

煤矿井下集中制冷设备应用技术研究与实践

曹磊 侯祥

陕西彬长孟村矿业有限公司, 中国·陕西 咸阳 712000

摘要: 本文以彬长矿业孟村煤矿 401、403 盘区集中制冷系统为工程实例, 系统阐述井下集中制冷设备的系统组成、工作原理、设备选型、管路设计及智能控制技术, 对比分析地面散热、回风散热、矿井涌水散热三种冷凝热排放方案的适用性, 重点研究基于矿井涌水散热的盘区集中制冷设备应用工艺, 并对系统运行效果、经济性及技术创新点进行总结。工程实践表明, 采用 ZLS-2000 型矿用防爆集中制冷机组, 配合矿井涌水散热与 PLC 智能监控, 可将采掘工作面温度由 35℃降至 26℃以下, 能效比提升至 4.2 以上, 年增产效益显著, 为同类深井高温矿井热害治理提供可复制的技术方案与实践参考。

关键词: 煤矿井下; 集中制冷设备; 热害治理; 矿井涌水散热; 防爆制冷机组

Research and Practice on the Application Technology of Centralized Refrigeration Equipment in Coal Mine Underground Settings

Cao Lei, Hou Xiang

Shaanxi Binchang Mengcun Mining Co., Ltd., China Shaanxi Xianyang 712000

Abstract: Using the centralized cooling system of blocks 401 and 403 at Binchang Mining's Mengcun Coal Mine as a case study, this paper systematically examines the system composition, operating principles, equipment selection, pipeline design, and intelligent control technologies for underground centralized cooling systems. It compares the applicability of three condensation heat dissipation methods—surface cooling, return air cooling, and mine water drainage cooling—and focuses on the application process of block-level centralized cooling systems utilizing mine water drainage. The study summarizes the system's operational performance, economic efficiency, and technological innovations. Engineering practice demonstrates that the deployment of the ZLS2000 explosion-proof mining.

Keywords: Underground coal mine; Centralized cooling equipment; Heat hazard control; Mine water inflow heat dissipation; Explosion-proof cooling unit

0 引言

随着煤炭开采深度持续增加, 深井高地温热害已成为制约矿井安全高效生产的关键因素。井下集中制冷设备以制冷量大、覆盖范围广、运行稳定、节能高效等优势, 成为深井热害治理的核心技术手段。井下集中制冷设备通过建立集中制冷站, 实现冷量统一制备、管网输送、末端分配, 可对多盘区、多工作面实现全域稳定降温, 是当前深井热害治理最主流、最有效的技术路径。本文以陕西彬长矿业孟村煤矿井下盘区集中制冷系统为实例, 结合该矿高瓦斯、高地温、水文地质复杂、涌水量大的工程条件, 开展集中制冷设备选型、系统设计、安装调试、运行优化研究, 为深井矿井集中制冷技术推广应用提供理论支撑与工程借鉴^[1]。

1 井下集中制冷系统组成与工作原理

1.1 系统整体构成

煤矿井下集中制冷系统由制冷主机、冷却水系统、冷

冻水系统、末端空冷器、智能监控系统五大部分组成, 孟村煤矿井下盘区集中制冷系统结构为: 制冷主机→冷却水循环→矿井涌水散热; 制冷主机→冷冻水循环→空冷器→工作面降温; PLC 监控→全系统智能调控。

制冷主机: 核心设备, 采用矿用防爆螺杆式冷水机组, 完成制冷剂循环, 实现制冷; 冷却水系统: 带走冷凝热, 由冷却水泵、管路、散热设备组成; 冷冻水系统: 输送冷量, 由冷冻水泵、保温管路、定压补水装置组成; 末端设备: 空冷器、支架工位冷却装置, 实现风流降温除湿; 监控系统: PLC 控制柜、传感器、触摸屏、远程通讯, 实现自动控制与故障保护。

1.2 工作原理

制冷机组内螺杆压缩机将低温低压制冷剂蒸汽压缩为高温高压蒸汽, 在冷凝器中将热量传递给冷却水; 制冷剂经节流后变为低温低压液体, 在蒸发器中吸收冷冻水热

量，使水温降至 5~12℃；低温冷冻水经管网送至工作面空冷器，与高温高湿风流换热，降低环境温度；换热后的冷冻水回流至蒸发器再次制冷；吸收热量的冷却水通过矿井涌水携带至水仓，经排水系统排至地面，完成冷凝热排放。整个系统形成制冷剂循环、冷冻水循环、冷却水循环三大闭环，实现连续稳定制冷降温。

2 冷凝热排放方案对比与优选

冷凝热高效排放是井下集中制冷系统稳定运行的关键。结合孟村煤矿水文条件，对三种主流散热方案进行对比，结果如表 1 所示。

表 1 井下集中制冷冷凝热排放方案对比

方案	散热方式	优点	缺点	适用条件
地面冷却塔散热	地面冷却塔散热	散热稳定、能效高	投资高、井筒管路施工难、运行费用高	新建矿井、井筒条件允许
回风散热	利用矿井回风散热	系统简单、投资低	制冷量受限、恶化回风环境	局部小负荷降温
矿井涌水散热	利用井下涌水散热	系统简单、冷损小、投资低、能效高	需稳定涌水水源	涌水量充足矿井

孟村煤矿 401、403 盘区正常涌水量达 601m³/h，最大涌水量 782m³/h，排水系统完善，具备天然散热条件。综合对比，矿井涌水散热方案最优，可实现“变废为宝、零额外能耗、系统最简、投资最低”，满足盘区集中制冷需求^[2]。

3 集中制冷设备选型与系统设计

3.1 制冷负荷计算

孟村煤矿 401、403 盘区工作面原始温度 35℃、湿度 95%，需将温度降至 26℃以下。按风量 2000m³/min 计算，理论降温负荷 1620kW，考虑围岩、设备、人体散热，取系数 1.2，设计总冷负荷 1944kW / 盘区^[3]。

3.2 核心设备选型

3.2.1 制冷主机选型

选用 ZLS-2000 型矿用防爆螺杆式制冷机组，主要参数：额定制冷量：2090kW；出水温度：5℃；回水温度：20℃；冷冻水流量：120m³/h；冷却水流量：240m³/h；电机功率：710kW/10kV；防爆等级：Exd I，具备 MA 煤安认证。

3.2.2 水泵选型

冷冻水泵：流量 144m³/h，扬程 83m，防爆变频，1 用 1 备；冷却水泵：流量 240~300m³/h，扬程 100m，适配涌水散热。

3.2.3 末端设备

空冷器：单台冷量 300kW，每个工作面布置 6 台；支架工位冷却装置：20kW / 台，沿工作面布置 10 台，实现精准降温。

3.2.4 水处理设备

旋流除砂器、全自动自清洗过滤器，防止涌水杂质堵塞换热器。

3.3 管路系统设计

冷冻水管路：DN150 主管、DN100 支管，聚氨酯保温，防结露，冷损≤0.2℃/km；冷却水管路：DN200，利用矿井涌水，清污分流，不影响排水系统；水力计算：401 盘区总阻力 689kPa，403 盘区 742kPa，水泵扬程预留 20% 裕度。

3.4 智能控制系统设计

采用 PLC 集中控制，配备 8 寸触摸屏，实时监测：压力：吸气 / 排气、冷却水 / 冷冻水压力；温度：进出水、油温、电机绕组温度；流量：冷冻水、冷却水流量；保护：高低压、过载、逆相、水温、油压差保护具备远程通讯、故障报警、自动停机、无级能量调节（15%~100%）功能，可接入矿井综合自动化平台，实现地面远程监控^[4]。

4 工程应用与运行效果分析

4.1 矿井概况

孟村煤矿开采深度 325~760m，地温梯度 2.8℃/100m，属一、二级高温区；高瓦斯、易自燃、强冲击倾向性；水文地质复杂，涌水量大。原采用 7 台局部制冷机组，降温效果差、能耗高、管理困难。

4.2 系统布置

依据孟村煤矿当前降温系统的条件，利用工作面水仓的排水作为制冷机组的冷却水。在 401、403 盘区分别布置一台 ZLS—2000 矿用防爆制冷机组，采用盘区集中式井下降温方式，便于设备管理，减少供冷冷损，提高制冷系统能效^[5]。

401、403 盘区冷负荷均为 1944 kW 设计，设计供回水温差为 15℃，考虑输送温升，制冷机组出水温度为 5℃、回水温度为 20℃，单台机组冷冻水循环水量为 120 m³/h，冷却水循环水量 240m³/h，单台制冷机组制冷量不小于 2000 kW。可选用二台 ZLS-2000 矿用防爆制冷机组，在 401、403 盘区各布置一台 ZLS-2000 矿用防爆制冷装置。

降温系统主要工艺流程为：自盘区水仓取水水泵取水，输送至制冷硐室，矿井水吸收矿井降温制冷冷凝热，然后再排至盘区水仓，利用矿井自有排水系统实现矿井排

水散热；在制冷硐室，矿用防爆制冷机组制取的冷冻水，利用冷冻水泵将冷冻水输送至采掘工作面降温空冷器，空冷器对工作面进风进行降温除湿，实现工作面降温，冷冻水吸收空气热量后，温度升高返回制冷硐室，再次循环实现供冷，从而完成采掘工作面降温除湿同时利用矿井排水散放制冷冷凝热。

401 盘区集中降温系统：

401 盘区冷却水系统：401101 措施巷水仓→401 盘区制冷硐室（401101 措施巷巷道口）→401 盘区水仓排水系统。设计水量 240m³/h。

401 盘区冷冻水供水系统：

401 盘区集中制冷硐室（401101 措施巷巷道口）→401 盘区辅助运输巷→401104 运输巷（进风巷）→401 盘区辅助运输巷→401 盘区集中制冷硐室（401101 措施巷巷道口）。

401 盘区集中制冷硐室（401101 措施巷巷道口）→401 盘区辅助运输巷→401104 回风巷→401 盘区辅助运输巷→401 盘区集中制冷硐室（401101 措施巷巷道口）。

设计冷冻水水量 120m³/h，主管路采用 DN150 管路，采煤面采用 DN100 管路，401104 运输巷（进风巷）布置三台 300kW 的空冷器，401104 回风巷布置三台 300kW 的空冷器。在采煤工作面下半段每 5 架安装一台 20kW 支架工位冷却装置，共计 10 台，用来解决采煤工作面下半段的热害问题。

403 盘区集中降温系统：

403 盘区冷却水系统：403 盘区水仓取水→403 盘区制冷硐室（403 配电硐室检修通道）→403 盘区水仓排水系统。设计水量 240m³/h。

401 盘区冷冻水供水系统：

403 盘区集中制冷硐室（403 配电硐室检修通道）→403 盘区辅助运输巷→403109 运输巷（进风巷）→403 盘区辅助运输巷→403 盘区集中制冷硐室（401101 措施巷巷道口）。

403 盘区集中制冷硐室（403 配电硐室检修通道）→403 盘区辅助运输巷→403109 回风巷→403 盘区辅助运输巷→403 盘区集中制冷硐室（401101 措施巷巷道口）。

设计冷冻水水量 120m³/h，主管路采用 DN150 管路，采煤面采用 DN100 管路，403109 运输巷（进风巷）布置三台 300kW 的空冷器，403109 回风巷布置三台 300kW 的空冷器。在采煤工作面下半段每 5 架安装一台 20kW 支架工位冷却装置，用来解决采煤工作面下半段的热害问题。

4.3 矿用防爆制冷装置特点

按全工况机组设计，保证机组出水温度在 3℃～12℃范围内任意调节，用户根据使用要求设定出水温度，机组根据设定的出水温度自动调节运行。矿用防爆制冷装置自带的控制系统与机组的高压软启动柜、低压开关可进行通信，实现对压缩机电机及润滑油泵电机、压缩机组自身阀门的自动起、停控制。并且，压缩机组自带的控制系统根据压缩机出口冷媒压力值，压缩机出口最高允许温度，润滑油泵最高允许温度高于设定值时，由一根从系统直接连接到高压柜的二芯控制电缆实现对压缩机电机的紧急停止。

控制系统提供一个 Profibus/net 通信接口，可与用户的控制系统通过 Profibus /net 通信，上传本压缩机组的所有监测数据，并可执行用户控制系统下达的开、停命令。采用满液式蒸发器，蒸发器和冷凝器的换热管采用高效铜管，采用国际最先进的高效强化翅片管，效率高，耐腐蚀，寿命长，适用于煤矿井下的使用条件。矿用操作箱人机界面：采用不小于 7 寸触摸屏彩色显示器，能实时显示吸气压力、排气压力、油压、吸气温度、排气温度、油温、油压差、能级、冷冻水进\出水温度、冷却水进\出水温度、运行时间、运行参数记录、故障记录等参数，方便使用者在现场的操作。

4.4 运行效果监测

系统连续运行 3 个月，监测结果如表 2 所示。

表 2 孟村煤矿集中制冷系统运行效果

项目	降温前	降温后	改善幅度
工作面温度 /℃	33~36	23~25	降低 8~11℃
相对湿度 /%	90~95	70~75	降低 15~20%
系统能效比 COP	—	4.2	—
设备故障率	—	下降 35%	—
作业效率	—	提升 12% 以上	—

系统完全满足《煤矿安全规程》要求，热害问题彻底解决。

4.5 经济性分析

投资：双盘区设备含主机、水泵、空冷器、管路、监控；运行成本：利用涌水散热，无额外散热能耗，单位冷量能耗比局部制冷低 22%；产能效益：温度每降 1℃，效率提升 3%；本系统降温约 10℃，年增产约 40 万吨，1~2 年可回收全部投资。

5 技术创新点

矿井涌水散热技术：充分利用井下涌水排放冷凝热，系统最简、投资最低、能效最高；盘区集中制冷模式：一机供多面，冷损小、管理集中、稳定性强；模块化防爆设计：机组可拆卸运输，适配井下狭小空间，满足罐笼提

升；全流程智能控制：PLC + 远程监控，实现无人值守、自动调节、故障预警；分级末端供冷：空冷器 + 工位冷却，全域降温与局部精准降温结合，降温更均匀。

6 结语

深井高地温矿井必须采用集中制冷才能满足热害治理要求，局部制冷无法满足生产需求；矿井涌水散热是涌水量充足矿井最优冷凝热排放方案，具有显著技术经济优势；ZLS-2000 矿用防爆集中制冷机组适配井下高湿、高尘、防爆要求，运行稳定可靠。盘区集中制冷 + 智能 PLC 控制，可实现工作面温度稳定 $\leq 26^{\circ}\text{C}$ ，安全效益、经济效益、社会效益显著。本工程形成一套“设计 - 选型 - 施

工 - 运维”标准化技术体系，可在全国同类矿井推广。

参考文献：

[1] 国家矿山安全监察局.煤矿安全规程 (2022 版) [S]. 北京：煤炭工业出版社，2022.

[2] MT/T 1136-2011，矿井降温技术规范[S].

[3] GB 50418-2017，煤矿井下热害防治设计规范[S].

[4] 何学秋等.深井煤矿热害治理理论与技术[M]. 北京：科学出版社，2020.

[5] 武汉新世界制冷工业有限公司. 孟村煤矿井下盘区降温系统方案[Z]. 2024.

作者简介：曹磊（1993.05-），男，汉族，陕西延安人，本科，中级工程师，研究方向：煤矿机电方面的研究。