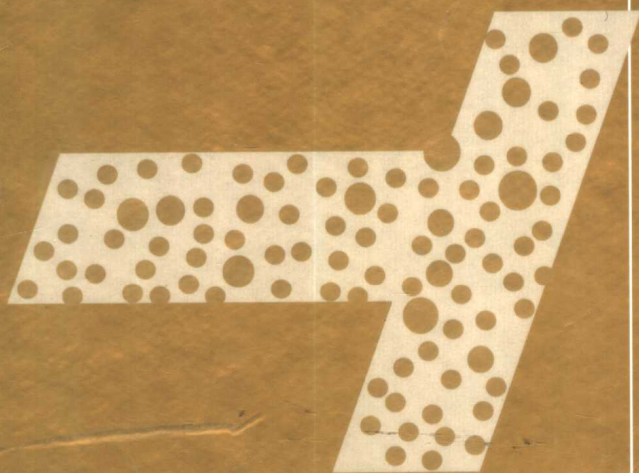


高等学校全国优秀博士学位论文作者专项资金资助项目
霍英东教育基金会高等院校青年教师基金
国家高技术研究发展(863)项目

金属注射成形 原理与应用

theory and application of metal injection molding

李益民 李云平 著



中南大学出版社

金属注射成形原理与应用

Theory and application of metal injection molding

李益民 李云平 著

中南大学出版社

金属注射成形原理与应用

李益民 李云平 著

☐责任编辑 谢贵良

☐出版发行 中南大学出版社

社址:长沙市麓山南路 邮编:410083

发行科电话:0731-8876770 传真:0731-8710482

电子邮件:csucbs @ public. cs. hn. cn

☐经 销 湖南省新华书店

☐印 装 中南大学印刷厂

☐开 本 889 × 1194 1/32 ☐印张 9 ☐字数 222 千字

☐版 次 2004 年 1 月第 1 版 ☐2004 年 1 月第 1 次印刷

☐书 号 ISBN 7-81061-822-9/TF · 025

☐定 价 28.00 元

图书出现印装问题,请与经销商调换

序

金属注射成形 (Metal Injection Molding, MIM) 是 20 世纪 80 年代以来粉末冶金学科及其相关学科领域研究的热点。通过在金属粉末中加入一定的聚合物及添加剂组元, 采用注射成形技术形成各种材质、形状的材料与制品, 从而解决了多年来一直困扰粉末冶金领域的复杂形状制品成形难的问题。目前, 全球范围内, 已有数百个为金属注射成形技术服务或直接从事金属注射成形技术的公司, 其产品从传统工业用的硬质工具、机械产品到高温发动机部件零件, 从计算机用的磁盘驱动器到手表业用产品、医用产品、甚至军工产品等等达近百种。因此, MIM 技术被誉为“当今最热门的零部件成形技术”。

金属注射成形技术的基础理论牵涉到粉末科学、烧结理论、聚合物科学、流变学、表面物理化学、计算机数值模拟等多门学科。到目前为止, 世界范围内仅有美国金属粉末产业联合会于 1990 年和 1995 年出版过两本这方面的专著, 而国内尚没有一本专门阐述 MIM 的专著出版。我国在 MIM 方面起步较晚, 从事这方面研究的单位不多。在世界 MIM 技术发展如日中天的背景下, 为了促进我国 MIM 的研究, 加速度发展, 出版系统论述 MIM 技术及相关理论的专著显得越来越迫切。

我国粉末冶金理论和技术研究的重要基地——中南大学粉末冶金国家重点实验室, 近 10 多年来一直从事金属注射成形的研究工作, 获得了该领域的国家自然科学基金重点项目、国家 863 高技术项目、国防军工配套项目。李益民教授是承担这方面基础研究工作的学术带头人。10 年来, 他及其同事在国外同行工作

的基础之上，进行了大量的技术创新，形成符合我国实际情况的MIM技术理论。采用该理论成功开发生产了枪械等轻武器铁基合金零件、不锈钢异形医疗器械零件、高比重合金通讯产品零件等四十余种系列产品，解决了长期以来困扰我国加工行业的不锈钢铁基、高比重合金等材料体系精密零件的难加工问题。因此而获得了国家科技进步二等奖、省部级科技进步一等奖、国家发明专利（5项），全国优秀博士学位论文（李益民的博士学位论文）等奖项。

该书系统深入的论述了MIM整个工业流程、相关的技术要点和理论。书中的内容大都是作者的原创性成果，它充分反映了我国MIM科技水平。它的出版必将对我国MIM的继续深入研究产生推动作用，对该技术的推广和应用具有指导性作用。

中 国 工 程 院 院 士
国 家 8 6 3 高 技 术
新 材 料 领 域 专 家 委 员 会

主任

黄伯云

前 言

随着技术进步和创新速度的加快,材料加工技术越来越朝着高性能、低成本、短流程、近净成形方向发展,涌现出一些集设计、制备、加工于一体的新型制备技术,如金属注射成形技术。金属注射成形(Metal Injection Molding, MIM)是传统粉末冶金吸收先进塑料注射成形的思想而发展起来的一门新型粉末冶金近净成形技术,它的基本工艺过程是:首先将金属或陶瓷粉末与有机粘结剂均匀混合,用注射成形机成形,然后将成形坯中的粘结剂脱除,最后经烧结致密化得到最终产品。MIM技术由于采用注射成形,所以可以一次成形出各种复杂形状,免除了繁琐的多道机加工工序。而且由于在流动状态下,均匀填充模腔成形,模腔内各点压力一致,密度一致,消除了传统粉末冶金压制成形不可避免的沿压制方向的密度梯度,可以获得组织结构均匀、力学性能优异的近净成形零部件。

金属注射成形技术由于采用细小粉末和大量的粘结剂,其工艺过程和机制与传统粉末冶金压制/烧结工艺相比发生了巨大的变化,存在粉末/粘结剂塑化体的流变学行为、喂料稳定流动填充模腔的过程预测和控制、粘结剂从成形坯中脱除的物理化学机制及动力学、粘结剂脱除后松散粉末聚集体烧结至全致密化等等诸多新的基础理论及实践问题。

作为我国粉末冶金理论和技术研究的重要基地,中南大学粉末冶金国家重点实验室在金属注射成形领域拥有长时间的研究工作积累,由国家863高技术新材料领域专家委员会主任黄伯云院士领导的研究小组,结合市场需求,经过近十年的艰苦努力,发

展并形成了系统的理论,进行了大量的技术创新。在该领域已获得国家级科技奖1项,省部级科技奖3项。在大量理论与实践工作的基础上,本书详细叙述了MIM的基本原理及步骤,包括粉末和粘结剂的选择、喂料的混炼、喂料流变学行为、注射成形、脱脂、烧结及MIM产品尺寸精度控制,同时介绍了MIM产品设计的特点、MIM相关设备、MIM在相关材料体系和产品中的应用。本书可作为相关科研、生产人员的参考书,也可作为材料科学与工程学科研究生的教材。书中既介绍了基本原理和理论,同时提供了国内外最新的研究成果,包括新材料体系、新的粘结剂专利、新的工艺曲线、新的应用性能、新的产品图片等。另外还提供了实际生产应用中获得的大批量产品的统计分析数据及几十种MIM典型产品应用情况。

在本书的资料收集、撰写和完成工作中,唐嵘博士、姜峰硕士、岳建岭硕士、赵利刚硕士、聂妍硕士、喻岚硕士、李流军硕士、汤潇硕士、何浩硕士付出了大量的时间和劳动,李笃信教授、李松林副教授、邓忠勇博士、张健博士、梁叔全教授、K. A. Khalil博士、范景莲教授、蒋炳炎教授等提供了有益的建议和帮助,在此一并表示由衷的感谢。最后要感谢湖南英捷高科技有限责任公司热心提供了大量的第一手数据和图片资料。

作 者

2004年1月

目 录

第一章 绪 论	(1)
§ 1-1 金属注射成形技术的特点	(3)
§ 1-2 金属注射成形技术的发展历程	(6)
§ 1-3 金属注射成形技术的发展方向	(10)
§ 1-4 小 结	(15)
第二章 金属注射成形喂料的制备	(18)
§ 2-1 注射成形用粉末的性能及制备	(18)
§ 2-2 注射成形用粘结剂的配比及性能	(38)
§ 2-3 注射成形用喂料的混炼	(47)
§ 2-4 小 结	(56)
第三章 金属注射成形喂料的流变学行为	(61)
§ 3-1 喂料流变学的一般原理及粘度测量	(61)
§ 3-2 MIM 喂料流变学行为	(68)
§ 3-3 典型金属注射成形粉末体系喂料的流变学性能	(75)
§ 3-4 流变学应用	(80)
§ 3-5 小 结	(82)
第四章 注射成形	(85)
§ 4-1 成形过程	(85)
§ 4-2 浇注系统及模具	(91)
§ 4-3 成形参数对注射坯性能的影响	(102)

§ 4-4	注射成形制品缺陷的产生与控制	(110)
§ 4-5	小 结	(115)
第五章	脱 脂	(118)
§ 5-1	热脱脂过程及机理	(119)
§ 5-2	溶剂脱脂过程及机理	(147)
§ 5-3	生产中的几种脱脂工艺	(158)
§ 5-4	脱脂过程的保形和缺陷避免	(164)
§ 5-5	小 结	(166)
第六章	注射成形坯的烧结	(170)
§ 6-1	注射成形坯烧结的基本原理	(171)
§ 6-2	几种典型注射成形材料体系的烧结	(177)
§ 6-3	烧结产品质量及尺寸精度控制	(195)
§ 6-4	烧结后处理	(202)
§ 6-5	小 结	(207)
第七章	金属注射成形设备	(212)
§ 7-1	混炼设备	(212)
§ 7-2	注射成形设备	(223)
§ 7-3	脱脂设备	(226)
§ 7-4	烧结设备	(234)
§ 7-5	小 结	(243)
第八章	金属注射成形产品的设计及应用	(245)
§ 8-1	金属注射成形产品的设计思想	(245)
§ 8-2	金属注射成形产品的应用	(260)
§ 8-3	小 结	(276)

第一章 绪 论

随着技术进步和创新速度的加快,材料加工技术越来越朝着高性能、低成本、短流程、近净成形方向发展,涌现出不少的新型制备技术,如金属注射成形技术。金属注射成形(Metal Injection Molding, MIM)是传统粉末冶金工艺与现代塑料注射成形工艺相结合而形成的一门新型近净成形技术,它的基本工艺过程是:首先将金属粉末与有机粘结剂均匀混合,用注射成形机成形,然后将成形坯中的粘结剂脱除,再经烧结致密化而得到最终产品。

如图 1.1 所示,金属注射成型的基本工艺过程可分为四个阶段,即喂料的制备、注射成形、脱脂、烧结。第一阶段喂料的制备包括几个独立的步骤,即原料粉末的预混合、粘结剂的制备、粉末/粘结剂喂料的混炼、喂料的制粒。这一阶段 MIM 工艺与传统塑料注射成形工艺最大的区别在于采用金属或陶瓷粉末作为原料。采用注射成形工艺的粉末粒度比较小(一般小于 $10\text{ }\mu\text{m}$),流动性差,所以需要加入大量的粘结剂来增强流动性,带动粉末成形。原料粉末一般分为两种,即元素粉和预合金粉。毫无疑问,元素粉末需要进行预混合,即使是预合金粉末一般也需要

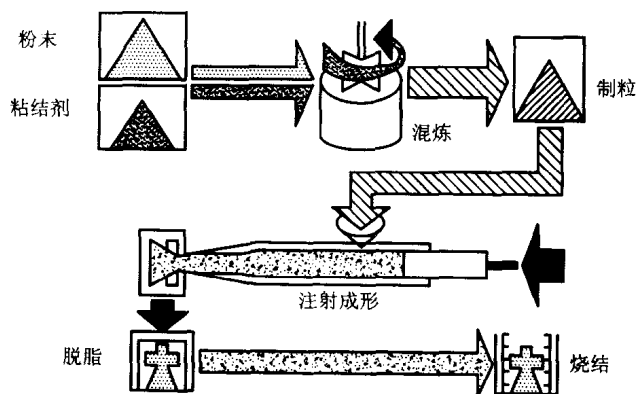


图 1.1 金属注射成形基本工艺过程

加入适量的表面活性剂进行预混合。预混合好的粉末需要与粘结剂在一定温度下混炼成均匀的、具有良好流动性的喂料，然后像塑料注射成形工艺一样，将制粒后的粉末/粘结剂混合物在注射成形机中进行注射成形。第二阶段为注射成形。这一阶段完全不同于传统粉末冶金的热压成形，而是类似于塑料工业中的成形工艺，是在一定压力和温度下将喂料以流体形式注入模腔一次成形出具有三维精细复杂形状和结构的注射坯。第三阶段为脱脂。这一阶段属于金属注射成形工艺独有的步骤，因为在这一阶段要从坯块中脱除 30% ~ 50% 的粘结剂，完全不同于传统粉末冶金压制工艺中极少量的表面活性剂的脱除。最后一阶段为烧结。此阶段类似于传统粉末冶金中的烧结，但也有一些区别。传统粉末冶金压坯在烧结前一般都已有 90% 以上

的相对密度,要达到全致密化只需消除约 10% 的孔隙即可,而金属注射成形坯在脱脂后、烧结前只有 60% 左右的相对密度,要达到全致密化须消除约 40% 的孔隙,烧结难度大大增加。

§ 1-1 金属注射成形技术的特点

金属注射成形作为一种制造高质量精密零件的近净成形技术,具有常规粉末冶金和机加工方法无法比拟的优势。MIM 能制造许多具有复杂形状特征的零件,如各种外部切槽、外螺纹、锥形外表面、交叉孔和盲孔、凹台与键销、加强筋板、表面滚花等等,具有以上特征的零件都是无法用常规粉末冶金方法得到的。而且,由于 MIM 制造的零件几乎不需要再进行机加工,减少了材料的消耗,因此在生产的零件数量高于一定值时,MIM 就会比机加工方法更为经济。图 1.2 给出了 MIM 零件的生产量对成本的影响。可以看出,生产 5 g 的零件的生产成本,年产 200000 件时为 3.5 元,年产 2000000 件以上时降为 1.4 元。此图还指出零件尺寸对成本的影响——零件越大,200000 件与 2000000 件之间的成本差就越小。

另一个可与 MIM 竞争的工艺是精密铸造,表 1.1 比较了由这两种工艺制造的零件特点^[1]。在许多方面,MIM 都具有较大的优势,许多由 MIM 制造的形状是不能由其他途径得到的。

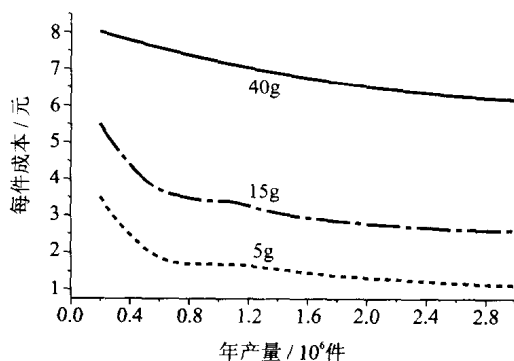


图 1.2 零件制造成本与生产量之间的变化关系

表 1.1 MIM 和精密铸造成形能力的比较

特 点	精密铸造	MIM
最小孔直径	2 mm	0.4 mm
2 mm 直径的盲孔最大深度	2 mm	20 mm
最小壁厚	2 mm	< 1 mm
最大壁厚	无限制	10 mm
4 mm 直径的公差	± 0.2 mm	± 0.06 mm
表面粗糙度	5 μ m	1 μ m

MIM 技术的主要特点可以进一步用图 1.3 表示。该图表明了各种加工方法与零件产量和复杂程度的关系, 可以看到, 机加工、精密铸造、模压烧结三块区域交界处代表了 MIM 技术的优点, 也就是说, MIM 技术可以低成本地

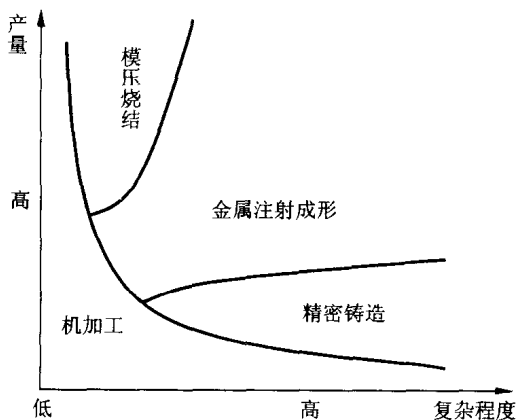


图 1.3 MIM 技术优势图

生产复杂形状的高性能产品。MIM 技术由于采用大量的粘结剂作为增强流动的手段，所以可以像塑料工业中一样任意成形各种复杂形状的金属零件。这是传统粉末冶金模压工艺所不可能达到的。而且，由于注射成形是一种近净成形工艺，基本上不需要后续加工，这使得零件制造成本大大降低，以前需要几十道机加工工序的零件可以一次成形获得。另外，注射成形时粉末流动充填模腔的均匀性，使得 MIM 产品各处密度均匀，避免了粉末冶金模压工艺中不可避免的密度分布不均匀性。并且由于采用细粉，产品烧结后可达到很高的密度。因此，MIM 产品的力学性能一般都优于模压和精密铸造产品。MIM 技术在制备几何形状复杂、组织结构均匀、性能优异的近净成形零部件方面具有独特的优势，而且可以实现不同材料零部件一体

化,材料适应性广,自动化程度高,生产成本低,材料的利用率几乎可以达到 100%。国际上普遍认为该技术的发展将会导致零部件成形与加工技术的一场革命,并将其誉为“当今最热门的零部件成形技术”。

虽然 MIM 技术有着许多其他工艺无法取代的优势,但是同许多新生事物一样,该工艺也有其局限性。由于成形和脱脂的困难,一些大尺寸零件(壁厚超过 20 mm),仍然无法采用该工艺制得。另外,由于该工艺中加入了大量的粘结剂,在烧结过程中会产生 40% 左右的体积收缩,因此零件的精度不易控制。金属注射成形技术从原理上来说适用于各种金属材质,只要该金属能加工成粉末状。但事实上,一些金属,例如铝、铜及其合金,由于本身的特性比较软,加工性能良好,机械加工成本低,一般不考虑用这种方式。

§ 1-2 金属注射成形技术的发展历程

金属注射成形最早可溯源于 20 世纪 20 年代开始的陶瓷火花塞的粉末注射成形制备,随后的几十年间粉末注射成形主要集中于陶瓷注射成形。直到 1979 年,由 Wiech 等人组建的 Parmatech 公司的金属注射成形产品获得两项大奖^[2],以及当时 Wiech^[3]和 Rivers^[4]先后获得专利,粉末注射成形才开始转向以金属注射成形为主导。在 Parmatech 公司转让了他们的几项专利后,MIM 公司纷纷建立起来。1980 年 Wiech 组建 Witec 公司,1982 年 Brunswick 公司进入 MIM 行业,并收购了 Witec 公司,其后又逐步注

册了 Omark 工业、Remington 军品、Rocky 牙科等子公司。1986 年,日本 Nippon Seison 公司引进了 Wiech 工艺。1990 年以色列 Metalor 2000 公司从 Parmatech 公司引进了 Wiech 工艺技术,建立了 MIM 生产线。经过近二十年的发展,2003 年全球 MIM 产品市场总值达到约 10 亿美元。以地域划分,美国占了 55%,接下来为欧洲和日本。目前全世界共有超过 500 家公司从事金属注射成形产品的生产和销售工作,另外还有约 40 家 MIM 粉末供应商,20 家 MIM 喂料供应商。据统计,全球 MIM 产业的成形能力已超过 700 台注射成形机、500 台炉子、300 台混炼机^[5]。Marko Maetzig^[6]详细分析了欧洲的情况,欧洲共有 120 家公司和 30 家研究机构从事 MIM 方面的工作,拥有 250 台注射成形机,年消耗 1100 吨喂料。欧洲的 MIM 公司 38% 来自于传统的陶瓷行业,27% 来自于塑料行业,8% 来自于传统粉末冶金和金属切削加工行业,5% 来自于铸造行业,另有 14% 为新成立的公司。日本现在共有 20~30 家 MIM 公司,日本近几年 MIM 市场呈现稳定上升趋势。图 1.4 为最近几年日本 MIM 销售额图谱^[7,8],可以看到虽然 2001 年较 2000 年有所下降,但总体而言,其销售总额呈稳定增长趋势。

图 1.5 给出了目前在 MIM 领域按销售额统计所消耗的材料比例^[9]。表 1.2 给出了近年来报道的 MIM 典型产品及应用领域^[10~13]。

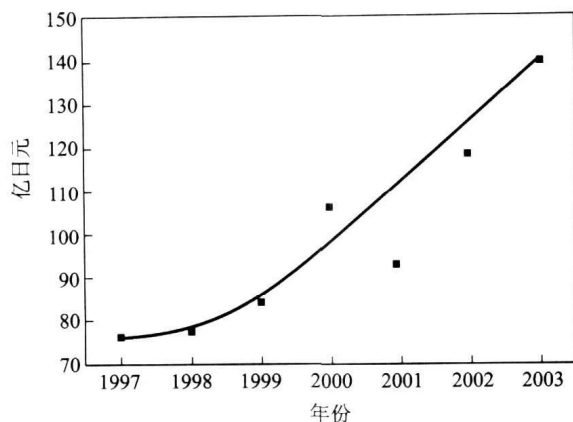


图 1.4 最近几年日本 MIM 市场总值

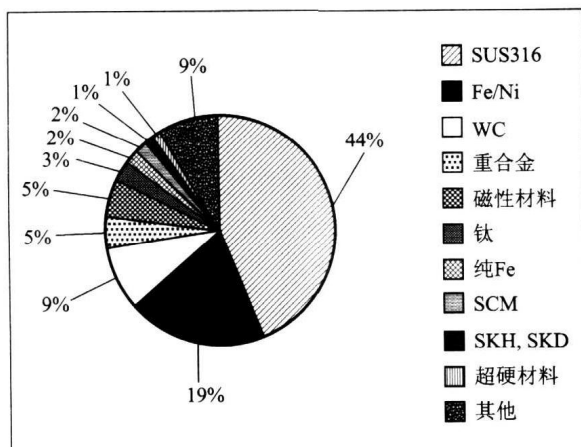


图 1.5 MIM 领域按销售额统计所消耗的材料比例