Instrumentation and Equipments 仪器与设备, 2024, 12(4), 569-577
Published Online December 2024 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/iae
https://doi.org/10.12677/iae.2024.124075

Hans汉斯

双相高品位废热回收技术在老公营子煤矿的应用

王金峰[1]，庞志民[2]

[1]内蒙古平庄煤业(集团)有限责任公司老公营子煤矿，内蒙古 赤峰
[2]北京中矿赛力贝特节能科技有限公司，北京

收稿日期：2024年8月30日；录用日期：2024年10月2日；发布日期：2024年12月17日

摘　要

介绍了双相高品位废热回收设备的主要性能参数和选型；计算分析了废热回收设备的性能匹配设计参数；结合智能化监控系统的精准调控，达到高效废热回收效果，得出废热回收利用确保洗浴供热系统改造获得较好经济及社会效益的结论。

关键词

空压机，双相废热，换热器，洗浴供热

Application of Duplex High-Grade Waste Heat Recovery Technology in Laogongyingzi Coal Mine

Jinfeng Wang[1], Zhimin Pang[2]

[1]Laogongyingzi Coal Mine, Inner Mongolia Pingzhuang Coal Industry (Group) Co., Ltd., Chifeng Inner Mongolia
[2]Beijing Zhongkuang Celebrate Energy Saving Technology Co., Ltd., Beijing

Received: Aug. 30th, 2024; accepted: Oct. 2nd, 2024; published: Dec. 17th, 2024

Abstract

The main performance parameters and selection of duplex high-grade waste heat recovery equipment were introduced. The performance matching design parameters of waste heat recovery equipment were calculated and analyzed; combined with the precise control of the intelligent monitoring

文章引用: 王金峰, 庞志民. 双相高品位废热回收技术在老公营子煤矿的应用[J]. 仪器与设备, 2024, 12(4): 569-577.
DOI: 10.12677/iae.2024.124075

system, achieve efficient waste heat recovery effect. It is concluded that the waste heat recovery and utilization ensure that the transformation of the bath heating system obtains better economic and social benefits.

Keywords

Air Compressor, Duplex Waste Heat, Heat Exchanger, Bath Heating

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Open Access

1. 矿井简介

老公营子煤矿位于赤峰市元宝山区风水沟镇，隶属国家能源集团平庄煤业，在册员工 1249 人。老公营子煤矿工业广场设有压风机房一座，装有 3 台广东正力双螺杆空压机，型号为 GE315-62/10，电机功率 315 kW，排气量 59.6 m^3/min，排气压力 1.0 MPa。空压机生产的压缩空气送入地面储气罐，储气罐出口管道接入井下压风自救系统。

老公营子煤矿联建楼职工浴室有淋浴喷头 109 个、2 个 12 m^3 浴池、2 个 20 m^3 浴池、1 个 7 m^3 浴池。联建楼 2 楼布置有两个 36 m^3 淋浴水箱。每年采暖季，风水沟锅炉房输送 120℃蒸汽到矿，用于矿井供暖及联建楼洗浴供热，非采暖季从平庄热电厂采购 90℃热水满足洗浴用水，每天由保温水车运送大约 120 m^3 到矿。

2. 空压机废热情况及利用方案

2.1. 空压机废热情况

老公营子煤矿空压机房安装 3 台空压机每天正常运行 1 台，早班、中班正常加载运行时间 16 小时，夜班八小时为待机运行。由于空压机运行过程中产生大量的废热，造成空压机房内温度上升，尤其是在夏季部分时间段甚至造成空压机超温故障报警和停机，影响煤矿正常生产。

一台空压机系统 5 年运行费用组成：系统设备投资及维护费用占到总费用的 25%，电能消耗占到 75%。在空压机正常运行状态下，压缩机用于增加空气势能所消耗的电能只占到运行效率的 15%左右，85%的电能转化为热能，通过空压机机壳和冷却器排放到了大气中。

为此，矿领导经研究决定，对老公营子煤矿空压机房废热充分利用解决空压机高温故障报警问题，同时利用空压机废热补充矿联建楼洗浴用水负荷，达到消除故障、节能增效一举两得的效果。

2.2. 空压机废热利用方案

通过安装空压机余热回收系统，把空压机运行过程产生的余热充分利用，既可以用于洗浴热水，也解决了夏季空压机散热效率低、能耗高的问题，可为矿井生产提高效益、降低排放做出一定贡献。老公营子煤矿空压机房正常生产开启一台 315 kW 空压机，可回收的余热量约 200 kW，制取 55℃左右热水可用于补充联建楼职工洗浴用水。

在非采暖季节，老公营子煤矿工业广场洗浴热水需要从 50 公里外的平庄电厂由水车运输到矿区，每天需要约 120 m^3，水温 85℃~90℃。空压机余热制取 55℃可作为职工洗浴热水的补充供应，空压机余热

系统运行后，每天可减少外运热水约 45 m^3。

如图 1 所示，老公营子煤矿空压机余热利用系统设计采用双相余热回收机组提取空压机运行过程冷却油和压缩空气中的高品位废热，用于加热软化水到 65℃以上，软化水在循环泵的驱动下从热回收机组流动到水箱加热器中，水箱加热器布置在充满自来水的加热水箱中，65℃软化水通过水箱加热器与自来水换热后再流回热回收机组继续提取空压机废热，如此往复循环，加热水箱内自来水升高到 55℃后可输送到浴室作为洗浴用水使用。

3. 双相高品位废热回收技术研究内容

老公营子煤矿双相高品位废热回收技术主要研究如何高效利用螺杆空压机压缩空气和冷却油中的大量废热，为此，主要研究内容是针对空压机具体运行参数和状态进行换热器参数选型，换热器的主要功能确定为提供 55℃以上热水的水换热器。通过安装双模式空压机余热回收系统，把空压机运行过程压缩空气中的气相废热和冷却油中的液相废热都充分利用，在热回收机组中与水进行热交换，最后制取出 55℃左右热水，即可用于矿井浴室洗浴热水。

3.1. 老公营子煤矿空压机废热情况

老公营子煤矿螺杆式空压机电机功率为 315 kW，冷却油和压缩空气中的热量大约占空压机输入功率的 70% [1]，则有效回收功率约 220 kW。对于喷油螺杆压缩机的热量回收水系统，实际回收热量占比与出水温度负相关，与回收水系统的传热平均温差正相关，若回收油冷却器的热量供应生活热水，在冬季当进水 10℃、出水 60℃时，为保证压缩机的合理油温，实际的回收热量占比约 65% [2]，本项目按有效回收功率 200 kW 保守计算。

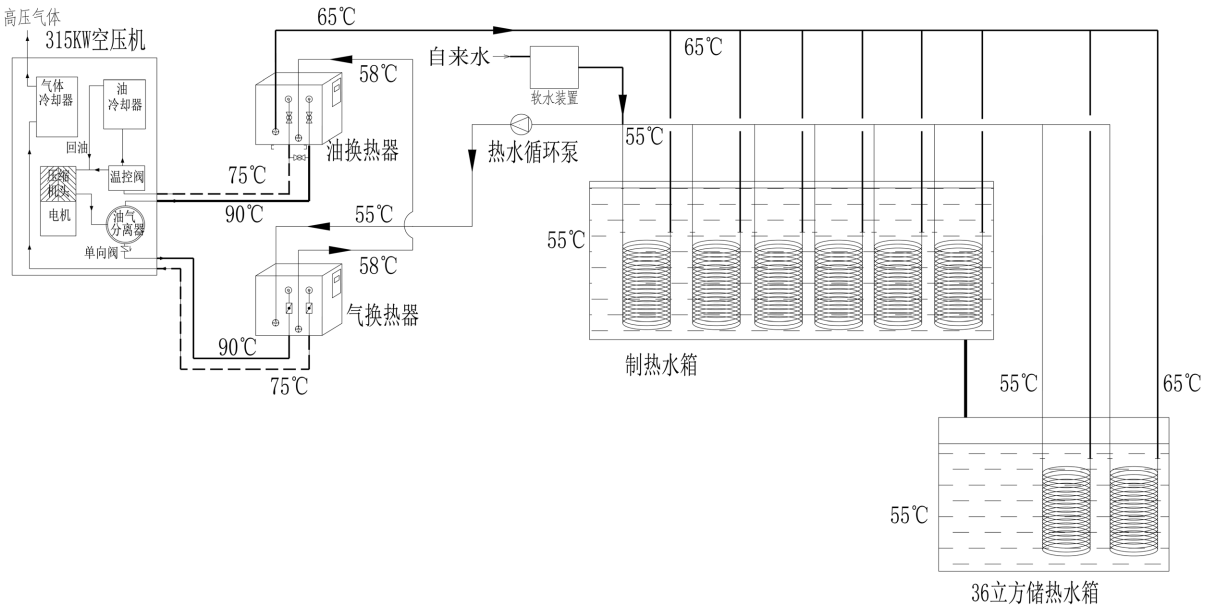

Figure 1. Schematic diagram of the duplex recovery process of air compressor waste heat
图 1. 空压机废热双相回收利用工艺原理图

喷油螺杆压缩机油气体积比为 1%左右时的性能较好[3]，针对老公营子矿 315 kW 螺杆空压机，空压机运行过程产生的废热体现在高温冷却油和压缩空气中，属于液相和气相两种储热介质，为了充分提取空压机产生的废热，需针对性选择气、液双相余热回收设备。以下按空压机公称容积流量 1 m^3/s，冷却油

循环流量 0.01 m^3/s，温度在 90℃~100℃范围，保守按 90℃计算废热量，冷却油提取废热后温度取 75℃，压缩空气提取废热后温度取 75℃。

3.2. 冷却油换热器选型计算

喷油螺杆压缩机通过油水换热器可以回收 40%占比的热量[4]，实际的回收热量占比约 65%，其中冷却油热量占比 70%，取冷却油中有效回收功率约 140 kW。

3.2.1. 油水换热器选用板式换热器温差计算

	热侧(冷却油)	冷侧(软化水)
进口温度(℃)	90 (T_1)	58 (t_1)
出口温度(℃)	75 (T_2)	65 (t_2)

按以上换热温度计算对数平均温差 ΔTm：

$$\Delta T_1 = T_1 - t_2 = 90 - 65 = 25$$

$$\Delta T_2 = T_2 - t_1 = 75 - 58 = 17$$

$$\Delta Tm = (\Delta T_1 - \Delta T_2)/\ln(\Delta T_1/\Delta T_2) = 20.7$$

3.2.2. 根据冷却油循环流量计算最大热量传递速率 Q

$$Q = G \cdot \rho \cdot CP \cdot \Delta t_0 = 0.01 * 980 * 1.4 * 15 = 205.8 \text{ kW}$$

G：冷却油体积流量，取 0.01 m^3/s；

ρ：冷却油密度(1.0 MPa, 90℃)，取 980 kg/m^3；

CP：冷却油比热容，取 1.4 KJ/(kg·℃)；

Δt：冷却油进出换热器温差，取 15 (进 90℃，出 75℃)。

3.2.3. 确定板式换热器换热面积 A

$$A = Q/(U \times \Delta Tm) = 205{,}800/(304 \times 20.7) = 17.4 \text{ m}^2$$

其中，A 代表换热面积，m^2；

Q 代表热量传递速率，kW；

U 代表总传热系数，$W/(m^2*K)$ (实验得出洁净工况 840，污垢工况 304，取平均值 572)；

ΔTm 代表平均温差。

换热面积的计算需要考虑污垢系数，这是影响换热器传热效率的重要因素之一。污垢系数反映了换热器表面积被污垢覆盖后对传热性能的影响程度。污垢层的存在会增加流体的流动阻力，并且显著降低换热器的传热效率。对于高粘度相对比较干净的介质，如一些润滑油和有机容积类介质，板式换热器设计面积余量取 15%~20%足够[5]，本项目板式换热器选型考虑工质洁净和污垢工作传热系数的平均值，为了确保项目实际运行效果，空压机油换热板式换热器换热面积在计算值 17.4 m^2 的基础上增大 30%，确定为 22.8 m^2。

3.3. 压缩空气换热器选型

GE315-62/10 型单螺杆空压机正常加载运行，公称容积流量 1 m^3/s，换算到 1.0 MPa，90℃条件下实际流量约 0.45 m^3/s，压缩空气中热量占比 30%，有效回收功率约 60 kW。

本项目采用螺旋缠绕管式气－水换热器提取压缩空气中的废热，气－水换热器外壳为 304 材料，缠绕管为 316 材料，螺旋缠绕管式换热器特征结构中管程同向交错排列，内层缠绕圈数为 4，外层缠绕圈数为 10，壳程流速 0.25 m/s，管程介质流速 1.5 m/s 时，其传热系数约 81 $W/(m^2 \cdot ℃)$ [6]。

螺旋缠绕管式结构延长了管段长度，使介质在管内停留时间长，换热充分，介质流经管程和壳程时，

流道界面和流动方向不断发生变化，冲击物流底层，形成复杂的三元混合流，形成强烈的湍流，强化了传热，使换热效果得到了极大的提高，传热系数最高可达 14,000 W/m·K。

螺旋管式空－空换热器总传热系数为 100~259 W/(m²·K) [7]，本项目选择螺旋缠绕式气－水换热器，根据实际应用经验，总换热系数取 200 W/(m²·K)。

3.3.1. 螺旋缠绕管式换热器温差计算

	热侧(压缩空气)	冷侧(软化水)
进口温度(℃)	90 (T_1)	55 (t_1)
出口温度(℃)	75 (T_2)	58 (t_2)

按以上换热温度计算对数平均温差 ΔTm：

$$\Delta T_1 = T_1 - t_2 = 90 - 58 = 32$$

$$\Delta T_2 = T_2 - t_1 = 75 - 55 = 20$$

$$\Delta Tm = (\Delta T_1 - \Delta T_2)/\ln(\Delta T_1/\Delta T_2) = 25.5$$

3.3.2. 根据压缩空气循环流量计算最大热量传递速率 Q

$$Q = G \cdot \rho \cdot CP \cdot \Delta t_0 = 0.45 * 9.72 * 1.1 * 15 = 72\ kW$$

G：压缩空气体积流量(1.0 MPa, 90℃)，取 0.45 m³/s；

ρ：压缩空气密度(1.0 MPa, 90℃)，取 9.72 kg/m³；

CP：压缩空气比热容，取 1.1 KJ/(kg·℃)；

Δt：压缩空气进出换热器温差，取 15 (进 90℃，出 75℃)。

3.3.3. 确定螺旋缠绕换热器换热面积 A

$$A = Q/(U \times \Delta Tm) = 72{,}000/(200 \times 25.5) = 14.1\ m^2$$

其中，A 代表换热面积，m²；

Q 代表热量传递速率，kW；

U 代表总传热系数，$W/(m^2*K)$ (304 材料，取 150)。

本项目压缩空气余热回收换热器选用的螺旋缠绕换热器换热面积确定为 15 m²。

3.4. 水箱加热器选型

从螺杆空压机油换热器和气换热器换热后的软化水进入水箱加热器加热水箱内存储的自来水，水箱加热器选用 32 × 1.5 不锈钢盘管结构。不锈钢盘管具有不锈性、耐蚀性、美观性、高强度、百分之百可回收等特性。不锈钢盘管新型可靠、连接方法简单方便，使其具有更多其他管材不可替代的优点。

不锈钢盘管的导热系数为 13 W/m·K，铜盘管的导热系数为 100 W/m·K，尽管不锈钢的导热系数比不上铜管，但是不锈钢管的壁厚可以减薄 0.5~0.8 mm 来增加其热交换效果，而铜盘管因强度及冲蚀磨损等原因，其壁厚不能低于 1.2 mm。由于铜盘管内外壁比不锈钢管更粗糙，容易结垢，增加了铜盘管的热阻，这又使铜盘管与不锈钢盘管总体传热系数的差距更加缩小。

根据老公营子矿工业广场的实际情况，结合空压机房附近实际场地空间，设计确定的换热机房结构紧凑，同时为了简化空压机余热回收系统设备控制流程，研究确定采用高位布置的加热水箱，加热到 55℃的热水可自流到储热水箱中，配套水箱加热器结构外形见图 2。

3.4.1. 水箱加热器具体结构参数

1) 水箱加热器结构：不锈钢螺旋盘管；

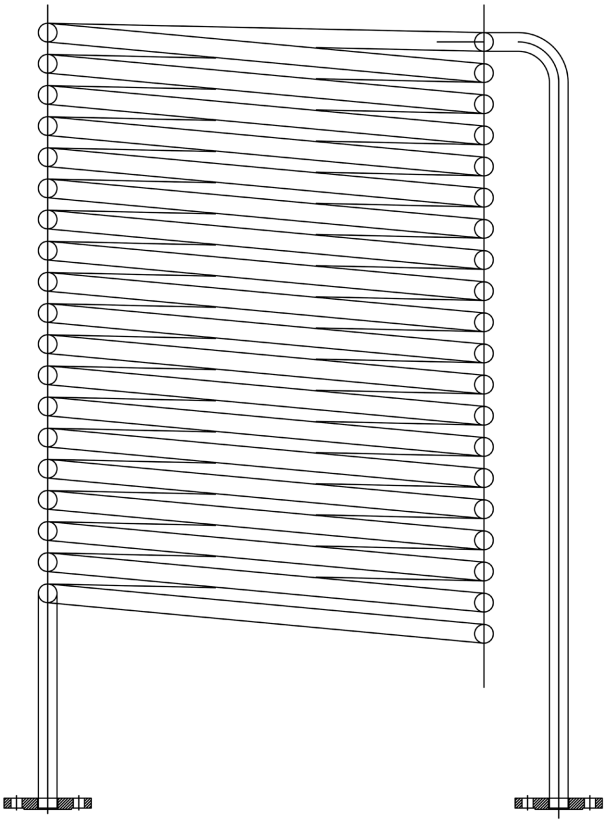

Figure 2. Outline diagram of water tank heater
图 2. 水箱加热器结构外形图

2) 盘管材料、规格：304，Φ32 × 1.5 管；
3) 盘管螺距、圈数：50 mm，20 圈；
4) 盘管展开长度：≥44 m；
5) 展开面积：≥4.1 m^2；
6) 承压：≤1.0 MPa；
7) 盘管螺旋中径 700 mm。

3.4.2. 不锈钢盘管水箱加热器进出口温度

	热侧(软化水)	冷侧(水箱自来水)
进口温度(℃)	65 (T_1)	48 (t_1)
出口温度(℃)	55 (T_2)	55 (t_2)

按以上换热温度计算对数平均温差 ΔTm：

$$\Delta T_1 = T_1 - t_2 = 65 - 55 = 10$$

$$\Delta T_2 = T_2 - t_1 = 55 - 48 = 7$$

$$\Delta Tm = (\Delta T_1 - \Delta T_2)/\ln(\Delta T_1/\Delta T_2) = 8.4$$

空压机冷却油和压缩空气最大传热速率之和为 212 kW。

3.4.3. 不锈钢盘管水箱加热器换热面积 A

$$A = Q/(U \times \Delta Tm) = 212{,}000/(900 \times 8.4) = 28\ m^2$$

其中，A 代表换热面积，m^2；

Q 代表热量传递速率，kW；

U 代表总传热系数，$W/(m^2*K)$ (不锈钢盘管水箱加热器常态换热系数取 900)。

根据计算选择 8 台不锈钢盘管水箱加热器确保满足空压机冷却油和压缩空气余热充分回收加热自来水温度达到 55℃的要求，本项目在加热水箱布置 6 台不锈钢盘管水箱加热器，另外在储热水箱布置 2 台作为储热水箱温度不够时加热使用。

4. 双相高品位废热回收系统实施

老公营子煤矿工业广场洗浴水负荷在非采暖季为每天约 120 m^3，水温 80℃~90℃，按 90℃计算 120 m^3 洗浴热水混合 15℃冷水到 55℃后总体积为 225 m^3。其中 70%的水量用于男浴池和来宾浴池供水，每天至少更换两次浴池热水。用于淋浴的热水量约 67.5 m^3 热水量。

通过空压机双相高品位废热回收系统应用，系统制取 55℃热水，空压机按每天早班、中班正常加载运行 16 小时、夜班待机运行 8 小时计算，自来水供水温度按 15℃考虑，系统早班、中班 16 小时可生产 55℃热水 65 m^3。夜班 8 小时空压机基本不加载，能耗约为运行功率的 40%，可回收余热功率约 75 kW，可生产 55℃热水约 13 m^3。这样空压机双相高品位废热回收系统每天可制取 55℃热水约 78 m^3，完全满足职工浴室淋浴热水需求。

由于矿井洗浴主要集中在上下班交班时间段，用水量比较集中，空压机双相高品位废热回收系统设计配置了 36 m^3 储热水箱和两台流量 25 m^3/h 的热水输送泵，系统制取的热水可及时输送到矿联建楼二楼的 2 座 36 m^3 淋浴水箱中，洗浴低峰时间段系统可随时补充热水保持 2 座淋浴水箱为满水状态，确保洗浴高峰时间段淋浴热水的供应。图 3 为最终确定的双相高品位废热回收制取洗浴热水系统原理。

5. 双相高品位废热回收制取洗浴热水系统实施效果

5.1. 废热回收、高效利用

老公营子煤矿空压机房通过安装空压机双相高品位废热回收制取洗浴热水系统，针对在用的螺杆空压机安装了压缩空气和冷却油换热器，系统运行后排入储气罐的压缩空气温度稳定保持在 50℃~55℃，空压机冷却油温度稳定保持在 70℃~75℃范围内，确保空压机正常运行的前提下最大限度提取了空压机运行废热，系统每天制取 55℃热水 50~65 吨。

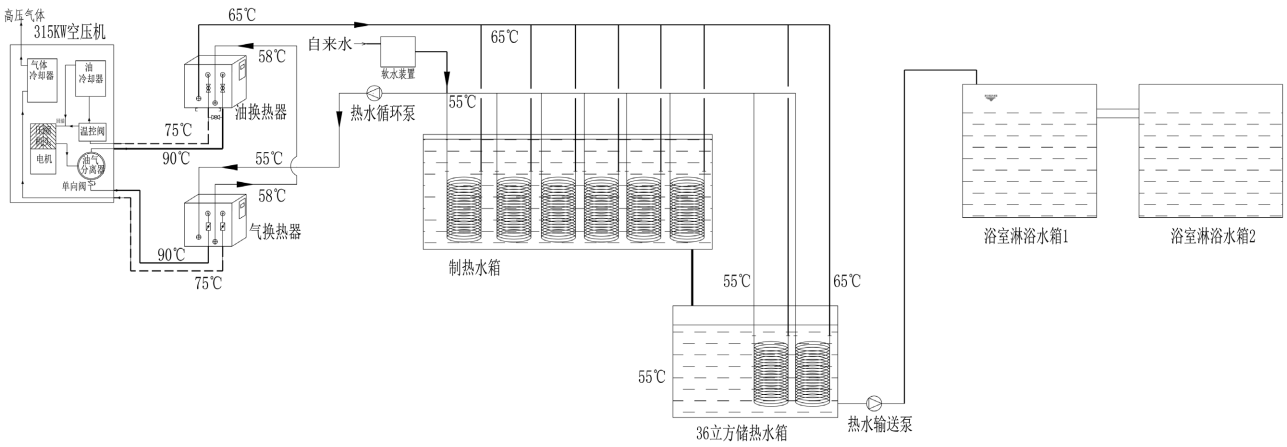

Figure 3. Principle of duplex high-grade waste heat recovery to produce hot water system for bath
图 3. 双相高品位废热回收制取洗浴热水系统原理

5.2. 智能运行、安全可靠

老公营子煤矿空压机双相高品位废热回收系统采用 PLC 程序结合先进的上位机监控系统，实现全过程(补水、软化、循环加热、热水输送、液位监控)无人值守，智能化全自动运行。系统运行过程中能够通过手机客户端进行远程监控，无需人员到现场即可了解系统运行参数和工况，现场人性化的液晶显示系统，使得巡检及维护人员观察更便捷、操作更简单。

老公营子煤矿空压机房三台螺杆空压机负责全天向井下供应高压空气以满足井下压风自救系统及其它生产用气需要。在夏季，由于室外气温较高，螺杆空压机运行过程中产生的大量热量不能及时散掉，经常造成运行过程中的螺杆空压机高温报警，甚至故障停机。

由于空压机房为无人化自动运行车间，当夜班维修人员较少的情况，如果巡检人员不能及时进行现场操作恢复空压机运行，可能会造成向井下供应压缩空气压力不够甚至中断，影响井下生产甚至造成生产安全隐患。

因此，双相高品位废热回收利用系统的实施可确保夏季空压机冷却散热效果更可靠，保证了空压机房稳定生产和向井下供气，消除供气不足带来的安全隐患。

5.3. 经济节能、低碳环保

老公营子煤矿空压机双相高品位废热回收系统每天可制取 55℃热水约 78 m^3，折合为 90℃外购热水约 41.6 m^3，按热水含运费价格 25 元/m^3 计算，每年可节省热水采购费用 37.96 万元。

老公营子煤矿空压机房三台螺杆空压机运行功率为 315 kW，空压机双相高品位废热回收系统按回收率 60%运行功率计算，可回收 189 kW 的运行功率用于制取洗浴热水。空压机每天按运行 16 小时，每年按运行 300 天计算，则余热回收系统相当于每年减少消耗标准煤 111.4 吨，每年相应可减少二氧化碳排放 289.64 吨，减少二氧化硫排放 946.9 公斤，减少氮氧化物排放 824.36 公斤，减少粉尘颗粒排放 1225.4 公斤。

6. 结论

老公营子煤矿空压机双相高品位废热回收项目通过关键换热器的设计选型和分析计算，确定了配套 315 kW 空压机废热回收制取热水时，冷却油换热器面积需不小于 17.4 m^2，压缩空气换热器面积需不小于 14.1 m^2，并确定了换热器的基本结构、参数和材料，为高效回收空压机双相废热提供理论支持。废热回收系统的实施解决了螺杆空压机夏季运行的高温故障问题，保证了井下供气压力和流量，彻底消除井下因供气不足造成的安全隐患。

另外，老公营子煤矿空压机双相废热回收利用系统的应用，制取的洗浴热水完全满足了职工浴室的淋浴热水需求，取得了显著的节能减排效果和经济效益。未来，该技术还有望在更多领域得到应用和推广，为我国的节能减排事业做出更大的贡献。同时，我们继续加强技术研发和创新，提高废热回收技术的效率和可靠性，推动该技术的进一步发展和应用。

参考文献

[1] 徐树风. 螺杆压缩机的能量回收[J]. 流体机械, 2000, 28(10): 35-36.

[2] 林子良, 鲍洋洋, 孙晓明, 刘玉勇. 螺杆空压机组的热量分析与计算[J]. 流体机械, 2014, 42(8): 46-51.

[3] 辛电波, 彭学院. 喷油螺杆压缩机热力性能影响因素的试验研究[J]. 流体机械, 2008, 36(4): 4-11.

[4] 朱立民, 闵圣恺. 喷油螺杆空压机热回收节能实践[J]. 通用机械, 2009(10): 79-81.

[5] 何满红, 王晓晨. 板式换热器中污垢系数与面积余量的分析与选取[J]. 区域供热, 2010(4): 23-28.

[6] 郑蔚温, 刘红梅, 等. 螺旋缠绕管式换热器传热性能优化与计算程序开发, 计算机测量与控制[J]. 2023, 31(8): 197-204.

[7] 刘银龙, 付衍琛, 等. 螺旋管式空气-空气换热器的设计和实验研究[J]. 推进技术, 2021, 5(42): 1088-1093.