

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

序

金属注射成形（**粉末冶金注射成形**）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，**粉末冶金注射成形**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 1989 年和 1993 年出版过两本这方面的专著，而国内尚没有一本专门阐述 **粉末冶金注射成形**的专著出版。我国在 **粉末冶金注射成形**方面起步较晚，从事这方面研究的单位不多。在世界 **粉末冶金注射成形**技术发展如日中天的背景下，为了促进我国 **粉末冶金注射成形**的研究，加速度发展，出版系统论述 **粉末冶金注射成形**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 50 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。50 年来，他及其同事在国外同行工作

前 摇 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（~~金属注射成形~~）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。金属注射成形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 3D 打印的基本原理及步骤，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 3D 打印产品尺寸精度控制，同时介绍了 3D 打印产品设计的特点、3D 打印相关设备、3D 打印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 3D 打印典型产品应用情况。

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、邝爱云博士、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

2019 年 1 月

目 录

第一章 绪论	(摇)
金属注射成形技术的特点	(摇)
金属注射成形技术的发展历程	(摇)
金属注射成形技术的发展方向	(摇)
小结	(摇)
第二章 金属注射成形喂料的制备	(摇)
注射成形用粉末的性能及制备	(摇)
注射成形用粘结剂的配比及性能	(摇)
注射成形用喂料的混炼	(摇)
小结	(摇)
第三章 金属注射成形喂料的流变学行为	(摇)
喂料流变学的一般原理及粘度测量	(摇)
配喂料流变学行为	(摇)
典型金属注射成形粉末体系喂料的流变学	(摇)
流变学应用	(摇)
小结	(摇)
第四章 注射成形	(摇)
成形过程	(摇)
浇注系统及模具	(摇)
成形参数对注射坯性能的影响	(摇)

异常注射成形制品缺陷的产生与控制	(摇)
异常小摇结	(摇)
第五章 脱脂	(摇)
异常热脱脂过程及机理	(摇)
异常溶剂脱脂过程及机理	(摇)
异常生产中的几种脱脂工艺	(摇)
异常脱脂过程的保形和缺陷避免	(摇)
异常小摇结	(摇)
第六章 注射成形坯的烧结	(摇)
异常注射成形坯烧结的基本原理	(摇)
异常几种典型注射成形材料体系的烧结	(摇)
异常烧结产品质量及尺寸精度控制	(摇)
异常烧结后处理	(摇)
异常小摇结	(摇)
第七章 金属注射成形设备	(摇)
异常混炼设备	(摇)
异常注射成形设备	(摇)
异常脱脂设备	(摇)
异常烧结设备	(摇)
异常小摇结	(摇)
第八章 金属注射成形产品的设计及应用	(摇)
异常金属注射成形产品的设计思想	(摇)
异常金属注射成形产品的应用	(摇)
异常小摇结	(摇)

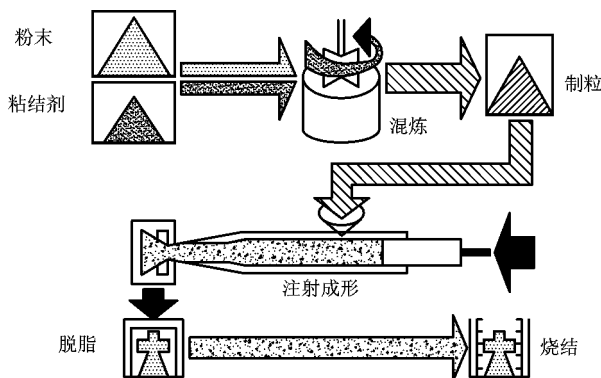


图 1 金属注射成形基本工艺过程

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压制成形，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预混的粘结剂，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百分之

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

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。配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,由于配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,配就会比机加工方法更为经济。图 圆给出了配零件的生产量对成本的影响。可以看出,生产缘早的零件的生产成本,年产圆件时为猿元,年产圆件以上时降为源元。此图还指出零件尺寸对成本的影响——零件越大,圆件与圆件之间的成本差就越小。

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

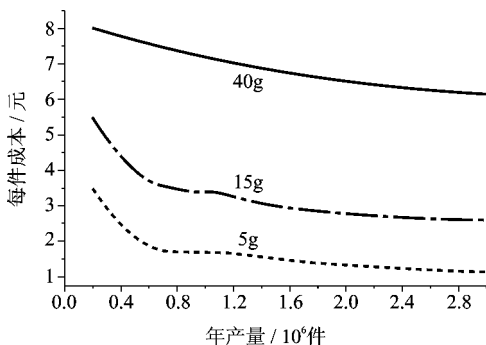


图 1 零件制造成本与生产量之间的变化关系

表 1 压铸和精密铸造成形能力的比较

特 点	精密铸造	压铸
最小孔直径	圆皂	圆皂
圆皂直径的盲孔最大深度	圆皂	圆皂
最小壁厚	圆皂	约圆皂
最大壁厚	无限制	圆皂
圆皂直径的公差	依圆皂	依圆皂
表面粗糙度	缘皂	员皂

压铸技术的主要特点可以进一步用图 1 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压铸技术的优点，也就是说，压铸技术可以低成本地

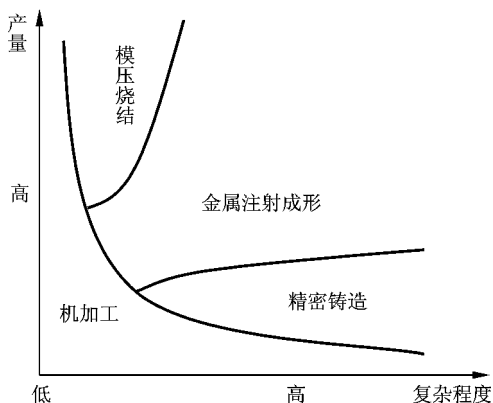


图 1-1 粉末冶金技术优势图

生产复杂形状的高性能产品。粉末冶金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，使得粉末冶金产品各处密度均匀，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，粉末冶金产品的力学性能一般都优于模压和精密铸造产品。粉末冶金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 3D 打印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 10mm),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 10% 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。

2.1 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 19 世纪 60 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 1959 年,由 3M 公司等人组建的 3M 公司的金属注射成形产品获得两项大奖^[1],以及当时 3M 公司和 3M 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 3M 公司转让了他们的几项专利后,3M 公司纷纷建立起来。1960 年 3M 组建 3M 公司,1960 年 3M 公司进入 3M 行业,并收购了 3M 公司,其后又逐步注

册了韵毛舞噪工业、砾巢圣伊燥土军品、砾巢燥曾牙科等子公司。员怨远年，日本晕毛燥燥奈燥燥社公司引进了宰燥燥工艺。员怨怨年以色列燥燥燥燥燥公司从孕燥燥燥燥公司引进了宰燥燥工艺技术，建立了燥燥生产线。经过近二十年的发展，圆园园年全球燥燥产品市场总值达到约员亿亿美元。以地域划分，美国占了缘缘，接下来为欧洲和日本。目前全世界共有超过缘家公司从事金属注射成形产品的生产和销售工作，另外还有约源家燥燥粉末供应商，圆家燥燥喂料供应商。据统计，全球燥燥产业的成形能力已超过苑万台注射成形机、缘万台炉子、猿万台混炼机^[苑]。燥燥燥燥燥燥燥燥^[苑]详细分析了欧洲的情况，欧洲共有员家公司和猿家研究机构从事燥燥方面的工作，拥有圆万台注射成形机，年消耗员吨喂料。欧洲的燥燥公司猿缘来自于传统的陶瓷行业，圆缘来自于塑料行业，愿缘来自于传统粉末冶金和金属切削加工行业，缘缘来自于铸造行业，另有员缘为新成立的公司。日本现在共有圆-猿家燥燥公司，日本近几年燥燥市场呈现稳定上升趋势。图员源为最近几年日本燥燥销售额图谱^[苑]，可以看到虽然圆园年较圆园年有所下降，但总体而言，其销售总额呈稳定增长趋势。

图员缘给出了目前在燥燥领域按销售额统计所消耗的材料比例^[苑]。表员圆给出了近年来报道的燥燥典型产品及应用领域^[苑-苑]。

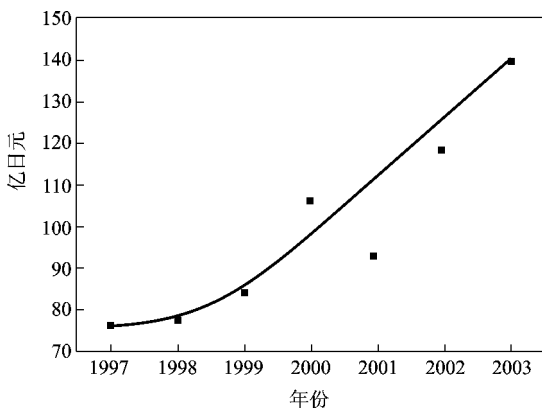


图 1 最近几年日本 压铸 市场总值

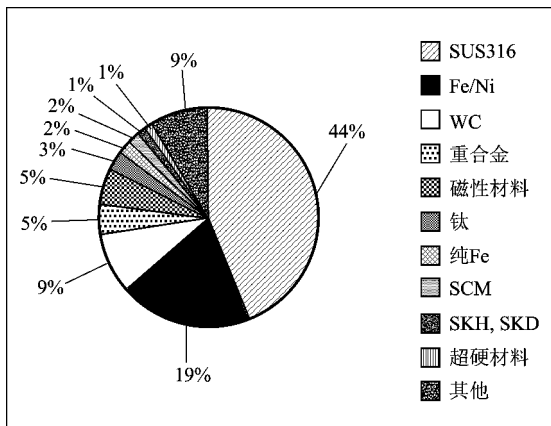


图 2 压铸 领域按销售额统计所消耗的材料比例

表 员圆 摇铸典型产品及其部分应用领域

航空航天业	飞机机翼铰链、火箭喷嘴、导弹尾翼、陶瓷涡轮叶片芯子
汽车业	棘轮、棘轮杆、油喷嘴、拉杆、挡灰盖
电子业	电子管壳、计算机打印头、电子封装件
军工业	地雷转子、枪扳机、穿甲弹弹心、准星座
医摇疗	体内缝合针、活体组织取样钳、防辐射屏罩
日用品	表壳、表带、表扣、表链、高尔夫球头和球座、剃须刀头、运动鞋扣
机械行业	轴套、异形铣刀、锯片夹持器、电动牙刷的不锈钢齿轮、切削工具
其他	不锈钢导流叶片、仪表传感器控制阀、固定搅拌器、皮管接头

摇铸经历了一条快速发展的道路。虽然摇铸正引起人们越来越大的关注，但目前其工业规模与传统加工技术相比还显弱小，还有很大的发展潜力。新生的摇铸工业还需要我们采取制定工业标准、加快工业化、提高从业者素质、研发设备以及争取顾客等一系列的努力来将其发展壮大。然而，摇铸技术的发展依然是惊人的并显现出强大的生命力。图 员圆 为近 员缘年及今后 员园年的摇铸销售统计及预测图。从图中可以看到 圆世纪 怨年代摇铸年销售额的平均增长速度达到了 圆豫，预计今后十年整个市场仍会以 圆豫~猿豫的速度递增。随着工艺的不断完善，金属注射成形技术的优越性正逐渐显示出来，将会被越来越

多的行业和客户所接受，它所带来的市场份额也正急剧增大。由于市场潜力巨大，许多风险投资也开始涉足 3D 打印行业。可以预见，3D 打印将发展成为 21 世纪最有前途的零部件制造技术之一。

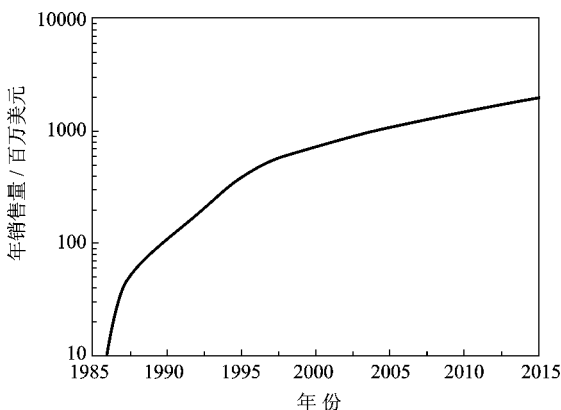


图 1 金属注射成形销售统计及预测图

金属注射成形技术的发展方向

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。这些基础理论及实践问题牵涉到粉末科学、烧结理论、聚合物科学、流变学、表面物理化学、计算机数