硝酸循环清洗法去除废水泵内氟硅酸盐垢层

冷启辉，吴鹏鹏，徐本芳

（瓮福（集团）有限责任公司 瓮福化工公司，贵州 福泉 550501）

［摘 要］废酸水输送泵（以下简称废水泵）输送的酸性废水中含磷、氟等元素较高，当泵使用时间长、环境温度较低时会在泵腔、叶轮及管道内部形成氟硅酸盐垢层，该垢层质地坚硬，清理困难。传统方式是将泵体拆开，进行机械清理。经实验分析，酸溶液能有效溶解垢块。通过采用硝酸循环清洗法，配制硝酸清洗液，用电加热法控制清洗液温度在50～70 ℃，动态循环清洗8～10 h，辅以浓度实时监测。最终垢块被安全、彻底清洗干净，泵效恢复至设计值的98%。本研究为氟硅酸盐结垢的工业设备清洗提供了安全解决方案。

［关键词］废水泵；除垢；氟硅酸盐；硝酸清洗

［中图分类号］TQ052 ［文献标志码］B ［文章编号］2097-4566（2026）05-0091-05

Removal of fluorosilicate scale in wastewater pumps by nitric acid circulation cleaning method

LENG Qihui, WU Pengpeng, XU Benfang

(*Wengfu Chemical Company*, *Wengfu* (*Group*) *Co.*, *Ltd.*, *Fuquan* 550501, *China*)

Abstract: The acidic wastewater transported by the waste acid water transfer pump (here in after referred to as the WFS wastewater pump) has high contents of phosphorus, fluorine and other elements. When the pump is used for a long time or under low-temperature conditions, fluorosilicate scaling occurs inside the pump cavity, impeller and pipelines. The scale layer is hard and difficult to clean. The traditional method involves disassembling the pump body for mechanical cleaning. Experimental analysis shows that acid solution can effectively dissolve the scale deposits. By adopting the nitric acid circulation cleaning method, a nitric acid cleaning solution is prepared, and the temperature of the cleaning solution is controlled between 50 - 70 ℃ using electric heating. Dynamic circulation cleaning is conducted for 8 - 10 hours, supplemented by real-time concentration monitoring. Eventually, the scale deposits are cleaned safely and thoroughly, and the pump efficiency is restored to 98% of the design value. This research provides a safe solution for the cleaning of industrial equipment with fluorosilicate scaling.

Key words: wastewater pum; descaling; fluorosilicate; nitric acid cleaning

瓮福（集团）有限责任公司是国家“八五”和“九五”期间建设的5个大型磷矿肥基地之一。其中，瓮福化工公司、瓮福磷矿是瓮福（集团）有限责任公司的二级机构，分别位于福泉市马场坪镇、牛场镇，两者相距约46 km。瓮福化工公司主要从事磷复肥生产，生产过程中会产生一些酸性废水，瓮福磷矿主要从事磷矿开采及浮选，在浮选过程中会使用酸性水[1]；且瓮福化工公司磷酸装置在生产中需要使用水将产出的磷石膏调制成渣浆，通过离心泵输送至渣场堆存。为实现资源利用最大化，2008年废酸水输送管线建设完成，用于向瓮福磷矿（牛场镇）输送磷石膏渣场装置的酸性废水，供选矿时使用，大幅度降低选矿成本。同时将酸性废水通过回水系统输送至磷酸装置循环利用，在行业内率先实现了污水零排放。

在渣场酸性废水循环利用过程中，磷石膏中的磷酸盐、氟化物和硅酸盐等不断溶解到水中，导致酸性废水中各种离子富集。冬季环境温度下降时，会在废水泵泵腔、叶轮及回水管道内形成结垢，需间隔2～3 d清理一次。国内外现有的除垢方式，无

收稿日期：2025-08-18； **修回日期**：2026-03-10

作者简介：冷启辉（1983— ），男，贵州瓮安人，工程师，主要从事磷石膏渣场设备设施管理维护工作。

通信作者：吴鹏鹏，助理工程师，主要从事设备设施的维护和巡检工作。

法将泵腔和叶轮的垢块彻底清除，严重影响生产的正常运行，且会造成渣场回水量减少，调蓄水池水位上升，调洪能力下降，存在安全环保风险。因此，针对废水泵泵腔和叶轮的结垢层，探索一种高效、彻底的清洗方式，对保障公司安全稳定生产具有重要意义。

1 结垢原因分析

瓮福化工公司渣场酸性废水中主要含氟、五氧化二磷等，$w(P_2O_5)$ 为0.66%，$w(F)$ 为0.001%～0.002%，$w(SO_4^{2-})$ 为0.28%，ρ(固) 为0.12～0.16 mg/L，ρ(悬浮物) 为0.11～0.45 mg/L，pH为1.3～2.2。废水泵在长期输送酸性废水过程中，因pH波动及温度变化，特别在冬季环境温度降低至16 ℃以下时[2]，氟硅酸钾（K_2SiF_6）和氟硅酸钠（Na_2SiF_6）在酸性废水中达到过饱和状态，氟硅酸盐结晶析出（反应过程见式（1）、式（2）），形成致密氟硅酸盐垢层[3]，该垢层质地坚硬，导致泵效率下降30%～50%。

$$2K^+ + SiF_6^{2-} \longrightarrow K_2SiF_6\downarrow ; \quad (1)$$

$$2Na^+ + SiF_6^{2-} \longrightarrow Na_2SiF_6\downarrow 。 \quad (2)$$

2 现有除垢技术

目前，国内外针对氟硅酸盐结垢问题的处理措施主要包括人工清理、电加热升温、添加化学试剂等。但针对废水泵内的垢层，这几种方法并不能取得很好的效果。

2.1 人工清理

拆除废水泵叶轮、泵壳和结垢严重管段，使用人工进行机械清理。但废水泵是一种高扬程、大流量的多级卧式离心泵，采用闭式多级叶轮，叶轮为六级，流道小且弯曲。传统机械清理方式不仅无法将附着垢块清理干净，而且易损伤叶轮，造成叶轮动平衡失衡，影响泵的正常运行。

2.2 电加热升温

通过在泵壳和进出口管道外层包裹保温毯，以电加热方式进行保温，提高输送介质温度，进而提高氟硅酸盐溶解率[4]。因废水泵流量大，采用电加热升温的方式不足以将水温快速升高。经具体实践，结垢时间间隔和垢层厚度较未加热情况下无明显改善，所以此方法不能解决结垢问题[5]。

2.3 添加化学试剂

设置中间槽，通过添加化学试剂来降低酸性废水中的氟硅酸根浓度，达到降低氟硅酸盐过饱和度的目的，抑制其结晶析出[6]。但此方法投入的人力和物力成本过大，时间较长时废水泵内依然会形成垢层难以清理，不能完全达到阻垢的目的。

3 废水泵氟硅酸盐垢层清洗方法研究

3.1 研究方向

废水泵内的垢层主要是因为氟硅酸根离子（SiF_6^{2-}）和金属阳离子过饱和结晶析出，形成了致密的氟硅酸盐垢层。氟硅酸盐可溶于酸性溶液中，且溶解过程是一个物理过程而非化学反应，即溶解后，酸性溶液中存在的是氟硅酸盐本身分离出来的离子。以氟硅酸钠（Na_2SiF_6）为例，它在酸性溶液中的溶解过程可用式（3）表示：

$$Na_2SiF_6 \longrightarrow 2Na^+ + SiF_6^{2-}。 \quad (3)$$

同时，氟硅酸根离子（SiF_6^{2-}）在溶液中存在水解倾向，即：

$$SiF_6^{2-} + 4H_2O \rightleftharpoons Si(OH)_4 + 6F^- + 4H^+。 \quad (4)$$

根据勒夏特列原理，当加入酸（增加H^+浓度）时，平衡强烈向左移动，抑制了SiF_6^{2-}的水解，使其能在酸性溶液中以离子形态稳定存在。

因此，氟硅酸盐在酸性溶液中是以氟硅酸根离子（SiF_6^{2-}）和金属阳离子的形态存在的，要想减少氟硅酸盐垢层的产生或清洗垢层，则需提高氟硅酸根离子在酸性溶液中的过饱和度。所以，实验需探究在不同环境下氟硅酸盐在酸性溶液中的过饱和度，即不同环境下酸性溶液对氟硅酸盐的溶解率。考虑盐酸中所含氯离子（Cl^-）对设备具有腐蚀性，会破坏钝化膜和引起电化学腐蚀[7]，导致设备性能下降和使用寿命缩短，故此实验采用硝酸溶液测定不同环境下对氟硅酸盐垢块的溶解率。

3.2 清洗方法

清洗液采用硝酸配制，具体工艺指标如温度、pH和清洗时间需根据实验得出最佳参数。因废水泵内泵腔和叶轮流道复杂，一般的静态浸泡清洗方式无法有效将不溶性杂质和分散的垢块清理出来。因此，需构建1套可动态调节关键参数的循环清洗装置，外部通过小型离心泵来实现清洗液在废水泵泵腔内的不间断流动，并辅以关键参数实时监测设备，便于人工及时调控，达到最佳清洗效果。

4 不同条件对垢块溶解率的影响实验

4.1 试剂与仪器

试剂：硝酸（HNO_3，阿拉丁生化科技股份有限公司），用于配制不同浓度的消洗液。

仪器：DC-0506型智能恒温槽、上海精其JA5103N电子天平、BPH-252型pH计。

4.2 静态浸泡实验

4.2.1 实验方法

为量化硝酸溶液对氟硅酸盐垢块的溶解率，实

验采用控制变量法，考察温度、硝酸浓度（以pH表征）和静态浸泡时间3个关键变量对溶解率的影响。

溶解率计算公式：

$$\eta=[(m_0-m_r)/m_0]\times100\%。\quad(5)$$

式中：η为溶解率，%；m_0为初始垢块质量，g；m_r为溶解后剩余垢块和沉淀物的总质量，g。

1）单因素静态浸泡实验设计

①温度对溶解率的影响实验：固定溶液pH为3（对应较高硝酸浓度），温度分别设定为25、45、65、80 ℃，浸泡时间12 h，测定不同温度下的溶解率。

②pH对溶解率的影响实验：固定温度t为25 ℃，用浓硝酸和去离子水分别配制不同pH（1、3、5、7）的硝酸溶液，浸泡时间12 h，测定不同pH下的溶解率。

③浸泡时间对溶解率的影响实验：固定温度t为25 ℃，pH为3，浸泡时间分别设定为2、8、12、24 h，测定不同浸泡时间的溶解率。

2）配制硝酸溶液

溶液采用去离子水配制，量取定量的去离子水加入锥形瓶中，插入pH计，按0.1 mL/次的滴入量，不断向锥形瓶中加入1.0 mol/L硝酸溶液，调节pH至实验值[8]。

3）操作步骤

准确称取约50 g氟硅酸盐垢样（m_0）置于500 mL锥形瓶中，加入200 mL配制好的硝酸溶液。用封口膜将瓶口密封以减少挥发，放入智能恒温槽中恒温静置。到达设定时间后，用已称量的0.3 μm滤膜针筒过滤器过滤取样，用少量去离子水清洗滤渣3次。将滤渣与滤膜一同置于100 ℃烘干箱中干燥至恒质量，称量后计算得到垢块和沉淀物的总质量m_r，每组实验平行3次，取平均值。测得垢块在不同pH、不同温度、不同浸泡时间下的溶解率。

4.2.2　实验结果与讨论

温度对垢块溶解率的影响见表1。

表1　温度对垢块溶解率的影响

Table 1　Effect of temperature on solubility of scale deposits

温度/℃	垢块溶解率/%	现象描述
25	19.3	少量沉淀,垢块不松散
45	22.6	少量沉淀,垢块不松散
65	32.2	微量沉淀,垢块呈松散状
80	46.4	微量沉淀,垢块呈松散状

由表1可知，随着温度从25 ℃升高至80 ℃，垢块溶解率从19.3%提高至46.4%，特别在45～80 ℃，溶解率提高尤为显著。通过观察现象，温度较低时（25～45 ℃）溶液中有少量沉淀，可能为H_2SiO_3或未完全溶解的氟硅酸盐和杂质，垢块外形基本完整；当温度升到65 ℃以上时，垢块明显松散脱落，溶液澄清有微量沉淀。表明温度升高会加速溶解反应，高温促进硝酸的氧化性，氟硅酸盐分解为可溶性产物（如KNO_3、$NaNO_3$、H_2SiF_6、HF等），溶解率随温度上升而显著增加[9]。

pH对垢块溶解率的影响见表2。

表2　pH对垢块溶解率的影响

Table 2　Effect of pH on solubility of scale deposits

pH	垢块溶解率/%	现象描述
1	42.7	无沉淀,垢块呈松散状
3	21.8	少量沉淀,垢块呈松散状
5	11.4	微量沉淀,垢块不松散
7	5.2	微量沉淀,垢块不松散

由表2可知，pH从7降至1，溶解率从5.2%显著提高至42.7%，在pH>3时，溶解率较低，当pH≤3时，溶解率显著提升，垢块在几小时内完全松散溶解。表明在强酸性条件（pH = 1～3）下，硝酸的高浓度H^+和NO_3^-离子共同作用，使氟硅酸盐快速分解，溶解率较高。pH升高（pH > 3），硝酸浓度降低，氧化性和酸性减弱，氟硅酸盐分解减少，溶解率显著下降。中性条件（pH=7）下，硝酸被中和为硝酸盐，氟硅酸盐仅以物理溶解为主，溶解率极低。

浸泡时间对垢块溶解率的影响见表3。

表3　浸泡时间对垢块溶解率的影响

Table 3　Effect of soaking time on solubility of scale deposits

浸泡时间/h	垢块溶解率/%	现象描述
2	7.2	少量溶解,垢块基本完整
8	18.1	少量沉淀,垢块部分松散
12	21.5	少量沉淀,垢块明显松散
24	23.6	大部分溶解,残留少量垢块

由表3可知，溶解过程在前8 h内速率较高，溶解率上升至18.1%。8 h后溶解速率明显下降，24 h时溶解率最终达到23.6%，趋于平衡。表明溶解率随浸泡时间的延长而提高，但增速逐渐放缓，前8 h的反应速率最快，24 h后接近饱和。

4.2.3　交互作用实验与改进

为进一步确定氟硅酸盐垢块溶解率的最佳工艺指标，设计温度（50、60、70 ℃）和pH（1、2、3）两个主要影响因素的交互实验。根据实验可知，浸泡时间在8 h前溶解速率较高，故实验时间固定为10 h，测定在不同温度和pH下的溶解率。

由表4可知，随着pH降低和温度升高，溶解率显著提高。当温度达到70 ℃，pH为1时，溶解

率达到最大值55.7%。但在较低温度和较高pH时，溶解率显著降低，仅有22.6%。

表4 不同温度和pH下浸泡的垢块溶解率

Table 4 Solubility of scale deposits after soaking at different temperatures and pH

温度/℃	不同pH下的垢块溶解率/%		
	pH=1	pH=2	pH=3
50	42.3	32.8	22.6
60	48.2	37.5	27.6
70	55.7	45.3	35.4

分析与改进：通过实验可知，温度和pH的变化，对氟硅酸盐垢块的溶解率均有明显影响，两者存在正向交互作用，即高温下降低pH可显著提高垢块的溶解率。因此，针对氟硅酸盐结垢清洗的方法，可通过提高溶液的温度和降低pH，提高垢块的溶解率，达到无损清洗的效果。因考虑到现场操作的安全与成本等因素，并非溶解率越高越好，即保持较高温度和维持较低pH带来的成本显著提高，且浓硝酸存在一定的腐蚀和安全风险。所以，选择温度在70 ℃左右、pH控制在1.0 ~ 1.5作为现场清洗的最佳工艺条件，可在保证高效清洗的同时，兼顾安全与经济性。

4.3 动态循环模拟实验

静态浸泡实验不能完全模拟废水泵内溶液循环流动、冲刷垢块的效果，因此，需搭建一个动态循环装置来验证垢块的清洗效果。

4.3.1 实验装置和方法

实验装置如图1所示，将已知质量（约300 g）的垢块装入一个多孔的样品笼中，放入不锈钢容器中。在不锈钢容器上方放置一个搅拌器，用以搅拌容器中的硝酸清洗液，模拟废水泵内的介质流动。

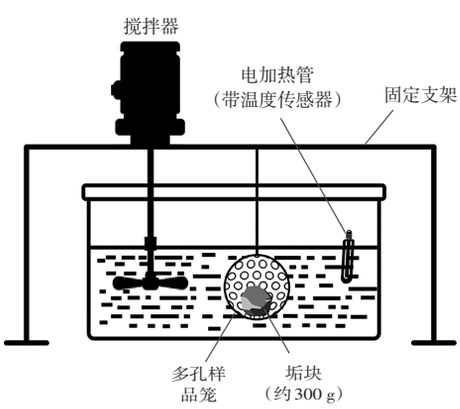


图1 动态循环模拟实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the dynamic cyclic simulation experiment set-up

配制一定体积的硝酸清洗液，液面高度完全浸没垢块，初始硝酸pH设为1.0，清洗液温度控制在50 ~ 70 ℃，溶液中放入电加热管和温度传感器，设定温度低于55 ℃时自动加热，保证溶液温度。

装置搭建完成后启动搅拌器，使硝酸清洗液以一定流速流经样品笼，运行时间设为8 h，定期观察垢块的变化。达到运行时间后，取下多孔样品笼，称取剩余垢块质量，计算出动态循环条件下的垢块溶解率。

4.3.2 实验结果与讨论

实验现象如表5所示，在硝酸溶液动态循环的条件下，溶解过程明显加快。运行6 h后，垢块完全解体为细小颗粒，样品笼中仅剩余少量的惰性杂质残渣，溶解情况好于静态浸泡实验（温度70 ℃，pH=1）下的最佳溶解情况。8 h后，取出样品笼，最终测得的溶解率约为87.4%，高于相同温度、pH和时间下的静态实验结果（约55.7%）。

表5 动态循环实验垢块的溶解现象

Table 5 Dissolution phenomenon of scale blocks under dynamic circulation experiment

运行时间/h	现象描述
2	容器内无沉淀，垢块体积明显变小，整体基本完整
4	容器内少量沉淀，垢块体积进一步变小，部分松散
6	容器内少量沉淀，垢块松散，分解为细小颗粒于样品笼底部
8	容器内少量沉淀，垢块松散，与6 h时观察的现象无明显差别

对比动态和静态实验结果，动态循环清洗法较静态浸泡的优越性主要体现在以下两个方面：一是强制对流显著增强了传质过程，通过溶液流动不断将新的H^+和NO_3^-带到垢块表面反应，并及时将反应产物（K^+、Na^+、H_2SiF_6等）和杂质移走，避免因局部产物浓度饱和从而抑制反应速率；二是流体的剪切力对垢块具有物理剥离作用，能加快垢块的崩裂和脱落，暴露出新的反应面，增加反应面积。以上现象和结果表明采用动态清洗的方法比静态浸泡下垢块的溶解更加高效、彻底，也完全适用于清洗废水泵这类具有复杂流道和结构的设备。

4.4 实验结论

本次实验采用多种方式，测定氟硅酸盐垢层在动态和静态条件下不同温度、pH和作用时间等因素对垢块溶解率的影响。实验结果表明。

（1）氟硅酸盐垢层在硝酸溶液中能有效溶解，在静态条件下，提高清洗液的温度，降低pH，延长作用时间皆可显著提高溶解率。且同时在温度大

于60 ℃、pH小于3、作用时间大于8 h时，溶解率达到最大。

（2）动态循环清洗较静态浸泡的方式，具有提高传质效果和物理剥离的作用，能大幅度提升溶解率和最终除垢率，同时还可通过清洗液的流动，及时将不溶性的杂质带离出来，是适合泵体这类复杂结构设备清洗的理想方式。

5　清洗工艺设计

5.1　系统隔离

拆除废水泵进出口大小头，脱开电机，采用法兰盲板的形式开孔后，与循环清洗装置连接。在废水泵出口设置一个节流阀，使泵腔内充满一定压力，使叶轮在循环泵的作用下缓慢旋转，达到均匀清洗的效果。

5.2　清洗液配制

废水泵循环清洗液用量约0.8 m^3，硝酸质量分数为40%，配制pH<2的硝酸清洗液来进行清洗，电加热器控制温度在50 ~ 70 ℃。

5.3　动态循环装置

选用1.5 m^3的316 L不锈钢容器[10]、316 L不锈钢小型离心泵（耐80 ℃左右温度）、DN50的316 L不锈钢管道、316 L不锈钢闸阀、316 L不锈钢电加热器组成一套循环清洗装置（见图2）。

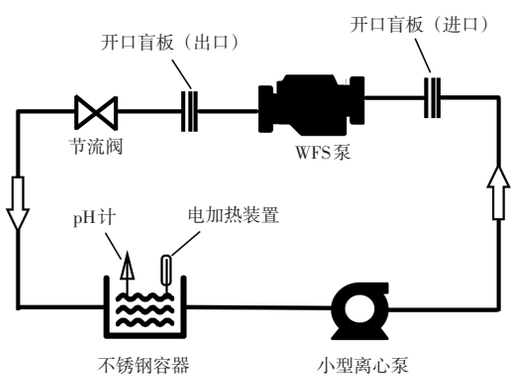


图2　动态循环清洗装置示意图

Fig. 2　Schematic diagram of dynamic circulating cleaning device

在脱开电机的WFS废水泵进出口分别设置盲板并开孔，出口盲板后接一个节流阀。通过不锈钢管道将进出口盲板开孔处连接起来。在管道中间分别设置一个不锈钢容器和小型离心泵，构成闭合回路。通过小型离心泵实现硝酸清洗液的循环清洗效果，同时采用pH计和电加热装置实时监测并人工调节清洗液温度和pH。

5.4　清洗液浓度维护

当硝酸清洗液的pH>3时补加浓硝酸使pH达到初始值。

5.5　清洗流程

首先，启动电加热器加热硝酸清洗液，控制温度不超过70 ℃；其次，启动小型离心泵开始清洗，并注意保证温度不低于50 ℃。在不断反复清洗过程中，按适当的比例添加一定量硝酸以保持清洗效果。最后，在清洗8 ~ 10 h后停止清洗，回装泵后试运行以检查清洗效果。

5.6　安全防护和清洗液处理

废水泵在清洗过程中处于封闭状态，仅用于调节pH和控制温度的316 L不锈钢容器未完全封闭，清洗过程中应注意避免眼睛和皮肤接触到清洗液或硝酸。因清洗液和硝酸具有一定腐蚀性，在沾染到皮肤时立即用清水冲洗即可。

渣场输送的酸性废水自身的pH在2.0左右，故使用硝酸调配的清洗液在完成清洗后，可直接全部回收至蓄水池，再经废水泵输送至下游装置循环利用。

6　结论

硝酸循环清洗法在50 ~ 70 ℃下对氟硅酸盐垢块有效溶解，使垢块分散脱落，垢块去除率 > 95%。回装启泵运行后，废水泵从清洗前的输送流量不到140 m^3/h，恢复至清洗后的输送流量达190 m^3/h以上，泵的振动和温度值都在正常范围内，泵效恢复至未结垢前最佳状态。

此次循环清洗费用包含材料、安装、运行等，约5 000.00元，较传统人工机械清理和添加化学试剂等方式，清洗效果好，清洗周期延长。未采取硝酸循环清洗法前，人工清洗后，流量仅恢复至额定流量的80%左右；采用硝酸清洗法后，流量恢复至额定流量的95%以上，且对部门生产影响小，减少了人力和物力成本。

通过此次清洗，可以考虑建立易操作、安全性更高的循环清洗装置。但此循环清洗方法不适用回水管、渣浆管的结垢清洗。同时，根据矿质的不同，酸性废水中的各元素和含量也都不相同，具体溶解率和清洗效果要根据实际实验结果得出。

［参考文献］

［1］ 张波. 磷石膏渣场酸性废水代替磷矿浮选中硫酸试验[J]. 广州化工, 2021, 49(23):114-117.
ZHANG B. Experiment study on Substitution of Acid Wastewater from Phosphogypsum Slag Field for Sulfuric Acid in Flotation of Phosphate Ore [J]. Guangzhou Chemical Industry, 2021, 49(23):114-117.

（下转第114页）