

金属粉末注射成形技术及其数值模拟

侯成龙, 郭俊卿, 陈拂晓, 皇涛

Metal powder injection molding technology and numerical simulation

HOU Cheng-long, GUO Jun-qing, CHEN Fu-xiao, and HUANG Tao

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.19591/j.cnki.cn11-1974/tf.2020120007>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

粉末注射成形钛合金粘结剂体系的研究进展

Research progress of titanium alloy binder system for powder injection molding
粉末冶金技术. 2021, 39(6): 563-572

生物医用Ti6Al4V合金粉末注射成形工艺研究

Research on powder injection molding of Ti6Al4V alloys for biomedical application
粉末冶金技术. 2018, 36(3): 217-222, 229

粉末净成形压制工艺优化及三维复杂零件结构设计的数值模拟

Optimization of powder net-shape compacting technology and structural design of 3D complex parts by numerical simulation
粉末冶金技术. 2019, 37(4): 298-305

计算机仿真在粉末冶金过程的应用及研究进展

Application and research progress of computer simulation used in powder metallurgy process
粉末冶金技术. 2021, 39(4): 366-372

纯钼的多向锻造数值模拟及实验研究

Numerical simulation and experimental investigation on multi-directional forging of pure molybdenum
粉末冶金技术. 2021, 39(3): 216-222

超细金属粉末注射成形在聚变装置钨零部件中的应用

Application of ultrafine metal powder injection moulding on tungsten components in fusion devices
粉末冶金技术. 2018, 36(4): 279-286



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

金属粉末注射成形技术及其数值模拟

侯成龙^{1,2)}, 郭俊卿^{1,2)}✉, 陈拂晓^{1,2)}, 皇涛^{1,2)}

1) 河南科技大学材料科学与工程学院, 洛阳 471023 2) 河南科技大学有色金属新材料与先进加工技术省部共建协同创新中心, 洛阳 471023

✉通信作者, E-mail: guojq@haust.edu.cn

摘要 金属粉末注射成形技术可以大批量、低成本地制造高性能异形精密零部件, 是当前先进制造技术领域研究的热点之一。本文概述了金属粉末注射成形的工艺, 包括粉末制备、粘结剂选取、混料、注射以及后续的脱脂、烧结, 介绍了金属粉末注射成形的发展过程、现状及新工艺, 深入分析了金属粉末注射成形数值模拟, 在此基础上展望了金属粉末注射成形的发展趋势。

关键词 金属粉末注射成形; 粉末冶金; 数值模拟; 粘结剂

分类号 TG142.71

Metal powder injection molding technology and numerical simulation

HOU Cheng-long^{1,2)}, GUO Jun-qing^{1,2)}✉, CHEN Fu-xiao^{1,2)}, HUANG Tao^{1,2)}

1) School of Materials Science and Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, China

2) Provinces and Ministerial Co-construction of Collaborative Innovation Center for Non-ferrous new Materials and Advanced Processing Technology, Luoyang 471023, China

✉Corresponding author, E-mail: guojq@haust.edu.cn

ABSTRACT Metal powder injection molding (MIM) can be used to manufacture the high performance precision parts with the special shape in large quantities and low cost, which is regarded as one of the research hotspots in the field of the advanced manufacturing technology. The MIM technology was summarized in this paper, including the powder preparation, the binder selection, the mixing, the injection, and the subsequent debinding and sintering. The development, status, and new technology of MIM were introduced, the numerical simulation of MIM was deeply analyzed, and the development trend of MIM was prospected.

KEY WORDS metal powder injection molding; powder metallurgy; numerical simulation; binder

金属粉末注射成形 (metal powder injection molding, MIM) 技术^[1]是将现代塑料注射成形技术引入粉末冶金领域而形成的一门新型粉末冶金近净成形技术, 是粉末注射成形技术的一种。与传统的粉末冶金产品相比, 金属粉末注射成形产品具有精度高、组织均匀等优点, 采用该技术可以大批量、低成本地生产结构复杂、性能优异的金属零件。

粉末注射成形技术起源于 20 世纪 20 年代, 被用于生产陶瓷零件。20 世纪 80 年代, Wiech^[2-3] 和 Rivers^[4] 开始采用粉末注射成形技术制备金属零件。进入 21 世纪, 金属粉末注射成形工艺进一步发展, 成为了制备难熔金属基复合材料和金属间化合物的新型工艺。李云平等^[5] 对金属粉末注射成形技术在 W-Cu 复合材料方面的应用做出了全面的综述。

收稿日期: 2020-12-17

DOI: 10.19591/j.cnki.cn11-1974/tf.2020120007; <http://pmt.ustb.edu.cn>

Hu 等^[6]用金属粉末注射成形技术制备多孔镍钛形状记忆合金零件, 采用两步脱脂工艺, 脱脂率可达 98.8%。Bose 和 German^[7]用金属粉末注射成形技术制备 Ni₃Al 基复合材料零件, 克服了金属间化合物因硬度过高难以进行加工的缺陷, 极大地提高了其加工效率。

传统的实验方法很难直观地观测到金属粉末注射成形充模流动过程, 计算机模拟可以很好地解决这个问题。从研究特点看, 对模腔中熔体流动模拟的研究经历了从一维向三维、从饼形和矩形简单零件向复杂零件、从简单边界条件向复杂边界条件、从经典的薄壁零件向厚壁零件发展的探索过程。1972 年, Kamal 和 Kenig^[8-9]基于幂率流体的蠕变流动理论建立了一维径向流动的数学模型, 不过该模型只适用于研究浇注系统内的流动模拟。Hieber 和 Shen^[10-11]用有限差分法分析计算了流体的二维流动过程, 提出了确定某一时刻流体前沿位置的“预测-校正”两步法。20 世纪 80 年代后期, Hieber 提出采用流动路径法和控制体积法对流体三维流动过程进行模拟, 计算结果与现实基本吻合。

本文介绍了金属粉末注射成形的工艺概况, 对金属粉末注射成形及其数值模拟研究进行了深入分析, 在此基础上对其发展趋势进行了展望。

1 金属粉末注射成形工艺概况

金属粉末注射成形工艺流程如图 1 所示, 基本过程是将金属粉末与粘结剂混合均匀, 制成注射料, 通过注射机注射成形, 然后除去粘结剂(脱脂), 最终烧结成接近全致密的成品零件。有些零件在脱脂和烧结过程中会出现一定的变形, 需要进行一定的后处理才能够得到最终产品。

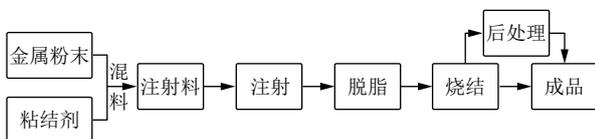


图 1 金属粉末注射成形技术工艺流程图

Fig.1 Flow chart of the metal powder injection molding

1.1 混料

混料是使用密炼机和造粒机(如图 2 所示)将金属粉末和粘结剂均匀混合, 在此过程中金属粉末被粘结剂完全包裹, 最终得到均匀的注射料。Lacey^[12]指出在混料的过程中, 存在扩散混合(喂料中金属颗粒分布于新形成的表面)、层流混合(在喂料中建立滑移面)、分散混合(相邻颗粒组

从喂料中的一个位置转移到另一个位置)三种机制。梁叔全和黄伯云^[13]在此基础上进一步指出, 扩散混合机制是混合均匀的热力学基础, 层流混合机制和分散混合机制是混合均匀的动力学保证。



图 2 密炼机 (a) 和造粒机 (b)

Fig.2 Mixer (a) and the granulator (b)

1.1.1 粉末

一般来说, 能够用于粉末冶金的所有金属粉末都能够用于金属粉末注射成形, 目前常用的材料系列如表 1 所示。用于金属粉末注射成形的金属粉末一般通过羟基法和雾化法制备。羟基法的原理是将金属与 CO 合成羟基金属化合物, 再通过热分解的方式制得金属粉末, 采用该方法制得的粉末呈球形且粒度较小, 但成本较高。雾化法包括超高压水雾化法、高压气雾化法以及层流雾化法。水雾化法生产效率高且经济实用, 但制得的粉末形状不规则; 气雾化法制得的粉末为球形, 但细粉率低, 生产成本较高; 层流雾化法适用于生产贵金属粉、铜合金粉以及超合金粉, 粉末粒度一般在 20 μm 以下。除上述两种方法外, 工业上常用于生产金属粉末的方法还有还原法、电解法以及研磨法等, 但无论是采用哪种方法, 制得的粉末都不可能绝对均匀。采用扫描电镜(scanning electron microscope, SEM)观察 316L 不锈钢粉末, 得到如图 3 所示扫描电子显

表 1 金属粉末注射成形常用材料系列

Table 1 Common material series in MIM

材料系列	合金成分
低合金钢	Fe-2Ni, Fe-8Ni
不锈钢	304L, 314L, 316L, 440A, 440C, 17-4PH
硬质合金	WC-6Co
重合金	W-Ni-Fe, W-Ni-Cu, W-Cu
工具钢	42CrMo4, M2
钛合金	TiAl, Ti-6Al-4V, TiMo
陶瓷	ZrO ₂ , Si ₃ N ₄ , AlN, Al ₂ O ₃ , SiO ₂
新型合金	Fe-Al-Si, 无Ni奥氏体不锈钢

显微镜形貌，从图中可以明显看到，金属粉末的粒度并不是绝对均匀的，而是大多数粉末的粒度都在一个很小范围内波动。尉念伦和孙世清^[14]采用水汽

联合雾化制造工艺制备钴铬钼粉末，所制得的金属粉末兼有水雾化粉末粒径小和气雾化粉末球形度好的优点。

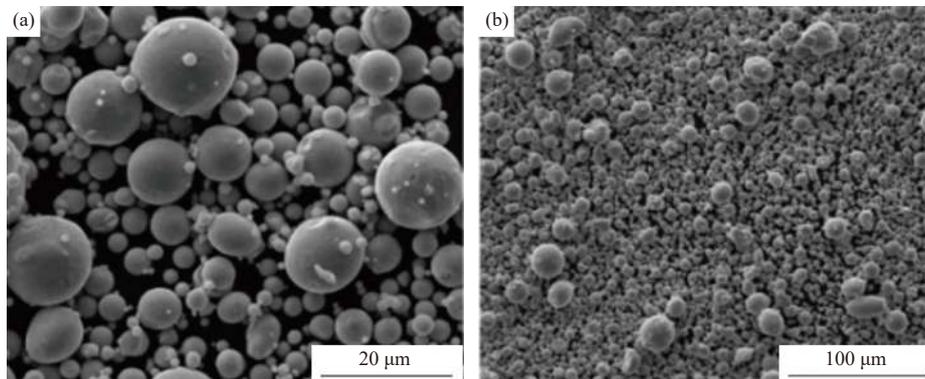


图3 316L 不锈钢粉末扫描电子显微形貌

Fig.3 SEM images of the 316L stainless steel powders

粉末粒度和粉末之间的摩擦影响喂料的成分均匀度。粉末粒度越大，由于质量所引起的偏析就越大；粉末之间的摩擦系数越大，团聚倾向也就越大，从而导致制成均匀注射料的难度也越大。因此在混料的过程中，经常添加一定的表面活性剂以减小粉末表面之间的摩擦，进而改善其团聚倾向^[15]。

金属粉末注射成形所使用的细球形粉末制备成本较高是限制该技术发展的一个重要原因，郝向阳等^[16]利用高速气流冲击对非球形氢化脱氢钛粉(HDH)进行干式机械化球化处理，获得了低成本的球化细粉。Mahmud等^[17]直接将低成本的非球形氢化脱氢钛粉用于金属粉末注射成形，成功生产出

无裂纹、无变形且烧结密度达到95%的合格零件。

1.1.2 粘结剂

理想的粘结剂具备以下特征^[18]：熔点低，固化性好，黏度低，流动性好，黏度随温度变化小，与金属粉末不发生反应，润湿性好，粘附性强，粘结剂中各组元不发生相分离，分解温度高于混料温度和成形温度，分解产物无腐蚀性、无毒、无残留，原料成本低，可循环使用。根据粘结剂的组元和性质可以分为热塑性体系、热固性体系、凝胶水基体系和水溶性粘结剂体系，各类粘结剂体系的优缺点如表2所示。

表2 金属粉末注射成形常用粘结剂体系及其优缺点

Table 2 Common binder systems and the characteristics of MIM

粘结剂体系	优点	缺点
热塑性体系	石蜡基粘结剂熔点低，流动性好，可填充复杂模腔；聚合物基粘结剂强度高，保形性好。	石蜡冷却时体积收缩大，注射时薄壁与厚壁的交界处应力较大；聚合物基粘结剂黏度高，混料难度大
热固性体系	脱脂时间短，可制备较大尺寸零件	注射坯强度低，脱脂不完全，注射料不能重复利用
凝胶水基体系	脱模简单，注射坯强度高，脱脂简单快速，可生产大尺寸零件	粘结剂中的水受热挥发影响注射料黏度，并且水对金属粉末有一定的氧化作用，凝胶化时间长，脱模困难
水溶性体系	绿色环保，不污染环境	注射坯易变形，不适合生产烧结密度高的产品

热塑性粘结剂是以热塑性有机化合物为主体的粘结剂，根据其中低分子组元的不同又可以分为蜡基粘结剂和聚合物基粘结剂。Muller等^[19]发明了一种以合成聚酰胺为主要成分的粘结剂，该粘结剂能够以加热的方式快速去除。热固性粘结剂以热固性有机物作为主要成分，Hens等^[20]研制了一种聚

乙二醇/聚乙烯醇缩丁醛酯(PEG/PVB)粘结剂，其中PEG可用水溶解，PVB受紫外线照射发生固化反应。凝胶水基粘结剂利用特定树脂受热产生凝胶反应获得粘结强度，Honeywell公司使用凝胶水基粘结剂和不锈钢粉混合，成功生产了17-4PH不锈钢飞机引擎叶轮、316L不锈钢轮船推进器等尺

寸较大的金属部件。Hens 等^[21]通过研究发现, 凝胶水基粘结剂虽然有助于获得更高的生坯强度, 但由于粘结剂中含大量水分, 注射时水分蒸发导致注射料黏度变化太大, 粘结剂难以重复利用。水溶性粘结剂主要由水溶性组元和水不溶性组元组成, 其优点是脱脂方便, 不需要使用有毒的有机溶剂进行脱脂。

1.2 注射

注射是金属粉末注射成形的一个重要环节, 其目的是获得具有一定形状的生坯。该环节采用的设备和塑料注射成形基本相同, 整个过程分为填充、保压、冷却三个阶段。喂料充模流动机理如图 4 所示, 喂料熔体进入模具之后, 最前端熔体与冷空气接触之后形成一层黏度很高的前沿膜, 阻碍熔体的进一步流动; 同时, 喂料熔体与温度较低的模具内壁接触之后也会迅速凝固, 形成一层冷凝层。产品的大多数缺陷也是在这个环节被引入的, 如模具的温度过低或注射压力偏小, 将导致产品的表面极易出现裂纹和褶皱, 甚至出现“欠注”现象; 注射压力过大或者注射温度较高时, 容易引起“喷泉”效应, 在产品的内部形成气孔或疏松^[22]。

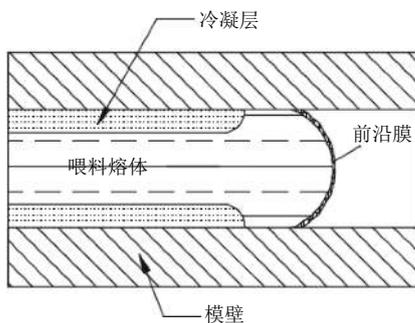


图 4 喂料充模流动机理

Fig.4 Filling flow mechanism of the feeding

虽然金属粉末注射成形在注射阶段和塑料注射成形基本相同, 但还是有自己特有的性质, 因此对于注射阶段喂料充模过程的研究十分重要。目前对于该过程的研究主要是采用数值模拟的方法。相对于塑料流动模拟, 金属粉末注射成形充模流动模拟起步较晚, 且发展也较为缓慢。韩国 Pohang 大学的 Kwon 等^[23]对熔体与模壁的滑移现象进行了数值仿真, 并开发了专门用于粉末注射成形的 CAE 软件 Pimflow, 为粉末注射成形模具设计和过程分析提供理论指导。

1.3 脱脂

脱脂是利用生坯中不同物质的不同熔点或溶解度去除粘结剂的过程。脱脂工艺的选择取决于金属

粉末注射成形所用的粘结剂体系。采用多组元粘结剂体系, 在脱脂过程中可以分步去除, 既可以提高脱脂效率, 又能保证脱脂过程中剩余足够的其他组元来保持金属粉末在其适当的位置^[22]。肖平安等^[24]发明了一种梯度负压热脱脂技术, 图 5 为该技术的装置示意图。脱脂时将零件埋于填料粉末中, 容器的底部进行抽真空的同时在容器的顶部通入气体, 形成梯度负压, 脱脂速度更快更彻底, 并解决脱脂后粘结剂的回收问题。

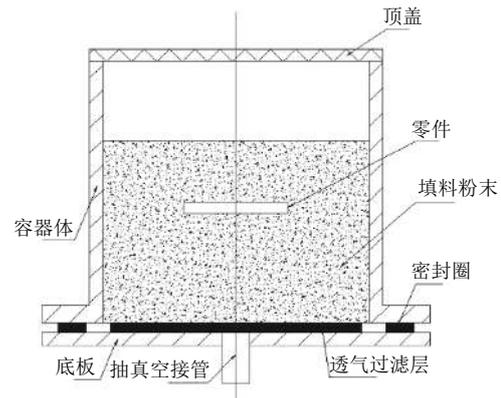


图 5 梯度负压脱脂技术装置示意图^[25]

Fig.5 Schematic diagram of the gradient vacuum degreasing technology^[25]

热脱脂的核心是控制热分解产生的物质在粉末颗粒中的扩散过程。热脱脂工艺简单、成本低、对设备要求低, 但同时也存在注射坯易变性、脱脂效率低以及脱脂不彻底等缺点。Camargo 等^[25]通过对热脱脂工艺动力学研究发现, 扩散是热脱脂的决定因素。图 6^[25]为使用两种不同粘结剂脱脂后样品的微观结构, 熔体流动指数 (MFI) 较低的样品 (LFPP) 比熔体流动指数较高的样品 (HFPP) 显示出更大的孔, 这表明熔体流动指数较低的样品分解形成大碎片, 粗化了原始的毛孔, 证明了扩散是热脱脂的决定因素。

溶剂脱脂工艺是将溶剂渗透到注射坯的内部, 将注射坯内部粘结剂中可溶解成分溶解并随溶剂脱出。由于溶剂脱脂只脱去粘结剂中的可溶解成分, 因此通常会在溶剂脱脂之后再进行一次热脱脂。溶剂脱脂工艺脱脂速度快, 且脱脂温度在粘结剂软化温度之下, 不易产生热变形。但溶剂进入注射坯内部后, 也可能因其过分膨胀而导致注射坯变形开裂。除此之外, 溶解剂一般为有机溶剂, 对人体和环境有害。

催化脱脂是目前国内外应用较多的脱脂工艺, 该工艺综合了热脱脂和溶剂脱脂的优点, 克服了传

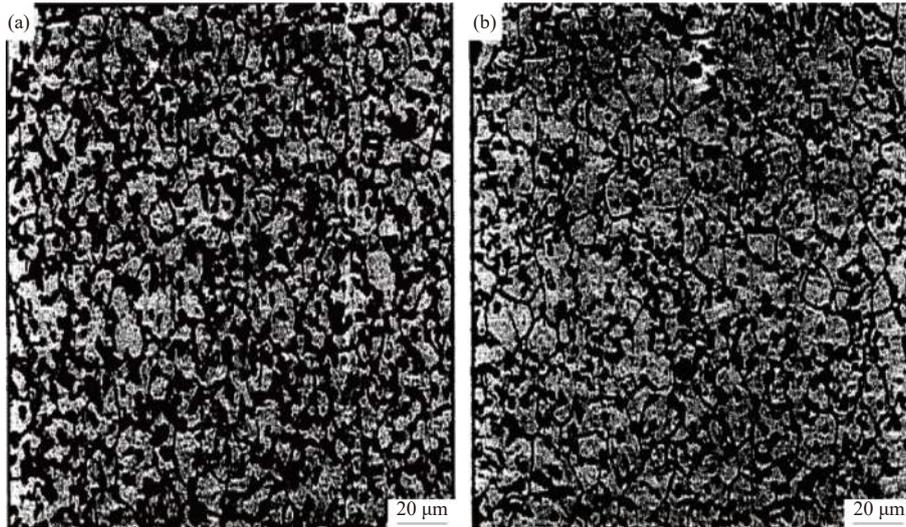


图6 脱脂后样品的微观结构: (a) LFPP; (b) HFPP^[25]

Fig.6 Microstructure of the sample after degreasing: (a) LFPP; (b) HFPP^[25]

统脱脂工艺脱脂时间长、脱脂不彻底的缺点。20世纪90年代,德国BASF公司开发出了Metamold脱脂工艺^[26],脱脂时从零件外部区域向内部区域进行,解决了传统热脱脂工艺脱脂时气体难以逸出所造成的脱脂不完全问题。

1.4 烧结

和传统粉末冶金技术一样,金属粉末注射成形进行烧结的目的也是使金属粉末之间发生冶金结合,从而提高零件的强度。一般来说,金属粉末注射成形烧结时的温度控制在金属熔点的0.7~0.8。根据烧结的过程中是否有液相的产生,又分为固相烧结和液相烧结。范景莲等^[27]通过实验证明,即使是液相烧结,金属粉末发生大部分致密化也是产生于固相烧结阶段。

金属粉末注射成形烧结的研究重点主要集中在烧结设备的设计以及烧结尺寸精度的控制。德国CREMER公司针对Metamold脱脂技术发明了一种连续脱脂烧结炉,实现了脱脂、烧结一体化,脱脂速率可达 $1\sim 4\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 。在烧结过程中,注射坯会产生14%~18%的均匀收缩,收缩比例的大小取决于注射料中粘结剂的含量以及金属粉末的粒度,想要得到和预期一样形状的零件,就要求前期的混料接近绝对均匀,且在注射阶段不发生两相分离。为了获得所需的性能,烧结时需控制烧结体的组织和密度,从而控制产品的尺寸和精度。此外,烧结过程中升温速度、烧结气氛以及保温时间、降温速度等也会影响烧结的效果。戴煜和王利民^[28]在已有真空脱脂烧结炉基础上,设计了一种分压控制式真空脱脂烧结一体炉,其结构如图7所示,该装置

通过两套压力控制系统分别实现分压脱脂以及恒压烧结。

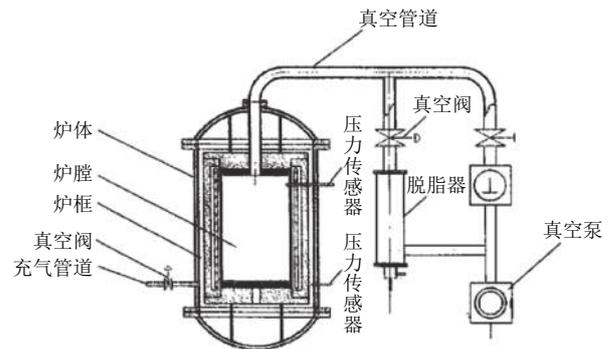


图7 分压控制式真空脱脂烧结一体炉示意图^[28]

Fig.7 Schematic diagram of the partial pressure controlled vacuum degreasing and sintering integrated furnace^[28]

1.5 工艺改进

为了将不同性能的两或几种材料结合在同一零件中,在金属粉末注射成形的基础上开发出了一种粉末共注射成形技术,通过一台带有两个或两个以上料筒,但是只有一个喷嘴的注射机实现,其中一个料筒用于成形零件的外壳,另一个料筒用于成形零件的芯部^[29]。Chen等^[30]采用粉末共注射成形技术制备了一种新的仿生种植结构,该结构有利于种植骨中的界面应力传递到周围的骨质结构中,其外层多孔结构最大孔隙可达 $400\text{ }\mu\text{m}$ 。

German^[31]和Zauner^[32]针对微型零件的生产提出微粉末注射成形技术,Rota等^[33]研究发现该技术用于金属成形领域可制得高强度、耐腐蚀、磁性能优异的微型零件。Zeep等^[34]和Piotter等^[35]采用微粉末注射成形技术制备氮冷却偏滤器,如图8

(a) 所示, 烧结密度可达 96%, 表明微粉末注射成形技术能够生产出符合使用要求的小型零部件。Nishiyabu^[36] 将 LIGA (lithographie galvanofornung abformung) 技术与金属粉末注射成形相结合, 制备出高精度的微型柱状 316L 不锈钢零件。但是, LIGA 技术会使整个制备过程极为复杂且耗时较长, Ammosova 等^[37] 利用微加工机器人在模具镶件表面制造微织构结构, 进而快速生产具有相应微结构的零件。Piotter 等^[38] 使用微粉末注射成形技术制备 316L 不锈钢微型台阶齿轮, 如图 8 (b) 所示, 最小齿宽可以达到 50 μm 。尹海清等^[39] 研究了齿顶圆直径小于 1 mm 的微型齿轮的粉末注射成形工艺, 并对零件性能表征的测试设备及方法进行了介绍。

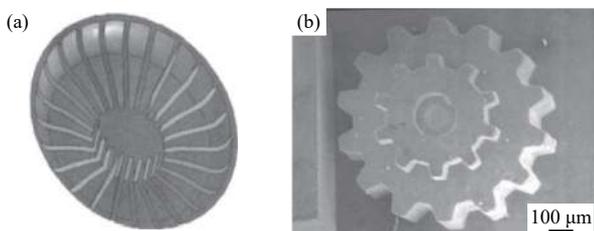


图 8 微注射成形零件: (a) 氦冷却偏滤器^[34-35]; (b) 316L 不锈钢微型台阶齿轮^[38]

Fig.8 Micro injection molding parts: (a) helium cooled divertor^[34-35]; (b) 316L stainless steel miniature step gear^[38]

1.6 国内外应用领域

作为当今热门的金属零部件成形技术, 金属粉末注射成形技术被广泛应用于电子产品、医疗器械、汽车等行业, 图 9 是 2017 年世界金属粉末注射成形产业市场分布图^[40]。我国金属粉末注射成形产品中的 82% 为 3C 产品^[41], 其中手机 67.5%, 可穿戴设备 7.1%, 计算机 7.4%。然而在医疗器械方面, 日本和北美在市场上占有主要份额, 分别为 38% 和 21.3%。汽车产业方面则由欧洲占有最大市场份额 (22%)。

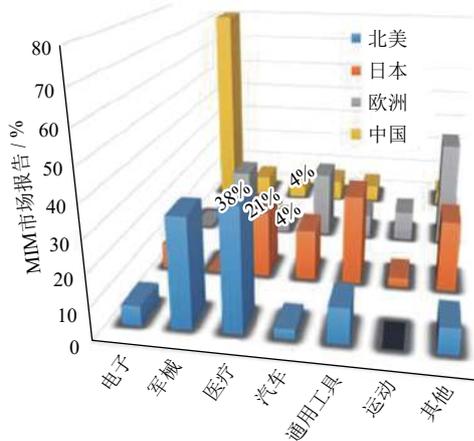


图 9 2017 年世界金属粉末注射成形产业市场分布^[40]

Fig.9 Market distribution of the world MIM industry in 2017^[40]

2 金属粉末注射成形数值模拟

2.1 流动模型研究进展

目前已有的流动模型大体上可以分为连续介质模型、两相流模型以及颗粒模型三种。

连续介质模型把金属粉末注射成形喂料熔体假设为内部没有任何孔隙的均一连续介质, 将充模过程看作非牛顿流体的非等温、非稳态层流流动。Najima^[42] 和卓海宇等^[43] 基于以上假设理论分别建立了金属粉末注射成形充模流动的基本控制方程。该模型由于将金属粉末和粘结剂看成同一介质, 故无法分析出金属粉末注射成形中的两相分离问题。

两相流模型将喂料中的金属粉末和粘结剂分别看作两种流体, 该模型能够很好预测注射过程中必然出现的两相分离现象。Samanta 等^[44] 结合粘结剂的半晶体特性, 模拟分析了喂料的填充过程, 并预测了粉末-粘结剂的分离情况。王会玉等^[45-47] 基于粉末-粘结剂双流体模型, 利用 CFX 软件对充模过程中粉末和粘结剂的分布情况进行了数值分析, 证明了粉末注射成形中特有的边界层效应的存在, 通过研究进一步发现减小密度差以及适当增加喂料的黏度均可有效减少边界层效应。

颗粒模型直接将粉末颗粒作为一个单元, 从颗粒与颗粒、颗粒与粘结剂的相互作用中导出动量输运方程^[48]。使用这种方法可以直接考察粉末特性 (粒度、粘径分布、密度、形状) 对流动过程的影响, 从而通过监视流动过程中粉末的变化、聚积来预测密度分布和分离现象等。Iwai 等^[49] 提出了粉末和粘结剂共同作用完成填充的颗粒模型, 可以计算每一个颗粒的运动情况, 其模型如图 10 所示, 假设每一粒金属粉末都被粘结剂所包裹, 包裹不同颗粒的粘结剂之间产生相互作用。郑洲顺等^[50]、刘煜等^[51]、李大鹏^[52] 将型腔中的喂料分为金属粉末、粘结剂以及空气, 进而建立了三相流模型, 也是颗粒模型的一种表现形式。该模型虽然有创意, 但在实际应用中, 由于还存在一系列的微观边界条件和参数的测定问题, 所以与连续介质模型和两相流模型相比, 颗粒模型难度大、复杂度高, 目前还不成熟。

2.2 数值模拟应用

对金属粉末注射成形进行数值模拟主要是对其注射阶段充模过程进行模拟, 主要研究工艺参数及模具结构对生坯质量的影响。郑洲顺等^[53] 建立了浇道模壁凝固层厚度的数学模型, 该模型可预测浇道模壁凝固层厚度的增长情况, 为进一步优化工艺

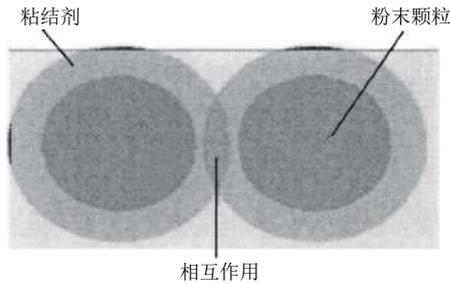


图 10 Iwai 颗粒模型示意图^[51]

Fig.10 Schematic diagram of Iwai particle model^[51]

设计提供了理论依据。吴苑标和郑振兴^[54]建立了粉末注射模具的浇注系统优化设计模型，并采用 Moldflow 进行模拟分析，结果表明优化后的模具锁模力和成形周期明显下降，且生坯密度明显提高。刘飞和李文明^[55]采用 Moldflow 软件分别对不同数量和位置的四种浇口方式进行了模拟，得出了最优浇口方式。郑振兴等^[56]对金属粉末注射成形中的注射过程进行数值模拟，成功预测了各工艺参数及其交互作用对生坯质量的影响，得出了最优工艺参数组合。

3 结论与展望

(1) 为降低原材料的成本，增强市场竞争力，应开展对大颗粒金属粉末成形技术的研究。但采用大颗粒金属粉末也会带来尺寸精度难以控制且后处理较为复杂等问题，应在降低原材料成本的同时充分考虑整体成本问题。

(2) 开发新的脱脂烧结工艺，减少零件中残留的粘结剂成分，从而降低因残留有粘结剂成分而导致的力学性能下降。

(3) 研究多金属组元注射成形技术，尤其是针对结构较为复杂、性能要求较高的高精密零件的注射成形技术。

(4) 将金属粉末注射成形与增材制造相结合，深入研究粘结剂喷射成形技术或者间接 3D 打印技术，拓宽金属粉末注射成形应用范围。

(5) 开发更为先进的金属粉末注射成形仿真模拟软件，尤其是属于自己的仿真软件，充分发挥数值模拟技术对于金属粉末注射成形的指导作用。

参考文献

[1] Gao J X, Zhuo H Y, Gao Z P, et al. Situation and development tendency of MIM computer simulation technology. *Cement Carb*, 2006, 23(1): 47
(高建祥, 卓海宇, 高泽平, 等. 金属粉末注射成形过程计算机模拟技术的现状及发展. *硬质合金*, 2006, 23(1): 47)

[2] Wiech R E. *Manufacture of Parts from Particulate Materials*: US Patent, 5613183. 1997-3-18

[3] Wiech R E. *Method and Means for Removing Binder from a Green Body*: EP Patent, 0032404. 1981-7-22

[4] Rivers R D. *Method of Injection Molding Powder Metal Parts*: US Patent, 4113480. 1978-9-12

[5] Li Y P, Qu X H, Zheng Z S, et al. The present state in research and development trend in industrialization of PIM W-Cu composites. *Powder Metall Technol*, 2003, 21(2): 108
(李云平, 曲选辉, 郑洲顺, 等. 注射成形W-Cu研究现状及产业化发展趋势. *粉末冶金技术*, 2003, 21(2): 108)

[6] Hu G X, Zhang L X, Fan Y L, et al. Fabrication of high porous NiTi shape memory alloy by metal injection molding. *J Mater Process Technol*, 2008, 206(1-3): 395

[7] Bose A, German R M. Potential of powder injection molding and hot isostatic pressing of nickel aluminide matrix composites. *Ind Heat*, 1988, 55(5): 38

[8] Kamal M R, Kenig S. The injection molding of thermoplastics part I: Theoretical model. *Polym Eng Sci*, 1972, 12(4): 294

[9] Kamal M R, Kenig S. The injection molding of thermoplastics part II: Experimental test of the model. *Polym Eng Sci*, 1972, 12(4): 302

[10] Hieber C A, Shen S F. Flow analysis of the non-isothermal two-dimensional filling process in injection molding. *Isr J Technol*, 1978, 16: 248

[11] Hieber C A, Shen S F. A finite-element/finite-difference simulation of the injection molding process. *J Non-Newtonian Fluid Mech*, 1980, 7: 1

[12] Lacey P M C. Development in the theory of particle mixing. *J Appl Chem*, 1954, 4(5): 257

[13] Liang S Q, Huang B Y. *Rheology of Powder Injection Molding*. Changsha: Central South University Press, 2000
(梁叔全, 黄伯云. 粉末注射成形流变学. 长沙: 中南大学出版社, 2000)

[14] Yu N L, Sun S Q. Preparation of cobalt-chromium-molybdenum powders for metal injection molding. *Hebei J Ind Sci Technol*, 2021, 38(1): 1
(尉念伦, 孙世清. 金属注射成形用钴铬钼粉末的制备. *河北工业科技*, 2021, 38(1): 1)

[15] He Y Q, Chen Z H, Chen Z G, et al. Metal injection molding: principle and development. *J Mater Sci Eng*, 2013, 31(2): 317
(贺毅强, 陈志华, 陈志刚, 等. 金属粉末注射成形的原理与发展趋势. *材料科学与工程学报*, 2013, 31(2): 317)

[16] Hao X Y, Gai G S, Zou X, et al. Shape modification of HDH Ti powder and its mechanism analysis. *Rare Met Mater Eng*, 2009, 38(Suppl 3): 264
(郝向阳, 盖国胜, 邹欣, 等. 氢化脱氢钛粉末颗粒的整形及其机理研究. *稀有金属材料与工程*, 2009, 38(增刊3): 264)

[17] Mahmud N N, Azam F A A, Ramli M I, et al. Rheological properties of irregular-shaped titanium-hydroxyapatite bimodal powder composite moulded by powder injection moulding. *J Mater Res Technol*, 2021, 11: 2255

[18] Guo S B, Qu X H. Research progress in binders used for metal injection molding. *Powder Metall Technol*, 2004, 22(3): 178
(郭世柏, 曲选辉. 金属注射成形粘结剂的研究进展. *粉末冶金技术*, 2004, 22(3): 178)

[19] Muller E, Horowitz D, Egozy A. *Polyhydroxyalkanoate Molding Compositions*: US Patent, 6071998. 2000-6-6

[20] Hens K F, Kupp D M, Alexander R A, et al. *Method and Binder for Use in Powder Molding*: US Patent, 5332537. 1994-7-26

[21] Hens S, Van Landuyt J, Bender H, et al. Chemical and structural analysis of etching residue layers in semiconductor devices with energy filtering transmission electron microscopy. *Mater Sci Semicond Process*, 2001, 4(1-3): 109

[22] Zhao X J, Dang X A. Research status of metal powder injection molding technology and the mold. *Mould Technol*, 2008(5): 11

- (赵小娟, 党新安. 金属粉末注射成形技术及模具的研究现状. *模具技术*, 2008(5): 11)
- [23] Kwon T H, Hwang C J, Rhee R E. Numerical simulation of powder injection molding filling process for 3D complicated cavity geometries. *Adv Powder Metall Part Mater*, 1996, 5: 19
- [24] Xiao P A, Hu Y Q, Liu J Z, et al. *A Gradient Negative Pressure Thermal Degreasing Technology for Powder Injection Molding*: China Patent, 1974080A. 2007-6-6
(肖平安, 胡业奇, 刘吉祥, 等. 一种粉末注射成形用梯度负压热脱脂技术: 中国专利, 1974080A. 2007-6-6)
- [25] Camargo A, Rodrigues D, Tschiptschin A P. Debinding kinetics of injection molding samples — The effects of the binder melt index flow. *Key Eng Mater*, 2001, 189-191: 604
- [26] Yang X M, Petcavich R J. *Powder and Binder Systems for Use in Metal and Ceramic Powder Injection Molding*: US Patent, 6008281. 1999-12-28
- [27] Fan J L, Huang B Y, Qu X H, et al. Densification mechanism of liquid phase sintered tungsten heavy alloy during initial solid state sintering stage. *Chin J Nonferrous Met*, 1998, 8(Suppl 1): 36
(范景莲, 黄伯云, 曲选辉, 等. 液相烧结高比重合金早期固相烧结阶段的致密化机理. *中国有色金属学报*, 1998, 8(增刊1): 36)
- [28] Dai Y, Wang L M. *Partial Pressure Controlled Vacuum Degreasing and Sintering Integrated Furnace*: China Patent, 2718480Y. 2005-8-17
(戴煜, 王利民. 分压控制真空脱脂烧结一体炉: 中国专利, 2718480Y. 2005-8-17)
- [29] Yi J H, Shi W F. The technology of metal powder injection molding and its development. *Miner Metall Eng*, 2001, 21(2): 7
(易健宏, 史文芳. 金属粉末注射成形技术及其发展动态. *矿冶工程*, 2001, 21(2): 7)
- [30] Chen L J, Li T, Li Y M, et al. Porous titanium implants fabricated by metal injection molding. *Trans Nonferrous Met Soc China*, 2009, 19(5): 1174
- [31] German R M. *Powder Injection Molding*. Princeton: Powder Industries Federation, 1997
- [32] Zauner R. Micro powder injection moulding. *Microelectron Eng*, 2006, 83: 1442
- [33] Rota A C. New features in material issues for metallic micro components by MIM // *World Conference on Powder Metallurgy & Particulate Materials*. Orlando, 2002: 49
- [34] Zeep B, Norajitra P, Piotter V. Net shaping of tungsten components by micro powder injection moulding. *Fusion Eng Des*, 2007, 82: 2660
- [35] Piotter V, Zeep B, Norajitra P, et al. Development of a powder metallurgy process for tungsten components. *Fusion Eng Des*, 2008, 83: 1517
- [36] Nishiyabu K. Micro metal powder injection molding [J/OL]. *InTech* (2012-03-15)[2020-12-07]. <http://www.intechopen.com/books/some-critical-issues-for-injection-molding/micro-metal-powder-injection-molding>
- [37] Ammosova L, Mnkken K, Suvanto M. Precise fabrication of microtextured stainless steel surfaces using metal injection moulding. *Precis Eng*, 2020, 62: 89
- [38] Piotter V, Gietzelt T, Merz L. Micro powder-injection moulding of metals and ceramics. *Sadhana*, 2003, 28: 299
- [39] Yin H Q, Jia C C, Qu X H. Status of micro powder injection molding. *Powder Metall Technol*, 2007, 25(5): 382
(尹海清, 贾成厂, 曲选辉. 粉末注射成形技术现状. *粉末冶金技术*, 2007, 25(5): 382)
- [40] Powder Injection Moulding International Group. *WORLDPM2018 Congress: Global MIM markets show healthy growth. Powder Inject Mould Int*, 2018, 12(4): 67
- [41] Yang T Z. Progress of modern powder metallurgy materials and technology. *China Met Bull*, 2019(12): 10
(杨廷志. 现代粉末冶金材料与技术进展. *中国金属通报*, 2019(12): 10)
- [42] Najima L A. Simulation of mold filling for powder injection molding processes. *Adv Powder Metall*, 1990, 3: 299
- [43] Zhuo H Y, Gao J X, Qu X H. Research on mathematical mold of filling process of metal powder injection molding. *New Technol New Process*, 2007(6): 87
(卓海宇, 高建祥, 曲选辉. 金属粉末注射成形充模过程数学模型研究. *新技术新工艺*, 2007(6): 87)
- [44] Samanta S K, Chattopadhyay H, Pustal B, et al. A numerical study of solidification in powder injection molding process. *Int J Heat Mass Transfer*, 2008, 51(3-4): 672
- [45] Wang Y H, Qu X H, He X B, et al. Numerical simulation of unique boundary layer effect during powder injection molding filling flow process. *Mater Mech Eng*, 2008, 32(2): 77
(王玉会, 曲选辉, 何新波, 等. 粉末注射成形充模过程特有边界层效应的数值模拟. *机械工程材料*, 2008, 32(2): 77)
- [46] Wang Y H, Qu X H, He X B, et al. Two-fluid model during powder injection molding process. *Mater Mech Eng*, 2008, 32(5): 74
(王玉会, 曲选辉, 何新波, 等. 粉末注射成型过程的双流体数学模型. *机械工程材料*, 2008, 32(5): 74)
- [47] Wang Y H, Qu X H, Zhang Y, et al. Boundary layer effect of powder injection molding filling flow process and mechanics analysis. *Powder Metall Technol*, 2008, 26(4): 254
(王玉会, 曲选辉, 张勇, 等. PIM充模过程的边界层效应及机理分析. *粉末冶金技术*, 2008, 26(4): 254)
- [48] Aizawa T, Iwai T, Kihara J. Granular modeling of steel powder flow and compaction in injection molding // *Proc Powder Injection Molding Symp92*. New Jersey, 1992: 419
- [49] Iwai T, Aizawa T, Kihara J. Numerical modeling for powder-binder compound flow in metal injection molding. *Adv Powder Metall Part Mater*, 1995, 49(3): 103
- [50] Zheng Z S, Qu X H, Xu Q W, et al. Three-dimensional numerical simulation of two phase flow for powder injection molding and separation of powder and binder. *Chin J Nonferrous Met*, 2014, 24(1): 122
(郑洲顺, 曲选辉, 徐勤武, 等. 粉末注射成形两相流动三维数值模拟及粉末与粘结剂的分离. *中国有色金属学报*, 2014, 24(1): 122)
- [51] Liu Y, Li Y M, Xiao Y F, et al. Research on particle contact model in powder injection molding. *J Changsha Univ*, 2010, 24(5): 30
(刘煜, 李益民, 肖燕芳, 等. 粉末注射成型中颗粒接触模型的研究. *长沙大学学报*, 2010, 24(5): 30)
- [52] Li D P. *Investigation on the Mold Filling Process in Powder Injection Molding Based on Granular Model* [Dissertation]. Changsha: Central South University, 2013
(李大鹏. 基于颗粒模型的粉末注射成形充模流动过程研究[学位论文]. 长沙: 中南大学, 2013)
- [53] Zheng Z S, Qu X H, Han X L, et al. Computation and simulation of solidification on wall of cavity in powder injection molding filling process. *Chin J Nonferrous Met*, 2008, 18(3): 511
(郑洲顺, 曲选辉, 韩旭里, 等. 粉末注射成形充模流动过程模壁凝固层增长的计算与模拟. *中国有色金属学报*, 2008, 18(3): 511)
- [54] Wu Y B, Zheng Z X. The optimal design of mold structure in powder injection molding based on the numerical simulation. *Mach Des Manuf*, 2009(12): 236
(吴苑标, 郑振兴. 基于数值模拟的粉末注射成形模具结构优化设计. *机械设计与制造*, 2009(12): 236)
- [55] Liu F, Li W M. Numerical simulation research on the effect of gate patterns on powder volume fraction variation of MIM milling cutter. *Mater Sci Eng Powder Metall*, 2018, 23(3): 292
(刘飞, 李文明. 数值模拟研究浇口方式对粉末注射成形铣刀粉体分布的影响. *粉末冶金材料科学与工程*, 2018, 23(3): 292)
- [56] Zheng Z X, Xia W, Zhou Z Y. Optimization of process parameters of powder injection molding based on numerical simulation. *J South China Univ Technol Nat Sci*, 2009, 37(2): 49
(郑振兴, 夏伟, 周照耀. 基于数值模拟的粉末注射成形工艺参数优化. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2009, 37(2): 49)