

基于事故树的焦化生产膨胀压力致灾机制与防控研究

徐淑娟¹, 苏树辰¹, 韦耀恒¹, 柴晨阳¹, 郭江^{1,2*}

¹太原科技大学安全与应急管理工程学院, 山西 太原

²太原科技大学粉尘职业危害防控与煤矿安全智能装备研发山西省重点实验室, 山西 太原

收稿日期: 2026年5月11日; 录用日期: 2026年6月4日; 发布日期: 2026年6月10日

摘要

为精准识别焦炉炭化室膨胀压力异常致灾因素, 构建科学的安全防控体系, 本文采用事故树分析法(FTA), 以“膨胀压力异常引发焦化生产安全事故”为顶上事件, 从原料、工艺、管控三维度搭建致灾风险模型, 通过求解最小割集与径集, 开展结构重要度、顶上事件发生概率及概率重要度的定性 + 定量全维度分析。研究结果表明, 塑性体渗透性异常、挥发物传质特性异常为核心致灾风险点, 测算得该类异常引发安全事故的实测概率为88.04%, 厘清了各致灾因素的层级影响权重。基于分析结果, 以配煤优化为核心, 从源头消减、过程稳控、末端兜底层面构建全链条精细化防控体系, 研究成果可为焦化生产膨胀压力风险精准管控提供理论支撑与实践指导。

关键词

焦化生产, 事故树分析, 致灾机制, 防控措施

Study on Disaster-Causing Mechanism and Prevention of Expansion Pressure in Coking Production Based on Fault Tree

Shujuan Xu¹, Shuchen Su¹, Yaoheng Wei¹, Chenyang Chai¹, Jiang Guo^{1,2*}

¹School of Safety and Emergency Management Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan Shanxi

²Shanxi Key Laboratory of Dust Occupational Hazard Prevention and Intelligent Equipment Research for Coal Mine Safety, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan Shanxi

Received: May 11, 2026; accepted: June 4, 2026; published: June 10, 2026

*通讯作者。

文章引用: 徐淑娟, 苏树辰, 韦耀恒, 柴晨阳, 郭江. 基于事故树的焦化生产膨胀压力致灾机制与防控研究[J]. 安防技术, 2026, 14(2): 73-80. DOI: 10.12677/jst.2026.142007

Abstract

To accurately identify the disaster-causing factors of abnormal expansion pressure in coke oven carbonization chambers and construct a scientific safety prevention and control system, this study adopted Fault Tree Analysis (FTA). Taking "safety accidents in coking production induced by abnormal expansion pressure" as the top event, a disaster-causing risk model was built from three dimensions of raw materials, process and management. By solving the minimum cut sets and path sets, a comprehensive qualitative and quantitative analysis was conducted on structural importance, occurrence probability of the top event and probability importance. The results show that abnormal plasticity permeability and abnormal volatile mass transfer characteristics are the core disaster-causing risk points, and the measured probability of safety accidents induced by such abnormalities is 88.04%, which clarifies the hierarchical influence weight of each disaster-causing factor. Based on the analysis results, with coal blending optimization as the core, a full-chain refined prevention and control system was constructed from the aspects of source reduction, process stabilization and terminal guarantee. The research results can provide theoretical support and practical guidance for the precise control of expansion pressure risks in coking production.

Keywords

Coking Production, Fault Tree Analysis, Disaster-Causing Mechanism, Prevention and Control Measures

Copyright © 2026 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. 引言

焦化生产是工业领域的核心工艺环节之一，其流程稳定性与安全性直接关联企业生产效率、人员安全及设备运维保障。其中，焦炉炭化室运行过程中出现的膨胀压力异常，是焦化生产环节的典型安全风险源之一，若该风险未得到有效管控，易引发系列安全隐患，进而影响生产系统的平稳运行[1]。

当前，针对焦化生产安全的研究多围绕工艺优化、单一设备防护等维度展开，相关风险分析多以定性判断或仅逻辑结构层面的重要度分析为主，缺乏结合事件发生概率的全面定量计算，在膨胀压力致灾过程的系统分析、致灾因素的全面溯源及精准防控体系构建等方面，仍存在进一步深化与完善的空间[2]。

基于此，本文结合相关焦化安全规范与行业实测数据，以焦化生产中膨胀压力致灾过程为研究对象，采用事故树分析方法构建致灾风险模型，通过求解最小割集、最小径集，开展结构重要度、顶上事件发生概率与概率重要度的分析，系统识别致灾过程中的核心风险因素，并针对性提出精细化防控策略。本研究不仅旨在填补相关领域系统风险量化分析的部分空白，也期望为焦化行业的安全管理升级提供理论参考与实践思路[3]。

2. 焦化生产膨胀压力生成与致灾原理

在焦化生产流程中，炼焦煤在焦炉炭化室内经高温干馏完成成焦过程，其中 350℃~550℃的塑性体阶段是膨胀压力生成的关键时期，该阶段炼焦煤会大量析出挥发物，成为膨胀压力的核心气源[4]。原料煤的本质特性(变质程度、黏结性、工业分析指标等)直接决定挥发物的释放规律，包括释放总量、释放

速率、释放温区等；唐山佳华煤化工实测数据表明，炼焦煤挥发分与黏结指数 G 值高度相关($R^2 = 0.984$) [5]，当挥发分 $> 28\%$ 时，黏结指数 G 值易超 85，塑性体透气性降低 60%，膨胀压力将显著升高[6]。而塑性体的透气性则是制约挥发物排出效率的核心因素，其透气性参数由塑性体结构、温区区间等决定 [4]，苗国鹏等工业实验数据显示，当塑性体低透气性区间起始温度从 350°C 升至 380°C 时，挥发物排出效率可提升 45%，膨胀压力降低 52% [4]。

当原料煤挥发物释放规律与塑性体透气性出现匹配失衡时，挥发物无法及时排出炭化室，会在室内持续积聚，进而形成膨胀压力[7]。当膨胀压力超出炉体设计承载阈值(通常为 0.8 kPa)时，将直接引发炉体变形、炉门密封失效等设备本体故障，破坏生产系统的密封性与结构完整性；据李刚对国内多家焦化企业的调研数据，2020~2024 年因压力监测系统失灵、应急泄压装置失效导致膨胀压力异常升级为安全事故的案例占比达 45% [8]，若此时叠加安全管控体系运行失效，无法及时发现风险并采取泄压、停炉等应急措施，设备故障将进一步扩大，最终诱发煤气泄漏、火灾爆炸等焦化生产安全事故，形成“原料/工艺偏差→挥发物积聚→膨胀压力超标→设备故障→管控失效→安全事故”的致灾链条[6]。

3. 焦化生产膨胀压力致灾事故树构建

事故树分析法(FTA)可清晰拆解膨胀压力致灾的“原料 - 工艺 - 管控”层级逻辑，将多因素耦合关系具象化，通过定性 + 定量分析定位关键风险点，为精准防控提供科学依据，有效解决传统经验判断的局限性问题[9]。本文以“膨胀压力异常引发焦化生产安全事故”为顶上事件，构建事故树模型(图 1)，并配套编制符号对应表(表 1)，系统梳理致灾因素的层级关联。

本研究构建的事故树模型，隐含遵循焦化生产实际致灾逻辑设定逻辑门，所有逻辑关系均通过后续最小割集求解结果验证：原料煤特性不达标(M3)、安全管控体系失效(M2)任一环节异常即可引发对应层级风险，为或门逻辑；工艺耦合致压异常(M4)需挥发物传质特性异常(M5)与塑性体渗透性异常(M6)同时发生才可引发，为与门逻辑，该设定贴合“工艺端多因素耦合致灾、原料/管控端单一因素即可致灾”的工业实际工况。模型覆盖原料、工艺、管控三大核心维度，系统梳理出原料煤特性、挥发物传质特性、塑性体渗透性、安全管控体系四大类共 17 项基本致灾事件，清晰厘清了各致灾因素的层级关联与耦合作用逻辑，为后续风险的定性与定量分析奠定了完整的模型基础[10]。

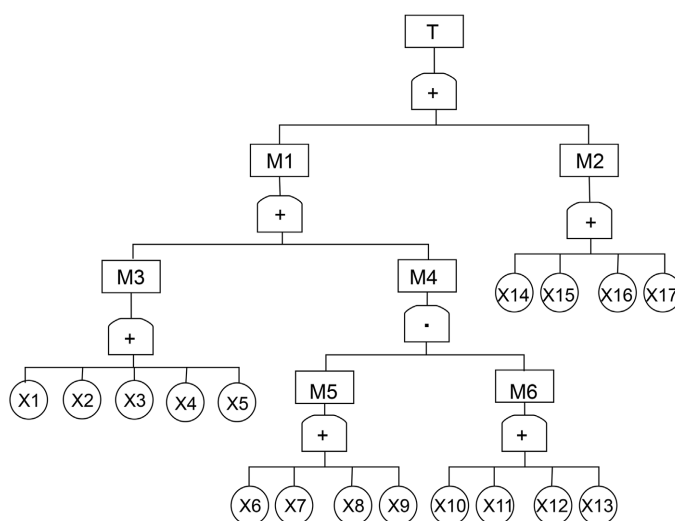


Figure 1. The accident tree caused by the expansion pressure in coking production

图 1. 焦化生产膨胀压力致灾事故树

Table 1. Parameters of disaster tree accidents caused by expansion pressure in coking production
表 1. 焦化生产膨胀压力致灾事故树事件参数表

符号	代表的事件	实测发生概率	符号	代表的事件	实测发生概率
T	膨胀压力异常引发安全事故	-	M1	膨胀压力超标	-
M2	安全管控体系失效	-	M3	原料煤特性不达标	-
M4	工艺耦合致压异常	-	M5	挥发物传质特性异常	-
M6	塑性体渗透性异常	-	X1	煤种变质程度偏离设计值	0.08
X2	黏结指数(G 值)超出安全阈值	0.12	X3	胶质层厚度(Y 值)异常	0.09
X4	工业分析中灰分(Ad)超标	0.10	X5	元素分析中 C/H 比失衡	0.07
X6	挥发物释放总量超标	0.32	X7	挥发物释放速率过快	0.28
X8	挥发物最大释放温度(Tmax)偏移	0.25	X9	挥发物释放温区宽度过大	0.23
X10	低透气性区间起始温度过低	0.29	X11	最低透气温度异常	0.21
X12	低透气性平台温区过长	0.24	X13	塑性体结构致密化	0.30
X14	压力监测系统失灵	0.15	X15	煤样预处理不规范	0.06
X16	应急泄压装置失效	0.13	X17	操作人员违规操作	0.20

注：实测发生概率综合高炜[10]的焦化行业 2008~2012 年事故统计数据、李刚[8]的 2020~2024 年焦化企业调研数据及符海朝等[11]的工业模拟实测数据测算得出，为行业及企业实测均值。

本研究构建的事故树模型，以“膨胀压力异常引发焦化生产安全事故”为顶上事件，覆盖原料、工艺、管控三大核心维度，系统梳理出原料煤特性、挥发物传质特性、塑性体渗透性、安全管控体系四大类共 17 项基本致灾事件，清晰厘清了各致灾因素的层级关联与耦合作用逻辑，为后续风险的定性定量分析奠定了完整的模型基础[10]。

4. 焦化生产膨胀压力致灾事故树分析

4.1. 事故树定性分析

事故树定性分析的任务是求出事故树的全部最小割集。最小割集是顶事件发生所必需的最低限度的割集，一个最小割集中的基本事件都发生顶上事件才会发生。如果事故树中与门较多，最小割集就少，说明系统较安全；如果事故树中或门较多，最小割集就多，说明系统较危险。通过对最小割集的分析，可以找出系统事故树定性分析[3]的任务是求出事故树的全部最小割集。最小割集是顶事件发生所必需的最低限度的割集，一个最小割集中的基本事件都发生顶上事件才会发生。如果事故树中与门较多，最小割集就少，说明系统较安全；如果事故树中或门较多，最小割集就多，说明系统较危险。通过对最小割集的分析，可以找出系统的薄弱环节，提高系统的可靠性与安全性。

4.1.1. 最小割集、最小径集的求解

利用布尔代数法求得最小割集为：{X1}，{X2}，{X3}，{X4}，{X5}，{X6, X10}，{X6, X11}，{X6, X12}，{X6, X13}，{X7, X10}，{X7, X11}，{X7, X12}，{X7, X13}，{X8, X10}，{X8, X11}，{X8, X12}，{X8, X13}，{X9, X10}，{X9, X11}，{X9, X12}，{X9, X13}，{X14}，{X15}，{X16}，{X17}。

利用对偶树法求得最小径集为：{X1, X2, X3, X4, X5, X6, X7, X8, X9, X14, X15, X16, X17}, {X1, X2, X3, X4, X5, X10, X11, X12, X13, X14, X15, X16, X17}。

4.1.2. 结构重要度分析

结构重要度反映基本事件在事故树逻辑结构中的位置重要性，是顶事件发生的内在逻辑影响权重，其计算结果仅与事故树的结构相关，与基本事件的发生概率无关[10]。本文采用最小割集法开展结构重要度计算，该方法为事故树定性分析的经典方法，适用于在少事件最小割(径)集中出现频次较低，与在多事件最小割(径)集中出现频次较高的两类基本事件之间进行结构重要度比较的事故树模型。核心计算公式为：

$$I(i) = \sum_{X_i \in E_r} \frac{1}{2^{n_i-1}}$$

式中： $I(i)$ 为基本事件 i 的结构重要度系数；每个最小割集记作 E_r ($r=1,2,\dots,k$)，则基本事件记作 X_i ； n_i 为基本事件 X_i 所属最小割(径)集包含的基本事件数。

结合本文求得的 25 个最小割集(单一事件割集 9 个、双事件耦合割集 16 个)，按上述公式分步计算各基本事件的结构重要度系数：

单一事件割集($n_i=1$)：代入公式得单割集贡献值 $\frac{1}{2^{1-1}}=1.0$ ，无其他割集参与，故此类事件结构重要度系数为基础值 1.0；

双事件耦合割集($n_i=2$)：代入公式得单割集贡献值 $\frac{1}{2^{2-1}}=0.5$ ，按各事件参与的耦合割集数量累计计算总系数。

利用最小割集求取结构重要度，计算结果如下： $I[X1]=1.0$ ， $I[X2]=1.0$ ， $I[X3]=1.0$ ， $I[X4]=1.0$ ， $I[X5]=1.0$ ， $I[X6]=2.0$ ， $I[X7]=2.0$ ， $I[X8]=2.0$ ， $I[X9]=2.0$ ， $I[X10]=2.0$ ， $I[X11]=2.0$ ， $I[X12]=2.0$ ， $I[X13]=2.0$ ， $I[X14]=1.0$ ， $I[X15]=1.0$ ， $I[X16]=1.0$ ， $I[X17]=1.0$ 。

结构重要度排序： $I[X6]=I[X7]=I[X8]=I[X9]=I[X10]=I[X11]=I[X12]=I[X13]>I[X1]=I[X2]=I[X3]=I[X4]=I[X5]=I[X14]=I[X15]=I[X16]=I[X17]$ 。

根据排序的结果，可以从结构上了解各基本事件对顶上事件发生的影响程度，其中，挥发物释放总量超标、挥发物释放速率过快、挥发物最大释放温度(Tmax)偏移、挥发物释放温区宽度过大、低透气性区间起始温度过低、最低透气温度异常、低透气性平台温区过长、塑性体结构致密化等基本事件影响程度偏高；煤种变质程度偏离设计值、黏结指数(G值)超出安全阈值、胶质层厚度(Y值)异常、工业分析中灰分(Ad)超标、元素分析中 C/H 比失衡、压力监测系统失灵、煤样预处理不规范、应急泄压装置失效、操作人员违规操作等基本事件影响程度相等，均为偏低水平[12]。

4.2. 事故树定量分析

基于表 1 中 17 项基本致灾事件的实测发生概率，采用最小割集法结合容斥原理(泊松近似)计算顶上事件发生概率，通过偏导求解各基本事件的概率重要度系数，定量分析各因素对膨胀压力异常引发安全事故的影响程度[13]。

4.2.1. 顶上事件发生概率计算

顶上事件发生概率计算公式(割集法，泊松近似)：

$$P(T) = 1 - \exp\left(-\sum_{r=1}^k \prod_{X_i \in E_r} q_i\right)$$

式中： k 为最小割集总数， E_r 为第 r 个最小割集， q_i 为基本事件 X_i 的实测发生概率。

将 25 个最小割集(9 个单一事件割集、16 个双事件耦合割集)的概率代入计算：

(1) 所有最小割集的概率和： $\sum_{r=1}^{25} \prod_{X_i \in E_r} q_i = 2.1232$ ；

(2) 顶上事件发生概率： $P(T) = 1 - \exp(-2.1232) = 0.8804$ 。

计算结果表明，焦化生产中因膨胀压力异常引发安全事故的实测概率为 88.04%，属于高概率风险事件，需针对性采取强管控措施降低事故发生概率[14]。

4.2.2. 概率重要度系数计算

概率重要度系数反映基本事件发生概率的微小变化对顶上事件发生概率的影响程度，计算公式：

$$I_g(i) = \frac{\partial P(T)}{\partial q_i}$$

结合泊松近似推导得工程简化公式：

$$I_g(i) = \exp\left(-\sum_{r=1}^k \prod_{X_i \in E_r} q_i\right) \cdot \frac{\partial\left(\sum_{r=1}^k \prod_{X_i \in E_r} q_i\right)}{\partial q_i}$$

通过求解各基本事件的偏导数，得到概率重要度系数及排序(降序)：

(1) $I_g(X10) = I_g(X11) = I_g(X12) = I_g(X13) = 0.1292$ (低透气性区间参数异常类)；

(2) $I_g(X6) = I_g(X7) = I_g(X8) = I_g(X9) = 0.1244$ (挥发物传质特性异常类)；

(3) $I_g(X1) = I_g(X2) = I_g(X3) = I_g(X4) = I_g(X5) = I_g(X14) = I_g(X15) = I_g(X16) = I_g(X17) = 0.1196$ (原料煤特性不达标、安全管控体系失效类)。

4.2.3. 定量分析结论

(1) 概率重要度第一层级为塑性体渗透性异常(X10~X13)，该类因素的概率变化对顶上事件影响最大，是防控的核心关键节点；

(2) 概率重要度第二层级为挥发物传质特性异常(X6~X9)，属于次关键风险点，需配合核心节点开展协同管控；

(3) 原料煤特性不达标(X1~X5)与安全管控体系失效(X14~X17)为第三层级，虽影响程度略低，但因属于单一事件割集(单独发生即可引发风险)，仍需严格管控。

定量分析结果与 4.1 结构重要度分析结论一致，进一步验证了挥发物释放异常、塑性体渗透性异常是焦化生产膨胀压力致灾的核心风险，为后续精细化防控措施制定提供了定量依据[15]。

5. 基于实验数据的精细化防控措施

结合事故树定性与定量分析结论及焦化生产实际工况，以配煤优化为核心，以工艺稳控与管控保障为支撑，构建“源头消减 - 过程稳控 - 末端兜底”的全链条防控体系，具体措施如下：

(1) 源头消减：优化配煤方案，精准匹配挥发分释放与塑性体透气性

将配合煤挥发分严格控制在 28% 以下，通过低、中、高挥发分煤种的优势互补，实现黏结指数、胶质层厚度等关键指标的动态平衡，从原料端精准调控挥发物释放规律与塑性体渗透性的匹配度[16]；常态化开展原料煤工业分析与元素分析，严控灰分超标、C/H 比失衡等异常指标，对高水分原料煤实施预干燥预处理，从源头上消除膨胀压力异常的致灾因子[17]。

(2) 过程稳控：稳定焦炉加热制度，简化工艺调控逻辑

基于焦炉加热制度相对稳定的生产实际，重点维持炭化室温度场的均匀性与稳定性，避免温区大幅

波动引发挥发物释放紊乱[15]; 依托配煤优化成果, 降低对复杂工艺参数的依赖, 确保膨胀压力始终处于安全阈值范围内[11]。

(3) 末端兜底: 升级设备防护与风险管控体系

在炭化室关键部位增设高精度压力监测点, 构建实时预警系统, 确保应急泄压装置定期校验与维护到位[7]; 开展从业人员核心风险管控专项培训, 将 X6~X13 核心风险点纳入重大危险源清单, 实施“闭环排查-整改-复核”机制, 有效规避人为操作失误与设备故障引发的次生风险[14]。

6. 结论

本文以焦化生产中焦炉炭化室膨胀压力异常致灾问题为研究对象, 运用事故树分析法, 从原料、工艺、管控三个维度构建致灾风险模型, 系统开展了膨胀压力致灾机理解析、事故树模型构建及致灾因素的定性与定量分析。

研究明确了塑性体渗透性异常、挥发物传质特性异常为焦化生产膨胀压力致灾的核心风险点, 定量测算得出膨胀压力异常引发安全事故的概率为 88.04%, 厘清了各致灾因素的结构重要度与概率重要度层级关系, 验证了工艺端多因素耦合致灾、原料与管控端单因素独立致灾的内在逻辑。

基于研究结果, 以配煤优化为核心, 构建了源头消减-过程稳控-末端兜底的全链条精细化防控体系, 实现了致灾关键节点与防控措施精准匹配。本研究弥补了焦化生产膨胀压力系统风险量化分析的研究空白, 为焦化行业膨胀压力风险的精准管控与安全事故防控提供了理论支撑和实践路径, 对推动焦化行业安全管理标准化、防控措施精细化发展具有重要的工程应用价值。

基金项目

山西省高等学校大学生创新训练计划项目“焦化安全生产视角下挥发物传质与炼焦煤塑性体渗透性关联研究”(20250913); 山西省高等学校教学改革创新项目“VR+ 产教融合安全与应急卓越工程师培养可持续模式构建与实践研究”(J20250153)。

参考文献

- [1] 徐吉福, 周梦远. 浅析煤焦化生产过程中存在的危险、危害因素[J]. 中小企业管理与科技, 2011, 20(10): 120.
- [2] 崔贝贝, 王美君, 常丽萍, 等. 炼焦煤成焦机理再认识, “衍构成焦机理”的提出[J]. 煤炭学报, 2024, 49(6): 2826-2839.
- [3] 唐颖, 吴晓丹, 孙景耀, 等. 黏结性富油煤热解油气析出规律及物性演变特征[J]. 洁净煤技术, 2024, 30(1): 58-65.
- [4] 苗国鹏, 杨伯威, 邓韶博, 等. 炼焦煤成焦过程中塑性层透气性和膨胀性演变的研究[J]. 洁净煤技术, 2025, 31(S2): 420-428.
- [5] 周延明. 炼焦煤热重分析与黏结指数的关系研究[J]. 燃料与化工, 2025, 56(3): 11-14+29.
- [6] 郭江, 王美君, 申岩峰, 等. 煤热解挥发物对炼焦煤塑性体渗透性的调控研究[J]. 燃料化学学报, 2022, 50(6): 724-734.
- [7] 任贺涛, 庞亮, 白宗庆, 等. 不同变质程度炼焦煤胶质体结构的演化及其与焦炭热强度的关系[J]. 燃料化学学报(中英文), 2025, 53(6): 848-862.
- [8] 李刚. 煤焦化企业的生产安全管理问题及解决措施[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2025, 45(10): 78-80.
- [9] 崔贝贝. 基于煤分子结构转变及其过程调控的炼焦煤成焦机理研究与应用[D]: [博士学位论文]. 太原: 太原理工大学, 2024.
- [10] 高炜. 焦炉火灾爆炸的事故树分析[J]. 德州学院学报, 2013, 29(2): 72-74.
- [11] 符海朝, 杨暖暖, 周慧敏, 等. 施加压力对炼焦煤膨胀压力及半焦结构影响研究[J]. 煤炭技术, 2024, 43(2): 262-265.

- [12] 宋孔儒. 焦化生产单元安全评价方法应用研究[D]: [硕士学位论文]. 秦皇岛: 华北理工大学, 2017.
- [13] 吴衍翠, 宋文华, 谢飞, 等. 危险度评价法与蒙德法在焦化装置中的对比应用研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2011, 7(12): 112-117.
- [14] 智红梅. 炼焦煤煤质及黏结性、结焦性指标相关性分析[J]. 煤炭加工与综合利用, 2025, 43(6): 66-70.
- [15] 周志威. 焦炉炉温和升降速率控制对焦炭质量的影响研究[J]. 粘接, 2025, 52(12): 154-157
- [16] 李沁兰, 晏燕, 王晨晖, 等. 捣固焦炉难推焦的研究与治理[J]. 燃料与化工, 2025, 56(3): 33-36+41.
- [17] 罗刚. 捣固焦炉焦炭质量稳定提升及提高效益的探索[J]. 新疆钢铁, 2025, 31(4): 40-41.