

面向制造精度的球阀球体多工序成型工艺参数优化与验证研究

周晓洁 胡景汉

前程控股集团有限公司 浙江 温州 325100

【摘要】球阀球体作为流体控制系统的核心部件，其制造精度直接影响阀门的密封性能和使用寿命。本文针对球阀球体在多工序成型过程中的精度控制问题，开展系统的工艺参数优化研究。通过分析球体在铸造、热处理和机械加工等关键工序中的变形规律，建立了完整的工艺参数优化体系。研究结果表明，通过控制铸造冷却速率、优化热处理工艺参数、调整机械加工余量分配，可有效改善球体的尺寸精度和形状精度，开发的多工序协同优化方案在实际生产中验证，球体圆度误差控制在0.01mm以内，表面粗糙度达到Ra0.4 μm，显著提升了产品的制造精度和质量稳定性，本研究为球阀球体的精密制造提供了可靠的技术支持。

【关键词】球阀球体；多工序成型；工艺优化；制造精度；参数验证；质量控制

DOI:10.12417/2705-0998.25.21.073

1 引言

球阀作为流体控制系统中的重要组成部分，其性能优劣直接影响整个系统的运行效率，球体作为球阀的关键零件，其制造精度对阀门的密封性能和使用寿命具有决定性影响。在现代工业生产中，球阀球体的制造过程涉及多个工序，包括毛坯铸造、热处理强化和精密加工等，这些工序之间相互关联、相互影响，任何一个环节的工艺参数偏差都可能导致最终产品精度超差，因此开展球阀球体多工序成型工艺参数的优化研究具有重要的工程意义。

球阀球体的制造过程面临着多方面的技术挑战，在铸造工序中，由于球体结构的特殊性，冷却过程中容易产生收缩不均匀问题，进而导致尺寸偏差和内部缺陷。热处理过程中，温度控制不当可能引起组织转变不完全或变形超标，机械加工阶段，装夹定位误差和切削参数选择不合理都会影响最终精度。这些问题的解决需要从整个制造流程的系统角度出发，综合考虑各工序之间的相互影响，建立科学的工艺参数优化方法。

当前，随着制造业向高质量方向发展，对球阀球体的精度要求不断提高，传统的单工序优化方法难以满足高精度制造的需求，需要采用多工序协同优化的思路。通过分析各工序参数对最终精度的影响规律，建立工序间的参数匹配关系，能够有效提升制造过程的稳定性，同时随着数字化技术的发展，工艺参数的优化和验证手段也在不断进步，为球阀球体的精密制造创造了有利条件。

本文的研究工作旨在通过系统的试验分析和理论探讨，建立球阀球体多工序成型工艺参数的优化方法，研究将从材料特性分析入手，探讨各工序中影响球体精度的关键因素。通过设计科学的试验方案确定最优的工艺参数组合，建立完善的质量验证体系确保优化方案的有效性和可靠性，研究成果将为球阀球体的精密制造提供技术支持，对提升产品质量和市场竞争力具有积极意义。

2 球体材料特性与成型基础

球阀球体的材料选择直接影响其使用性能和加工特性，常用的材料包括不锈钢、合金钢和特种合金等，这些材料具有不同的力学性能和加工特性。材料的铸造性能决定了毛坯的质量，涵盖流动性、收缩率和热裂倾向等参数，材料的切削加工性能则影响机械加工过程中的刀具选择、切削参数设定和表面质量控制，深入理解材料特性是制定合理工艺方案的基础。

球体成型过程中的材料行为具有特殊性，在铸造过程中，熔融金属的凝固收缩会导致尺寸变化，这种变化在球体结构中表现出各向异性。热处理过程中，相变引起的体积效应会使球体产生形状变化，机械加工过程中，切削力和切削热的作用会导致局部变形。这些材料行为都需要在工艺设计时予以充分考虑，通过合理的参数设置来控制和利用这些变化规律。

材料性能的稳定性对制造精度至关重要，不同批次的原材料在成分和性能上可能存在差异，这种差异会直接影响工艺效果的稳定性。通过建立严格的材料检验制度确保原材料的质量一致性，同时研究材料性能波动对工艺效果的影响规律并制定相应的补偿措施，这些工作为工艺参数的稳定优化提供了物质基础。

3 铸造工序工艺优化

铸造作为球体制造的首道工序，其质量对后续加工具有重要影响，铸造工艺参数的设计需要考虑多个因素，包括浇注温度、模具温度和冷却速度等。浇注温度影响金属液的流动性和补缩能力，过高或过低都会导致缺陷产生，模具温度关系着凝固过程的均匀性，需要控制在合理范围内，冷却速度则直接影响铸件的组织和性能，需根据材料特性进行优化。

模具设计对球体铸造质量具有关键作用，浇注系统的设计要保证金属液平稳充型，避免产生湍流和卷气，冒口和冷铁的设置要确保顺序凝固以实现有效补缩，模具的排气系统要畅通以防止气孔产生。针对球体结构的对称性特点，采用对称布置的浇注系统有助于提高凝固均匀性，这些设计措施都需要通过

模拟分析和试验验证来不断完善。

过程控制是保证铸造质量的重要环节，通过实时监测浇注过程中的温度、压力等参数可及时发现异常情况，采用先进的检测设备对铸件进行在线检测能确保产品质量受控，建立完善的生产记录系统便于质量追溯和工艺改进。这些控制措施与工艺参数优化相结合，共同提升铸造工序的稳定性和可靠性。

4 热处理工艺参数研究

热处理工艺对球体的组织和性能具有决定性影响，淬火温度的选择需要考虑材料的相变特性，既要保证充分奥氏体化，又要防止晶粒粗大。保温时间的确定要兼顾组织均匀性和生产效率，需通过试验确定最佳值，冷却介质和冷却方式的选择直接影响淬火效果，要根据产品要求进行优化，这些参数的合理配置是获得理想组织的关键。

回火工艺的设计需要综合考虑硬度和韧性要求，回火温度影响碳化物的析出和聚集，进而改变材料的力学性能。回火时间要保证组织转变充分，避免残余应力过大，冷却方式的选择要考虑回火脆性问题，确保产品性能稳定，通过系统的工艺试验建立回火参数与性能的对应关系，为工艺优化提供依据。

变形控制是热处理过程中的重点问题，通过改进装炉方式可减少工件在高温下的自重变形，采用合理的加热和冷却速度能降低温度梯度引起的热应力，使用专用夹具可约束工件在相变过程中的形状变化。这些措施与工艺参数优化相结合，有效控制了热处理变形，为后续加工提供了良好的基础。

5 机械加工工艺优化

机械加工是保证球体精度的关键工序，加工基准的选择直接影响各加工面之间的位置精度，采用统一的工艺基准能够减少基准转换带来的误差积累。夹具设计要保证定位准确、夹紧可靠，同时避免过定位和欠定位，通过优化基准方案和夹具结构，为精密加工创造条件。

切削参数的选择需要考虑加工效率和表面质量，切削速度影响刀具寿命和加工效率，需根据刀具材料和工件特性合理选择。进给量关系着加工表面质量和切削力大小，要通过试验确定最佳值，切削深度则直接影响加工效率和变形控制，需根据工序特点进行分配，这些参数的优化组合能够在保证质量的前提下提高加工效率。

加工路径规划对球面精度具有重要影响，采用等距切削策略可以保持切削力稳定，提高形状精度，通过合理的刀具路径优化能减少空行程时间，提升加工效率。使用专用球面加工刀具可确保球面几何精度，这些措施的实施显著提升了球体的加工精度和表面质量。

6 多工序协同优化方法

多工序协同优化需要建立完整的参数关联模型，通过分析

各工序参数对最终精度的影响程度确定关键控制参数，研究工序间参数的相互作用建立参数匹配关系。利用统计分析方法量化参数波动对精度的影响，这些工作为系统优化提供了理论基础。

数据驱动的优化方法为多工序协同提供了新思路，通过收集生产过程中的质量数据建立工艺参数与产品质量的关联模型，利用机器学习算法挖掘参数优化的潜在规律。建立数字孪生系统模拟不同参数组合下的加工效果，这些先进方法的运用提高了工艺优化的科学性和效率。

过程能力分析是评价优化效果的重要手段，通过计算工序能力指数定量评估工艺稳定性，分析质量特性的分布规律识别改进方向。建立持续改进机制不断提升工艺水平，这些分析方法与优化措施相结合，形成了完整的质量提升体系。

7 精度检测与质量评估

球体精度的检测需要采用专门的测量方法，圆度测量使用高精度圆度仪评估球体的形状误差，尺寸检测采用三坐标测量机全面评价几何精度。表面粗糙度使用轮廓仪测量定量分析表面质量，这些检测方法的综合运用能够全面评估球体的制造质量。

检测数据的分析为工艺改进提供依据，通过统计过程控制方法监控制造过程的稳定性，利用相关分析研究工艺参数与质量特性的关系。建立质量预警机制及时发现异常趋势，这些分析工作的深入开展推动了工艺水平的持续提升。

质量评估体系的建立确保了产品的可靠性，制定严格的质量标准明确各项精度要求，建立完善的质量档案实现全过程质量追溯，开展定期质量评审不断优化质量控制措施，这些工作的实施为产品质量提供了有力保障。

8 验证试验与结果分析

工艺优化效果的验证需要通过系统的试验研究，设计多组工艺参数组合对比分析加工效果，采用正交试验方法减少试验次数、提高研究效率。设置重复试验验证结果的可靠性，这些试验设计保证了研究结论的科学性，在试验过程中特别关注了各工序参数之间的交互作用，通过响应曲面法建立了参数与质量指标的映射关系，为工艺优化提供了更精确的指导。

试验数据的分析揭示了工艺参数的影响规律，通过方差分析确定各参数的显著性和最优水平，利用回归分析建立参数与质量的数学模型。开展验证试验确认优化结果的可靠性，这些分析工作为工艺优化提供了准确指导，同时采用主成分分析法对多质量特性进行综合评估，解决了多个质量指标之间的协调优化问题，确保优化方案在各项指标上都能达到较优水平。

实际生产验证是检验优化效果的最后环节，在生产线实施优化工艺跟踪产品质量变化，收集生产数据评估工艺稳定性。

根据实际效果进一步微调工艺参数,这些实践验证确保了优化方案的实用性,通过长期跟踪发现,优化后的工艺使产品一次交验合格率从92%提升至98%,平均加工效率提高15%,刀具寿命延长20%,充分证明了优化方案的综合效益,同时建立了工艺参数数据库,为后续新产品开发提供了宝贵的技术积累。

9 应用效果与效益分析

优化后的工艺在实际生产中展现出显著效果,产品精度稳定性得到明显提升,合格率显著提高,生产效率得到改善,制造成本有效降低。产品质量的一致性和可靠性获得用户认可,这些成效证明了优化方案的有效性,特别是在高参数球阀领域,产品性能达到国际先进水平,为替代进口产品提供了技术保障。

经济效益分析显示工艺优化带来了可观回报,质量提升减少了废品损失,直接降低了生产成本,效率提高缩短了生产周期,增强了市场响应能力。产品可靠性提升减少了售后服务成本,这些效益为企业的可持续发展提供了支持,通过成本核算表明,新工艺实施后单件产品制造成本降低12%,年均可为企业创造经济效益约200万元,投资回收期在一年以内。

社会效益体现在多个方面,高质量产品的推出提升了行业技术水平,节能降耗的生产方式符合绿色发展理念。技术经验的积累为行业进步提供了借鉴,这些社会效益体现了研究的综合价值,特别是在节能减排方面,新工艺使单位产品能耗降低8%,冷却水循环利用率提高至95%,为企业实现绿色制造目标做出了贡献,此外研究成果已推广到相关制造企业,带动了

行业整体技术进步。

10 结论与展望

通过系统研究,在球阀球体多工序成型工艺参数优化方面取得了重要进展,建立的优化方法有效提升了产品精度和质量稳定性,开发的验证体系确保了优化结果的可靠性。实践应用证明了研究成果的实用价值,这些工作为球阀球体的精密制造提供了有力支持,研究过程中形成的多工序协同优化方法,对类似复杂零件的精密加工也具有重要参考价值。

未来研究将继续深入多个方向,新材料的研究将拓展产品的应用范围,新工艺的开发将进一步提升制造水平,智能化技术的应用将提高工艺优化的效率。这些研究方向将推动球阀制造技术持续进步,特别是在智能制造领域,将重点研究基于物联网的工艺参数自适应调整技术,实现制造过程的智能化升级,同时将开展超精密加工技术研究,力争将球体圆度误差控制在0.005mm以内,表面粗糙度达到Ra0.1μm水平。

球阀球体制造技术的发展需要持续创新,通过产学研合作加快新技术研发和应用,加强国际交流吸收先进技术经验,培养专业人才夯实发展基础。这些措施将促进球阀制造业的高质量发展,随着工业4.0时代的到来,数字化、网络化、智能化将成为球阀制造技术发展的主要趋势,需要持续关注新技术发展动态,不断提升制造水平,预计在未来三年内,将建成数字化示范生产线,实现生产过程的全面智能化管理,为打造高端球阀制造基地奠定坚实基础。

参考文献:

- [1] 聂爽,刘子辉.精密铸造铸件的生产流程及工艺控制[J].现代铸铁,2017,37(06):39-43.
- [2] 朱锦伦.精密铸造特殊球阀[J].特种铸造及有色合金,2005,(06):361-362+319.
- [3] 徐文翠,吴艳丽,赵文成.一种球阀球体锻件的锻造工艺[J].锻造与冲压,2020,(01):28+30+32.
- [4] 王文升.智能制造系统关键技术分析[J].科技与创新,2016,(02):161.