

综合技术

# 高寒地区超低温空气源热泵余热回收 技术研究

Research on Waste Heat Recovery Technology of Ultra-low Temperature Air  
Source Heat Pump in Alpine Regions

王晶<sup>1</sup>, 曹亮<sup>2</sup>, 李争荣<sup>1</sup>, 刘韬<sup>2</sup>, 刘明武<sup>1</sup>

(1. 云南迪庆有色金属有限公司, 云南 迪庆 674400; 2. 中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038)

**摘要:**本文以普朗铜矿为试验基地,首次实现高海拔地区的矿山采用超低温空气源热泵机组制热、供暖,实现矿山节能、环保供热。矿井回风中蕴含大量余热,以一个供暖周期为限,将回风中的余热利用空气源热泵进行回收,与电加热方案相比,3 600 m平硐与3 700 m回风井采用余热回收系统之后,节电量约为 $1.48 \times 10^6$  kW·h,节约电费79.92万元/年。3 850 m平硐与南回风井采用余热回收系统之后,总节电量约为 $3.45 \times 10^6$  kW·h,合计节约电费186.3万元/年。

**关键词:**高寒地区;空气源热泵;余热回收;经济性分析

中图分类号: TD724

文献标志码: A

文章编号: 1672-609X(2022)01-0077-05

**Abstract:** With the fast and high-quality development of China's national economy, the demand for mineral resources has grown rapidly. With thin air and low temperature all year round in plateau mining areas, the demand for heat due to downcast air preheating as well as production heating and domestic heating is high, with a high energy consumption. In this paper, Pulang Copper Mine is used as the test base. For the first time, the mine in the high altitude area adopts the ultra-low temperature air source heat pump unit for heat generation and heating, enabling energy efficient and environment-friendly heating of the mine. The upcast air from the mine contains a large amount of waste heat. The waste heat in the upcast air is recovered by the air source heat pump within the limit of one heating cycle. Compared with electric heating, the installation of waste heat recovery system for 3 600 adit and 3 700 upcast shaft helps save  $1.48 \times 10^6$  kW·h of electric energy per year, or 799,200 yuan of tariff per year. The installation of waste heat recovery system for 3 850 adit and the south upcast shaft helps save  $3.45 \times 10^6$  kW·h of electric energy per year, or 1.863 million yuan of tariff per year.

**Key words:** alpine region; air source heat pump; waste heat recovery; economic analysis

## 1 前言

能源是21世纪人类发展的重大主题,能源的合理开发利用是人类处理好“能源、环境与发展”三者关系的重要一环,是人类可持续发展的重要保证<sup>[1-2]</sup>。采矿领域的高速发展一方面伴随着高效益,另一方面也不可避免的出现对环境的高污染、对能源的高消耗<sup>[3]</sup>。同时,因东部地区矿产资源逐步减少,在我国西部地区的矿山项目呈日渐增多的趋势。特别在地质构造复杂,矿产资源丰富的青藏高原,这一趋势更为明显。此类高原矿区,空气稀薄、

终年低温,井口进风预热和生产生活供暖需求量大、能耗高;高原地区生态环境脆弱,交通运输不便,环保压力大,热源、燃料不易解决。

普朗矿毗邻三江并流自然保护区,环保要求高,且无煤、燃油等能源条件,供冬季供暖使用的能源仅有电能。而矿区处于高寒地区,供暖期长达176 d,漫长寒冷。经计算,矿井预热及采选工业场地、公辅设施供暖负荷合计达26 351 kW。若直接采用电加热设备制热、供暖,运行费用高,且配套的输配系统投资不大,而矿区水温较低,地下涌水量较小。根据现有的气象资料和现阶段的热泵技术,当地的相对湿度较小,空气是一个较为理想的热源,且矿井回风中带有较大的热量。热泵是实现低温余热利用的理想装置,通过热回收专用热泵机组,将回风中的余热加以回收,用于井口保温、供暖等多项用途,合理利

[作者简介] 王晶(1985-),男,工程师,从事安全工程、采矿工程工作。

[引用格式] 王晶,曹亮,李争荣,等.高寒地区超低温空气源热泵余热回收技术研究[J].中国矿山工程,2022,51(1):77-81.

用热能,高效节能<sup>[4-7]</sup>。

在此技术背景下,项目各参与方设想采用空气源热泵机组回收利用采矿回风平硐、回风竖井排风中的余热,供井口预热保温系统使用<sup>[8]</sup>;利用低温空气源热泵机组汲取冬季室外空气中的热量,供各生产、生活建筑物使用。该方案可有效降低能耗和运营成本。在高寒、高海拔地区采用此技术方案为国内首次。

## 2 余热回收方案

根据《金属非金属矿山安全规程》,为保障采矿生产安全,各通风平硐硐口进风温度须 $\geq 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,考虑到矿区冬季漫长严寒,进风必须加热。根据相关技术措施,采用香格里拉地区的冬季供暖室外计算温度与极端低温的平均值 $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ 作为冬季平硐进风计算温度,加热至 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 送入井下。具体各平硐口风量及热负荷详见表1。

表1 各个平硐风量及进风热负荷

| 平硐类别 | 平硐名称     | 风量/ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ | 进风热负荷/ $\text{kW}$ |
|------|----------|--------------------------------------|--------------------|
| 进风平硐 | 3600平硐   | 270                                  | 3 302              |
| 回风平硐 | 3700回风平硐 | 250                                  | 0                  |
| 进风平硐 | 3850进风平硐 | 250                                  | 3 057              |
| 回风竖井 | 南回风井     | 380                                  | 0                  |

将辅助设备装机功率考虑在内,若依靠电能直接加热平硐进风,2个进风平硐总装机功率达 $7\,065\text{ kW}$ ,能耗及运行成本较高。经调查,我国各有色矿山的矿井回风的温度终年稳定在 $7\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,回风中大量的余热,通过热回收专用热泵机组,将回风中的余热加以回收,用于井口保温、供暖等多项用途,合理利用热能,高效节能,无污染,符合环保要求。

普朗矿区共有 $3850\text{ m}$ 平硐、 $3600\text{ m}$ 平硐2个主要进风平硐,南回风井、 $3700\text{ m}$ 平硐、 $3540\text{ m}$ 平硐,3个回风平硐(鉴于 $3540\text{ m}$ 胶带运输平硐回风量过小且场地局促,不考虑回风热回收)。根据现场各平硐相对位置的实际情况进行合理分配,共设计2组系统满足余热回收需要。经模拟计算,预计回风温度 $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,相对湿度 $60\%$ ,具备余热利用条件。

第一组: $3850\text{ m}$ 平硐和南回风井风量见表2,回风余热供井口保温工艺如图1所示。

表2  $3850\text{ m}$ 平硐和南回风井风量

| 编号  | 平硐类别 | 平硐(井)名称              | 风量/ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ |
|-----|------|----------------------|--------------------------------------|
| 第一组 | 进风井  | $3850\text{ m}$ 进风平硐 | 250                                  |
|     | 回风井  | 南回风井                 | 380                                  |

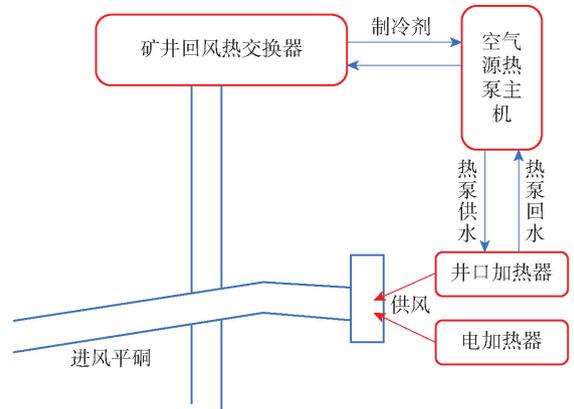


图1 南回风井矿回风余热供井口保温工艺示意图

$3850\text{ m}$ 平硐送风预热,需将 $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的室外空气加热至 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 送入平硐,热负荷 $3\,057\text{ kW}$ 。南回风井风温 $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,汲取 $7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温差使回风降至 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,可回收余热 $2\,504\text{ kW}$ ,余热回收不能满足进风余热的时段开启电加热补足。回风热回收热泵机组设在南回风井旁的专用机房内,配置5台MAS130 HA型和1台MAS090 HA型热泵机组,制备出 $50\text{ }^{\circ}\text{C}/45\text{ }^{\circ}\text{C}$ 热水,经室外管网输配至 $3850\text{ m}$ 平硐口部机房内的加热器。加热器送风温度 $36\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。选用EKDM1315H31型井口加热器4台,出风温度 $36\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,风量 $63\,000\text{ m}^3/\text{h} \cdot \text{台}$ 及BDFR-380/500型电加热器1台,加热功率 $500\text{ kW}$ ,风量 $40\,600\text{ m}^3/\text{h} \cdot \text{台}$ 。经核算,在室外温度 $\geq -10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的情况下,完全依靠回收南回风井回风余热即可满足 $3850\text{ m}$ 平硐进风预热负荷要求。当室外温度低于 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时依靠电加热器补充不足部分热负荷。

第二组: $3600\text{ m}$ 进风平硐和 $3700\text{ m}$ 回风平硐风量见表3,余热回收及进风预热如图2所示。

表3  $3600\text{ m}$ 进风平硐和 $3700\text{ m}$ 回风平硐风量

| 编号  | 平硐类别 | 平硐(井)名称              | 风量/ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ |
|-----|------|----------------------|--------------------------------------|
| 第二组 | 进风井  | $3600\text{ m}$ 进风平硐 | 270                                  |
|     | 回风井  | $3700\text{ m}$ 回风平硐 | 250                                  |

$3600\text{ m}$ 平硐送风预热,需将 $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的室外空气加热至 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 送入平硐,热负荷 $3\,302\text{ kW}$ 。 $3700\text{ m}$ 回风平硐风温 $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,汲取 $7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温差使回风降至 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,可回收余热 $1\,647\text{ kW}$ 。回风热回收热泵机组设在南回风井旁的专用机房内,配置3台MAS130 HA型和1台MAS090 HA型热泵机组,制备出 $50\text{ }^{\circ}\text{C}/45\text{ }^{\circ}\text{C}$ 热水,经室外管网输配至 $3600\text{ m}$ 平硐口部机房内的加热器,加热器送风温度 $36\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。选用EKDM1315H31型井口加热器4台,出风温度 $36\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,风量 $63\,000\text{ m}^3/\text{h} \cdot \text{台}$ 。

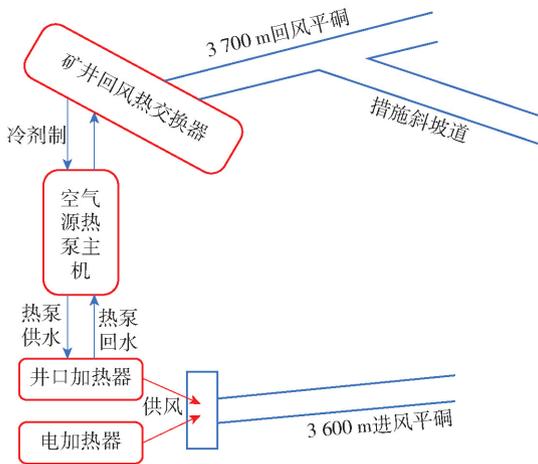


图2 3600 m 进风平硐、3700 m 回风平硐余热回收及进风预热示意图

台,4台BDFR-380/500型电加热器,加热功率500 kW,风量40 600 m<sup>3</sup>/h·台。因3700 m平硐回风量少,回收热量有限,经核算,在室外温度 $\geq -6^{\circ}\text{C}$ 的情况下,完全依靠回收3700 m平硐的余热可满足3600 m平硐进风预热需求。当室外温度在 $-6^{\circ}\text{C}$ 以下时首先开启电加热器,补充不足部分热负荷。

### 3 余热回收方案分析

普朗铜矿回风余热回收及进风预热系统在2018年9月竣工,10月开始调试、试运行。现初步分析最冷月(2019年1月)的现有数据,3700 m回风平硐回风温度与设计预估值基本一致,稳定在 $8.4 \sim 8.8^{\circ}\text{C}$ ,回收热量在1 100~1 300 kW,制热量1 780~1 980 kW,能效比2.62~2.92。能效比计算结果不甚理想的原因是因为热泵机组、循环泵在相当一部分时间未满负荷运转,但因无电表,此次数据统计设备功率均按额定负荷计算,故能效比偏低。3600 m进风平硐在进风预热系统正常运行时,硐内基本无结冰现象。南回风井,回风温度较设计预估值偏低,稳定在 $4.5 \sim 5.5^{\circ}\text{C}$ ,回收热量1 440~1 500 kW,制热量2 480~2 540 kW,能效比2.38~2.43。3850 m进风平硐在进风预热系统正常运行时,硐内基本无结冰现象。

图3所示为各个机组的总制热量与热回收量,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 m平硐2号机组的制热量和热回收量是最大的,因为其进风温度在几个机组中是较高的。对比南回风井和3700 m回风井各个机组制热量及热回收量,3700 m平硐要高于南回风井。因为3700 m回风平硐,回风温度稳定为 $8.4 \sim 8.8^{\circ}\text{C}$ ,而南回风井的回风温度为 $4.5 \sim 5.5^{\circ}\text{C}$ 。

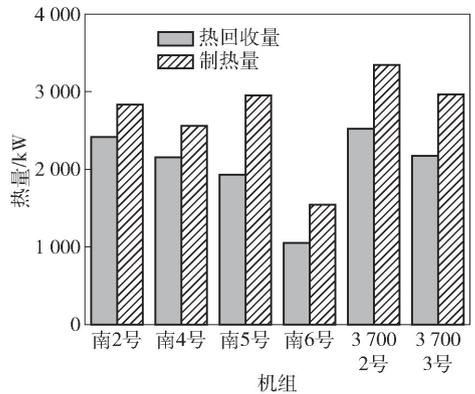


图3 各个机组在记录时间内的总制热量与热回收量

图4、图5所示为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,机组的进出口水温差越大,热回收量也就越大。从现场反馈过来的数据,由图15可知,机组的进出口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。也可以发现,南回风井6号机组在同样的进出口水温下,制热量和热回收量均偏低,这与制冷剂的充注量有关。

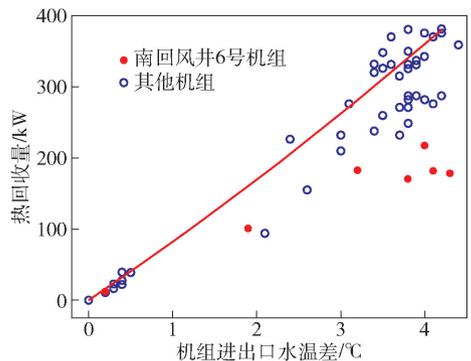


图4 各个机组进出口水温差与热回收量

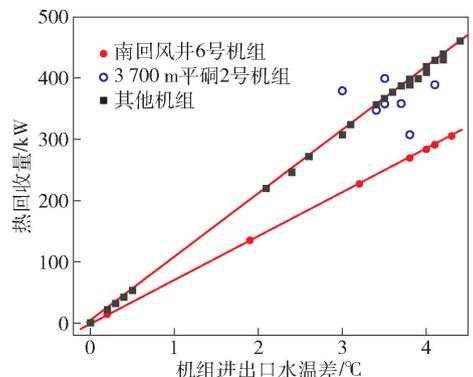


图5 各个机组进出口水温差与制热量

图6、图7所示为各个机组进风回风温差与制热量和热回收量之间的关系。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。

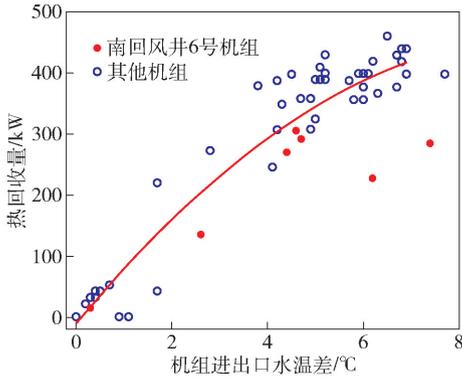


图6 各个机组进风回风温差与制热量

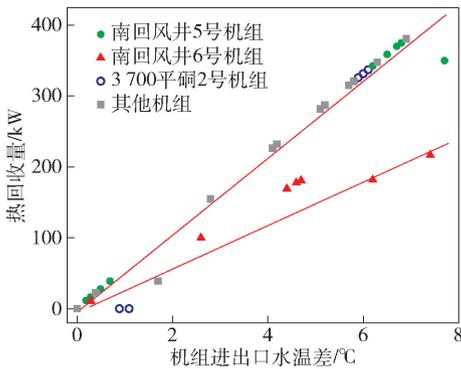


图7 各个机组进风回风温差与热回收量

图8、图9所示为各个机组进出口水温差与制热量、各个机组进风回风温差与热回收量之间的关系。从图中可以看出,目前各个机组总体的运行状态比较平稳,未出明显的现异常情况。所以空气源热泵在高原矿山的余热回收方案是可行的。

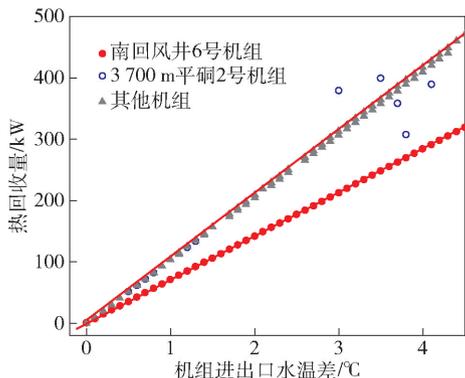


图8 1月份各个机组进出口水温差与制热量

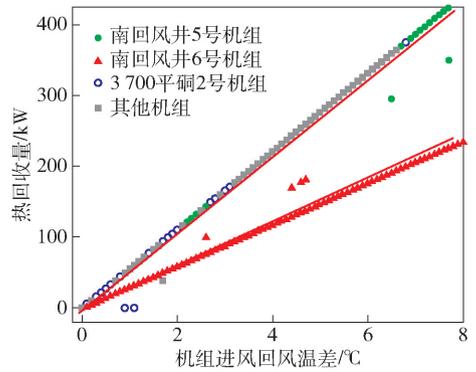


图9 1月份各个机组进风回风温差与热回收量

#### 4 节能与经济性分析

在实施方案之前,若依靠电能直接加热 3850 m、3600 m 平硐进风,总装机功率达 7 065 kW,其中 3850 m 平硐为 3 396 kW,3600 m 平硐为 3 669 kW,能耗及运行成本较高,也不符合国家节能环保政策。

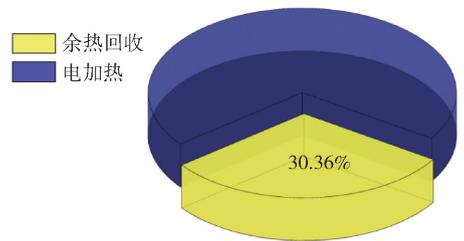


图10 温度高于-6℃时,3600 m 平硐余热回收系统装机功率与电加热方案装机功率比值

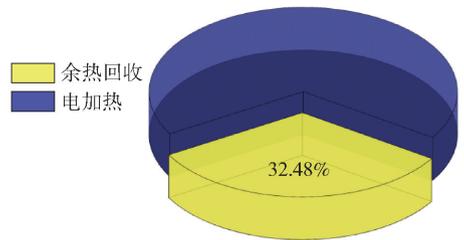


图11 温度高于-10℃时,3850 m 平硐余热回收系统装机功率与电加热方案装机功率比值

经计算,在温度高于-6℃时,3600 m 平硐的热负荷可以 3700 m 平硐处的热泵机组全部承担,此时余热回收系统的装机功率为 638 kW,而若使用直接电加热方案,装机功率为 2 101.5 kW。具体装机功率比值如图 10 所示。

对于南回风井和 3850 m 平硐,由于南回风井的回风量较大,余热利用价值更高,在环境温度高于-10℃时,热负荷可全部由南回风井处的热泵机组承担,装机功率为 948 kW,而若采用直接电加热的装机功率为 2 918.9 kW。具体装机功率比值如图 11 所示。

设备的运行成本可由式(1)计算

运行成本 = 电价 × 装机功率 × 同时使用系数 × 运行时间 (1)

普朗矿区电价 0.54 元/度,若机组每天平均运行 12 h,同时使用系数为 0.7,则 3600 m 平硐采用电加热方案一天的运行成本为:运行成本 =  $0.54 \times 2101.5 \times 0.7 \times 12 = 9532.4$  元。

使用余热回收方案一天的运行成本为:运行成本 =  $0.54 \times 638 \times 0.7 \times 12 = 2893.9$  元。

根据式(1)可以得出,3850 m 平硐采用电加热方案一天的运行成本为:运行成本 =  $0.54 \times 2918.9 \times 0.7 \times 12 = 13240.1$  元。

使用余热回收方案一天的运行成本为:运行成本 =  $0.54 \times 948 \times 0.7 \times 12 = 4300.1$  元。

若平硐入口的一个供暖周期为 4 个月,温度高于  $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$  时,3600 m 平硐采用电加热方案的耗电量为: $2101.5 \times 0.7 \times 12 \times 120 \approx 2.12 \times 10^6$  kW·h。

采用余热回收系统的耗电量为: $638 \times 0.7 \times 12 \times 120 \approx 6.43 \times 10^5$  kW·h。

节电量约  $2.12 \times 10^6 - 6.43 \times 10^5 \approx 1.48 \times 10^6$  kW·h。

温度高于  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  时,3850 m 平硐采用电加热方案的耗电量为: $2918.9 \times 0.7 \times 12 \times 120 \approx 2.94 \times 10^6$  kW·h。

采用余热回收系统的耗电量为: $948 \times 0.7 \times 12 \times 120 \approx 9.56 \times 10^5$  kW·h。

节电量约为  $2.94 \times 10^6 - 9.56 \times 10^5 \approx 1.97 \times 10^6$  kW·h,合计总节电量约为  $3.45 \times 10^6$  kW·h。

从图 10、图 11 明显可以看出余热回收系统的装机功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 m 平硐。虽然上述内容只分析了使用空气源热泵机组就能满足热负荷的情况,通过计算结果,无论 3600 m 平硐还是 3850 m 平硐,空气源热泵方案相较直接电加热方案,极大的减少了耗电量及运行成本,节能减排效果显著,存在着巨大的推广潜力。

## 5 结论

通过初步的数据分析可知,将空气源热泵技术

应用于高原矿山的回风余热回收后,进风预热的电耗较之直接电加热方案,大幅降低,节能效果明显,拥有巨大的推广潜力。

以普朗铜矿为实验基地根据数据分析结果,3600 m 平硐与 3700 m 回风井的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,余热回收设备运行正常。以一个供暖周期为限,与电加热方案相比,采用余热回收系统之后,节电量约为  $1.48 \times 10^6$  kW·h。节约电费 79.92 万元/年。

南回风井的回风量比较大,余热利用价值更高。数据与计算结果表明 3850 m 平硐与南回风井的设备运行正常,无异常情况。采用余热回收系统之后,一个供暖周期的节电量约为  $1.97 \times 10^6$  kW·h,节约电费 106.38 万元/年。从设备的运行情况和节能效果来看,空气源热泵技术应用于高原矿山的回风余热回风是成功的。综合整个余热回收系统,总节电量约为  $3.45 \times 10^6$  kW·h,合计节约电费 186.3 万元/年。

## [参考文献]

- [1] 陈军,成金华. 中国矿产资源开发利用的环境影响[J]. 中国人口·资源与环境,2015,(3):111-119.
- [2] Ma W, Liu T, Li M, et al. Effects of physical and chemical properties of working fluids on thermodynamic performances of medium-low temperature organic Rankine cycles (ORCs)[J]. Energy Conversion & Management, 2018, 171:742-749.
- [3] 魏新利,尹树桂,马新灵,等. 有机工质低温余热发电的模拟与优化[J]. 郑州大学学报(工学版),2012,33(3):72-75.
- [4] 陈少杰. 空气源热泵采暖技术在寒冷地区的应用研究[D]. 济南:山东建筑大学,2017.
- [5] 李欣林,卢军. 拉萨地区空气源热泵供暖应用研究[D]. 重庆:重庆大学,2014.
- [6] 孟得林,岳向吉,董首祥. 多点余热回收空气源热泵热水器技术及应用研究[J]. 制冷与空调(北京),2019,19(5):79-83.
- [7] 杨云龙. 基于空气源-污水源复合热泵高校浴池余热回收系统研究[D]. 沈阳:沈阳建筑大学,2019.
- [8] 陈新伟. 煤矿压风机综合余热回收设计研究[J]. 能源与环保,2017,39(7):226-229.