

# 矿井系统中水源热泵应用技术探析

——以山东省济宁梁宝寺煤矿为例

赵志钊, 马宁, 魏巍, 赵强

(山东省煤田地质局山东亚特尔集团股份有限公司, 山东 济南 250011)

**摘要:** 用水源热泵技术, 将矿井回风、矿井水、洗浴废水、冷却水(风)中的低品位废热转变为供热热能。该热泵热回收技术系统可靠、经济效益好, 可达到节能减排的目的。该文分析了矿井系统中的废热类型和应用原理, 给出了矿井回风、矿井水、洗浴废水、冷却水(风)废热回收量的计算方法, 并分析了山东济宁梁宝寺煤矿矿井废热回收供热系统设计实例。认为该技术的应用为矿区提供了生产、生活必备的热源和热水, 节约了生产成本, 保障了煤矿企业的绿色生产, 改善了矿区周围的生活环境。

**关键词:** 矿井余热回收; 水源热泵; 节能; 山东济宁

**中图分类号:** TD926.5

**文献标识码:** B

矿井一般从几百米到1 000多米深, 井下温度常年恒定, 含湿量大, 蕴含着大量的低品位能源, 矿产的开采过程会产生大量的低温余热<sup>[1]</sup>。这些能源一般随着矿井回风、矿井水、空压机冷却水、油等废弃物排放而散失在环境中, 造成能源浪费; 另一方面矿区工业广场建筑冬季供热、井筒保温和全年洗浴热水的供应又需要消耗大量的燃煤或燃油, 而且燃煤或燃油过程中还向周围环境排放了大量的废气, 造成环境污染。利用水源热泵技术提取这些低品位热量用于矿区工业广场建筑的冬季供暖、井筒保温和制取洗浴热水, 不仅能取代锅炉房, 没有环境污染, 还能有效地降低企业的生产能耗<sup>[2,3]</sup>。

## 1 矿井低品位能源回收

### 1.1 矿井回风热回收

目前矿井一般采用抽出式通风方式, 利用主扇通过回风井回风, 通过扩散塔扩散到大气中。矿井回风热回收原理如图1所示。针对矿井回风恒温(一般乏风温度在18~22℃之间)、高湿、粉尘大的特点, 且一般矿井回风风量大, 扩散塔出口小, 风速很快, 为了充分回收矿井回风中蕴含的热量, 选用“气—水”全热交换形式, 同时提取矿井回风中的显

热和潜热<sup>[4]</sup>。再通过水源热泵系统提取循环水中的热量, 使循环水温度有所降低(一般5℃)。提取热量后的循环水再重新送入矿井回风热交换器进行热交换, 循环往复, 冬季矿井回风换热量计算公式如下:

$$Q_{\text{冬季换热}} = \rho V (h_1 - h_2) \quad (1)$$

式中:  $h_1$ —冬季矿井回风湿空气的焓值;  $h_2$ —经换热后矿井回风湿空气的焓值;  $\rho$ —回风平均空气密度;  $V$ —回风量( $\text{m}^3/\text{s}$ )。

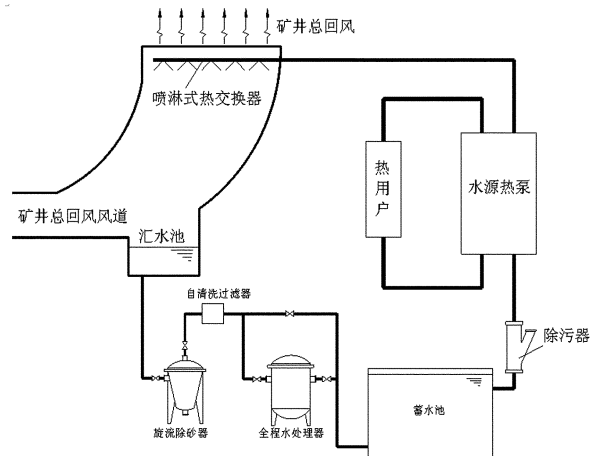


图1 矿井回风热回收原理图

\* 收稿日期: 2013-04-01; 修订日期: 2013-05-14; 编辑: 曹丽丽

作者简介: 赵志钊(1984—), 男, 山东潍坊人, 工程师, 主要从事水、地源热泵技术应用工作; E-mail: zhaozhizhao1218@163.com。

### 1.2 矿井水热回收

矿床开采破坏了地下水原始赋存状态并产生了裂隙,密切了大气降水、地表水、地下水和生活用水,各含水层之间的水力联系,使各种水沿着原有的和新的裂隙渗入井下采掘空间形成矿井水。矿井水是煤炭生产过程中排放量最多的废水。一般采用在井下设置水仓的方法将不同水平的矿井水收集起来,再通过泵站将其抽到地表,直接作为废水排掉<sup>[5]</sup>。

目前对矿井水的研究主要集中在水质处理及再生利用上,而忽略了矿井水中所蕴含的低品位热能。矿井水温度常年在 18~22℃ 之间,是非常好的低温热源。矿井水处理完毕排放前将其内所蕴含的热量用水源热泵技术将其提取转化为供热热源,每年可节约大量的一次能源消耗。矿井水热能回收利用原理如图 2 所示,将经过处理后的矿井水作为低温热源,通过水源热泵提取热量后再返回矿井水蓄水池循环利用。同时针对矿井水不连续排放的特点,矿井水蓄水池可起到很好地调节作用,矿井水热回收量计算公式如下:

$$Q_s = 1.163 \times L \times (T_1 - T_2) \quad (2)$$

式中: $Q_s$ —冬季矿井水换热量(kW); $T_1$ —冬季矿井水温度(℃); $T_2$ —提取热量后冬季矿井水温度(℃); $L$ —矿井水量( $m^3/h$ )。

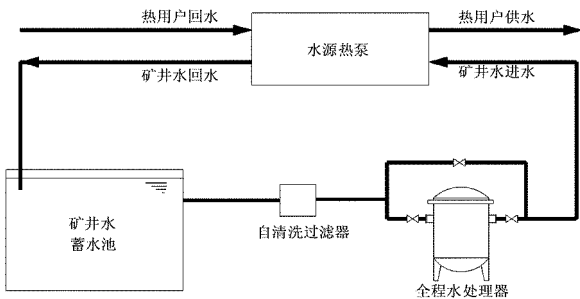


图 2 矿井水热回收原理图

### 1.3 洗浴废水

采矿工人劳动强度大,生产环境脏,在生产过程中沾染大量的矿粉、灰尘等物质,因此每天需要大量的洗浴用水。通常洗浴热水的温度为 40~45℃,但在洗澡过程中,只利用了其中很少一部分热量,排水温度仍达 30~35℃,废水直接排入下水道,不仅造成能源浪费,也给环境带来了热污染。洗浴废水的水质主要以悬浮物 SS,生化需氧量 BOD,COD 及阴

离子合成洗涤剂为主要污染物,同时含有人体的毛发、油脂和大量的细菌。洗浴废水经过处理后,可作为水源热泵的低温热源。经换热器提取热量后的洗浴废水可作为工业用水使用后排放。图 3 为洗浴废水处理利用原理图,洗浴废水热回收量计算公式同公式(2)。

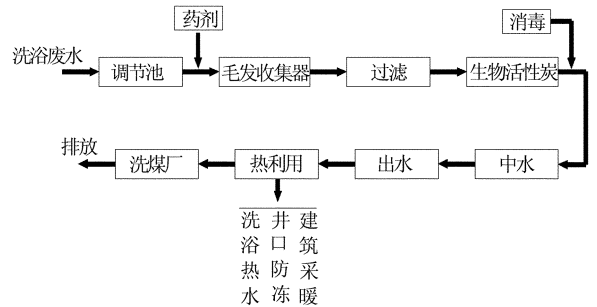


图 3 洗浴废水热回收原理图

### 1.4 空压机余热回收

空气压缩机长期连续的运行过程中,把电能转换为机械能,机械能转换为风能,在机械能转换为风能的过程中,空气得到强烈的高压压缩,使之温度骤升,这是普通物理学机械能量转换现象。空气压缩过程,同时也摩擦发热,这些产生的高热由空压机润滑油的加入混合成油、气蒸汽排出机体,这部分高温油、气流的热量相当于空压机输入功率的 60%,它的温度通常在 80℃(冬季)、100℃(夏季),这些热能由于机器运行温度的要求,都被无端的废弃排放大气中。空压机热泵机组就是利用热能转换原理,把空压机散发的热量回收转换到水里,水吸收热量后水温就会升高,空压机组的运行温度就会降低。温度升高的冷却水是非常好的低温热源,可用水源热泵提取其中的热量,其计算公式如下,空压机余热回收原理如图 4 所示。

$$Q_{\text{热回收量}} = Q_{\text{空压机}} \times \oint_1 \times \oint_2 \times \oint_3 \quad (3)$$

式中: $Q_{\text{空压机}}$ —空压机功率(%); $\oint_1$ —空压机加载率(%); $\oint_2$ —空压机转化为热能的轴功率(%); $\oint_3$ —热回收系统可回收总热量数值(%)。

## 2 案例分析

山东济宁梁宝寺煤矿于 2005 年开始投产,核定矿井生产量为 300 万 t/a,职工近 5 000 人。目前 2 台 6 t/h 蒸汽锅炉、3 台 4.2 MW 热水锅炉(两用一

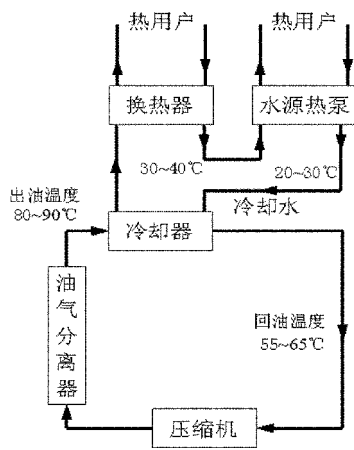


图 4 空压机冷却水热回收原理图

备)负责地面工业建筑冬季采暖、井筒保温和洗浴热水,年总运行费用 950 万元,耗煤量 10 000 t(热值 21 000 kJ/t)。现有锅炉房系统运行管理人员为 16 人,工人平均工资为 2 200 元/月,年费用为 42.24 万元。

## 2.1 工程用热概况

该煤矿工广供暖面积包括部分厂房、办公、宿舍等约 87 000 m<sup>2</sup>,按照 48W/m<sup>2</sup> 计算。矿井井口为防止结冰,要求进风量约为 183 m<sup>3</sup>/s,冬季最低进风温度要求 ≥2℃<sup>[6]</sup>,实际回风温度约为 18~22℃,井口保温负荷冬季计算参数取室外空气最低气温 -13.7℃,相对湿度为 67% 计算。工人每天三班连续生产,每天洗浴热水用水量为 1 200 m<sup>3</sup>,每班用水 400 m<sup>3</sup>,洗浴水温要求 40℃ 以上,按照冷水 15℃,热水出水温度 40℃ 计算,冷水加热时间 5 h,洗浴室每班运行 3 h 进行计算。经计算可得矿区生产、生活用热负荷如表 1 所示。

表 1 热负荷汇总

序号	建筑名称	热负荷(kW)	备注
1	工广供暖	4 176	建筑面积 87 000 m <sup>2</sup>
2	井筒保温	5 304	按 -13.7℃ 计算
3	洗浴热水	2 334	5 小时加热;每天三班
合计		11 814	

## 2.2 废(余)热及回收利用概况

冬季矿井回风风量约为 183 m<sup>3</sup>/s,初始温度为 20℃,回风温度约为 18℃,相对湿度为 90%,换热后乏风温度为 13℃,相对湿度为 98%,回风平均空气密度为 1.283 kg/m<sup>3</sup>。冬季矿井为保证生产矿井水

排水量为 180 m<sup>3</sup>/h,排水温度约 17℃,依据水源热泵主机的适用工况设定热量回收后的排水温度为 9℃。该煤矿洗浴热水平均每小时排水量 50 m<sup>3</sup>/h,经水处理后的排水温度约为 28℃,依据水源热泵主机的适用工况设定热量回收后的排水温度为 8℃。该煤矿因生产需求配备了 7 台 SA-250 水冷式空压机(3 用 4 备),每台空压机功率为 250 kW,按照实际运行工况,取 3 台空压机运行时电能转换为热能的效率 $\eta$ 分别为 100%,80%,62%。采用以上设计参数,依据式(1)、式(2)、式(3)可计算取得矿井回风、矿井水、洗浴热水、空压机排热等废热的可利用负荷如表 2 所示。

表 2 可输出热负荷统计

序号	系统名称	供热负荷(kW)
1	矿井回风热回收	5 246
2	矿井水热回收	2 166
3	洗浴热水热回收	1 505
4	空压机热回收	481
合计		9 398

注:取水源热泵的平均制热能效比为 4.4。

## 2.3 方案设计思路

依据表 1 和表 2 的负荷数据可得,冬季低品位热源可输出热负荷比矿区实际需要热负荷少 2 416 kW。缺少部分热负荷采用空气源热泵系统方式解决,即矿区热源采用螺杆空气源热泵机组+离心水源热泵机组的形式。全年均使用矿井水与空压机余热回收系统提供洗浴热水热源;冬季以矿井回风热回收、洗浴热水热回收及空气源热泵系统作为热源提供井筒保温与厂区建筑供暖热负荷,优先使用矿井水、洗浴热水热回收和矿井回风作为低温热源,空气源热泵在废(余)热回收系统供热量不足时启动,作为调峰热源使用。依据以上设计思路,选用 1 台离心式全热回收水源热泵机组用于制取洗浴热水,选用螺杆空气源热泵机组 3 台、离心水源热泵机组 3 台,用于井筒保温及冬季建筑物采暖。1 台全热回收型水源热泵机组主要提供洗浴热水热源,供热量约为 2 500 kW,满足洗浴热水负荷 2 334 kW;3 台离心式水源热泵机组与 3 台螺杆空气源热泵机组提供热量 3×1 000+3×2 500=10 500 kW,满足井口保温和厂区采暖负荷共 9 389 kW。表 3 为选用空气源热泵、离心式水源热泵基本技术参数表。

表 3 热泵技术参数

设备	台数	制热量 (kW)	制热功率 (kW)	热水流量 (m <sup>3</sup> /h)	热水参数 (°C)	余热水参数 (°C)
空气源热泵	3	1000	278.2	85.7	40/45	20/15
离心式水源热泵	3	2400	543	431	50/55	20/15

注：以上为机组标准工况下参数，运行工况应根据现场实际参数确定。

### 2.4 经济与环境效益分析

冬季 3 台离心式水源热泵机组与 3 台空气源热泵机组供热运行，按 120 d 计算。1 台全热回收型离心式水源热泵机组制取生活热水，全年运行。电价按照 0.66 元/度计算。运行费用的计算如表 4、表 5 所示，全年供热和生活热水的运行费用总计为 297.63+232.23=529.86 万元。目前蒸汽锅炉及热水锅炉提供地面工业建筑冬季采暖、井筒保温和洗浴热水年耗煤量约 10 000 t，年费用约为 950 万元。进行热回收系统改造后每年节省运行费用 420 万元。现有锅炉房系统总运行管理人员为 16 人，工人平均工资为 2 200 元/月，此项目改造后机房值守人员为 3 人，按目前锅炉房工人平均工资，则每年所节约的人工费约为 34.3 万元。由此可知项目建成后每年约可节省运行管理费用 454.3 万元。

表 4 空调运行费用分析

设备	设备功率 kW	运行时间 (d)	时间份额 (%)	负荷率 (%)	用电量 kWh	总电量 kWh	运行费用 (元)
机组	2427.6	120	5	100	349574.4	3757924.8	2480230.4
			25	75	1310904		
			50	50	1747872		
			20	25	349574.4		
水泵	485.5	120	5	100	69912	751554	496025.64
			25	75	262170		
			50	50	349560		
			20	25	69912		
合计							2976256.04

注：运行季节为冬季，每天运行 24 小时。

表 5 洗浴热水运行费用分析

运行季节	设备名称	设备功率 (kW)	运行时间 (d)	每天运行时间 (h)	用电量 (kWh)	运行费用 (元)
全年	机组	543	360	15	2932200	1935252
	水泵	108.6	360		586440	387050.4
合计						2322302.4

煤矿现有蒸汽锅炉及热水锅炉年耗煤量为 10 000 t (热值约 21 000 kJ /t)，折合成标准煤量为 7143 t。

按照发电效率 0.360 kg 标准煤/kW·h 计算，热泵机组运行耗电折合标煤量约 2 642 t。因此项目建成后每年节约标煤 4 501 t。按每吨标煤燃烧排放二氧化碳 2.6 t，排放二氧化硫 0.02 t 计算，项目建成后每年减少 CO<sub>2</sub> 排量 117 026 t，减少 SO<sub>2</sub> 排量 90.02 t。

### 3 结语

煤矿矿井开采中产生的大量回风、涌水、洗浴废水，温度在 18~30℃ 之间，煤炭开采所使用的空气压缩机的冷却水(风)，约在 80~100℃，其中蕴含较多的低品位热能，适合于水源热泵机组的技术应用条件，具有较好的经济效益和环境效益。就该文所采用的案例数据可得，该煤矿产能约为 300 万 t/a，采用热回收系统后，减少供热系统运行费用 465.6 万元，节约标准煤 4 501 t。对于该工业企业而言，即可产生 1.55 元/t 煤的生产成本节约合 15 kg/t 煤的环保效益。

采用水源热泵技术，将矿井回风、矿井水、洗浴废水、冷却水(风)中的低品位废热转变为供热热能。该热泵热回收技术系统可靠、运行费用低、自控程度高、维护简单，可以取消锅炉房，达到节能减排的目的。该项目的研究应用开创了矿井能源综合利用和热泵技术应用一个新的技术途径，符合我国环境保护和能源节约的政策，值得推广。

### 参考文献：

- [1] 王景刚,张鑫. 矿井余热水源热泵技术的应用[J]. 能源与节能, 2012,78(3):46-47.
- [2] 孔庆友,姚春梅,何国幸,等. 山东省济宁及枣庄地区煤矿矿坑排水综合利用规划建议[J]. 山东国土资源,2004,20(2):45-48.
- [3] 杜春涛,董志峰. 矿井回风喷淋换热器节水及换热效率影响因素研究[J]. 煤炭科学技术,2012,(12):80-83.
- [4] 孙廷春. 矿井水的回收与利用[J]. 煤炭加工与综合利用,2006,(3):47-49.
- [5] 于卫平,王清平. 水源热泵技术在山东协庄煤矿中的应用[J]. 暖通空调,2008,(11):130-132.
- [6] 国家安全生产监督管理总局,国家煤矿安全监察局. 煤矿安全规程[M]. 北京:煤炭工业出版社,2011:15.

# Primary Alysis on Water Resource Heat Pump Application Technology in Mine System

——Setting Liangbaosi Coal Mine in Jining City as an Example

ZHAO Zhizhao, MA Ning, WEI Wei, ZHAO Qiang

(Shandong Yateer Group, Shandong Jinan 250011, China)

**Abstract:** Water source heat pump technology can change the low - grade waste heat coming from the mine return air, mine water, bathing waste water and cooling water (wind) into the heating energy. The heat recovery system of this heat pump is reliable. It can bring significant economic benefits and also can make energy - saving and emission - reduction come true. In this paper, the types of waste heat and application theory in mine system have been analyzed, and provides the method of calculating the amount of waste heat in mine return air, mine water, bathing waste water and cool water (wind). The design examples of waste heat recovery heating system for some coal mines in Shandong province have also been analyzed. The application of this project creates a new technological approach for the mine energy utilization and heat pump technology application; it not only provides essential sources of heat energy and hot water for mine production and people's daily life and creates a new way for saving cost of production, but also provides a guarantee for coal mine enterprise's environmental friendly production, greatly improved the living environment around the mines.

**Key words:** Heat; recovery; water source heat pump; energy saving; Jining city in Shandong province