

# 含氟矿井水处理工艺实际应用

王思宇

中煤科工集团北京华宇工程有限公司 北京 100120

**摘要:** 文章围绕含氟矿井水处理工艺实际应用展开研究, 阐述处理必要性及氟离子危害, 探讨化学沉淀、吸附等单一工艺及组合工艺特点, 结合实际案例分析应用效果。指出当前技术、经济、管理层面存在的问题, 提出研发新技术、优化集成工艺、推进智能化控制及开展资源化利用等未来研究方向, 为含氟矿井水处理提供参考。

**关键词:** 含氟矿井水; 处理工艺; 实际应用; 问题与展望

## 1 含氟矿井水处理的必要性及氟离子的危害

随着矿产资源开发力度加大, 含氟矿井水的处理已刻不容缓。未经处理的含氟矿井水直接排放, 不仅浪费大量水资源, 更会造成严重的生态破坏与健康威胁。从生态角度看, 氟离子进入水体后, 会抑制水生植物的光合作用和呼吸作用, 干扰其正常生长; 进入土壤则会改变土壤理化性质, 降低肥力, 影响农作物生长。从人体健康层面, 长期饮用或接触含氟超标水, 会引发氟斑牙、氟骨症, 导致牙齿缺损、骨骼变形, 严重影响肢体活动能力。氟离子还会干扰神经系统、内分泌系统和免疫系统的正常功能, 尤其对儿童智力发育产生不良影响。另外, 处理含氟矿井水也是绿色矿山建设和矿业可持续发展的必然要求。通过有效处理, 不仅能减少环境污染, 还能实现水资源的循环利用, 提升资源综合利用率, 这对维护生态平衡、保障人类健康和推动矿业绿色转型具有重要意义。

## 2 去除氟离子的主要工艺讨论

### 2.1 化学沉淀法

化学沉淀法是去除含氟矿井水中氟离子最常用的方法之一, 其原理是向含氟矿井水中投加钙盐、铝盐等沉淀剂, 使氟离子与沉淀剂中的金属离子反应, 生成难溶性的氟化物沉淀, 从而实现氟离子的去除。以钙盐为例, 在碱性条件下, 钙离子与氟离子反应生成氟化钙沉淀, 反应方程式为:  $\text{Ca}^{2+} + 2\text{F}^- = \text{CaF}_2\downarrow$ 。该方法操作简单, 成本相对较低, 适合处理高浓度含氟矿井水<sup>[1]</sup>。但化学沉淀法存在明显的局限性, 一方面, 生成的沉淀颗粒较小, 沉淀速度慢, 需要较长的沉淀时间和较大的沉淀空间; 另一方面, 处理后的出水氟离子浓度往往难以达到国家规定的排放标准, 通常需要与其他方法联合使用。大量化学污泥的产生也带来了二次污染问题, 增加了污泥处理成本。

### 2.2 吸附法

常用的吸附剂包括活性氧化铝、活性炭、沸石、羟基磷灰石等。活性氧化铝具有较大的比表面积和良好的吸附性能, 对氟离子有较强的选择性吸附能力; 活性炭不仅可以吸附氟离子, 还能去除水中的有机物和部分重金属离子; 沸石具有独特的孔道结构和离子交换性能, 能够有效吸附氟离子。吸附法的优点是处理效果好, 出水氟离子浓度可以达到较低水平, 适用于处理中低浓度含氟矿井水。但吸附法也存在一些问题, 如吸附剂的吸附容量有限, 需要定期更换或再生吸附剂, 增加了运行成本; 吸附剂的再生过程复杂, 且再生效果往往不理想, 会导致吸附剂的吸附性能逐渐下降。不同吸附剂对水质条件要求不同, 需要根据实际情况选择合适的吸附剂和操作条件。

### 2.3 离子交换法

离子交换树脂通常含有可交换的离子基团, 如磺酸基、季铵基等。当含氟矿井水通过离子交换树脂时, 树脂上的可交换离子与氟离子发生交换, 将氟离子吸附到树脂上, 实现氟离子的去除。该方法的优点是出水水质稳定, 能够有效去除低浓度含氟矿井水中的氟离子, 且离子交换树脂可以通过再生重复使用, 降低了运行成本。然而离子交换法也存在一定的局限性, 一方面, 离子交换树脂对进水水质要求较高, 需要对含氟矿井水进行预处理, 去除其中的悬浮物、有机物和重金属离子等杂质, 以防止树脂中毒; 另一方面, 树脂的再生过程会产生大量的再生废液, 若处理不当, 会造成二次污染。

### 2.4 膜分离法

膜分离法是利用膜的选择透过性, 将含氟矿井水中的氟离子与其他组分分离, 从而达到去除氟离子的目的。常用的膜分离技术包括反渗透、纳滤、超滤等。反渗透膜能够截留包括氟离子在内的几乎所有离子和小分子有机物, 对氟离子的去除率可达90%以上; 纳滤膜对二价及以上离子有较高的截留率, 也能有效去除部分

氟离子；超滤膜主要用于去除水中的大分子有机物和悬浮物，对氟离子的去除效果相对较弱，通常需要与其他膜技术联合使用。膜分离法具有分离效率高、出水水质好、操作简单、占地面积小等优点，能够实现含氟矿井水的深度处理和回用。但膜分离法也存在明显的缺点，如膜组件价格昂贵，投资成本高；膜容易受到污染，需要定期进行清洗和维护，增加运行成本；膜的使用寿命有限，需要定期更换膜组件，进一步提高处理成本。

### 2.5 工艺组合应用

由于单一的氟离子去除工艺都存在一定的局限性，为了提高含氟矿井水的处理效果，满足不同的处理要求和排放标准，在实际应用中，通常采用多种工艺组合的方式。例如，化学沉淀法与吸附法组合，先通过化学沉淀法去除大部分氟离子，降低水中氟离子浓度，然后利用吸附法进一步深度处理，使出水氟离子浓度达到排放标准；膜分离法与离子交换法组合，利用膜分离法进行初步处理，去除水中的大部分杂质和部分氟离子，再通过离子交换法对出水进行精处理，确保出水水质稳定达标<sup>[2]</sup>。工艺组合应用能够充分发挥各工艺的优势，弥补单一工艺的不足，提高处理效率，降低处理成本。但在选择工艺组合时，需要综合考虑含氟矿井水的水质水量特点、处理规模、排放标准、投资成本和运行成本等因素，通过技术经济分析，选择最适合的工艺组合方案。

## 3 含氟矿井水处理工程案例列举与分析

### 3.1 案例一

山西大同作为我国北方重要的产煤大省核心区域，煤峪口矿在煤炭开采进程中，面临着棘手的含氟矿井水问题。该矿所产生的矿井水含氟量颇高，经长期监测，平均氟离子浓度达到15mg/L，这一数值远超国家规定的生活饮用水氟离子浓度限值（1.0mg/L）以及工业废水排放标准（10mg/L）。为有效攻克这一难题，煤峪口矿采用了“化学沉淀-吸附”组合工艺。在化学沉淀阶段，工作人员精准地向含氟矿井水中投加氢氧化钙和氯化钙，同时利用专业设备精细调节pH值至10-11区间。在此条件下，氟离子与钙离子迅速发生化学反应，生成氟化钙沉淀。这一过程在大型反应池中进行，通过机械搅拌确保反应充分。经过沉淀处理后，水中氟离子浓度成功降至5-6mg/L。随后，沉淀后的出水依靠重力自流，被引入吸附池。在吸附池中，煤峪口矿选用活性氧化铝作为吸附剂开展深度处理工作。活性氧化铝吸附柱依据矿井水流量及水质特征进行定制，运行流速被严格控制在5-8m/h。经过吸附处理后，出水氟离子浓度稳定在0.8-1.0mg/L，完全达到国家生活饮用水标准。该工程自投入运行一年多

以来，展现出稳定的处理效果，出水水质达标率始终维持在较高水平。在运行实践中也暴露出一些问题。化学沉淀阶段产生的污泥量较大，每天产生的湿污泥可达数十吨，且污泥含水率高，后续污泥处理需要经过浓缩、脱水等多道工序，处理成本较高。活性氧化铝吸附剂在运行一段时间后，由于吸附位点被氟离子及其他杂质占据，吸附性能逐渐下降，需要定期进行再生处理。再生过程涉及复杂的酸碱洗脱等操作，不仅消耗大量化学药剂，且再生效果不理想，导致部分吸附剂需要频繁更换，进一步增加了运行成本。

### 3.2 案例二

贵州织金珠藏镇矿区地处西南喀斯特地貌区，其矿井水含氟量超标，且伴有高浓度悬浮物和有机物。为实现有效治理，矿区采用“预处理-膜分离-离子交换”组合工艺。预处理阶段，先以格栅拦截树枝、石块等大颗粒悬浮物，再经沉砂池去除砂粒，最后在混凝沉淀池投加混凝剂与助凝剂，使悬浮物和部分有机物凝聚沉淀，有效去除大部分悬浮物与部分有机物。膜分离阶段，运用纳滤膜和反渗透膜组合深度处理。纳滤膜利用特殊孔径结构，截留大部分有机物、二价离子及胶体；反渗透膜凭借高脱盐率，进一步去除氟离子等小分子杂质，处理后出水氟离子浓度降至2-3mg/L。离子交换阶段，采用固定床强碱性阴离子交换树脂，通过离子交换反应吸附氟离子，使出水氟离子浓度稳定在1.0mg/L以下，达到排放标准<sup>[3]</sup>。该工程运行效果良好，实现部分矿井水回用于绿化灌溉和道路喷洒，有效节水。但工艺存在显著弊端：膜组件购置成本高达数百万，占工程投资比重大；膜易受有机物、微生物等污染，需频繁化学清洗，不仅污染环境，还缩短膜3-5年的使用寿命，增加运行成本；离子交换树脂再生废液含高浓度氟离子、重金属及酸碱物质，处理不当易造成二次污染。

## 4 含氟矿井水处理工艺实际应用中存在的问题

### 4.1 技术层面问题

目前，含氟矿井水处理技术虽然种类较多，但都存在一定的局限性。化学沉淀法处理后的出水氟离子浓度难以达到较低水平，且污泥产量大；吸附法的吸附剂吸附容量有限，再生困难；离子交换法对进水水质要求高，树脂容易中毒；膜分离法存在膜污染严重、使用寿命短、投资和运行成本高等问题。不同处理工艺对水质条件的要求不同，在实际应用中，需要根据含氟矿井水的具体水质水量特点选择合适的处理工艺，但目前缺乏准确的水质分析和工艺选择标准，导致工艺选择的盲目性较大，影响处理效果。

## 4.2 经济层面问题

含氟矿井水处理工程的投资和运行成本较高,限制了先进处理技术的推广应用。以膜分离法为例,膜组件的购置费用占整个工程投资的40%-50%,且膜的使用寿命一般为3-5年,需要定期更换,增加了投资成本;在运行过程中,膜的清洗和维护费用、化学药剂费用、能源消耗费用等也较高。化学沉淀法虽然投资成本相对较低,但污泥处理费用较高;吸附法和离子交换法的吸附剂和树脂更换费用也不容忽视。对于一些小型矿区来说,难以承担高额的处理成本,导致部分矿区对含氟矿井水的处理不彻底,甚至直接排放。

## 4.3 管理层面问题

含氟矿井水处理工程的运行管理涉及多个方面,包括设备运行维护、水质监测、人员管理等。目前,部分矿区存在运行管理人员专业素质不高,对处理工艺和设备操作不熟练,不能及时发现和解决运行过程中出现的问题;水质监测不规范,监测频率低,监测指标不全面,无法准确掌握处理效果和水质变化情况;缺乏完善的管理制度和应急预案,在遇到突发情况时,不能及时采取有效的应对措施,影响处理工程的正常运行和出水水质安全。

## 5 未来研究方向

### 5.1 新型处理技术研发

为了克服现有含氟矿井水处理技术的不足,需要加强新型处理技术的研发。一方面,研发高效、经济、环保的新型吸附剂和离子交换树脂,提高其吸附容量和选择性,降低再生难度和成本;另一方面,探索新的处理方法,如生物法、电化学法等。生物法利用微生物的代谢作用去除氟离子,具有环境友好、成本低等优点,但目前该技术还处于实验室研究阶段,需要进一步优化微生物菌种和处理工艺;电化学法通过电化学反应去除氟离子,具有处理效率高、无二次污染等特点,但需要解决电极材料的寿命和能耗问题。

### 5.2 工艺优化与集成创新

在现有处理工艺的基础上,进一步优化工艺参数,提高处理效率和降低处理成本。例如,通过优化化学沉淀法的沉淀剂投加量、反应时间和pH值等参数,提高沉淀效果,减少污泥产量;优化膜分离法的运行条件,降低

膜污染程度,延长膜的使用寿命<sup>[4]</sup>。同时加强工艺集成创新,开发更加合理、高效的工艺组合方案,充分发挥各工艺的优势,实现含氟矿井水的高效处理和资源化利用。

### 5.3 智能化与自动化控制

将智能化和自动化技术应用于含氟矿井水处理工程中,实现设备的自动运行、水质的实时监测和处理工艺的自动调节。通过安装传感器和在线监测设备,实时监测含氟矿井水的水质水量变化情况,根据监测数据自动调整处理工艺参数,确保出水水质稳定达标。利用智能化控制系统对设备进行远程监控和故障诊断,及时发现和解决设备运行过程中出现的问题,提高运行管理效率,降低人工成本和运行风险。

### 5.4 资源化利用研究

含氟矿井水经过处理后,其中的氟离子和其他有用成分可以进行资源化利用。例如,从化学沉淀产生的污泥中提取氟化钙,用于化工生产;对处理后的出水进行进一步处理,使其达到工业用水或生活杂用水标准,实现水资源的循环利用。开展含氟矿井水的资源化利用研究,不仅可以降低处理成本,还能实现资源的综合利用,具有重要的经济和环境意义。未来需要加强对含氟矿井水资源化利用技术的研究和开发,探索更加有效的资源化利用途径和方法。

## 结束语

含氟矿井水处理关乎生态环境与矿业可持续发展。尽管当前处理工艺存在诸多问题,但随着新型技术研发、工艺优化创新、智能化应用推进及资源化利用探索,有望攻克难题,实现含氟矿井水高效处理与资源循环利用,推动矿业绿色转型,保障生态环境与人类健康。

## 参考文献

- [1]赵建波.含氟矿井水处理工艺实际应用[J].煤炭技术,2025,44(4):214-217.DOI:10.13301/j.cnki.ct.2025.04.041.
- [2]朱佳,杨楠,高静思等.含氟工业废水处理工艺及性能比较分析[J].当代化工研究,2021(22):92-94.
- [3]余琴芳,镇祥华,邹磊等.含氟工业废水深度处理工艺方案[J].净水技术,2020,39(05):140-146.
- [4]李庭,李井峰,杜文凤,等.国外矿井水利用现状及特点分析[J].煤炭工程,2021,53(1):133-138.