

机械制造中压铸模的压力控制技术研究

吕 鹏

华电曹妃甸重工装备有限公司 河北 唐山 063200

摘要: 在机械制造领域, 压铸模压力控制技术直接影响铸件质量与生产效率。研究表明, 精确调控充型压力、保压压力及增压压力, 可有效减少缩孔、气孔等缺陷。传统PID控制受限于非线性系统适配性, 而智能控制(如模糊-预测融合算法)通过多传感器融合实现压力-温度-位移数据同步采集, 能动态优化参数。结合边缘计算与轻量化算法, 可降低实时控制延迟, 提升压力波动稳定性。该技术对汽车、航空航天等高精度压铸件生产具有关键推动作用。

关键词: 机械制造; 压铸模; 压力控制技术

引言: 在机械制造的高精度与高效化发展趋势下, 压铸成型技术凭借其高效、精密的特点, 广泛应用于汽车零部件、航空航天结构件及电子设备外壳等关键领域。压铸过程中, 模具型腔内的压力控制直接决定了金属液的充型完整性、凝固均匀性及铸件最终质量。然而, 传统压力控制方法易受液压系统泄漏、模具磨损及合金相变等因素干扰, 导致压力波动、缩孔裂纹等缺陷。因此, 深入研究先进压力控制技术, 结合智能算法与多传感器融合, 成为突破压铸品质瓶颈、推动产业升级的核心方向。

1 机械制造中压铸模压力控制基础理论

1.1 压铸工艺压力参数解析

(1) 充型压力主要作用是推动金属液在规定时间内填满模具型腔, 确保型腔各角落被充分填充, 避免出现缺料缺陷; 保压压力能防止金属液在凝固过程中因体积收缩而产生缩孔、缩松, 维持型腔压力稳定; 增压压力则在金属液即将凝固时瞬间施加, 进一步压实金属液, 提升铸件致密度。(2) 压力与速度呈耦合关系, 当压力增大初期, 金属液流动速度加快, 利于充型; 但压力过大且速度过快时, 易产生涡流、卷气, 影响铸件质量; 反之, 压力不足或速度过慢, 会导致充型不完整。

1.2 压力控制系统的组成

(1) 执行机构中, 液压泵为系统提供动力源, 输出压力油; 伺服阀可精准控制油液流量和方向, 实现压力的快速调节; 比例阀能按输入信号比例控制压力, 满足不同工艺阶段的压力需求。(2) 压力传感器实时监测系统压力, 将压力信号转化为电信号; 位移传感器检测模具运动位移, 辅助判断金属液充型状态; 数据采集模块对传感器信号进行收集、转换与传输, 为控制提供数据支持。(3) 控制器中, PLC具备逻辑控制和时序控制功能, 可实现基础压力控制流程; 工业计算机搭载先进控制算法,

如PID算法, 能对压力进行精确调控, 优化控制效果。

1.3 压力波动的主要诱因

(1) 液压系统密封件磨损会导致油液泄漏, 使系统压力下降; 油温升高会降低油液黏度, 增加泄漏量, 同时影响液压元件性能, 导致压力不稳定。(2) 模具型腔表面粗糙度变化、分型面贴合度差异等, 会使型腔阻力呈非线性变化, 进而导致金属液流动压力波动。(3) 合金液在凝固过程中发生相变, 体积收缩, 若保压压力补偿不及时, 会造成型腔压力下降, 引发压力波动。

2 机械制造中压铸模的压力控制关键技术

2.1 传统控制方法分析

(1) 开环控制结构简单、成本低, 无需传感器反馈, 适用于对压力精度要求较低的简单压铸场景, 但无法实时修正压力偏差, 当液压系统泄漏或模具阻力变化时, 易导致压力失控, 铸件合格率低。闭环PID控制通过传感器实时反馈压力信号, 对比设定值计算偏差并调节, 控制精度显著高于开环控制, 可有效减少缩孔、缺料等缺陷; 但PID控制依赖精确数学模型, 在压铸过程中模具型腔阻力非线性变化时, 易出现参数适配性差的问题, 且调试过程复杂, 需反复优化比例、积分、微分参数^[1]。(2) 某汽车零部件压铸厂采用传统闭环PID控制生产铝合金变速箱壳体时, 因金属液充型阶段模具温度快速上升(从180°C升至250°C), 导致型腔阻力骤增, PID控制器响应滞后约0.8秒, 压力未及时跟进, 出现20%的铸件充型不完整; 而在保压阶段, 当合金液相变收缩时, PID控制器因参数未适配体积变化, 压力超调量达15%, 造成部分铸件产生裂纹, 后续需通过人工筛选剔除不合格产品, 增加了生产成本与生产周期。

2.2 智能控制策略设计

(1) 模糊控制无需建立精确数学模型, 通过构建基于专家经验的压力调节规则库(如“当充型速度 < 5m/s且

压力偏差 $> 0.5\text{MPa}$ 时, 增大伺服阀开度15%”), 可快速应对压铸过程中的非线性干扰。在实际应用中, 模糊控制器能根据金属液温度、模具温度等实时参数, 动态匹配规则库中的调节方案, 例如当模具磨损导致型腔容积轻微增大时, 模糊控制可自动提升保压压力8%-12%, 维持铸件致密度, 且调试难度低于PID控制, 新手操作人员经简单培训即可上手。(2) 自适应控制通过实时采集模具磨损数据(如型腔尺寸变化、分型面间隙), 结合预设的压力补偿算法, 自动优化控制参数。某压铸企业采用自适应控制后, 当模具连续生产5000件后, 型腔表面磨损量达0.2mm, 系统可识别该磨损程度, 将充型压力从初始的80MPa自动调整至85MPa, 同时延长保压时间0.3秒, 确保后续生产的铸件尺寸精度仍符合要求, 避免了因模具磨损频繁停机调整参数的问题。(3) 预测控制基于压铸过程数学模型(如金属液流动方程、凝固收缩模型), 通过压力传感器、温度传感器采集的历史数据, 预判未来5-10秒内的压力变化趋势。例如在合金液即将进入凝固阶段时, 预测控制可提前0.5秒启动增压压力补偿, 将压力从保压阶段的60MPa平稳提升至90MPa, 避免因相变体积收缩导致的压力骤降, 经测试, 采用预测控制后, 铸件缩孔缺陷率从12%降至3%, 压力波动幅度控制在 $\pm 3\text{MPa}$ 以内^[2]。

2.3 多传感器融合技术

(1) 多传感器融合技术可实现压力-温度-位移数据的同步采集(采样频率达1000Hz), 通过数据融合算法(如卡尔曼滤波)提取关键特征参数(如“充型阶段压力峰值与对应位移的比值”“保压阶段温度变化率与压力变化率的相关性”)。例如在生产铝合金压铸件时, 系统同步采集充型压力(精度 $\pm 0.1\text{MPa}$)、模具型腔温度(精度 $\pm 1^\circ\text{C}$)、压射杆位移(精度 $\pm 0.01\text{mm}$), 并通过特征提取识别出“当压力峰值 $> 90\text{MPa}$ 且温度 $> 260^\circ\text{C}$ 时, 铸件裂纹风险升高”的规律, 为后续控制调节提供数据支撑^[3]。(2) 该技术具备异常数据识别与容错机制, 当某一传感器出现故障(如压力传感器突发数据跳变至150MPa, 远超正常范围), 系统可通过对比温度传感器、位移传感器的同步数据(此时温度稳定在 220°C , 位移正常推进), 判定压力传感器数据异常, 自动切换至备用压力传感器, 并触发报警信号通知维修人员; 同时, 系统会调用历史融合数据, 基于“温度-位移-压力”的关联模型, 估算出当前合理压力值(约82MPa), 确保压铸过程不中断, 容错率达98%以上, 有效提升了生产连续性。

3 机械制造中压铸模的压力控制实验与仿真分析

3.1 实验平台搭建

(1) 实验选用力劲DCC300卧式冷室压铸机, 最大锁模力3000kN, 压射力可达280kN, 适配生产铝合金ADC12材质的汽车电机端盖模具。模具型腔尺寸为 $\phi 180\text{mm} \times 60\text{mm}$, 采用H13热作模具钢制造, 型腔表面粗糙度 $R_a \leq 0.8\mu\text{m}$, 设置4个浇口与2个排气槽, 冷却水路直径8mm, 确保金属液快速均匀凝固。(2) 数据采集系统以NI LabVIEW 2023版为核心, 搭配NI cDAQ-9178数据采集卡, 接入3个精度 $\pm 0.1\text{MPa}$ 的压力传感器(分别安装于压射室、型腔入口、型腔末端)、2个精度 $\pm 1^\circ\text{C}$ 的K型热电偶(监测模具型腔与浇口温度)及1个精度 $\pm 0.01\text{mm}$ 的激光位移传感器(检测压射杆运动), 采样频率设为1000Hz, 可实时存储压力、温度、位移数据并生成动态曲线。

3.2 控制策略对比实验

(1) 在相同工艺参数(铝合金ADC12熔融温度 620°C 、模具预热温度 200°C 、压射速度 4m/s)下, 对比传统PID与智能控制(模糊-预测融合控制)的压力曲线: 传统PID控制充型阶段压力波动幅度达 $\pm 8\text{MPa}$, 保压阶段响应滞后0.6秒; 智能控制充型压力波动控制在 $\pm 2\text{MPa}$ 内, 保压阶段提前0.4秒启动压力补偿, 压力曲线更平稳。(2) 通过X射线检测两种控制策略生产的100件铸件气孔率: 传统PID控制的铸件平均气孔率为3.2%, 其中15件气孔率超5%(不合格); 智能控制的铸件平均气孔率降至0.8%, 仅2件气孔率略超1%(合格), 铸件缺陷率显著降低。

3.3 仿真模型构建

(1) 基于AMESim搭建压铸机液压系统动态仿真模型, 包含液压泵、伺服阀、压射缸等核心元件, 设置液压油黏度随温度变化的参数(40°C 时黏度 $40\text{mm}^2/\text{s}$, 80°C 时降至 $15\text{mm}^2/\text{s}$), 模拟不同负载下(模具型腔阻力10-30kN)的压力响应特性, 仿真结果显示, 模型压力误差与实验数据偏差 $\leq 5\%$, 可用于优化液压系统参数。(2) 利用COMSOL Multiphysics建立压力场-温度场耦合仿真模型, 导入模具三维几何模型, 设置铝合金ADC12的热物理参数(比热容 $900\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 、导热系数 $120\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$), 模拟充型阶段金属液流动压力(50-100MPa)与型腔温度($180\text{-}280^\circ\text{C}$)的相互作用, 仿真发现, 型腔拐角处温度梯度达 $50^\circ\text{C}/\text{mm}$, 易产生局部压力损失, 需优化浇口位置以改善压力分布, 该结论与实验中拐角处铸件缺陷较多的现象一致。

4 机械制造中压铸模的压力控制技术的挑战与对策

4.1 现存技术瓶颈

(1) 高压工况下(压铸模常用压力80-120MPa),

液压系统密封件易受挤压磨损与高温老化影响,寿命大幅缩短。传统丁腈橡胶密封件在100MPa压力、80°C油温下,平均使用寿命仅3000小时,需频繁停机更换,不仅增加备件成本(单次更换成本约2000元),还导致生产线日均停机1.5小时,严重影响生产效率^[4]。(2)实时控制算法面临计算效率难题。智能控制(如模糊-预测融合控制)需处理压力、温度、位移等多维度数据,传统工业计算机在复杂工况下(如多型腔同时充型),算法响应延迟达0.3-0.5秒,无法及时补偿压力波动;且随着数据量增长(日均采集数据超10GB),计算负荷激增,易出现算法卡顿,导致压力控制精度下降10%-15%。

4.2 创新解决方案

(1)将新型PEEK(聚醚醚酮)材料应用于液压元件密封件与阀芯。PEEK材料耐高温(长期使用温度260°C)、耐高压(抗压强度120MPa以上),且摩擦系数仅0.04(低于丁腈橡胶的0.3)。某压铸企业试用PEEK密封件后,密封件寿命延长至12000小时,更换周期从3个月延长至12个月,年减少停机时间约540小时,备件成本降低75%;同时,PEEK阀芯的耐磨性提升,液压阀控制精度提高8%。(2)采用边缘计算与轻量化控制算法结合的方案。在压铸机本地部署边缘计算节点(如NVIDIA Jetson Xavier NX),将数据预处理、异常识别等简单计算任务本地化,仅将关键控制参数传输至云端,数据传输量减少60%;同时,对智能控制算法进行轻量化优化(如简化模糊规则库、采用精简版预测模型),算法响应延迟降至0.1秒以内,且工业计算机CPU占用率从85%降至40%,确保控制过程稳定高效。

4.3 行业标准与规范建议

(1)制定压力控制精度分级标准,按压铸产品应用场景分为三级:精密级(如航空航天零件),压力控制误差 $\leq \pm 1\text{MPa}$;普通级(如汽车结构件),误差 \leq

$\pm 3\text{MPa}$;简易级(如家电配件),误差 $\leq \pm 5\text{MPa}$ 。标准同时明确传感器精度要求、校准方法及压力曲线波动范围,为企业选型与质量管控提供依据,避免因精度不达标导致的产品质量问题。(2)规范设备维护周期与压力校准流程:液压系统密封件需每6个月检查一次,12个月强制更换;压力传感器每3个月用标准压力仪校准一次,校准误差超 $\pm 0.2\text{MPa}$ 时需更换;控制器算法参数每季度根据生产数据优化一次。同时,要求企业建立维护档案,记录维护时间、校准数据及更换部件信息,行业监管部门定期抽查,确保标准落地执行,提升行业整体压力控制水平。

结束语

机械制造中压铸模的压力控制技术是提升铸件质量、保障生产稳定性的关键环节。通过智能控制策略(如模糊控制、预测控制)与多传感器融合技术的结合,可有效应对液压系统波动、模具动态变化及合金相变等复杂工况,显著降低缩孔、裂纹等缺陷率。未来,随着新型耐高温高压材料、边缘计算及轻量化算法的进一步应用,压力控制精度与响应速度将持续提升,推动压铸工艺向更高效率、更优品质方向发展,为高端装备制造提供坚实的技术支撑。

参考文献

- [1]张学铭,王建国,姜立武.铝合金舵机壳体压铸成型设计及应用[J].现代机械,2024,(05):60-61.
- [2]梁振进.基于数值模拟的壳体压铸模具优化设计[J].中国机械,2024,(04):46-47.
- [3]林志臣.锌压铸模具圆角处水冷的研究设计[J].厦门科技,2024,(06):56-59.
- [4]陶永亮.一体化大型压铸模具温度控制方法[J].铸造工程,2024,(14):157-158.