某铀矿含氟矿井水处理工艺设计及运行分析

张 羽,陈伟山,杨彦虎

(中核第四研究设计工程有限公司,河北 石家庄 050021)

摘要:根据某铀矿含氟矿井水水质特点,通过对构筑物及关键设备尺寸、水力条件等参数进行精细化设计计算,实现严格控制加药量、混合设施的流速和总水头损失、絮凝池速度梯度、沉淀池雷诺数等工艺参数的目的,最大限度提高了絮凝沉淀效果。通过分析项目首年运行费用和水质监测数据,总结了存在的问题并提出了改进措施。

关键词:精细化设计;絮凝速度梯度;雷诺数;成本费用分析

中图分类号:X753 **文献标志码**:A **文章编号**:1000-8063(2023)03-0093-07

DOI:10.13426/j.cnki.yky.2023.02.01

由于某铀矿矿石具有萤石含量高的特性,矿井水中除放射性元素铀超标外,非放射性元素氟也存在超标现象。铀矿冶企业须将矿井废水处理达标后排放。如直接采用化学或物理方法从该体系中除氟,存在铀元素被沉淀或吸附等情况,无法实现铀资源的充分回收。因此,在处理工艺中先采用离子交换法吸附铀,对吸附尾液再进行氟元素的处理,保证铀的回收利用,最大限度实现节能减排。由于离子交换法除铀工艺在铀矿冶企业应用较为成熟,所以笔者重点对某铀矿矿井水除氟工艺的方案设计、设备选型及运行管理等进行分析。

1 矿井水除氟工艺设计

1.1 水质分析

某铀矿床地下水水质类型主要为HCO_3—Ca·Na型,HCO_3—SO_4—Na 和 SO_4—HCO_3—Ca·Mg型水次之,浸蚀性 CO_2 质量浓度为 5.29~25.43 mg/L。在构造带和变质岩地下水中 Ca^{2+}、Mg^{2+} 增高,岩浆岩地下水中 K^+、Na^+ 增高。地下水的矿化度为 0.05~0.17 g/L,属低矿化、弱酸性至中性水。矿床开采期间,地下水的铀质量浓度达 1.42~3.84 mg/L。根据《岩土工程勘察规范》判定,地下水对混凝土结构和钢结构均具有弱腐蚀性。

矿井水经密实固定床离子交换工艺吸附除铀后再进入除氟工艺处理设施[1]。矿井水主要组分和排放限值(《铀矿冶辐射防护和辐射环境保护规定》和《污水综合排放标准》一级标准)见表 1。可以看出,矿井水经过离子交换除铀后,除氟质量浓度和 pH 超标外,其余污染物组分均满足排放限值要求。

表 1 矿井水主要污染物组分及排放限值

Table 1 Main pollutant components and emission limits of the mine water

项目	$\rho(U)$/(mg/L)	$C(^{226}Ra)$/(Bq/L)	$\rho(F^-)$/(mg/L)	$\rho(SO_4^{2-})$/(mg/L)	$\rho(Cl^-)$/(mg/L)	$\rho(HCO_3^-)$/(mg/L)	pH
矿井水原水	1.42~3.84	0.41~0.88	16.24~29.43	2.89~17.76	0.68~3.23	13.68~94.15	5.4~7.3
矿井水除铀后	0.06~0.19	0.36~0.85	15.36~28.65	2.64~17.39	0.57~3.04	13.65~92.63	5.6~7.4
排放限值	0.3	1.1	10				6~9

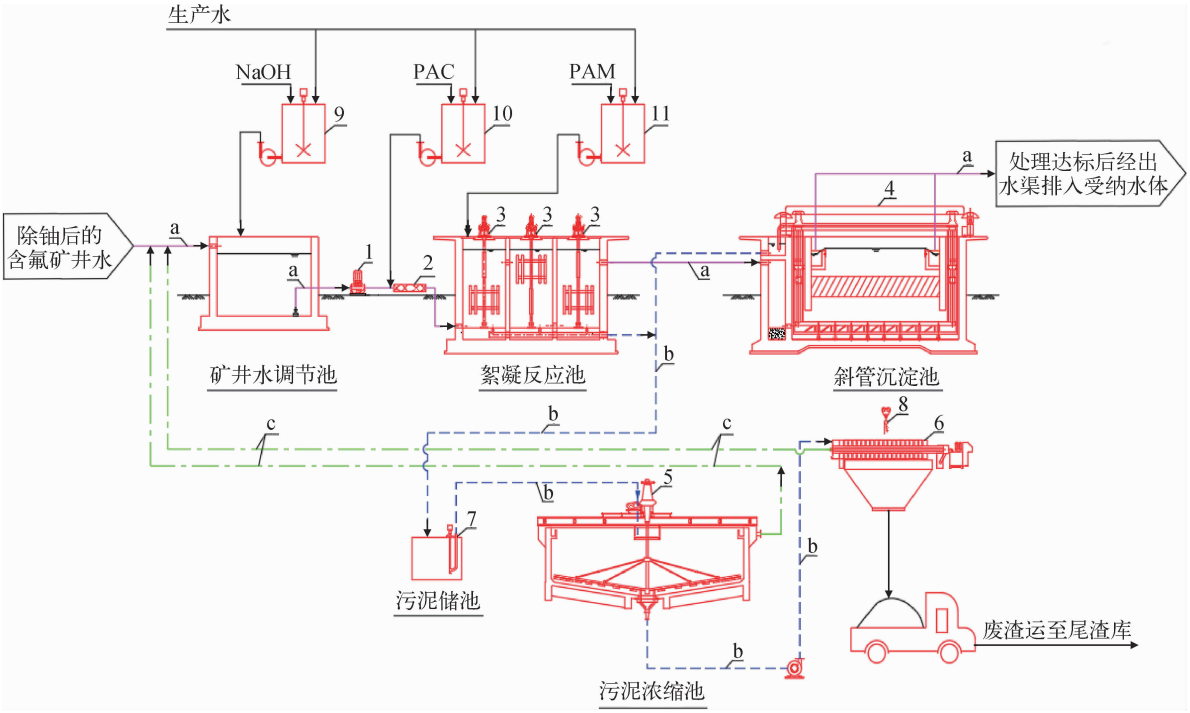
收稿日期:2023-02-01

第一作者简介:张羽(1979—),男,河北保定人,硕士,高级工程师,主要从事工业及民用给水排水、环境保护工程设计及施工图审查工作。

1.2 除氟工艺选择

目前，应用比较普遍的含氟废水处理技术主要有化学沉淀法、混凝沉淀法、吸附法等，其中化学沉淀法主要用于处理高浓度含氟废水，存在氟离子难以达标排放的问题，需要和其他方法联合使用；吸附法适用于处理低浓度含氟废水，但需要特定设备且吸附剂再生频繁，成本较高[2]。离子交换法、膜分离法、电凝聚法等应用相对较少，其中离子交换法也存在树脂再生问题，且再生过程容易造成氟离子二次污染；膜分离法处理效果好，不引入杂质离子，但运行成本高，存在浓盐水后处理问题，操作管理较复杂；电凝聚法存在电极钝化，不易清理，专业维护费用高等问题[3]。

该矿井水氟离子平均质量浓度为 22.01 mg/L，属于低浓度含氟废水。混凝沉淀法可用于处理低浓度含氟废水，废水与絮凝剂混合后形成絮体，通过吸附、配合、离子交换等作用将氟去除[4]126。混凝沉淀法设备简单，操作管理简便，较为适合该铀矿含氟矿井水的水质特点和运行管理水平。因此，矿井水除氟处理工艺采用混凝沉淀法，工艺流程见图 1。



1—提升泵；2—静态混合器；3—垂直轴桨叶搅拌机；4—桁车式吸泥机；5—中心传动浓缩机；6—自动厢式压滤机；7—污泥泵；8—电动葫芦；9—NaOH 加药装置；10—PAC 加药装置；11—PAM 加药装置；a—矿井水；b—污泥；c—污泥上清液。

图 1 矿井水除氟工艺流程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of mine water defluorination process

1.3 除氟药剂选用

当采用聚合氯化铝(PAC)絮凝除氟时，在氟离子质量浓度低于 100 mg/L 条件下，对废水的处理效果好。此外，聚丙烯酰胺(PAM)作为助凝剂，可以充分发挥其吸附架桥作用，促进絮凝体快速形成，并使沉淀速度加快[4]128。因此，除氟工艺的絮凝剂和助凝剂分别选用 PAC 和 PAM。

1.4 主要构筑物、设备选型及控制

铀矿山矿井水处理设施使用年限较长，即使矿井退役后，矿井水仍在不断外排，如采用一体化处理设备(多为碳钢材质)，在南方潮湿气候下容易腐蚀老化。因此，主要处理构筑物采用钢筋混凝土结构，在构筑物内壁衬环氧树脂防腐。

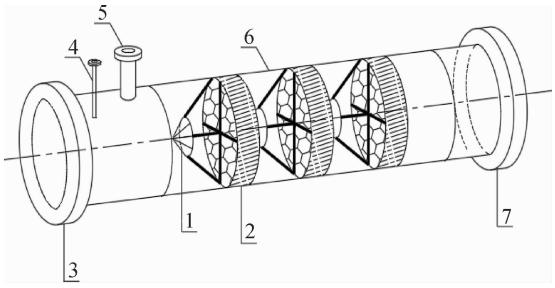
某铀矿井在矿床开采期间，正常排水量约为 2 382 m^3/d，最大排水量约为 3 179 m^3/d。矿井水处理规模按最大排水量考虑，设计处理量 Q=3 200 m^3/d=0.037 m^3/s。

1.4.1　调节池

矿井水经离子交换塔除铀后进入调节池，调节池水力停留时间 6 h，总有效容积为 800 m^3。根据地形条件，其规格为 20 m×12 m×4 m(长×宽×深)。调节池采用半地下式钢筋混凝土结构，内设 2 台提升泵。

1.4.2　混合设施

管式静态混合器构造简单，不需外加动力设备，安装及维护管理方便，且不需另建混合池，节省占地面积[5]。蜂窝状高频旋流混合器是 1 种新型管式混合器(图 2)，它在特制圆管内串联安装多道环状 ABS 混合内芯，混合内芯前端装有分流帽；通过分流帽和蜂窝内芯多单元多级折转水流方向，形成水流高频次微涡旋并打破跟随效应，使药剂与水流迅速混合均匀，从而达到快速水解、聚合及颗粒脱稳的目的。本研究混合设施选用高频旋流混合器。本工艺选用蜂窝状高频旋流混合器，管径(d)=225 mm，长(L)=3 m。以下对相关参数进行计算。



1—分流帽；2—ABS 混合内芯；3—固定法兰；4—加药口；5—目镜；6—特制圆管；7—可伸缩法兰。

图 2　蜂窝状高频旋流混合器构造示意图

Fig. 2　Structure diagram of honeycomb high frequency cyclone mixer

1.4.2.1　总水头损失计算

管道截面积(S)计算：

$$S=\pi\left(\frac{d}{2}\right)^2=3.14\times\left(\frac{0.225}{2}\right)^2=0.04\ m^2;$$

管道流速(v)计算：

$$v=Q/S=\frac{0.037}{0.04}=0.925\ m/s;$$

分流帽处流速($v_{帽}$)计算：

$$v_{帽}=\frac{v}{(1-K_1)}=\frac{0.925}{(1-0.3)}=1.32\ m/s^{[6]26};$$

分流帽处局部水头损失($h_{帽}$)计算：

$$h_{帽}=\frac{\xi_1 v_{帽}^2}{2g}=\frac{0.5\times1.32^2}{2\times9.81}=0.044\ m;$$

混合内芯流速($v_{内芯}$)计算：

$$v_{内芯}=\frac{Q}{\beta S}=\frac{0.037}{0.5\times0.04}=1.85\ m/s^{[6]26};$$

混合内芯水头损失($h_{内芯}$)计算：

$$h_{内芯}=\frac{\xi_2 v_{内芯}^2}{2g}=\frac{1.0\times1.85^2}{2\times9.81}=0.174\ m;$$

混合器沿程水头损失(h_1)计算：

$$h_1=iL=\frac{6.84\times3}{1000}=0.021\ m;$$

混合器总水头损失($h_{总}$)计算：

$$h_{总}=h_1+n(h_{帽}+h_{内芯})=0.021+3(0.044+0.174)=0.675\ m>0.5\ m;$$

式中：K_1—分流帽与管道断面面积比，K_1=30%；ξ_1—分流帽处局部水头损失系数，取 0.5；β—混合内芯等效开孔比，取 0.5；ξ_2—蜂窝混合内芯处局部水头损失系数，取 1.0；L—管式混合器总长度，取 3 m；n—串联放置的混合内芯个数，取 3；i—水力坡降(m/m)，查管道水力计算表可知，在 Q=0.037 m^3/s、d=225 mm 时，水力坡降 1 000i=6.84[7]350。由于单个混合内芯有效容积占整个管道混合器的比例很小，所以混合内芯对沿程水头损失的影响可忽略不计。

1.4.2.2　混合时间计算

管道混合器的总体积($V_{总}$)计算：

$$V_{总}=S\cdot L=0.04\times3=0.12\ m^3;$$

单个混合内芯有效容积($V_{芯}$)计算：

$$V_{芯}=S\cdot L_1\cdot K_2=0.04\times0.18\times10\%=0.000\ 72\ m^3;$$

管道混合器有效容积($V_{有效}$)计算：

$$V_{有效}=V_{总}-nV_{芯}=0.12-3\times0.000\ 72=0.118\ m^3;$$

混合时间(t)计算：

$$t=V_{有效}/Q=0.118/0.037=3.2\ s>3.0\ s$$

式中：L_1—单个管道混合器内芯长度，取0.18 m；K_2—单个管道混合器内芯的有效容积占比，取 10%；n—串联放置的混合内芯个数，取 3。

通过计算可知，主要设计参数满足水流通过混合器的总水头损失($h_{总}$)不小于 0.5 m、混合时间(t)不小于 3 s 的要求[6]25。管式静态混合器与其他混合设施相比，虽然其水头损失较大，但因混

合效果好，总体上具有一定优势[8]。

1.4.3 絮凝反应池

絮凝反应池采用 3 格串联，每格设 1 台搅拌机，搅拌强度由大到小。絮凝池隔墙过水孔上下交错布置，使水流分布均匀。每格池壁四周设 4 块固定挡板，增强水流紊动。搅拌轴及叶轮等设备均考虑防腐。

1.4.3.1 絮凝反应池池体

除氟矿井水经管道混合器与药剂充分混合后，进入絮凝反应池，絮凝时间(T)=20 min，有效容积(V)=44 m^3，平均分成 3 格，每格尺寸 $l_0\times b_0\times h_0$=2.0 m×2.0 m×4.0 m(长×宽×深)，有效水深(h)=3.7 m，单格有效容积(V_1)=2.0 m×2.0 m×3.7 m=14.81 m^3，采用半地下混凝土结构。

1.4.3.2 絮凝池搅拌设备

叶轮直径(D)=1.60 m，取池宽的 80%；叶轮桨板中心点旋转直径(D_0)=[(800−350)/2.0+350]×2.0/1 000=1.15 m；单个桨板长(l_1)×宽(b_1)为 1.2 m×0.10 m，l_1/D=1.2/1.6=0.75，满足长径比不大于 0.75 的要求[5]519。每根轴上桨板数(n_1)=8 个，内侧、外侧各 4 个。每格池壁上固定挡板数(n_2)=4 个，每个挡板长(l_2)×宽(b_2)=1.0 m×0.18 m(图 3)。

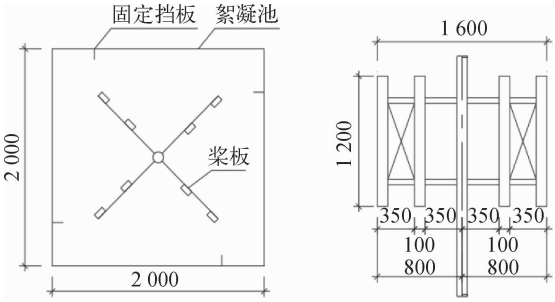


图 3 垂直轴桨叶搅拌设备详图(单位:mm)

Fig. 3 Detail drawing of vertical axis paddle mixing equipment (dimension unit: mm)

过水断面面积(A_0)=$l_0\times h$=2.0 m×3.7 m=7.4 m^2，旋转桨板总面积与过水断面面积之比(m_1)为

$$m_1=\frac{n_1\times l_1\times b_1}{A_0}=\frac{8\times 1.2\times 0.10}{7.4}=13.0\%。$$

固定挡板总面积与絮凝池过水断面积之比(m_2)为

$$m_2=\frac{n_2\times l_2\times b_2}{A_0}=\frac{4\times 1.0\times 0.18}{7.4}=9.7\%。$$

旋转桨板与固定挡板总面积占过水断面积之比(m)为

$$m=m_1+m_2=13.0\%+9.7\%=22.7\%。$$

计算表明，满足 $m<25\%$的要求[5]519。

1.4.3.3 每格搅拌器功率及速度梯度计算

机械絮凝池线速度宜自第一级的 0.5 m/s 逐渐变小至末级的 0.2 m/s，分别取第 1、2、3 格叶轮桨板中心点的线速度 v_1=0.5 m/s、v_2=0.35 m/s、v_3=0.2 m/s[9]。第 1 格叶轮转数和叶轮旋转角速度计算公式为[5]520-523

$$n_1=\frac{60v_1}{\pi D_0}=\frac{60\times 0.5}{3.14\times 1.15}=8.31\ \text{r/min},$$

$$\omega_1=\frac{2\pi n_1}{60}=\frac{2\times 3.14\times 8.31}{60}=0.87\ \text{rad/s},$$

$$k_1=\frac{\psi\rho}{2g}=\frac{1.10\times 1\,000}{2\times 9.81}=56,$$

$$N'_{01}=\frac{ykl_1{\omega_1}^3}{408}(r_2^4-r_1^4)=\frac{4\times 56\times 1.2\times 0.87^3}{408}\times(0.8^4-0.7^4)=0.07\ \text{kW},$$

$$N''_{01}=\frac{ykl_1{\omega_1}^3}{408}(r_4^4-r_3^4)=\frac{4\times 56\times 1.2\times 0.87^3}{408}\times(0.45^4-0.35^4)=0.01\ \text{kW},$$

$$N_{01}=N'_{01}+N''_{01}=0.07+0.01=0.08\ \text{kW},$$

$$G_1=\sqrt{\frac{102\times N_{01}}{\mu V_1}}=\sqrt{\frac{102\times 0.08}{102\times 14.81}\times 10^6}=75\ \text{s}^{-1},$$

式中：n_1—第 1 格叶轮转数，r/min；ω_1—和叶轮旋转角速度，rad/s；N'_{01}—桨板旋转时第 1 格外侧桨板克服水的阻力所耗功率，kW；N''_{01}—桨板旋转时第 1 格内侧桨板克服水的阻力所耗功率，kW；y—每个叶轮上面的桨板数目，个，取 4 个；k—系数；ψ—阻力系数，桨板宽长比(b_1/l_1=0.10/1.2)小于 1，取 1.10[5]520；ρ—水的密度；取 1 000 kg/m^3；g—9.81 N/kg；r_1—外侧叶轮半径与桨板宽度之差，m；r_2—外侧叶轮半径，m；r_3—内侧叶轮半径与桨板宽度之差，m；r_4—内侧叶轮半径，m；N_{01}—絮凝池第 1 格搅拌轴功率，kW；G_1—絮凝池第 1 格平均速度梯度，s^{-1}。用同样方法求得各格叶轮所耗功率和速度梯度(表 2)。

1.4.3.4 平均速度梯度及验证

絮凝反应池平均速度梯度计算公式为[5]520-524

$$N_0=0.08+0.034+0.005\ 7=0.12\ \text{kW},$$

$$N=\frac{N_0}{\eta_1\eta_2}=\frac{0.12}{0.75\times 0.70}=0.23\ \text{kW},$$

$$G=\sqrt{\frac{102\times N_0}{\mu V}}=\sqrt{\frac{102\times 0.12}{102\times 44.4}\times 10^6}=52\ s^{-1},$$

$$GT=52\times 20\times 60=6.24\times 10^4,$$

式中：N_0—絮凝池所耗总功率，kW；η_1—搅拌器机械总效率，取 0.75；η_2—传动效率，取 0.7；N—电动机功率，kW；μ—动力黏度，按水温 20 ℃计，取 102×10^{-6} kg·s/m²；G—絮凝反应池平均速度梯度，s^{-1}；T—絮凝时间，min。

表 2　絮凝池每格叶轮主要指标

Table 2　Main indexes of impeller in each grid of flocculation tank

叶轮	v/m	N/(r/min)	ω/(rad/s)	外叶轮功率/kW	内叶轮功率/kW	每格叶轮功率/kW	速度梯度/s^{-1}
第 1 格	0.50	8.31	0.87	0.07	0.01	0.08	75
第 2 格	0.35	5.82	0.61	0.03	0.004	0.034	44
第 3 格	0.20	3.32	0.35	0.005	0.000 7	0.005 7	19

絮凝效果不仅与 G 有关，还与絮凝时间有关，通常控制平均 G 在 20～70 s^{-1}，平均 GT 值在 1×10^4～1×10^5[8]269，经核算 G 和 GT 值均满足要求。搅拌设备选用 3 台 LFJ-160 型立式搅拌机，装机功率分别为 0.37、0.25、0.18 kW，采用齿轮式摆线针轮减速装置，可设置多档转速。由于实际工况较复杂，选用的搅拌机功率比理论计算值大，可根据现场运行情况调节叶轮转速以适应水质变化，达到最佳处理效果。

1.4.4　斜管沉淀池

斜管沉淀池具有沉淀效率高、占地面积小等优点，可大幅度降低雷诺数，水流基本属层流状态，因此，沉淀工艺采用斜管沉淀池[8]305。

斜管沉淀池液面负荷(u_0)=3.6 $m^3/(m^2\cdot h)$，斜管材料采用塑料片热压六边形蜂窝管，斜管长度($l_{斜}$)=1.0 m。

斜管沉淀池清水区面积(A)计算：

$$A=Q/v_{清}=0.037/(1/1\ 000)=37\ m^2;$$

清水区实际需要面积(A_1)计算：

$$A_1=A\times 1.05=37\times 1.05=38.85\ m^2$$

斜管内流速($v_{管内}$)计算：

$$v_{管内}=v_{清}/\sin\theta=1.0/\sin 60^\circ=0.115\ cm/s;$$

水力半径(R)计算：

$$R=d/4=30/4=0.75\ cm;$$

雷诺数(Re)计算：

$$Re=\frac{RV_{管内}}{\nu}=\frac{0.75\times 0.115}{0.01}=8.625<100;$$

式中：$v_{清}$—清水区上升流速，通过液面负荷计算得出 $v_{清}$=1.0 mm/s；θ— 斜管水平倾角取 60°；d—斜管内切圆直径为 30 mm；ν—运动黏度(水温 t=20 ℃时，ν=0.01 cm^2/s)；斜管结构占用面积按 5%计。

雷诺数是判断沉淀效果的重要指标，经核算斜管内雷诺数<100[5]537，符合设计要求。斜管沉淀池尺寸为 8.6 m×4.6 m×4.0 m，有效水深 3.6 m，沉淀时间 14 min。斜管沉淀池与絮凝沉淀池合建，一端通过穿孔花墙向沉淀池进水，另一端通过集水槽出水。

斜管沉淀池采用 HJX-9 型桁车式吸泥机，泵吸式排泥，采用机械排泥方式，可充分发挥沉淀池的容积利用率[10]。通过桁车往复行走吸排池底污泥，不扰动水体，排泥可靠。

1.4.5　污泥浓缩池

污泥浓缩池液面负荷取 0.2 $m^3/(m^2\cdot h)$，设计水力停留时间 25 h，浓缩池尺寸为 ϕ9.0 m×4.0 m，有效水深为 3.7 m。采用地上式钢筋混凝土结构，选用 1 台 NZ-9 型中心传动浓缩机，对斜管沉淀池排出的污泥进行浓缩，进一步分离污泥中的间隙水，以减少污泥体积，提高污泥浓度[11]。

1.4.6　自动厢式压滤机

压滤机处理能力为 18 $kg/(m^2\cdot h)$，过滤周期按 1 h 设计，每天 3 班，每班 1 次，选用 2 台 XMZ100/1000-UB 自动厢式压滤机，每台过滤面积 100 m^2，滤室容积 1.51 m^3。自动厢式压滤时作用于泥饼两侧的压力差比真空过滤时大，能将含水率从 97%～98%降到 75%，体积缩小到脱水前的 1/8～1/12，出料含水率低，滤饼便于运输和处理[12]。

自动厢式压滤机可自动卸料、组装、自动洗刷滤布，运行效率高。滤板材质为 TPE 弹性体无碱玻纤聚丙烯，滤板耐高温高压、防腐密封好。压滤产生的污泥运至尾渣库填埋处置。

1.4.7 加药装置

PAC 及 PAM 投加装置均选用 JY-Ⅲ型自动加药装置，各 1 套，计量泵投加量为 30～390 L/h，溶解槽容积为 1 000 L，溶液槽容积为2 000 L。

NaOH 投加装置选用 JYB 型玻璃钢液体搅拌机 1 套，计量泵投加量为 0～20 L/h；溶液槽容积 700 L，材质为玻璃钢。

1.4.8 辅助用房

辅助用房采用钢筋混凝土框架结构，加药间、值班控制室和污泥脱水间合建。加药间和值班控制室设在一层，加药装置并排布置在加药间内，药剂存放在储药间内，在加药间四周设围墙。污泥脱水间为局部二层，自动厢式压滤机布置在二层，设置电动葫芦方便检修；一层为出渣区，压滤机自动拉板卸料，滤饼直接落入车中。在脱水间二层设有围栏；脱水间为敞开式结构，采用自然通风。

2 运行控制及监测

采用 PLC 系统对矿井水除氟设施主要工艺过程实现自动控制，将主要设备运行情况、故障报警信号及各项监测仪表数据传至值班控制室，便于值班人员根据监测数据及报警信号进行现场操作管理。

矿井水调节池内设液位监测装置，通过设置高低液位信号自动控制矿井水提升泵启停；在矿井水调节池进水位置设置在线 pH 监测装置和在线氟离子监测装置，根据 pH 监测值对 NaOH 投加量进行实时控制。由于矿井水水质和水量随季节变化明显，但在每个季节周期内水质相对稳定，因此可根据水质监测数据定期调控 PAC 及 PAM 的投加量。

在絮凝池进水管上设置电磁流量计和水力开关，水力开关联锁控制 PAC 加药装置计量泵启停，同时通过时间延迟信号联锁控制 PAM 加药装置启停。在絮凝池第 2 格设置在线 pH 监测装置。

在斜管沉淀池内设置泥位计，根据污泥液位控制桁车式吸泥机的启停；在沉淀池出水区设置在线氟离子监测装置和 pH 监测装置，监测出水水质情况。在重力浓缩池内设置泥位计，根据污泥液位自动控制污泥输送泵的启停。

3 处理费用分析

矿井水除氟设施处理费用主要包括外购原材料、动力费、职工薪酬、固定资产折旧费、修理费等（表 3）。根据投入运行首年成本费用计算，矿井水除氟设施处理费用为 2.14 元/m^3，其中 PAC 药剂费用占处理费用的 43%，动力费占 24%。

4 运行效果分析

本工程的首年运行监测数据显示，出水氟离子浓度满足排放标准限值要求（表 4）。

表 3 吨水处理费用分析

Table 3 Cost analysis of the water treatment per ton

费用名称	年消耗量	费用单价	吨水处理费用/元	备注
动力费	59.57 万 kW·h	0.88 元/(kW·h)	0.517	综合考虑电费、污泥运输费等，折合运行功率共 68 kW
水费	8 388.19 m^3	5.47 元/m^3	0.045	配药用水
PAC	527.64 t	1 800 元/t	0.936	配制浓度 20%
PAM	17.25 t	12 000 元/t	0.204	配制浓度 0.3%
液碱	3.38 t	780 元/t	0.026	成品浓度 30%
职工薪酬	16.20 万元	5.4 万元/(人·年)	0.160	定员 3 人
固定资产折旧费	16.21 万元		0.160	建构筑物和设备综合折旧年限 18 年，预计净残值率 4%
固定资产修理费	9.12 万元		0.09	按固定资产原值的 3%计
合计			2.14	

表 4　除氟出水主要污染物组分

Table 4　Main pollutant components of mine water after fluoride removal

项目	ρ(U)/(mg/L)	$C(^{226}Ra)$/(Bq/L)	$\rho(F^-)$/(mg/L)	pH	$\rho(SO_4^{2-})$/(mg/L)	$\rho(Cl^-)$/(mg/L)	$\rho(HCO_3^-)$/(mg/L)
监测值	0.03～0.14	0.21～0.67	5.76～8.81	6.2～8.1	2.47～15.16	0.46～2.73	11.37～85.42
设计值	＜0.3	＜1.1	＜10	6～9			

5　结论

1）混凝沉淀法处理含氟矿井水工艺简单，操作管理简便，维护管理成本较低。将矿井水 pH 控制在 6.5～7.5 时，絮凝除氟反应效果最好。

2）为保证混合和絮凝反应过程中的最佳水力条件，矿井水提升泵要求采用工频泵，以保证平均流量基本稳定。运行过程中可以根据进水水质变化，适当调节絮凝桨叶搅拌转速，保证反应效果。

3）斜管沉淀池液面负荷基本控制在 3.6 $m^3/(m^2 \cdot h)$，适当延长沉淀时间，降低雷诺数，可提高出水水质。

参考文献：

[1]　侯伟强. 含铀矿井水设施的研究与设计[J]. 铀矿冶，2022，41(3)：309-313.

[2]　刘新胜. 几种含氟废水处理方法的比较[J]. 广州化工，2012，40(12)：63-68.

[3]　刘亮强，冯永山. 含氟废水处理工艺综述[J]. 中国资源综合利用，2022(2)：92-95＋100.

[4]　吴忠山. 工业含氟废水处理工艺技术探讨[J]. 工艺与技术，2012(12)：126-128.

[5]　上海市政工程设计研究院(集团)有限公司. 给水排水设计手册：第三版：第 3 册 城镇给水[M]. 北京：中国建筑工业出版社，2017.

[6]　崔玉川. 给水厂处理设施设计计算：第三版[M]. 北京：化学工艺出版社，2019.

[7]　中国市政西南设计研究院. 给水排水设计手册：第二版：第 1 册 常用资料[M]. 北京：中国建筑工业出版社，2000.

[8]　严煦世，范瑾初. 给水工程：第四版[M]. 北京：中国建筑工业出版社，1999.

[9]　上海市政工程设计研究院(集团)有限公司. 室外给水设计标准[M]. 北京：中国计划出版社，2018.

[10]　蒋克彬，彭松，陈秀珍，等. 水处理工程常用设备与工艺[M]. 北京：中国石化出版社，2010.

[11]　王绍文，杨景玲. 环保设备材料手册：第 2 版[M]. 北京：冶金工业出版社，2000.

[12]　张自杰. 排水工程：下册：第四版[M]. 北京：中国建筑工业出版社，1999.

[13]　周霖，张彰，方瑜，等. 混凝沉淀法处理工业含氟废水的工艺研究[J]. 化学研究，2010，21(5)：54-57＋62.

[14]　陈后兴，赖兰萍. 萤石选矿含氟废水处理试验研究[J]. 环境科学与管理，2011，36(2)：68-70.

[15]　周勇. 化学沉淀法处理高浓度含氟废水的研究[J]. 中国资源综合利用，2013，31(2)：23-25.

Process Design and Operation Analysis of Fluorine-containing Mine Water Treatment in a Uranium Mine

ZHANG Yu, CHEN Wenshan, YANG Yanhu

(The Fourth Research and Design Engineering Corporation, CNNC, Shijiazhuang 050021, China)

Abstract: According to the water quality characteristics of fluorine-containing mine water in a uranium mine, the size of structures and key equipment, hydraulic conditions and other parameters were designed and calculated to achieve the purpose of strictly controlling the dosing amount, the flow rate of mixing facilities and the total head loss, the velocity gradient of flocculation tank, the Reynolds Number of sedimentation tank and other process parameters, so as to maximize the flocculation and sedimentation effect. Based on the operation cost and water quality monitoring data of the project in the first year, the existing problems and presented improvement measures were summarized.

Key words: precise design; velocity gradient; Reynolds Number; cost analysis