

# 某高寒矿井通风余热回收效果研究

张海胜<sup>1</sup>, 杨朝义<sup>2</sup>, 葛启发<sup>1,3</sup>, 尹继贵<sup>2</sup>, 曹亮<sup>1</sup>, 何文斌<sup>2</sup>

(1. 中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038; 2. 云南迪庆有色金属有限责任公司, 云南 迪庆 674400;  
3. 北京科技大学, 北京 100083)

**[摘要]** 在当前我国“双碳”政策下, 矿井余热回收再利用是矿山向绿色低碳转型途径之一。基于此背景, 本文针对某高寒矿山通风现状, 设计了通风余热回收方案, 用以解决寒冷季节矿山井口防冻问题, 通过采集系统六个月的运行数据, 对余热回收效果进行分析。结果表明, 余热回收各个机组总体的运行状态比较平稳, 余热回收效果显著, 相比于电加热方案, 极大的减少了能源的消耗, 降低了运行成本, 存在巨大的推广潜力。

**[关键词]** 高寒矿山; 矿井通风; 余热回收; 井口防冻; 双碳发展

**[中图分类号]** TD72 **[文献标志码]** B **[文章编号]** 1003-8884(2022)01-0022-06

**DOI:** 10.19611/j.cnki.cn11-2919/tg.2022.01.006

## 0 引言

为应对气候变化, 我国提出了“碳中和、碳达峰”双碳目标, 鼓励各行业积极探索符合本领域特色的绿色低碳、高效节能的发展模式<sup>[1]</sup>。矿山企业作为典型的高能耗、高碳排放企业, 大力提升绿色创新能力, 加快向绿色低碳转型势在必行。在矿山企业生产过程中, 常常采用抽出式通风, 而我国各有色矿山的矿井因地热能的释放, 回风的温度终年稳定在 7~20℃ 之间, 故被抽出的空气随之带出大量的低温热能<sup>[2]</sup>。同时, 矿山需投入大量的能源用以维持矿山员工的洗浴、主要井巷工程的冬季防冻及其他设备的保温等, 若能将矿井回风余热资源加以回收, 用于部分替代上述能耗环节, 将对矿山达成“双碳”目标具有重要意义。

在矿井回风余热再利用方面, 国内众多研究单位及矿山企业做了大量相关的探索及开发。陈庆刚等<sup>[3]</sup>利用 Ventsim Visual™ 三维通风仿真系统进行井下热环境模拟研究, 证明矿山采用回风余热回收技术的可行性和节能前景。熊楚超等<sup>[4]</sup>提出采用分体式余热回收系统, 并通过配置电加热和调峰热

源, 确保在极端天气和矿井排风余热不足情况下的能源供需平衡, 使得井口防冻系统稳定可靠运行; 王成<sup>[5]</sup>以榆树坡煤矿基峰热源 + 燃气锅炉双源供热模式为基础, 设计了余热综合利用自动化监控系统, 采用最大限度地利用矿井废热和余热资源, 实现矿井全年卫生洗浴热水制备、冬季井口防冻保温、冬季建筑供暖等; 高丽<sup>[6]</sup>提出在凉水井煤矿中可以活用多个技术形式构建综合余热回收系统, 充分发挥现场多种热源, 实现多元余热回收; 段泽敏等<sup>[7]</sup>研究发现矿井排风采用 3 级喷淋水除尘吸热, 排风余热利用率为 40%~50%。

以上大量的研究并未涉及高寒矿山, 而在我国东北及西南地区, 众多矿山因纬度高、海拔高等原因, 全年日平均温度小于或等于 10℃, 积温在 1 800~2 000℃, 属于高寒矿山行列<sup>[8-9]</sup>。这类矿山在低温季节, 为缓解矿井井口、井筒等的冰冻灾害, 对余热回收利用的需求更加迫切, 因此, 本文以云南某铜矿高寒矿山为例, 部署余热回收工程、建立远程监控系统, 开展回风余热高效节能再利用的研究, 为国内同类矿山绿色低碳转型提供借鉴意义。

## 1 矿山气候及通风情况概述

### 1.1 矿山气候环境分析

某铜矿地处我国云南省西北部, 矿区属寒温带气候, 年平均气温 4℃, 最热月平均气温 10℃, 最冷月平均气温 -8℃<sup>[10]</sup>。该铜矿所处之地属于高原

**[收稿日期]** 2021-11-02

**[作者简介]** 张海胜(1994—), 男, 山西临汾人, 工程师, 硕士, 主要从事智能矿山规划、金属矿山设计咨询等相关工作。

**[引用格式]** 张海胜, 杨朝义, 葛启发, 等. 某高寒矿井通风余热回收效果研究[J]. 有色设备, 2022, 36(1): 22-27.

坝区,平均年冻土日达到了127.1天,平均冻土深度达0.18 m,每至冬季矿山气候严寒,一年中约有6个月的供暖期,且仅有电能可供使用,极大提高了矿山生产运营成本。

## 1.2 矿山通风情况

该铜矿采用压抽结合的通风方式。根据开拓系统、采矿方法和矿体赋存条件,矿井由3850 m进风平硐、3600 m进风平硐、3660 m有轨运输平硐和3720 m无轨进风平硐,采场辅扇分风,3700 m回风平

硐和南回风井集中回风的多级机站串并联协同工作的通风方式。总体上南回风井和3700 m回风平硐的回风各项热力学参数相对比较稳定,有利于回风余热的回收和控制。

## 2 余热回收方案及数据采集

### 2.1 矿山余热回收方案

矿山余热回收主要针对南回风井口段以及3700水平巷道北硐口,总体布置如图1所示。

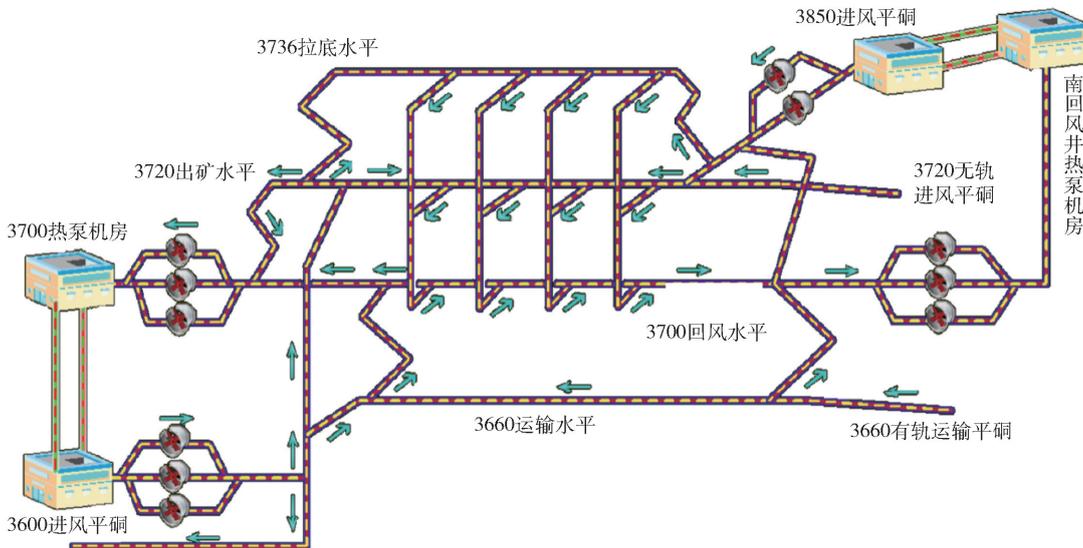


图1 某铜矿通风系统及余热回收示意图

南回风井口段余热回收:设计南回风井风温8℃,汲取7℃温差使回风降至1℃,回收余热用于最近的3850平硐加热,余热回收不能满足进风余热的时段开启电加热补足。回风余热回收热泵机组设在南回风井旁的专用机房内,配置6台KDF360型热泵机组,制备出50/45℃热水,经室外管网输配至3850平硐口部机房内的水空换热器,水空换热器送风温度36℃,系统平面布置如图2所示。

3700水平巷道北硐口余热回收:设计3700水平北回风平硐风温8℃,汲取7℃温差使回风降至1℃,回收余热用于最近的3600平硐加热,余热回收不能满足进风余热的时段开启电加热补足。3700水平巷道北硐口回风热回收热泵机组设在3700回风平硐旁的专用机房内,配置4台KDF360型热泵机组,制备出50/45℃热水,经室外管网输配至3600平硐口部机房内的水空换热器,水空换热器送风温度36℃,系统平面布置如图3所示。

余热利用:通风余热主要用于井口预热。根据

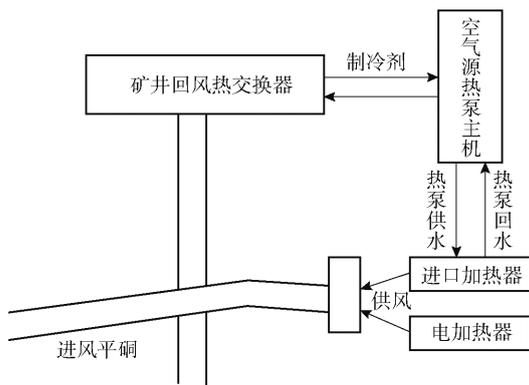


图2 南回风井回风余热工艺示意图

当地的气象资料和安全规程要求,对于3660 m平硐、3720 m平硐、3850 m平硐、3600 m平硐,冬季进风需预热至2℃。加热流程为:室外冷风-粗效过滤-电热盘管-风机-井口。根据送风量与加热温度差(入风空气温度-16℃与出风空气温度2℃的差值)进行热交换。

在3720水平进风平硐、矿山在3720水平进风

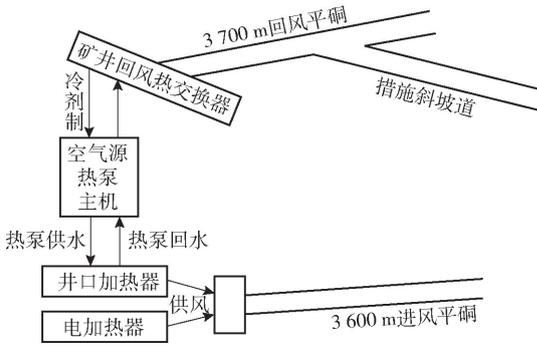


图3 3600、3700平硐回风余热利用及进风预热示意图

平硐、3660水平进风平硐建成两套独立进风电加热系统(组合式空调整机组)。每套两个机组额定功率1380 kW,每个机组额定功率690 kW。

### 2.2 远程控制系统及数据采集

余热回收远程控制系统由网络通信系统、温度传感器、风速传感器、摄像头、PLC和控制箱、余热回收远程控制单元、电加热远程控制单元、数据存储运算中心服务器组成。通过温度传感器、风速传感器、摄像头获取实时数据,数据存储运算中心服务器获取相关数据,进行调温模拟仿真,对比设备调控方案,确定最优方案,并对余热回收设备及电加热设备进行远程控制。本次测试数据采集自2018年自11月至2019年4月六个寒冷月份的运行情况,因测试过程中遇到现场停电,停水等意外故障,个别温度传感器故障,数据采集不全,但总体满足余热回收效果的分析使用。

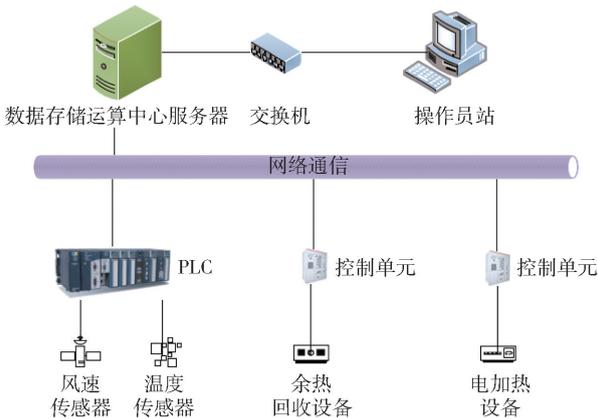


图4 系统架构图

## 3 余热回收情况及节能效果分析

### 3.1 余热回收分析

图5反映了在记录的时间段内,各个机组的总

制热量,其中除了南回风井6号机组制热量偏小,其他几个机组相差不大。3700平硐2号机组的制热量和热回收量最大,因为其进风温度在几个机组中较高。对比南回风井和3700回风井各个机组制热量及热回收量来看,3700平硐要高于南回风井。因为3700回风平硐,回风温度稳定为8.4~8.8℃,而南回风井的回风温度为4.5~5.5℃。

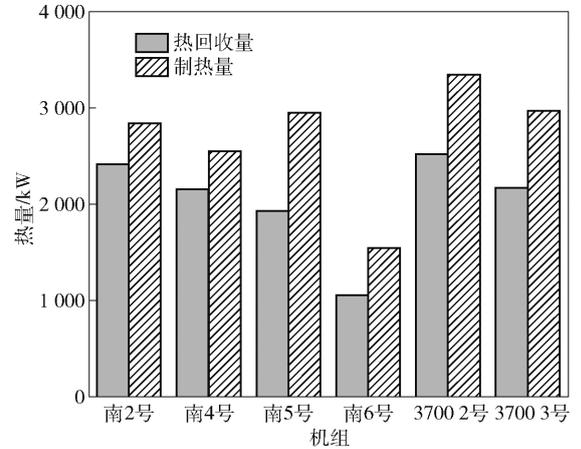


图5 各个机组在记录时间内的总制热量

图6和图7反映了各个机组进出口水温差对热回收量与制热量的影响。机组的进出口水温差虽然与热回收量没有直接的线性关系,但总体来看,机组的进出水温差越大,热回收量越大。结合现场反馈数据,由图7可知,机组的进出水温差与制热量有着明显的线型关系,与热力理论计算相符,从侧面反映出设备运行是处于稳定状态。从图6和图7中发现,南回风井6号机组在同样的进出水温差下,制热量和热回收量均偏低,这与制冷剂的充注量有关。

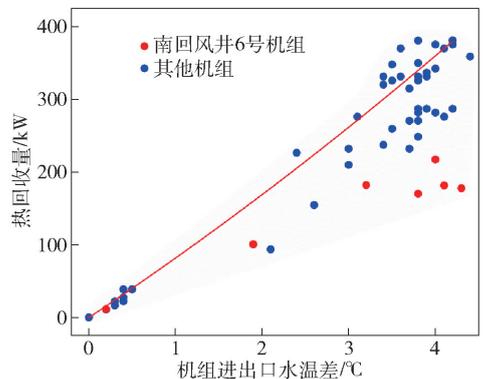


图6 各个机组进出口水温差与热回收量

图8和图9反映了各个机组进风回风温差与制

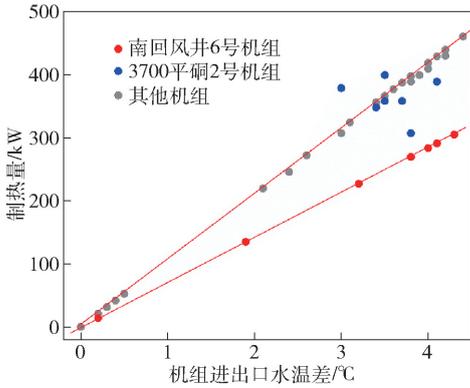


图7 各个机组进出口水温差与制热量

热量和热回收量之间的关系。与机组进出水温差相似,机组进风回风温差越大,制热量和热回收量也越大。机组进风回风温差与制热量虽然不呈现线性增长的关系,但是符合二次曲线增长的关系。机组进风回风温差与制热量则呈现了明显的线性关系,同样的,南回风井6号机组,在同一风回风温差下,制冷量和热回收量要偏小。

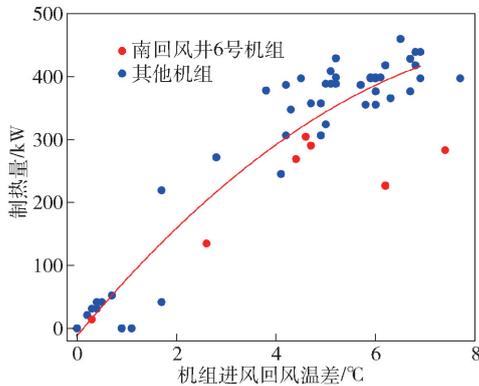


图8 各个机组进风回风温差与制热量

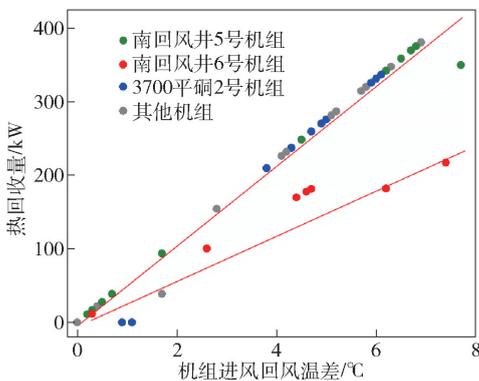


图9 各个机组进风回风温差与热回收量

温差,各个机组进风回风温差与制热量和热回收量之间的关系。从图10和图11看,目前各个机组总体的运行状态比较平稳,未出明显的异常情况。所以在高寒矿山的余热回收方案是可行且成功的。

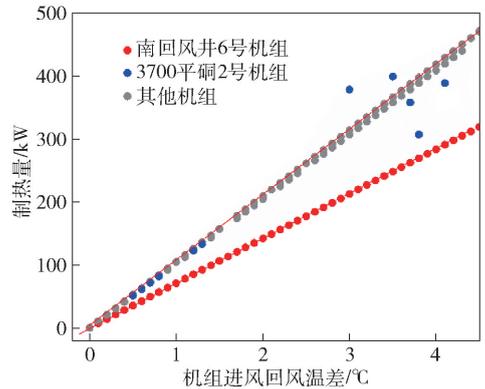


图10 1月各个机组进出口水温差与制热量

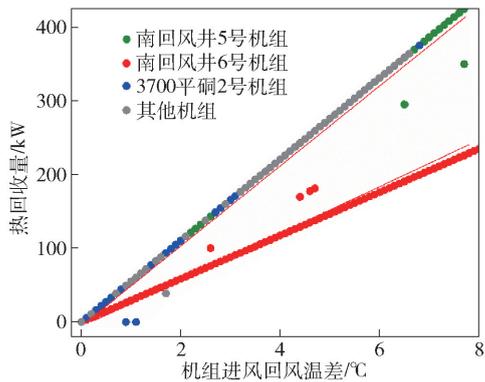


图11 1月各个机组进风回风温差与热回收量

### 3.2 运行节能分析

在实施方案之前,若依靠电能直接加热3850和3600平硐进风,总装机功率达7065 kW,其中3850平硐为3396 kW,3600平硐为3669 kW,能耗及运行成本较高,不符合国家节能环保政策。

在通风余热回收后,在温度高于 $-6^{\circ}\text{C}$ 时,3600平硐的热负荷可以由热泵机组全部承担,此时余热回收系统的装机功率为638 kW,此时电加热的装机功率为2101.5 kW,其中包括循环水泵的装机功率。对于南回风井和3850平硐,由于南回风井的回风量比较大,余热利用价值更高,在环境温度高于 $-10^{\circ}\text{C}$ 时,热负荷可全部由热泵机组承担,装机功率为948 kW,电加热的装机功率为2918.9 kW。

图10和图11反映出1月各个机组进出口水

图 12 和图 13 反映了两组平硐采用余热回收系统的装机功率与采用电加热方案装机功率的比值,从图中明显可以看出余热回收系统的装机功率远远小于电加热方案装机功率。由于南回风井的风量大,可以用余热较多,所以南回风井机房的装机功率略大于 3700 平硐。余热回收系统相比于电加热方案,极大的减少了电量的使用以及运行成本,节能减排效果显著,存在着巨大的推广潜力。

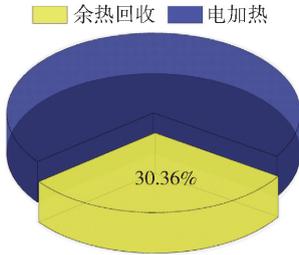


图 12 温度高于  $-6^{\circ}\text{C}$  时,3600 平硐余热回收系统装机功率与电加热方案装机功率比值

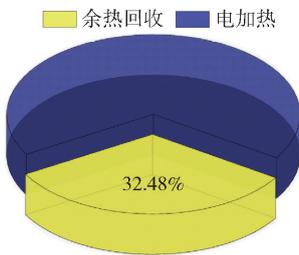


图 13 温度高于  $-10^{\circ}\text{C}$  时,3850 平硐余热回收系统装机功率与电加热方案装机功率比值

#### 4 结语

矿井余热回收再利用,是矿山节能减排和绿色低碳转型有效途径,本文以某高寒矿山通风现状为基础,分析了矿山气候条件以及回风余热回收的可行性,并制定了余热回收方案,通过分析系统运行期间的数据,可以得出以下结论:

余热回收各个机组的进出口水温差与热回收量

和制热量的关系,以及各个机组进风回风温差与制热量和热回收量的关系表明,设备运行状态稳定,余热回收效果较好。

针对某高寒矿山通风现状,余热回收系统的装机功率远远小于采用电加热方案装机功率,采用余热回收方案为主,电加热为辅的解决方案改善井口冬季冻结现象,是经济合理的,有助于节约矿山运行成本,推动企业绿色低碳转型。

在我国“双碳”政策下,结合按需通风系统对余热回收利用工程、建立远程监控系统,开展回风余热高效节能再利用的研究,为国内同类矿山绿色低碳转型和落实“双碳”政策提供借鉴意义。

#### [参考文献]

- [1] 李政,张东杰,潘玲颖,等.“双碳”目标下我国能源低碳转型路径及建议[J]. 动力工程学报,2021,41(11):905-909,971.
- [2] 张振涛. 利用热泵系统回收矿井排风余热的研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2015.
- [3] 陈庆刚,葛启发,曹亮,等. 基于 Ventsim Visual ~ (TM) 高海拔矿井按需通风热模拟研究[J]. 有色冶金节能,2020,36(3):30-35.
- [4] 熊楚超,罗景辉,魏莹,等. 分体式矿井排风余热回收井口防冻系统应用探究[J]. 煤炭工程,2020,52(12):12-15.
- [5] 王成. 基于自动化监控子系统对煤矿中乏风及涌水余热回收的应用研究[D]. 中国矿业大学,2020.
- [6] 高丽. 矿井余热回收再利用技术在凉水井煤矿的运用[J]. 化工管理,2021(30):77-78.
- [7] 段泽敏,马素霞,郭千中. 矿井余热资源利用技术[J]. 煤矿安全,2014,45(9):68-71.
- [8] 杨彪. 高寒高海拔地区矿山工程设计要点思考[J]. 中国钨业,2018,42(3):11-16.
- [9] 张继业. 某高寒高海拔铜矿井口防冻加热系统设计[J]. 世界有色金属,2018(20):49-50,52.
- [10] 杨俊鹏,戴华阳,赵溪,等. 滇西北高寒地区金属矿山土地复垦技术探究:以普朗铜矿区为例[J]. 中国矿业,2015,24(12):66-69.

## Research on Efficiency of Ventilation Waste Heat Recovery in an Alpine Mine

ZHANG Hai-sheng, YANG Chao-yi, GE Qi-fa, YIN Ji-gui, CAO Liang, HE Wen-bin

**Abstract:** Under the current “carbon peak and carbon neutrality” policy in China, mine waste heat recovery and reuse is one of the pathways for mines to transform to green and low carbon mines. Based on this background, in view of the current situation of ventilation in an alpine mine, this paper designs a ventilation waste heat recovery scheme to solve its shaft collar antifreeze issue in cold seasons, and analyzes the waste heat recovery effect by acquiring 6-month operating data of the system. The results show that the overall operation status of each waste heat recovery unit is relatively stable, and the effect of waste heat recovery is remarkable. Compared with the electric heating scheme, it greatly reduces the energy consumption and the operating costs, and has a huge potential for application promotion.

**Key words:** alpine mine; mine ventilation; waste heat recovery; shaft collar antifreeze; carbon peak and carbon neutrality development ▲

(上接第 21 页)

280 kg/t<sub>干矿</sub>、搅拌速度 120 r/min、浸出时间 50 min、浓度 25% 高压酸浸条件下能获得最佳经济效益。

试验为间断性操作、间接方式电加热、升温前已加酸和搅拌、降温时矿浆仍在高压釜内,与工业生产的连续加酸闪蒸、直接蒸汽加热等工艺条件有所不同,故试验结果与生产实际可能存在一定偏差。

[参考文献]

[1] USSG. Mineral Commodity Summaries 2021 [R]. USSG, 2021:113.

[2] 彭容秋. 镍冶金(第一版)[M]. 长沙:中南大学出版社, 2005.

[3] 刘瑶,丛自范,王德全. 对低品位镍红土矿常压浸出的初步探讨[J]. 有色矿业,2007,23(5):28.

[4] 方兆衍. 湿法冶金技术丛书浸出[M]. 北京:冶金工业出版社,2007.

[5] 贾露萍. 瑞木红土镍矿高压釜结垢及预防[J]. 有色设备,2018(6):88.

## Bench-scale HPAL Test and Research on Nickel Laterite Ore

JIA Lu-ping, WU Di, LIU Nan-cai, XIAO Gui-long

**Abstract:** This bench-scale test employs high-pressure acid leaching technology to treat typical near-equatorial low-grade wet nickel laterite ore, and studies the relationship between the Ni, Co, Al and Fe leaching rates and the temperature, acid-to-ore ratio, agitator revolution speed, leaching time and slurry feed concentration in the autoclave, and then, by means of technical and economic analysis, it further analyzes the screened test results, whereby discovering the optimum process conditions for high pressure acid leaching of the nickel laterite.

**Key words:** nickel laterite; HPAL; nickel; cobalt ▲