某铀矿废水处理自动控制系统的研究与应用

高 志[1],侯 录[1],侯 江[1],伍宪玉[1],邱军军[1],刘红军[2],闫 晔[3]

(1. 核工业北京化工冶金研究院,北京 101149;
2. 中核北方铀业有限公司,辽宁 葫芦岛 125100;
3. 中国工程院战略咨询中心,北京 100088)

摘要:针对某铀矿废水处理工艺不完善、自动化水平低、工艺参数调试不稳定等问题,采用西门子 1500 系列 PLC 作为控制系统,控制过程包括自动配碱、自动配酸、石灰过碱中和、PID 自动调节 pH、废水自动排放等。自动调节 pH 采用分段增益方法,使得废水回调过程更快,抗干扰性更强。该控制系统以 WinCC 7.4 作为上位系统进行远程监控与控制,依靠先进的网络技术、自动化技术,实现了数据自动采集、在线监测报警、参数自动调节、执行机构自动控制等功能,实现了废水处理过程的无人值守,保证了铀矿废水处理工艺连续、安全、稳定运行。

关键词:铀矿;废水处理;pH 回调;PID 自动调节;自动控制

中图分类号:TP273 **文献标志码**:A **文章编号**:1000-8063(2023)02-0046-06

DOI:10.13426/j.cnki.yky.2022.09.01

中国北方某铀矿共有 2 个工区,目前处于关停维护阶段,2 个工区的矿井均已实施淹井。现阶段维护内容主要包括实时监测尾渣库渗出水 pH、铀、锰等超标情况,并采用“石灰过碱中和除锰、除铀—浓密澄清—加酸回调 pH—砂滤”工艺处理渗出水。石灰过碱中和处理后的废水 pH 偏高,需加入硫酸进行回调,使处理后的废水符合《铀矿冶辐射防护和环境保护规定》(GB 23727—2009)的排放要求。

由于 pH 调节过程存在非线性和滞后性问题,pH 的检测和控制并非易事[1-3]。目前铀矿山废水处理工艺不完善,自动化水平低,工艺参数不稳定,石灰加入量、pH 回调加酸量等参数控制不准确,造成处理后的废水指标不稳定;而且手动操作劳动强度大,工人作业环境差,人为因素影响较大,不利于实现本质环保,也不满足数字铀矿山的发展目标[4-5]。因此,需要建立废水处理自动控制系统,实现废水安全达标排放。

1 废水处理工艺自动控制系统

在分析该矿区废水处理工艺过程的基础上,确定主要在石灰配制、硫酸配制、pH 回调、废水中和、废水自动排放等工艺环节,实现自动化控制。所有操作工艺均使用先进的 PLC 进行控制,并结合由工控机和软件组成的上位系统对现场数据进行采集、分析和处理。

设计采用远程控制系统、在线监测仪表、自动执行机构、PLC 控制器编程,实现自动配制石灰浆和稀释硫酸、自动回调 pH、自动控制废水外排,从根本上解决人为因素对废水处理的干扰,实现废水处理过程自动化。

自动控制系统采用 3 层网络结构,包括现场设备层、过程控制层、监控层,现场设备层包括变频器、变频计量泵、自动控制阀、在线监测流量仪表、在线 pH 分析仪、在线监测液位计,以及远传式压力变送器;过程控制层采用西门子 1500 系列 PLC;监控层采用西门子组态软件 WinCC 7.4。监控层与过程控制层之间通过光纤以太网进行连接,实现对工艺过程控制的远程监控[6]。系统结构见图 1。

自动控制系统配置包括硬件部分和软件部分,硬件部分有工控机、西门子 1500 系列 PLC、

收稿日期:2022-09-01

第一作者简介:高志(1987—),男,内蒙古巴彦淖尔人,硕士,工程师,主要从事铀矿山自动化研究工作。

模拟量处理模块、数字量处理模块、通讯模块、光纤收发器、交换机，以及 NVR 硬盘录像机；软件部分有上位机 WinCC 组态软件（用于监控系统的开发）和下位机编程软件 TIA Portal V15（用于逻辑控制、PID 控制功能的开发）[7]。

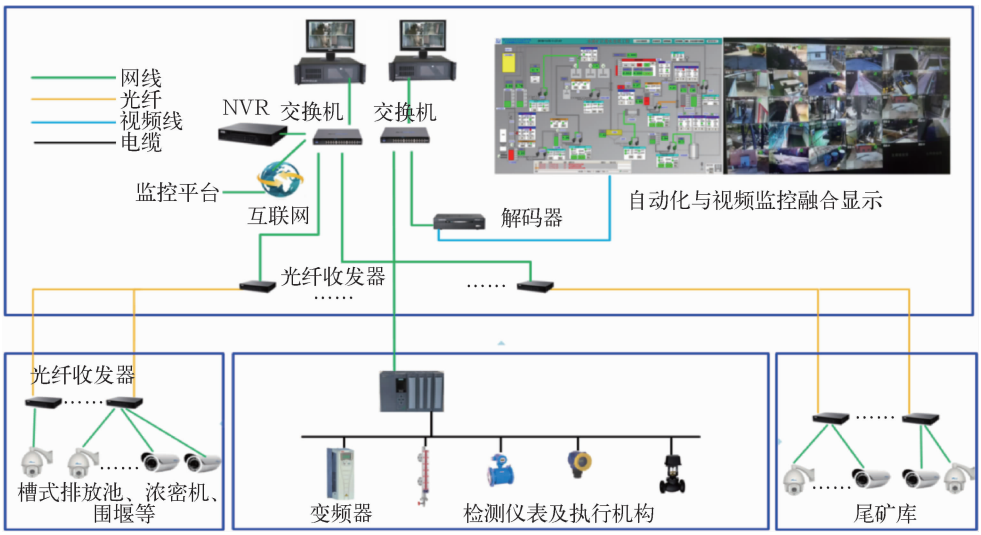


图 1　自动控制系统结构示意图

Fig. 1　Structure of automatic control system

2　废水处理工艺自动控制过程

pH 回调工艺流程见图 2。主要对石灰浆配制过程、石灰过碱中和过程、浓密固液反应系统、过滤器系统等进行自动控制。

2.1　应急池液位自动控制

废水从尾矿库自流进入应急池，应急池装有液位计，实现对泵的高启、低停自动控制。通过泵将废水恒速打入一级反应槽中，使废水与石灰浆在反应槽中进行充分反应。

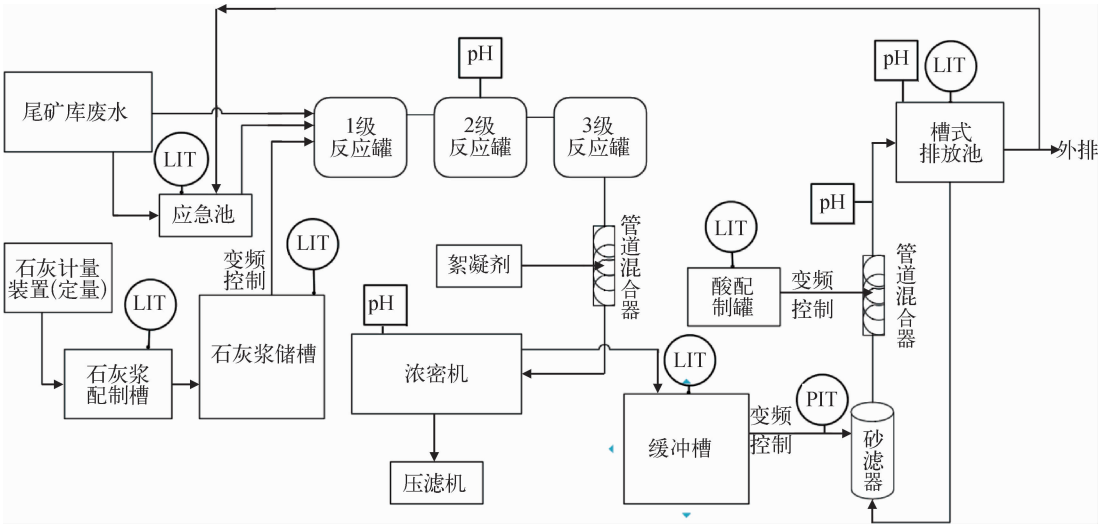


图 2　pH 回调工艺流程示意图

Fig. 2　Process flow diagram of pH callback

2.2 石灰浆配制过程自动控制

通过石灰存储及计量装置自动定量配制石灰浆，保证配制的石灰浆浓度为定值，方便 pH 回调对象稳定，消除被调对象滞后问题。

石灰浆配制槽配有液位计，由液位计控制加入槽内的水量；PLC 采集该装置的远程信号，通过上位机远程控制螺旋给料机，放入定量的石灰。在上位机进行实时监测加入的石灰质量，待质量达到要求后，关闭石灰计量配料阀。远程控制石灰浆配制槽内的搅拌电机，使水和石灰充分混合。配制好的石灰浆用泵打入石灰浆储槽，然后通过变频泵将石灰浆按照一定的流量均匀输送至一级反应槽。

2.3 石灰过碱中和自动控制系统

石灰过碱中和除锰、除铀系统配置 3 级反应槽，废水在反应槽中与石灰浆发生充分反应，去除水中的铀和锰，使溶液中的金属含量符合规定；反应后的混合溶液自流进入浓密机处理系统。

二级反应槽中装有 pH 计，pH 可以通过上位监控系统进行设定，一般 pH 设定在 11～12；PLC 程序可根据该 pH，联锁控制石灰浆变频器的频率，从而控制反应槽内的反应速度。

2.4 浓密机自动控制系统

该系统包括絮凝剂自动控制和浓密机固液反应系统控制。

絮凝剂有助于加快混合溶液中沉淀物的凝结沉降。通过加入定量的絮凝剂及定量的水（由自动阀控制），配制恒定浓度的絮凝剂溶液。采用絮凝剂计量泵将浓度一定的絮凝剂溶液打入管道混合器，自动控制絮凝剂溶液的加入。

絮凝剂和 3 级反应槽流出的混合溶液经过管道混合器充分混合后，进入浓密机进行固液分离。将沉积到浓密机底层的固体物，通过渣浆泵打入压滤机进行处理；浓密机上层清液自流进入缓冲槽。浓密机装有 pH 计，实时检测上层清液的 pH；若 pH 出现较大波动，则及时调整石灰过碱中和系统，保证被控对象的稳定。

2.5 缓冲槽液位控制

缓冲槽的溶液采用变频泵打入砂滤器过滤。为保证缓冲槽内有充足的废水，在缓冲槽内设置液位计，液位计与变频出液泵进行联锁控制，通过 PLC 控制变频器频率进而调节出液泵的运行频率，保证砂滤器的水量稳定。

2.6 过滤器自动控制系统

PLC 根据采集到的砂滤控制系统信号，可自动启动和控制砂滤器反冲洗过程。反冲洗过程可保证砂滤器的过滤效果和延长砂滤器的使用寿命，从而保证生产系统的稳定性。

采用变频器控制砂滤进液泵的输出功率，砂滤器的进水管道上装有远传式压力变送器，可将管道压力传送到 PLC，PLC 根据压力值实时监视进水的恒定性；砂滤器的出水管道上装有流量计，实时监视出水的恒定性。恒定水量可减少 pH 回调中 PID 控制的干扰因素。

过滤后的废水进入管道混合器，充分混合，达到中和溶液、稳定 pH 的目的，以减少 PID 控制的滞后性。安装于管道混合器后的 pH 计，测量出液的 pH，通过 PLC 调用 PID 程序块，执行 pH 回调功能程序，实现 pH 回调自动控制。

3 pH 回调自动控制系统

3.1 自动配酸系统

在配酸槽安装磁翻板液位计，在浓硫酸管道上安装电磁流量计，在自来水管和浓硫酸管道上分别安装电动阀。液位计和流量计远传信号通过 PLC 模拟量处理模块采集至控制系统，通过 PLC 编程实现液位计、自动阀的联动控制，从而完成配酸过程的自动控制。

通过上位机监控系统设置配酸相关参数后，启动自动配酸系统。系统通过检测程序先判断阀门状态、配酸槽液位高度、系统状态等是否满足条件，如满足条件则 PLC 发出控制命令，自动打开进水阀，配酸槽液位信号实时传输至控制系统；当程序检测达到设定高度后，发出浓硫酸进酸阀打开控制命令，浓硫酸自流加入，通过流量计计量浓硫酸加入量，程序自动计算浓硫酸累计流量，达到指定值后自动关闭进酸阀，配酸完成。

3.2 pH 回调 PID 自动控制系统

常规 PID 控制只有 1 个固定的比例增益，若参数设置过大，系统不稳定；若参数设置过小，响应速度慢。为此，笔者采用分段式变增益 PID 调节算法[8-9]，根据 pH 特性曲线用分段折线来近似非线性特性曲线（图 3），将 pH 特性曲线分成 3 个区段，1 个高增益区，2 个低增益区（图 4）。可以看出，在高增益区，PID 采用低比例增益，降低调节速度，防止过调或系统发散；在低增益

区，采用高比例增益，让系统在偏离设定值时能快速调节至设定范围。在不同的低增益区，PID 控制采用不同的高比例增益，使开环总增益为常数[10]。

设计的 pH 回调 PID 自动控制系统将增益系数变成 3 个，从而将非线性系统补偿为线性系统进行控制，实现了 pH 调节的优化控制。pH 回调自动控制系统程序包括信号的采集、发送、控制器计算、设备故障报警等模块。

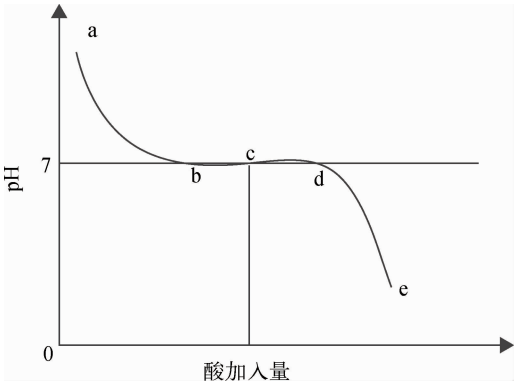


图 3　pH 回调工艺特性曲线

Fig. 3　pH callback characteristic curve

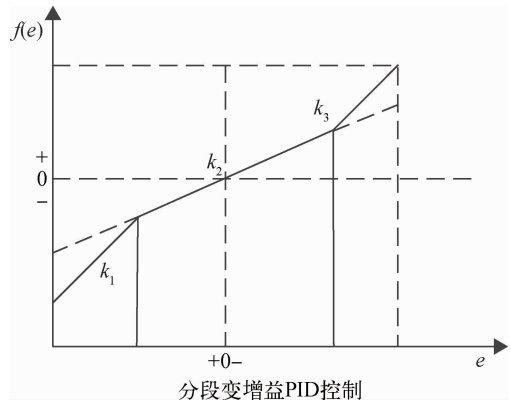


图 4　分段式变增益回调 pH 示意图

Fig. 4　Schematic diagram of interval gain regulation of pH callback

3.2.1　系统控制原理

本系统采用管道式pH在线分析仪，实时在线监测外排水的 pH，当 pH＞7（设定值）时，通过控制器计算设定值与反馈值偏差，输出信号控制酸计量泵变频器的运行频率，加大进酸量；当 pH 偏小时，则减少酸计量泵的出酸量。通过上位机设定 pH 上下限值，一旦超出限值，则维持上一时刻输出值。

PID 控制器的参数整定是控制系统设计的核心内容，根据被控过程的特性确定 PID 控制器的比例系数、积分时间和微分时间的大小。采用临界比例法进行 PID 控制器参数整定，步骤如下：1）首先预选择 1 个足够短的采样周期让系统工作；2）仅加入比例控制环节，直到系统对输入的阶跃响应出现临界振荡，记录此时的比例放大系数和临界振荡周期；3）在一定的控制度下通过公式计算得到 PID 控制器的参数[11]。

pH 回调自动控制系统正常运行时，通过系统恒流量控制环节控制砂滤进液泵变频器的运行频率，系统将 pH 在线分析值经过模块处理输入至 PLC，与上位机设定值进行比较计算；PLC 根据 pH 反馈值自动选择增益系数进行 PID 控制器输出计算，通过输出模块将得出的控制量赋值给酸计量泵变频器，调节酸计量泵运行频率进而控制硫酸的加入量，达到 pH 设定值要求。系统具有故障诊断功能，当酸计量泵、变频器、pH 在线分析仪出现故障报警时，控制系统按照工艺要求自动切断、关闭相应的阀、泵，以免造成不必要的损失[12]。

3.2.2　PID 工艺对象程序组态

PID 工艺对象程序组态见图 5。通过 PLC 对所组态的 PID 工艺对象进行调试，得出系统自动调试的最佳 P 和 I 参数。在手动 PID 调节过程中也可参照上述参数进行 pH 回调。

3.3　外排废水安全控制系统

在废水排放池安装 pH 计，实时监控外排废水。PLC 会根据废水 pH 和排放池的液位计参数自动控制废水外排，当达到排放液位且 pH 满足要求时，自动开启电动阀进行废水外排；当检测到 pH 不符合要求时，自动启动返回泵，将排放池中的废水返回应急池，重新进行回调处理。

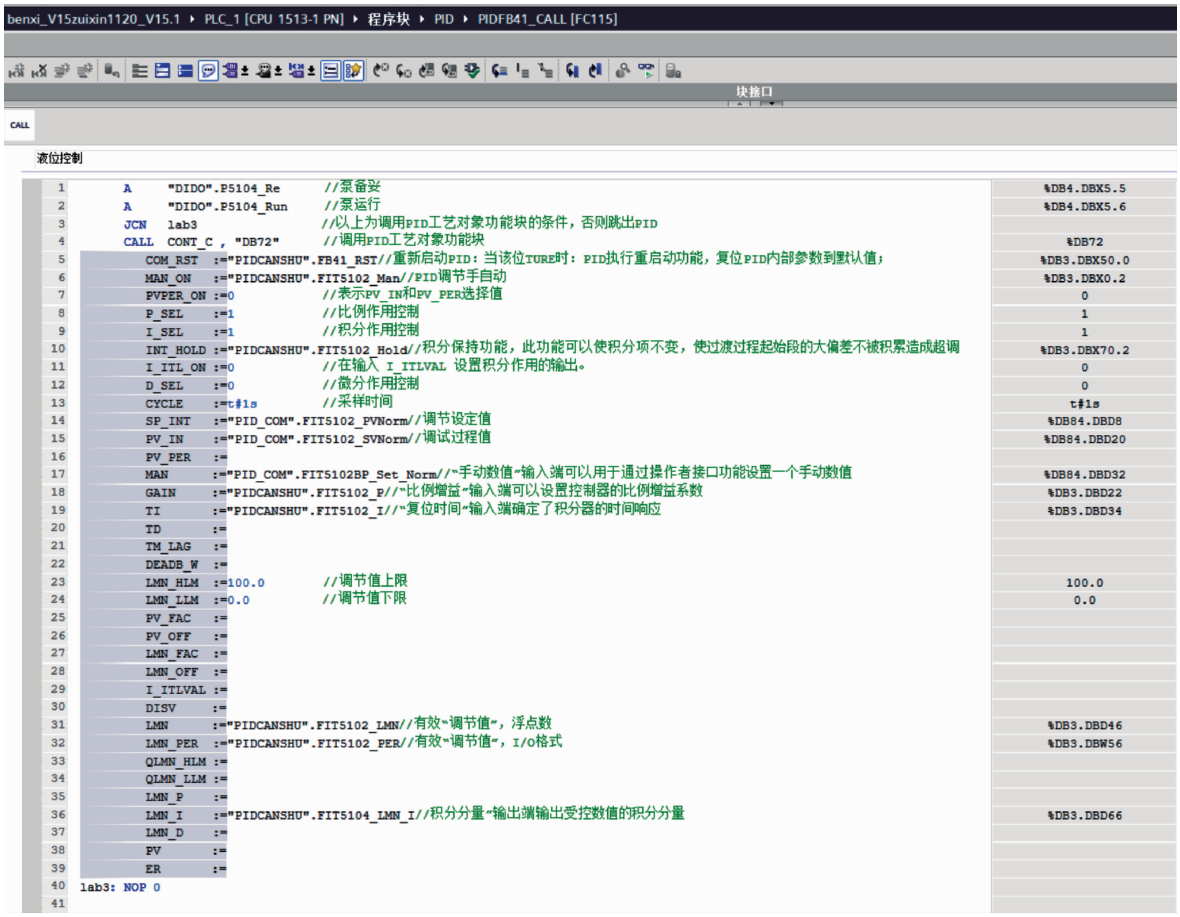


图 5 PID 工艺对象部分程序组态

Fig. 5 Program configuration of PID process object

4 上位机监控系统

本系统上位机监控画面主要包括工艺流程总画面、参数设置画面、数据查询画面、报警画面等，其中配酸过程参数设置及操作在工艺流程总画面中实现；pH 回调自动化控制、石灰自动配制、砂滤过滤器控制等，可在单独画面中实现。在工艺流程总画面中，可以实时查看整个工艺设备的状态及设备、仪表参数[13]。

配酸过程监控画面有手动、自动切换按钮，正常情况下，设置液位、流量后，点击加酸按钮，系统自动完成配酸过程，遇到突发情况或者设备出现故障时，切换至手动配酸。

pH 回调自动控制操作画面有手动、自动控制功能，正常运行时，按工艺要求设定 pH 控制上下限和初始 P、I 参数，点击自动按钮，系统自动调节 pH 使其稳定在要求范围；遇到突发情况，点击手动按钮，手动输入酸计量泵频率，控制加酸速度。画面上有趋势显示功能，方便操作人员了解调节过程的各种参数，分析过程是否正常。

在历时 10 d 的调试过程中，通过调节酸计量泵的频率，自动调节后 pH 始终保持在 7 左右，pH 波动较小，能稳定满足自动控制和外排要求。

5 结论

在废水处理过程中采用了多种自动、联锁及分段式变增益 PID 调节算法控制技术，通过在线监测仪表实时回传各系统参数，对 pH 回调进行了自动调节和精准控制。该自动控制系统降低了操作人员的劳动强度，提高了生产工作效率及矿山智能化程度，保证外排废水 pH 稳定符合要求。

参考文献：

[1] 郭红霞，刘磊. pH 值控制方法的研究[J]. 价值工程，2012，31(6)：283-284.

[2] 黄美春，汪雄海. 含铜废水 pH 值控制系统设计与实

现[J]. 科技通报，2009，25(5)：659-663.
[3] 邹吉慧. 矿浆中和槽计算机控制系统的设计与开发[D]. 沈阳：东北大学，2010.
[4] 关键，侯江，邢妍. 数字地浸铀矿山顶层设计研究[J]. 铀矿冶，2021，40(2)：134-138.
[5] 关键，侯江，苏艳茹，等. 数字铀矿山发展思路[J]. 铀矿冶，2017，36(4)：241-247.
[6] 伍宪玉，侯江，侯录，等. 地浸铀矿山自动化和信息化系统融合设计及应用[J]. 湿法冶金，2021，40(6)：523-526.
[7] 伍宪玉，侯江，施建明，等. 计算机自动监控在通辽某地浸采铀系统中的应用研究[J]. 铀矿冶，2013，32(4)：189-194.
[8] 郭红霞. pH 值控制方法研究及其控制器的设计[D]. 西安：西安科技大学，2008.
[9] 金海峰，张琳，朱利强，等. 废水处理中 pH 值的在线监控系统[J]. 西安理工大学学报，2004(2)：194-198.
[10] 郑辑光，韩九强，杨清宇. 过程控制系统[M]. 北京：清华大学出版社，2012.
[11] 李友善. 自动控制原理[M]. 北京：国防工业出版社，2011.
[12] 张彩萍，侯江，侯录，等. 水冶吸附塔进液流量智能控制浅析[J]. 铀矿冶，2018，37(2)：104-107.
[13] 侯录，侯江，闫晔，等. 基于自整定 PID 自动调节地浸抽液流量[J]. 铀矿冶，2018，37(4)：273-277.

Research and Application of Automatic Control System for Waste Water Treatment in a Uranium Mine

GAO Zhi[1], HOU Lu[1], HOU Jiang[1], WU Xianyu[1], QIU Junjun[1], LIU Hongjun[2], YAN Ye[3]
(1. Beijing Research Institute of Chemical Engineering and Metallurgy, CNNC, Beijing 101149, China;
2. North Uranium Co., Ltd., CNNC, Huludao 125100, China;
3. Strategic Consulting Center of Chinese Academy of Engineering, Beijing 100088, China)

Abstract: In view of the problems such as imperfect waste water treatment process, low automation level and unstable process parameter commissioning in a uranium mine, Siemens 1500 series PLC is used as the control system, the control process includes automatic alkali dispensing, acid dispensing, lime over alkali neutralization, PID automatic pH adjustment, automatic wastewater discharge and other functions. The pH callback adopts the segmented gain method, which makes the waste water callback process is faster and more anti-interference. WinCC 7.4 is used as the upper system for remote monitoring and control. The control system, relying on advanced network technology and automation technology, realizes the functions of automatic data collection, online monitoring alarm, automatic parameter adjustment, automatic control of the actuator, etc., realizes unattended wastewater treatment process, and ensures continuous, safe and stable operation of uranium mine waste water treatment process.

Key words: uranium mine; waste water treatment; pH callback; PID automatic adjustment; automatic control