

引用格式:陈亮. 金属矿山井下排水自动化系统优化与应用研究[J]. 有色设备, 2025, 39(6): 81-87.

CHEN Liang. Research on optimization and application of underground drainage automation system in metal mine[J]. Non-ferrous Metallurgical Equipment, 2025, 39(6): 81-87.

金属矿山井下排水自动化系统优化与应用研究

陈亮

(中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038)

[摘要] 国内有色金属矿山井下排水系统自动化程度参差不齐, 大多数大中型矿山井下排水系统已基本实现自动排水, 部分中小型矿山自动化水平仍相对较低, 以现场人工手动操作为主, 已实现自动排水的矿山也存在自动化程度低、控制系统相互独立和数据无法实现共享等问题。本文对目前有色金属矿山井下排水泵房的自动化现状进行了阐述, 提出了基于 SCADA 数据采集与监控系统的井下排水泵房自动化改造方案, 并对改造方案的网络结构、检测和控制内容、水泵启动过程、控制方式等进行了详细说明。井下排水系统改造后, 操作人员可在地表控制室内集中监控井下各排水泵房运行状态, 同时消除了各排水泵房控制系统之间“信息孤岛”, 实现排水系统的无人值守。该改造后运行效果证明, 成本控制效果显著, 人工成本从 5 000 美元/t 铜降低至 4 000 美元/t, 年节约人工成本约 70 万美元。

[关键词] 排水泵房; 自动化改造; SCADA; RTU; 冗余; 矿山; 控制系统

[中图分类号] TD744

[文献标志码] A

[文章编号] 1003-8884(2025)06-0081-07

DOI: 10.19611/j.cnki.cn11-2919/tg.2025.06.011

0 前言

随着信息技术、通信技术和计算机技术的快速发展以及局域网和以太网的广泛普及, 计算机、传感器和网络通信设备等硬件设备的性价比大幅提升, 各类远程监控系统在矿业行业得到了广泛应用, 有色金属矿山行业的自动化控制和管理水平取得了显著提升。国内外越来越多的有色金属矿山, 通过对现有矿山设施进行自动化改造和升级, 取得了显著的经济和社会效益^[1-2]。

井下涌水不仅会影响矿山的生产进度, 还可能对井下作业人员的安全造成威胁。因此, 及时将井下积水排放至地表, 确保井下作业人员、机械设备以及电气设施能够在安全的环境中正常运作, 显得尤为重要^[3-4]。矿山井下排水系统一般由主、副水仓、排水管线、多级离心泵及各种检测仪表和电动阀门等组成^[5-7]。排水系统的自动化水平, 在一定程度上代表了矿山的现代化程度。国内大多数大中型矿山和新建矿山井下排水系统已基本实现自动排水, 但也存在自动化程度低、控制

系统相互独立和数据无法实现共享等问题。部分中小型矿山自动化水平仍相对较低, 以现场人工手动操作为主, 传统的人工操作存在以下问题。①可靠性和工作效率低: 人工操作时, 主要由操作人员依据水仓水位高低及个人经验判断投入水泵的数量, 对操作人员经验依赖性较高, 存在误操作或操作不当的可能性^[8]; ②设备利用率低: 操作人员一般根据个人经验选择水泵开关, 易造成水泵不能有效轮转工作, 部分水泵过早磨损甚至损坏, 长期不用的水泵出现无法启动的情况。

基于此, 本文结合国外某矿山自动化改造项目, 提出基于 SCADA 数据采集与监控系统的排水泵房自动化改造方案, 解决目前矿山企业井下排水泵房普遍存在的自动化水平低、水泵运行状态无法远程监控、泵房之间数据无法共享等问题。

1 现有矿山井下排水系统

该矿山井下排水系统包括: 948 mL 水泵房、700 mL 水泵房、500 mL 水泵房、448 mL 水泵房和 400 mL 水泵房, 5 个排水泵房采用接力排水方式将

[收稿日期] 2025-08-06

[第一作者] 陈亮(1985—), 男, 辽宁沈阳人, 高级工程师, 主要从事矿山行业自动化、智能化设计与研究工作。

各区域地下水输送至地表水仓内。各排水泵房配置 见表 1。

表 1 排水系统配置
Table 1 Drainage system configuration

泵房位置	水泵台数/台	工作方式	主排水管路数量/根	水泵出口阀门数量/台	排水终点
948 mL 水泵房	6	2 台工作 4 台备用	2	2	400 mL 水泵房水仓 448 mL 水泵房水仓
700 mL 水泵房	4	2 台工作 2 台备用	1	1	400 mL 水泵房水仓
500 mL 水泵房	3	2 台工作 1 台备用	1	1	448 mL 水泵房水仓
448 mL 水泵房	6	2 台工作 4 台备用	2	2	地表水仓
400 mL 水泵房	3	1 台工作 2 台备用	1	1	地表水仓

表中:948 mL 水泵房配置 6 台高压水泵,采用 2 台工作、4 台备用的运行方式,每台水泵出口管路设置 2 台手动阀门,2 根排水管路分别送至 400 mL 水泵房水仓和 448 mL 水泵房水仓;700 mL 水泵房安装 4 台高压水泵(2 台工作、2 台备用),每台水泵出口管路设置 1 台手动阀门,通过 1 根排水管路将水排至 400 mL 水泵房水仓;500 mL 水泵房安装 3 台高压水泵(2 台工作、1 台备用),每台水泵出口管路设置 1 台手动阀门,1 根排水管路分别送至 448 mL 水泵房水仓;448 mL 水泵房安装 6 台高压水泵(2 台工作、4 台备用),每台水泵出口管路设置 2 台手动阀门,通过 2 根排水管路送至地表水仓;400 mL 水泵房安装 3 台高压水泵(1 台工作、2 台备用),每台水泵出口管路设置 1 台手动阀门,通过 1 根排水管路排至地表水仓。

整个排水系统采用人工值守与现场手动操作的工作方式。现场需要大量操作人员,同时因井下水量较大、水质较差,造成水泵连续运转故障率高、维护量较大等问题。原有排水系统主要检测和控制内容如下。

1) 排水泵设有就地控制箱,负责水泵现场启停控制;

2) 水泵和电机轴承温度、电机绕组温度现场仪表盘进行显示和报警;

3) 水泵电机电流现场显示;

4) 水泵磨损环检测和现场报警;

5) 清水仓、污水仓设有液位开关现场报警;

6) 水泵出口阀门手动操作。

2 自动化改造方案

该矿山采用基于 SCADA 数据采集和监控系统对井下排水系统进行自动化改造,具体改造内容如下。

1) 在各水泵房配电室内新增远程终端单元(Remote Terminal Unit, RTU),并在机柜上设置触摸屏,实现地表控制室和现场的两地监控;

2) 排水泵出口管路手动阀门增加电动执行机构,可远程控制阀门开关;

3) 为排水泵设置新的现场控制箱,配置就地/远程切换按钮,可远程控制水泵启停;

4) 配置振动、压力和流量等检测仪表;

5) 对水泵和电机本体的仪表信号进行采集;

6) 增设排水泵房污水仓、清水仓液位检测仪表;

7) 增配智能电流表,采集电机设备的电压、电流、功率和电能等数据;

8) 将全部检测和控制信号接入泵房 RTU,实现地表控制室远程监控;

9) 取消泵房内固定岗位人员,在各泵房配电室 RTU 柜的触摸屏上设置巡检人员操作界面,巡检人员在巡检完成后,需要在触摸屏上手动完成巡检信息的输入,系统根据巡检人员的操作生成包含巡检人员姓名、巡检项目、巡检时间、故障状态等信息的巡检报表。在规定时间内未完成巡检信息的输入,系统将报警^[9]。

3 数据采集与监控(SCADA)系统

数据采集与监控(SCADA, Supervisory Control

and Data Acquisition) 系统是一种用于工业过程自动化的系统,能够对分布在不同地点的设备进行远程监视和控制。SCADA 系统具有数据采集、设备控制以及各类参数报警等功能。

3.1 系统组成

SCADA 系统主要由工程师站、操作员站、数据服务器、历史数据服务器、环网交换机以及远程终端单元 RTU 组成。RTU 是 SCADA 系统的基本组成单元,安装在现场各泵房配电室内,用来监视和控制泵房内的传感器和电气设备。

SCADA 数据服务器采用双机热备冗余的工作方式,主备服务器数据实时同步,并可在线进行无缝切换,服务器可通过通信网络访问各泵房内远程 RTU,获取整个排水系统运行数据、设备状态及报警

信息,发送控制指令至各泵房 RTU,同时为网络中其他服务器和监控站提供实时数据;历史数据服务器主要用于完成历史数据的存储和管理,并为网络中的其他服务器和监控站提供历史数据。工程师站用于系统的组态和编程、监控画面绘制及维护等工作。操作员站作为人机接口,主要用于监控现场设备的工作状态和运行数据。

3.2 网络结构

SCADA 系统的网络结构如图 1 所示。井下部分网络采用环网拓扑结构,由 400 mL、448 mL、500 mL、700 mL、948 mL 各区域环网交换机和地表工业交换机,构成环网结构,采用环网协议进行链接。RTU 和环网交换机之间采用端口冗余的方式接入。

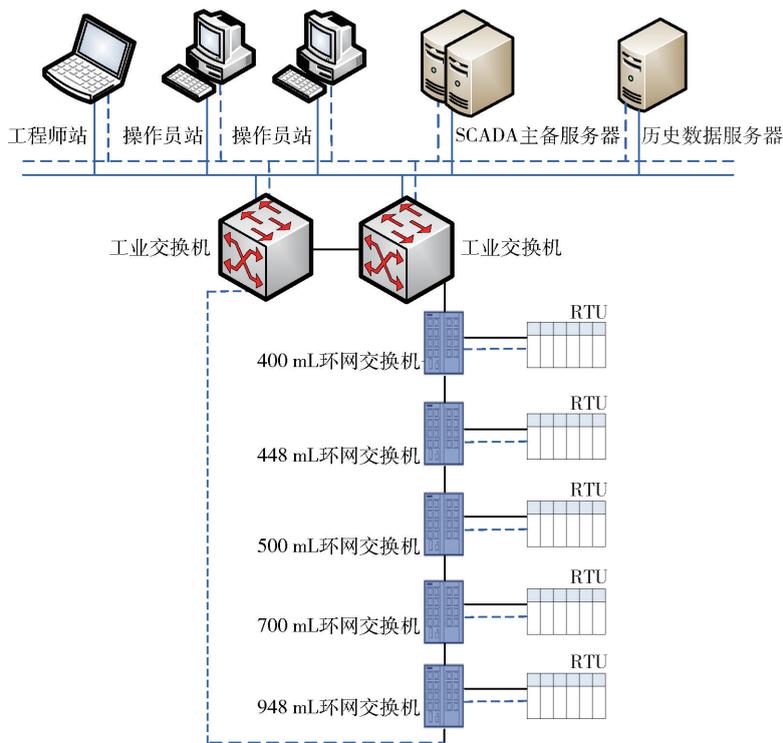


图 1 SCADA 系统网络结构

Fig.1 SCADA system network structure

地表网络采用星型拓扑结构,地表控制室内 SCADA 数据服务器、历史数据服务器、工程师站和操作员站均采用端口冗余的方式接入工业交换机,同时 2 台工业交换机互为热备冗余。

4 排水泵房监控系统

井下每个中段的排水泵房设置 1 套排水泵房监

控系统。作为 SCADA 系统的一部分,排水泵房监控系统以远程终端单元 RTU 为核心,用于监测和控制本地水泵房各项运行参数和电气设备启停,并通过环网交换机将数据上传至地表控制室内 SCADA 数据服务器,地表控制室内的操作人员可以实现排水泵房的远程监控。

4.1 系统组成

排水泵房监控系统主要由远程数据采集和控制单元 RTU、触摸屏、各种检测仪表、电动阀门及智能电流表等组成,如图 2 所示。监控系统数据通过环网交换机上传至 SCADA 数据服务器。

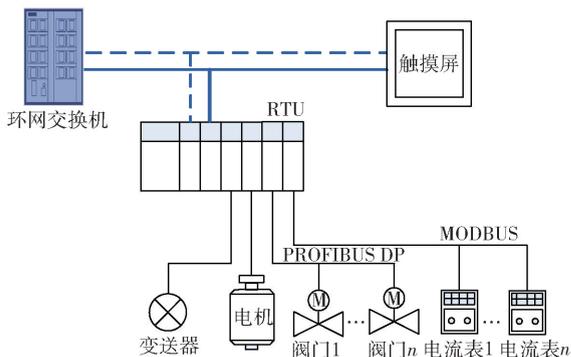


图 2 排水泵房监控系统组成

Fig. 2 Drainage pump room monitoring and control system components

4.2 检测和控制内容

排水泵房监控系统主要检测和控制内容如下。

- 1) 电机轴承和绕组温度检测;
- 2) 水泵轴承驱动端和非驱动端温度检测;
- 3) 电机和水泵轴承驱动端和非驱动端振动检测;
- 4) 水泵出口管压力检测;
- 5) 排水总管流量检测;
- 6) 水泵磨损环磨损检测;
- 7) 污水仓和清水仓液位检测;
- 8) 水泵出口管电动阀门开关控制;
- 9) 水泵排气管电磁阀开关控制;
- 10) 水泵启停控制;
- 11) 水泵电机设备电流、电压、功率和电能等数据采集。

其中,电动阀门的开关控制和运行状态通过 PROFIBUS DP 通讯方式接入 RTU。水泵设备的电流、电压、功率和电能等数据通过智能电流表采集后以 MODBUS RTU 通讯方式接入 RTU。DP 和 MODBUS 总线网络如图 3 所示。

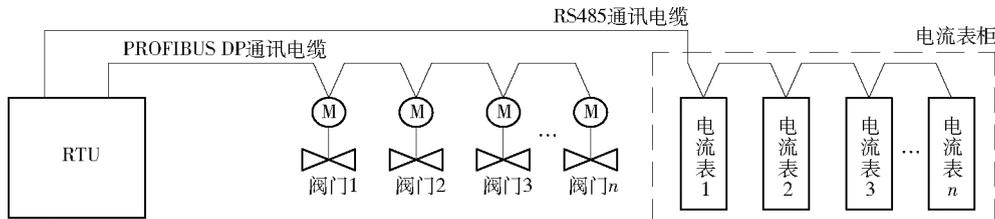


图 3 DP 和 MODBUS 总线网络

Fig. 3 DP and MODBUS fieldbus network

4.3 水泵启动流程

阀门启动流程如图 4 所示。在启动前,首先判断温度、振动和磨损环等仪表信号是否正常,确认信号正常后打开排气电磁阀,待水泵排气管流量满足要求后关闭电磁阀,启动电机,待泵出口压力信号达到启动条件,延时 3 s,打开水泵出口电动阀门,启动过程结束^[10]。

4.4 故障停车

为确保水泵设备可靠运行,设置故障停车条件。当出现故障时,停止水泵运行,保护设备不受损坏。故障报警信号主要包括温度、振动、磨损环和电流。当电机绕组或轴承温度超过设置报警上限时,停止水泵;当电机或轴承的振动幅度大于设定上限时,停止水泵;当磨损环出现报警信号时,停止水泵;当电

机电流超过报警上限时,停止水泵。

4.5 控制方式

排水监控系统包括自动、半自动和手动 3 种工作模式。控制方式分为现场控制、远程控制 2 种。现场控制指操作人员通过触摸屏完成操作,而远程控制指操作人员在地面控制室内进行操作。3 种工作模式如下。

1) 自动模式:控制系统根据水仓水位和排水速度自动控制水泵及电动阀门的开关。在正常水位时,各台水泵自动轮转工作,较大涌水出现时,系统根据涌水速度自动投入适量的水泵进行排水。当某台运行中水泵发生故障时,系统能够及时关闭故障水泵并切换至备用水泵。

2) 半自动模式:操作人员根据水仓水位和排水

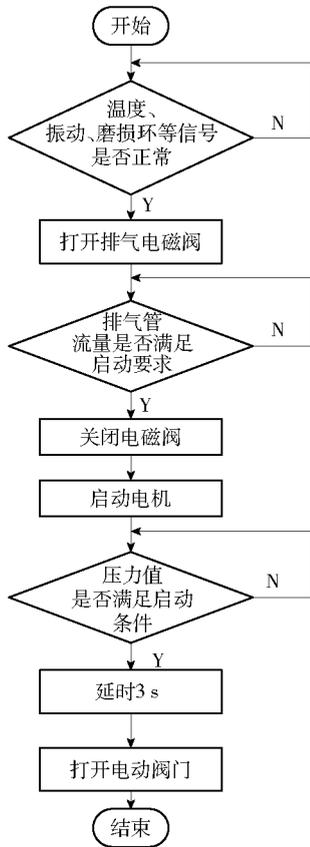


图4 阀门启动流程

Fig. 4 Valve startup procedure

速度手动选择水泵投入数量,系统自动完成已选泵组的启停操作。当运行中的某台水泵出现故障时,该泵组将自动停止运行,其余泵组继续正常运行。

3) 手动模式:主要用于故障检修和试车时,操作人员可控制任意单台水泵启停,电动阀门开关,相互动作互不闭锁^[11]。

4.6 自动轮换方式

为了防止排水系统中备用水泵长期不工作,备用水泵、配套电机及管路上电动阀门在需要投入工作时因故障无法正常排水,系统设置了水泵自动轮换工作方式,通过记录每台水泵的累计工作时间及排水量等数据,每隔一段时间对水泵进行轮换,关闭工作时间较长的泵组,切换至累计工作时间相对较短的泵组,在轮换模式下,每组水泵工作时间能均匀分布^[5]。当排水系统中某台泵组出现故障,无法继续执行排水任务时,系统关闭该泵组并报警,同时切换至备用泵组继续执行排水工作,剩余的各泵组继续按照轮换工作方式进行排水。此工作方式确保了泵组出现故障能够被及时发现和处理,从而保障排

水系统的连续性和安全性。

4.7 水泵保护方式

排水系统工作过程中,设计了启泵保护、停泵保护和运行过程保护3种保护方式,确保了排水系统运行的安全性和可靠性。

4.7.1 启泵保护

该矿山井下排水系统水泵启动前,需要将水泵泵体灌满水后才能启动水泵。为确保水泵的可靠启动,在水泵泵体排气管路处设置电磁阀和流量检测仪表,水泵启动前先打开排气电磁阀,待水泵灌水至排气管路流量满足要求时,具备水泵启动条件,同时设置灌水保护时间限值,当水泵灌水时间超过保护时间限值,排气管流量不能满足条件时,停止该水泵启动程序,系统进行报警,通知检修人员进行故障排除工作。

当水泵灌水完成启动后,系统自动检测排水泵出口压力值,当出口压力满足启动条件后,打开出口管路电动阀门,完成水泵启动,同时设置压力保护时间限值,当水泵工作累计时间超过保护时间限值时,出口管路压力不能达到正常启动压力,停止水泵,同时系统报警,通知检修人员进行故障排除工作。

4.7.2 停泵保护

当水仓液位低于系统设定的报警下限时,系统自动停泵并进行低液位报警,保护水泵因低液位空转损坏。

4.7.3 运行过程保护

在水泵运行过程中,当电机电流减小至正常值以下,并超过一定的时限,或电机轴承温度、振动,电机绕组温度达到停泵的设定限值时,系统停泵并进行报警,通知检修人员进行检修和故障排除。

5 运行效果

通过对井下排水泵房自动化改造,将原来需要由人工现场操作、现场值守的生产过程,改造为地表控制室远程集中操作、操作人员定时巡检的方式。同时对生产人员组织结构进行了优化调整,精简了大量的操作和维护岗位。对操作主管、值班长、班长、现场负责人、清渣工、主操作工、帮工等操作岗位合并和调整,减少了大量生产操作人员;对电气工程师、机械工程师、电工、仪表工、钳工、焊工等维护人员工种合并,大幅减少了维保人员的数量。

改造前后的指标对比见表2,岗位人员由改造

前的 150 人精简至 45 人,年节约人工成本约 70 万美元;劳动生产效率从过去的 2 t 铜/(人·d)提高至 4.81 t 铜/(人·d),劳动生产效率提升 1.4 倍;人工成本从 5 000 美元/t 铜降低至 4 000 美元/t 铜,成本控制效果显著。

表 2 改造前后指标对比

Table 2 Comparison of metrics before and after transformation

对比项目	改造前	改造后
岗位人数/人	150	45
人均劳动生产率/(t·人 ⁻¹ ·d ⁻¹)	2	4.81
人工成本/(美元/t 铜)	5 000	4 000

6 结束语

1)该矿山井下排水泵房经过自动化改造后,解决了原来自动化水平落后、现场手动操作不方便等问题。操作人员在控制室内可以集中监控井下各个中段排水泵房运行状态,实时掌握全矿井下排水数据。同时取消各水泵房内固定岗位人员,减少井下操作人员数量,实现排水系统无人值守,达到减员增效的目的。

2)该矿山井下排水系统采用基于 SCADA 数据采集和监控系统进行自动化改造,彻底消除了“信息孤岛”,解决了控制系统之间相互独立和数据无法实现共享等问题,使得各系统之间数据互联互通,提高系统运行的可靠性。

3)通过建立排水系统控制模型,综合水仓水

位、涌水速度、排水能力、管路效率等情况,能合理控制水泵起停和轮换,既可节省运行费用,也能减小对电网的冲击和其他运行设备的影响,实现安全、经济排水。

4)运行效果表明,成本控制效果显著,人工成本从 5 000 美元/t 铜降低至 4 000 美元/t,年节约人工成本约 70 万美元。

[参考文献]

- [1] 陈亮. 基于融合网络有色矿山采矿自动化改造方案研究[J]. 中国矿山工程,2018,47(2):36-39.
- [2] 赵晶莹. 浅析矿山地下排水设备的选型与排水方式的确定[J]. 有色矿冶,2019,35(04):8-13+7.
- [3] 刘震. 基于最优控制理论的自动化排水系统研究与应用[D]. 西安:西安科技大学,2017.
- [4] 王文忠. 高水压矿山井下防水闸门硐室设计探讨[J]. 中国矿山工程,2024,53(4):83-86.
- [5] 邵鹏. 矿井排水系统设备及控制改造的研究[D]. 杭州:浙江工业大学,2011.
- [6] 王盛杰. 矿井主排水监测监控系统的开发与应用[D]. 太原:太原理工大学,2014.
- [7] 张远放. 煤矿井下排水智能控制系统的研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2019.
- [8] 高林. 煤矿井下排水自动控制系统的研究与开发[D]. 太原:太原理工大学,2007.
- [9] 李强. 煤矿主排水监控系统的设计及应用[D]. 太原:太原理工大学,2010.
- [10] 赵奕. 自动化矿山改造典型应用——谦比希铜矿主西矿体自动化及电能管控改造项目综述[J]. 自动化应用,2019(1):137-140.
- [11] 张东永. 基于 PLC 技术的矿山排水系统的自动控制[J]. 矿山机械,2021,49(7):50-55.

Research on optimization and application of underground drainage automation system in metal mine

CHEN Liang

(China ENFI Engineering Corporation, Beijing 100038, China)

Abstract: The level of automation in underground drainage systems of non-ferrous metal mines in China varies significantly. Most large and medium-sized mines have basically achieved automatic drainage. The automation level of some small and medium-sized mines is still relatively low, and on-site manual operations are mainly performed. Mines that have implemented automatic drainage also have problems

such as low degree of automation, independent control systems and inability to share data. The paper describes the current status of the automation of drainage pump house in non-ferrous mines, and proposes the automation transformation solution of the underground drainage pump house based on the SCADA system, and explains in detail the network structure, detection and control content, water pump startup process, and control methods, etc. After the transformation of the underground drainage system, operators can centrally monitor the operation status of all underground drainage pump rooms from the surface control room. This eliminates the “information silos” between the control systems of the various drainage pump rooms, achieving unattended operation of the drainage system. The operational results after the transformation demonstrate significant cost control effects, with labor costs decreasing from \$ 5 000/t of copper to \$ 4 000/t, resulting in annual labor cost savings of approximately \$ 700 000.

Keywords: pump station; automation transformation; SCADA; RTU; redundant; mine; control system



中国恩菲 5 项技术入选自然资源部 《矿产资源节约与综合利用先进适用技术目录(2025 年版)》

近日,自然资源部发布《矿产资源节约和综合利用先进适用技术目录(2025 版)》。在全国遴选出的 376 项先进技术中,中国恩菲工程技术有限公司 5 项核心技术成功入选。这是该公司相关技术继入选 2022 版目录后,再度获得国家层面权威认可,充分体现出其在矿业工程领域持续领先的技术实力与行业影响力。

该公司此次入选的技术覆盖绿色开采、智能矿山、资源综合利用等多个关键方向,分别为露天坑全尾砂充填治理与深部资源协同安全开采关键技术、低品位厚大矿体自然崩落法连续高效开采技术、中线式尾矿筑坝技术、大型有色金属选矿半自磨高效碎磨技术、深井硬岩矿床大规模高效开采工艺技术。

资料来源:中国有色网