

基于数值模拟的煤矿液压支架立柱检修工艺优化研究

曹 骞

国家能源集团神东煤炭集团大柳塔煤矿 陕西 榆林 719315

摘要: 本文聚焦基于数值模拟的煤矿液压支架立柱检修工艺优化。先阐述立柱工作原理,接着分析密封失效、缸体损坏等常见故障类型及数值模拟分析方法。然后介绍数值模拟模型构建、参数与算法选择、结果分析与验证等应用框架。通过具体实践评估优化工艺效果,包括前后对比、案例展示及用户反馈改进,旨在提高立柱可靠性与安全性,保障煤矿安全生产。

关键词: 数值模拟; 煤矿液压支架; 立柱检修工艺

引言: 在煤矿开采中, 液压支架立柱作为关键支撑部件, 其性能直接影响工作面的安全与生产效率。然而, 立柱工作于恶劣环境, 常出现密封失效、缸体损坏等故障, 传统检修工艺存在局限性。数值模拟技术凭借其精准分析与预测能力, 为检修工艺优化提供了新途径。本文深入探讨基于数值模拟的立柱检修工艺优化, 以提升立柱性能, 保障煤矿稳定生产。

1 煤矿液压支架立柱的工作原理

煤矿液压支架立柱是液压支架的关键支撑部件, 承担着支撑顶板、维持工作面空间稳定的重要任务。其工作原理基于帕斯卡定律, 即在一个封闭的液体系统中, 施加在液体任一点的压力, 会等值地传递到液体的各个部分。液压支架立柱通常由缸体、活塞、活塞杆、密封件等部分组成。当高压乳化液从立柱的进液口进入缸体的有杆腔或无杆腔时, 液体的压力作用在活塞上, 产生一个与压力和活塞面积成正比的推力。如果液体进入无杆腔, 活塞杆伸出, 立柱升高, 支撑起顶板; 反之, 当液体从进液口进入有杆腔时, 活塞杆缩回, 立柱下降。在立柱的工作过程中, 密封件起着至关重要的作用。它能够防止乳化液泄漏, 保证立柱内部的压力稳定, 从而确保立柱能够正常地伸缩和提供足够的支撑力^[1]。常见的密封形式有鼓形密封圈、蕾形密封圈、O形密封圈等, 它们分别安装在活塞与缸体、活塞杆与缸盖之间, 通过自身的弹性变形来填补间隙, 实现密封效果。另外, 液压支架立柱还配备了安全阀, 其作用是在立柱承受的压力超过额定值时, 安全阀自动打开, 将多余的液体排出, 防止立柱因过载而损坏, 保障设备和人员的安全。通过立柱的升降动作以及安全阀的保护作用, 液压支架能够适应不同地质条件下工作面的顶板压力变化, 为煤矿开采提供一个安全、稳定的工作环境。

2 基于数值模拟的煤矿常见故障类型

2.1 密封失效

密封失效是煤矿液压支架立柱最常见的故障之一。由于立柱工作环境的恶劣性, 密封件长期受到高压乳化液的侵蚀、摩擦以及温度变化的影响, 容易出现老化、磨损、撕裂等问题。当密封失效时, 乳化液会从密封处泄漏, 导致立柱内部压力下降, 支撑力不足, 无法正常支撑顶板。这不仅会影响工作面的正常生产, 还可能引发顶板冒落等安全事故。

2.2 缸体损坏

缸体作为立柱的主要承载部件, 在工作过程中承受着巨大的压力和交变载荷。长期使用后, 缸体可能会出现裂纹、变形等损坏情况。裂纹的产生主要是由于缸体内部的应力集中, 当应力超过缸体材料的强度极限时, 就会形成裂纹并逐渐扩展。而变形则可能是由于缸体受到过大的外力作用或内部压力不均匀导致的。

2.3 其他故障

除了密封失效和缸体损坏外, 煤矿液压支架立柱还可能出现其他故障, 如活塞杆弯曲、安全阀故障等。活塞杆弯曲可能是由于立柱在升降过程中受到侧向力的作用, 或者由于缸体内有异物导致活塞杆卡死而产生的^[2]。安全阀故障则可能表现为安全阀开启压力不准确、关闭不严等问题, 影响立柱的安全保护功能。

3 数值模拟方法在煤矿液压支架立柱检修工艺优化中的应用框架

3.1 数值模拟模型构建

数值模拟模型构建是应用数值模拟方法开展研究工作的坚实基础。在构建煤矿液压支架立柱的数值模拟模型时, 首先要依据其实际结构和精确尺寸, 借助专业的三维建模软件精心打造精确的几何模型。这个几何模型必须全面涵盖缸体、活塞、活塞杆、密封件等所有关

键部件，而且要确保各部件之间的装配关系分毫不差，就如同在实际生产中精确组装一样，任何一个细微的偏差都可能影响后续模拟结果的准确性。完成几何模型构建后，将其导入到专业的有限元分析软件中，进行细致的网格划分。网格划分的质量堪称数值模拟的“生命线”，它直接影响着模拟的准确性和计算效率。一般来说，对于应力集中区域和关键部件，如缸体与活塞的接触部位、密封件周边等，要采用极为细密的网格进行划分，以此提高模拟精度，捕捉到细微的物理变化；而对于其他相对次要的区域，则可以采用较粗的网格，在保证一定精度的前提下，大幅减少计算量，提高计算速度。最后，根据立柱在煤矿工作面中的实际工作条件，精准定义模型的边界条件和材料属性。边界条件涵盖载荷、约束等，要依据立柱真实的受力情况进行合理设置；材料属性包括弹性模量、泊松比、密度等，需根据立柱实际使用的材料准确输入，确保模型能真实反映立柱的工作状态。

3.2 模拟参数与算法选择

模拟参数的选择对于数值模拟结果的准确性起着决定性作用。在对煤矿液压支架立柱进行数值模拟时，需要全面考虑液体压力、流量、温度、摩擦系数等一系列参数。这些参数并非随意选取，而是要根据实际工况进行精心挑选。例如，液体压力要依据煤矿工作面的实际液压系统压力设定；温度则要考虑煤矿井下的实际环境温度以及立柱工作过程中产生的热量。为了确保参数选取的合理性，还需进行敏感性分析，通过改变各个参数的数值，观察模拟结果的变化情况，从而确定各参数对模拟结果的影响程度，为参数的优化调整提供依据。算法选择同样是数值模拟的关键环节，不同的算法适用于不同类型的问题，如静态分析、动态分析、流固耦合分析等。对于煤矿液压支架立柱的强度、刚度分析，由于其主要是研究立柱在静态载荷下的力学性能，通常采用静态有限元算法；而对于立柱的密封性能分析，由于涉及到液体与密封件之间的相互作用，需要采用流固耦合算法，以准确模拟这种复杂的物理现象。在选择算法时，要综合考虑问题的复杂度、计算精度和计算效率等因素，确保既能得到准确的结果，又能高效地完成计算。

3.3 模拟结果分析与验证

模拟结果分析是数值模拟的核心环节，它就像是一把钥匙，能打开深入理解立柱工作性能的大门。通过对模拟结果进行可视化处理，可以直观地观察到立柱在不同工况下的应力、应变、位移等分布情况。这些直观的图像就如同立柱的“X光片”，能够清晰地展现出立柱

内部的物理变化，帮助我们找出潜在的故障隐患和薄弱环节。例如，通过观察应力分布图，可以发现哪些部位应力集中，容易发生断裂；通过位移分布图，可以了解立柱在受力时的变形情况。同时，还可以对模拟结果进行定量分析，如计算立柱的强度、刚度、疲劳寿命等指标，通过与设计要求进行对比，评估立柱的性能是否达标。为了确保数值模拟结果的准确性和可靠性，必须对模拟结果进行严格的验证。验证方法主要有实验验证和现场数据对比验证。实验验证是在实验室条件下，按照模拟的工况对立柱进行实际测试，将测试结果与模拟结果进行细致的对比分析；现场数据对比验证则是收集煤矿现场立柱的实际运行数据，与模拟结果进行比对。通过验证，可以及时发现模拟过程中存在的问题，对模拟模型和参数进行修正和优化，使模拟结果更加贴近实际情况。

4 数值模拟优化检修工艺的具体实践

4.1 立柱缸体损伤评估与修复优化

数值模拟方法为准确评估立柱缸体损伤程度提供了有力工具。首先，依据缸体的实际结构和尺寸，建立精确的有限元模型。该模型需全面考虑缸体材料的力学性能、边界条件以及实际工作载荷等因素。通过模拟缸体在不同损伤情况下的应力、应变分布，能清晰洞察损伤对缸体强度和刚度的影响。例如，当缸体出现裂纹时，借助模拟可深入分析裂纹尖端的应力强度因子。依据断裂力学理论，应力强度因子的大小直接决定了裂纹的扩展趋势。若应力强度因子超过材料的临界值，裂纹将迅速扩展，导致缸体失效。通过模拟还能评估缸体的剩余寿命，为后续的修复决策提供依据。在修复优化方面，数值模拟发挥着关键作用，对于缸体的焊接修复，能模拟焊接过程中的温度场和应力场分布^[3]。焊接时局部高温会使材料性能发生变化，产生焊接残余应力，影响缸体性能。通过模拟可优化焊接工艺参数，如焊接速度、电流、电压等，降低残余应力，提高焊接质量。对于喷涂修复，可模拟喷涂层的结合强度和耐磨性能。通过对比不同喷涂材料和工艺下的模拟结果，选择最适合的方案，有效延长缸体的使用寿命，降低维修成本。

4.2 立柱密封性能模拟与优化

数值模拟能够深入探究立柱密封件的密封性能。通过建立密封件与缸体、活塞杆之间的流固耦合模型，该模型综合考虑了流体的压力、温度、流速以及密封件的弹性变形等因素。模拟密封件在不同压力、温度和运动速度下的密封效果，能精确分析密封件的接触压力分布。接触压力是保证密封的关键，若接触压力不足，会导致泄漏；若过大，则会加速密封件的磨损。同时，模

拟还能计算密封件的泄漏量等指标,找出影响密封性能的关键因素,如密封件的结构形状、材料性能、表面粗糙度等。基于模拟结果,可对密封件进行优化设计。例如,改变密封件的唇口形状,使其与缸体、活塞杆的贴合更紧密;选用高性能的密封材料,提高其耐磨损、耐腐蚀能力;优化表面粗糙度,降低摩擦阻力。另外,还能模拟不同密封件的组合使用效果,通过对比不同组合方案的模拟结果,选择最优的密封方案,有效降低立柱的泄漏率,提高其工作可靠性和稳定性。

4.3 立柱强度与刚度校核与改进

数值模拟方法为全面校核立柱的强度和刚度提供了可靠手段。建立立柱的整体有限元模型时,要精确模拟其各部件的连接方式、实际工作载荷以及边界条件等。通过模拟立柱在不同工况下的受力情况,如承受顶板压力、侧向力等,可准确计算立柱的应力、应变和位移分布。根据计算结果,依据相关设计标准和规范,判断立柱的强度和刚度是否满足设计要求。若发现立柱的强度或刚度不足,数值模拟可助力改进设计。例如,优化立柱的结构尺寸,合理调整缸体、活塞杆的直径和壁厚等参数,提高其承载能力;增加加强筋,改变立柱的应力分布,增强其抗弯、抗扭能力;改变材料,选用强度更高、刚度更好的材料。同时还能模拟不同改进方案的效果,通过对比各方案的应力、应变和位移分布情况,选择最优的设计方案。确保立柱在煤矿复杂的工作面环境中能够安全、稳定地工作,减少故障发生,提高煤矿生产的效率和安全性。

5 优化工艺的实际应用效果评估

5.1 工艺优化前后的对比分析

通过对工艺优化前后的煤矿液压支架立柱进行对比分析,可以直观地评估优化工艺的效果。对比指标可以包括立柱的故障发生率、维修周期、使用寿命等。例如,统计优化工艺实施前后一段时间内立柱的故障次数,计算故障发生率的变化情况;记录立柱的维修时间和维修成本,分析维修周期和维修成本的变化趋势;跟踪立柱的使用寿命,评估优化工艺对延长立柱使用寿命

的作用。

5.2 实际案例分析与效果展示

选取具体的煤矿工作面作为实际案例,详细分析优化工艺在该工作面的应用效果。介绍工作面的地质条件、生产情况以及立柱的使用状况,阐述优化工艺的实施过程和方法^[4]。通过实际数据和现场照片,展示优化工艺实施前后立柱的性能变化,如泄漏量的减少、支撑力的提高等,直观地体现优化工艺的实际效果。

5.3 用户反馈与持续改进措施

收集煤矿用户对优化工艺的反馈意见,了解用户在实际使用过程中遇到的问题 and 需求。根据用户反馈,对优化工艺进行持续改进和完善。例如,如果用户反映优化后的立柱在某些特殊工况下仍存在故障,可以进一步开展数值模拟研究,分析问题产生的原因,提出针对性的改进措施。通过不断地用户反馈和持续改进,使优化工艺更加符合煤矿生产的实际需求,提高煤矿液压支架立柱的可靠性和安全性。

结束语

本文围绕基于数值模拟的煤矿液压支架立柱检修工艺优化展开研究,通过理论分析与实践应用,验证数值模拟在故障分析、工艺优化等方面的有效性。优化后的检修工艺显著降低立柱故障率,延长使用寿命,提高了煤矿生产的安全性与经济性。未来,将持续完善数值模拟方法,推动检修工艺不断升级,为煤矿智能化发展提供有力支撑。

参考文献

- [1]田庆凯,张顺,王庆法.浅析煤矿液压支架选型[J].内蒙古煤炭经济,2025(8):16-18.
- [2]陈科.煤矿液压支架的轻量化设计[J].能源与节能,2025(6):290-292.
- [3]王毅.煤矿液压支架电液控制系统设计研究[J].机械管理开发,2025,40(3):218-220.
- [4]尉红.煤矿液压支架移位检测技术方案设计与应用[J].机械管理开发,2025,40(2):272-274.