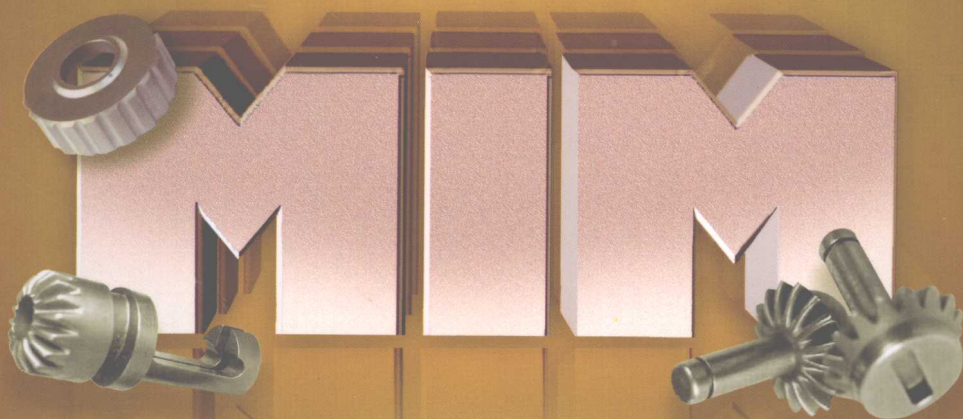


张 驰 徐 春 等编著

金属粉末 注射成形技术

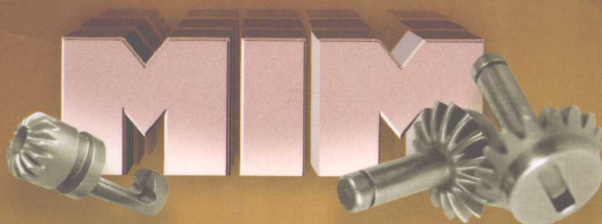
JINSHU FENMO
ZHUSHE CHENGXING JISHU



化学工业出版社

金属粉末 注射成形技术

JINSHU FENMO
ZHUSHE CHENGXING JISHU



www.cip.com.cn
读科技图书 上化工社网

ISBN 978-7-122-01012-4



9 787122 010124 >

销售分类建议：冶金/粉末冶金

定 价：29.00元

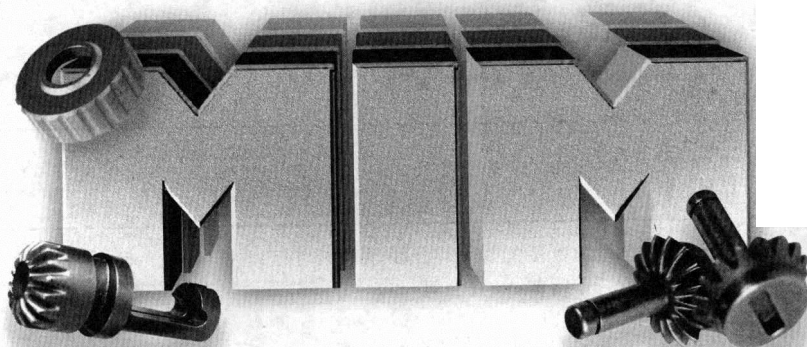


张 驰 徐 春 等编著



金属粉末 注射成形技术

JINSHU FENMO
ZHUSHE CHENGXING JISHU



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书介绍了一种零部件新型近净成形技术——金属粉末注射成形(MIM)技术,主要包括以下几个方面的内容:喂料的制备,注射成形,注射成形过程的计算机模拟,脱脂,烧结,MIM的应用及实例,MIM产品设计指南及规范。此外,对金属注射成形的发展状况也作了详细的介绍。

本书适合于从事金属粉末注射成形及材料加工的工程技术人员阅读,也可供相关专业的师生阅读。

图书在版编目(CIP)数据

金属粉末注射成形技术/张驰等编著. —北京:化学工业出版社, 2007. 9

ISBN 978-7-122-01012-4

I. 金… II. 张… III. 粉末成形 IV. TF124

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 130973 号

责任编辑:邢涛

文字编辑:闫敏

责任校对:周梦华

装帧设计:史利平

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:大厂聚鑫印刷有限责任公司

装订:三河市延风装订厂

850mm×1168mm 1/32 印张10¼ 字数274千字 2008年1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: 29.00 元

版权所有 违者必究

前 言

金属（陶瓷）粉末注射成形技术（MIM/CIM）是塑料成形工艺学、高分子化学、粉末冶金工艺学和金属材料学等多学科相结合而形成的一种零部件新型近净成形技术。它可以利用模具注射成形坯件，并通过烧结快速制造高密度、高精度、三维复杂形状的结构零件，能够快速、准确地将设计思想物化为具有一定结构、功能特性的制品，并可直接进行大批量生产，是制造业的一次新的变革。该技术不仅具有常规粉末冶金工艺工序少、无切削或少切削、经济效益高等优点，而且克服了传统粉末冶金工艺制品材质不均匀、力学性能低、薄壁不易成形及结构复杂的缺点，特别适合于大批量生产小型、复杂以及具有特殊要求的金属零件。MIM 产品的力学性能明显优于精密铸造产品和传统的粉末冶金产品，产品尺寸精度和表面光洁度高，材料利用率接近 100%，且可实现自动化连续生产，因此被誉为“当今最热门的零部件成形技术”。

我国在 MIM 方面起步较晚，到目前为止，阐述 MIM 的专著还不多。在世界 MIM 技术迅速发展的背景下，为了促进我国 MIM 的研究及发展，出版系统论述 MIM 技术相关理论，特别是应用的专著显得越来越重要。作者在国外及国内从事金属粉末注射成形技术开发研究多年，在大量理论与实践工作的基础上，总结了作者及同行多年来的研究成果和生产实践经验，编著成本书。本书介绍了喂料的制备、注射成形、注射成形过程的计算机模拟、脱脂、烧结、MIM 的应用及实例以及 MIM 产品设计指南及规范等内容，充分反映了国内外 MIM 科技水平，提供了国内外最新的研究成果，它的出版将对我国 MIM 的继续深入研究产生极大的推动作用，对该技术的推广和应用具有积极的指导作用。

本书第 2 章、第 3 章、第 7 章由重庆工学院张驰教授编写；第

1 章、第 4 章由重庆工学院胡红军老师编写；第 8 章由重庆工学院吴紫光编写；第 5 章、第 6 章由上海应用技术学院徐春教授编写。全书由张驰教授策划和统稿。此外，在本书的资料收集、撰写和完成过程中，邱恺硕士、徐博硕士、梁宝钱硕士付出了大量的辛勤劳动，在此一并表示由衷的感谢。

本书可作为相关科研、技术研发人员的参考书，也可作为材料科学与工程学科研究生的教材。

由于金属粉末注射成形技术是一门多学科、高科技相结合的综合技术，涉及面宽，加之作者专业水平有限，书中难免存在不当之处，欢迎读者批评指正。

张 驰

2007 年 10 月于重庆

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 基本概念	2
1.2 粉末注射成形技术的特点	3
1.3 PIM 技术的发展状况	4
1.3.1 国际概况	5
1.3.2 国内状况	6
1.4 产业结构及效益	9
1.4.1 产业结构	9
1.4.2 提高效益的策略	9
1.5 MIM 技术的特色	12
1.6 MIM 的标准	17
1.6.1 MIM 零件材料标准的注释和定义	18
1.6.2 检验方法	22
1.6.3 MIM 材料技术标准	24
1.7 MIM 技术的局限性	27
第 2 章 喂料的制备	31
2.1 粉末的制备	31
2.1.1 MIM 用粉末的理想特征	32
2.1.2 粉末颗粒的形状和粒度	34
2.1.3 粒间摩擦和散装密度	38
2.1.4 粉末的制作	39
2.1.5 注射成形粉末的调制与处理	43
2.1.6 粉末注射成形用粉末的举例	45
2.2 黏结剂的配比与性能	49
2.2.1 黏结剂的要求	49
2.2.2 黏结剂系统举例	52

2.3 喂料的混炼	61
2.3.1 粉末与黏结剂的比例	61
2.3.2 喂料流变学	68
2.3.3 喂料特性	73
2.3.4 喂料制备	74
2.3.5 喂料实例和性能	80
第3章 注射成形	82
3.1 金属注射成形工艺	83
3.1.1 成形性	84
3.1.2 成形实践	88
3.1.3 注射成形过程的质量控制	92
3.2 金属注射成形模具设计	95
3.2.1 注射成形坯形状设计	95
3.2.2 注射成形模具设计	96
3.2.3 模具的基本结构	99
3.2.4 模具设计的基本步骤	100
3.2.5 带外侧凹制品的模具设计	119
3.2.6 侧向抽芯模具和带内侧凹制品的模具设计	125
3.2.7 金属注射成形模具的材料选择	130
3.2.8 金属注射成形模具设计实例	132
3.3 MIM 注射成形设备	134
3.3.1 MIM 注射成形设备的分类	135
3.3.2 MIM 注射成形机的特性	136
3.3.3 选择合适的 MIM 注射成形机的方法	142
第4章 注射成形过程的计算机模拟	144
4.1 金属粉末注射成形的计算机模拟的必要性	144
4.2 粉末注射成形喂料性能参数的模拟	150
4.3 粉末注射成形充模流动模拟	152
4.3.1 喂料熔体在任意平面几何形状型腔中的流动模拟	157
4.3.2 喂料熔体在三维型腔中的流动	162
4.3.3 颗粒模型	164

4.3.4	金属粉末注射成形充模流动模拟亟待解决的问题	166
4.4	充模过程的数值求解	167
4.5	MIM 计算机模拟的商业化软件	170
4.6	粉末注射成形充模流动模拟的实际应用	173
4.6.1	不锈钢 SUS316L (PF15%) 53% (体积分数) 喂料的 U 形 试验模型分析	176
4.6.2	硬质合金 MIM 充模数值模拟	178
第 5 章	脱脂	183
5.1	脱脂基础	183
5.1.1	Wiech 法	185
5.1.2	Injectamax 法	186
5.1.3	水溶解法	186
5.1.4	Metamold 法	187
5.2	脱脂机理	188
5.2.1	热脱脂机理	189
5.2.2	溶剂脱脂机理	200
5.3	脱脂过程的缺陷避免	203
5.4	脱脂设备	206
5.4.1	溶剂脱脂装置	206
5.4.2	热脱脂炉	207
5.4.3	连续式催化脱脂炉	209
第 6 章	烧结	213
6.1	注射成形坯烧结的基本原理	214
6.2	几种典型注射成形材料体系的烧结	220
6.2.1	注射成形不锈钢材料的烧结	220
6.2.2	注射成形铁基合金的烧结	225
6.2.3	注射成形高密度合金的烧结	228
6.2.4	注射成形 AlN 的烧结	229
6.2.5	注射成形硬质合金的烧结	231
6.3	烧结产品质量及尺寸精度的控制	232
6.3.1	烧结产品的质量控制	232

6.3.2 尺寸精度控制	234
6.4 烧结后处理	237
6.4.1 致密化	237
6.4.2 热处理	238
6.4.3 表面处理	239
6.5 烧结设备	240
6.5.1 连续式烧结设备	241
6.5.2 批料式烧结设备	249
第7章 MIM 的应用及实例	253
7.1 MIM 技术的应用领域	256
7.1.1 汽车行业中的应用	256
7.1.2 兵器工业中的应用	260
7.1.3 钟表行业中的应用	262
7.1.4 电子工业中的应用	263
7.1.5 医疗器械中的应用	265
7.1.6 办公自动化及通信行业中的应用	266
7.2 MIM 材料性能及其应用	268
7.2.1 MIM 不锈钢	268
7.2.2 MIM 钛合金	274
7.2.3 MIM 硬质合金	278
7.3 MIM 应用实例分析	279
7.3.1 MIM 工艺应用实例(一)	279
7.3.2 MIM 工艺应用实例(二)	284
第8章 MIM 产品设计指南及规范	288
8.1 MIM 的应用特征	288
8.2 MIM 的设计思想	289
8.2.1 MIM 产品的结构设计	289
8.2.2 MIM 产品的公差	307
8.2.3 MIM 产品的后续处理	308
8.3 MIM 产品的材料	309
参考文献	311

第1章 概述

粉末注射成形 (Powder Injection Molding, PIM) 由金属粉末注射成形 (Metal Injection Molding, MIM) 与陶瓷粉末注射成形 (Ceramics Injection Molding, CIM) 两部分组成, 它是一种新的金属、陶瓷零部件制备技术, 它是将塑料注射成形技术引入到粉末冶金领域而形成的一种全新的零部件加工技术。众所周知, 塑料注射成形技术能生产各种形状复杂且价格低廉的塑料制品, 但塑料制品强度不高, 为了改善其性能, 可以在塑料中添加金属或陶瓷粉末以得到强度较高、耐磨性好的制品。近年来, 这一想法已发展演变为最大限度地提高固体粒子的含量, 并且在随后的烧结过程中完全除去黏结剂, 从而使成形坯致密化。这种新的粉末冶金成形方法被称为粉末注射成形。

MIM 的基本工艺步骤是: 首先选取符合 MIM 要求的金属粉末和黏结剂, 然后在一定温度下采用适当的方法将粉末和黏结剂混合成均匀的喂料, 经制粒后再注射成形, 获得成形坯 (Green Part), 再经过脱脂处理后烧结致密化成为最终成品 (White Part), 图 1-1 所示为 MIM 的产品。

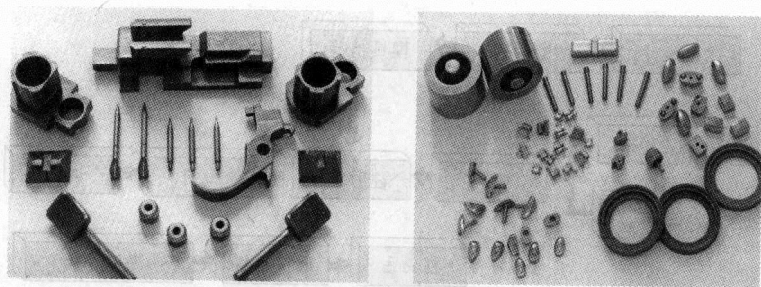


图 1-1 MIM 的产品

1.1 基本概念

粉末注射成形是一个已经提出许久的成形概念，早在 1872 年底就被提出，且在 20 世纪 30 年代用于陶瓷热压铸制品的生产。但真正引起材料科学与工程领域的重视是在 20 世纪 70 年代末到 80 年代初，随着先进陶瓷发动机部件的开发而带动起来的。

MIM 技术的主要工艺流程如图 1-2 所示。它首先是选择符合 MIM 要求的金属粉末和黏结剂，然后在一定温度下采用适当的方法将粉末和黏结剂混炼成均匀的注射成形喂料，经制粒后在注射成形机上注射成形，获得的成形坯经脱脂处理后烧结致密化成最终产品。在注射成形时，物料在螺旋挤压杆和料桶之间熔化转变为黏性可塑性流体；黏性可塑性流体在压力作用下被注射到冷的模具中；制品在模具中冷却凝固，然后取出。MIM 技术使用的设备通常为螺旋式注射成形机，它和普通的塑料注射成形机并无太大差异。如果说对注射成形机应该提出特别要求的话，主要应对出料口和进料口部分螺杆提出特殊的耐磨性要求。对于前一部分，因高装载量的黏性流体快速地通过此口，势必引起剧烈的摩擦；对于进料口螺杆部分，因物料处于固态，因此摩擦也相当严重，应提出特别要求。MIM 工艺包括产品设计、模具设计、模具制造、注射成形、脱脂、烧结、再加工、质量检测 8 个主要环节。

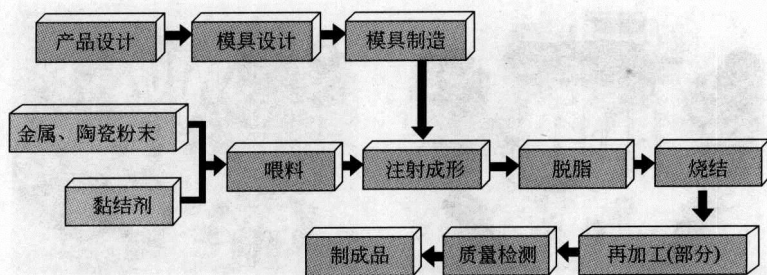


图 1-2 MIM 技术的主要工艺流程

1.2 粉末注射成形技术的特点

粉末注射成形能像生产塑料制品一样，一次成形生产形状复杂的金属、陶瓷零部件。该工艺技术利用注射方法，保证物料充满模具型腔，也就保证了零件高复杂结构的实现。以往在传统加工技术中，对于复杂的零件，通常是先分别制作出单个零件，然后再组装；而在使用 PIM 技术时，可以考虑整合成完整的单一零件，这样大大减少了生产步骤，简化了加工程序。

① 与传统的机械加工、精密铸造相比，制品内部组织结构更均匀；与传统粉末冶金压制/烧结相比，产品性能更优异，产品尺寸精度高，表面光洁度好，不必进行再加工或只需少量精加工。金属注射成形工艺可直接成形薄壁结构件，制品形状已能接近或达到最终产品要求，零件尺寸公差一般保持在 $\pm 0.10\% \sim \pm 0.30\%$ 水平，特别对于降低难以进行机械加工的硬质合金的加工成本、减少贵重金属的加工损失尤其具有重要意义。

② 零部件几何形状的自由度高，制件各部分密度均匀、尺寸精度高，适于制造几何形状复杂、精密度高及具有特殊要求的小型零件（0.2~200g）。

③ 合金化灵活性好，对于过硬、过脆、难以切削的材料或原料铸造时有偏析或污染的零件，可降低制造成本。

④ 产品质量稳定、性能可靠，制品的相对密度可达 $95\% \sim 98\%$ ，可进行渗碳、淬火、回火等热处理。

⑤ 适用材料范围宽，应用领域广，原材料利用率高，生产自动化程度高，工序简单，可连续大批量规模化生产。生产过程无污染，为清洁工艺生产。MIM 技术使用的模具，其寿命与塑料注射成形模具相似。由于使用金属模具，MIM 适于零件的大批量生产；由于利用注射机成形产品毛坯，极大地提高了生产效率，降低了成本，而且注射成形产品一致性好、重复性好，从而为大批量和规模化工业生产提供了保证，再者一模多腔可进一步提高效率和降低毛

坯的成形成本。

⑥ 制品微观组织均匀，密度高，产品强度、硬度、伸长率等力学性能高，耐磨性好，耐疲劳，组织均匀，性能好。在粉末冶金压制过程中，由于模壁与粉末以及粉末与粉末之间的摩擦力，使得压制压力分布不均匀，也就导致了压制毛坯在微观组织的不均匀、材料致密性差、密度低，严重影响了产品的力学性能；而 MIM 是一种流体成形工艺，黏结剂的存在保证了粉末均匀排布，从而可消除毛坯微观组织的不均匀，进而使烧结制品密度接近材料的理论密度，从而使强度增加、韧性加强，延展性、导电性、导热性得到改善，综合性能提高。能像生产塑料制品一样，一次成形生产形状复杂的金属、陶瓷等零部件，产品成本低，光洁度好，表面粗糙度可达 $R_a 0.80 \sim 1.6 \mu m$ ，精度高，一般无需后续加工。

1.3 PIM 技术的发展状况

PIM 技术是小型复杂零部件成形与加工工艺的一场革命，近年来得到了世界各发达国家的高度重视，被国际上誉为当今“最热门的零部件成形技术”。截至 1999 年底，全世界约有 300 家公司和科研院所从事 PIM 技术的研究。近几年来，PIM 产业产值年增长率约为 32%，预计到 2010 年，全球 PIM 产品总销售额将达 24 亿美元（见图 1-3）。我国于 20 世纪 80 年代末 90 年代初由中南大学粉末冶金研究所率先从事 PIM 技术的研究和开发，并已开始从事

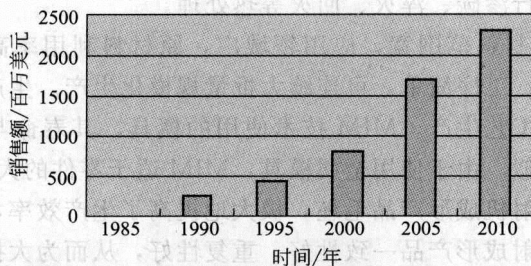


图 1-3 PIM 市场分析

该技术的产业化工作。

1.3.1 国际概况

现代 PIM 技术的研究开始于 20 世纪 70 年代初期, 1973 年 Parmatech 公司在美国成立, 专门从事 PIM 技术的研究和产品开发工作, 但当时该项技术还鲜为人知。直到 1979 年, Parmatech 公司有两件 PIM 产品在国际粉末冶金大会的产品设计大赛中获奖后, PIM 技术才开始受到粉末冶金界的关注。但由于这一阶段的研究工作都是在少数几家公司当中进行, 彼此技术保密, 此外由于粉末原料成本高、脱脂工艺时间长、产品易变形等问题还没有解决, 其发展一度处于停滞状态。

直到 1985 年, 美国才向全世界公布这一技术, 而在这期间美国国内的 PIM 技术得以成熟并迅速发展形成产业化。该项技术向世界披露后得到世界各国政府、学术界、企业界的广泛重视, 并投入了大量人力、物力和财力予以研究开发。美国政府先后拨款数百万美元, 在伦塞尔理工学院 (Rensselaer Polytechnic Institute) 开始 PIM 技术基础理论和应用基础的研究工作。之后, 又在宾州大学 (Pennsylvania State University) 建立了 PIM 专业实验基地, 并成立了全美 PIM 协会, 每年都定期举办专门的国际研讨会, 以促进该项技术的发展。目前, 该协会已吸收了许多国外单位和专家参加, 而发展成为一个国际性的学术组织。由于政府研究机构和大学的介入, 使 PIM 技术研究工作向深层次发展, 建立了一些成形理论。因此, 20 世纪 80 年代中期, PIM 技术得到了迅速的发展。这一方面归功于在流体力学和气体动力学研究成果基础上开发出的超高压水雾化和高压惰性气体雾化技术的发展, 使细粉产出率大大提高, 原材料生产成本大大下降; 另一方面, 在黏结剂设计理论和脱脂机理等研究成果的指导下, 以美国 Injectamax 公司和德国 BASF 公司为代表的新一代 PIM 工艺的开发成功, 不仅使原来的脱脂时间从数十小时缩短到几个小时, 而且其保形性得到明显的改善, 大规模生产的产品的尺寸精度从 $\pm 0.5\%$ 提高到 $\pm 0.3\%$ 。

进入 20 世纪 90 年代, 一方面 PIM 工艺进一步改进, 新材料、

新工艺不断涌现；另一方面，其产业化发展非常迅速。日本 1991 年 PIM 产品销售额为 27 亿日元，1992 年猛增到 46 亿日元，增长了 70%。德国 1993 年的 PIM 产品销售比 1992 年增加了 5 倍。瑞士中、高档手表的表壳和表带 70% 用 PIM 工艺制造。到 1997 年底，全球共有 240 家以上的公司和机构从事 PIM 技术研究、开发、生产和咨询业务，2000 年达到 375 家。美国政府已将该项技术列为对美国经济繁荣和国家持久安全起至关重要作用的“国家关键技术”。为了保持美国在该项技术与开发方面的优势，1999 年 6 月美国国家自然科学基金会和宾州政府联合支持在宾州大学建立了烧结材料工程研究中心，PIM 技术是该中心重点研究的领域之一。

到目前为止，美国、欧洲、日本等十多个国家和地区的多家公司从事该工艺技术的产品开发、研制与销售工作。日本在竞争上十分积极，并且表现突出，许多大型株式会社均参与 MIM 工业的推广，这些公司包括太平洋金属、三菱制钢、川崎制铁、神户制钢、住友矿山、精工-爱普生、大同特殊钢等。目前日本有 40 多家专业从事 MIM 产业的公司，其 MIM 工业产品的销售总值早已超过欧洲并直追美国，每家公司的利润都十分可观。2000 年世界粉末冶金会议在日本召开，并专门设立了 MIM 技术论坛。继日本快速发展之后，中国台湾地区、韩国、新加坡、欧洲和南美的 MIM 产业也如雨后春笋般地发展起来，其中德国的 BASF 公司以其独特的黏结剂配方成立了专门的 MIM 产品喂料生产线，在全世界范围内进行技术辅导和喂料的销售，获得了较大的商业利润。作为该项技术的发明国美国，MIM 技术已经广泛应用于航天、摩托车、汽车、医疗器械、食品机械、计算机、通信设备、五金工具、仪器仪表、钟表等各个制造行业，MIM 企业也因此赚得盆满钵满。据粉末冶金协会粗略统计和预测，全球 MIM 产品的销售量正在以每年 30%~40% 的速度递增，截至 1999 年，全球的年销售额为 10 亿美元，预计到 2010 年年销售量将超过 24 亿美元。

1.3.2 国内状况

国内 PIM 技术的研究始于 20 世纪 80 年代末，从事研究开发

的单位不足 10 家,虽然黏结剂各有不同,但都取得了可喜的成果,有的已经达到国际先进水平。从 20 世纪 80 年代末期开始,国内先后有钢铁研究总院、北京科技大学、中南大学、北京有色金属研究总院、北京粉末冶金研究所、广州有色金属研究院等开展了 PIM 技术的研究工作,但由于缺乏资金,加之国外的技术保密,均没有取得突破性进展。九五期间,在国家“863”计划、国家科技攻关计划、国家军工配套科研计划和国家自然科学基金等计划的资助下,我国突破了 PIM 技术的一些技术难关,取得了一系列创新性成果,小批量的产品已成功地应用于我国国防军工和民用领域,部分研究成果达到国际先进水平。

到 20 世纪 90 年代末,形成小批量生产规模的有北京安泰科技股份有限公司(钢铁研究总院)、湖南英捷高科技有限责任公司(中南大学)、山东金珠粉末注射成形公司等。经过几年的发展,山东金珠粉末注射成形公司完成了 MIM 技术由试验室向产业化发展的过程,应用技术更加成熟,能够大批量生产高精尖的军用、民用产品,制品水平已接近世界同期水平,并连续三年实现产值翻番,企业的发展呈现出良好的态势。2000 年的全国 PIM 产品销售额仅为 1000 多万元,远远满足不了军工和国民经济的需要。

近年来,由于 PIM 技术的良好发展势头,国内公司纷纷从国外引进先进的 PIM 设备来提升 PIM 的制造水平及能力,使得我国的 PIM 技术上了一个新的台阶。但是,总体而言,由于我国 PIM 技术研究起步晚、投入少,其研究的广度和深度距世界先进水平仍有较大差距,尤其是产业化进程缓慢、规模小、水平低、工艺装备落后,与国外相比存在一定的差距,原因有以下几个方面:

- ① 中国 1956 年才开始粉末冶金的发展,基础实力薄弱。
- ② 机械制造业与发达国家相比落后,工程技术人员的能力不足。
- ③ 到目前为止,国家还没有发布 MIM 零件的材料标准及设计规范。
- ④ 国内技术人员对 MIM 技术的认识程度不够,制约了 MIM