

## 不同氧浓度对煤自燃特性影响研究

代义明, 程刚\*, 李钦骅, 魏翔

新疆大学地质与矿业工程学院 新疆乌鲁木齐

**【摘要】**为研究不同氧浓度环境对煤自燃特性的影响规律,采用程序升温实验方法,升温速率为5K/min,升温范围30~400°C,气体流速为50ml/min,改变N<sub>2</sub>和O<sub>2</sub>的气体流速达到0%、3%、5%、7%、10%、12%、15%、18%、21%九种氧浓度条件,然后对新疆准东地区易自燃煤样进行了系统实验研究。通过监测升温过程中CO、CO<sub>2</sub>等特征气体产物浓度变化,分析不同氧浓度对煤氧化自燃过程的影响机理。根据实验结果表明,当温度达到100°C,煤样产生的CO<sub>2</sub>浓度随着氧浓度升高而显著升高,与此同时CO浓度开始也呈指数型快速增长,且在12%和15%氧浓度的条件下时达到峰值分别为31590ppm、31570ppm。研究结果为矿井防灭火技术的制定和惰化防火措施的优化提供了理论依据。

**【关键词】**煤; 煤自燃; 氧浓度; 程序升温实验

**【收稿日期】**2025年10月15日 **【出刊日期】**2025年11月15日 **【DOI】**10.12208/j.sdr.20250267

### Study on the effect of different oxygen concentrations on the spontaneous combustion characteristics of coal

Yiming Dai, Gang Cheng\*, Qinhua Li, Xiang Wei

School of Geology and Mining Engineering, Xinjiang University, Urumqi, Xinjiang

**【Abstract】** To investigate the influence of different oxygen concentrations on the spontaneous combustion characteristics of coal, a programmed temperature experiment was conducted with a heating rate of 5 K/min, a temperature range of 30~400°C and a gas flow rate of 50 ml/min. By adjusting the flow rates of N<sub>2</sub> and O<sub>2</sub>, nine oxygen concentration conditions were achieved: 0%, 3%, 5%, 7%, 10%, 12%, 15%, 18%, and 21%. A systematic experimental study was carried out using a coal sample prone to spontaneous combustion from the Zhundong region of Xinjiang. By monitoring the changes in the concentrations of characteristic gaseous products such as CO and CO<sub>2</sub> during the heating process, the influence mechanism of different oxygen concentrations on the coal oxidation and spontaneous combustion process was analyzed. The experimental results indicate that when the temperature reached 100°C, the CO<sub>2</sub> concentration generated by the coal sample increased significantly with rising oxygen concentration. Meanwhile, the CO concentration initially exhibited exponential growth, peaking at 31,590 ppm and 31,570 ppm under oxygen concentrations of 12% and 15%, respectively. The research results provide a theoretical basis for the formulation of mine fire prevention and extinguishing technologies and the optimization of inert gas fire prevention measures.

**【Keywords】** Coal; Coal spontaneous combustion; Oxygen concentration; Programmed temperature ramping experiment

### 1 引言

煤自燃是煤矿开采过程的主要灾害之一<sup>[1,2]</sup>。煤炭是我国重要的能源支柱,占能源消耗的55%以上,然而矿山火灾80%是由于煤自燃,严重威胁到人员

生命财产安全,制约着煤矿的可持续发展<sup>[3-5]</sup>。煤自燃是煤在常温常压下与氧气发生缓慢氧化反应,积聚热量达到着火点而自行燃烧的现象。氧气作为煤自燃过程中的关键要素,其浓度变化对煤氧化自燃

\*通讯作者: 程刚

进程具有重要影响<sup>[6,7]</sup>。

目前, 国内外学者对煤自燃特性开展了大量研究工作。Wang<sup>[8]</sup>等通过实验研究发现, 氧浓度是影响煤自燃倾向性的重要因素之一。张辛亥<sup>[9]</sup>等采用绝热氧化实验方法, 研究了不同氧浓度条件下煤的氧化放热特性。然而, 现有研究多集中在单一氧浓度或常规空气条件下的煤自燃特性<sup>[10]</sup>, 对不同氧浓度梯度下煤自燃全过程特征参数变化规律的系统性研究相对不足。

本研究采用程序升温实验方法, 系统考察了 0%、3%、5%、7%、10%、12%、15%、18%、21%九种

氧浓度条件下煤样的氧化自燃特性, 获得了不同氧浓度对煤自燃气体产物生成规律的影响, 为矿井防灭火技术的优化提供科学依据。

## 2 实验材料与方法

### 2.1 煤样制备

实验煤样取自新疆准东地区, 该矿煤层具有易自燃特性。煤样采集后立即密封保存, 运回实验室后在通风干燥处自然风干 7 天。采用破碎机和球磨机将煤样加工至 0.18~0.38 mm 粒径范围, 并按照国家标准 GB/T 212-2008 测定煤样的工业分析和元素分析, 煤样基本特性参数见表 1。

表 1 煤样工业分析和元素分析结果

编号	工业分析				元素分析				
	水分 Mad (%)	灰分 A (%)	挥发分 V (%)	固定碳	C (%)	H (%)	O (%)	N (%)	S (%)
准东煤样	9.2	5.59	30.42	44.82	81.23	4.03	13.67	0.72	0.35

### 2.2 实验装置与流程

实验采用程序升温+气相色谱联用的实验仪器。实验装置主要由程序升温控制箱、气相色谱仪、配气系统以及气相色谱分析软件 PC 端组成。通过改变气体配比系统输入气路的气体流量来实现 N<sub>2</sub> 与 O<sub>2</sub> 的混合比例, 获得设定氧浓度的混合气体; 程序升温通过设定仪器的升温速率, 升温速率可在 0.1~5.0°C/min 范围内精确调节。数据采集系统实时监测炉内温度、气体产物浓度等参数。

实验步骤如下: 精确称取 12.0±0.5g 煤粉装入石英反应管, 以 1°C/min 的升温速率从室温加热至 380°C。实验过程中通入设定氧浓度的混合气体, 流量控制在 100mL/min。采用气相色谱仪连续监测 CO、CO<sub>2</sub> 等气体产物浓度, 同时记录煤样温度变化。

### 3 实验结果与分析

图 1 和图 2 分别展示了不同氧浓度条件下 CO 和 CO<sub>2</sub> 的生成规律。从图 1 中可以看出, 在相同温度下, CO<sub>2</sub> 的浓度均随氧浓度增加而显著升高。当温度在 30~100°C 时, 各氧浓度条件下 CO<sub>2</sub> 浓度均维持在较低水平, 21% 氧浓度煤样温度达到 100 时 CO<sub>2</sub> 含量为 246.9 ppm (<300 ppm), 且不同氧浓度曲线基本重合, 差异不显著。这表明低温阶段煤的氧化反应较为缓慢, 氧浓度对 CO<sub>2</sub> 生成的影响有限。0% 氧浓度 (纯氮气氛) 条件下 CO<sub>2</sub> 浓度在 100°C 时为

84 ppm (<100 ppm), 证实了 CO<sub>2</sub> 的生成主要来源于煤氧化反应而非热解过程。当煤温超过 100°C 后, CO<sub>2</sub> 浓度开始加速上升, 且不同氧浓度条件下的曲线逐渐分离。氧浓度越高, CO<sub>2</sub> 生成速率越快, 曲线斜率越大。

CO<sub>2</sub> 作为煤完全氧化的主要终产物, 其生成量直接反映了煤氧化反应的深度和强度。煤的氧化是一个自由基链式反应过程。氧浓度升高增加了自由基 (如 •OH、HO<sub>2</sub> • 等) 的生成量, 加速了链式反应过程。特别是在中高温阶段, 充足的氧供应使得煤分子中间产物 (如醛、酮、过氧化物等) 能够迅速进一步氧化为 CO<sub>2</sub>, 而不是停留在 CO 等中间氧化产物阶段。

CO 作为煤不完全氧化的标志性气体产物, 其浓度变化曲线呈现出先随着氧气浓度升高增后减规律。CO 的生成主要源于煤中官能团的氧化分解, 其浓度变化反映了煤氧化反应的活跃程度。实验结果显示, 当温度为 30~100°C 时, 各氧浓度条件下 CO 浓度均保持在极低水平 (<10 ppm), 不同氧浓度曲线几乎完全重合, 不同氧浓度下 CO 析出量差异较小。这一阶段煤表面氧化反应活性较弱, 活性官能团的分解尚未达到大规模产生 CO 的程度。当煤温>100°C, CO 浓度开始呈指数型快速增长, 且氧浓度差异开始显现。12% 和 15% 氧浓度产生 CO 气体的含量远高

于其他氧浓度。CO 主要通过煤的不完全氧化大量生成, 在达到峰值之前 CO 的生成速率远大于消耗速率,

当氧气浓度到达一定程度后, CO 进一步氧化为  $\text{CO}_2$  的反应被显著激活, 导致 CO 含量降低。

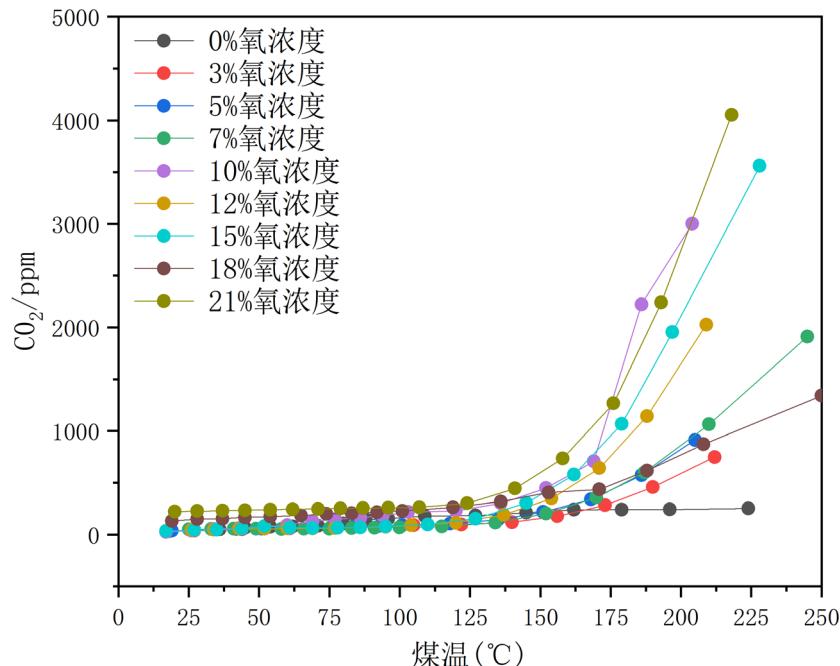


图 1 程序升温过程  $\text{CO}_2$  产生量

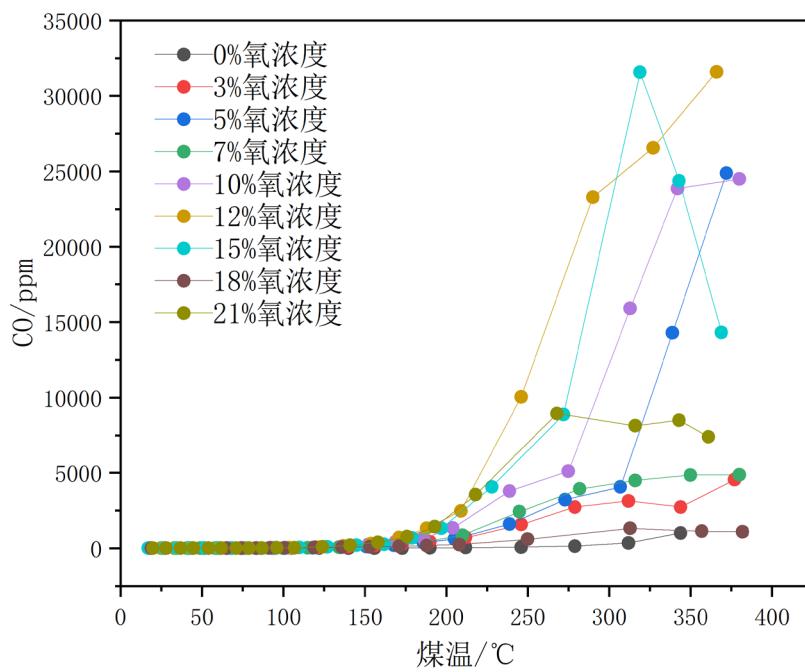


图 2 程序升温过程 CO 产生量

综合实验数据分析表明, 氧浓度对煤完全氧化具有显著促进作用,  $\text{CO}_2$  浓度随氧浓度升高单调递增, CO 含量是煤不完全氧化生成速率与进一步氧化为  $\text{CO}_2$  消耗速率的动态平衡, 12%~15% 氧浓度生成

CO 的含量比其他氧气浓度更高, 并非  $\text{O}_2$  浓度越高其含量越高。CO 浓度可以作为煤自燃早期预警指标, 基于 CO 生成规律并结合实验结果, 建议将采空区氧浓度控制在 12% 以下, 可以有效抑制煤的快速氧

化和 CO 的大量生成, 延缓自燃进程。

## 参考文献

- [1] 刘艳亮. 2002~2016年我国煤矿事故统计分析及预防措施[J]. 陕西煤炭, 2018, 37(3): 64-67, 40.
- [2] 邓军, 白祖锦, 肖旸, 等. 煤自燃灾害防治技术现状与挑战[J/OL]. 煤矿安全, 2020, 51(10): 118-125.
- [3] 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.
- [4] 邓军, 李贝, 王凯, 等. 我国煤火灾防治技术研究现状及展望[J/OL]. 煤炭科学技术, 2016, 44(10): 1-7, 101.
- [5] 戚颖敏. 我国煤矿火灾防治技术的现代发展与应用[J/OL]. 煤, 1999(2)[2025-11-17].  
<https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?dbcode=CJFQ&dbname=CJFD9899&filename=MEIA902.000>.
- [6] 秦波涛, 仲晓星, 王德明, 等. 煤自燃过程特性及防治技术研究进展[J/OL]. 煤炭科学技术, 2021, 49(1): 66-99.
- [7] 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/OL]. 内蒙古煤炭经济, 2025(7): 10-12.
- [8] WANG H, DLUGOGORSKI B Z, KENNEDY E M. Coal oxidation at low temperatures: Oxygen consumption, oxidation products, reaction mechanism and kinetic modelling[J/OL]. Progress in Energy and Combustion Science, 2003, 29(6): 487-513.
- [9] 张辛亥, 张天赐, 王玥, 等. 不同氧浓度和温度下侏罗纪煤氧化动力学参数规律[J/OL]. 西安科技大学学报, 2019, 39(4): 564-570.
- [10] 杨博, 王昊宇, 司俊鸿, 等. 基于程序升温的沙曲一矿煤自燃特性实验研究[J/OL]. 华北科技学院学报, 2024, 21(4): 49-55.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS