

# 基于多参数协同控制的球体表面完整性精密加工工艺研究

胡景汉 周晓洁

前程控股集团有限公司 浙江 温州 325100

**【摘要】**球阀是现代流体控制系统的核心部件，其球体的表面完整性直接决定了阀门的密封性、使用寿命与可靠性，球体表面微观的粗糙度、残余应力、微裂纹等缺陷，在高压、腐蚀及频繁启闭的工况下极易导致密封失效。传统加工工艺常侧重于单一参数的优化，难以全面管控表面质量，本研究提出一种多参数协同控制的加工理念，系统探讨在球体车削、磨削及抛光过程中，如何将切削参数、刀具几何、冷却条件与机床性能作为一个整体进行协同优化。该研究旨在通过参数间的协同配比，在获得超光滑表面的同时，主动调控表层微观组织与残余应力分布，形成强化表面层，从而综合提升球体的耐磨、抗疲劳与耐腐蚀性能，本文阐述了该理论的内涵，规划了协同工艺路线，并讨论了表面完整性的表征方法，为高端球阀的精密制造提供了重要的理论依据与实践方向。

**【关键词】**球阀球体；表面完整性；多参数协同控制；精密加工；工艺优化

DOI:10.12417/2705-0998.25.20.026

## 1 引言

球阀凭借其流阻小、密封性好、启闭迅速、结构紧凑等显著优点，在石油化工、天然气输送、电力、水利、航空航天等国民经济与国防关键领域得到了极为广泛的应用。球阀的核心功能是通过球体的九十度旋转来实现流路的开启与关闭，这一功能特性决定了球体本身必须是整个阀门中制造精度最高、表面质量要求最严苛的零件。球体，特别是其密封球面，不仅要保证与阀座之间实现零泄漏或微泄漏的紧密接触，还要在频繁的启闭操作中承受摩擦、挤压以及介质冲蚀等多重作用。在实际工况中，球阀可能面临高压、高温、强腐蚀、颗粒磨损等极端条件，这对球体表面的综合性能提出了近乎苛刻的要求。

当前，在球体的精密加工实践中，普遍存在一种技术倾向，即过度依赖操作人员的经验，或者采用试错法对个别工艺参数进行孤立的、局部的调整，例如为了降低粗糙度，可能会无限制地降低进给率，但这可能导致加工硬化加剧、切削温度升高从而引发材料退火或相变，或者为了提高加工效率而选用高切削速度，却可能因振动等因素导致表面振纹的产生。这种“头痛医头、脚痛医脚”的优化方式，由于未能洞悉切削速度、进给量、切深、刀具几何形状、刀尖圆弧半径、冷却液属性、机床刚性等众多因素之间复杂的、非线性的相互作用，往往无法取得理想的效果，甚至可能相互矛盾，导致表面完整性各项指标此消彼长，难以达到整体最优。

因此，本文提出并深入研究“多参数协同控制”的加工理念，这一理念的核心思想在于，将影响球体表面完整性的所有关键工艺参数视为一个统一的、相互关联的系统。研究的重点从单个参数的最优值寻找，转向对整个参数系统协同效应的挖掘与调控，通过对这些参数进行科学合理的匹配与组合，旨在实现球体表面微观几何面貌、微观组织结构、表面力学性能三者的协同优化，最终在保证加工经济性的前提下，稳定地制造出具有卓越服役性能的球阀球体。这一研究对于打破国外技术

垄断，推动我国高端流体控制装备的自主化进程具有重要的现实意义。

## 2 球阀球体材料特性与加工挑战

球阀球体的材料选择与其服役环境紧密相关，不同的材料特性直接决定了所采用的加工工艺路线及其面临的挑战，常见的球体材料包括奥氏体不锈钢、双相不锈钢、马氏体不锈钢、钛合金、蒙乃尔合金以及表面硬化处理后的各类合金钢。这些材料普遍具有高强度、高韧性、高耐腐蚀性等特点，但同时也带来了显著的加工难度。

球体本身的几何形状是其加工面临的另一大固有挑战，作为一个三维曲面零件，球体在加工过程中，刀具与工件的接触点、接触角度以及切削速度都在持续不断地变化。在球体的赤道区域，切削线速度最高，而在两极区域，切削线速度趋近于零，这种变化的切削动力学条件使得在整个球面上维持稳定、一致的加工状态变得异常困难，在低速区域，容易产生挤压、啃噬而非正常切削，导致表面质量恶化；在高速区域，则可能因切削力波动而引发颤振。此外球体的密封球面通常要求极高的形状精度和极低的表面粗糙度，其圆度误差和尺寸精度往往需要控制在微米级别，如何在整个复杂曲面上实现纳米级甚至亚纳米级的表面光洁度，并且保证表层下数十微米深度内的材料组织不受损伤，是球体精密加工工艺需要解决的核心问题。这些材料特性和几何特性共同构成了球体加工的特殊性与复杂性，也凸显了采用系统性、协同性方法进行工艺控制的必要性与紧迫性。

## 3 多参数协同控制的理论内涵

多参数协同控制作为一种先进的制造哲学，其理论内涵在于摒弃传统的、孤立的参数优化模式，转而将整个加工系统视为一个由输入参数、加工过程、输出响应构成的闭环。在这个系统中，所有影响最终表面完整性的工艺因素不再是独立的变

量，而是彼此交织、相互影响的网络节点，协同控制的目的是通过理解这个网络的内在联系，找到一组能够使系统输出响应达到全局最优的参数组合，而非单个参数的局部最优。

具体到球体加工，所涉及的关键参数可以归纳为几个层面，第一是切削用量参数，主要包括切削速度、进给量和切削深度，这三者共同决定了材料去除率、切削力和切削温度的基本水平。第二是刀具相关参数，包括刀具材料、几何角度、刀尖圆弧半径、刃口锋利度以及表面涂层状态。不同的刀具材料与涂层决定了其抵抗磨损、承受热冲击的能力。刀具的前角、后角、刃倾角等直接影响切削力的方向、大小以及切屑的形态与排出，一个经过优化的刀具几何形状，可以有效地引导切削力，减少塑性变形，抑制积屑瘤的产生，从而直接改善表面质量。第三是冷却润滑参数，即切削液的种类、浓度、流量、压力及喷射方式，有效的冷却润滑不仅能降低切削区的温度，减少刀具磨损，还能通过改变刀-屑和工作-刀具之间的摩擦状态，来影响残余应力的类型和分布。高压冷却技术甚至可以利用射流的冲击力辅助断屑和排屑。第四是机床系统参数，涵盖机床的刚性、动态稳定性、主轴回转精度以及运动控制算法的先进性。一台高刚性的机床能够有效阻尼切削振动，而高精度的伺服系统则能确保刀具轨迹与理论球面高度吻合。

多参数协同控制的精髓，就在于深刻理解并主动利用这些参数之间的耦合关系，例如当我们希望获得一个高残余压应力的表面层时，不能仅仅考虑通过喷丸等后处理工序来实现，我们可以在精加工阶段，通过协同优化刀具的负前角、适当的进给率以及高效的冷却条件，在切削过程中直接诱导产生有益的塑性变形，从而在加工表层形成稳定的应力场。为了同时实现低粗糙度和无烧伤的磨削效果，需要将砂轮线速度、工件转速、轴向进给量、磨削深度以及冷却液的压力和流量进行精确匹配，一个不恰当的匹配，即使单个参数在推荐范围内，也可能导致磨削烧伤或振纹。因此协同控制本质上是一种系统工程的思维，它要求工艺设计者具备全局视野，通过建模、仿真与实验验证相结合的手段，探寻能使表面完整性各项指标达到最佳平衡点的“工艺窗口”，从而实现球体加工质量从“合格”到“卓越”的飞跃。

#### 4 球体精密加工工艺路线的协同设计

一条完整的球体精密加工工艺路线，通常包括毛坯成形、热处理、粗加工、半精加工、精加工以及最终的超精加工或抛光等环节。多参数协同控制的思想需要贯穿于从粗加工到超精加工的每一个阶段，因为前一工序留下的表面状态将作为后一工序的初始条件，层层传递，最终决定产品的质量。

在粗加工和半精加工阶段，主要目标是高效地去除余量，并为后续精加工提供一个几何形状准确、余量均匀且损伤层较浅的坯件。此阶段的协同重点在于平衡加工效率与对材料初始

损伤的控制。过大的切削用量虽然效率高，但会在亚表层引入较深的塑性变形层和微裂纹，这些缺陷在后续工序中难以完全消除，甚至会成为潜在的失效源。

精加工阶段是形成球体最终表面形貌和决定大部分表面完整性指标的关键环节，对于车削而言，实现镜面效果需要极高的协同性。采用单点金刚石车削是常见的选择，在此过程中机床的动态精度、主轴平稳性、刀具刃口的纳米级锋锐度及其与工件材料的化学相容性、切削环境的恒温控制、微米级甚至纳米级的切削深度与进给量，所有这些参数必须处于一个高度协同的状态。任何一方面的缺失，例如机床存在微小的振动或刀具刃口有微崩，都会在球体表面留下可见的缺陷。对于磨削精加工，协同性要求更为复杂。砂轮可以视为由无数个微小切削刃组成的多刃刀具，砂轮的选择包括磨料种类、粒度、硬度、结合剂类型和组织密度，必须与球体材料特性相匹配，然后砂轮修整参数、磨削速度、工件速度、进给量、磨削深度以及冷却液的应用，构成了一个复杂的参数系统。协同的目标是实现“柔性”或“韧性”磨削，即保证材料以剪切方式被顺利去除，而非因过大的磨削力或过高的磨削温度导致材料被挤压、灼烧或发生相变。

超精加工或抛光作为最终工序，其目的是进一步降低表面粗糙度，平滑微观峰谷，并诱导产生有益的压应力，传统的纯手工抛光或简单机械抛光，由于压力、轨迹和速度难以精确控制，很容易导致球体失圆或产生“过抛光”与“欠抛光”区域，表面完整性的一致性很差。基于多参数协同控制的智能抛光技术，例如采用工业机器人夹持柔性抛光工具，并集成实时力位混合控制与在位测量补偿系统，正成为研究热点。在这种模式下，抛光工具的压力、转速、移动轨迹、抛光剂的浓度与流量等参数，可以根据球面不同位置的实时形貌测量数据进行动态调整和协同优化，确保整个球面获得均匀一致的高品质表面，同时避免因局部压力过大或时间过长导致的材料去除不均问题。

#### 5 表面完整性的表征与评价

要验证多参数协同控制工艺的有效性，就必须对加工后的球体表面完整性进行全面、客观的表征与评价。表征工作不应仅仅停留在表面粗糙度测量，而应深入到表层的物理与力学本质。

表面形貌分析是基础，使用高精度的白光干涉仪或原子力显微镜可以获取球体表面在三维尺度上的微观轮廓，不仅能够给出  $R_a$ 、 $R_z$  等传统粗糙度参数，还能分析表面的波度、纹理方向、峰谷分布以及功能性的面积支承率曲线。这些信息对于评估球体与阀座之间的密封接触状态至关重要。

微观组织观察是揭示表层材料状态的金标准，通过扫描电子显微镜和透射电子显微镜，可以对球体表层进行横截面观

察。制取样品后，在显微镜下可以清晰地看到加工变质层的厚度、晶粒的变形程度、是否存在非晶化、相变或微裂纹等缺陷。

残余应力测量是评价表面完整性的核心环节之一，X 射线衍射法是测量表层残余应力的常用且可靠的方法，通过测量晶格间距的变化，可以计算出表面特定方向上的应力大小和方向。一个理想的球体表面，其残余应力应呈现为均匀分布的压力，且压应力层具有一定的深度，这能有效提高球体的疲劳寿命和抗应力腐蚀能力，若检测到拉应力，则表明加工工艺存在严重问题，需要立即调整。

显微硬度和纳米力学性能测试可以反映表层材料的强化或弱化情况。利用显微硬度计，可以从表面向心部测量硬度的梯度变化，从而判断加工硬化影响层的深度和程度。更先进的纳米压痕技术则可以在更小的尺度上获取材料的弹性模量、硬度等力学参数，对于评估极薄表面的性能尤为有效。

通过综合运用以上多种表征手段，可以对采用不同工艺参数组合加工出的球体进行全面的“体检”，从而建立起“工艺参数组合”与“表面完整性状态”之间的定量映射关系。这种

映射关系正是多参数协同控制工艺得以优化和推广的数据基础和科学依据。

## 6 结论与展望

球阀球体的表面完整性是其长期可靠服役的根本保障，本文系统地论述了基于多参数协同控制理念的球体表面完整性精密加工工艺。研究指出，要突破高端球阀制造的瓶颈，必须超越传统依赖单一参数优化的局限，将切削用量、刀具参数、冷却条件及机床性能等所有影响因素视为一个有机的整体。通过深入探究这些参数之间的内在耦合机制，并对其进行系统性的协同设计与优化，方能在球体复杂曲面上稳定地制造出不仅几何精度高、表面光洁度好，而且微观组织稳定、残余应力分布合理、无微观损伤的高性能表面层。

综上所述，多参数协同控制不仅是一种先进的加工技术，更是一种系统性的工程方法论，它的深入研究和广泛应用，必将推动我国球阀制造技术迈向新的高度，为保障国家重大工程和关键装备的自主安全可控奠定坚实的技术基础。

## 参考文献：

- [1] 夏信义,周丐波.球阀球体加工工艺的振动抑制与精度提升策略研究[C]//重庆市大数据和人工智能产业协会,重庆建筑编辑部,重庆市建筑协会.智慧建筑与智能经济建设学术研讨会论文集（二）.浙江球特阀门有限公司;,2025:1252-1255.
- [2] 苏伟,颜娟.高精度硬质合金球阀球体加工工艺研究[J].硬质合金,2021,38(05):351-356.
- [3] 万磊.基于 ANSYS Workbench 的全焊接球阀球体应力和变形分析[J].机械制造,2016,54(11):18-20.
- [4] 曹霞,王建伟,曹鹤,等.液压系统多参数协同优化控制方法研究[J].今日制造与升级,2025,(02):30-32.