

# 燃煤锅炉燃烧利用矿井乏风甲烷改造经济性及运行影响分析

郭前鑫<sup>1</sup>, 魏琳<sup>2\*</sup>, 王虎<sup>3</sup>, 谢国威<sup>3</sup>, 何超<sup>3</sup>, 王志超<sup>2</sup>, 刘超<sup>3</sup>, 赵勇刚<sup>1</sup>

(1. 神华神东电力有限责任公司, 陕西 西安 710076;  
2. 西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710054;  
3. 国家能源集团国源电力有限公司, 北京 100033)

**摘要:**为处理矿井大流量乏风中的超低浓度甲烷,拟采用将乏风作为锅炉二次风进行处理利用。对此类工程改造的锅炉引风、投资运行成本、项目改造收益、锅炉效率影响进行了分析。结果表明,矿井乏风甲烷利用工程改造减小了原来锅炉烟气的产生量,且烟气的量改变很小,无需对锅炉侧进行改造。管道及保温材料的采购与安装是此类改造工程的主要投资部分。该类项目的主要收益为乏风处理的碳汇补贴收益。乏风流速越低,工程投资成本变高,但运行成本变低,有助于项目的长周期盈利。绘制了不同运输长度下乏风总量与瓦斯绝对涌出量的20年期盈利平衡曲线。提出了优化矿井侧及二次风侧的乏风输送系统,并对乏风温度、湿度等因素对锅炉效率的影响进行了分析。对矿井乏风利用项目的立项及可行性分析提供了指导。

**关键词:**乏风甲烷;二次风;工程投资;经济性;锅炉效率

中图分类号:TD712

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2024)10-0208-06

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2024.10.038

## Technical and economic feasibility study on using mine ventilation air methane for coal-fire boiler and analysis on influence of operation

GUO Qian-xin<sup>1</sup>, WEI Lin<sup>2\*</sup>, WANG Hu<sup>3</sup>, XIE Guo-wei<sup>3</sup>, HE Chao<sup>3</sup>, WANG Zhi-chao<sup>2</sup>,  
LIU Chao<sup>3</sup>, ZHAO Yong-gang<sup>1</sup>

(1. Shenhua Shendong Electric Power Co., Ltd., Xi'an 710076, China;

2. Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China;

3. CHN Energy Guoyuan Electric Power Co., Ltd., Beijing 100033, China)

**Abstract:** In order to treat with ultra-low concentration methane in high flow ventilation air in mines, the ventilation air is fed into the boiler as a secondary air. Induced draft fan, investment and operating cost, project renovation earnings and the influence of boiler efficiency for these engineering reconstructions are analyzed. Results illustrate that the boiler generates less flue gas after using ventilation air methane. The variation of mass flow rate of the fuel gas is so small that there needs no technological transformation on induced draft fan of the boiler. Majority investment of such renovation project is subject to procurement and installation of pipelines and thermal insulation cotton. Carbon sink part is the main earnings for such a project. Low flow velocity of the ventilation air can raise the engineering investment cost but reduce annual operating cost, which is beneficial for the profit over a long period. Earnings surplus and deficit balance curves of the project in 20-year are plotted under different transportation distances. An optimized ventilation air methane delivery system is proposed for both mine-side and secondary air-side. Meanwhile, the effect of ventilation air methane temperature and humidity on boiler efficiency is analyzed. This study provides a reference for the approval and feasibility analysis of ventilation air methane utilization projects.

**Key words:** ventilation air methane; secondary air; project investment; economic efficiency; boiler efficiency

甲烷作为全球排放量第二大的温室气体,短期内具备较强的温室气体效应,是一种具有快速增温效应的温室气体<sup>[1-2]</sup>。2022年我国甲烷排放总量为5 567.6万t,占全球甲烷排放总量的15.6%,其中能源领域甲烷排放量为2 537.2万t,约占我国甲烷排放总量的46%。煤炭地下开采导致的对外排放甲烷占30.2%,远高于世界平均水平的9%<sup>[3]</sup>。因此,

减少煤炭行业的甲烷排放,提高甲烷利用效率对推动我国甲烷减排工作意义重大。

对于排出甲烷体积分数一般大于30%的气体,可通过处理成为管道级气体进行直接利用<sup>[4-6]</sup>。甲烷体积分数在1%~30%之间的低浓度甲烷发电、直燃及浓缩技术在我国也得到了广泛发展及应用<sup>[7-12]</sup>。但对于矿井中的超低浓度瓦斯气(又称乏

收稿日期:2024-05-23;修回日期:2024-08-07

基金项目:国神公司科技创新项目(GSKJ-23-202)

作者简介:郭前鑫(1970-),男,本科,高级工程师,从事电力工程技术开发和管理;魏琳(1994-),男,博士,工程师,研究方向为矿井乏风利用技术,通讯联系人,18706830601@163.com。

风),甲烷体积分数多变( $\leq 0.75\%$ ),且体积流量大,约占煤炭开采活动总甲烷排放的60%~70%<sup>[13]</sup>,处理和利用较困难。

目前乏风的处理利用主要分为作为主燃料燃烧和作为助燃空气辅助燃烧这2大类技术路线。乏风甲烷蓄热氧化技术是将超低浓度甲烷作为主燃料燃烧利用的典型代表,在国内外已有广泛应用的实例<sup>[14-16]</sup>。但该技术需要较高浓度的抽放瓦斯与乏风掺混以提高蓄热氧化室内甲烷浓度,保证反应的自维持<sup>[17-18]</sup>。另外,单个蓄热氧化装置处理乏风能力有限,且规模效应不明显,对于大流量矿井乏风投资成本较高。超低浓度甲烷主要成分为空气,因此可直接将其作为助燃空气送入锅炉二次风中依靠锅炉高温运行环境实现乏风甲烷的处理及热量利用<sup>[19-20]</sup>。澳大利亚 Vales Point 电厂将乏风送入锅炉作为助燃空气为该技术的实施提供了可行案例<sup>[21]</sup>。但目前国内还没有矿井乏风送入锅炉进行大规模处理的工程实例。

本研究对国内多家煤电一体化运行煤矿及对应燃煤电厂进行收资和调研,计算了煤电一体化矿井乏风处理技术的投资改造运行成本及项目收益情况。分析了影响煤电一体化矿井乏风处理技术投资和收益的主要因素,为未来该类项目改造的经济性评估提供参考。

## 1 乏风处理工程简介

### 1.1 乏风利用方式及经济性计算边界条件

锅炉常见的正压直吹式制粉系统会将部分一次风送入磨煤机。由于磨煤机对防爆要求较高,矿井乏风进入一次风系统会存在爆炸风险。而将矿井乏风直接送入二次风机入口,对锅炉本体影响不大,符合防爆、安全输送、稳定燃烧要求。乏风送入锅炉处理的流程如图1所示。

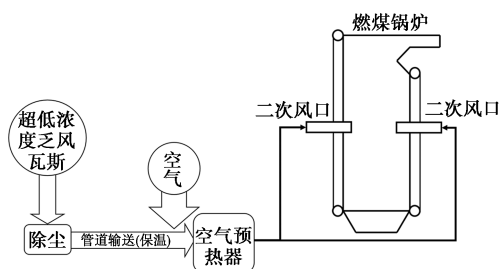


图1 乏风利用流程示意图

本研究选择4组不同乏风输送距离、不同矿井乏风浓度及乏风量的煤电一体化乏风利用比选点进

行经济性对比分析。各比选点参数如表1所示。

表1 各煤电一体化示范比选点乏风基本信息

地点	输送距离/ m	矿井甲烷绝对涌出量/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ )	乏风风量/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ )
A厂	3311	1.40	31.92
B厂	4785	3.20	41.70
C厂	4268	4.67	43.20
D厂	2728	1.06	49.95

### 1.2 乏风利用项目经济性测算方法

乏风利用项目的投资成本构成如式(1)所示:

$$N = N_1 + N_2 + N_3 + N_4 + N_5 \quad (1)$$

式中, $N$ 为投资总成本,万元; $N_1$ 为管道建设成本,万元; $N_2$ 为保温敷设成本,万元; $N_3$ 为设备购置成本,万元; $N_4$ 为征地土建成本,万元; $N_5$ 为电控改造成本,万元。

考虑到冬季环境温度较低,对矿井乏风在冬季的管道输送过程的散热进行计算。管道外侧采用硅酸铝保温层,厚度为0.1 m。管道散热考虑为绝热过程,各煤电一体化示范点冬季乏风输送温度结果如表2所示。冬季乏风出口依旧温度较高,乏风冬季利用可产生暖风器节煤收益。

表2 冬季乏风输送进出口温度  $^{\circ}\text{C}$

地点	A厂	B厂	C厂	D厂
环境温度	-30	-35	-25	-35
乏风进口侧温度	20	14	20	15
乏风出口侧温度	15.8	9	15.8	12.3

乏风利用项目的节煤(折算为标煤)量计算如式(2)所示:

$$M = M_1 + M_2 - M_3 \quad (2)$$

式中, $M$ 为总节煤量,t/a; $M_1$ 为乏风利用节煤量,t/a; $M_2$ 为暖风器乏风热量利用节煤量,t/a; $M_3$ 为乏风利用系统增加煤耗,t/a。

乏风利用项目的 $\text{CO}_2$ 减排量计算如式(3)所示:

$$C = C_1 + C_2 = (\text{GWP} - 1)Q + \xi M \quad (3)$$

式中, $C$ 为项目 $\text{CO}_2$ 总减排量,t/a; $C_1$ 为乏风甲烷利用 $\text{CO}_2$ 减排量,t/a; $C_2$ 为节煤产生的 $\text{CO}_2$ 减排量,t/a; $\text{GWP}$ 为甲烷的全球增温潜势与 $\text{CO}_2$ 的比值; $\xi$ 为标煤的 $\text{CO}_2$ 排放系数; $Q$ 为乏风甲烷量,t/a; $M$ 为乏风利用总节煤量,t/a。

## 2 乏风利用对锅炉侧引风影响分析

煤矿乏风中甲烷体积分数在0.75%以下,因此

乏风引入二次风道中对于锅炉烟气流量产生的影响较小。将本研究中调研的各厂,通过热力校核计算的方式,对乏风代替部分二次风助燃对烟气流量产生的影响进行大致估算。乏风利用部分产生的烟气量以及该热量采用燃煤产生的烟气量估算如表 3 所示。乏风利用部分在 A 厂、B 厂、C 厂和 D 厂产生的烟气量分别为 608.1、2 578.6、3 737.5、850.2 kg/h。而改造前该部分热量由煤粉产生,对应生成的烟气量分别为 721.3、3 270.4、4 626.3、1 018.6 kg/h。煤电一体化处理乏风甲烷的技术改造减小了烟气产生量,并且烟气变化量对于整个锅炉总烟气量而言,基本可以忽略不计。因此,无需对锅炉侧引风进行改造。

表 3 乏风改造前后烟气量变化

项目	A 厂	B 厂	C 厂	D 厂
乏风中甲烷浓度/ $10^{-6}$	142.9	460.4	648.6	127.3
乏风标态体积流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$	304522	400664	412257	477704
消耗瓦斯质量流量/ $(\text{kg} \cdot \text{h}^{-1})$	31.2	132.3	191.7	43.6
甲烷燃烧产生烟气的密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1.3	1.3	1.3	1.3
乏风中甲烷燃烧产生的烟气 质量流量/ $(\text{kg} \cdot \text{h}^{-1})$	608.1	2578.6	3737.5	850.2
当地燃煤低位发热量/ $(\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1})$	20830	12910	16140	19610
乏风折算煤质量流量/ $(\text{kg} \cdot \text{h}^{-1})$	75.0	513.0	594.8	111.4
当地燃煤燃烧产生烟气的密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1.33	1.29	1.31	1.32
乏风折算的燃煤燃烧烟气流量/ $(\text{kg} \cdot \text{h}^{-1})$	721.3	3270.4	4626.3	1018.6

### 3 乏风利用工程经济性比选结果分析

锅炉常见的二次风风速在 10~20 m/s 范围内,因此乏风输送速度也限制在此范围内。随着乏风输送速度的提升,对应系统输送风机耗电成本增加,但对应管道的建设投资成本降低。本研究对不同乏风输送速度下各煤电一体化示范点乏风利用建设投资、节煤减碳收益及项目运行总收益进行了估算和分析。

#### 3.1 乏风利用工程一次性投资比选分析

该项目各乏风利用示范点的投资统计如图 2 所示。由于设备购置、征地土建及电控等部分的投资金额与乏风管内流速无关,在图 2 中统计为其他投资成本。各比选点管道及保温的投资值远大于其余投资成本,占总投资的 70%左右。另外,由于输送

距离较长,B 厂与 C 厂的管道、保温投资与总投资要远高于 A 厂和 D 厂。D 厂由于乏风量较大,相较于 A 厂虽然有距离优势,但同样流速下输送管道管径更大,最终 2 厂的管道及保温投资基本相当。考虑到各地征地成本等因素的影响,在相同输送速度的水平上 D 厂最终投资总成本高于 A 厂。除此以外,各曲线随着管内流速的增加,各比选点的投资成本逐渐降低,这与管道直径的降低导致管道建设与保温敷设成本降低的分析是一致的。以上分析充分说明管道长度和直径等管道尺寸参数是影响此类项目投资成本的主要因素。

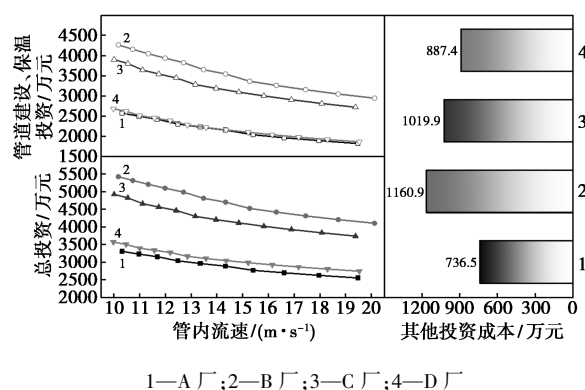


图 2 工程改造投资统计

#### 3.2 乏风利用工程节煤比选分析

系统的年节煤量主要由暖风器节煤、乏风利用节煤以及系统运行新增煤耗这 3 部分组成。其中乏风利用与暖风器节煤只与乏风温度和瓦斯绝对涌出量等参数有关。系统运行新增煤耗主要与送风机功率(即乏风总量和管内流速)有关。各比选点的节煤量分析估计如图 3 所示。不同示范点的暖风器节煤和系统运行新增煤耗差异较小。不同比选点的乏风热量利用产生的节煤量差异较大。综合考虑后,在乏风利用项目节煤方面,优先考虑甲烷总量最高的煤电一体化比选点,即 C 厂。

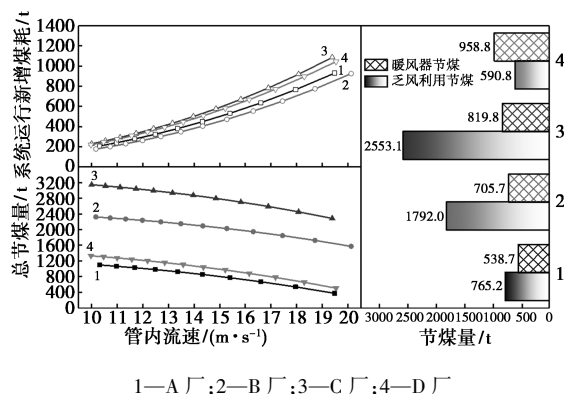
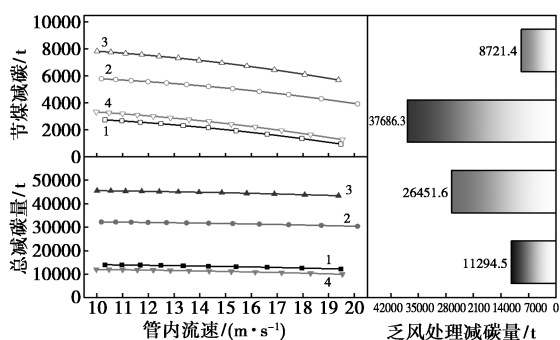


图 3 节煤量统计

### 3.3 乏风利用工程二氧化碳减排比选分析

甲烷具有强烈的温室效应,乏风的燃烧处理会产生可观的二氧化碳减排效果。另外,甲烷利用的节煤也会产生一定的二氧化碳减排。其中,乏风处理减排二氧化碳与乏风管内流速无关。乏风处理减碳、节煤减碳与总减碳量的结果如图4所示。乏风处理减碳量完全取决于矿井中所能处理的甲烷总量,即绝对瓦斯涌出量。不同示范点的年节煤减碳量在1 000~8 000 t,乏风处理的年CO<sub>2</sub>减排量范围为8 721.4~37 686.3 t。不同示范点的乏风处理减碳量的差异非常大,且均远高于对应节煤产生的CO<sub>2</sub>减排量。因此,在初步评估乏风利用项目节煤减碳环保效益时,应优先考虑绝对瓦斯涌出量高的C厂。



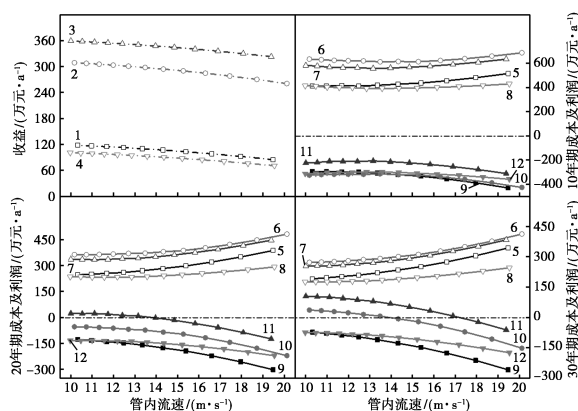
1—A厂;2—B厂;3—C厂;4—D厂

图4 减排二氧化碳统计

### 3.4 乏风利用工程收益比选分析

在CCER项目重启后,煤电一体化乏风处理项目的收益主要由乏风利用节煤收益和二氧化碳减排收益这2部分组成。在本比选分析中,CCER碳汇收益单价定为60元/t。乏风处理利用项目的年成本主要由均摊到每年的投资成本和输送系统年运行成本这2部分组成。本研究对设计运行年限为10年期、20年期及30年期的乏风处理利用项目成本及最终利润进行统计。乏风处理利用项目的收益、不同年限的运行成本及年利润如图5所示。随着乏风输运速度的升高,系统运行耗电量增加,节煤量和减碳量降低,项目最终利润逐渐下降。为提高乏风利用项目的盈利能力,应尽量选择乏风低输运速度。另外,随着项目运行年限的提升,项目年投资成本逐渐降低。各项目10年期综合利润均为负值,不具备经济价值。20年期C厂在13.2 m/s以下输运速度年利润为正值。随着运行年限进一步提升,30年期的B厂在13.5 m/s以下及C厂在16.9 m/s以下输运速度均为正利润。B厂和C厂的瓦斯绝对涌出量(即乏风利用收益)远高于其他2比选项目,因此在

长运行周期及低乏风输运速度下,乏风处理项目具备经济效益。

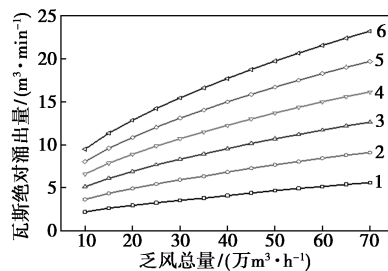


1—A厂;2—B厂;3—C厂;4—D厂;5—A厂成本;  
6—B厂成本;7—C厂成本;8—D厂成本;9—A厂利润;  
10—B厂利润;11—C厂利润;12—D厂利润

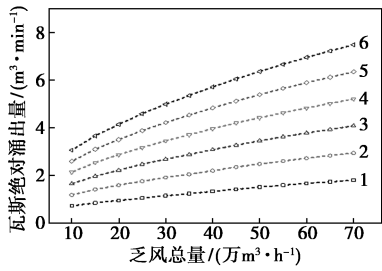
图5 项目收益图

## 4 乏风利用工程收支平衡分析

从上述分析可知,煤电一体化乏风处理项目的收益主要取决于乏风中甲烷的绝对涌出量。而项目的主要成本为管道建设、保温投资成本及输运电耗成本。以20年期的C厂征地土建等边界条件为例,统计计算了不同管道长度下乏风处理项目收支平衡的乏风总量和对应的瓦斯绝对涌出量。通过对上述乏风处理项目收益的研究发现,低速输运更具备经济性。因此,在本统计中改变管道直径以保证乏风输运速度在10 m/s左右。对输送管道长度在1~6 km之间的乏风处理项目考虑申请CCER及不考虑CCER政策的收支平衡曲线进行统计,结果如图6所示。随着管道长度的提升,管道建设及保温投资大幅升高,因此整个收支平衡曲线向上移动。相较于管道投资及矿井瓦斯绝对涌出量,不同电厂的厂用电、总节煤收益、土建成本等因素对煤电一体化乏风处理项目的收益影响较小。因此该曲线图可对之后的乏风处理项目20年期的经济性进行简单快速的初步评估。



(a) 不考虑CCER收益



(b) 考虑 CCER 收益

管长: 1—1 km; 2—2 km; 3—3 km; 4—4 km; 5—5 km; 6—6 km

图 6 20 年期煤电一体化乏风处理项目收支平衡曲线图

### 5 煤电一体化乏风利用输送系统设计

#### 5.1 乏风输送系统初步设计

矿井乏风输送系统的初步设计示意图如图 7 所示。矿井侧采用乏风引风帽和百叶窗电动关断门组合,在引风帽上开孔取乏风的方式进行乏风侧的取气。取气时百叶窗关闭,保证乏风全部送入乏风输送管道不产生甲烷外溢。当电厂侧停运或者矿井定期通风机反风操作时,增设的乏风送风机停止运行、关闭输送系统的电动阀、打开对空排放口处的百叶窗电动门即可,不会对煤矿反风操作或正常乏风排放产生影响。另外,在乏风输送管道上每隔一段距离设置有疏排水阀门,以保证乏风输送过程中降温析出的凝结水及时排除,降低送入炉膛的乏风含水量,保证锅炉运行效率。

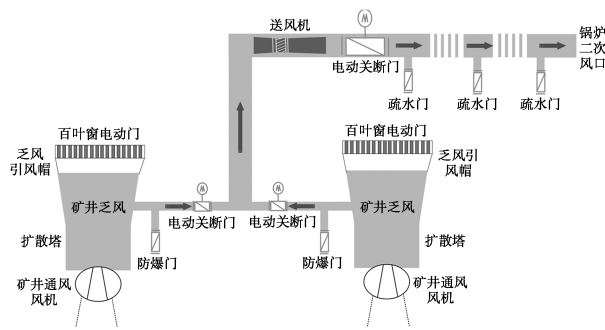


图 7 矿井乏风输送系统初步设计示意图

矿井乏风在锅炉二次风进口处掺混形式初步提出如图 8 所示的分侧进风和风管伸入二次风口进风 2 种方式。其中,由于乏风输送至送风机入口为微正压状态,若采用分侧进风可能造成部分乏风从空气入口扩散至大气,初步分析不建议采用。而风管伸入二次风口的方式可有效防止乏风向大气泄漏,仅当矿井乏风输送系统故障退出时,矿井乏风输送管的存在会提升空气抽气阻力。通常电厂二次风机均

有裕量,且由于新能源并网,煤电机组满出力运行工况越来越少。因此风管伸入二次风口的方式可作为乏风在二次风口的较优掺混方式。

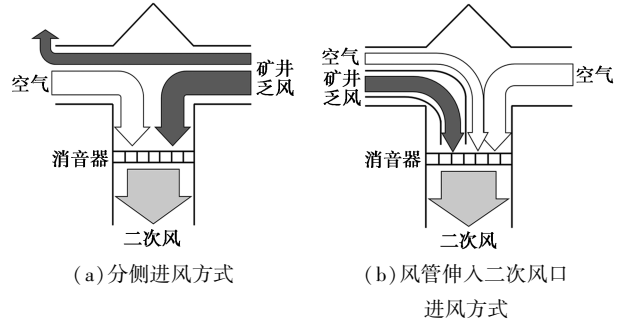
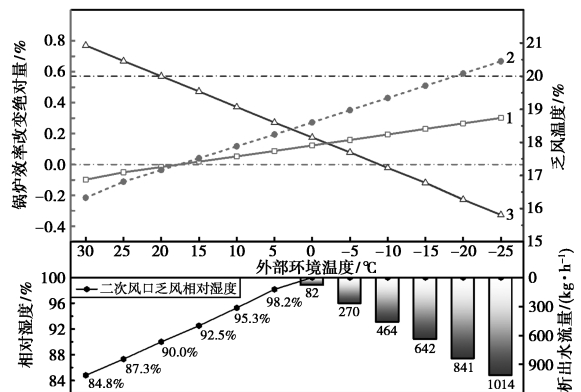


图 8 矿井乏风二次风口掺混方式

#### 5.2 乏风利用对锅炉效率的影响分析

以 C 厂为例,矿井乏风在矿井侧温度为 20℃,相对湿度为 90%,且其温湿度受环境温度影响较小。乏风的含湿量会对锅炉效率产生负面影响,而低温环境下较高温度的乏风会提高锅炉效率。以环境温度-25~30℃为限,研究不同环境温度下乏风利用对锅炉效率的影响。曲线如图 9 所示。随着外部空气温度的降低,矿井乏风在输送过程中温度不断降低,含湿量达到该温度下最大值时管道内析出水通过疏水阀定期排出系统。随着环境温度的不断降低,矿井乏风在二次风入口处含湿量越低,且乏风温度与环境空气温度的温差也越来越大。最终,随着环境温度的降低,锅炉效率在 50% 出力和额定负荷运行下效率均有不同程度的提高。锅炉不同负荷下矿井乏风均需优先保证全部消纳,因此 50% 出力下环境空气二次风比例较少,最终导致锅炉 2 种不同出力下锅炉效率变化幅度的不同。另外,从图 9 中不难发现在高温环境下乏风利用对锅炉效率的降低效果十分有限,而低温环境下锅炉效率提升明显。



1—锅炉额定负荷; 2—锅炉 50% 负荷; 3—二次风口乏风温度

图 9 矿井乏风利用对锅炉效率的影响

从全年连续运行的角度综合考虑,乏风送入锅炉二次风中利用在降低碳排放的同时有利于锅炉运行。

## 6 结论

矿井乏风直接送入锅炉二次风能有效处理大规模的超低浓度矿井乏风甲烷。本文中对多个实际运行的矿井乏风送入锅炉二次风处理的工程进行经济性比选分析,得到的主要结论如下。

(1)煤电一体化处理乏风甲烷的技术将矿井乏风直送到锅炉二次风道中燃烧处理。该改造减小了烟气产生量,且减小的烟气量对于总烟气量而言,基本可以忽略不计。无需对锅炉侧进行改造。

(2)煤电一体化处理乏风甲烷工程主要投资为管道及保温投资。该类项目主要收益来源于乏风处理的碳汇收益,瓦斯绝对涌出量越高的比选点越具有投资改造价值。乏风流速越低一次性建设投资越高,但年运行成本越低,长期而言更有助于项目盈利。

(3)本研究对不同输运长度下乏风总量与瓦斯绝对涌出量的20年期盈利平衡点进行了统计。由于征地、土建等成本占比较小,该曲线作为大多数煤电一体化乏风利用工程改造经济可行性的初步依据。

(4)本研究提出了一套乏风输送系统,对矿井侧乏风收集及二次风侧乏风与空气的掺混均给出了优化方案。对乏风温度、湿度等影响因素对锅炉效率的影响进行了分析,结果表明矿井乏风送入锅炉有助于在全年范围内锅炉效率的整体提升。

## 参考文献

- [1] IPCC. Climate change 2014: Synthesis report [R]. City: Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2014.
- [2] 古小东, 吴晓雅, 周丽旋. “双碳”目标下我国甲烷排放控制制度的完善[J]. 环境保护, 2023, 51(6): 32-36.

(上接第207页)

- [15] Carbide U. Feasibility of the silane process for producing semiconductor grade silicon [R]. New York: Union Carbide Corp, 1979.
- [16] Zanta J, Laskafeld D. Liquid-vapor equilibrium in the trichlorosilane-methyldichlorosilane-silicon tetrachloride system [J]. Chem Prum, 1969, 19: 539-544.
- [17] Zhurenko E M, Karasev V F, Petrik A G, et al. Liquid-vapor equilibrium in a chlorosilane-based system [J]. Zh Prikl Khim, 1991, 64: 1907-1911.
- [18] Olson J D. Measurement of vapor-liquid equilibria by ebulliometry [J]. Fluid Phase Equilib, 1989, 52: 209-218.
- [19] 王乃治. 三氯氢硅歧化制取硅烷及硅烷热分解制备多晶硅工艺研究[D]. 天津: 天津大学, 2016.
- [20] You X, Gu J, Gerbaud V, et al. Optimization of pre-concentration,

- [3] 国际能源署 (Iea). Methane Tracker 数据平台 [EB/OL]. [2024-02-11]. <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/methane-tracker>.
- [4] 煤矿低浓度瓦斯综合利用技术简析 [J]. 能源与节能, 2019, (8): 143-144, 147.
- [5] 刘之琳, 田亚峻, 李永龙, 等. 欧洲主要产煤国煤矿瓦斯利用技术及展望 [J]. 煤炭技术, 2018, 37(3): 168-169.
- [6] 康宇, 张秀慧. 瓦斯制甲醇技术研究与安全性评价 [J]. 中外企业家, 2018, (31): 132.
- [7] 黄克海. 低浓度煤层气发电提效系统设计 [J]. 煤气与热力, 2023, 43(8): 9-13.
- [8] 赵旭生, 逢锦伦. 低浓度瓦斯安全直接燃烧技术研究 [J]. 矿业安全与环保, 2017, 44(6): 1-5, 16.
- [9] 张陈, 李广学, 徐汉城. 变压吸附浓缩低浓度煤层气制甲烷研究进展 [J]. 安徽化工, 2023, 49(4): 1-3.
- [10] 徐汉城, 李广学, 张陈. 低浓度煤层气变压吸附制甲烷研究进展 [J]. 现代化工, 2023, 43(9): 57-60.
- [11] 李国富, 李超, 霍春秀, 等. 山西重点煤矿区瓦斯梯级利用关键技术与工程示范 [J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(9): 42-50.
- [12] 栗硕豪, 巩雨晴, 付沈光, 等. 煤矿瓦斯变压吸附提纯甲烷的研究进展 [J]. 中国科学: 化学, 2023, 53(6): 992-1007.
- [13] Yang Z, Hussain M Z, Marín P, et al. Enrichment of low concentration methane: an overview of ventilation air methane [J]. Journal of Materials Chemistry A, 2022, 10(12): 6397-6413.
- [14] 黄克海. 乏风瓦斯混配装置调控系统设计研究 [J]. 矿业安全与环保, 2017, 44(3): 33-36.
- [15] 高鹏飞. 低浓度瓦斯蓄热氧化后的热量调配方法探讨 [J]. 矿业安全与环保, 2017, 44(2): 111-115.
- [16] 陈金华. 低浓度瓦斯蓄热氧化供热系统的应用研究 [J]. 矿业安全与环保, 2017, 44(2): 62-65.
- [17] 田涛, 韩雨, 张兴旺, 等. 旋转阀蓄热氧化技术助力煤矿风排瓦斯综合利用 [J]. 中国煤层气, 2023, 20(2): 39-42, 38.
- [18] 陈相煜, 王波, 周秋平, 等. 煤矿乏风蓄热氧化过程数值模拟 [J]. 化学工程, 2023, 51(1): 78-83.
- [19] 邓磊, 王一坤, 车得福. 低浓度可燃废气作为辅助燃料在燃煤锅炉中的应用研究 [J]. 热能动力工程, 2010, 25(3): 287-291, 357.
- [20] Wang Y, Liu Y, Cao Q, et al. Homogeneous combustion of fuel ultra-lean methane-air mixtures: Experimental study and simplified reaction mechanism [J]. Energy & Fuels, 2011, 25(8): 3437-3445.
- [21] 曹敏敏. 煤矿低浓度甲烷利用技术研究进展 [J]. 煤炭技术, 2022, 41(1): 101-105. ■

entrainer recycle and pressure selection for the extractive distillation of acetonitrile-water with ethylene glycol [J]. Chemical Engineering Science, 2018, 177: 354-368.

- [21] Medina-Herrera N, Tututi-Avila S, Jimenez-Gutierrez A, et al. Optimal design of a multi-product reactive distillation system for silanes production [J]. Computers & Chemical Engineering, 2017, 105(4): 132-141.
- [22] Gadalla M, Olujić Ž, de Rijke A, et al. Reducing CO<sub>2</sub> emissions of internally heat-integrated distillation columns for separation of close boiling mixtures [J]. Energy, 2006, 31(13): 2409-2417.
- [23] Demirel Y. Thermodynamic analysis of separation systems [J]. Separation Science and Technology, 2004, 39(16): 3897-3942.
- [24] Nguyen N, Demirel Y. Retrofit of distillation columns in biodiesel production plants [J]. Energy, 2010, 35(4): 1625-1632. ■