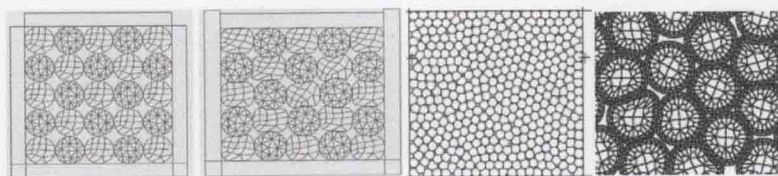


◎王德广 吴玉程 著

JINSHU FENMO GAOZHIMIHUA CHENGXING
JIQI SHUZHI MONI YANJIU

金属粉末高致密化成形 及其数值模拟研究



金属粉末高致密化成形 及其数值模拟研究

王德广 吴玉程 著



合肥工业大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

金属粉末高致密化成形及其数值模拟研究/王德广,吴玉程著. —合肥:
合肥工业大学出版社,2014.12

ISBN 978-7-5650-2082-7

I. ①金… II. ①王…②吴… III. ①金属粉末—粉末成形—研究
IV. ①TF124.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 306301 号

金属粉末高致密化成形及其数值模拟研究

王德广 吴玉程 著

责任编辑 权 怡

出 版	合肥工业大学出版社	版 次	2014 年 12 月第 1 版
地 址	合肥市屯溪路 193 号	印 次	2015 年 4 月第 1 次印刷
邮 编	230009	开 本	710 毫米×1010 毫米 1/16
电 话	总 编 室:0551-62903038 市场营销部:0551-62903198	印 张	14.25
网 址	www.hfutpress.com.cn	字 数	224 千字
E-mail	hfutpress@163.com	印 刷	合肥现代印务有限公司
		发 行	全国新华书店

ISBN 978-7-5650-2082-7

定价:32.00 元

如果有影响阅读的印装质量问题,请与出版社市场营销部联系调换。

前 言

王德广博士学位论文的研究工作是在合肥工业大学吴玉程教授和美国伊利诺伊州理工大学热处理技术中心 Prof. Philip Nash 的悉心指导下完成的,本书基于此研究的成果总结而成。此研究得到了国家自然科学基金(51104051)、安徽省自然科学基金(20571022)、安徽省“十五”二期科技攻关项目(04002039)、合肥市重点科技攻关项目(20051044)等项目的支持;同时得到了国家留学基金管理委员会和美国伊利诺伊理工大学机械材料与航空系热处理中心的资助。本书以如何获得高密度高性能的粉末冶金制品为研究目标,首先讨论了粉末模具控制温度和压制力对粉末温压致密化的影响,采用冲击锤和分离式霍普金森高速撞击试验两种方法对铁基合金粉末(Distaloy4600A)和纯钛粉末(Ti-Dupont)高速成形变形过程进行了分析,系统地研究了铁基合金粉末制品密度与力学性能的关系;其次对粉末高致密化成型技术致密化机理、多孔材料力学性能与密度的关系以及粉末成型进行了有限元数值模拟研究。

本书得到了合肥工业大学摩擦学研究所焦明华、解挺、俞建卫、尹延国、田明等老师,以及材料学院黄新民、王文芳、郑玉春、舒霞等老师的大力支持,感谢安徽建筑大学朱绍峰老师以及合肥波林新材料有限公司的马少波经理、徐伟工程师、田清源师傅及其他员工在试验测试等方面的指导和帮助。感谢课题组邓景泉、汪峰涛、任榕、陈勇、王德宝和实验室其他同学的支持和帮助。

由于作者水平有限,书中难免出现错误,敬请读者批评指正。

作 者

2014年5月

目 录

第 1 章 绪 论	(001)
1.1 引言	(001)
1.2 粉末高致密化成形新技术简介	(004)
1.2.1 粉末温压成形	(004)
1.2.2 流动温压成形技术	(005)
1.2.3 模壁润滑技术	(005)
1.2.4 高速压制技术	(005)
1.2.5 动力磁性压制技术	(006)
1.2.6 爆炸压制技术	(006)
1.2.7 金属注射成形技术	(007)
1.3 温压工艺研究与应用	(009)
1.3.1 国外研究与应用	(009)
1.3.2 国内研究与应用	(010)
1.3.3 温压致密化机理的研究	(014)
1.4 粉末高速压制成形的研究	(016)
1.5 粉末成形数值模拟研究	(019)
1.5.1 国内研究状况	(022)
1.5.2 国外研究状况	(024)
1.6 研究内容与方案	(031)
1.6.1 研究内容	(031)
1.6.2 研究方案	(032)

1.7 支持项目	(033)
第2章 粉末温压成形与致密化机理	(034)
2.1 温压工艺特点	(034)
2.2 粉末温压致密化影响因素的分析	(036)
2.2.1 温压粉末	(036)
2.2.2 温压温度	(038)
2.2.3 温压压力和压制速度	(038)
2.2.4 温压加热系统	(038)
2.3 粉末温压成形及致密化机理研究	(040)
2.3.1 电阻式温压加热系统	(040)
2.3.2 电磁感应加热系统的研究与开发	(053)
2.4 温压致密化机理的分析	(059)
2.5 本章小结	(061)
第3章 粉末高速压制成形与致密化机理	(063)
3.1 引言	(063)
3.2 高速压制成形工艺特点	(064)
3.3 粉末高速压制成形工艺的研究	(065)
3.3.1 冲击锤法	(066)
3.3.2 分离式霍普金森高速撞击法	(086)
3.3.3 传统浮动阴模压制	(092)
3.4 粉末高速压制成形致密化机理的分析	(093)
3.5 本章小结	(095)
第4章 粉末多孔材料力学性能与密度关系	(098)
4.1 粉末多孔材料杨氏模量与密度关系研究	(098)
4.1.1 研究现状	(098)
4.1.2 粉末多孔材料弹性模量的研究	(106)
4.2 粉末多孔材料局部密度评价方法	(112)

4.2.1 引言	(112)
4.2.2 局部密度评价方法的研究	(113)
4.2.3 硬度法评测制品局部密度方法的研究	(115)
4.3 粉末压制过程中摩擦现象的研究	(122)
4.3.1 引言	(122)
4.3.2 摩擦描述模型	(123)
4.3.3 粉末成形过程中摩擦行为研究现状	(124)
4.3.4 粉末压制过程中摩擦行为的研究	(135)
4.4 本章小结	(145)
第5章 粉末温压成形有限元数值模拟	(147)
5.1 有限元方法概述	(147)
5.2 粉末压制热弹塑性力学问题的基本方程	(149)
5.3 金属粉末温压成形数值模拟模型建立	(153)
5.4 金属粉末温压成形数值模拟分析	(155)
5.4.1 不同温度状况下的粉末压制	(155)
5.4.2 压制方式对粉末压坯性能的影响	(161)
5.4.3 压坯的形状因子对粉末压坯性能的影响	(163)
5.4.4 压制速度对粉末冶金性能的影响	(173)
5.4.5 摩擦有利化研究	(178)
5.4.6 粉末三轴向压制成形	(185)
5.5 本章小结	(192)
第6章 全书总结、创新之处及工作展望	(195)
6.1 全书总结	(195)
6.2 创新之处	(201)
6.3 工作展望	(202)
参考文献	(204)

第1章 绪论

粉末冶金零部件广泛应用于机械、电子、汽车、自动化等领域,中国汽车工业的大力发展,为粉末冶金技术和粉末冶金零部件的应用提供了广阔的应用前景和市场。但是粉末冶金制品固有孔隙的存在显著影响了制品的性能,并使精密成形的难度增加了。传统的粉末压制工艺制得的制品相对密度一般小于90%,粉末温压成形和高速压制成形在增加成本不多的情况下,可以有效地提高制品密度,同时粉末高速成形可以快速大量生产粉末冶金零部件。这两种新型粉末高致密化成形技术引起了广大研究人员和生产者的重视。由于粉末成形过程复杂,因此详细了解粉末成形过程中粉末致密化、密度变化与分布规律、粉末变形特征成为一个难题,而有限元数值模拟技术的发展和运用是人们详细了解粉末成形过程有效、快速的工具。

1.1 引言

粉末冶金技术是一项集材料制备与零件成形于一体,节能、节材、高效、性能优异、产品精度高且稳定、近净(终)成形、无(少)污染的先进制造技术,在材料和零件制造业中具有不可替代的地位和作用,已经成为当代材料科学发展的前沿领域。粉末冶金零部件已普遍应用于机械、电子、自动化、航天等领域,特别是随着汽车工业的大力发展,粉末冶金工业获得了前所未有的发展机遇,其市场前景非常广阔。现在,汽车上使用的粉末冶金零部件日趋增多。汽车工业一直是粉末冶金零部件的第一大用户或市场,表现在两个方面:一方面汽车产量不断增加。这在亚洲尤为显著,如中国的汽车2003年产量已达到440万辆,比2002年增长了35%;印度为120万辆,泰国为80

万辆,均比 2002 年增长了 40%。另一方面粉末冶金零件在单辆汽车上的用量也在不断增加。北美平均每辆汽车用粉末冶金零件质量最高,已达到 19.5kg,欧洲平均为 9kg,日本平均为 8kg。中国由于汽车工业高速发展,拥有巨大的粉末冶金零部件市场前景,已经成为众多国际粉末冶金企业关注的热点^[1~3]。

粉末冶金铁基零件在汽车上的应用主要是发动机、传送系统、ABS 系统、点火装置等。欧洲的柴油发动机装配的汽车数量比例已由 1998 年的 25% 上升至 2003 年的 45%,日本尼桑公司则采用新型的 DIG 发动机。与通常的多点喷射汽油发动机相比,这些发动机的马力更强大,油耗更低。高性能发动机的技术条件要求粉末冶金铁基零件性能更好、可靠性更高。此外,在提高零部件性能的同时,注重工艺的改进、降低成本也是非常重要的。2004 年 EPMA 技术革新奖(EPMA Innovation Awards)的获奖零件完全体现了上述理念。值得一提的是,这次获奖的零件都是汽车用铁基零件。例如 Miba 公司 2003 年中期开发的烧结曲轴齿轮(Camshaftgear),采用表面硬化手段,使齿根和法兰部位的硬度分别达到 750HV5 和 200HV5,从而能够代替锻钢。该公司称,这是第一个粉末冶金烧结齿轮用于内燃机的高强度曲轴部位。该零件已经生产 100 多万件。汽车轻量化为高比强度材料的应用提供了发展前景,如铝合金、钛合金、镁合金及其复合材料。特别是在发动机传送系统(Powertrain)方面,零部件的轻量化往往能够明显改善汽车的性能^[4]。

美国国家科学基金委员会向美国总统和国会提交的科学展望对粉末冶金技术曾作了如下论述:“这些技术的出现和发展,将给运输、空间、能源系统带来大量的经济利益,并且提高美国的工业基础,有可能对美国工业生产局面产生相当大的冲击。”2004 年 6 月,在芝加哥召开的由美国金属粉末工业联合会举办的 2004 年粉末冶金和颗粒材料年度会议上(PM² TEC2004),发布了由美国金属粉末工业联合会会长 David L. Schaefer 先生和首席执行官 C. James Trombino 先生共同撰写的《2004 年北美地区粉末冶金工业发展形势的报告》(以下简称《报告》)。《报告》指出,汽车行业现在是北美地区粉末冶金制品的最大市场,并且在未来的 10 年里仍将如此。2003 年北美地区轻型汽车的总产量约为 1580 万辆,2004 年北美地区轻型汽车的总产量与

2003年基本持平。2004年北美地区生产的每辆汽车中使用的粉末冶金制品总量继续增加,几乎接近43lb/辆(19.5kg/辆),未来的3年内,北美地区生产的汽车平均每辆车每年增加使用约1lb(0.454kg)的粉末冶金制品。为了降低整车制造费用,毫无疑问美国三大汽车公司将会使用更多的粉末冶金零件,尤其在新型的汽车用引擎和变速器中。未来汽车的重量会更轻,粉末冶金制品会担当更重要的角色,未来汽车使用的粉末冶金零件将包括连杆、阀门、摇臂、油泵齿轮、活塞栓、汽缸衬套及托架等。同时《报告》还指出,在精密金属零件制造领域,利用粉末冶金技术是最有效的增加工业产值的方法^[5]。

目前,美国汽车使用的粉末冶金零件已达300种、750件。美国MPIF(金属粉末工业联合会)从1995年开始,每年举行一次粉末冶金设计竞赛,竞赛设大奖与优秀奖两个奖项。1998~2009年参赛获奖的零件共计156个,其中粉末冶金汽车零件50个,发动机零件16个,变速器零件19个,其他零件15个。

中国是一个巨大的汽车、电器和工具的潜在市场,特别是汽车工业的快速发展,给粉末冶金工业提供了很大的市场前景。根据中国机协粉末冶金分会34个单位的统计资料,2000年汽车产量为200万辆,加入世界贸易组织后,汽车产量基本上翻了一番,2003年汽车产量达到400余万辆,2005年为600万~700万辆,2006年为728万辆,2007年为880万辆,2009年为1379万辆,2010年为1600万辆。中国汽车行业总需求量已跃居世界第3位,汽车产量居世界第4位。然而目前中国每辆汽车用粉末冶金零部件总重量还很小,一直维持在4kg左右,与欧美、日本等发达地区和国家相比还有很大的差别^[6,7]。这主要与中国粉末冶金行业整体技术水平低下、工艺装备落后有关,粉末冶金技术的开发能力需要提高。

快速发展的汽车工业同时也给粉末冶金技术带来巨大的挑战,对粉末冶金制品的性能要求也日益提高,特别是复杂形状的粉末冶金零件力学性能。粉末冶金材料是基体和孔隙的复合体^[8],其固有孔隙不仅显著影响粉末冶金材料的力学、物理、化学和工艺性能,同时也使粉末精密成形的难度增加。粉末压制成形是粉末冶金工艺过程的第二道基本工序,是使金属粉末密实成具有一定形状、尺寸、密度和强度压坯的工艺过程。该工艺过程对

粉末冶金制品最终性能有着很大的影响,特别是力学性能。该过程往往出现各种缺陷,其中由于密度分布不均匀引起的缺陷和存在的裂纹是粉末冶金制品最主要的缺陷,这些缺陷对后续烧结工艺造成潜在的危害,这种危害往往造成粉末冶金制品最终因性能低劣而废弃,造成资源的极大浪费。粉末冶金制品的密度大小与其性能有着很大的联系,两者之间的关系成正比,密度提高了,制品的各项性能都有所提高。对于铁基制品,密度达到 $7.2\text{g}/\text{cm}^3$ 后,其硬度、抗拉强度、疲劳强度、韧性等都会呈几何级数增大^[8]。传统一次压制/一次烧结生产的铁基粉末冶金制品,其密度一般在 $7.1\text{g}/\text{cm}^3$ (相对密度约 90%) 以下,因此其力学性能远低于同类材料的全致密件。

综合上述分析,有必要对粉末高致密化成形技术进行研究,以获得高密度、高性能的粉末冶金零部件。

1.2 粉末高致密化成形新技术简介

从传统的致密化途径来看,复压复烧、粉末锻造、渗铜、热等静压、热压等技术各有其优缺点。20 世纪 90 年代以后粉末冶金技术有了突破性进展,近年来更呈现加速发展的态势,一系列新技术、新工艺相继推出,如温压、流动温压、模壁润滑、高速压制、动力磁性压制技术、爆炸压制技术、超高压压制成形、放电等离子烧结、激光选区烧结、微波烧结、电火花烧结技术、激光立体成形技术等新技术^[1~54]。目前粉末冶金技术正向着高致密化、高性能化、集成化、最优化和低成本等方向发展。同时,粉末冶金制品也向形状复杂化、尺寸精度高、性能特殊等方向发展,使得粉末冶金技术的应用范围更加广泛。

1.2.1 粉末温压成形

粉末温压技术由美国 Hoeganaes 公司在国际粉末冶金和颗粒材料会议 (PM2TEC94) 上正式公布的。国外多家公司已利用温压技术开发出高密度、高强度的斜齿轮。温压工艺除使齿轮整体密度增大外,也使齿的密度大为增加,使齿的强度比例提高约 30%,从而省去了用滚压工艺来局部提高齿

部密度的工序。温压工艺作为一项新型的粉末成形技术,具有广泛的应用范围和较高的技术价值。

1.2.2 流动温压成形技术

流动温压成形技术是在粉末压制、温压成形工艺的基础上,结合了金属粉末注射成形工艺的优点而形成的一种新型粉末冶金零部件近净成形技术。该技术由德国 Fraunhofer 先进材料与制造研究所(IFAM)于2000年首次公布。流动温压成形技术通过提高混合粉末的流动性、填充能力和成形性,从而在 $80^{\circ}\text{C}\sim 130^{\circ}\text{C}$ 的温度下,在传统压机上精密成形具有复杂几何外形的零件,如带有与压制方向垂直的凹槽、孔和螺纹孔等零件,而不需要其后的二次机加工。该技术既克服了传统粉末冶金在成形复杂几何形状方面的不足,又避免了金属注射成形技术的高成本,是一项极具潜力的新技术,具有非常广阔的应用前景。

1.2.3 模壁润滑技术

近年来,采用模壁润滑技术取代粉末润滑技术已成为粉末成形研究和开发的又一热点。传统粉末零件成形时,为了减少粉末颗粒之间和粉末颗粒与模壁之间的摩擦,在粉末混合物中需添加一定量的润滑剂,但因润滑剂密度低,不利于获得高密度的粉末冶金零件,而且润滑剂的烧结会污染环境,甚至会降低烧结炉的寿命和产品的性能。模壁润滑技术的应用则很好地解决了这一难题。模壁润滑技术作为一种易嫁接的技术,与其他成形技术结合,将为粉末高致密化精密成形提供更为有效的途径。最近,St-Laurent 成功地将模壁润滑技术引入温压技术,获得了密度大于 $7.4\text{g}/\text{cm}^3$ 的钢铁粉末生坯。日本丰田汽车中心研究人员利用温压、模壁润滑与高压制压力使铁基粉末压坯近乎达到全致密。

1.2.4 高速压制技术

高速压制技术是瑞典的 Höganäs 公司在2001年6月推介的一种新技术。该技术可能是粉末冶金工业寻求低成本高密度材料加工技术的又一次新突破。高速压制技术的速度是传统压制技术的500~1000倍,适于大批量

生产零部件。可以产生间隔 0.3 s 的多重附加冲击波,以不断提高密度。当粉末在 2~30m/s 速度下进行高能锤击(质量为 5~1200kg)压制时,根据使用的材料和润滑方式,其烧结密度可达到 $7.8\text{g}/\text{cm}^3$ 以上,可压制出质量为 5~10kg 的零件。实际上,该技术是传统粉末压制成形技术的一种极限式外延的结果。如果将高速压制技术与温压技术相结合,即将温压中成形速度极大提高,将可能成为高速压制和温压技术创新和发展的一个契机。该技术适用于制备阀门、简单齿轮、气门导筒、主轴承盖、轮毂、齿轮、法兰、轴套、轴轴承套圈和凸轮凸角机构等产品。

1.2.5 动力磁性压制技术

动力磁性压制技术是 1995 年美国开始研究的一种新型的高性能粉末近终成形压制技术。该技术采用脉冲调制电磁场施加的压力的方式来固结粉末。与传统的粉末冶金压制工艺一样,动力磁性压制技术也是两维压制工艺,但却是径向压制而不是轴向压制。目前,许多动力磁性压制技术的应用已接近工业化阶段,如应用动力磁性压制技术的 MAGNEPRESSTM 系统能每分钟生产十个零件,效率十分之高。

1.2.6 爆炸压制技术

爆炸压制又称冲击波压制,是利用化学能的一种高能率成形技术。该技术始于 20 世纪 50 年代末,因为当时宇航和原子能工业设备需要粉末材料制的高密度零件,后来用来生产隔热屏、轴承电子元件、传输过滤器以及高速设备的精密小件等类零件。使用该技术时,通常将金属粉末材料置于具有一定结构的模具中施加爆炸压力,爆炸物质的化学能在极短的时间内转化为周围介质中的高压冲击波,并以脉冲波的形式作用粉末,使其获得高密度。作用时间仅为 $10\sim 100\mu\text{s}$,粉末成形时间为 1ms 左右。爆炸压制方法是一种独特的加工方法,可使松散材料的密度达到理论密度。能将不适合传统压力加工的材料制造成零件,可得传统的不可压缩的金属陶瓷材料、低延性金属等压制成复合材料,典型的应用是将高温合金粉末用于成形飞机发动机的耐高温零件。爆炸技术压制在粉末冶金磁性材料成形中也发挥了很重要的作用。

1.2.7 金属注射成形技术

粉末注射成形技术是随着高分子材料的应用而发展起来的一种新型固结金属粉、金属陶瓷粉和陶瓷粉的特殊成形方法。使用该技术时,将大量热塑性黏结剂与粉料一起注入成形模中,施于低而均匀的等静压力,使之固结成形,然后脱黏结剂烧结。这种技术能够制造用常规模压粉末的技术无法制造的复杂形状结构(如带有螺纹、垂直或高叉孔锐角、多台阶、壁、翼等)制品,具有更高的材质密度(93%~100%的理论密度)和强韧性并具有材质各向同性等特性,且精度高,表面粗糙度等级高,成本低。

表1-1列举了几种压制工艺形式可获得的铁基粉末压坯相对密度,从中可以看到,温压成形与高速压制成形可获得较高的压坯密度^[10]。

表1-1 不同压制工艺形式获得的铁基粉末压坯相对密度

工艺形式	压坯相对密度	工艺形式	压坯相对密度
等静压(传统模具)	90	两次压制两次烧结	94
单次压制单次烧结	90	高速压制	95
温压	93	粉末锻压	99

通过性能与成本对比(表1-2和表1-3以及图1-1)可以看到,温压成形提供了低成本制备高密度、高性能粉末冶金零件的新途径,其能力可与现有锻钢进行竞争,而成本只比常规粉末冶金工艺高一些^[9,11~20]。

表1-2 各种粉末冶金工艺性能与成本比较

成形工艺	密度(g/cm ³)	成本系数	工艺特点
传统一次压制/一次烧结	<7.1	1.0	工序少,成本低,精度高,但密度低,性能差
温压工艺	7.1~7.5	1.3	密度高,工序少,成本低,精度高,生坯力学性能高,适用复杂零件
渗铜	7.0~全致密	1.4	密度高,但工序较多,组织不均匀,性能相对较差
传统复压复烧	7.2~7.6	1.5	密度较高,但工序较多,不适用于复杂零件

(续表)

成形工艺	密度(g/cm ³)	成本系数	工艺特点
粉末锻造	>7.6	2.0	密度高,但成本也高,工序多,精度低,不适用于复杂零件

表 1-3 复压复烧与温压成本比率对比

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%
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%
比率	100%	100%	100%	100%
制作成本	0.35 元/件	0.31 元/件	0.40 元/件	0.35 元/件

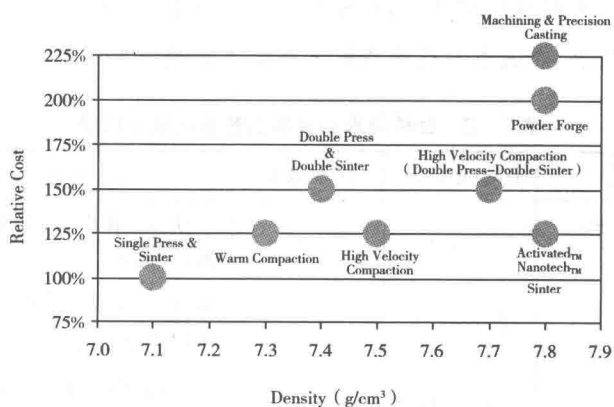


图 1-1 不同工艺所获制品相对密度及成本对比

综合上述研究,本文对粉末温压成形技术和高速压制成形技术进行了研究,分析了这两种成形工艺粉末致密化机理,并利用有限元数值模拟技术分析了粉末温压成形变形规律。

1.3 温压工艺研究与应用

粉末温压技术是采用特殊工艺配制的预合金化粉末,然后输送到模具系统,并将加有特殊润滑剂的预合金化粉末和模具加热至 $130^{\circ}\text{C}\sim 150^{\circ}\text{C}$,同时,为保证良好的粉末流动性和粉末充填行为,将温度控制在 $\pm 2.5^{\circ}\text{C}$ 以内,然后按传统粉末压制工艺进行压制的一项新型粉末冶金生产技术。其工艺流程:混合—温压—烧结—后处理—粉末冶金零件制品,该工艺过程可获得高密度(对于铁基制品,大于 $7.25\text{kg}/\text{cm}^3$)的粉末压坯。该技术已被认为是 20 世纪 90 年代以来粉末冶金生产领域最为重要的技术,在 1995 年获得美国粉末冶金工艺新技术新发展功勋奖。

1.3.1 国外研究与应用

粉末温压工艺是一项新型的制取高密度、高性能粉末冶金制品的粉末压制成形技术^[9,11~20]。自温压技术被正式公布到 1996 年年底为止,短短的两年时间就有大约 36 种温压产品在批量生产或准备批量生产,其中包括重达 112kg 用在福特卡车变速箱上的转矩涡轮毂,同时国外多家公司也利用温压技术开发出高密度、高强度的斜齿轮。温压工艺除使齿轮整体密度增大外,也使齿的密度大为增加,使齿的强度比例提高约 30%,从而省去了用滚压工艺来局部提高齿部密度的工序。日本日立粉末金属公司采用温压技术生产粉末冶金小节锥半角斜伞齿轮,成功取代过去以机加工锻钢坯的昂贵生产工艺。法国 Federal Mogul 公司运用温压技术为汽车工业制造了使用性能与锻造和粉末锻造相近但成本较低的连杆,表明了温压技术取得了重大突破。该公司在 2002 年生产了 350~600g 的各种连杆 1500 万件。瑞典 Höganas AB 与 Scania CV 公司采用温压工艺共同开发出一种用于重型卡车变速器的大型零件 Latch Cone,该零件长期以来都是用精密锻造或粉

末锻造方法生产的。由此可见,温压工艺具有工艺简单和较高性能价格比的优势,完全可以和锻造工艺竞争。

由于温压工艺作为一项新型的粉末成形技术,具有广泛的应用范围和较高的技术价值,因此在国外处于严格的专利保护下,相关技术受到严格的保密。温压工艺目前已经获得了几十项美国专利^[9,11~20],其保护范围主要在以下两个方面。一是预混合金粉(含特殊有机聚合物黏结剂、润滑剂和金属粉末)。现有的温压专利粉末研制生产公司主要有美国 Hoeganaes 公司的 AncordenseTM,瑞典 Höganäs AB 公司的 Densmix 和加拿大 QMP 公司的 Flowment WPTM。二是温压设备。温压专利加热设备主要有美国 Hoeganaes 公司 Cincinnati 机器公司合作开发的以电阻为加热源的 EL-TEMP 温压加热系统,美国 Hoeganaes 公司和美国微波材料技术公司共同开发的以微波为加热源的 Micro_Met 系统,Abbott Furnace Company 生产的 TPP300 系统、TOPS 系统,瑞典的 Höganäs 公司和 Linde Metal /teknik 公司合作生产的以热油加热的 Linde Metal/teknik 系统。因此开发具有自主专利的粉末温压加热系统成为我国发展温压工艺的主要因素之一。

1.3.2 国内研究与应用

由于温压技术在国外尚处于严格的保密和专利保护中,加之国内整体技术和设备落后,资金匮乏,研究时间尚短,因此国内研究成果不多,对该技术尚无法完全掌握。在国内,虽然目前已有华南理工大学、北京科技大学、中南大学等高校和科研机构致力于粉末温压技术的开发与应用,但大部分被限于实验阶段,尚无法实现工业化。国内的企业也只有宁波东睦、扬州保来得、中山耀威、佛山盈峰、广东华金等企业引进了温压工艺生产线及技术,并利用国外专用温压粉末进行生产,而大多数企业尚处于观望状态。目前国内对粉末温压技术的研究主要集中于基于铁基粉末材料,形状简单的粉末冶金制品,对复杂形状的结构零件的研究尚不多,同时对其他材质粉末冶金制品的温压工艺研究也不多^[9~45]。

韩凤麟于 1995 年在《粉末冶金技术》上发表文章^[12],介绍了美国 Hoeganaes 公司 1994 年开发出的 ANCORDENSE 温压工艺,指出采用粉末温压工艺可以获得高密度、高性能的粉末压坯,其烧结密度和材料强度要求