

矿井通风热湿提取与资源化利用方法

周福宝^{1,2)}✉, 黄荣廷²⁾, 辛海会²⁾, 菅从光²⁾

1) 中国安全生产科学研究院, 北京 116016 2) 中国矿业大学安全工程学院, 徐州 221116

✉通信作者, E-mail: f.zhou@cumt.edu.cn

摘 要 矿井热湿风流中储存有大量低位热能和水汽, 导致井下工作环境恶劣, 乏风直排造成了大量资源浪费。因此, 矿井通风热湿提取与资源化利用是解决深井热害和矿井低碳转型发展的重要途径之一。受地面大气状态参数和井下热湿源的影响, 井巷热湿风流参数随时间变化, 实时掌握井巷热湿风流转变特征是精准提取矿井风流中低位热能的关键。本文基于热湿风网实时解算, 确定了矿井关键热湿节点分布规律及变化特征; 建立了冷凝热湿提取计算模型, 研发了热湿风流低位冷凝余热提用技术, 形成了制冷–除湿联合的低位热能原位利用系统; 提出了矿井乏风集中式和关键节点分布式热湿提取与资源化利用方法, 并对提热收水效果进行了实例分析, 为矿井低位热能提取利用和热害治理提供了理论基础和建设思路。

关键词 矿井通风; 热湿风流; 风网解算; 低位热能提取; 冷凝余热利用

分类号 TG142.71

Extraction and resource utilization of heat and humidity in mine ventilation

ZHOU Fu-bao^{1,2)}✉, HUANG Rong-ting²⁾, XIN Hai-hui²⁾, JIAN Cong-guang²⁾

1) China Academy of Safety Science and Technology, Beijing 116016, China

2) School of Safety Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China

✉ Corresponding author, E-mail: f.zhou@cumt.edu.cn

ABSTRACT Massive low-grade thermal energy and water vapor are stored in the hot and humid airflow of mines, typically resulting in a poor underground working environment and posing threats to worker safety and health. The direct discharge of exhausted ventilation air causes an enormous waste of resources as well as pollution problems to the surrounding environment. Therefore, the extraction and utilization of mine ventilation heat and humidity have become some of the most important ways to solve thermal damage problems in deep mines, thereby boosting their low-carbon transformation development. Affected by the changes in the surface atmospheric and downhole heat and humidity sources, the hot and humid airflow parameters in mines change with time. Real-time determination of the hot and humid airflow characteristics in mines is key to extracting low-grade thermal energy from the underground environment efficiently. In this paper, the distribution law and variation characteristics of key heat and humidity joints are determined based on the real-time calculation of the hot and humid air network. A calculation model of condensation heat and humidity extraction is established, and the technology of low-grade condensation waste heat extraction from heat and humidity airflow is also developed, which, in composition, forms a low-grade heat *in situ* utilization system combined with refrigeration and dehumidification. Furthermore, the centralized and distributed thermal and humidity extraction and resource utilization methods of coal mine ventilation are put forward. The effects of heat extraction and water recovery are also analyzed using examples. The results show that around 224 t of moisture is wasted every day in ventilation air emission, whose recycling has economic benefits. Thousands of kilowatts of thermal energy are stored in the ventilation air emission, which can be used as direct heat energy or converted electricity. An approximately linear relationship is revealed between the temperature decrease and theoretical moisture recovery from ventilation air emission, providing a

收稿日期: 2022–04–19

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2018YFC0808100)

rapid way for engineering estimation. The analysis of the heat recovery shows that heat extraction is favored by high initial temperature and humidity due to high values and efficiencies. The application of heat-moisture recovery in underground nodes can effectively moderate the *in situ* working environment and simultaneously recover some energy as a supply to running costs. This work provides significant construction ideas and a theoretical basis for the extraction and utilization of low-level thermal energy and heat damage control in mines.

KEY WORDS mine ventilation; hot and humid air flow; wind network calculation; low-grade thermal energy extraction; condensation waste heat utilization

矿井低位热能利用是我国“十四五”能源领域科技创新规划的重要任务之一^[1]。矿井热湿风流中存在着井下 80% 以上的可利用低位热能, 随着乏风排除造成了大量热能浪费。同时热湿风流也是造成井下重点工作区域环境热害的重要因素之一^[2], 有效解决矿井热湿风流中低位热能提取的问题将为矿井热害治理和低碳节能提供关键技术保障^[3], 也是我国“双碳”政策下矿井绿色低碳转型的重要途径之一。

随着我国矿产资源开采深度的逐渐增加^[4], 井下地热更加显著^[5-6], 井下总风量不断增加, 大部分矿井已超过了 $10000 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$, 我国各类矿井因地热能的释放, 回风的温度终年稳定在 $18 \sim 30 \text{ }^\circ\text{C}$ 之间, 被抽出的空气随之带出大量的低温热能^[7-9]。大量热湿风流中的低位热能提取不仅能显著降低重要工作地点的环境温度和湿度, 改善人员和设备的工作环境, 还能以原位能的形式为局部高温点降温除湿提供能量供应, 乏风中大量剩余低温热能提取还能作为矿井供暖和卫生等热水的供能系统, 大幅提高矿井废热的清洁利用效率, 加快高能耗、高碳排放矿井企业的绿色低碳转型^[10-11]。多年来针对矿井井下低位热能利用, 大量学者开展了相关研究和探索^[12-13]。如蔡美峰等^[14]提出了矿产与热共采理论, 明确了在采矿的同时提升地热开采与低位废热提取的思路; 陈庆刚等^[15]模拟分析了矿井通风系统的热环境, 提出了矿井回风余热回收可行的节能前景; 王成^[16]设计了矿井余热利用监测系统, 并在榆树坡煤矿进行了双源供热模式应用, 实现了矿井全年的生活热水供应。王健等^[17]基于梧桐庄矿的余热利用条件, 提出矿井回风热泵系统的优化方案, 提高了换热效率并降低了能耗。刘丽娟等^[18]提出将回风热能交换到循环水中的低温热源利用方案, 取得了良好的经济效益和社会效益。

大量研究均证明了矿井热湿风流低位热能提取利用的可行性, 井下地点的热能提取不仅取决于风流的热湿参数, 还受到通风参数的影响。准确

获得不同时间不同地点的热湿参数和风流参数, 精准控制不同地点热湿风流低位热能提取的运转参数, 是提高矿井热湿风流低位热能利用效率的关键。目前针对井巷热湿分布多基于数值模拟方法进行预估^[19-21], 基于此, 陈开岩和作者本身提出了热湿风流与风量耦合的风网解算方法^[22], 但基于热湿风网解算的低位热能提取方法仍不完善, 本文提出了冷凝热湿提取计算模型, 矿井风流热湿提取与资源化利用关键技术; 提出了矿井乏风集中式和关键节点分布式热湿提取方法, 并进行了实例分析, 为矿井低位热能提取利用和热害治理提供了建设思路和理论基础。

1 矿井风流湿热提取计算方法

1.1 井巷风流热湿参数计算与风网实时解算

由于受地面大气状态参数、井下热湿源的影响, 随着昼夜和季节的转变, 矿井进风段的热湿参数随时间变化, 随着井巷风流流动, 风流与井巷主要热源(围岩换热、氧化散热、热水沟散热、机电设备运转时放热、人体散热、以及空气自身压缩(膨胀)散(吸)热等)进行热湿交换, 导致风流热湿湿度增大, 目前大量学者对井巷对流换热进行了研究和分析^[23-26]。以进风节点状态参数(气压 p_1 、干球温度 t_1 、含湿量 d_1 、空气密度 ρ_1)为初始点, 代入井下关键地点空气状态参数(气压、温度和湿度)监测值, 考虑每条潮湿巷道主要热源的热交换, 采用巷道分段递推的温度和含湿量联合迭代法^[22], 计算末端井巷风流的热湿参数。假设的终端含湿量 d_2 、温度 t_2 , 计算公式如(1)和(2)。根据风流热湿参数耦合风量的实时解算方法^[22]开展井下风网实时解算, 掌握地表大气压变化下井下不同地点热湿参数的分布式变化规律, 评估矿井不同时期井下最佳的低位热能提取地点, 调整不同时间不同地点低位热能提取的运行参数。

$$d_2 = d_1 + \frac{ULa\psi(d_{ww} - d_1)}{GC_p + 0.5ULa\psi} \quad (1)$$

$$t_2 = t_1 + \frac{UL\alpha(t_w - t_1) + Q_m + Q_E + Gg(Z_1 - Z_2)}{GC_p + 0.5UL\alpha} \quad (2)$$

式中: ψ 为湿壁系数; g 为重力加速度, $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$; Z_1 为进风节点的深度, m ; Z_2 为终端节点的深度, m ; G 为空气质量流量, $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$; C_p 为空气的定压比热, $\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})^{-1}$; d_{ww} 为井巷湿壁温度 t_{ww} 下的含湿量, $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$; α 为井巷壁面的对流换热系数, 定义为巷壁温度与风温相差 1°C 时, 单位时间内自井巷壁面单位面积散出或吸收的热量, $\text{W}\cdot(\text{m}^2\cdot^\circ\text{C})^{-1}$; U 为井巷断面周长, m ; L 为井巷长度, m ; Q_m 为巷道中机电设备散热量, W ; Q_E 为巷道围岩氧化等其它热源散热量之总和, W ; t_w 为平均壁面温度, $^\circ\text{C}$ 。

1.2 冷凝水回收计算模型

基于矿井热湿风流开展冷凝水提取计算, 理论上可回收水分全部来源于气流中水汽冷凝, 需假设气流降温前后及降温过程中保持完全混合; 水汽未达饱和时不凝结, 达到当前温度条件下的饱和状态后立即凝结析出; 气流降温前后体积、密度保持不变, 皆按照理想状态常压气体计算。当针对矿井巷道中某节点 i 风流进行热湿回收时, 常根据需求和现场条件, 抽取一定比例的风流进行处理, 该部分风流中理论可回收水量可由公式(3)近似计算:

$$M_{\text{water},i} = \frac{Q_{0,i} \times \beta_i \times (\text{RH}_{0,i} \times w_{s0,i} - w_{1,i}) \times 3600 \times 24}{1000000} \quad (3)$$

式中: $M_{\text{water},i}$ 为点位 i 风流中理论可回收水量, $\text{t}\cdot\text{d}^{-1}$; $Q_{0,i}$ 为点位 i 的平均风流流量, $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$; β_i 为点位 i 用于热湿回收的气流占该点位风流总量的比例, %; $\text{RH}_{0,i}$ 为点位 i 风流的初始相对湿度, %; $w_{s0,i}$ 为点位 i 风流初始温度对应的饱和含水量, 可由查表获得, $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; $w_{1,i}$ 为经过热湿回收处理后该部分气流的含水量, 通常为降温后最终温度对应的饱和含水量, 可由查表获得, $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

1.3 热能提取计算模型

在矿井风流降温过程中, 热量释放由两部分组成, 一部分是由于温度变化产生的显热释放, 另一部分是由于水汽相变产生的潜热释放; 在假设气流只有空气和水汽两种组分的前提下, 温度变化产生的显热由空气释放的显热和水汽释放的显热两部分组成。因此, 针对矿井巷道中某点位 i 风流进行热能提取时, 其理论可释放热量可由公式(4)近似计算:

$$Q_{t,i} = Q_{l,i} + Q_{\text{sair},i} + Q_{\text{svapor},i} \quad (4)$$

式中: $Q_{l,i}$ 表示点位 i 风流降温过程中单位时间释

放的全热量, kW ; $Q_{l,i}$ 表示点位 i 风流降温过程中单位时间释放的潜热, kW ; $Q_{\text{sair},i}$ 表示点位 i 风流降温过程中单位时间由空气释放的显热, kW ; $Q_{\text{svapor},i}$ 表示点位 i 风流降温过程中单位时间由水汽释放的显热, kW 。其中, 显热释放 $Q_{\text{sair},i}$ 和 $Q_{\text{svapor},i}$ 可由公式(5)计算:

$$Q_{s,j} = C_j \times \rho_j \times Q_{0,i} \times \beta_i \times \phi_j \times (T_{0,i} - T_{1,i}) \quad (5)$$

式中: $Q_{s,j}$ 为点位 i 风流降温过程中单位时间由物质 j 释放的显热, j 这里指空气或水汽, kW ; C_j 表示物质 j 的比热容, $\text{kJ}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}$; ρ_j 指的是物质 j 的密度, $\text{kg}\cdot\text{Nm}^{-3}$; ϕ_j 表示物质 j 在风流中的占比, %; $T_{0,i}$ 表示点位 i 风流的原始温度, K ; $T_{1,i}$ 表示参与热湿回收处理的气流降温后的温度, K 。

水汽相变释放的潜热部分 $Q_{l,i}$ 可由公式(6)计算:

$$Q_{l,i} = \frac{Q_{0,i} \times \beta_i \times (\text{RH}_{0,i} \times w_{s0,i} - w_{1,i}) \times r_{\text{water}}}{1000} \quad (6)$$

式中, r_{water} 表示水的相变潜热, 其不同温度下的数值可以通过查表获得, $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

2 矿井风流热湿提取与资源化利用关键技术

2.1 井下低位冷凝余热提用技术

针对井下局部地点温湿度较高的特点, 提出井下热湿风流低位冷凝余热提用技术, 该技术由提热收水与余热利用两个系统组成, 如图1所示。提热收水系统采用逆卡诺循环原理工作, 通过热交换介质在系统循环运行过程中的相态、温度以及压力的变化, 达到降低环境空气温度的目的, 同时促使水汽冷凝析出, 回收水汽同时可回收其相变潜热, 用来调节、改善井下局部区域高温高湿环境。

井下局域通风中的冷凝余热在提热收水系统中被收集, 进入余热利用系统, 该系统可根据实际需求对收集到的冷凝余热采取直接利用或转化存储的处理方式。如图2所示, 提取的余热首先进入热存储单元, 可直接用于供给热水或区域供暖; 也可利用大量并联的半导体热电模块, 将热能直接转化为电能后以供存储或再利用。在热电转化过程中, 需要在温差发电模块两侧形成一定的温差, 因此其热端一侧与热存储单元相连, 冷端一侧与正常通风环境相连, 同时可与提热收水系统中的热交换蒸发器形成并联结构, 以辅助提供冷却性能, 保证热电转化效率。应用井下低位冷凝余热提用技术, 可针对性解决井下微风、无风地点热流与湿气难以排出的问题, 改善作业环境; 同时对水汽及低位冷凝余热加以回收利用, 实现了节能与降温一体化目标。

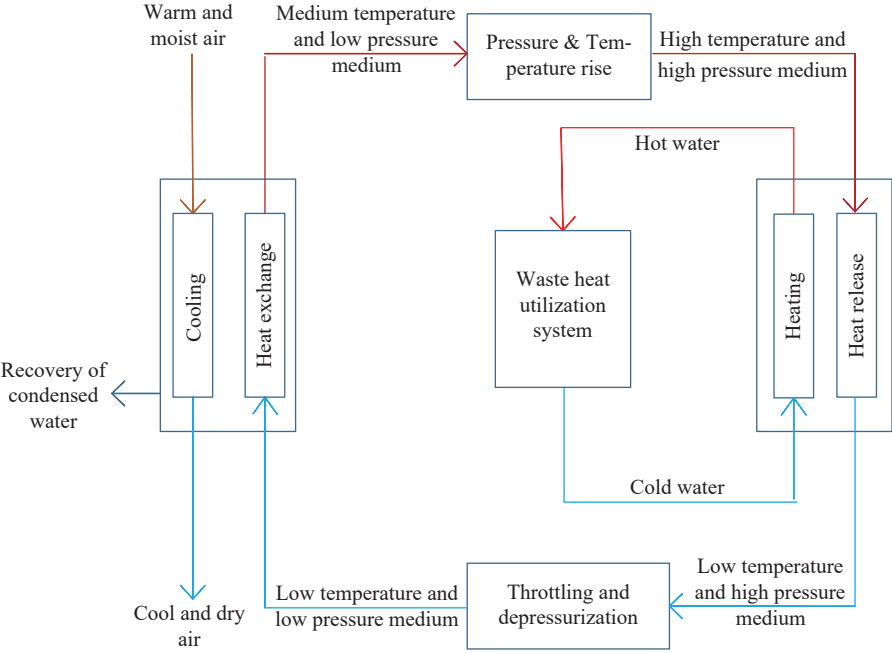


图 1 井下低位冷凝余热提取技术流程图

Fig.1 Flow chart of the underground low-grade condensation waste heat extraction technology

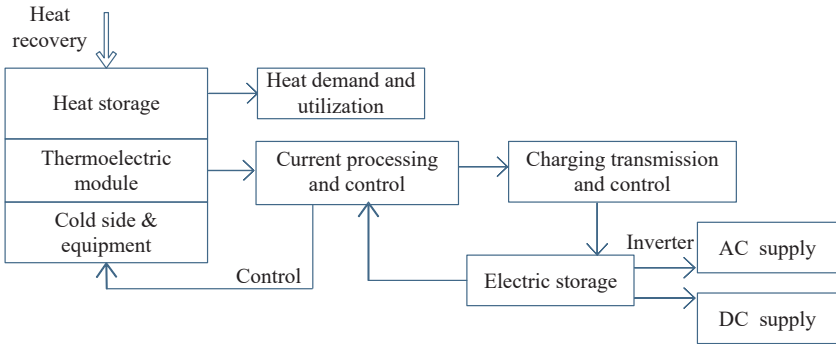


图 2 基于能量利用与存储的余热技术流程图

Fig.2 Flow chart of the waste heat technology based on energy utilization and storage

2.2 井下制冷-除湿联合可控循环系统

局部制冷-除湿联合可控循环系统是以主动降温过程为核心,用降温过程中回收的热能及其转化能作为系统能耗的补充,以高效经济的方式实现对矿井热环境温度、湿度的联合调节. 制冷-除湿联合可控循环系统如图 3 所示,系统分为三个功能分区,分别为冷却除湿区、提热收水区以及余热利用区. 井下湿热空气通过冷却除湿区,可降低其含有的湿与热,对井下局部工作环境中的湿度和温度起到改善、调节的作用;提热收水区负责对空气中的水汽和余热进行提取、分离与回收,其中冷凝余热被传输至热存储与利用模块,以待后续利用;在余热利用区,可直接利用热能,用以供给热水等,亦可间接利用热能,利用冷凝余热与冷却装置在热电转化模块两面形成较大且稳定的温

差,使热能直接向电能转化;转化生成的电能可用于装置照明或补充本系统的用电供给,从而降低了系统能耗,实现了井下通风资源能源循环利用及节能降温的目标.

3 矿井低位余热与水汽回收效果分析

3.1 乏风低位余热与水汽集中式回收

井下通风注入的新鲜风流与井下的湿热空气快速混合,通过换湿交换带走井下的热量和水汽,经过回风巷道最终排至地面. 排放的乏风风流中通常含有大量的水汽与低品位热,以山东境内某矿井为例,其南风井排放乏风相对湿度高达 95%,温度年均达到 28 ℃,排放风量约为 $8.64 \times 10^6 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$,以理想气体常压排放计算,该风井每天随乏风外排水量约 224 t. 若将排放乏风简化为空气和水汽

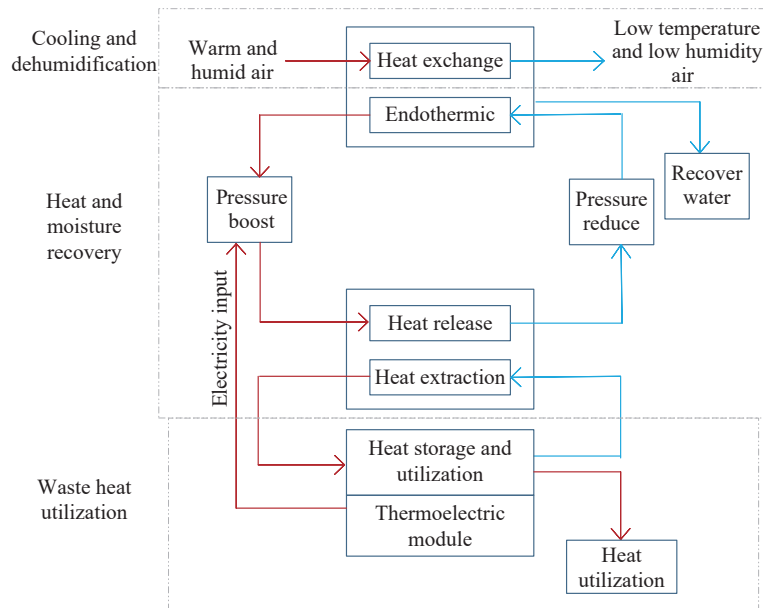


图3 制冷-除湿联合可控循环系统

Fig.3 Refrigeration dehumidification combined controllable cycle system

的混合体系,则乏风中的低品位热量主要以两种形式存在:一种是以显热的形式存在于具有一定温度的空气和水汽中,通过温度变化过程释放出来;另一种则以潜热的形式存在于水汽中,会在水汽凝结相变过程中释放出来。

由于乏风温度变化范围较小,可作以下假设:

- (1)乏风按照理想气体常压排放;
- (2)排放乏风由空气和水蒸气组成,降温前后乏风皆为完全混合;
- (3)温度降至低于乏风水露点时,乏风中水汽为饱和状态;

(4)空气定压比热容为 $1.004 \text{ kJ} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$, 密度为 $1.293 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$;

(5)热回收过程无损耗,乏风降温释放的热量被完全回收。

根据表1所示的参数,可由简化计算得知,若将该乏风温度降低至 $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$,理论上可从乏风中回收的热量约为 3500 kW ,使用热电转换装置(假设转换效率恒定 10%),即可获得每小时 350 度的发电量,可用于供给风井及周边设施用电,实现能量循环与节能环保。

表1 乏风热回收计算参数表

Table 1 Calculation parameters of heat recovery from exhaust air

Parameter	Value	Data source
Exhaust air temperature / $^{\circ}\text{C}$	28.000	Measured
Exhaust air humidity / %	95.000	Measured
Exhaust air volume / $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	100.000	Ideal gas assumption
Water content in the exhaust air / $(\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$	28.584	Given
Air proportion in the exhaust air / %	97.706	Calculated
Water vapor proportion in the exhaust air / %	2.294	Calculated
Specific heat capacity of the air at constant pressure / $(\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	1.004	Given
Air density / $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1.293	Given
Specific heat capacity of water vapor at constant pressure / $(\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	1.860	Given

上述从乏风中回收的热量中,水汽凝结释放的相变潜热占比接近 70% ,是乏风回收余热的主

要来源。以温度 $28 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 、湿度 95% 的乏风排放条件为基础,计算得到理论可回收水量、可回收热量及

相变潜热在其中的占比随乏风降温幅度的变化, 结果如图 4 和 5 所示. 图 4 展示了不同乏风降温幅度下理论可回收水量的变化趋势, 当乏风初始温湿度不变时, 乏风中理论可被回收的水量随降温幅度增加, 且回收水量的增幅有减缓趋势, 但在乏风排放的常规温度范围内, 由于回收水量的增幅变化有限, 因此可近似认为该温度变化范围内理论可回收水汽量与降温幅度之间存在线性关系, 以方便工程上对理论可回收水量进行快速估算.

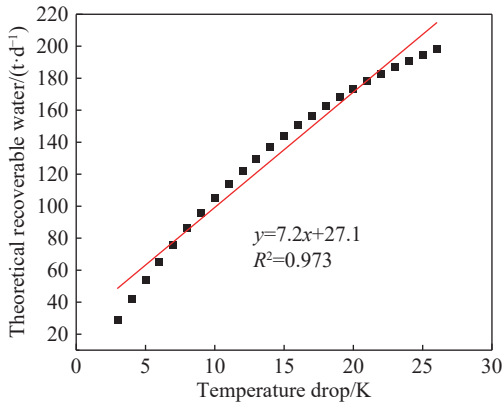


图 4 降温回收水汽变化趋势
Fig.4 Theoretical water recovery at different temperature drops

图 5 展示了理论可回收热量、可回收相变潜热及其在总回收热量中占比随降温幅度的变化, 可见, 理论可回收热量及其中回收的相变潜热皆随降温幅度增大而增加, 理论可回收水量在 3~26 K 的降温范围内总体上与降温幅度呈增函数关系, 但其中相变潜热占比在小范围(<8%)呈现先增加后降低的趋势. 当降温幅度在 3~7 K 范围增加时, 理论可回收的相变潜热随温度下降增加而增大, 原因是乏风起始相对湿度为 95%, 因此在温度下降初期理论上不发生水汽凝结, 因此无法回收其相变潜热; 随着降温幅度进一步增大, 乏风中的水汽凝结量随之稳步增加, 因此相变潜热在总回收热量中占比稳步提高; 当降温超过 7 K 时, 随着乏风温度的降低, 乏风中含有的可冷凝水量变少, 因而由相变潜热回收的热量在总回收热量中的占比随之减少. 因此, 乏风排放初始温湿度越高, 降温空间越大, 其应用热湿回收技术的价值就越高.

由上述计算可知, 基于温度 28 ℃、湿度 95% 的乏风排放初始条件, 每将乏风降温 1 K, 理论上可回收热量 341.5 kW、水量 7.2 t·d⁻¹, 可用于供给用水、用电与用热. 随着热回收与热电转化技术的不断发展与成熟, 该部分回收的资源具有极大的应用潜力.

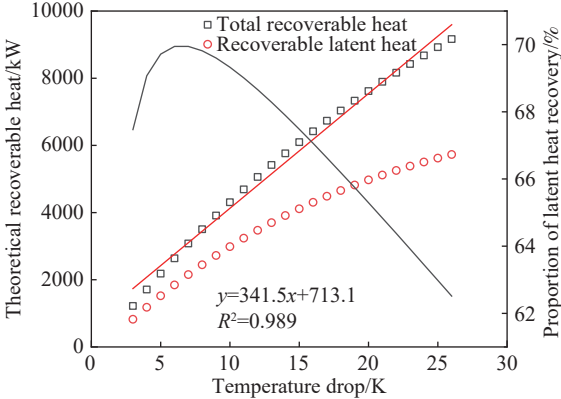


图 5 乏风降温回收热量变化趋势
Fig.5 Theoretical heat recovery at different temperature drops

3.2 井下重点工作节点余热与水汽分布式回收

某矿井的通风网络如图 6 所示, 基于热湿风流的风网解算^[22], 该矿井中, 16、14 号分支(1、2 号采煤工作面运输巷)、22、19 号分支(1、2 号采煤工作面材料巷)、15、13 号分支(1、2 号采煤工作面辅运巷)以及 7 号分支(3 号双巷掘进工作面)和 8 号分支(4 号双巷掘进工作面)八条关键巷道中常发生通风风阻变化, 易出现局部高温、高湿等不利工作环境, 其点位测量温湿度等参数如表 2 所示.

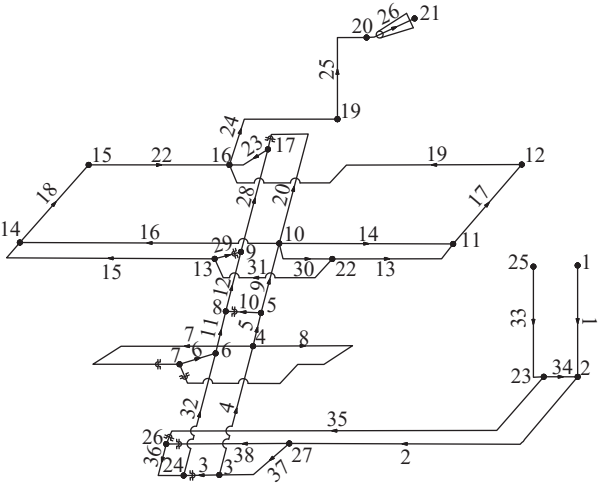


图 6 矿井通风网络图
Fig.6 Mine ventilation network diagram

对上述点位的低位冷凝余热与水汽进行回收时, 可以直接利用点位的通风动能, 使之自然流过热交换蒸发器, 从中提取热量和冷凝水. 但这样的换热方式换热效率较低, 需要增大蒸发器换热部件在巷道中的展开面积, 以增大换热部件与风流的接触面积, 在井下布置带来诸多不便. 因此多采用小型风机抽取该点位的风流, 使其定量通过热交换蒸发器, 具有效率稳定、装置外观固定、布置方便等优点.

表2 部分通风网络节点温湿度

Table 2 Temperature and humidity in some ventilation network nodes

Node No.	Temperature /℃	Relative humidity /%	Flow volume /(m ³ ·s ⁻¹)	Flow velocity /(m·s ⁻¹)
7	23.40	96.40	16.00	1.07
8	24.00	90.10	16.00	1.07
13	23.50	86.00	9.50	0.79
14	24.00	85.30	9.10	0.76
15	22.90	93.70	16.15	1.35
16	24.20	88.70	16.21	1.35
19	23.70	91.40	18.76	1.56
22	23.50	85.60	32.44	2.70

根据表2所示各点位通过的风量和风速,设定合适的换热风量,换热后的风流温度降低、湿度下降,再与原风流混合,可实现对该点位除热除湿。

查表计算可知上述各点位风流中的原始含水量,如表3所示。

表3 部分通风网络节点空气含水量

Table 3 Water content in the air at some ventilation network nodes

Node No.	7	8	13	14	15	16	19	22
Water content /(g·m ⁻³)	22.08	21.40	19.82	20.26	20.83	21.32	21.32	21.32

假设基于各个点位现有的风量,固定取其10%进行热湿回收处理;由于温度变化幅度较小,可忽略温度变化引起的空气密度及体积变化;并假设换热前后风流皆为完全混合。因此经处理后的混合空气温度在各点位随降温幅度的变化如图7所示。图中,随降温幅度增加,各点位混合空气温度有明显下降,平均下降幅度与该点位中风流的处理比例成正比,需根据该点位的实际情况进行调整,以获得最佳效果。

降温幅度的变化如图8所示。可知,各点位理论可回收热量随降温幅度增加。当降温幅度小于5~6 K时,理论可回收热量较低,且随温降增加增长缓慢,这是因为该点位风流中原始湿度未达到饱和,小幅度降温无法促使水汽发生相变凝结,此时温度每多下降1 K,热回收效率约平均增加4.1 kW;当降温幅度超过6 K,部分水汽因达到饱和而相变析出,释放相变潜热,提高了理论可回收热量,此时温度每多下降1 K,热回收效率约平均增加5.4 kW。

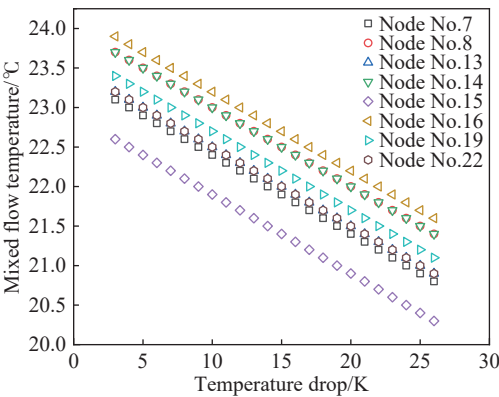


图7 井下节点冷凝除湿后混合温度变化

Fig.7 Temperature changes in the mixed air after water and heat recovery at underground nodes

对井下各点位风流进行降温除湿,可以回收水、热资源。基于上述条件,计算理论热回收量随

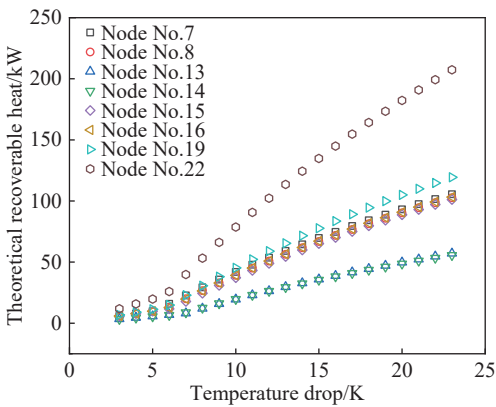


图8 井下各节点热量回收变化

Fig.8 Theoretical recoverable heat at underground nodes

计算得到理论水回收量随降温幅度的变化如图9所示。当降温幅度小于5~6 K时,部分点位可回收水量为0,原因是该点位风流中原始湿度未

达饱和, 小幅度降温尚未使相对湿度达到 100%, 因此无水汽凝结; 当降温幅度超过 6 K, 计算的所有点位皆有水汽凝结, 其凝结量随降温幅度增大而增加, 温降每多增加 1 K, 理论上每天可回收水量平均增加 0.12 t.

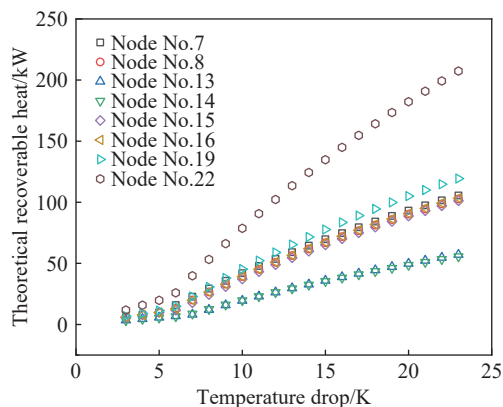


图 9 井下各节点水回收变化

Fig.9 Theoretical recoverable moisture at underground nodes

上述结果说明, 对井下高温高湿点位应用余热与水汽回收技术, 可改善其局部工作环境; 同时, 该技术的高效应用也离不开高温高湿环境的支撑; 因此, 在井下重点工作点位应用余热与水汽分布式回收, 是生产需求与技术需求的双重选择.

3.3 矿井低位余热提用经济性分析

低位冷凝余热提用技术一端从热湿气流中提取热量, 另一端将热量汇聚形成可利用的热源, 其能量消耗主要是用于促进热交换介质循环和形态变化. 对于热源的利用一般可以直接利用为主、转化利用为辅, 因此, 可以热量的生成效率为标准考察本技术的经济性. 以山东境内某矿井为例, 其南风井排放乏风相对湿度高达 95%, 温度年均达到 28 °C, 该条件有利于发挥低位冷凝余热提用技术的优势, 提高其效能比. 假设系统综合效能比达到 4:1, 即采用本系统提热供暖时, 每消耗 1 度电可产生热量为 14.4 MJ. 以工业用电每度 0.7 元计算 (不分峰谷价), 系统的产热量 20.57 MJ·Yuan⁻¹. 在“煤改气”工程的推动下, 新建供暖设备多采用燃烧天然气 (Liquefied natural gas, LNG) 供暖, 天然气热值以 37.67 MJ·m⁻³ 计, 价格以 2.55 Yuan·m⁻³ 计^[27], 采暖热效率以 80% 计, 则天然气供暖的产热量为 11.82 MJ·Yuan⁻¹. 在尚未能使用天然气的地区, 可采用电热供暖, 假设电热效率为 100%, 工业用电每度 0.7 元, 则电热供暖的产热量约为 5.14 MJ·Yuan⁻¹. 产热量随电价的变化如图 10 所示.

由图 10 对比可知, 当前条件下, 采用余热提用

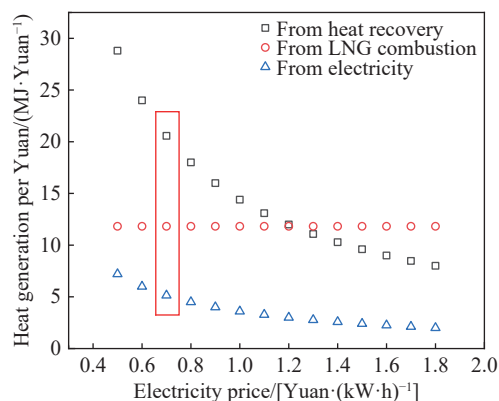


图 10 不同方式产热效率对比

Fig.10 Comparison of heat generation via different methods

技术供暖相较于天然气供暖和电热供暖具有明显的经济性优势, 产生单位热量所需费用比燃烧天然气便宜约 42.5%, 比电热供暖便宜约 75.0%. 余热提用技术对于天然气供暖的经济性优势同时取决于天然气价格和电费价格. 图 10 所示, 假设天然气价格不变, 余热提用的经济优势随电价上升而下降; 当工业用电平均价格上涨到 1.2 Yuan·(kW·h)⁻¹ 及以上时, 余热提用技术即失去其经济优势. 然而, 虽然能源危机导致全球性电价上涨, 但在系列政策措施的支撑下, 我国电价保持相对平稳^[28]; 相比之下, 从 2021 年来, 全球天然气产能持续下滑, 欧美天然气价格飙涨^[29], 我国天然气产量不足, 但需求快速增长, 因此对外依存度持续走高, 在国际形势影响下, 我国天然气价格持续上升; 此外, 随矿井开采深度增加, 排放乏风温湿度增大, 可进一步提高余热提用技术的综合效能比. 基于上述变化, 余热提用技术对于天然气供暖的经济性优势有持续扩大趋势.

当在井下重点工作节点应用冷凝余热提用技术时, 由于点位分散, 回收热量难以汇聚统一应用, 因此可选择采用热电转化技术将回收的热能转化为电能, 以供储存和使用. 当前阶段, 温差发电的热电转化效率一般不超过 14%, 效率相对较低. 但考虑到冷凝余热提用技术主要用于治理井下的热害问题, 因此, 任何对于余热的回收转化都是额外的收益, 转化效率低不会成为本技术应用的阻碍^[30]. 随温差发电的研究推进, 热电转化效率势必不断提高; 同时井下热害问题也随着采矿深度增加而越发突出, 冷凝余热提用技术的综合效能比也随之提高; 两者综合作用下, 未来有望实现“零能耗”治理井下热害的目标.

综合上述分析, 矿井低位余热提用技术具有

较好的经济性和较大的应用潜力。

4 结论

(1) 基于热湿风流的风网解算模型, 提出了热湿风流中冷凝水理论回收及其水汽相变潜热的计算方法。这为掌握井下关键区域热湿参数的分布式变化规律, 评估不同时期矿井最佳的低位热能提取节点, 调整不同时间不同地点低位热能提取的运行参数提供了理论支撑。

(2) 研发了矿井风流热湿提取与资源化利用关键技术。基于热湿风流水汽相变冷凝除湿提热方法, 提出了井下热湿风流低位冷凝余热提用技术, 形成了低位热能原位利用的制冷-除湿联合循环系统, 可针对性解决井下微风、无风地点热流与湿气难以排出的问题, 改善作业环境, 收集到的冷凝余热采取直接利用和热电转化存储两种方式进行资源化利用, 实现了节能与降温一体化目标。

(3) 提出了矿井通风集中式和分布式两种热湿回收方法, 实现了地表抽排乏风低位热能回收利用, 形成了井下关键节点分布式提热除湿的节能降温系统。实例分析表明, 乏风余热回收量及其应用潜力极大, 井下高温高湿节点热湿提取回收量较大且能显著改善局部工作环境。

参 考 文 献

- [1] National Energy Administration, Ministry of Science and Technology of the People's Republic of China. Notice on printing and distributing the plan for scientific and technological innovation in the energy field during the 14th five year plan [EB/OL]. *Information Disclosure* (2021-11-29) [2022-04-19]. http://zfxgk.nea.gov.cn/2021-11/29/c_1310540453.htm
(国家能源局科学技术部. 关于印发《“十四五”能源领域科技创新规划》的通知[EB/OL]. 信息公开 (2021-11-29) [2022-04-19]. http://zfxgk.nea.gov.cn/2021-11/29/c_1310540453.htm)
- [2] Yuan L. Theoretical analysis and practical application of coal mine cooling in Huainan mining area. *J Min Saf Eng*, 2007, 24(3): 298
(袁亮. 淮南矿区矿井降温研究与实践. 采矿与安全工程学报, 2007, 24(3): 298)
- [3] Li Z, Zhang D J, Pan L Y, et al. Low-carbon transition of China's energy sector and suggestions with the 'carbon-peak and carbon-neutrality' target. *J Chin Soc Power Eng*, 2021, 41(11): 905
(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. 动力工程学报, 2021, 41(11): 905)
- [4] Cai M F, Xue D L, Ren F H. Current status and development strategy of metal mines. *Chin J Eng*, 2019, 41(4): 417
(蔡美峰, 薛鼎龙, 任奋华. 金属矿深部开采现状与发展战略. 工程科学学报, 2019, 41(4): 417)
- [5] Wang H N, Peng J L, Cheng Z. Ventilation and cooling analysis of high temperature mine. *Nonferrous Met Eng*, 2013, 3(3): 34
(王海宁, 彭家兰, 程哲. 高温矿井的通风与降温分析. 有色金属工程, 2013, 3(3): 34)
- [6] Gao J L, Yang M. Analysis of the factors influencing temperature distribution of surrounding rock and cooled zone radius. *China Saf Sci J*, 2005, 15(2): 73
(高建良, 杨明. 巷道围岩温度分布及调热圈半径的影响因素分析. 中国安全科学学报, 2005, 15(2): 73)
- [7] Lü X Y, Zhao J K. Application of water source heat pump technology in mine system. *Energy Conserv Environ Prot*, 2010(8): 43
(吕向阳, 赵建康. 水源热泵技术在矿井系统中的应用. 节能与环保, 2010(8): 43)
- [8] Zhang Z T. *Recovery of Mine Waste Heat of Exhaust Air Heat Pump System was Used to Study* [Dissertation]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2015
(张振涛. 利用热泵系统回收矿井排风余热的研究[学位论文]. 西安: 西安建筑科技大学, 2015)
- [9] Li J G, Chen F L, Jiang Z J, et al. Research and application on low enthalpy ventilation air methane waste-heat utilization technology of mine. *China Coal*, 2015, 41(12): 120
(李建光, 陈峰雷, 蒋正君, 等. 矿井低焓乏风余热利用技术研究与应用. 中国煤炭, 2015, 41(12): 120)
- [10] Gao J L, Zhang X B. Study on method of temperature and humidity calculation of airflow in wet airway. *China Saf Sci J*, 2007, 17(6): 114
(高建良, 张学博. 潮湿巷道风流温度及湿度计算方法研究. 中国安全科学学报, 2007, 17(6): 114)
- [11] Mo F, Yu Z M, Wu G Y, et al. Resource utilization and comprehensive utilization of coal mine water. *Coal Eng*, 2009, 41(6): 103
(莫樊, 郁钟铭, 吴桂义, 等. 煤矿矿井水资源化及综合利用. 煤炭工程, 2009, 41(6): 103)
- [12] Xiong C C, Luo J H, Wei Y, et al. Research on the application of an anti-freezing system at residual heat recovery head of a split-type mine shaft exhaust. *Coal Eng*, 2020, 52(12): 12
(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. 煤炭工程, 2020, 52(12): 12)
- [13] Gao L. Application of mine waste heat recovery and reuse technology in Liangshuijing coal mine. *Chem Enterp Manag*, 2021(30): 77
(高丽. 矿井余热回收再利用技术在凉水井煤矿的运用. 化工管理, 2021(30): 77)
- [14] Cai M F, Dor J, Chen X S, et al. Development strategy for Co-mining of the deep mineral and geothermal resources. *Strateg Study CAE*, 2021, 23(6): 43
(蔡美峰, 多吉, 陈湘生, 等. 深部矿产和地热资源共采战略研究. 中国工程科学, 2021, 23(6): 43)
- [15] Chen Q G, Ge Q F, Cao L, et al. Study on thermal environment simulation of ventilation on demand of high altitude mine based on

- ventsim Visual™. *Energy Sav Nonferrous Metall*, 2020, 36(3): 30
(陈庆刚, 葛启发, 曹亮, 等. 基于Ventsim Visual™高海拔矿井按需通风热模拟研究. 有色冶金节能, 2020, 36(3): 30)
- [16] Wang C. *Application Research of Waste Heat Recovery of Lack of Air and Inrush Water in Coal Mine Based on Automation Monitoring Subsystem* [Dissertation]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020
(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[学位论文]. 徐州: 中国矿业大学, 2020)
- [17] Wang J, Huang W, Wang W D. Application and optimization of return air source heat pump system in a mine of Jizhong energy group. *Heilongjiang Sci Technol Inf*, 2012(7): 103
(王健, 黄炜, 王卫东. 浅谈冀中能源集团某矿回风源热泵系统的应用与优化. 黑龙江科技信息, 2012(7): 103)
- [18] Liu L J, Wang J M, Ren P Q. Application on return air source heat pump in heat recovery in a coal mine. *Appl Energy Technol*, 2012(10): 35
(刘丽娟, 王吉明, 任丕清. 回风源热泵技术在煤矿的应用与实践研究. 应用能源技术, 2012(10): 35)
- [19] Wang H. *Numerical Simulation Method Research on Heat Dissipation of Surrounding Rock and Prediction of Wind Temperature in High Temperature Coal Mining Face* [Dissertation]. Beijing: China University of Mining & Technology, Beijing, 2018
(王浩. 高温采煤工作面围岩散热及风温预测数值模拟方法研究[学位论文]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2018)
- [20] Gao J L, Wei P R. Numerical simulation of the thermal environment at working face of diving airway. *J China Coal Soc*, 2006, 31(2): 201
(高建良, 魏平儒. 掘进巷道风流热环境的数值模拟. 煤炭学报, 2006, 31(2): 201)
- [21] Ji J H, Liao Q, Hu Q T, et al. Heat transfer characteristics of driving face in heat harm mine. *J China Coal Soc*, 2014, 39(4): 692
(姬建虎, 廖强, 胡千庭, 等. 热害矿井掘进工作面换热特性. 煤炭学报, 2014, 39(4): 692)
- [22] Chen K Y, Zhou F B, Xia T Q, et al. Ventilation network solution method based on coupling iteration of air state parameters and air quantity. *J China Univ Min Technol*, 2021, 50(4): 613
(陈开岩, 周福宝, 夏同强, 等. 基于空气状态参数与风量耦合迭代的网风网解算方法. 中国矿业大学学报, 2021, 50(4): 613)
- [23] Zhou X Q, Wu B. *Theory and Practice of Mine Fire Disaster Relief*. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1996
(周心权, 吴兵. 矿井火灾救灾理论与实践. 北京: 煤炭工业出版社, 1996)
- [24] Chen K Y. *The Theory and Application of Mine Ventilation System Optimization*. Xuzhou: China University of Mining & Technology Press, 2003
(陈开岩. 矿井通风系统优化理论及应用. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2003)
- [25] Zhang S F, Ke J C, Qin Y P. Study on the prediction of air temperature distribution in overall mine ventilation network and a computer program for this purpose. *J China Univ Min Technol*, 1992, 21(1): 34
(张素芬, 柯金川, 秦跃平. 矿井全风网风温预测法及其计算机程序的研究. 中国矿业大学学报, 1992, 21(1): 34)
- [26] Ma H, Gao W, Zhou X H. Study on multi-parameter prediction of mine climate and automatic solution algorithm of ventilation network. *J Saf Sci Technol*, 2017, 13(11): 110
(马恒, 高巍, 周西华. 矿井气候多参数预测与通风网络自动解算算法研究. 中国安全生产科学技术, 2017, 13(11): 110)
- [27] Jining Development and Reform Commission. Notice on matters relating to the price of piped natural gas for residential use in Jining City [EB/OL]. *Information Disclosure* (2022-03-11) [2022-04-19] http://www.jining.gov.cn/art/2022/3/11/art_33390_2763920.html
(济宁市人民政府发展和改革委员会. 济发改价格〔2019〕201号关于济宁城区居民生活用管道天然气价格有关事项的通知 [EB/OL]. 信息公开(2022-03-11) [2022-04-19]. http://www.jining.gov.cn/art/2022/3/11/art_33390_2763920.html)
- [28] National Development and Reform Commission. The energy crisis has led to a rise in global electricity prices China's "supply and price stability" effect is obvious [EB/OL]. *China Electricity News* (2022-01-30) [2022-04-19]. https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/ztzl/gn-jnybg/202201/t20220130_1314263.html
(中华人民共和国国家发展和改革委员会. 能源危机导致全球电价上涨 中国“保供稳价”效果明显 [EB/OL]. 中国电力报 (2022-01-30) [2022-04-19]. https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/ztzl/gn-jnybg/202201/t20220130_1314263.html)
- [29] International Energy Agency. Gas Market Report Q4-2021 including Global Gas Security Review 2021 [EB/OL]. *Information Disclosure* (2021-10) [2022-04-19]. <https://www.iea.org/reports/gas-market-report-q4-2021>
- [30] Riffat S B, Ma X L. Thermoelectrics: A review of present and potential applications. *Appl Therm Eng*, 2003, 23(8): 913