺的基本过程

从温压工艺的基本过程图可以看出，温压工艺主要包括混合粉的制备、粉末和模具的加热、温压成形、烧结四个阶段。

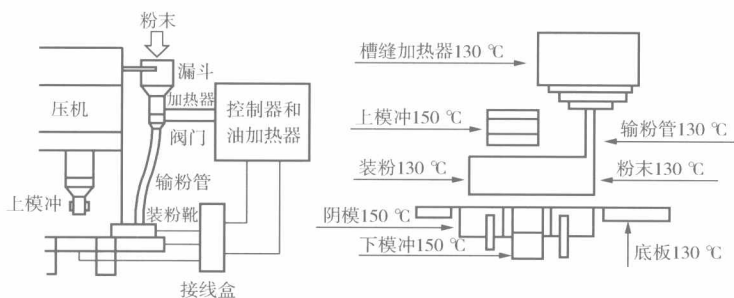
第一阶段为混合粉的制备，包括几个独立的步骤，即原料粉末的预混合、润滑剂（或粘结剂）的选择、粉末与润滑剂/粘结剂的混合。这一阶段，温压工艺与传统压制工艺最大的区别在于温压采用特殊的粉末作为原料。由于通常的温压温度为 $130 \sim 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，传统的润滑剂/粘结剂均不能用于温压，需要采用特殊的润滑剂/粘结剂。原料粉末一般为预混合粉，预混合好的粉末需要与润滑剂/粘结剂以一定的方式混合成均匀的、具有良好流动性的混合粉，然后进行加热。

第二阶段为粉末和模具的加热。这一阶段完全不同于传统粉末冶金压制工艺，是温压工艺独有的步骤，传统压制无

需加热，而温压是将加有特殊润滑剂的预混合粉末和模具等加热到 $130 \sim 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，为保证良好的粉末流动性和粉末充填行为，粉末和模具温度控制在 $\pm 2.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内。然后，将加热的粉未经具有保温功能的输粉管由送粉靴装入阴模型腔中，再进行压制。

第三阶段为温压成形。这一阶段几乎与传统压制工艺一样，只是在一定温度下压制。

最后一个阶段为烧结。这一阶段也与传统粉末冶金中的烧结相当，但是在烧结前要采用较长时间的预烧，将润滑剂脱除，因为温压压坯的相对密度较高，如果预烧段过短，会因润滑剂急剧挥发而来不及逸出压坯导致烧结体产生裂纹等缺陷。温压系统的结构示意图如图 1.2 所示。



(a) 温压成形的粉末加热器 (b) 加热容器与模具各部位的温度设定^[1]

图 1.2 温压系统的结构示意图

1.1 金属粉末温压成形技术的特点

温压成形是通过一次压制/烧结工艺制造高密度、高性

能、低成本粉末冶金结构零件的一项经济、可行的新技术^[2-3]。由于温压是在传统模压工艺基础上发展起来的，与其他粉末冶金零件制备技术相比，最显著的优点在于其以较低的成本制造高密度、高精度的铁基粉末冶金结构零件。因而被认为是 20 世纪 90 年代以来粉末冶金领域中的一项创造性技术进步^[2-3]，也被誉为“开创粉末冶金零件应用新纪元的一项新型制造技术”^[4]，为粉末冶金零部件在性能与成本之间找到了一个较佳的结合点。因此，高密度、低成本是温压技术最主要的特点。

高密度主要表现为压坯密度和烧结密度高^[5]。在同一压制力下，采用温压工艺压制的铁基粉末冶金零件压坯密度比传统方法压制的零件压坯密度高 $0.13 \sim 0.25 \text{ g/cm}^3$ ，可达 7.5 g/cm^3 ，烧结密度高达 7.64 g/cm^3 ^[5-6]；同时，压坯的强度也高，温压的压坯强度比常规压制的压坯强度提高 $50\% \sim 100\%$ ^[1,7]。高的压坯强度不仅降低了压坯搬运过程中的破损率，而且能在烧结工序之前直接对压坯进行钻孔、攻丝、车削和铣削等机加工，减少了压坯废料，节约机加工工时，提高刀具使用寿命，且零件表面的粗糙度值低，从而为用粉末冶金方法制造复杂形状的零件提供了方便^[8-9]；另外，材料性能高还体现在相同的压制力下，当零件密度、材质相同时，采用温压工艺制得的材料屈服强度比传统工艺提高 11% 、抗拉强度提高 13.5% 、疲劳强度提高 $10\% \sim 40\%$ 、冲击韧性提高 33% ^[10]。

低成本主要表现为在产品性能相当的前提下零件的制造成本低。表 1.1 比较了粉末冶金不同工艺的优缺点和成本。从表中可以看出，温压能以低于复压复烧的成本生产出与其性能相当的产品。值得注意的是，温压产品在某些方面可以和锻造产

品相竞争，但生产成本却低得多。表 1.2 是温压工艺和传统复压复烧工艺生产齿轮的成本比较。在零件性能相当的前提下，温压工艺生产的齿轮成本比复压复烧工艺的成本低 10% 左右。

表 1.1 粉末冶金不同工艺的优缺点及成本比较^[11]

成形工艺	密度/(g/cm ³)	成本系数	工艺特点
传统一次压制/烧结	<7.1	1.0	工序少，成本低，精度高，但制品密度低
温压一次压制/烧结	7.1~7.5	1.3	制品密度较高，工序少，成本较低，精度高，压坯力学性能高
渗铜	7.0~全致密	1.4	制品密度高，但工序较多，组织不均一，性能相对较差
传统复压复烧	7.2~7.6	1.5	制品密度较高，但工序较多，不适用于复杂零件
粉末锻造	>7.6	2.0	制品密度高，但成本高，工序多，精度低，不适用于复杂零件

表 1.2 温压工艺和复压复烧工艺生产齿轮的成本比较^[4]

工 序	行星齿轮		固定齿轮	
	复压复烧成本比率	温压成本比率	复压复烧成本比率	温压成本比率
混粉/送粉	24%	30%	34%	40%

续表1.2

工 序	行星齿轮		固定齿轮	
	复压复烧 成本比率	温压 成本比率	复压复烧 成本比率	温压 成本比率
模具	22%	—	19%	—
压制	—	32%	—	28%
预烧结	8%	—	7%	—
烧结	14%	16%	12%	14%
复压	13%	—	12%	—
震动磨光	2%	2%	1%	2%
热处理	17%	20%	15%	16%
制造成本	US \$ 0.35/件	US \$ 0.31/件	US \$ 0.40/件	US \$ 0.37/件

其次，温压技术的主要特点还体现在压制压力低、脱模力小和弹性后效小等方面。采用温压可使获得相同密度压坯所需的压制压力降低 140 MPa 左右，相对地增大了压机的吨位^[5,7]；温压脱模力比传统压制工艺低 30% 以上，低的脱模力意味着温压工艺易于压制形状复杂的铁基零件和减小模具磨损，从而延长模具的使用寿命。同时，还可以降低粉末混料中润滑剂的添加量，进一步提高压坯密度和压制较大面积的零部件^[5,12]；采用温压技术压制的零件毛坯在烧结后零件尺寸的变化比传统压制的要小得多，这样易于获得高尺寸精度的铁基零件，提高零件的合格率，降低成本。

另外，温压工艺还具有使压坯密度分布均匀的特点。由

于压制温度的提高,改善了粉末中润滑剂的性能,降低了压制过程中粉末与粉末之间以及粉末与模具壁之间的摩擦力,减小了摩擦损失,有利于压制力在整个零件内部的传递,促进了粉末颗粒的移动和重排,使粉末填充得更好。采用温压工艺制备齿轮类零件时,齿部与根部间的密度差比常规压制工艺低 $0.1 \sim 0.2 \text{ g/cm}^3$ [10]。

1.2 金属粉末温压成形技术的发展历程

进入 20 世纪 80 年代以来,许多行业,特别是汽车工业,尽可能多地采用粉末冶金高性能的零部件是提高汽车尤其是轿车在市场中的竞争能力的一种有力手段 [13]。而高密度的粉末冶金产品是保证其在轿车上具有优势的关键因素 [14]。常用来提高粉末冶金零部件密度的技术途径有 [15-16]: ①复压复烧; ②渗铜; ③粉末热锻; ④高温烧结。由于这些工艺存在着不同程度的成本和零件尺寸精度保证困难等问题,使本富于竞争力的粉末冶金零件的潜力难以得到充分发挥。为此,必须寻找新的提高粉末冶金零件密度、降低制造成本的技术途径。

美国通用汽车公司为提高粉末冶金零件的性能,对粉末冶金零件的成形工艺进行了系统的研究。其做法是将有机润滑剂、聚合物均匀地包覆在铁粉颗粒表面,并在 $100 \sim 300 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度下压制或注射成形后不烧结,目的是用铁合金颗粒铁芯来代替变压器用硅钢片铁芯。当时美国通用汽车公司提供的数据已包含了少量包覆的有机润滑剂可以提高压坯的整体密度的内容,但那时没有往铁基结构件上联想 [17]。20 世纪 80 年代中期,瑞典 Hoeganaes 公司在制备铁