

# 精密模具与精密部件在金属粉末注射成形中的作用分析

尹小平

杭州铭赫科技有限公司 浙江杭州 311100

**摘要：**在金属粉末注射成形这一前沿制造领域，精密模具与精密部件扮演着极为关键的角色。本大纲深入剖析二者在提升产品精度、优化性能及提高生产效率方面的核心作用，探究精密模具设计要点、精密部件制造工艺及其协同工作机制。同时，直面当前应用面临的挑战并提出应对策略，为推动该技术革新、助力产业升级提供极具价值的参考。

**关键词：**金属粉末注射成形；精密模具；精密部件；作用分析

## 引言

金属粉末注射成形凭借其独特优势，如能制造复杂形状零件、材料利用率高，在现代制造业，尤其是航空航天、电子等高端领域应用日益广泛。精密模具与精密部件宛如该技术的“灵魂”，直接左右产品质量与生产效益。然而，现有研究对其作用挖掘不够深入，传统工艺在精度把控、生产效率提升上遭遇瓶颈。深度探究二者作用，推动工艺创新，是突破当前困境、满足高端制造对高精度、高效率需求的必由之路，对行业发展意义非凡。

## 一、精密模具与精密部件在金属粉末注射成形中的重要作用

### （一）保障产品精度

精密模具的型腔设计精度可达微米级，能精准复刻产品复杂形状，其配合间隙极小，有效避免粉末溢料，从而严格控制产品尺寸公差。例如，在制造手机内部的微小金属部件时，精密模具可确保产品尺寸误差控制在 $\pm 0.01\text{mm}$ 以内。精密部件自身的高精度加工，如采用先进的电火花加工、超精密磨削工艺，使得关键部位尺寸精度极高。在注射过程中，精密部件与模具紧密配合，进一步保障了产品形状的精准度，大幅减少因尺寸偏差、形状不规整导致的产品不合格率。此外，精密模具的材料选择也至关重要，通常采用高硬度、高耐磨性的合金钢或硬质合金，以确保模具在长期使用中保持高精度和稳定性。

### （二）提升产品性能

精密模具的合理流道设计，能使金属粉末均匀填充

型腔，避免出现局部疏松或气孔，优化产品内部结构。通过模拟分析软件，可精准设计流道走向与尺寸，确保粉末流动顺畅。在烧结阶段，精密部件能辅助控制收缩均匀性，保证产品密度一致性。如在制造航空发动机叶片时，精密模具与部件配合，使产品内部结构致密，密度偏差控制在极小范围，显著提升叶片的强度、疲劳寿命等性能，满足严苛的使用要求。

### （三）提高生产效率

高效模具设计采用热流道系统，减少废料产生，缩短成型周期。热流道可使塑料熔体在流道内始终保持熔融状态，无需每次成型后清理流道凝料，成型周期可缩短30%~50%。精密部件的快速响应与精准动作，如高速开合模机构、精准的顶出装置，配合自动化生产设备，实现快速、连续生产。在大规模生产汽车零部件时，这种协同作用可使产量大幅提升，从传统工艺的每日数百件提升至数千件，极大提高生产效率，降低生产成本。

## 二、精密模具设计要点及其对金属粉末注射成形的影响

### （一）模具结构设计

适合粉末注射的模具多采用三板式结构，在实际生产中，这种结构优势尽显。比如制造小型电子零件的模具，三板式结构可轻松实现点浇口进料，凭借精准的浇口位置与尺寸把控，确保金属粉末均匀填充型腔，避免因填充不均导致产品内部出现空洞、疏松等缺陷。分型面选择至关重要，对于形状复杂的产品，依据其轮廓与脱模方向确定分型面，能降低模具制造难度，保障产品顺利脱模。加强筋设计可增强模具整体强度，防止在高压注射下变形；冷却水道布局更是关键，合理分布冷却水道，如采用螺旋式或循环式设计，能使模具各部位温度均匀，显著缩短冷却时间，助力企业实现高效生产。

**作者简介：**尹小平（1981/11/28），男，汉族，湖南株洲人，本科，职务：总监，研究方向：精密模具。

## （二）模具材料选择

常用模具材料如热作模具钢H13，广泛应用于一般粉末注射模具。在汽车零部件制造中，H13钢能凭借良好的热疲劳性能，经受住频繁的高温、高压循环冲击，保证模具稳定运行。对于高精度、高产量需求，铍铜合金成为优选。像在手机精密部件生产中，铍铜合金模具因其出色的导热性，可快速将模具热量散发，使成型周期大幅缩短，提高生产效率。同时，其高耐磨性确保长期使用后模具仍能保持高精度，稳定生产出尺寸精准的产品。不同材料热膨胀系数差异，直接关系到模具受热时的尺寸变化，低膨胀系数材料可有效维持产品尺寸精度，而高硬度材料则是延长模具使用寿命的保障。

## （三）模具表面处理

表面处理工艺中的氮化处理，能在模具表面生成一层细密且硬度高的氮化层。在金属粉末注射过程中，这层氮化层极大提升模具抗粘模性能，使产品脱模更为顺畅，减少脱模时的刮擦，从而提高产品表面质量。镀硬铬处理则是在模具表面形成一层坚硬、光亮的镀铬层，降低粉末在模具内流动时的阻力，有效减少产品表面划伤。以医疗器械零部件模具为例，经镀硬铬处理后，生产出的产品表面光滑，符合严苛的卫生标准。这些表面处理工艺，从延长模具寿命、提升产品质量等多方面着手，降低企业综合生产成本，增强产品在市场中的竞争力，助力企业在激烈竞争中脱颖而出。

## 三、精密部件制造工艺及其与金属粉末注射成形的适配性

### （一）粉末特性控制

控制金属粉末粒度可采用气流分级技术，该技术基于空气动力学原理，利用不同粒度粉末在气流中沉降速度差异实现精准分级。在实际生产中，制造小型电子元件时，因对产品表面质量与精度要求极高，需采用细粒度粉末。例如，智能手机的微型金属连接器，细粒度粉末能填充模具细微结构，使产品表面光滑，尺寸精度可达微米级。控制粉末形状采用雾化制粉工艺，通过高压气体或液体将金属液流吹散成微小液滴，凝固后获得球形度高的粉末。球形粉末在注射过程中，其良好流动性可使填充更均匀，大幅减少产品内部因填充不均产生的孔洞、裂纹等缺陷，显著提升产品质量与性能。

### （二）注射成型工艺优化

优化注射压力需根据产品形状、尺寸、粉末特性确定。复杂形状产品，如航空发动机叶轮，不同部位对压力要求不同，通过数值模拟软件，可精确预测压力在模

具型腔中的分布，据此调整压力曲线，确保粉末均匀填充，避免出现欠注、飞边等缺陷。温度控制方面，料筒温度决定粉末塑化程度，模具温度影响产品成型质量。合适的温度能保证粉末良好的流动性与粘结性，如对于钛合金粉末，特定温度区间可使其在注射时顺利填充且成型后结构稳固。注射速度要与压力、温度协同调整，薄壁产品，如汽车轻量化铝合金部件，采用高速注射可防止粉末提前凝固，保证产品成型质量，实现高效生产。此外，还需结合材料特性与工艺参数进行动态优化。

### （三）后续处理工艺

烧结是关键后续工艺，采用真空烧结，在低氧环境下，可有效减少产品氧化，提高产品致密度。例如，制造机械刀具的硬质合金部件，真空烧结能使内部组织更加致密，提升刀具硬度与耐磨性。控制烧结温度与时间，可精准调整产品微观结构，如通过调整烧结参数，改变金属晶粒大小与分布，提升产品综合性能。整形工艺如冷挤压整形，借助外部压力使产品发生塑性变形，进一步提高产品尺寸精度，消除烧结过程中的微小变形。对于精密光学仪器部件，冷挤压整形能满足其高精度要求，使精密部件质量达到更高标准。

## 四、精密模具与精密部件协同工作机制及对金属粉末注射成形的促进

### （一）模具与部件的匹配设计

通过三维建模与仿真分析，利用专业软件构建模具与部件的虚拟模型，精确设计二者的配合尺寸、形状。在设计精密顶出部件时，深入研究模具型腔结构与产品脱模方向，运用力学分析计算顶出位置与顶出力大小。借助有限元分析软件，模拟不同顶出方案的受力情况，优化设计。如在制造塑料外壳模具时，合理设置顶出点，确保产品顶出过程平稳，不产生变形、划伤等损伤。在制造复杂产品模具，如多滑块模具时，对滑块、斜顶等部件与模具主体的配合精度要求极高，通过优化设计，使各部件在开合模过程中精准运动，实现高效、精准的协同工作，保障产品顺利成型。

### （二）工作过程中的协同作用

在注射阶段，精密部件如高精度注射螺杆，能精准控制粉末注射量与速度，配合模具型腔填充。以制造医疗器械零部件为例，注射螺杆精确推送金属粉末，确保填充量误差控制在极小范围。保压阶段，压力控制部件维持压力稳定，使产品压实，减少收缩缺陷，保障产品尺寸精度。冷却阶段，模具冷却系统与部件协同工作，冷却管道合理布局，配合高效冷却介质，快速均匀冷却

产品。如在制造汽车发动机缸体模具时，冷却系统与内部冷却部件配合，使缸体各部位冷却均匀，保证尺寸精度，满足产品质量严格标准。

### （三）故障诊断与协同维护

建立传感器监测系统，在模具与部件关键部位安装温度、压力、振动等传感器，实时采集工作参数。这些传感器具备高精度与高灵敏度，能快速捕捉细微变化。通过先进的数据分析算法，对采集数据进行深度挖掘，精准识别潜在故障模式。例如，利用机器学习算法，提前诊断故障隐患，如通过温度异常升高判断模具局部磨损，依据振动变化察觉部件松动。一旦出现故障，维修团队依据监测数据，迅速定位问题根源。如模具型芯磨损，维修人员根据数据反馈，快速更换磨损型芯，协同修复模具损伤部位，采用先进维修工艺，如激光熔覆修复技术，缩短维修时间，减少停机损失，保障生产连续性，显著提高企业生产效益。

## 五、当前精密模具与精密部件应用面临的挑战及应对策略

### （一）技术难题

高精度模具制造在迈向纳米级精度时，现有加工设备的精度与分辨率受限，传统机械加工刀具难以实现如此细微的切削操作，电火花加工也面临电极损耗与加工表面质量难以保障的问题。在部件性能提升上，高温、高压极端工况下，常见金属材料易发生蠕变、疲劳等失效现象，导致部件尺寸变化、强度降低。例如航空发动机热端部件，长期处于高温燃气环境，材料性能衰退严重。应对策略中，电子束加工利用高能电子束轰击材料，实现纳米级精度加工，但其设备昂贵、加工效率较低，需进一步优化。离子束加工可对材料表面进行原子级去除与改性，提升部件表面性能，未来需攻克设备稳定性与加工成本难题。陶瓷基复合材料凭借高硬度、耐高温、低密度等特性，有望成为极端工况下部件的理想材料，不过其制备工艺复杂，需深入研究优化。

### （二）成本控制

模具与部件制造成本居高不下，高精度加工设备如超精密磨床，价格动辄数百万甚至上千万元，且维护成本高昂。特殊模具材料与高性能部件材料，如用于高端模具的进口钢材、航空航天用特殊合金，价格远超普通材料。生产周期长，从模具设计到最终产品交付，涉及多道复杂工序，每一步都可能因技术难题、质量检测等原因延误。通过优化设计，运用拓扑优化技术，去除模具与部件中不必要的结构，简化形状，降低加工难度。

增材制造即3D打印，能直接根据设计模型逐层堆积材料，减少材料浪费与加工工序，大幅缩短生产周期，但目前打印材料种类有限、成本较高。寻找替代材料时，可探索新型复合材料或对现有材料进行改性，在保证性能前提下降低成本，如用高性能工程塑料替代部分金属部件，实现成本有效控制。

### （三）市场竞争应对

在激烈的市场竞争中，高端市场对产品精度与性能要求近乎苛刻，如半导体芯片制造用模具，精度需达到亚微米级，产品性能要满足长期稳定运行。企业必须持续投入研发，引进先进技术与人才，不断创新工艺，提升产品质量，才能进入并站稳高端市场。中低端市场价格敏感度高，企业需优化生产流程，引入自动化生产线，提高生产效率，降低人工成本。同时，加强品牌建设，通过参加行业展会、发布高质量产品案例、利用社交媒体宣传等方式，提升品牌知名度。完善售后服务体系，及时响应客户需求，提供维修、技术咨询等服务，树立良好企业形象，增强客户忠诚度，扩大市场份额，在竞争中脱颖而出。

## 结论

精密模具与精密部件在金属粉末注射成形中发挥着不可替代的关键作用，从保障产品精度、提升性能到提高生产效率，全方位推动该技术发展。通过优化设计、制造工艺，建立协同工作机制，虽能应对部分挑战，但仍需持续攻克技术难题、控制成本、提升竞争力。未来，应加大研发投入，深化技术创新，促进精密模具与精密部件在金属粉末注射成形领域的深度融合，助力行业迈向高质量发展新阶段。

## 参考文献

- [1] 侯成龙. 316L 不锈钢金属粉末注射成形工艺及力学性能研究 [D]. 河南科技大学, 2022.
- [2] 侯成龙, 郭俊卿, 陈拂晓, 等. 金属粉末注射成形技术及其数值模拟 [J]. 粉末冶金技术, 2022, 40 (01): 72-79.
- [3] 廖燕霞. 注射成形制备铁基小模数齿轮的微结构与性能研究 [D]. 中南大学, 2023.
- [4] 尉念伦. 铬合金粉末及注射成形工艺的研究 [D]. 河北科技大学, 2021.
- [5] 楚夏威. 铁镍合金照门座件粉末注射成形数值模拟与试验研究. 2021.