

Research on MIM processing technology

Ye Duan

Harbin Yuanchi Aviation Equipment Co., Ltd., Harbin, Heilongjiang, 150060, China

Abstract

With the increasing demand of precision and complex metal components in the manufacturing industry, this paper deeply studies the processing technology of metal injection molding (MIM), and discusses the process, common technical problems and quality control measures. By analyzing each link of MIM process, the process parameters such as feeding, injection molding, defatting, sintering and post-treatment are optimized, and the technical problems of underinjection, air acupoint, incomplete defat, deformation and shrinkage are solved. The results show that through process optimization and quality control, MIM technology can significantly improve the production efficiency and quality of complex shape parts, and provide theoretical and practical support for future applications in high-end manufacturing field.

Keywords

metal injection molding; technology process; quality control measures

金属注射成型 MIM 加工技术相关研究

段冶

哈尔滨远驰航空装备有限公司, 中国·黑龙江 哈尔滨 150060

摘要

随着制造业对精密、复杂金属部件需求的不断增加, 本文深入研究金属注射成型 (Metal Injection Molding, 简称MIM) 加工技术, 探讨其工艺流程、常见技术问题及质控措施。通过分析MIM工艺各环节, 优化喂料、注射成型、脱脂、烧结及后处理等工艺参数, 解决欠注、气穴、脱脂不完全、变形及收缩不均等技术难题。研究结果表明, 通过工艺优化与质量控制, MIM技术可显著提高复杂形状零件的生产效率与质量, 为未来在高端制造领域的应用提供理论与实践支持。

关键词

金属注射成型; 技术工艺; 质控措施

1 引言

面对当今制造业对精密复杂金属构件日益增长的需求, 传统的加工技术显得力不从心, 暴露出效率低下、资源利用率低和难以形成复杂构件等弊端。在这样的背景下, MIM加工技术崭露头角。MIM属于一种新型的粉末冶金, 融合了粉末冶金与塑料注塑的优点, 适合形状复杂、精度高、性能卓越的中小型金属构件。下文就结合相关文献与实践经验, 对MIM加工技术相关问题展开研究。

2 金属注射成型 MIM 加工工艺

MIM技术的核心在于将金属粉末与热塑性或热固性粘结剂混合, 形成可注射的原料。通过注射成型设备将混合料注入模具中, 随后经过脱脂和烧结工艺, 最终获得高精度的金属零件^[1]。MIM流程为: 喂料—注射成型—脱脂—烧结—后道加工—成品。

【作者简介】段冶 (1989–), 男, 中国黑龙江哈尔滨人, 本科, 工程师, 从事机械设计制造及其自动化研究。

2.1 喂料

金属粉末与粘结剂按比例混合、混炼、造粒, 制成具备塑质特性材料的过程称为喂料。MIM的材料与同牌号机加工用材相比, 在材料成分、物理性能、机械性能、耐腐蚀性能、金相组织等方面相当。适用于MIM的金属材料有低合金钢 (Fe-2Ni, Fe-8Ni, Fe-50Ni)、不锈钢 (304、316L、17-4PH、420、440C)、工具钢 (42CrMo4)、硬质合金 (WC-Co 6%)、高比重合金 (W-Ni-Fe, W-Ni-Cu, W-Cu) 等; 与之混合的粘结剂通常选用石蜡、聚合物 (HIGH MW PS)、石蜡+聚合物 (石蜡或 PP、PE、PS HIGH MW)、水性聚合物 (10%~20% PMMA)、催化脱脂聚合物 (POM) 等。

喂料过程在混合设备中进行, 加热到一定温度时粘结剂融化, 与金属粉末颗粒混炼, 直至粉末颗粒均匀地涂上粘结剂, 冷却后形成颗粒状原料。粘结剂提供良好的流动性, 与金属粉末按比例混合可保证优良的结构性, 配合速度均匀的喂料过程, 对最终零件的尺寸精度及变形控制起关键作用。金属粉末的粒度影响密度, 密度又影响零件强度。

通常,粒度在150~500 μm 为粗粉,44~500 μm 为中等粉,10~44 μm 为细粉,0.5~10 μm 为极细粉,小于0.5 μm 的为超细粉。越是粒度细小、颗粒均匀、接近球状的粉末颗粒越适合制造喂料,这样的粉末制成的喂料在后续制品成型过程中流动性良好,最终产品的密度越高。

2.2 注射成型

注射成型类似于塑胶注塑,根据零件克重匹配合适吨位的注塑机,提高注塑机的吨位可提高零件的密度,密度影响零件的强度。粘结剂提供良好的流动性,能带着金属粉末被充分地注射到模腔内。在注射前对仪器设备的精度进行检查调试,以保证注射成型质量。好的注射成型操作,零件收缩率几乎接近于0^[2]。成型后的零件称为生坯,要去料头及水口、修整合模线等,生坯质地很脆。料头可当回料,以低于20%的比例添加,但不可超过2次,否则物理特性会改变,影响零件机械性能。生坯形状和成品零件相同,但整体大15%~20%^[3]。在注射成型过程中,形状不同导致局部收缩率不同,可借助模具做补偿调整。

2.3 脱脂

脱脂是烧结前的预处理环节。将需脱脂的生坯摆放在导热性良好的陶瓷板上,再将陶瓷板摆放在不锈钢托盘上。脱脂温度在100~110 $^{\circ}\text{C}$ 之间,此温度区间脱脂速率较快且低于聚合物熔融温度150~170 $^{\circ}\text{C}$,聚合物直接由固体转化为气体,气体分子可以很容易地通过生坯已形成的多孔性外层溢出,而不会破坏粉末颗粒堆积结构。通过定量泵将催化剂(草酸或硝酸)定量地输入炉体中,随即在陶瓷盘上汽化,充入氮气作为载体气体,可保护待脱脂的生坯不被腐蚀。炉内装有风扇使气体充分混合并循环流动,生坯粘结剂内含有约10%的耐酸成分,可以确保脱脂后的生坯不会在出脱脂炉及运输的过程中变形或散掉,耐酸成分最终会在烧结炉中去除。须确保脱脂时间充分,脱脂时间太长并不会损坏零件,但脱脂时间太短,会产生废品。

脱脂过程中产生的气体不能直接排放,需经过两级燃烧处理。第一级在缺氧的丙烷气火焰中燃烧,发生还原反应;第二级在空气中完全燃烧,燃烧后排放的气体符合环保法规。脱脂后的零件称为棕坯,棕坯容易与空气中的水分接触发生锈蚀,需将棕坯在炉内放置,直至需要出炉时再取出,也可制作专门的氮气保护箱,用于存放棕坯。

2.4 烧结

烧结分三步:1、低温去粘结剂:将棕坯规范、快速地放入烧结炉,尽可能缩短与空气的接触时间,负压输入氮气并加热烧结炉至600 $^{\circ}\text{C}$ 后保温以使粘结剂(聚合物)完全热分解。2、高温烧结:真空内烧不进气并加热至设定温度,材料不同,所需最高温度也不同。以不锈钢为例,一般在1300 $^{\circ}\text{C}$ 左右。烧结涉及原子尺度的融合连接,金属颗粒接触融合,颗粒间的孔隙减小直至消失,进而坯体收缩形成致密的固体。生产工艺控制得当,烧结密度可达材料理论密

度的97%~98%、尺寸公差为 $\pm 0.3\%$ ~0.5%,以机加工材料SUS304为例,密度7.9g/cm³,MIM成型的SUS304的密度可达7.6~7.7g/cm³。因致密性接近,热处理后的机械性能也接近。烧结时间22~24H,好的烧结炉主要在于控制温度和时间准确性。烧结过程不可逆,中途断电、整炉零件报废处理。分压烧结充入氩气,防止零件被氧化。3、冷却:冷却有自然冷却,也可从几百度开始风机冷却,一般选择气体风机自然对流冷却。

2.5 后道加工

后道加工工艺主要包括3类,1、机加工(攻螺纹、CNC、整形、焊接等);2、热处理(淬火、回火、渗碳、渗氮等);3、表面处理(抛丸/喷丸、喷砂、磁力抛光、涡流抛光、电镀、PVD等)。

在以上后道加工工艺中,整形工艺可处理烧结过程中因零件摆放不当造成的悬臂等特征的明显变形,需借助整形工装进行校正,MIM件的塑性好、整形良率高,甚至可通过整形提高零件的尺寸精度。淬火可提高产品的刚性、韧性、硬度、耐磨性及疲劳强度。回火可去除淬火后的残余应力,调整强度、硬度、塑性、韧性,稳定组织和尺寸等综合性能。渗碳用于低碳钢,提高表面硬度和耐磨性。渗氮可提高表面硬度、耐磨性、疲劳性及耐腐蚀性。抛丸/喷丸可去氧化层及毛刺,提高表面硬度、疲劳寿命,使表面晶格扭曲并强化。喷砂是一种预处理工艺,主要清理零件表面,如除锈、除油、除氧化皮、除毛边等。磁力抛光是使用导磁的抛光针除毛刺、除氧化皮,从而获得一定的粗糙度,用于不导磁零件效率较高。涡流抛光分水抛与干抛,主要用于除毛刺、除氧化皮,从而获得一定的粗糙度,应用广泛。电镀主要用于铁基的镀锌、镀铬、镀镍及锌镍合金等。PVD主要用于不锈钢的表面电镀,镀层致密,与机加工不锈钢PVD无异。

2.6 成品

零件公差可按GB/T1804-m,6mm以下的尺寸可做到 ± 0.05 。同一批零件因在炉内摆放的位置不同,烧结的温度不同而导致尺寸略有差异,烧结时外表面温度更高,成品零件表面会形成致密层。零件设计时尽量做到壁厚均匀,相邻两个特征的壁厚最好不要超过3倍,通常最小壁厚可做到0.5mm。零件克重在30g以下性价比最高,从工艺上讲,根据机器吨位,零件克重最大可以做到960g,但普遍在100g以下。

3 金属注射成型 MIM 加工常见技术问题与质控措施分析

3.1 欠注问题与解决措施

因注射压力不够、材料流动性不足或者模具温度偏低,会造成材料无法充分填满模具型腔,导致制品的不完整。

针对这个问题,可以从以下几个策略着手解决:首先增强材料的流动性。可通过调整原料配比来实现,例如选用

更细腻且分布均匀的粉末粒子,或在原料中添加适量的流动性增强剂以减少材料的熔体粘度。同时,适度增强注射压力,可通过调节注塑机的液压系统设定来完成,以确保熔体在型腔中拥有足够的流动推力。此外,将模具温度调整至适宜的水平,有助于减缓熔体在填充过程中的冷却速度,进而提升流动性。在设计制品时,适当增加壁厚能够减少熔体流动的阻力,使材料更易填满型腔。此外,延长注射时间也能确保熔体有足够的时间完成型腔填充,防止因成型周期过短而导致的浇口固化前树脂逆流现象,从而难以填满型腔^[4]。

3.2 气穴问题与解决措施

由于模腔中的空气未能得到有效排出,常常会引起产品表面出现注塑不足或结构强度降低的问题。为了应对这一问题,在模具设计的初始阶段,可以增设排气通道以优化模腔内的空气排放。这些排气通道的布局需要根据模腔的具体形状及其深度进行精心调整,特别是对于深型腔结构,排气通道应布置在模腔最后填充的区域。同时,调整浇口的部位也是一项可行的策略,恰当的浇口位置有助于材料的平滑流动,进而减少模腔内气体的堆积。在调整生产参数方面,适当地降低注塑速率有助于防止气体被推挤到模腔的盲区,进而减少气泡的产生。

3.3 脱脂不完全

在MIM的应用过程中,经常会遇到难以将复杂部件内的脱脂剂彻底清除的问题,这一问题在烧结阶段可能会引发诸如部件变形、裂缝或者尺寸偏差等缺陷。为解决这一难题,设计模具时必须充分考虑到部件的立体结构和几何特征,尤其是那些内部结构复杂或壁厚较薄的部件。通过对模具浇口位置和流道排布的精心设计,能够提升材料流动的均匀性,进而使得脱脂剂在注射阶段得以均匀分布。同时,模具的排气设计同样不容忽视。增多排气孔并优化其布局,有助于减少模腔中的气体积存,从而防止因气体残留而影响脱脂剂的彻底清除。

此外,实施分级去脂策略能够极大提升去脂效率。例如,利用溶剂提取去除大部分去脂剂,随后借助高温去脂手段清除剩余部分。这样的做法能够规避因去脂剂分布不均所引起的局部去脂不彻底的问题。此外,在去脂过程中对温度和时间参数的精准控制同样关键。比如,选择较低的去脂温度和减缓升温速度,有助于降低部件内部的热应力,避免因温度差过大而造成的去脂剂残留问题。

3.4 变形与收缩不均

在MIM技术中,粉末和粘结剂混合不均匀,注射或脱脂阶段引起的密度波动,烧结炉中温度不均匀或冷却速度不一致,金属粉末的形状和大小一致性差,气体控制不精确使粘结剂在第二脱脂环节再次沉积,残留的烧结炉污染物等,极有可能造成部件出现曲折或歪斜,这种情况直接关系到部

件的尺寸精度及外观。针对这个问题,需综合考虑烧结技术、模具构造以及辅助固定等多个环节。例如,在烧结加热过程中,调整加热曲线,防止快速加热导致部件内部产生过多的应力,尤其是在接近烧结温度点时,应适度降低加热速度。对于那些结构复杂的部件,采用烧结固定装置加以固定。这种固定装置可以为部件提供额外的稳固性,避免在高温烧结时由于重力或内部应力作用而产生形变^[5]。

4 MIM 技术的发展与应用分析

近年来,在材料研究领域,成功研制出了一种具备离子与电子双重导电特性的粘结剂,该粘结剂不仅增强了材料的导电特性,还借助于交联化学反应,赋予了材料自我调控的功能,使其能够随着充放电过程中材料体积的变动而调整,极大提高了材料的性能指标和使用期限。在工艺革新领域,计算机仿真技术对MIM工艺的完善起到了关键的推动作用,借助计算机仿真技术以及仿真数据,对生产参数进行精确调整,大幅增强了成品的密度与硬度,提高了产品质量。

随着技术的不断进步,MIM技术在众多领域有了重要应用,并展现出巨大的发展潜力。如在汽车领域,利用MIM技术可以打造出汽车发动机的组件、变速箱零件、车身结构部件以及多种精密的连接器。在医疗器械行业,MIM技术被用于制造手术工具的柄部、手术剪、镊子、牙科和耳科植入物以及骨科的人工关节等。

5 结语

综上所述,MIM技术凭借其高效生产复杂形状和高精度零件的能力,在汽车、医疗、电子等领域展现出巨大的应用潜力。然而,烧结过程中可能出现的尺寸不均匀、变形等问题仍需通过工艺优化和质量控制加以解决。通过优化喂料、注射成型、脱脂、烧结及后处理等工艺环节,并借助计算机模拟技术优化工艺参数,MIM技术能够显著提高产品质量和生产效率。未来,随着材料研发和工艺技术的不断进步,MIM技术将在更多高端制造领域发挥重要作用,为现代制造业的高质量发展提供有力支持。

参考文献

- [1] 袁子良,罗国军,刘余林.带金属嵌件注塑制品开裂原因分析与结构改进[J].汽车零部件,2024,(09):29-32.
- [2] 刘赣华,唐乃夫,汪啟.等距螺旋锥齿轮的精确建模与金属粉末注射成型工艺试制[J].粉末冶金技术,2024,42(02):207-214.
- [3] 周凡,胡可,彭小敏.等.基于造孔法的多孔钛金属注射成形[J].粉末冶金技术,2023,41(06):593-599.
- [4] 王浩然,宋涛,张永翠.等.金属粉末注射成型工艺及研究进展[J].山东冶金,2023,45(05):43-47.
- [5] 张雨萌,胡可,彭小敏.等.钛粉末注射成形PEG/PMMA黏结剂体系的PHB改性研究[J].材料工程,2024,52(05):148-155.