

氧浓度对长焰煤氧化失重与活性基团的关联分析

曲国娜*, 苗宇欣, 贾廷贵

(内蒙古科技大学矿业与煤炭学院, 内蒙古 包头 014010)

摘要:为探究氧浓度在长焰煤氧化过程中对失重特性与关键官能团演变的耦合关联机制,以3种氧浓度为5%、10%、21% (体积分数)的氧气作为反应气,采用热重分析与原位傅里叶变换红外光谱联用技术,研究煤氧化失重过程的特征温度和官能团变化规律,基于灰色关联度分析煤氧化自燃失重量与官能团间的相关性,探讨不同氧浓度煤氧化失重过程的关键官能团。研究表明:随氧浓度降低,煤氧化各阶段的各特征温度均向高温区偏移,初始阶段的质量变化量降低81.3%左右,可见低氧浓度在初始阶段可显著抑制煤氧化反应的进行;氧化反应活化能同样受氧浓度调控;低氧条件下初始阶段活化能升高,抑制了反应启动;氧浓度未改变官能团演变顺序,而是调控其热失重中的相对重要性,5%氧浓度以C=O分解为主,10%氧浓度下依赖脂肪链与羧酸等结构氧化,21%氧浓度由芳香结构开环及残留含氧官能团深度分解主导。

关键词:氧浓度;氧化特性;热重分析;原位红外光谱;官能团演化

中图分类号:TQ413.23

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2026)S1-0113-07

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.S1.020

Study on the oxidation characteristics of long-flamed coal spontaneous combustion at different oxygen concentrations

QU Guo-na*, MIAO Yu-xin, JIA Ting-gui

(School of Mining and Coal, Inner Mongolia University of Science & Technology, Baotou 014010, China)

Abstract:To investigate the coupling mechanism between oxygen concentration and the evolution of weight loss characteristics and key functional groups during the oxidation of long-flame coal, three oxygen concentrations (5%, 10%, and 21%) were used as the reaction atmospheres. Thermogravimetric analysis coupled with in-situ Fourier transform infrared spectroscopy was employed to study the characteristic temperatures and the variation patterns of functional groups during the coal oxidation and thermal weight loss process. Based on grey relational analysis, the correlation between the spontaneous combustion weight loss and functional groups was analyzed to identify the key functional groups involved in the weight loss process under different oxygen concentrations. The results indicate that as the oxygen concentration decreases, the characteristic temperatures of each oxidation stage shift towards higher temperature zones. The mass change in the initial stage decreases by approximately 81.3%, demonstrating that low oxygen concentration can significantly inhibit the coal oxidation reaction in its early phase. The activation energy of the oxidation reaction is also regulated by oxygen concentration; under low-oxygen conditions, the activation energy in the initial stage increases, suppressing the reaction initiation. Oxygen concentration does not alter the sequence of functional group evolution but modulates their relative importance during thermal weight loss. At 5% oxygen concentration, the decomposition of C=O groups dominate; at 10%, the process relies on the oxidation of structures like aliphatic chains and carboxylic acids; while at 21%, it is governed by the ring-opening of aromatic structures and the deep decomposition of residual oxygen-containing functional groups.

Key words: oxygen concentration; oxidation characteristics; thermogravimetric analysis; in-situ infrared spectroscopy; functional group evolution

煤自燃是煤矿安全生产中的重大灾害之一,其本质是煤与氧气发生复杂的物理化学复合反应,并伴随热量的产生与积聚^[1-3]。长期处于开放式漏风环境的采空区为煤自燃提供了有氧环境,氧化反应期间不断释放热量,超过临界量后会导致煤体自燃^[4]。因此,深入揭示煤的氧化反应机制,特别是氧浓度的作用规律,是发展精准、高效煤自燃防控技

术的理论基础。

围绕煤的自燃特性及其影响机制主要聚焦于氧化气体产物、反应动力学及关键影响因素等方面^[5]。Zhao等^[6]通过依据TG曲线将煤自燃过程划分为多个阶段。文虎等^[7]利用热重法研究发现煤阶越高,特征温度越高,越难以发生氧化反应。陈锦浩等^[8]利用原位傅里叶红外光谱实验发现羟基、含

收稿日期:2025-12-11;修回日期:2026-03-01

基金项目:内蒙古自治区自然科学基金(2022LHMS05019);内蒙古自治区自然科学基金(2022LHMS05020)

作者简介:曲国娜(1980-),女,博士,讲师,硕士生导师,研究方向为矿井火灾防治理论及技术等,通讯联系人,quguona@126.com。

氧基团里的芳醚含量与温度呈负相关;羧基含量与温度呈正相关,且其含量曲线波动性较大。Zhou 等^[9]发现煤中的甲基和亚甲基随着反应进行逐渐减少。宋双林^[10]通过程序升温实验,发现风化煤对氧浓度的变化更为敏感。贾廷贵等^[11-12]研究了不同含水量以及不同变质程度对煤的自燃特性的影响,得出结果表明煤体温度上升所需的热量与煤中水分含量、变质程度与烟煤化学性质呈正相关。王建利^[13]、陈锐等^[14]发现氧浓度与氧化速率、耗氧强度、产热产气速率正相关;煤粒径通过影响吸附与反应过程,对产气、产热产生直接作用。Zhang 等^[15]、仲晓星等^[16]研究发现煤表观活化能随氧气体积分数成反比。Ren 等^[17]、Qi 等^[18]通过分析不同氧浓度下煤氧化放热量为煤低温氧化划分出不同阶段。

煤的氧化特性受氧浓度显著影响,但传统研究多采用单一技术,难以量化宏-微观指标关联。本文以典型长焰煤为研究对象,联合热重分析、傅里叶变换红外光谱、频率模型法及灰色关联度法,系统研究体积分数为 5%、10%、21% 的 3 种氧浓度下主导煤氧化热失重过程的关键官能团,从宏-微观协同视角揭示氧浓度对煤氧化特性的调控机制。研究结果对开发新型自燃阻化技术及优化煤自燃早期预警系统具有重要的应用基础支撑。

1 试验方法及装置

1.1 煤样的选取与制备

实验煤样取自内蒙古不连沟煤矿典型长焰煤工作面。取得新鲜煤样后立刻封闭完全后运至实验室。实验前将煤样已氧化的表层进行剥离,选取内层煤样破碎后筛选出粒径 0.2~0.45 mm 的实验样品。进行充氮保护后将煤样置于密闭瓶中备用。对煤样进行工业分析,结果见表 1。

表 1 实验煤样的工业分析

煤样	工业分析/%			
	水分	灰分	挥发分	固定碳
长焰煤	4.10	6.59	34.10	55.21

1.2 热重分析实验

采用 TGA 同步热分析仪对煤样测试热重曲线,实验条件:升温速率控制在 10℃/min,实验温度范围设定为常温升至 800℃,单次实验使用煤样质量为 (10±0.2) mg,气体流量为 100 mL/min,实验气氛为配制的 5%、10%、21% 的 N₂-O₂ 混合气体。

1.3 原位红外实验

实验仪器采用德国 Bruker INVENIO-S 型的傅

里叶变换红外光谱仪,测试模式选择漫反射。实验条件:升温速率为 2℃/min,温度范围为室温至 600℃,样品量为 10 mg,通入与热重实验相同的气氛,设置实验参数为光谱波束扫描范围为 600~4 000 cm⁻¹,分辨率为 4 cm⁻¹,扫描次数为 64 次。

1.4 相关性分析法

频率比模型(FR)是一种用于量化单一事件与关联因子间相关程度的量化分析工具。本文中,FR 值的定义为:特定官能团在某一时刻的特征峰强度变化占有官能团特征峰总变化量的占比,与该时刻热失重占总失重量的比例之比,并以百分比形式表征。

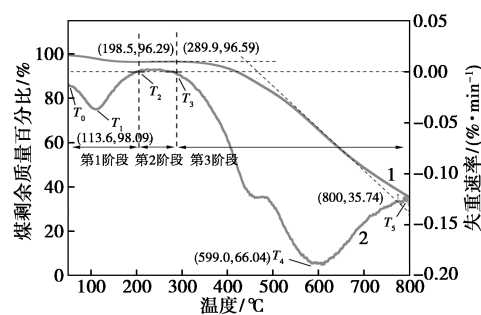
灰色关联分析依托灰色系统理论构建,是通过判别参考数列与比较数列的几何趋势相似度,实现多因素间关联紧密程度定量化的统计分析方法。本文中,选取煤氧化过程的热失重质量作为参考数列,各关键官能团的含量变化作为比较数列,开展关联度量化分析。

2 结果与讨论

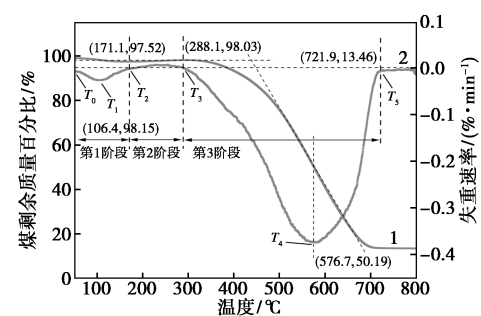
2.1 氧浓度对热失重特性影响研究

2.1.1 基于 TG-DTG 的特征温度分析与阶段划分

图 1 分别为 3 种氧浓度下煤样的 TG-DTG 曲线。根据 DTG 曲线的峰值与拐点,可将煤的氧化升温过程划分为 3 个阶段,分别为蒸发脱附阶段($T_0 \sim T_2$)、吸氧增重阶段($T_2 \sim T_3$)和燃烧阶段($T_3 \sim T_5$)。各阶段特征温度点的数值见表 2。



(a) 5% 氧浓度



(b) 10% 氧浓度

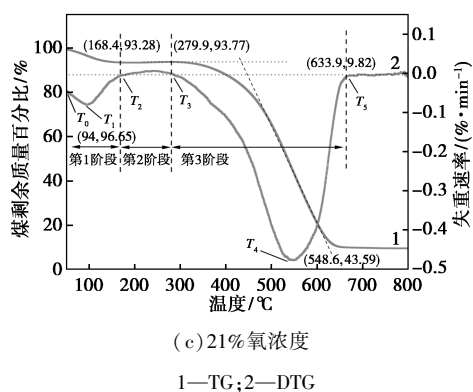


图1 不同氧浓度下煤样TG-DTG曲线

表2 不同氧浓度下煤氧化过程的特征温度

氧浓度/ %	临界 温度 T_1 / °C	干裂 温度 T_2 / °C	热解温 度点 T_3 / °C	最大失重 速率温度 T_4 / °C	燃尽 温度 T_5 / °C
5	113.6	198.5	289.9	599.0	800.0
10	106.4	171.1	288.1	576.7	721.9
21	94.0	168.4	279.9	548.6	633.9

第1阶段,煤样的质量损失主要源于煤中物理吸附水和部分结合水的蒸发。当氧气浓度为5%、10%、21%时,相同温度条件下,21%氧浓度提高了煤样表面氧分子的吸附量与反应活性位点的碰撞概率,加速煤中羟基、甲基等活性基团的氧化分解及挥发分的释放,使反应更易发生,因此,随着氧浓度升高,煤样的临界温度降低。第2阶段,煤样与氧气发生化学吸附和初步氧化反应。干馏温度随氧浓度的升高而降低,对比5%氧浓度,10%与21%氧浓度分别下降了27.4°C与30.1°C。这是由于氧浓度升高显著提升煤样孔隙对氧分子的吸附量,前期脱水阶段吸附的氧分子在后续反应中强化氧化进程,加速化学键断裂,促使干裂温度整体随氧浓度升高呈下降趋势^[19]。DTG曲线在此阶段呈现小的增重峰,其强度随氧浓度增加而增强。第3阶段,对比煤样在不同氧浓度下的着火温度与燃尽温度,发现着火温度受氧浓度的影响不大,但仍小幅降低;氧浓度升高加速了煤中挥发分与固定碳的氧化燃烧,缩短燃尽时间,使燃尽温度大幅提前,且反应彻底性提升,表现为质量变化量随氧浓度升高而增大。

从图2可知,在煤氧化第1阶段,与21%氧浓度的质量变化相比,10%和5%氧浓度下的质量变化量分别下降了81.3%、46.6%,5%氧浓度下降幅度小于10%的现象推测可能是长焰煤发达的孔隙结构使其在低氧环境下仍具备一定的氧吸附能力,5%氧

浓度下煤样表面活性位点与氧分子的吸附平衡更稳定,而10%氧浓度下可能因氧分压不足导致吸附-氧化反应协同抑制效应更显著,最终表现为质量变化下降幅度更大。氧浓度对在煤氧化第2阶段影响不明显,结合长焰煤挥发分含量高,推测热解主导的挥发分释放更剧烈,氧化反应的贡献占比低。在第3阶段,随氧浓度从5%提升至10%与21%,燃烧阶段的质量变化量提升38%左右。可见,低氧浓度可显著抑制煤氧化初始阶段的氧化反应,失重量也因挥发分与氧化产物的释放量减少呈递减趋势^[20]。

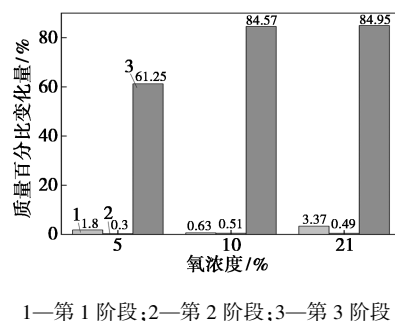


图2 不同氧浓度下煤样的质量百分比变化量

2.1.2 反应动力学分析

通过解析不同氧浓度下煤氧化的动力学行为,能够揭示其化学反应的动态演变规律。基于TG实验结果,使用Coats-Redfern法计算3种氧浓度在不同阶段的表现活化能。

由图3可知,在3种氧浓度下,第1阶段反应较弱,吸收能量少,第2、3阶段煤的复杂大分子结构裂解,生成大量高反应活性的小分子产物,需要维持链式燃烧反应所需跨越的能垒增高。与21%氧浓度相比,氧浓度为5%和10%分别降低65.29%、54.61%。这是由于低氧环境下,氧浓度的降低减少了需克服更高能垒才能参与反应的低活性官能团数量,这直接导致煤氧化时的表现活化能降低^[21]。

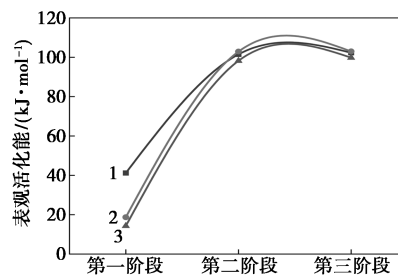
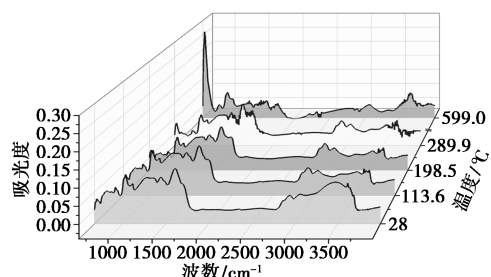


图3 不同氧浓度下各阶段活化能分布特征

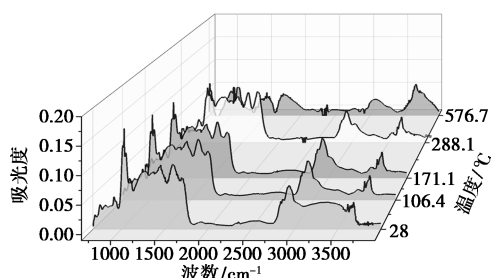
2.2 氧浓度对官能团变化规律的影响

由图4可知,3种氧浓度下煤样的官能团随温

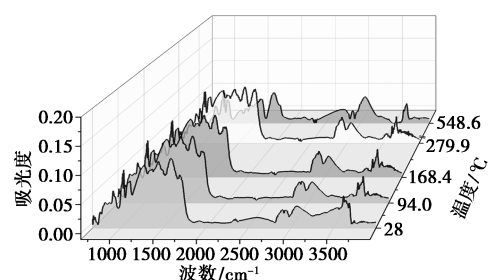
度不断演变,基于 TG-DTG 曲线划分的氧化阶段,对原位红外实验结果中特征吸收谱带依据特征温度点进行分峰拟合与积分计算,以峰面积定量表征官能团的相对含量变化。



(a) 5% 氧浓度下特征温度点红外谱图



(b) 10% 氧浓度下特征温度点红外谱图



(c) 21% 氧浓度下特征温度点红外谱图

图 4 不同氧浓度下煤样在特征温度点处红外谱图

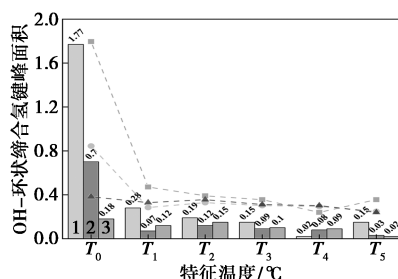
将文中研究的 3 种氧浓度下的煤样特征峰归属列于表 3。

表 3 煤样官能团归属

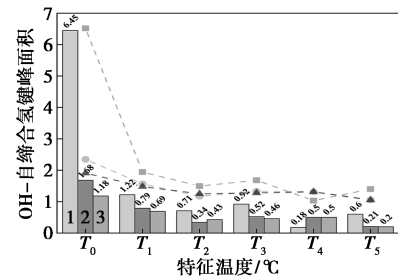
官能团类别	官能团	吸收峰位置/cm ⁻¹
羟基	OH-环状缔合氢键	3202~3231
	OH-自缔合氢键	3428~3492
脂肪烃	-CH ₂ -对称伸缩振动	2848
	-CH ₃ 对称伸缩振动	2875
含氧官能团	酚、醇、醚、酯(C-O 伸缩振动)	1188~1345
	共轭羰基伸缩振动(C=O)	1642
	不饱和羧酸中 C=O 伸缩振动	1694~1735
芳香烃	取代苯	707~870
	芳香环或稠环(C=C 伸缩振动)	1498~1597

2.2.1 羟基

图 5 为归属波数为 3 202~3 231 cm⁻¹ 的 OH-环状缔合氢键与 3 428~3 492 cm⁻¹ 的 OH-自缔合氢键的峰面积变化图^[22],随着反应的进行,两种羟基在煤自燃过程中均呈现下降趋势。OH-环状缔合氢键的变化与煤中苯环上酚羟基和脂肪烃上醇羟基的消耗有关。在 T₀~T₂ 阶段煤处于缓慢氧化放热阶段,侧链反应主导,T₁ 温度点羟基大量消耗,对应脱水后煤氧化反应启动;进入分解蓄热阶段后,反应由侧链向苯环过渡,因前期羟基已大量消耗,OH-环状缔合氢键含量基本稳定,曲线趋于平缓;而 OH-自缔合氢键的消耗与煤中水分赋存、脱除过程密切相关。T₂~T₃ 阶段结合水逐步脱除使得自缔合氢键的断裂速率显著减缓,进入缓慢下降阶段。T₃~T₅ 阶段自缔合羟基已基本消耗殆尽,曲线趋于平缓,氧浓度的影响主要集中在第 1 阶段,21% 氧浓度下的羟基基团峰面积始终低于 5% 和 10% 氧浓度,这是由于充足的氧气大幅促进了煤体表面自由基的生成与链式反应,加速了酚羟基、醇羟基以及吸附水分子中的自缔合羟基被快速氧化消耗。进入第 2、3 阶段后,热效应成为反应进程的关键因素,对羟基影响减弱。



(a) OH-环状缔合氢键峰面积



(b) OH-自缔合氢键峰面积

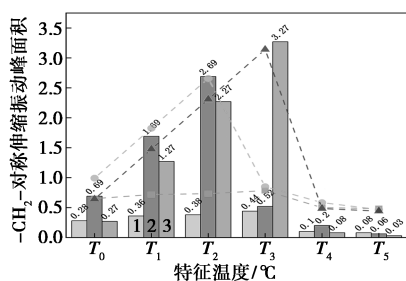
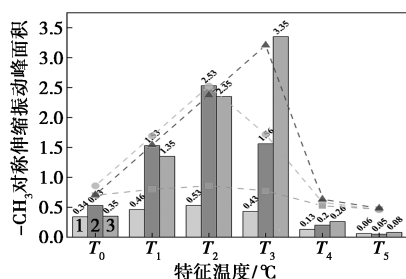
1—5% 氧浓度;2—10% 氧浓度;3—21% 氧浓度

图 5 不同氧浓度下煤样羟基基团的变化趋势

2.2.2 脂肪族结构

为避免谱带重叠干扰,选取 2 875 cm⁻¹ (甲基对称伸缩)和 2 848 cm⁻¹ (亚甲基对称伸缩)峰面积对煤中脂肪烃演变定量追踪,由图 6 可知,二者均遵循

着先增后减的规律,第1、2阶段,长链脂肪烃断裂为短链并放出 C_2H_4 、 C_2H_6 等烃类气体,脂肪烃含量阶段性增加,峰面积平缓增长。5%氧浓度下临界温度较高、反应启动慢,峰面积无明显增长;10%和21%氧浓度下,临界温度低,氧气充足促进自由基链反应, $-CH_2-$ 与 $-CH_3$ 迅速断裂积累,峰面积快速上升。第3阶段温度升高,未氧化的脂肪烃通过热分解逸散、氧化生成CO与 CO_2 两条路径,使脂肪烃含量逐步降低,峰面积急剧下降至燃尽。低氧环境下脂肪族结构含量无显著波动,仅缓慢下降,与燃尽温度大幅推迟相符,可见贫氧状态下脂肪烃的增长被抑制。

(a) $-CH_2-$ 对称伸缩振动峰面积(b) $-CH_3$ 对称伸缩振动峰面积

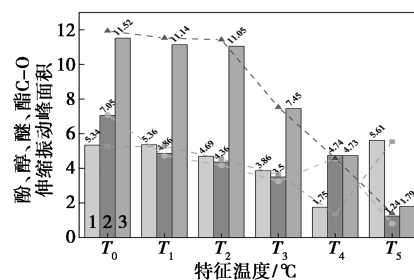
1—5%氧浓度;2—10%氧浓度;3—21%氧浓度

图6 不同氧浓度下煤样脂肪族结构的变化趋势

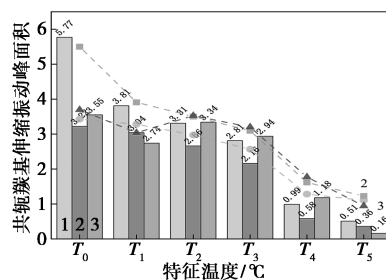
2.2.3 含氧官能团

随着温度升高, $C-O$ 、共轭 $C=O$ 、不饱和羧酸 $C=O$ 3类官能团的峰面积演变呈现出阶段性与氧浓度依赖性,均大致遵循先增长后降低的规律(图7)。第1阶段,各官能团峰面积均随温度上升,源于煤表面对氧的物理-化学吸附生产不稳定的碳氧络合物,且脂肪烃与氧反应生成大量过氧化物;其中21%氧浓度下 $C-O$ 与不饱和羧酸 $C=O$ 的生成速率显著领先,共轭 $C=O$ 生成受氧浓度影响微弱,体现了高氧浓度对初期 $C-O$ 与不饱和羧酸 $C=O$ 的生成的强促进作用。第2阶段,含氧官能团逐渐断裂转化为CO和 CO_2 ;21%氧浓度下 $C-O$ 峰面积转为下降,表明其开始消耗,共轭 $C=O$ 持续积累,不饱和羧酸 $C=O$ 则在高氧下急剧生成,揭示了含

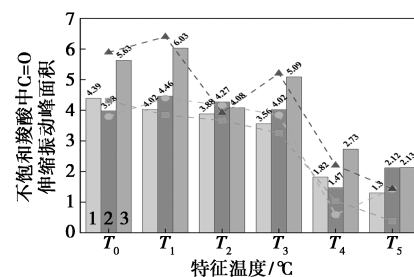
氧官能团存在明显的演化关系。第3阶段,21%氧浓度下驱动各官能团深度转化: $C-O$ 迅速消耗,共轭 $C=O$ 经历生成与消耗的动态平衡(表现为 $T_3 \sim T_4$ 增长进入平台期),随后下降;不饱和羧酸 $C=O$ 达到峰值后快速分解。低氧环境下所有进程均显著滞后。整体而言,氧浓度未改变含氧官能团的反应历程,只是高氧加速全程并引发中间产物的动态竞争,低氧则延缓反应并促进中间体积聚。这与脂肪烃的变化趋势相辅相成,清晰展示了含氧官能团与脂肪烃之间的转化。



(a) 酚、醇、醚、酯C—O 伸缩振动峰面积



(b) 共轭C=C 伸缩振动峰面积



(c) 不饱和羧酸中C=O 伸缩振动峰面积

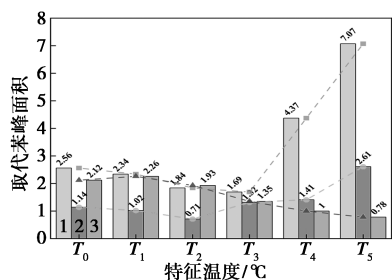
1—5%氧浓度;2—10%氧浓度;3—21%氧浓度

图7 不同氧浓度下煤样含氧官能团的变化趋势

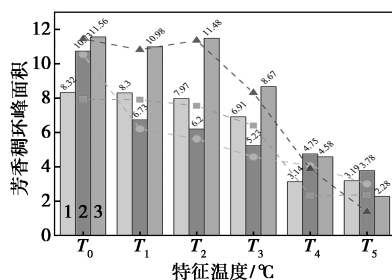
2.2.4 芳香结构

由图8可知,第1阶段,21%氧浓度环境下大分子芳香结构优先断裂,生成大量芳香环/稠环并通过侧链连接形成取代苯类,二者峰面积均呈增长趋势。5%与10%氧浓度条件下反应活性较低,大分子芳香结构断裂速率较慢,两类峰面积同步缓慢下降。第2阶段,21%氧浓度下芳香环/稠环发生开环降解,生成与降解速率达到动态平衡,峰面积呈波动下降;

取代苯类同样达到动态平衡;在 5% 与 10% 氧浓度下,取代苯类侧链断裂持续,大分子芳香结构断裂生成芳香环/稠环的速率提升并转化为取代苯类,两类结构峰面积的下降趋势缓和。第 3 阶段,5%、10% 下高温促进大分子芳香结构进一步断裂生成芳香环/稠环,并持续转化为取代苯类,但由于氧浓度偏低开环反应受阻,二者峰面积逐步上升;21% 氧浓度下芳香环结构裂解加速,大量的挥发分及碳氧基团生成,取代苯类同步开环,峰面积均迅速下降,反映了高氧环境中芳香族结构的深度氧化特征^[23]。



(a) 取代苯峰面积



(b) 芳香环或稠环峰面积

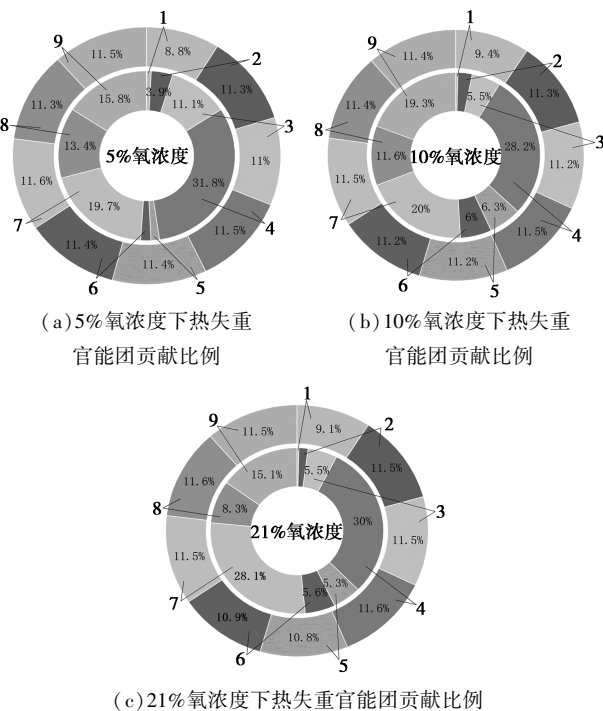
1—5% 氧浓度; 2—10% 氧浓度; 3—21% 氧浓度

图 8 不同氧浓度下煤样芳香结构的变化趋势

2.3 关键官能团分析

图 9 为 3 种氧浓度下煤样热失重官能团贡献比例图,图 9 内圈为 FR 法计算的相关性,外圈为灰色关联度法计算得出的相关性。煤氧化热失重过程受氧浓度调控,关键官能团的贡献模式呈现显著差异。5% 氧浓度下,含氧中间体如共轭羰基与不饱和羧酸中 C=O 与失重过程关联度较高,而脂肪链(甲基、亚甲基)及芳香结构(C=C)关联度极低,表明反应以受限的含氧官能团转化为主导。10% 氧浓度下,脂肪族甲基的关联度显著升高至 20.00%,同时不饱和羧酸中 C=O 关联度维持高位,表明反应路径向脂肪链活化与含氧结构生成转移。21% 氧浓度下,酚/醇/醚类(C—O)关联度大幅上升至 28.10%,成为主导失重的关键官能团;同时芳香结构(C=C)关联度也升高至 30.00%,反映高温下芳香环参与

深度氧化。OH 类氢键在所有氧浓度下关联度均极低,且 FR 贡献稳定。



1—OH-环状缔合氢键; 2—OH-自缔合氢键; 3—取代苯; 4—芳香环或稠环; 5—CH₂-对称伸缩振动; 6—CH₃ 对称伸缩振动; 7—酚、醇、醚、酯 C—O 伸缩振动; 8—共轭羰基伸缩振动; 9—不饱和羧酸中 C=O 伸缩振动

图 9 不同氧浓度下煤样含氧官能团的变化趋势

3 结论

(1) 氧浓度显著调控长焰煤氧化的宏观热失重特性:随氧浓度从 5% 升高至 21%,临界温度、燃尽温度等特征温度向低温区偏移,燃烧阶段质量损失率从 61.25% 提升至 84.95%;低氧(5%)可显著抑制初始阶段氧化反应,高氧则加速煤氧复合反应,提升自燃危险性。

(2) 煤氧化反应表观活化能受氧浓度影响显著:21%、10% 氧浓度下平均表观活化能分别较 5% 氧浓度降低 65.29%、54.61%;高氧通过增加氧分子吸附与活性位点碰撞频率降低反应能垒,低氧则因氧供应不足提高反应能垒,从动力学层面解释了反应速率差异。

(3) 结合实验与 FR 法与灰色关联度分析表明,氧浓度改变了各官能团在热失重过程中的相对重要性,从 5% 氧浓度下以碳氧基团(C=O)的分解为主导,到 10% 氧浓度下脂肪链与—COOH 的脱羧反应共同主导热失重过程,再到 21% 氧浓度下以芳香结构与残留含氧官能团的深度分解为主。

参考文献

- [1] Ejlali A, Mee D, Hooman K, *et al.* Numerical modelling of the self-heating process of a wet porous medium[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2011, 54(25/26): 5200–5206.
- [2] Taraba B, Michalec Z. Effect of longwall face advance rate on spontaneous heating process in the gob area-CFD modelling[J]. *Fuel*, 2011, 90(8): 2790–2797.
- [3] Kim J C, Sohn H C. A novel method to suppress spontaneous ignition of coal stockpiles in a coal storage yard[J]. *Fuel Processing Technology*, 2012, 100: 73–83.
- [4] 冯清喜, 李杰, 侯祥建. 煤矿井下综合防火技术的研究[J]. *内蒙古煤炭经济*, 2024, (20): 55–57.
- [5] 邓军, 徐精彩, 陈晓坤. 煤自燃机理及预测理论研究进展[J]. *辽宁工程技术大学学报*, 2003, (4): 455–459.
- [6] Zhao J Y, Deng J, Wang T, *et al.* Assessing the effectiveness of a high-temperature-programmed experimental system for simulating the spontaneous combustion properties of bituminous coal through thermokinetic analysis of four oxidation stages[J]. *Energy*, 2019, 169: 587–596.
- [7] 文虎, 陆彦博, 刘文永. 利用热重法研究不同氧浓度对煤自燃特性的影响[J]. *矿业安全与环保*, 2021, (1): 1–5.
- [8] 陈锦浩, 刘龙, 王珍珍. 淮南气煤低温氧化过程中主要官能团的变化规律研究[J]. *内蒙古煤炭经济*, 2024, (2): 1–6.
- [9] Zhou C, Zhang Y, Wang J, *et al.* Study on the relationship between microscopic functional group and coal mass changes during low-temperature oxidation of coal[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2017, 171: 212–222.
- [10] 宋双林. 不同氧气体积分数下风化煤自燃特性研究[J]. *煤矿安全*, 2022, (7): 32–37.
- [11] 贾廷贵, 姜和壮, 刘剑, 等. 不同水分含量煤自燃过程热特性实验研究[J]. *煤炭学报*, 2020, (S1): 346–352.
- [12] 贾廷贵, 张智超, 郝长胜. 不同变质程度烟煤的自燃特性研究[J]. *煤矿安全*, 2024, (2): 87–98.
- [13] 王建利. 氧气浓度对煤氧化特性及自燃极限参数影响的实验研究[J]. *陕西煤炭*, 2019, 38(1): 9–13, 50.
- [14] 陈锐, 秦汝祥. 不同氧浓度与粒径对煤自燃特性的影响研究[J]. *内蒙古煤炭经济*, 2025, (7): 10–12.
- [15] Zhang Y, Zhang Y, Li Y, *et al.* Heat effects and kinetics of coal spontaneous combustion at various oxygen contents[J]. *Energy*, 2021, 234: 121299.
- [16] 仲晓星, 侯飞, 曹威虎, 等. 基于等转化率法的煤氧化自热动力学参数测试方法[J]. *煤炭学报*, 2021, (6): 1727–1737.
- [17] Ren L, Deng J, Li Q, *et al.* Low-temperature exothermic oxidation characteristics and spontaneous combustion risk of pulverised coal[J]. *Fuel*, 2019, 252: 238–245.
- [18] Qi G, Wang D, Zheng K, *et al.* Kinetics characteristics of coal low-temperature oxidation in oxygen-depleted air[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2015, 35: 224–231.
- [19] 何启林, 王德明. 煤的氧化和热解反应的动力学研究[J]. *北京科技大学学报*, 2006, (1): 1–5.
- [20] 邓军, 赵夏琦, 王彩萍, 等. 煤欠氧氧化热动力学特性研究[J]. *矿业安全与环保*, 2025, (2): 9–16.
- [21] 李青蔚, 任立峰, 任帅京. 煤低温贫氧氧化放热特性研究[J]. *煤矿安全*, 2020, (11): 34–38.
- [22] Yin L, Xiao Y, Zhong K Q, *et al.* Temperature effects on thermal diffusivity of bituminous coal using different pre-oxidation levels in a nitrogenous atmosphere[J]. *Fuel*, 2021, 288: 119640.
- [23] 张园勃, 张玉涛, 邓军, 等. 贫氧作用下煤氧化放热关键基团演变特征及其热效应[J]. *煤炭学报*, 2024, (10): 4336–4350. ■
-
- (上接第 112 页)
- [19] 赵亮, 王欣, 黄宝成, 等. 污泥燃烧过程氮迁移转化机理[J]. *洁净煤技术*, 2023, 29(10): 153–165.
- [20] Wan G, Sun L, Xu L, *et al.* Emission of nitrogen/sulfur pollutants and migration of heavy metals during combustion of oily sludge from the oil refining process in fluidized bed[J]. *Journal of the Energy Institute*, 2024, 112: 101476.
- [21] 雷浩洋. 污泥与秸秆掺混水热碳化的氮迁移机理及固相产物燃烧 NO_x 生成特性研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2021.
- [22] 杨晓阳, 王宝凤, 宋旭涛, 等. 污泥与高硫煤共水热碳化过程中硫氮形态转化规律[J]. *化工学报*, 2022, 73(11): 5211–5219.
- [23] 王鑫. 典型污泥—煤泥混合燃烧过程中硫氮迁移转化机理[D]. 武汉: 华中科技大学, 2023.
- [24] 王碧茹. 污泥与煤泥混燃过程中硫氮迁移特性试验研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2022.
- [25] Gong Z, Wang L, Wang Z, *et al.* Experimental study on combustion and pollutants emissions of oil sludge blended with microalgae residue[J]. *Journal of the Energy Institute*, 2018, 91: 877–886.
- [26] 陶斯泽, 赵珂珂, 王雅慧, 等. Na 基添加剂对梅花井煤快速热解过程中硫元素迁移转化的影响研究[J/OL]. *煤炭转化*, 1–15. [2026-03-14]. <https://link.cnki.net/urlid/14.1163.TQ.20250423.1049.004>.
- [27] 杨真乐, 乔瑜, 刘帅, 等. 污泥低温热解过程中含硫气体释放实验研究[J]. *工程热物理学报*, 2012, 33(12): 2202–2206.
- [28] 翁焕新, 高彩霞, 刘瓚, 等. 污泥硫酸盐还原菌(SRB)与硫化氢释放[J]. *环境科学学报*, 2009, 29(10): 2094–2102.
- [29] 李亚林, 刘蕾, 刘晓彤, 等. 电渗透-过硫酸铵协同污泥脱水过程中胞外聚合物的变化[J]. *化工进展*, 2018, 37(11): 4468–4475.
- [30] 裴康越. 市政污泥含氮物质调控对污泥脱水性能及厌氧产气性能影响的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019. ■