

粉末注射成形流变学

Rheology for

P

Injection Molding

国家自然科学基金重点资助
教育部骨干教师项目资助



梁叔全 黄伯云 著
中南大学出版社

国家自然科学基金重点资助
教育部骨干教师项目资助

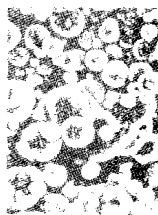
Rheology for

Injection Molding

梁叔全 黄伯云 著

中南大学出版社

粉末注射成形流变学



图书在版编目(CIP)数据

粉末注射成形流变学/梁叔全,黄伯云著. —湖南:

中南大学出版社,2000.12

I. 粉... II. ①梁...②黄... III. 粉末成形—基础—研究 IV. TF124.39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 07272 号

粉末注射成形流变学

梁叔全 黄伯云 著

☐责任编辑 谢贵良

☐责任校对 周兴武

☐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:0731-8829482

电子邮件:csucbs @ public.cs.hn.cn

☐经 销 湖南省新华书店

☐印 装 中南大学出版社印刷厂

☐开本 850×1168 1/32 ☐印张 7.625 ☐字数 194 千字

☐版次 2000 年 12 月第 1 版 ☐2000 年 12 月第 1 次印刷

☐书号 ISBN 7-81061-371-5/TB·008

☐定价 18.00 元

图书出现印装问题,请与经销商调换

序一

PREFACE ONE

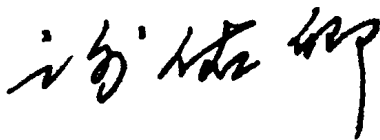
粉末注射成形是能带来材料成形技术革命的材料制备高新技术;而流变学作为一门研究物质流动与变形的力学学科,在材料工艺科学领域有十分广泛的应用。如何将粉末注射成形与流变学有机地结合起来,一直是材料成形领域应用基础研究的重要方向。由黄伯云院士领导的研究小组,多年来一直从事粉末冶金注射成形的研究工作,梁叔全教授是承担这方面基础研究工作的重要成员。他们在国内外工作期间,对粉末注射成形流变学作过广泛深入的调查研究,查阅了大量国内外最新的文献资料,并获得了丰富的实验素材;该研究小组在这一领域的工作获得国家自然科学基金、国家“863”高技术研究计划和国家“973”研究计划的重点支持和资助。本书是该项研究的重要成果。

本书是国内外第一本关于粉末注射成形流变学的著作。全书分两篇。第一篇主要涵盖了粉末注射成形喂料制备的基础理论,

粉末与粘结剂组成、溶剂对流变行为的影响,典型的粉末注射成形喂料流变行为分析等,记载了不少创新性的研究成果,丰富了粉末注射成形流变学的理论。第二篇主要包括粉末注射成形等温和非等温填充分析,流场分析,以及复杂模腔注射成形计算与模拟,比较系统地研究了注射成形中的计算问题,把流变学在粉末注射成形中的应用进一步落到实处。

本书内容丰富,素材新颖,层次分明,是从事粉末注射成形基础理论研究和工程技术研究的科技工作者的一本重要参考书,也是材料学高年级本科生、研究生学习粉末注射成形基础理论和过程分析的重要参考书。我相信本书的出版,将有力推动我国在该领域的研究和开发工作。

中南大学教授、博士生导师



2000 年 12 月

序二

PREFACE TWO

粉末注射成形技术源于 20 世纪 20 年代一种叫热压铸的成形技术,当时已用这一技术成功地生产了汽车用的火花塞等少数几种产品。20 世纪 50 年代,用环氧树脂作为粘结剂,试制了大量硬质合金、难熔金属、陶瓷的试验样品,预示着这一技术在这些难制备、难加工材料中应用的特殊地位。但是,由于当时的材料科学理论还相当欠缺,加之制粉技术、成形技术、烧结技术等一系列技术也有许多不足,这些材料离应用还有一段距离。进入 20 世纪七八十年代,硬质金属、陶瓷领域基础研究的突破,如超微细粉的制备,先进陶瓷增韧、增强理论与技术的发展,使得粉末工艺制备的材料在性能上较 50 年代有了很大的提高。粉末注射成形技术再次被重新研究、认识并逐步发展为较成熟的复杂形状制品制备技术。目前,全球范围内,已有数百个为粉末注射成形技术服务或直接从事粉末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等,从信息计算机用的磁盘驱动磁性元件到珠宝、手表业用产品,以及体育用品等达近百种。其全球销售收入从 80 年代的 4 500 万美元左右发展到 90 年代末的约 4.2 亿美元,并以 22% 的年增长速率高速增长。因此,粉末注射成形技术是一种相对成熟、潜力很大的粉末材料近净成形技术。

在这一成形技术中,流变学起着十分关键的作用。每一种新的材料体系、新的粘结剂体系的开发,首先要进行的基础工作就是流变学评价。粉末注射成形工程技术人员、研究人员始终不遗余力地试图通过调控流体组成结构来为工艺的顺利实施及优化提供科学的依据。令人遗憾的是,虽然国内外出版了一些流变学的著作,但这些著作不是十分切合粉末注射成形实际,要么太理论,要么太简略,始终缺乏一本既相对深入,又切合应用实际的粉末注射成形流变学原理的著作。中南大学粉末冶金国家重点实验室在国家自然科学基金重点项目“粉末近净成形与全致密化过程流变与塑变研究”的资助下,比较全面地开展了有关粉末注射成形流变问题的研究,对理论和实践及其联系作了一些探索性的工作,具有开拓意义。现整理成书,为该研究领域抛砖引玉。希望它的出版有助于推动我国在相关领域的基础研究和新技术开发。

最后对本书完成予以大力支持的国家自然科学基金委何鸣鸿教授、朱旺喜博士、孙贵如老师和本研究小组的曲选辉教授、李益民教授、邱光汉副教授、蒋炳炎副教授、李志林博士、范景莲博士、刘绍军博士、谢贵良博士、朱垒硕士、乐红胜硕士、毛精英硕士、颜寒松硕士、钟孝贤老师等表示由衷的感谢。

作者

2000 年 8 月

目录

CONTENTS

第 1 篇 粉末注射成形流变学基础

第 1 章 粉末注射成形喂料制备与流变学概述	5
1.1 粉末注射成形	5
1.2 喂料制备——粉末与聚合物粘结剂的混合	7
1.3 喂料流变学	11
1.4 本章小结	37
第 2 章 粉末注射成形喂料制备(分散)	40
2.1 粉末在粘结剂中的分散过程的热力学	40
2.2 分散系颗粒相互作用的分析	46
2.3 Fe-Ni 粉末在 HDPE-EVA 中的分散研究	54
2.4 粉末注射成形喂料颗粒相互作用的位阻效应及相关理论	58
2.5 本章小结	67
第 3 章 粉末、粘结剂组成、溶剂对流变行为的影响	69
3.1 分散系的 Einstein 流变理论的发展	69
3.2 粘结剂对流变行为的影响	79
3.3 增塑剂组元对流变行为的影响	90

3.4	润滑剂组元对流变行为的影响	97
3.5	粉末 - 粘结剂 - 溶剂分散系的流变特性	103
3.6	本章小结	116
第 4 章	典型粉末注射成形体系喂料流变行为	118
4.1	Fe - Ni 粉末注射成形体系喂料流变行为	118
4.2	W - Ni - Fe 粉末注射成形体系喂料流变行为	125
4.3	316L 不锈钢粉末注射成形体系喂料流变行为	131
4.4	Si ₃ N ₄ 粉末注射成形体系喂料流变行为	135
4.5	Si 粉末注射成形体系流变行为	141
4.6	本章小结	147
参考文献		148

第 2 篇 流变学应用

第 5 章	粉末注射成形等温填充分析	167
5.1	概述	167
5.2	粉末注射成形与塑料注射成形的比较	168
5.3	具有夹缝型流道的矩形模腔的等温填充	170
5.4	配置中心圆柱型流道的圆片模腔的等温填充分析	179
5.5	本章小结	184
第 6 章	粉末注射成形非等温填充分析	186
6.1	概述	186
6.2	非等温填充的一般性描述	187
6.3	非等温填充过程的数学物理描述	188
6.4	计算方法、计算结果与讨论	192
6.5	本章小结	198
第 7 章	粉末注射成形填充过程的等温动态流场分析	199
7.1	概述	199

7.2	在矩形模腔中的等温流场分析·····	199
7.3	程序与计算实例·····	202
7.4	本章小结·····	207
第 8 章	复杂模腔注射成形填充分析·····	208
8.1	概述·····	208
8.2	控制方程·····	208
8.3	变换·····	214
8.4	求解过程·····	218
8.5	算例·····	222
8.6	本章小结·····	227
参考文献	·····	228

第 **1** 篇

粉末注射成形 流变学基础

粉

末注射成形 (Powder Injection Molding——PIM) 是 20 世纪 80 年代

以来粉末冶金学科、无机非金属材料学科及其他相关学科领域研究的热点。通过加入一定的聚合物及添加剂组元,赋予金属粉末、无机非金属材料粉末与聚合物相似的流动性,采用注射成形技术形成各种材质、形状的材料与制品,从而解决多年来一直困扰粉末冶金领域、无机非金属材料领域的复杂形状制品成形难的问题。要制成形状复杂的制品,就必须要求成形用的物料体系有良好的流动性与变形而不产生缺陷的能力,即良好的流变特性。因此,如何制备用于注射成形用的物料,并给出恰当的流变学特性评价表征就成了粉末注射成形技术的理论之基、技术之源。

有关粉末注射成形物料制备与流变学评价方面的工作已有一些,我们将在第1章中予以讨论。有关喂料制备过程中粉末分散过程的热力学,及分散系中颗粒-粘结剂-颗粒能量相互作用分析及进一步的研究放到第2章中讨论。第3章研究 Einstein 流变学理论,粘结剂流变特性,增塑剂、润滑剂、溶剂对流变特性的影响。

第4章就粉末冶金及无机非金属材料中涉及的典型粉末注射成形物料系的流变学特性予以评价表征。通过本篇的研究与讨论,形成比较完整的粉末注射成形流变学原理。

第 1 章 粉末注射成形喂料制备与流变学概述

1.1 粉末注射成形

粉末注射成形 PIM(Powder Injection Molding)是一个早在 1872 年底就已经提出的成形技术，且在 20 世纪 30 年代用于陶瓷热压铸制品的生产^[1,2]，但真正引起材料科学与工程领域的重视是在 20 世纪 70 年代末至 80 年代初随着先进陶瓷发动机部件的开发而带动起来的^[3~5]。该工艺流程如图 1.1 所示。实际过程如

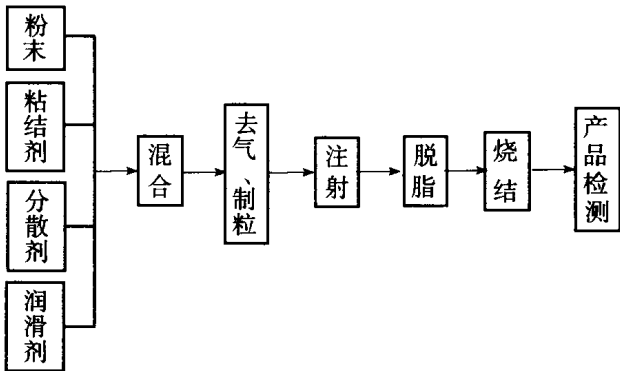


图 1.1 粉末注射成形流程图

图 1.2 所示。其步骤可分为三步：(1) 物料在螺旋挤压杆和桶之间熔化转变为粘性可塑性流体；(2) 粘性可塑性流体在压力作用下被注射到冷却的模具中；(3) 制品在模具中冷却凝固，然后取出。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什么特别的要求的话，主要应对出料口和进料口部分螺杆的耐磨性提出特殊要求。在前一部位，高装载量的粘性流体快速地通过此口，势必引起严重的摩擦；在进料口螺杆部位，物料处于固态，摩擦也相当严重，因此，对这两部位螺杆的耐磨性应提出特别要求^[10]。

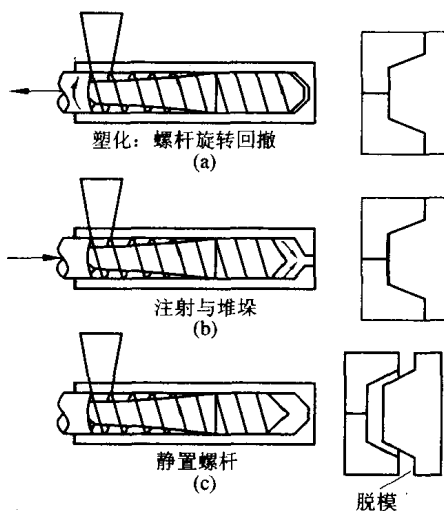


图 1.2 注射步骤

七八十年代，PIM 的研究主要集中在相对较为传统的粘结剂体系，和新型的、性能较好的粉末，即石蜡为主要成分的粘结剂的应用还占有相当大的比重^[8,9]。新的粘结剂处于实验室的开发之中，鲜有报导。PIM 粉末包括先进陶瓷发动机用的 Si_3N_4 、 SiC 、 Al_2O_3 等。金属则以 Fe-Ni 系、不锈钢系为主。在这方面开展研

究的有 Ford 汽车公司^[6,7]、瑞典硅酸盐所^[11]、英国 Brunel 大学^[10,12]等。国内从事这方面研究的以清华大学为主^[13~16]。后因种种原因,陶瓷发动机并未取得预期的突破性进展,因而陶瓷注射成形的研究开发进展速度明显放缓,而几乎与此同一时期,金属的注射成形(Metal Injection Molding——MIM)却稳步地发展起来。Wiech 和 Rivers 分别提出了有名的 Wiech 工艺^[17,18]和 Rivers 工艺^[19],为 MIM 发展打下了坚实的基础。进入 80 年代末和 90 年代初,新一代的粘结剂已逐步走向成熟,为新一代的注射成形开发研究提供了新的驱动力。在有关的基础研究方面,以美国 German 教授和 Mutsuddy 教授、英国 Edirisinhe 和 Evens 为代表的著名材料科学家,开展了大量的理论性基础研究和应用基础研究,发表了大量的论文,出版了有关的专著^[20~22]。虽然,这些研究和专著以实验、经验为主,但仍然为 PIM 开发研究提供了较好的指导^[23,24]。这里值得特别提出来的是一些新一代工艺,如德国的 BASF 快速催化脱脂新工艺和溶剂脱脂新工艺^[25,26],很好地克服了传统 PIM 的不足,有力地推动了 PIM 的快速发展。

1.2 喂料制备——粉末与聚合物粘结剂的混合

整个注射成形过程可以划分为几个阶段:原材料选配,混合与造粒,成形,脱脂,烧结等^[20,21]。每一个阶段都有其特殊的作用。粉末与聚合物粘结剂混合物的制备是最为重要的步骤之一。粉末与粘结剂形成的混合物称为喂料。注射成形工艺要求喂料具有均匀性、良好的流变特性,以及良好的脱脂特性。只有这三方面都照顾到的粉末注射成形系统才会是一个成功的系统,其产品才有可能由实验室走向高技术市场。有关喂料制备,正如 K. S. Roetenborg 等^[27]在其研究论文中指出的那样,尽管喂料制备是 PIM 中最重要的关键步骤之一,但由于这一过程相对来说是在比