Mine Engineering 矿山工程, 2026, 14(6), 1459-1465
Published Online November 2026 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/me
https://doi.org/10.12677/me.2026.146145

Hans汉斯

氧化作用对煤样溶蚀率及工业分析特性的影响研究

何成志，陆　伟

安徽理工大学安全科学与工程学院，安徽 淮南

收稿日期：2026年8月28日；录用日期：2026年10月1日；发布日期：2026年11月4日

摘　要

探究氧化作用对煤样的溶蚀效果及其工业分析特性的影响规律，为筛选高效煤储层氧化改性剂及理解氧化溶蚀机理提供实验依据。选取无烟煤、焦煤和长焰煤三种不同变质程度的煤样，分别采用双氧水(H_2O_2)、过硫酸铵(APS)和次氯酸钠(NaClO)三种氧化剂在3%、5%、7%、9%四种质量浓度下进行溶蚀实验，测定溶蚀率变化；并基于优选氧化剂(9%浓度)处理后的煤样，系统分析其水分、灰分、挥发分和固定碳含量的变化规律。研究表明：① H_2O_2对三种煤样的溶蚀率均低于3%，与清水对照组无明显差异，不具备有效溶蚀能力；APS和NaClO在9%浓度下表现出显著溶蚀效果。② APS对焦煤和长焰煤的溶蚀效果优于NaClO，溶蚀率分别达9.63%和12.44%；对无烟煤二者效果相近(5.41% vs 6.03%)。③ 氧化处理后煤样工业分析呈现规律性变化：水分含量普遍升高(增幅0.31%~4.83%)；灰分呈下降趋势(降幅0.86%~2.25%)；挥发分变化与煤阶密切相关，中低阶煤(焦煤、长焰煤)挥发分升高，高阶煤(无烟煤)挥发分波动较小；固定碳含量整体降低。过硫酸铵是更具普适性的煤储层氧化改性剂，尤其适用于中低变质程度煤层；氧化溶蚀主要作用于煤中有机质组分，同时伴随部分矿物的溶蚀迁出；氧化改性效果受煤阶与氧化剂类型的协同控制，研究结果可为煤层气增产的氧化预处理工艺优化提供理论指导。

关键词

煤样，氧化作用，溶蚀率，工业分析，煤阶，过硫酸铵

Study on Influence of Oxidation on Dissolution Rate and Proximate Analysis Characteristics of Coal Samples

Chengzhi He, Wei Lu

School of Safety Science and Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui

Received: August 28, 2026; accepted: October 1, 2026; published: November 4, 2026

文章引用: 何成志, 陆伟. 氧化作用对煤样溶蚀率及工业分析特性的影响研究[J]. 矿山工程, 2026, 14(6): 1459-1465.
DOI: 10.12677/me.2026.146145

Abstract

This study explores the influence of oxidation on the dissolution effect of coal samples and their proximate analysis characteristics, so as to provide experimental basis for screening efficient oxidation modifiers for coal reservoirs and understanding the oxidation dissolution mechanism. Anthracite, coking coal and long flame coal with different metamorphic degrees were selected, and the corrosion experiments were carried out by using hydrogen peroxide (H_2O_2), ammonium persulfate (APS) and sodium hypochlorite (NaClO) at four mass concentrations of 3%, 5%, 7% and 9%, respectively, to determine the change of corrosion rate. Based on the coal samples treated by the optimal oxidant (9% concentration), the variation of moisture, ash, volatile matter and fixed carbon content were systematically analyzed. The results show that: ① The dissolution rate of three kinds of coal samples by H_2O_2 is less than 3%, which has no significant difference with the control group of water, and has no effective dissolution ability; APS and NaClO show significant dissolution effect at the concentration of 9%. ② The dissolution efficiency of APS on coking coal and long flame coal is better than that of NaClO, the dissolution rates are 9.63% and 12.44% respectively, and the dissolution efficiency of APS on anthracite is similar (5.41% vs 6.03%). (3) The proximate analysis of coal samples after oxidation treatment showed regular changes: the moisture content generally increased (by 0.31%~4.83%); the ash content showed a downward trend (by 0.86%~2.25%); the change of volatile matter was closely related to the coal rank, the volatile matter of middle and low rank coal (coking coal, long flame coal) increased, and the volatile matter of high rank coal (anthracite) fluctuated slightly; the fixed carbon content is reduced as a whole. Ammonium persulfate is a more universal oxidation modifier for coal reservoirs, especially suitable for coal seams with medium and low metamorphic grade. Oxidation and dissolution mainly act on the organic components in coal, accompanied by the dissolution and migration of some minerals. The effect of oxidation modification is controlled by the synergy of coal rank and oxidant type. The results can provide theoretical guidance for the optimization of oxidation pretreatment process for CBM stimulation.

Keywords

Coal Sample, Oxidation, Dissolution Rate, Proximate Analysis, Coal Rank, Ammonium Persulfate

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. 绪论

煤层气作为一种重要的非常规天然气资源[1]，其高效开发对优化能源结构、缓解天然气供需矛盾具有重要意义。我国煤层气资源储量丰富，但大部分煤层具有低孔、低渗的特征，严重制约了煤层气的产能释放。如何有效提高煤储层的渗透率[2]，一直是煤层气开发领域的研究热点与难点。

近年来，化学增透技术[3]因其作用范围广、改性效果显著而受到广泛关注。其中，氧化改性技术[4]通过氧化剂对煤基质的溶蚀作用，疏通和扩增煤中的原生割理与微裂隙网络，从而实现渗透率的有效提升。该技术的关键在于筛选出对煤基质具备强效氧化溶解能力、且反应生成物以水溶性液相为主的理想氧化剂，以避免不溶性固体颗粒堵塞渗流通道，诱发渗透率劣化。

目前，国内外学者对煤的氧化改性开展了大量研究[5]。在氧化剂选择方面，双氧水、过硫酸盐、次氯酸盐等是常见的氧化体系。已有研究表明[6]，不同氧化剂对煤的氧化效果存在显著差异，其作用机理

涉及自由基生成效率、氧化还原电位、反应路径等多个方面。

在氧化效果评价方面，现有研究多聚焦于溶蚀率的测定[7]，即通过质量损失来量化氧化剂的溶蚀能力。然而，质量损失仅反映了总体的物质损耗，无法揭示损耗的微观组分来源——是源于有机质的氧化分解，还是矿物组分的溶蚀迁出。这一问题的澄清对于理解氧化改性机理至关重要。

工业分析作为煤质特性评价的基础手段[8]，能够系统揭示煤中水分、灰分、挥发分和固定碳的含量变化。将工业分析与溶蚀率测定相结合，有望从组分层面阐明氧化作用的物质来源，辨识对氧化作用更为敏感的煤样类型，从而推动氧化剂与目标煤样的精准匹配。

基于上述分析，本研究选取无烟煤、焦煤和长焰煤三种不同变质程度的煤样，采用双氧水、过硫酸铵和次氯酸钠三种氧化剂，系统开展以下研究：

(1) 通过煤粉溶蚀实验[9]，测定不同氧化剂种类及浓度下的溶蚀率，筛选高效氧化剂；

(2) 对优选氧化剂处理前后的煤样进行工业分析，揭示氧化作用对水分、灰分、挥发分和固定碳含量的影响规律；

(3) 结合溶蚀率与工业分析数据，探讨氧化溶蚀的组分来源及煤阶对氧化效果的制约机制，为氧化改性技术的优化提供理论依据。

2. 实验设计

2.1. 煤样采集与制备

实验选取了三种具有代表性的煤样[10]，分别为无烟煤、焦煤以及长焰煤，涵盖高、中、低三种变质程度。所有煤样均取自井下约 700 m 的煤层，该深度属于典型的高瓦斯煤层赋存条件。三种煤样的基本工业分析参数如表 1 所示。

Table 1. Basic parameters of coal samples
表 1. 煤样基本参数

煤种	水分/%	灰分/%	挥发分/%	固定碳/%
无烟煤	0.96	8.68	9.41	80.95
焦煤	2.73	7.25	23.35	66.67
长焰煤	2.57	6.39	37.21	53.83

为最大限度减少样品自身非均质性对实验结果的影响，针对每一种煤，均从同一煤块上制取样品。样品制备过程遵循标准方法：首先将煤块经机械破碎后研磨，并使用标准分样筛筛分，截取 60~80 目(粒径介于 180 μm 至 250 μm 之间)的煤粉颗粒用于实验。随后，将筛分好的煤粉置于 105℃的恒温干燥箱中干燥至恒重(判定标准为连续两次称量质量差不超过 0.001 g)。干燥后的样品立即置于干燥器中密封保存，以备后续实验使用。

2.2. 氧化剂筛选原则

基于环境友好性原则，实验初步筛选了三种氧化剂：双氧水(H_2O_2)、过硫酸铵(APS)及次氯酸钠(NaClO)。此类氧化法的核心机理在于，通过氧化剂对煤基质中有机质成分的高效溶蚀，从而疏通和扩增煤中的原生割理与微裂隙网络，最终实现渗透率的有效提升。为确保技术可行性并降低储层伤害风险，理想的氧化剂需满足以下关键条件：其一，对煤基质具备强效的氧化溶解能力；其二，反应生成物应以水溶性液相为主，便于在后续排采过程中随流体顺利排出裂隙系统；反之，若生成不溶性固体颗粒或沉淀，则易滞留并堵塞已扩宽的渗流通道，诱发渗透率劣化的潜在风险。

2.3. 溶蚀率测定方法

为定量评价不同氧化剂的溶蚀效能，设计了煤粉溶蚀实验。具体步骤如下：称取约 2 g 煤粉样品，与 100 mL 不同质量浓度(3%、5%、7%、9%)的氧化剂溶液置于恒温反应装置中，在持续搅拌条件下充分反应 24 h，以确保反应完全。反应结束后，使用孔径为 8 μm 的微孔滤膜对混合液进行真空抽滤，分离固液相。收集到的固体残渣使用去离子水反复洗涤，直至滤液呈中性，以彻底去除残留的氧化剂及可溶性离子。随后，将洗涤后的煤样置于烘箱中，在 105℃下干燥至恒重。最终，通过精确测定氧化前后煤粉的质量损失，计算溶蚀率，以此作为评估氧化剂溶蚀能力与效率的核心量化指标。为消除煤样内部水分波动对测定结果的干扰，本文中所有涉及数据分析的环节(包括反应前后的质量称重与后续溶蚀率、工业分析指标计算)均统一采用干燥基作为统一的质量基准。

$$\eta = \frac{M_1 + M_2 - M_3}{M_1} \times 100\% \tag{2-1}$$

其中 M_1 为反应前煤样质量，g； M_2 为滤纸质量，g； M_3 为反应后煤样和滤纸质量，g。

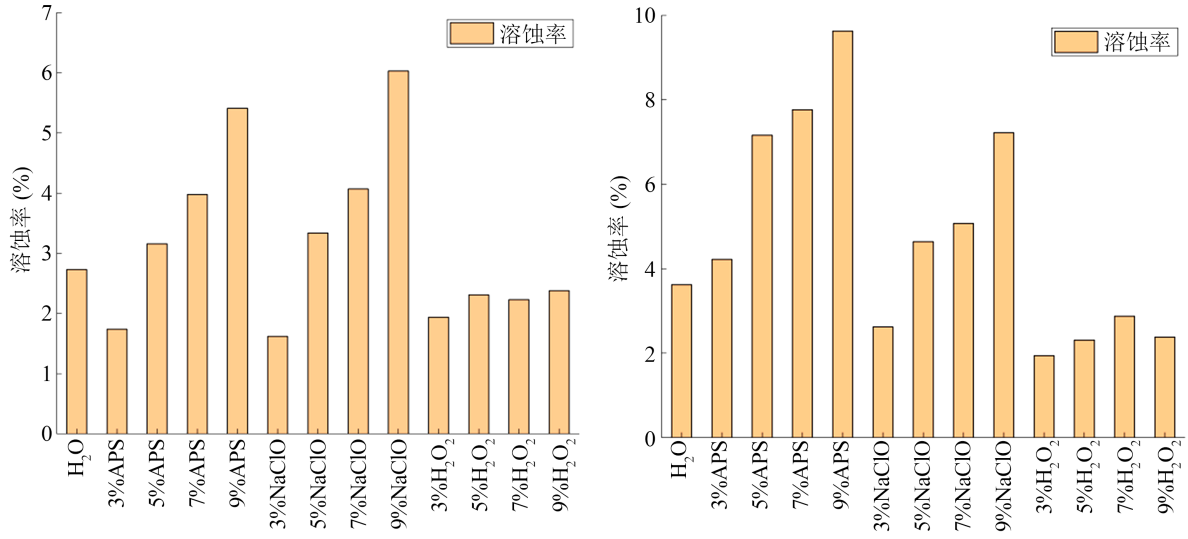
2.4. 工业分析方法

煤样氧化溶蚀实验所获得的质量变化数据，表征了改性过程的总体物质损耗。为阐明该损耗的微观组分来源及其所反映的煤体物性演变规律，本研究进一步对氧化前后煤样进行了系统的工业分析，测定水分、灰分、挥发分及固定碳含量。这一分析能够有效区分质量损失是归因于有机质的氧化分解，还是矿物组分的溶蚀迁出。实验中，所有煤样的工业分析均依据国家标准 GB/T 212-2008，采用 5E-MAG6600 型工业分析仪(长沙开元仪器股份有限公司)完成。

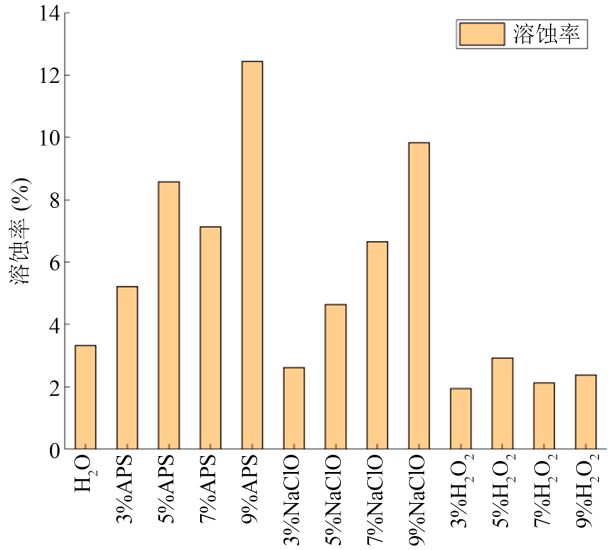
3. 结果与分析

3.1. 氧化剂溶蚀效能评价

基于图 1 所示的无烟煤、焦煤及长焰煤在多种氧化剂中的溶蚀行为比较，本研究识别出过硫酸铵与次氯酸钠在 9%质量浓度下具有显著的溶蚀促进作用。相比之下，过氧化氢在所有浓度条件下均未呈现有效溶蚀能力，其溶蚀率始终低于 3%，与清水对照组的结果无明显区别。



(a) 无烟煤　　(b) 焦煤



(c) 长焰煤

Figure 1. Bar chart of mass change of coal samples before and after oxidation
图 1. 煤样氧化前后质量变化柱状图

进一步对比上述两种高效氧化剂发现，其对不同煤阶煤样的作用效果存在分化：

无烟煤体系：9%过硫酸铵与 9%次氯酸钠的溶蚀率分别为 5.41%和 6.03%，二者数值接近，溶蚀效率相当。

焦煤体系：9%过硫酸铵的溶蚀率为 9.63%，显著高于 9%次氯酸钠的 7.22%。

长焰煤体系：9%过硫酸铵的溶蚀率达 12.44%，而相同浓度的次氯酸钠仅为 9.83%。

该结果表明，过硫酸铵在针对中低变质程度煤样的溶蚀反应体系中具备更广泛的适用性，其背后机制或与氧化剂在不同煤结构中的自由基生成效率及反应路径差异有关。中低阶煤含有较多的脂肪族结构和含氧官能团，更易受到过硫酸铵分解产生的硫酸根自由基($SO_4^{\cdot-}$)的攻击，从而实现高效溶蚀。

3.2. 氧化处理后煤样工业分析

优选 9%浓度氧化剂处理后的煤样进行工业分析，结果见表 2。

Table 2. Proximate analysis results of coal samples after oxidation treatment
表 2. 氧化处理后煤样工业分析结果

煤种	氧化剂种类	水分/%	灰分/%	挥发分/%	固定碳/%
无烟煤	H_2O_2	1.98	7.24	12.19	78.59
	APS	2.52	6.98	12.97	77.53
	NaClO	2.27	7.82	11.63	78.28
焦煤	H_2O_2	4.75	6.12	26.79	62.34
	APS	5.24	5.85	28.3	60.61
	NaClO	4.99	6.93	26.68	61.40
长焰煤	H_2O_2	6.08	4.14	44.61	45.17
	APS	6.56	4.33	45.93	43.18
	NaClO	7.40	6.64	41.35	44.61

3.3. 氧化作用对工业分析特性的影响规律

3.3.1. 水分变化

对比表 1 与表 2 数据可知，经氧化处理后，各煤样的水分含量均呈现升高趋势。无烟煤水分从 0.96%升至 1.98%~2.52%；焦煤从 2.73%升至 4.75%~5.24%；长焰煤从 2.57%升至 6.08%~7.40%。水分升高的原因可能包括：① 氧化作用增加了煤表面的含氧官能团(如羟基、羧基)，提高了煤的亲水性；② 氧化溶蚀产生了更多的孔隙空间，增强了煤的持水能力；③ 部分氧化产物(如无机盐)的吸湿性贡献。

3.3.2. 灰分变化

氧化处理后煤样的灰分整体呈下降趋势。无烟煤灰分从 8.68%降至 6.98%~7.82%；焦煤从 7.25%降至 5.85%~6.93%；长焰煤从 6.39%降至 4.14%~6.64%。灰分的降低表明氧化过程中伴随有部分矿物质的溶蚀迁出，这与溶蚀率结果相互印证。值得注意的是，长焰煤经 NaClO 处理后灰分(6.64%)高于原煤(6.39%)，可能是由于 NaClO 与煤中某些组分反应生成了不溶性沉淀物，导致残留灰分升高。

3.3.3. 挥发分变化

挥发分的变化规律与煤阶密切相关：

无烟煤：挥发分从 9.41%升至 11.63%~12.97%，升幅较为有限。作为高阶煤，无烟煤结构高度芳构化，化学性质稳定，氧化作用主要发生在边缘官能团，对主体结构影响较小。

焦煤：挥发分从 23.35%升至 26.68%~28.30%，升幅显著。表明氧化作用使煤中部分大分子结构断裂，生成了更多的小分子挥发性组分。

长焰煤：挥发分从 37.21%升至 41.35%~45.93%，其中 APS 处理后达 45.93%。长焰煤作为低阶煤，含有丰富的脂肪族结构和含氧官能团，对氧化作用极为敏感，氧化降解程度最高。

3.3.4. 固定碳变化

氧化处理后，各煤样的固定碳含量均有所降低。无烟煤固定碳从 80.95%降至 77.53%~78.59%；焦煤从 66.67%降至 60.61%~62.34%；长焰煤从 53.83%降至 43.18%~45.17%。固定碳的降低直接反映了煤中有机质的氧化分解损失，且损失程度与溶蚀率变化趋势一致：长焰煤(溶蚀率最高)的固定碳降幅最大，无烟煤(溶蚀率最低)的固定碳降幅最小。

3.4. 溶蚀率与工业分析特性的关联分析

综合溶蚀率与工业分析数据，可以得出以下关联规律：

(1) 溶蚀率与固定碳降幅呈正相关。过硫酸铵处理下，长焰煤溶蚀率最高(12.44%)，其固定碳降幅也最大(10.65 个百分点)；焦煤次之(溶蚀率 9.63%，固定碳降幅 6.06 个百分点)；无烟煤最小(溶蚀率 5.41%，固定碳降幅 3.42 个百分点)。这证实了溶蚀损失主要来源于有机质的氧化分解。

(2) 挥发分变化可作为氧化敏感性的指示指标。氧化后挥发分升高幅度：长焰煤(4.74~8.72 个百分点) > 焦煤(3.33~4.95 个百分点) > 无烟煤(2.22~3.56 个百分点)，与溶蚀率排序完全一致。这表明挥发分变化能够有效反映煤对氧化作用的敏感性，可作为筛选目标煤层的参考指标。

(3) 灰分变化揭示矿物溶蚀贡献。APS 处理下，无烟煤灰分降幅 1.70 个百分点，焦煤 1.40 个百分点，长焰煤 2.06 个百分点，表明矿物溶蚀也是质量损失的来源之一，但其贡献小于有机质氧化。

3.5. 结论适用范围及局限性讨论

虽然本研究系统揭示了氧化作用对不同煤阶煤样溶蚀率及工业分析特性的影响规律，但相关结论的适用范围需作更加审慎的界定。煤炭作为一种高度非均质性的复杂地质体，其微观结构和物质组成差异

巨大。为进一步验证上述氧化改性规律及过硫酸铵优越性的普适性，后续研究中必须增加更多不同产地、不同微观煤岩组分(如不同镜质组与惰质组配比)的同煤阶煤样进行大量平行实验与交叉对比。

此外，必须明确指出，由实验室煤粉实验外推至现场实际应用时存在显著的物理与工程局限性。本研究的溶蚀实验采用了 60~80 目的细小煤粉颗粒，并在持续搅拌的理想条件下进行，极大地增加了煤基质与氧化剂的固液接触面积和传质效率。然而，在真实的地下煤储层原位条件下，其条件远比实验情况复杂。因此，现场应用中的实际溶蚀效率及增透效果可能远低于实验室的理想状态，上述实验结论在指导现场实际煤层气氧化增产工艺时，还需结合原位岩心流体驱替实验及大尺度储层数值模拟进行综合评估与参数修正。

4. 结论

(1) 氧化剂类型对煤样溶蚀效果具有显著影响。双氧水(H_2O_2)对三种煤样的溶蚀率均低于 3%，不具备有效溶蚀能力；过硫酸铵(APS)和次氯酸钠(NaClO)在 9%质量浓度下表现出显著溶蚀效果，其中过硫酸铵对中低阶煤(焦煤、长焰煤)的溶蚀效果优于次氯酸钠，溶蚀率分别达 9.63%和 12.44%。

(2) 氧化作用显著改变煤样的工业分析特性：水分含量普遍升高(增幅 0.31%~4.83%)；灰分整体呈下降趋势(降幅 0.86%~2.25%)；挥发分变化与煤阶密切相关，中低阶煤挥发分升高幅度大于高阶煤；固定碳含量整体降低。

(3) 溶蚀损失主要来源于煤中有机质的氧化分解，表现为固定碳含量的降低和挥发分含量的升高；同时伴随部分矿物的溶蚀迁出，表现为灰分的下降。挥发分变化幅度可作为评价煤对氧化作用敏感性的有效指标。

(4) 煤阶对氧化改性效果具有显著制约作用。低阶煤(长焰煤)对氧化作用最为敏感，溶蚀率最高，工业分析变化最显著；中阶煤(焦煤)次之；高阶煤(无烟煤)化学性质稳定，氧化改性效果有限。

(5) 综合考量溶蚀效能与工业分析响应，过硫酸铵是更具普适性的煤储层氧化改性剂，尤其适用于中低变质程度煤层的增透改造。研究成果可为煤层气开发的氧化预处理工艺优化提供理论依据与数据支撑。

参考文献

[1] 王恩元, 张国锐, 张超林, 等. 我国煤与瓦斯突出防治理论技术研究进展与展望[J]. 煤炭学报, 2022, 47(1): 297-322.

[2] 袁亮, 林柏泉, 杨威. 我国煤矿水力化技术瓦斯治理研究进展及发展方向[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(1): 45-49.

[3] 孙明闯, 白新华. 煤储层水力压裂技术新进展[J]. 中国煤层气, 2013, 10(1): 31-34.

[4] 梁运培, 王庆慧, 朱拴成, 等. 深部低煤阶煤层高值化学品与天然气共采技术构想[J]. 煤炭学报, 2023, 48(1): 317-334.

[5] 马汉鹏, 陆伟, 王德明, 等. 煤自燃过程物理吸附氧的研究[J]. 煤炭科学技术, 2006(7): 26-29.

[6] 单晓梅, 朱书全, 张文辉, 等. 氧化法改性煤基活性炭和椰壳活性炭的研究[J]. 中国矿业大学学报, 2003(6): 133-137.

[7] 石军太, 范倩雯, 曹运兴, 等. 煤储层酸化氧化试剂体系优选及增产效果评价[J]. 煤炭学报, 2024, 49(4): 1989-2003.

[8] 冯杰, 李文英, 谢克昌. 傅立叶红外光谱法对煤结构的研究[J]. 中国矿业大学学报, 2002(5): 25-29.

[9] 陈绍川. 酸化煤吸附过程热稳定性及微观分形特征研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2025.

[10] 苏怀兴. 褐煤中水分存在形式的实验研究[D]: [硕士学位论文]. 鞍山: 辽宁科技大学, 2014.