

采空区复合灾害环境下含瓦斯煤自燃特征研究进展

田富超^{1,2,3,4}, 贾东旭¹, 陈明义^{1,3}, 梁运涛^{1,2,4}, 朱红青⁴, 张同浩³

(1. 中煤科工集团沈阳研究院有限公司 煤矿灾害防控全国重点实验室, 辽宁 沈抚示范区 113122; 2. 煤炭科学研究总院, 北京 100013; 3. 石家庄铁道大学 安全工程与应急管理学院, 河北 石家庄 050043; 4. 中国矿业大学(北京) 应急管理与安全工程学院, 北京 100083)

摘要:采空区瓦斯与煤自燃复合灾害日趋成为制约矿井安全生产的主要灾害模式, 煤自燃作为瓦斯燃烧、爆炸等灾害事故的“点火源”, 无疑是防范煤矿采空区复合灾害的关键。目前关于采空区遗煤残余瓦斯(吸附态为主)与风流瓦斯(游离态)对煤自燃影响机理的认识还不够深入, 为此探究了含瓦斯条件下煤自燃相关研究的最新进展。现阶段针对含瓦斯风流/气氛下煤自燃特性的研究内容较为丰富, 但吸附态瓦斯影响条件下的煤自燃特性实验平台及相关研究成果较匮乏。研究表明, 游离瓦斯易引起煤低温氧化气体产物出现明显的“滞后效应”, 同时煤体放热强度减弱、活化能整体增大, 这反映出氧化气氛中的瓦斯对煤自燃具有抑制作用; 相应地, 煤自燃过程中的官能团、自由基及煤微晶结构等微观特征参数均会随瓦斯体积分数呈现规律性演变。进一步, 考虑到遗煤内部残余瓦斯与风流瓦斯的赋存状态差异, 探究了瓦斯对煤自燃过程的影响机理, 包括CH₄对O₂的驱替稀释作用、CH₄与O₂的竞争吸附解吸引起的置换效应, 以及高温环境下的O₂分子化学吸附和煤氧复合效应作用。基于此, 提出了采空区遗煤在吸附态瓦斯影响下的自燃过程特性、含瓦斯煤自燃流-固-热-化多场耦合特征、含瓦斯煤自燃监测预警理论应用等亟待突破的瓶颈问题。

关键词:煤自燃; 复合灾害环境; 微观特征; 多场耦合; 遗煤残余瓦斯; 热动力灾害

中图分类号: TD752.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2024)06-2711-17

Research progress of spontaneous combustion of coal containing gas under the compound disaster environment in the goaf

TIAN Fuchao^{1,2,3,4}, JIA Dongxu¹, CHEN Mingyi^{1,3}, LIANG Yuntao^{1,2,4}, ZHU Hongqing⁴, ZHANG Tonghao³

(1. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Prevention and Control, China Coal Technology and Engineering Group Shenyang Research Institute, Shenyang Demonstration Zone 113122, China; 2. China Coal Research Institute, Beijing 100013, China; 3. School of Safety Engineering and Emergency Management, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China; 4. School of Emergency Management and Safety Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: The compound disasters of gas and coal spontaneous combustion have become the main disaster mode that restricts safe mine production. As the “ignition source” of gas combustion and gas explosion accidents in goaf, coal spontaneous combustion is undoubtedly the key influence factor for preventing compound disasters. At present, there is still insufficient understanding on the influence characteristics and mechanism of both the methane gas (free state) of the airflow filed and the residual methane gas (mainly adsorbed state) of the fractured coals on the coal spontaneous combustion.

收稿日期: 2023-07-12 修回日期: 2023-12-13 责任编辑: 王晓珍 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2023.0855

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52174229, 52174230); 辽宁省自然科学基金资助项目(2021-KF-23-04)

作者简介: 田富超(1984—), 男, 河南项城人, 副研究员, 博士生导师, 博士(后)。E-mail: tianfuchao@cumt.edu.cn

通讯作者: 陈明义(1988—), 男, 安徽淮北市人, 副教授, 博士生导师, 博士。E-mail: chenmingyi@stdu.edu.cn

引用格式: 田富超, 贾东旭, 陈明义, 等. 采空区复合灾害环境下含瓦斯煤自燃特征研究进展[J]. 煤炭学报, 2024, 49(6): 2711-2727.

TIAN Fuchao, JIA Dongxu, CHEN Mingyi, et al. Research progress of spontaneous combustion of coal containing gas under the compound disaster environment in the goaf[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(6): 2711-2727.



移动阅读

Therefore, the latest research progress in the field of the spontaneous combustion under gas-containing conditions was explored. It was found that the rich research results have been obtained on the characteristics of coal spontaneous combustion under the gas-containing airflow/environment. However, there is a lack of experimental platforms and the research results for simulating the impacts of the adsorbed gas on the coal spontaneous combustion. It is pointed out that the free gas can lead to a significant “hysteresis effect” in the generation on the oxidation gas products of coal, the weakening of the heat release intensity of coal oxidation and the overall increase in the activation energy, all of which reflect the inhibitory effect of the methane in the free state on coal spontaneous combustion. Correspondingly, the microscopic characteristic parameters of functional groups, free radicals, and coal microcrystalline structure exhibit the regular change with methane concentration during coal spontaneous combustion process. Furthermore, considering the difference in the occurrence state of the residual methane inside the fractured coal and the free methane in the goaf environment, the influence mechanisms of methane on the coal spontaneous combustion are investigated including the displacement and dilution effects of methane, the effect of competition adsorption/desorption between methane and oxygen, as well as the chemical adsorption of oxygen molecules and the coal-oxygen reaction effects under the high temperature environment. At last, it is proposed that the research urgently needs to breakthrough the bottleneck issues of the evolution characteristics of coal spontaneous combustion under the impact of adsorbed gas, the multi-field characteristics of gas-containing coal spontaneous combustion, and the monitoring and warning of gas-containing coal spontaneous combustion.

Key words: coal spontaneous combustion; compound disasters environment; microscopic characteristics; multi-field coupling; residual gas of fractured coals; thermodynamic disaster

受我国“富煤、少气、缺油”能源资源禀赋的影响,煤炭在一次能源消费中占比长期超过 50%^[1]。当前,我国煤炭资源开发以井工开采为主,而瓦斯与煤自燃是威胁井工煤矿安全生产的主要灾害。据不完全统计,我国重点矿区中 70% 以上的矿井存在煤自燃灾害,而具有煤自燃风险的高瓦斯矿井达 30% 以上^[2]。特别是,随着煤层采深的逐渐增加,煤岩赋存环境的“三高”(高瓦斯压力、高地温、高渗透压)特征突出,由此导致低瓦斯矿井逐渐转变为高瓦斯矿井、不易自燃煤层可能转变为自燃甚至易自燃煤层^[3-4]。采空区瓦斯与煤自燃复合灾害无疑将成为威胁煤矿安全开采的灾害模式之一^[5-6]。

煤矿采空区浮煤、遗煤在持续漏风条件下加速升温氧化,同时周围实体煤所含的吸附态瓦斯在卸压条件下不断解吸并涌向采场空间,导致采空区遗煤氧化自燃实际上是在吸附态瓦斯转化为解吸态瓦斯的伴随下进行,此过程称为含瓦斯煤升温氧化。因此,采空区瓦斯与煤自燃复合灾害是在有利的采空区漏风条件下,采空区破碎的、卸压瓦斯释放的落煤易发生煤自燃,而煤的低温氧化又可能引起采空区裂隙场的瓦斯燃烧、爆炸等^[6-7]。因此,这种复合灾害是采空区裂隙场、CH₄ 体积分数场、O₂ 体积分数场和温度场等多场介质交汇致灾结果^[8],在裂隙空间多场交汇中瓦斯与煤自燃的致灾因子动态转化,煤自燃、瓦斯燃烧、瓦斯爆炸等灾害共存、互相影响,表现出强烈的动态

耦合作用^[9-10]。采空区环境内瓦斯抽采工程可能为煤自燃提供有利的漏风供氧条件,易导致采空区内的煤自然发火;而合适供氧和蓄热环境下的煤自燃可能成为引发瓦斯灾害的高温“点火源”。诸多事故已反映出煤自燃对瓦斯灾害(瓦斯燃烧、瓦斯爆炸)的诱发作用,例如,2005年辽宁大明煤矿、2010年辽宁大窑沟煤矿、2013年吉林八宝煤矿和2014年新疆大黄山煤矿等发生的瓦斯爆炸事故,其直接原因多是采空区遗煤自燃引爆了体积分数处于爆炸极限范围的瓦斯气体^[11-12]。因此,采空区内的煤自燃是煤矿井下复合灾害的致灾源头。采空区赋存大量瓦斯,一是来自于采动破碎煤岩体释放的游离态气体;二是来自于遗煤中残余瓦斯的不断解吸扩散,即吸附态气体,2种赋存形式的瓦斯对煤自燃的影响不容忽视。

当前,国内外学者针对采空区遗煤自燃特性与机理开展了大量研究,如利用自建的试验装置对煤自燃过程中的宏观参数(产物生成量、特征温度、放热量等)及分段特性等进行测试与研究^[13];运用傅里叶红外光谱(FTIR)、电子自旋共振波谱(ESR)、核磁共振(NMR)等现代分析技术开展官能团、自由基等微观结构的变化测试与分析^[14-15];以及结合量子化学计算原理研究煤自燃过程的基元反应机理^[16-17]。此外,水浸风干、二次氧化、火成岩侵入等因素能够显著改变煤自燃过程的耗氧、活化能、气体产物生成等特性^[18-20],受到了学者们的广泛关注,这为特殊环境条件下的煤

自燃灾害防治奠定了理论基础。甲烷是广泛存在于井下采空区的一种强吸附性气体,其对煤-氧接触吸附及煤氧复合反应的影响存在稀释、置换、竞争等的叠加作用,会影响煤自燃的动态演化过程,对采空区复合灾害环境下的热动力灾害防治提出了新挑战。为此,深入分析风流瓦斯和吸附态瓦斯对煤自燃特性的影响,探究含瓦斯条件下煤自燃过程的微观结构演化规律,研究瓦斯对煤自燃的影响机理,并提出含瓦斯煤自燃理论与应用方面的研究趋势,以期采空区瓦斯与煤自燃复合灾害理论的发展及灾害防治新技术的研发提供基础参考。

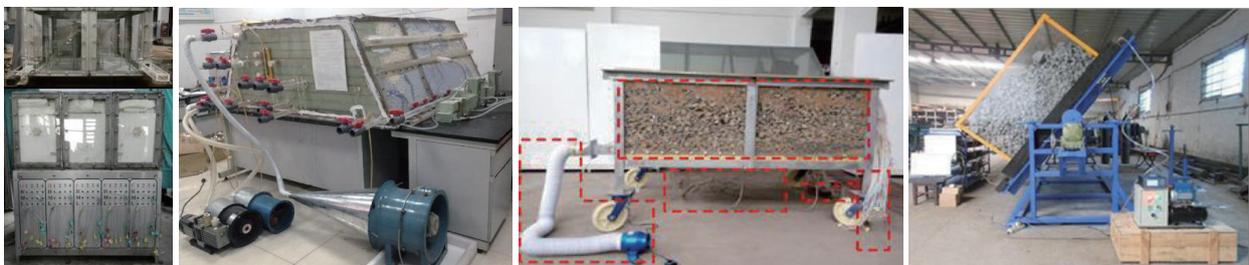
1 含瓦斯条件下的煤自燃特征

煤矿采空区环境复杂,现场开展长期、大数据量的测试难度较大。为此,学者们多基于相似原理搭建采空区煤自燃环境的“缩尺”平台,通过可重复、可对比的室内测试以及较全面的数据监测,探究采空区煤自燃环境的温度场、风流场、气体体积分数场等的演化特征。

1.1 试验装置

结合相似模拟试验方法,一系列测试装置被提出用于研究采空区瓦斯与煤自燃耦合作用下的多物理

场演化特征。图1为现有的采空区瓦斯与煤自燃多场耦合环境相似模拟实验平台,其性能参数见表1。林柏泉等^[21]运用分布式点热源与模块化设计理念,建立了尺寸为1200 mm×1200 mm×600 mm(长×宽×高)的采空区热动力灾害模拟实验平台,用于研究采空区含瓦斯环境下的煤自燃动态演化过程以及判识多元气体爆炸危险区域的动态演化趋势,研究指出采空区内的空气泄漏与甲烷气体聚集范围呈负相关^[22]。余照阳等^[23-24]搭建了综采工作面三维采空区流场模型试验台,可研究不同通风方式(U型、U+I型)下采空区氧气场、瓦斯场和漏风流场分布规律以及遗煤自燃特征,研究指出采空区瓦斯流场呈非均匀分布,在采空区中部靠近回风侧会形成瓦斯富集区,并且该瓦斯富集区随通风负压而增大,并向工作面回风和开采工作面方向移动。李林^[25]针对黑龙江兴安煤矿U型通风工作面,按100:1比例搭建了采空区煤自燃与瓦斯耦合相似模拟实验平台,研究指出煤自燃位置的瓦斯体积分数最小而在自燃区域外的体积分数较大,这与采空区内的漏风流、火风压和气体卷吸作用有关^[26]。SU等^[27-28]搭建了可调倾角的采空区相似模型,重点分析了通风量、倾角对采空区气体体积分数分布的影响。



(a) 林柏泉等^[21]实验平台 (b) 余照阳等^[24]实验平台 (c) 李林^[25]实验平台 (d) SU等^[27-28]实验平台

图1 采空区多场耦合环境相似模拟实验平台

Fig.1 Simulating test devices of multi-field coupling environment of the goaf

现有平台更多聚焦于采空区煤自燃升温环境下的多场动态演化,并以通入不同比例的甲烷与空气混合气体的方式探究含瓦斯风流/气氛下的煤低温氧化规律^[29-30]。同时,田富超等^[31]解决了高温高压条件下(0~220 ℃、0~6 MPa)瓦斯与火耦合测试平台的保压及控温技术难题,迭代发明了TZX-3000A/B系列智能型含瓦斯煤竞争吸附—解吸—氧化耦合灾害溯源实验平台,如图2所示,实现了不同温度压力工况下的多元气体竞争吸附、解吸、自燃全过程连续物理模拟,精准溯源了吸附态瓦斯不断解吸条件下的采空区遗煤自燃特性,为矿井采空区复合灾害环境下含瓦斯煤自燃监测预警及防治提供了基础支撑。

1.2 低温氧化特性

1.2.1 氧化气体生成产物

甲烷作为一种含碳量很低的碳氢化合物,其对煤自燃的影响十分复杂。在低体积分数(小于3%)甲烷气氛下,煤自燃过程中CO和CO₂的气体生成量和耗氧速率均明显大于氧化气氛中无甲烷的情况,意味着低体积分数甲烷对煤自燃具有一定促进作用^[33]。更多学者关注了较高体积分数甲烷气体对煤自燃的影响并得到了不同结论。

宋万新等^[34]研究了CH₄气体对山西天池煤矿煤样(挥发分为9.8%)的低温氧化产物CO的生成规律,发现CO生成量受到CH₄体积分数的影响较大;在相

表 1 实验装置参数
Table 1 Experimental device parameters

平台名称	主要模拟内容	装置尺寸	试验参数	设备构成	文献
煤矿采空区热动力灾害模拟实验平台	采空区含瓦斯环境下的煤自燃过程模拟试验; 采空区热动力灾害预警与防治模拟试验	相似比1:150; 长×宽×高: 120 cm×120 cm×60 cm; 9个模块, 每个模块尺寸为40 cm×40 cm×60 cm	通风速率: 0~50 L/min; 试验温度: 20~1 100 ℃; 测试气体: 甲烷、空气	控制系统: 进风调控子系统、分布式气体添加子系统、程控点式加热子系统; 测试系统: 温度采集子系统、气体取样及分析子系统、压力及差压监测子系统	[21]
三维采空区流场模型实验平台	不同通风条件下采空区多场分布规律	相似比: 1:100; 工作面截面尺寸: 6 cm×3 cm; 采空区走向长度180 cm、倾向长度160 cm; 煤层倾角0°	气体释放速率: 2 200 mL/min (采空区); 1 800 mL/min (上邻近层); 1 500 mL/min (煤壁); 通风方式: U型、“U+I”型; 测试气体: 甲烷、空气	瓦斯释放系统、采样检测单元、通风及抽采接口、动力单元	[23-24]
采空区气体运移模拟实验平台	采空区煤自燃环境的瓦斯运移积聚特征及温度分布规律	相似比: 1:100; 进回风巷: 20 cm×4 cm×3 cm; 工作面: 120 cm×5 cm×3 cm; 采空区: 200 cm×120 cm×60 cm; 气体释放室: 200 cm×120 cm×5 cm; 加热模块: 144 cm×124 cm×6 cm	气体释放速率: 150 mL/min; 工作面通风速率: 0.2~1.0 m/s; 试验温度: 130 ℃; 测试气体: 空气、氮气、甲烷	通风装置、采空区模拟腔室、气体释放室、加热装置、温度监测装置、数据监测装置、体积分数监测装置	[25-26]
长壁采空区倾角可调节模拟实验平台	急倾斜长壁采空区通风对煤自燃的影响规律	相似比: 1:100; 采空区尺寸: 300 cm×180 cm×100 cm; 煤层厚度: 24 cm; 开采高度: 6 cm; 放顶煤厚度: 18 cm; 巷道: 10 cm×6 m	通风速率: 0~7.2 L/min; 倾角: -50°~50°; 测试气体: 空气、氮气	长壁采空区模块、气体注入模块、负压通风模块、数据采集模块	[27-28]
含瓦斯风流条件下的煤低温氧化实验装置	不同风流瓦斯体积分数条件下煤低温氧化特性	—	气体速率: 50 L/min; 测试温度: 15~225 ℃; 升温速率: 1 ℃/min; 测试气体: 甲烷、空气	程序控温箱、气体加压装置、供气装置、安全检测装置、气体采集与分析装置	[29]
含瓦斯气流松散煤体自燃特性实验装置	不同风流瓦斯体积分数条件下煤低温氧化特性	—	气体速率: 100 mL/min; 测试温度: 40~230 ℃; 升温速率: 0.8 ℃/min; 测试气体: 空气、甲烷	程序控温箱、供气装置、温度采集与控制系统、气体采集与分析装置、安全检测装置	[30]
含瓦斯煤竞争吸附—解吸—氧化耦合灾害溯源实验平台	不同温度压力工况下的多元气体竞争吸附、解吸、自燃全过程连续物理模拟, 溯源吸附态瓦斯不断解吸条件下的采空区遗煤自燃特性	2个罐体容积均为100 mL; 整机: 90 cm×75 cm×135 cm	气体流量: 0~200 mL/min; 测试温度: 20~220 ℃; 测试压力: 6 MPa; 解吸量程: 50~5 000 mL/min; 测试气体: 甲烷、二氧化碳、氮气、空气、氮气	供气、抽真空、程序控温、瓦斯吸附解吸、氧化升温、气体采集与分析、数据采集与控制	[31]
采场高温煤体引燃瓦斯燃烧实验平台	不同条件下升温煤体诱发气体燃烧(爆炸)特性研究	瓦斯燃烧反应器: 50 cm×50 cm×50 cm; 腔体厚度: 0.5 cm; 储煤装置: 15 cm×15 cm×21 cm	温度: 20~750 ℃; 甲烷体积分数: 3.2%~12.8%; 加热功率: 60~125 W; 测试气体: 甲烷、空气	钢制瓦斯燃烧反应器、引燃模块、供气模块、测温与采气模块	[32]

同温度和 O₂ 体积分数情况下, CO 生成量随 CH₄ 体积分数的升高而减小。郝宇等^[35]测试了 CH₄ 体积分数为 30%~100% 时重庆东林煤矿煤样 (挥发分为 19.15%) 的 CO 和 CO₂ 气体产物生成规律, 指出在煤加速氧化阶段, CO 和 CO₂ 生成量随温度的升高呈指

数上升趋势, 并且 CH₄ 体积分数越高、O₂ 体积分数越小, 则 CO 和 CO₂ 生成量越小, 反映出温度越高, CH₄ 气体对煤氧化的抑制作用越明显。ZHOU 等^[36]也发现了类似规律, 指出随着风流中 CH₄ 体积分数增加, 相同温度时煤氧化产物 CO 和 CO₂ 的生成量均逐渐

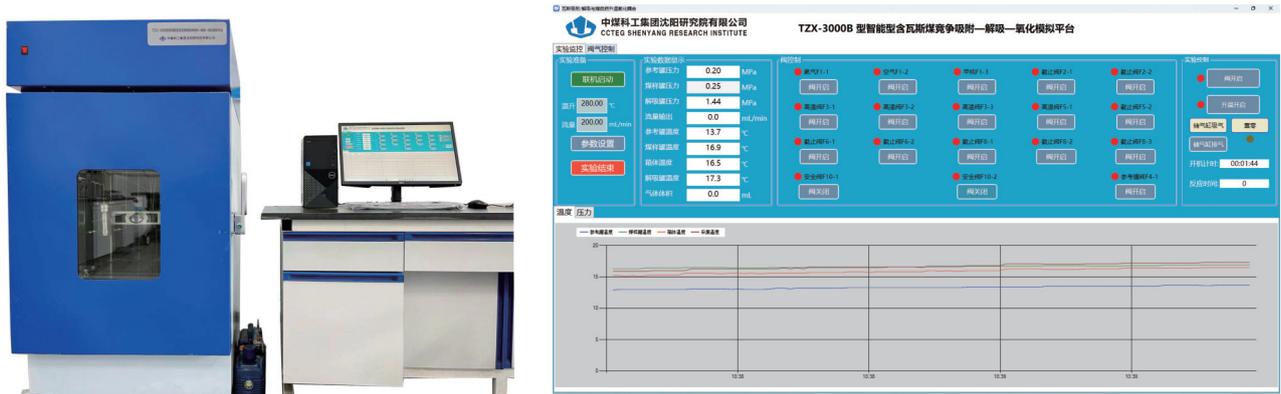


图 2 含瓦斯煤竞争吸附—解吸—氧化耦合灾害溯源实验平台^[31]

Fig.2 Test platform of coupling gas adsorption/desorption and heating oxidation of coal^[31]

减小, C₂H₄、C₂H₆、C₃H₈ 气体也呈现出相同规律。

此外, 采空区遗落煤体中残留着以吸附态为主的瓦斯, 其对煤自燃的影响也受到了关注。邓军等^[37]研究指出预吸附甲烷处理煤样在程序升温过程中的耗氧速率、CO 与 CO₂ 产生率均比原煤样的更小。刘敬^[38]试验研究了不同 CH₄ 含量 (1.9、2.5、3.3、3.8 m³/t) 煤样的低温氧化特性, 发现当煤温低于临界温度时, CO 气体产生量随 CH₄ 含量的增加而减小, 反映出吸附气体对 CO 气体生成具有抑制作用; 而当温度高于临界温度时, CO 气体产生量随 CH₄ 含量增加出现增大趋势, 说明吸附 CH₄ 气体会延缓煤的氧化进程, 在临界温度后煤样的氧化能力被释放; 而对于 CO₂ 等氧化产物, CH₄ 气体的抑制作用更显著。

1.2.2 初始生成温度

含瓦斯气氛下煤氧化气体产物的初始生成温度见表 2。宋万新等^[34]试验发现, 当 O₂ 体积分数为 14%、CH₄ 体积分数为 0~25% 时, CO 气体生成的初始温度为 30~40 °C; 而当 O₂ 体积分数减小为 8% 而 CH₄ 体积分数不变时, CO 气体的初始生成温度为 50~60 °C; 因此 CH₄ 体积分数越高、O₂ 体积分数越低, 则 CO 的初始生成温度越高且生成时间越晚。CAI 等^[39]也发现了 CO 气体初始生成温度随 O₂ 体积分数减小和甲烷体积分数增加表现出的“滞后效应”。周亮^[30]研究指出当 O₂ 体积分数为 16% 且 CH₄ 体积分数为 0~20% 时, 煤样的氧化产物 CO、CO₂ 和 C₂H₄ 的初始生成温度相同, 而 C₂H₆ 和 C₃H₈ 的初始生成温度随 CH₄ 体积分数的增加出现增大趋势; 当 O₂ 体积分数为 10% 时, CO、C₂H₄、C₂H₆ 和 C₃H₈ 初始生成温度均随 CH₄ 体积分数的增加而增大, 而 CO₂ 的初始生成温度变化不显著。

郝宇等^[35]研究指出, 氧化气体产物 CO 和 CO₂ 的初始生成温度分别为 90~150 °C 和 110~150 °C, 远高于周亮^[30]和宋万新等^[34]的研究结果, 这可能是由于

表 2 含瓦斯气氛下煤氧化气体产物的初始生成温度

Table 2 Initial generation temperature of oxidation gas products in a gas-containing atmosphere

含瓦斯气氛	初始生成温度/°C					参考文献
	CO	CO ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	
O ₂ (14%), CH ₄ (0)	30	—	—	—	—	[34]
O ₂ (14%), CH ₄ (8.70%)	30	—	—	—	—	
O ₂ (14%), CH ₄ (17.04%)	40	—	—	—	—	
O ₂ (14%), CH ₄ (25.00%)	40	—	—	—	—	
O ₂ (8%), CH ₄ (0)	50	—	—	—	—	[35]
O ₂ (8%), CH ₄ (17.00%)	50	—	—	—	—	
O ₂ (8%), CH ₄ (24.90%)	60	—	—	—	—	
O ₂ (0), CH ₄ (100%)	~150.0	~150.0	—	—	—	
O ₂ (10.5%), CH ₄ (50%)	~110.0	~130.0	—	—	—	[30]
O ₂ (14.7%), CH ₄ (30%)	~90.0	~110.0	—	—	—	
O ₂ (21%), CH ₄ (0)	~40.0	~80.0	—	—	—	
O ₂ (100%), CH ₄ (0)	~30.0	~70.0	—	—	—	
O ₂ (16%), CH ₄ (0)	60	40	130	80	100	[30]
O ₂ (16%), CH ₄ (10%)	60	40	130	80	130	
O ₂ (16%), CH ₄ (20%)	60	40	130	130	120	
O ₂ (10%), CH ₄ (0)	70	60	160	130	130	
O ₂ (10%), CH ₄ (10%)	70	50	170	140	140	
O ₂ (10%), CH ₄ (20%)	80	60	170	—	140	

前者的 CH₄ 试验体积分数为 30%~100%, 显著高于后者的。同时, 在相同 CH₄ 体积分数条件下, 随着 O₂ 体积分数的减小, 氧化气体产物 CO 和 CO₂ 的初始生成温度明显增大。这些现象一方面说明, 当 CH₄ 体积分数足够高 (大于 20%) 且 O₂ 体积分数较低时, 煤的氧化产物 CO 和 CO₂ 初始生成温度会出现更显著的增大; 另一方面也说明, 气体产物生成量对氧化气氛中 CH₄ 体积分数的变化更敏感, 而气体产物的初始生成温度对 CH₄ 体积分数影响的表现相对“迟钝”。

1.3 热效应与活化能

煤自燃是一系列复杂的物理、化学反应过程,在不同气体组分环境下会导致特征温度、放热量、活化能等参数发生明显变化。热重分析法(TG)、差式扫描量热法(DSC)、差热分析法(DTA)被用于研究煤自燃过程的宏观热效应。

1.3.1 特征温度

胡新成^[40]利用 TG-DSC 同步热分析技术研究发现,干裂温度随氧化气氛中 O₂ 体积分数的降低而缓慢增加,而 CH₄ 气体会弱化活性温度与干裂温度的差异。LIU 等^[41]通过热重分析与气相色谱联用技术研究了不同温度阶段 CH₄ 对煤自燃的影响,指出在低温氧化阶段 CH₄ 气体可延迟氧化产物 CO 和 CO₂ 的生成,在加速氧化阶段 CH₄ 气体造成的贫氧环境会减缓煤氧反应的速度和点火温度,在燃烧阶段由于 CH₄ 的剧烈燃烧和 CH₄ 分解产生的 C 和 H₂ 的燃烧会消耗大量的 O₂,从而会抑制甚至终止煤氧复合反应过程。刘敬^[38]制备了不同 CH₄ 含量(1.9~3.8 m³/t)煤样,通过程序升温试验发现吸附 CH₄ 气体煤样的临界温度和干裂温度有所升高。周亮^[30]研究指出随着氧化气氛中 CH₄ 体积分数的增加,交叉点温度与临界温度均有增高。邓军等^[42]分析指出当煤体温度低于临界温度时,煤体吸附的 CH₄ 气体会抑制煤的低温氧化进程,并且瓦斯含量越大对煤氧化的抑制作用越明显。这主要是由于随着 CH₄ 体积分数的增大,竞争吸附效应下 CH₄ 气体能够占据煤表面更多的活性位点,导致参与煤表面氧化反应的 O₂ 减少,煤低温氧化反应强度也明显降低;而当温度高于临界温度时,煤的氧化能力得到了一定程度的释放。

1.3.2 放热量

娄和壮等^[43]研究发现随着 CH₄ 气体体积分数的减小,TG 和 DSC 曲线偏移,低 CH₄ 气体体积分数下的煤自燃失重速率高于高 CH₄ 体积分数情况。ZHANG 等^[44]指出氧化气氛中 CH₄ 气体可减少低温氧化过程中吸收和释放的热量,且 CH₄ 体积分数越高、放热量越少。胡新成^[40]指出 CH₄ 气体对煤在快速氧化阶段的产热量影响较大,当 CH₄ 体积分数为 14.3%~57.1% 时会增大煤快速氧化阶段的产热量,意味着 CH₄ 气体降低了煤氧复合反应难度,而在其他体积分数范围会抑制煤氧复合作用。张玉涛等^[45]利用 C80 微量热仪研究了低体积分数 CH₄ 气氛下的煤放热特性,指出随着 CH₄ 体积分数的升高,煤的吸热量降幅小于 10 J 而放热量降幅接近 300 J。尽管学者们的研究结论有所差异,但从整体而言,CH₄ 体积分数

增加对煤氧放热特性具有抑制作用,并且高温条件下 CH₄ 体积分数的弱化效应更强,这主要是由于随着氧化温度的升高,煤表面活性基团增多,耗氧量增大,对氧气供给量的依赖性增加,导致氧含量对放热量的影响愈发明显,而 CH₄ 体积分数升高会抑制高温条件下氧气的有效供给,从而致使煤放热量的显著降低。

1.3.3 活化能

活化能是反映煤氧化动力学特征的重要指标,决定着煤发生氧化反应的难易程度^[46]。活化能越低意味着煤氧化反应越易进行,反之氧化反应不易进行^[47]。基于 TG-DSC 同步热分析试验、程序升温试验、C80 热流量热试验等的测试数据,通过 Arrhenius 方程或 Coats-Redfern 积分法可计算获得煤氧化动力学参数即活化能。邓军等^[42]研究指出 CH₄ 体积分数对煤氧复合进程的活化能影响显著,且 CH₄ 气体致使高变质程度煤低温氧化所需活化能增大 10%,而对低变质程度煤样活化能影响较小。娄和壮等^[43]结合 CH₄ 气氛下煤的 TG-DSC 联用试验指出,当 CH₄ 体积分数小于 24% 时,煤增重阶段的活化能略有降低,煤燃烧阶段的活化能基本稳定在 99.5 kJ/mol;而当 CH₄ 体积分数为 24%~72% 时,增重阶段的活化能不断增加而燃烧阶段的活化能逐渐降低至 62.4 kJ/mol。郝宇等^[48]利用 Coats-Redfern 积分法分析热重试验数据指出,随着 CH₄ 体积分数升高,煤低温氧化活化能增大而指前因子减小,意味着 CH₄ 气体对煤自燃具有明显的抑制作用。胡新成^[40]研究指出含 CH₄ 气氛下缓慢氧化阶段的活化能变化并不大,快速氧化阶段的活化能随 CH₄ 体积分数略有变化,而燃烧阶段的活化能明显高于缓慢和快速氧化阶段,并且随着 CH₄ 体积分数的增加会出现微弱降低。

随着 CH₄ 体积分数或含量的增加,煤自燃热效应及活化能结果见表 3。当前研究工作中 CH₄ 气体对煤氧化过程活化能的影响程度存在差异,但普遍认为:在低体积分数 CH₄ 气氛下,煤的活化能较低且 CH₄ 气体的影响较小,这主要是由于氧气体积分数较高,煤处于富氧氧化状态,CH₄ 气体对煤氧反应的影响较小;在高体积分数 CH₄ 气氛下,氧气体积分数较低,煤处于富燃料状态,加之煤对 CH₄ 气体的吸附性更强,导致 CH₄ 气体占据煤表面的活性吸附位更多,表现为 CH₄ 气体对煤氧反应进程的抑制效应,即活化能增加。然而,MA 等^[33]研究指出,低 CH₄ 体积分数(1%~3%)气氛下的煤表观活化能比无 CH₄ 气氛下的更小,这意味着 CH₄ 气体对煤自燃具有一定的积极作用,但并未给出相应解释。

表 3 含瓦斯条件下的煤自燃热效应及活化能结果

Table 3 Thermal effect and activation energy of coal spontaneous combustion under the gas-containing conditions

甲烷体积分数/%	热效应	活化能		试验方法	文献
		活化能变化	计算方法		
0~3	—	表观活化能(↘)	Arrhenius方程	程序升温试验	[33]
0~4	吸热量(↘有限); 放热量(↘显著)	表观活化能(↗)	Arrhenius方程	C80量热试验	[44]
0~4	低变质程度煤放热量(不明显)	低变质程度煤(不明显)	Arrhenius方程	C80量热试验	[42]
0~4	高变质程度煤放热量(↘) 吸热量(↘不明显) 放热量(↘显著)	高变质程度煤活化能(↗)	—	C80量热试验	[45]
0~72	失重速率(↘); 放热量(↘)	煤增重阶段: 活化能(整体↗) 煤燃烧阶段: 活化能(整体↘) 快速氧化阶段	Coats-Redfern方程	TG-DSC热分析试验	[43]
0~85.7	缓慢氧化阶段: 失重速率(↘) 快速氧化阶段: 放热速度(↘) 热分解与燃烧阶段: 放热速度(↘)	<28.6%活化能(微弱↗) 28.6~57.1%: 活化能(微弱↘) >57.1%: 活化能(↗)	Coats-Redfern方程	TG-DSC热分析试验	[40]
29~86	低温氧化阶段: 反应速率(↘) 加速氧化阶段: 着火温度(↗) 燃烧阶段: 失重速率(↘)	—	—	TG-S/DTG-S热分析试验	[41]
0~100	放热量(↘)	表观活化能(↗)	Coats-Redfern方程	TG-DSC热分析试验	[35]
0~100	—	低温氧化活化能(↗)	Coats-Redfern方程	TG-DSC热分析试验	[48]

2 瓦斯影响下的煤自燃过程微观特征

2.1 官能团

煤自燃过程是不同官能团依次分布逐渐活化, 并与氧气发生反应的自加速升温过程, 这与煤中主要官能团的氧化活性、反应发生条件以及环境温度等有关^[49]。空气组分改变对煤自燃的影响受到关注, 如吕志广等^[50]发现煤自燃气氛中氮气组分比例提高可导致煤中官能团演化特征的改变; 相应地, CH₄ 作为一种含碳量很低的碳氢化合物, 其对煤自燃的影响十分复杂。随着 CH₄ 体积分数的增加, 氧化煤样的主要官能团变化情况见表 4。

MA 等^[33]分析认为在低 CH₄ 体积分数 (< 3%) 气氛下, 随着 CH₄ 体积分数的增加, 芳香族对煤自燃有负效应, 而甲基和亚甲基有正效应; 烷基醚对煤自燃的抑制作用减弱, 而芳香环的抑制作用增强。邓军等^[42]研究指出 CH₄ 气体能够通过抑制煤低温氧化过程的关键活性基团含量, 以延缓煤低温氧化进程, 并且在体积分数为 0~4% 时, CH₄ 气体对煤低温氧化的抑制作用随 CH₄ 体积分数的增加变得显著, CH₄ 对活性基团的抑制程度由大到小依次为含氧官能团、芳香烃、脂肪烃、羟基。张玉涛等^[45]研究指出芳香烃和脂肪烃、羧基的相对含量随着氧化气氛中 CH₄ 体积分数的增大而减小; 羟基和醚键、羰基的相对含量表现出增加趋势, 意味着 CH₄ 气体会抑制煤中脂肪烃的断裂以及羧基的氧化生成。刘超等^[51]将含 CH₄ 气氛下煤

表 4 含瓦斯气氛下氧化煤样的主要官能团变化情况

Table 4 Changes in the main functional groups of oxidized coal samples under the gas-containing atmospheres

甲烷体积分数/%	主要官能团相对变化	文献
0~4	CH ₄ 2%: C—C&C—H (↘); COO— (↘); C—O— (↗); C=O (↗)	[45]
0~4	CH ₄ 4%: C—C&C—H (↘); COO— (↘); C—O— (↗); C=O (↗)	[42]
0~40	—OH (↘); C=O & C—O—C (↘); —CH ₃ & —CH ₂ (↘); Ar—CH&C=C (↘)	[51]
0~45, 80 °C	CH ₄ < 6.0%: —COOH (消耗↗) CH ₄ (6.0%~13.6%): —COOH (消耗↗较小) CH ₄ > 13.6%: —COOH (消耗↘) CH ₄ < 15%: —CH ₃ &—CH ₂ (↗)	[52]
0~45	CH ₄ (15%~25%): —CH ₃ &—CH ₂ (—) CH ₄ > 25%: —CH ₃ &—CH ₂ (↗) CH ₄ < 25%: —CH ₃ &—CH ₂ (↘) CH ₄ > 35%: —OH (↘↗↘) CH ₄ > 25%: —C—O (↗)、COO— (—)	[53]
5~55(实验温度 190、230 °C)	C—H&C—C (↗↘); C—O (↘↗); C=O (↗↘)	[40]

注: (—)代表保持不变。

自燃过程的—COOH 官能团氧化反应分为 3 个阶段: ① 低体积分数阶段 (< 6.0%), CH₄ 气体对—COOH 官能团的氧化消耗具有显著的促进作用; ② 中体积分数阶段 (6.0%~13.6%), CH₄ 气体对—COOH 官能团氧化反应的激励效果减弱; ③ 高体积分数阶段 (> 13.6%), CH₄ 气体的抑制作用显著, 并且抑制效果随着 CH₄ 体积分数的增加而加剧。XU 等^[52]分析认为

当氧化温度为 80 °C 时, CH₄ 气体在低体积分数条件下对—OH 氧化反应有很强的抑制作用, 而对—COOH 氧化反应的抑制作用主要发生于高体积分数条件。

2.2 自由基

煤自燃的自由基理论认为, 煤氧复合是氧分子与煤表面活性基团(自由基)的反应^[49]。在煤自燃过程中, 氧化气氛会改变煤自由基的产生规律进而影响煤氧复合进程^[53]。HU 等^[54]借助电子顺磁共振波谱技术研究了瓦斯气氛下煤氧化过程的自由基特性, 并用朗德因子 g 表征自由基活性。不同氧化温度条件下煤的自由基体积分数和 g 因子随 CH₄ 体积分数的变化如图 3 所示。由图 3 可发现, CH₄ 气体对 g 因子和自由基的影响可大致划分 3 个阶段: ① 在低体积分数阶段 (< 25%), 随 CH₄ 体积分数的升高, g 因子缓慢增加而自由基体积分数快速降低; ② 在中体积分数阶段 (25%~35%), CH₄ 体积分数的升高导致了 g 因子的快速增加, 而自由基体积分数的降低速率减小; ③ 高体

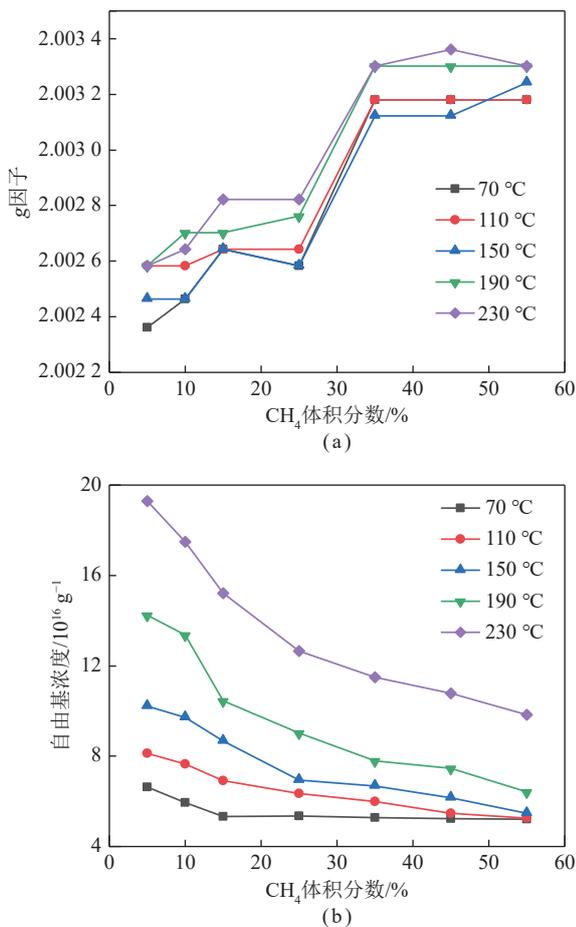


图3 不同氧化温度下煤的自由基参数随 CH₄ 体积分数的变化^[54]

Fig.3 Variation of free radical parameters with CH₄ concentration at different oxidation temperatures^[54]

积分数阶段 (> 35%), g 因子基本保持不变而自由基体积分数降低趋于平缓。这表明氧化气氛中 CH₄ 气体的存在会影响煤氧复合反应过程中自由基的产生与传递, 煤的轨道-自旋耦合作用、煤自由基的种类及含量均随之改变。分析认为, 由于随着 CH₄ 气体的体积分数升高, 煤表面的活性位点会被不参与氧化反应的稀释性气体分子占据, 削弱煤对氧分子的吸附, 从而影响煤氧复合反应进程, 表现为自由基体积分数随 CH₄ 气体体积分数的升高而降低。

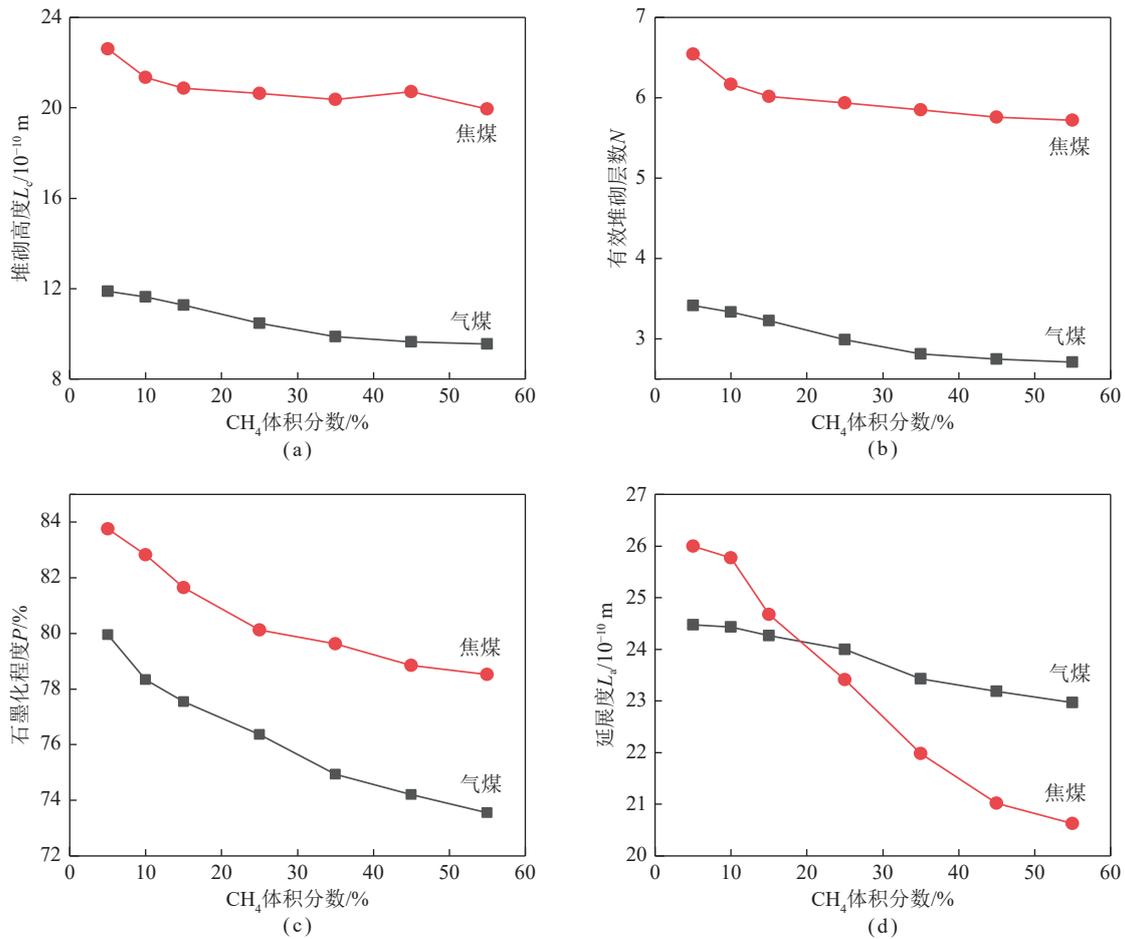
2.3 微晶结构

煤大分子结构常被看作是芳香族化合物的立体结构, 煤的微晶结构参数主要包括芳香层片的堆砌高度 L_c 、有效堆砌层数 N 、层片延展度 L_a 和石墨化程度 P 等^[55]。基于 X 射线衍射 (XRD) 试验, 恒定氧化温度 (190 °C) 下气煤和焦煤样品的微晶结构参数与 CH₄ 体积分数的关系如图 4 所示^[56]。由图 4 可发现, 煤芳香层片的堆砌高度、有效堆砌层数均随着 CH₄ 体积分数的升高出现先快速降低后趋于平缓的趋势, 而延展度表现出相对稳定的降低并且煤的石墨化程度有所减小。这反映出随着氧化气氛中 CH₄ 体积分数的增加, 煤微晶结构单元体积减小, 煤大分子结构单元的芳构化和缩合程度减弱且定向排列程度变差。在相同 CH₄ 体积分数条件下, 焦煤的堆砌高度、有效堆砌层数和石墨化程度参数均要比气煤的更大, 而 2 种煤样的 3 个参数随 CH₄ 体积分数升高的变化趋势基本相同。对于延展度参数, 在 CH₄ 体积分数较低 (小于 10%) 情况下, 2 种煤样的延展度随 CH₄ 体积分数的变化均不明显, 而随着 CH₄ 体积分数的继续增加, 气煤的延展度要比焦煤的表现出更快速的稳定降低趋势, 这可能是由于受高体积分数甲烷气体稀释、竞争吸附等作用影响, 焦煤的芳香微晶层片在横向上的氧化反应要比气煤的更快所致。

胡新成^[40]进一步开展了恒定 CH₄ 体积分数条件下氧化温度对煤芳香微晶结构的影响研究, 发现随着恒定氧化温度的升高, 芳香层片的堆砌层数逐渐增加、堆砌高度不断变大而煤的石墨化程度逐渐加深, 并且该现象会随恒定氧化温度气氛下 CH₄ 体积分数的降低而愈加显著。这说明温升促使氧化煤样的芳香层片发生缩聚作用且空间排列有序性增强, 也反映出 CH₄ 气体对煤氧化反应中煤微晶结构空间定向排列的影响程度与氧化温度的关系密切。

2.4 孔隙特性

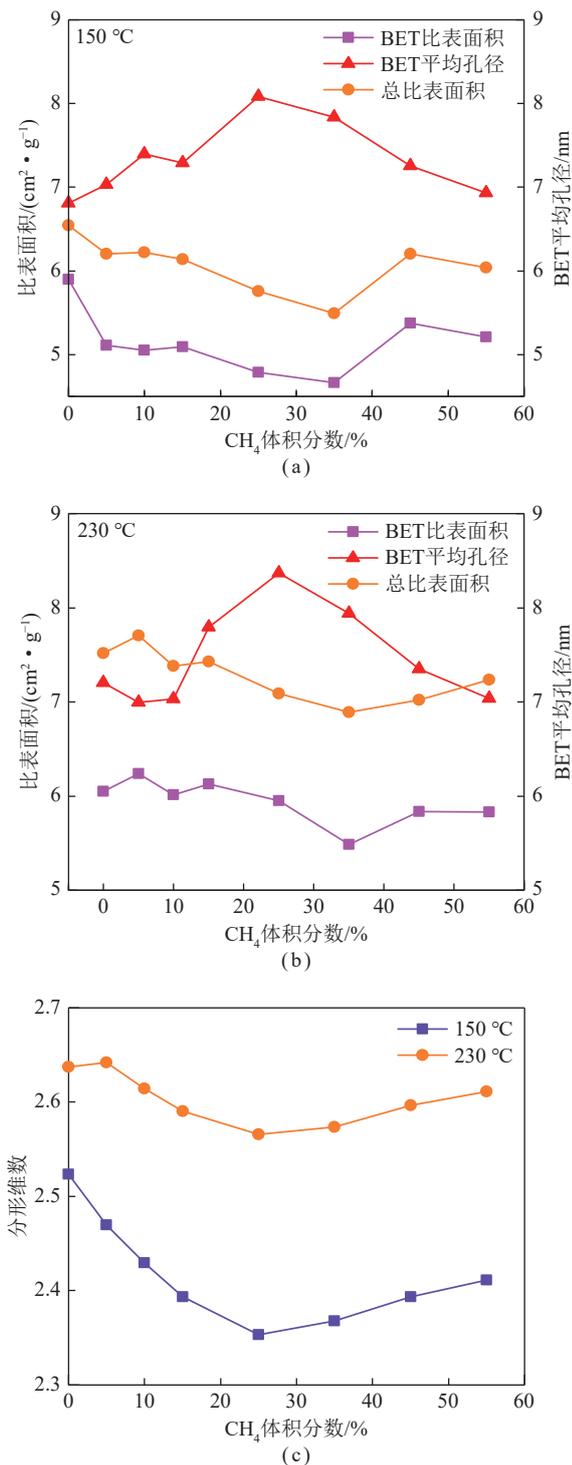
煤的孔隙特性 (孔型、比表面积、孔容等) 是与煤氧化进程密切相关的重要因素, 其可通过在煤氧化进程中影响物理吸氧能力等对煤氧复合反应产生明显

图4 煤的微晶结构参数随 CH₄ 体积分数的变化^[56]Fig.4 Variation of microcrystalline structure parameters of coal with CH₄ concentration^[56]

作用^[57]。不同气体氛围下煤孔隙结构随煤氧化进程的演化特性受到关注。唐一博等^[58]开展了 N₂、CO₂ 和 10% O₂ 气氛下恒温 200 °C 处理 12 h 后煤样(烟煤)的压汞试验,指出预处理煤样的 10 nm 以上孔隙体积明显增加,平均孔径、孔隙率和渗透率均比原煤样的更大,反映出在低氧和惰性气体氛围下热效应促使煤孔隙分布更均匀、孔隙结构复杂性减弱,有利于气体在煤孔隙内的运移。

分形维数是表征多孔材料孔隙表面粗糙度和结构复杂性的重要参数^[59],CAI 等^[39]开展了不同 CH₄ 体积分气氛下恒温 150 °C 和 230 °C 处理 2 h 后煤样(无烟煤)的低温液氮吸附试验,获得的煤比表面积、平均孔径及 FHH(Frenkel-Halsey-Hill)分形维数随 CH₄ 体积分数的变化如图 5 所示。由图 5 可发现,随着氧化气氛中 CH₄ 体积分数的增加,恒温 150 °C 和 230 °C 氧化处理煤样的 BET 平均孔径整体上均表现为先升高后降低的趋势,并在 CH₄ 体积分数为 25% 时达到最大值;氧化处理煤样的 BET 比表面积、总比表面积均随 CH₄ 体积分数的增加出现先快速降低后

略有升高的变化,并且在 CH₄ 体积分数为 35% 时达到最小值。同时,恒温 230 °C 氧化处理煤样的比表面积最小值要大于恒温 150 °C,而前者的 BET 平均孔径要小于后者的,反映出更高的氧化温度有利于煤的微孔隙发育。由图 5(c) 可发现,随着 CH₄ 体积分数的增加,恒温 150 °C 和 230 °C 氧化处理煤样的分形维数存在差异,但整体均表现出先降低后略微升高的趋势,并在 CH₄ 体积分数为 25% 时达到最小值。煤低温氧化过程中 CH₄ 气体对煤微孔隙的影响与 CH₄ 体积分、氧化温度有关,并且 CH₄ 气体使得更高氧化温度下的微孔隙结构趋于复杂。该试验现象可能是由于当 CH₄ 体积分低于一定值(~25%)时,CH₄ 气体对煤氧化反应的抑制效应有限,在高温氧化作用下的煤体内部微孔扩张、连接及贯通发育成更大的孔隙,导致煤的微孔隙平均尺寸增加、比表面积有所减小而微孔隙分布均匀程度随之增强;而随着 CH₄ 体积分数的继续升高,CH₄ 气体对煤氧化反应的抑制作用增强,在氧化过程中的煤微孔隙扩张发育受阻、微孔结构复杂性弱化程度也不再显著。

图5 煤的孔隙结构参数随CH₄体积分数的变化^[39]Fig.5 Variation of pore structure parameters of coal with CH₄ concentration^[39]

目前含瓦斯气氛下煤氧化过程中的孔隙结构演化特征研究尚不足,压汞法、低温液氮吸附法在分析孔径大于2 nm的介孔和更大孔隙方面具有优势^[60],却并不能很好地表征煤的微孔(<2 nm)特性。在今后的研究中还应结合低温CO₂吸附法、小角中子散射法等先进测试技术开展煤的全尺度孔隙表征研究,进

而探析含瓦斯气氛下的煤孔隙特性对煤氧反应的作用机理。

3 讨论与展望

3.1 瓦斯对煤自燃的影响机理探析

煤中90%以上的瓦斯以吸附态为主,在井下采动破碎煤体以及采空区漏风过程中,必然伴随着破碎煤体中残余瓦斯的解吸-扩散-渗流行为^[61]以及漏风流空气(N₂、O₂)与甲烷气体在煤表面的物理竞争吸附解吸作用^[62]。特别是对于高瓦斯易自燃煤层,采空区遗煤的残余瓦斯含量较高,瓦斯对煤氧复合反应的影响不容忽视。

当采空区破碎煤体的残余瓦斯含量较高且处于快速解吸阶段时,煤基质内甲烷气体分压和体积分数会明显高于漏风流空气,从煤基质内表面解吸出的瓦斯主要对涌入的空气产生驱替稀释作用,从而限制了O₂分子与煤活性基团的接触。在煤体残余瓦斯的缓慢解吸阶段,残余CH₄气体解吸能力减弱,漏风流场中吸附性比CH₄弱的N₂和O₂会在浓度梯度作用下侵入煤基质并占据暴露出的吸附空位,该阶段内CH₄与空气的物理竞争吸附引起的置换效应起到关键作用,煤氧复合反应进入有利的发展阶段。煤氧化生热会诱发煤基质孔隙结构演变并加剧残余CH₄气体的解吸,促进O₂分子在煤基质的吸附,残余CH₄气体也逐渐趋于解吸殆尽。当煤氧化升温足够高时,O₂在煤表面的化学吸附占据主导地位,煤氧复合反应的不可逆化学吸附会产生大量的吸附热,煤微观基团活性增强,并会氧化生成CO、C₂H₄等气体产物等;此外当温度超过220 °C后,吸附在煤体表面的O₂在高温作用下会与CH₄进行缓慢的氧化反应^[63],也会加速煤的自燃反应进程。

总之,采空区遗煤或破碎煤体自燃过程中瓦斯对煤氧反应的作用机理可概括为:在煤中残余瓦斯快速解吸阶段,CH₄气体对空气的驱替稀释作用占主导,煤的氧化进程缓慢;在残余瓦斯缓慢解吸阶段,CH₄与空气中N₂、O₂的物理竞争吸附解吸产生的置换效应发挥主要作用,煤-氧复合反应得以发展;而当煤中瓦斯解吸殆尽,O₂分子化学吸附和煤-氧复合反应为主,煤氧化升温进程不断加剧。遗煤瓦斯解吸过程的煤自燃演化机理概念如图6所示。

3.2 吸附态瓦斯对煤自燃的影响特征

当前关于含瓦斯风流/气氛下的煤自燃特性研究工作较为丰富,研究表明游离瓦斯会显著影响煤自燃过程的微宏观特征,其中煤的气体产物生成、放热性能及活化能等均随着氧化环境中的瓦斯体积分数而

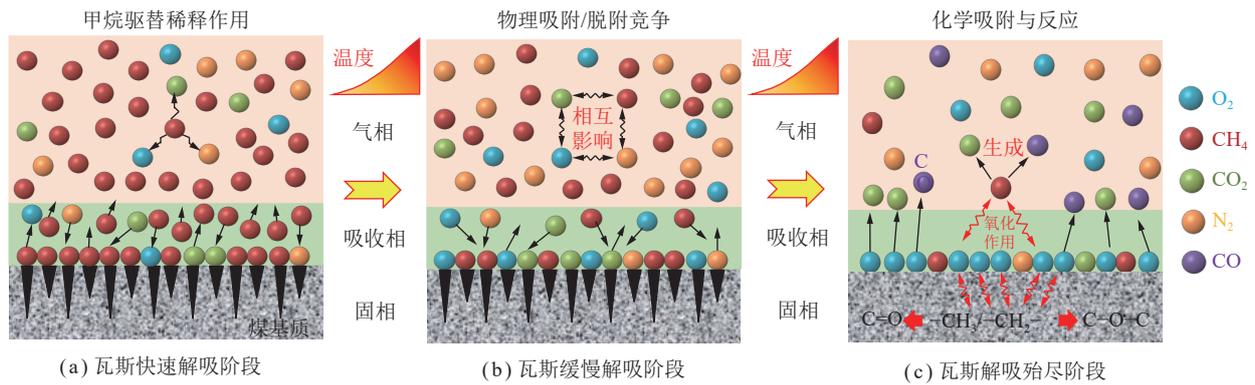


图 6 遗煤瓦斯解吸过程的煤自燃演化机理概念

Fig.6 Concept of coal spontaneous combustion evolution mechanism in the gas desorption process of fractured coals

改变;煤的主要官能团、自由基等的微观结构参数同样随之演变。呈自由运动状态的游离瓦斯与吸附态瓦斯对煤自燃的内在影响机制存在差异,前者主要受到物理竞争吸附解吸和高温条件下化学吸附反应的共同作用^[63]。然而,采空区破碎煤体中的吸附态瓦斯在体积分数梯度和压力梯度的双重作用下自煤基质表面逐渐脱附并“转化”为裂隙场域的游离态瓦斯,其物理过程涉及吸附态气体由煤基质内表面解吸并向裂隙空间的扩散与渗流运动。加之,煤对 CH₄、O₂ 的

吸附性能差异较大,2种气体会产生显著的竞争吸附效应^[64],因此研究含瓦斯煤自燃特性需要考虑吸附态瓦斯的影响,然而这在当前研究工作中基本上是空白。采空区含瓦斯条件下的煤自燃概念如图 7 所示^[61]。为此,系统研究不同赋存状态瓦斯作用下的煤自燃特性以及煤微观结构演变规律,是揭示含瓦斯煤自燃过程氧化动力学行为的基础,有助于系统阐释采空区多场耦合致灾机理。

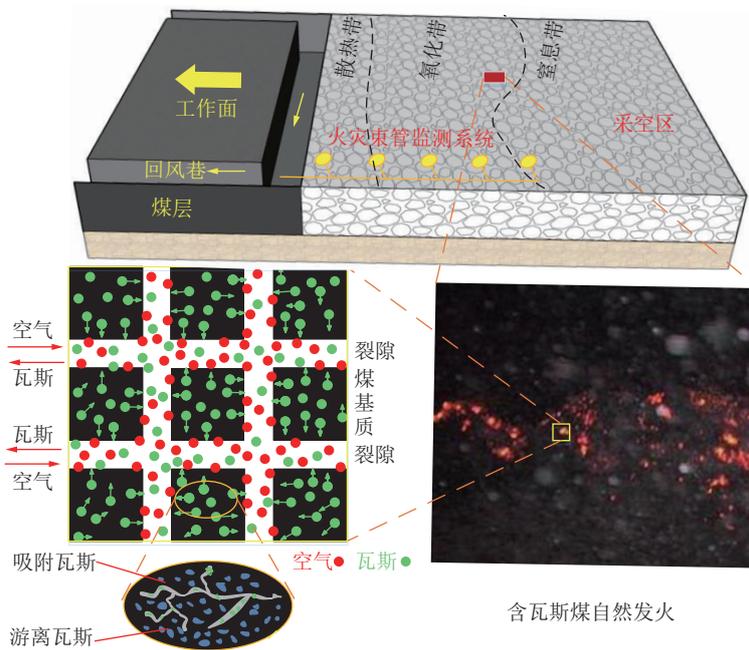


图 7 含瓦斯条件下的煤自燃概念 (修改自文献[57])

Fig.7 Concept of coal spontaneous combustion under gas-containing conditions (Modified from Reference [57])

3.3 采空区含瓦斯煤自燃多场耦合特征

采空区中裂隙场、CH₄ 和 O₂ 体积分数场、温度场等的多场耦合作用是研究瓦斯与煤自燃复合致灾机理及其相互影响的基础问题。众多学者运用数值计算、现场测试等方法开展了研究^[65-67]。如,程卫民等^[68]基于现场可测的采空区遗煤分布场、O₂ 体积分数场、

CH₄ 爆炸界限分布场和温度场的叠加效应,开展了采空区瓦斯与煤自燃耦合灾害危险区域的三维重构。徐宇等^[69]考虑了渗流场、体积分数场和温度场的共同作用,建立了工作面推进中采空区煤自燃与瓦斯涌出数值模型,分析了煤自燃与瓦斯复合致灾隐患区的分布规律。邸帅^[70]、肖峻峰^[71]等基于 CH₄ 与 O₂ 体积分

数场、温度场共同影响的考虑,进行了瓦斯与煤自燃复合灾害协同防治参数的优化研究。夏同等^[72-73]建立了考虑破碎煤体瓦斯解吸-扩散-渗流行为、煤氧化升温动力学共同作用的含瓦斯煤自燃流-固-热-化耦合模型(图8(a)),系统研究了煤岩渗透率、瓦斯解吸参数、煤耗氧参数等对煤自燃的影响。林柏泉团队^[21-22]提出了基于采空区堆积煤岩体渗透率动态演化特性的含瓦斯煤自燃多组分气体流固耦合传热模型(图8(b)),进行了采空区煤自燃环境下的多场分布规律模拟研究,并分析了采空区煤自燃过程中高温区域的瓦斯积聚机理。

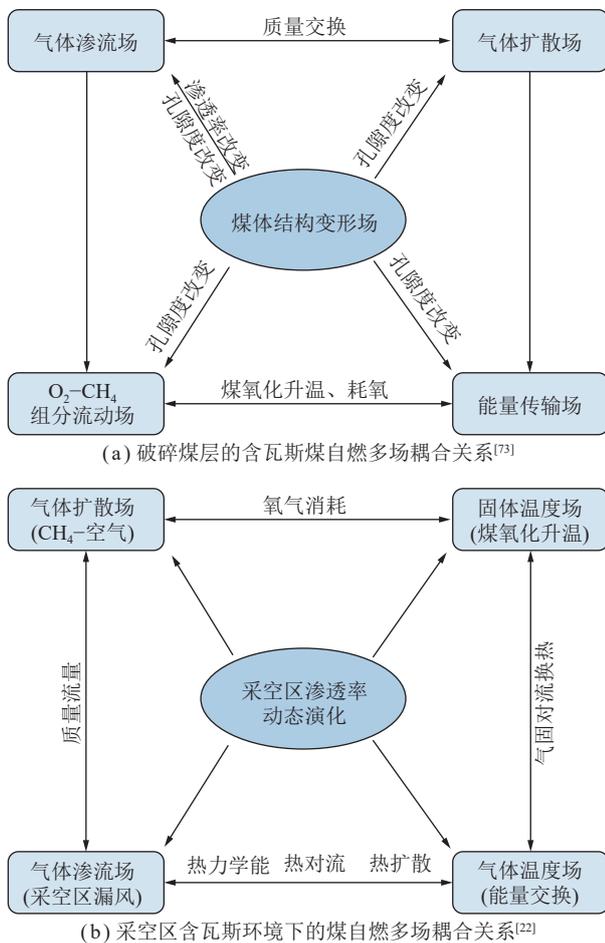


图8 含瓦斯条件下的煤自燃多场耦合关系

Fig.8 Multi-field coupling relationship of coal spontaneous combustion under gas-containing conditions

随着工作面的推进,采空区遗煤(卸压的含瓦斯破碎煤体)在自燃“三带”的滞留时间不断改变,不同区域的遗煤中瓦斯解吸能力和涌出强度存在差异,加上环境等因素的影响,遗煤中的残余瓦斯含量也在动态变化。由此可推断,采空区含瓦斯煤自燃多场耦合效应涉及到工作面推进过程中采空区渗流场、风流场、氧化温度场的时空动态演化分布^[72,74],以及煤体中的

基质(微细观尺度)瓦斯向采空区(宏观尺度)的跨尺度运移。因此,探究煤基质瓦斯解吸-扩散-渗流运动、甲烷-空气多组分气体混合流动、采空区渗透率动态演化以及热量传输(包含煤氧化反应)等多因素、多物理化学场的动态耦合效应,是揭示采空区含瓦斯煤自燃的多场耦合致灾机理、研究采空区复合灾害发展进程、危险区域分布与协同防治技术等的重要基础。

3.4 采空区含瓦斯煤自燃监测预警理论应用

指标气体是表征煤自燃危险性的主要先兆信息,掌握煤自燃指标气体释放特性及其与煤温的关系是实现煤自燃监测预警的关键^[75]。煤自燃具有显著的分段特性,且随着氧化温度升高会规律性地生成不同气体,包括 CO 、 CO_2 、 C_2H_4 和 C_2H_2 等。众多学者结合煤低温氧化过程的气体产物生成规律及分阶段反应温度临界点,建立了多种煤自燃分级预警体系^[76-78],并运用多源信息融合理论开展井下多源火灾信息融合预警技术研究^[79-80]。然而,在指标气体与温度全阶段连续函数关系和煤自燃分段划分方法的研究中,缺乏对含瓦斯煤自燃过程的适用性研究。同时,为降低高体积分数瓦斯涌出对煤自燃预测预报的干扰影响,应提高气体检测的效率和精度,并尽量选用复合指标预测预报方法。

采空区复合灾害环境下的含瓦斯煤自燃进程受到工作面推进、采动破碎煤体瓦斯运动等因素引发的多物理化学场动态变化的影响,表现出显著的跨尺度、多时空、多场耦合特征。因此,采空区含瓦斯煤自燃的监测预警必然面临着不同物理意义的火灾信息和海量数据的实时采集、以及基于智能算法的多源异构性数据分析与应用等难题。此外,常规的采空区煤自燃监测预警技术多依赖于气体束管的远距离传输,具有响应周期长、可靠性差等缺陷^[81-82],并且气样的异地检测忽视了井下原位温度、湿度等复杂环境因素对指标气体体积分数测量的影响^[83],因此难以适应采空区煤自燃长期精准监测预警的需求。因此,采空区含瓦斯煤自燃过程的精准划分方法和全阶段连续预警指标体系构建、高精度宽量程的气体原位检测元器件研发、以及多源异构数据信息融合的预警模型及辨识方法的研究等,是采空区瓦斯与煤自燃复合灾害事故孕育发展状态准确识别亟待突破的瓶颈问题,对于煤矿井下火灾防治及事故应急救援实施具有重要的理论意义。采空区含瓦斯煤自燃监测预警系统应用架构如图9所示。

此外,结合矿井煤自燃形成与发展机理,诸多防火技术被提出,包括注浆技术、均压通风技术、惰气技术、阻化剂技术、凝胶及三相泡沫技术等^[13,84]。对

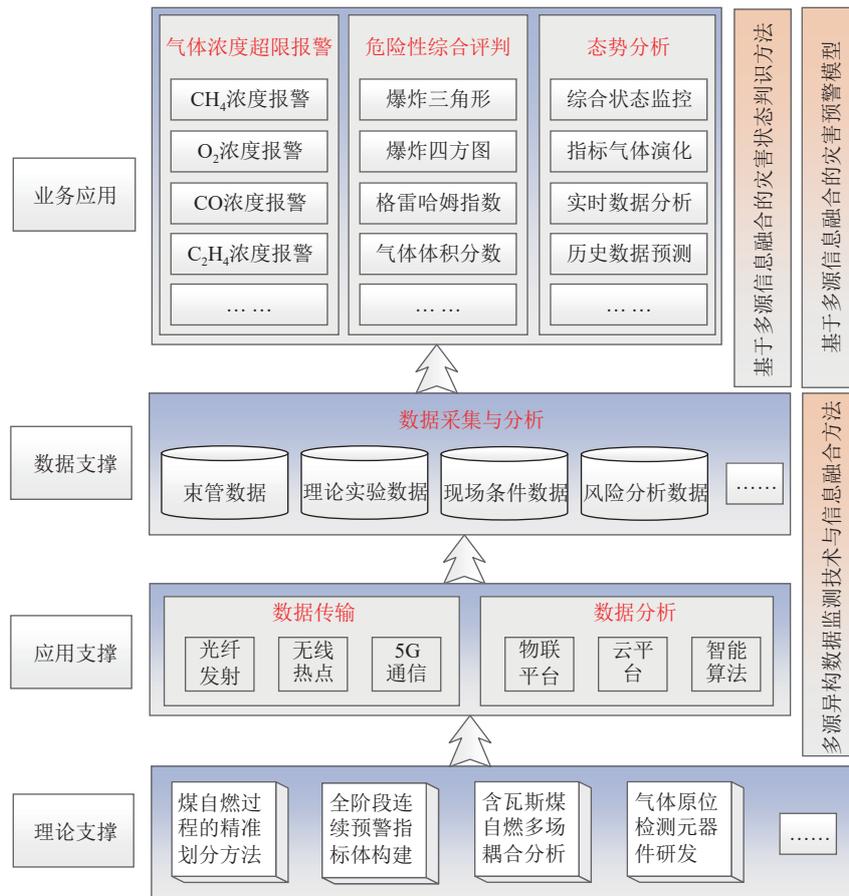


图 9 采空区含瓦斯煤自燃监测预警理论应用架构

Fig.9 Theory and application framework for monitoring and warning of spontaneous combustion of gas-bearing coal in goaf

于高瓦斯易自燃矿井,为降低煤自燃与瓦斯共存致灾风险,还应加强瓦斯灾害与煤自燃灾害协同防治理论与技术的研究。为此,建议重视 3 个方面内容:①合理确定开采技术措施,如选定合理的开拓开采方式、巷道支护技术、回采速度、通风技术参数等,减小煤体自然发火的可能性;②优化瓦斯抽采技术^[8],如提升抽采钻孔封孔质量、合理布置瓦斯抽采工程参数(抽采负压、封孔深度、抽采巷位置^[65]等)、健全瓦斯抽采监测监控系统等,降低抽采技术欠缺对煤自燃的“诱发”作用;③提升防灭火技术,如自燃采空区注惰技术参数的合理选型^[2]等,避免在未预见的传热传质作用下出现 CH₄ 场、O₂ 场和温度场的多场交汇现象,减小煤火治理引发的瓦斯燃烧、爆炸等灾害事故风险。

4 结 语

含瓦斯煤自燃是采空区瓦斯与煤自燃复合灾害的典型形式之一,是瓦斯燃烧爆炸等灾害事故的“点火源”,而当前关于含瓦斯条件下煤自燃特征及内在作用机制尚不明晰,为此围绕我国采空区复合灾害环境下的含瓦斯煤自燃研究工作进行了综述分析。目前,众多的采空区复合灾害多场耦合相似实验平台及

含瓦斯风流/气氛下的煤低温氧化试验装置被提出,并针对采空区环境内瓦斯体积分数对煤自燃的影响开展了诸多研究,但针对遗煤中残余吸附态瓦斯影响煤自燃的试验装置与研究成果较为匮乏。现有研究表明,在氧化气氛中游离瓦斯会导致煤低温氧化气体产物生成量减少、初始生成温度出现“滞后效应”,表明瓦斯会阻碍煤氧反应发展;随着瓦斯体积分数增加,煤放热性能减弱而活化能整体增大,也反映出瓦斯对煤自燃具有抑制作用;相应地,煤自燃过程中的主要官能团、自由基、XRD 微晶结构等的微观特征参数也随着瓦斯体积分数出现规律性演变。考虑到游离瓦斯与吸附态瓦斯的赋存状态差异,推断分析了含瓦斯煤自燃过程中瓦斯对煤氧反应的作用机理,并概括为 CH₄ 对 O₂ 的驱替稀释作用、CH₄ 与 O₂ 的物理竞争吸附解吸引起的置换效应以及高温环境下的 O₂ 分子化学吸附和煤氧复合反应作用。在此基础上,考虑到采空区复合灾害环境的多尺度、多时空及多场耦合的复杂性,凝练提出了吸附态瓦斯影响下的煤自燃特性、采空区含瓦斯煤自燃多场耦合特征以及采空区含瓦斯煤自燃监测预警理论应用 3 个方面的瓶颈问题。

参考文献(References):

- [1] 王双明, 申艳军, 宋世杰, 等. “双碳”目标下煤炭能源地位变化与绿色低碳开发[J]. 煤炭学报, 2023, 48(7): 2599–2612.
WANG Shuangming, SHEN Yanjun, SONG Shijie, et al. Change of coal energy status and green and low-carbon development under the “dual carbon” goal[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(7): 2599–2612.
- [2] 周福宝. 瓦斯与煤自燃共存研究(I): 致灾机理[J]. 煤炭学报, 2012, 37(5): 843–849.
ZHOU Fubao. Study on the coexistence of gas and coal spontaneous combustion(I): Disaster mechanism[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(5): 843–849.
- [3] 袁亮. 我国深部煤与瓦斯共采战略思考[J]. 煤炭学报, 2016, 41(1): 1–6.
YUAN Liang. Strategic thinking of simultaneous exploitation of coal and gas in deep mining[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(1): 1–6.
- [4] 何满潮, 谢和平, 彭苏萍, 等. 深部开采岩体力学研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(16): 2803–2813.
HE Manchao, XIE Heping, PENG Suping, et al. Study on rock mechanics in deep mining engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(16): 2803–2813.
- [5] 张巨峰, 施式亮, 鲁义, 等. 矿井瓦斯与煤自燃共生灾害: 耦合关系、致灾机制、防控技术[J]. 中国安全科学学报, 2020, 30(10): 149–155.
ZHANG Jufeng, SHI Shiliang, LU Yi, et al. Symbiotic disasters of mine gas and coal spontaneous combustion: coupling relationship, disaster mechanism, prevention and control technology[J]. China Safety Science Journal, 2020, 30(10): 149–155.
- [6] 曾明圣, 施式亮, 鲁义, 等. 煤与瓦斯共生灾害现状研究[J]. 能源与环保, 2020, 42(8): 6–9.
ZENG Mingsheng, SHI Shiliang, LU Yi, et al. Research on current situation of coal and gas symbiosis disaster[J]. China Energy and Environmental Protection, 2020, 42(8): 6–9.
- [7] 王连聪, 梁运涛, 罗海珠. 我国矿井热动力灾害理论研究与展望[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(7): 1–9.
WANG Liancong, LIANG Yuntao, LUO Haizhu. Research progress and outlook on theory of thermodynamic disaster of coal mine in China[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(7): 1–9.
- [8] 周福宝, 王鑫鑫, 夏同强. 瓦斯安全抽采及其建模[J]. 煤炭学报, 2014, 39(8): 1659–1666.
ZHOU Fubao, WANG Xinxin, XIA Tongqiang. A model of safe drainage of coal seam gas[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(8): 1659–1666.
- [9] 施式亮, 曾明圣, 李贺, 等. 煤自燃与瓦斯共生灾害演化与预警[J]. 煤矿安全, 2022, 53(9): 9–16.
SHI Shiliang, ZENG Mingsheng, LI He, et al. Coal spontaneous combustion and gas symbiotic disasters evolution and early warning[J]. Safety in Coal Mines, 2022, 53(9): 9–16.
- [10] 王德明, 邵振鲁, 朱云飞. 煤矿热动力重大灾害中的几个科学问题[J]. 煤炭学报, 2021, 46(1): 57–64.
WANG Deming, SHAO Zhenlu, ZHU Yunfei. Several scientific issues on major thermodynamic disasters in coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(1): 57–64.
- [11] 邓军, 何勇军, 翟小伟, 等. 基于控制论的八宝煤矿瓦斯爆炸事故分析[J]. 煤矿安全, 2015, 46(11): 234–237.
DENG Jun, HE Yongjun, ZHAI Xiaowei, et al. Cause analysis of gas explosion accident for Babao Mine based on cybernetics[J]. Safety in Coal Mines, 2015, 46(11): 234–237.
- [12] 王德明. 煤矿热动力灾害及特性[J]. 煤炭学报, 2018, 43(1): 137–142.
WANG Deming. Thermodynamic disaster in coal mine and its characteristics[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(1): 137–142.
- [13] 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]. 煤炭科学技术, 2021, 49(1): 66–99.
QIN Botao, ZHONG Xiaoxing, WANG Deming, et al. Research progress of coal spontaneous combustion process characteristics and prevention technology[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(1): 66–99.
- [14] 姬玉成, 张英华, 黄志安, 等. 褐煤低温氧化分子结构单元变化特性[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2020, 51(9): 2614–2623.
JI Yucheng, ZHANG Yinghua, HUANG Zhi'an, et al. Variation characteristics of molecular structure unit during low-temperature oxidation of lignite coal[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2020, 51(9): 2614–2623.
- [15] CAI J W, YANG S Q, HU X C, et al. Forecast of coal spontaneous combustion based on the variations of functional groups and micro-crystalline structure during low-temperature oxidation[J]. Fuel, 2019, 253: 339–348.
- [16] 王继仁, 金智新, 邓存宝. 煤自燃量子化学理论[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [17] 王德明. 煤氧化动力学理论及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [18] SONG S, QIN B T, XIN H H, et al. Exploring effect of water immersion on the structure and low-temperature oxidation of coal: A case study of Shendong long flame coal, China[J]. Fuel, 2018, 234: 732–737.
- [19] SHI Q L, QIN B T, LIANG H J, et al. Effects of igneous intrusions on the structure and spontaneous combustion propensity of coal: a case study of bituminous coal in Daxing Mine, China[J]. Fuel, 2018, 216: 181–189.
- [20] 邓军, 赵婧昱, 张嫵妮, 等. 不同变质程度煤二次氧化自燃的微观特性试验[J]. 煤炭学报, 2016, 41(5): 1164–1172.
DENG Jun, ZHAO Jingyu, ZHANG Yanni, et al. Micro-characteristics of spontaneous combustion of second oxidation with different rank coals[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(5): 1164–1172.
- [21] 林柏泉, 李庆钊, 周延. 煤矿采空区瓦斯与煤自燃复合热动力灾害多场演化研究进展[J]. 煤炭学报, 2021, 46(6): 1715–1726.
LIN Baiquan, LI Qingzhao, ZHOU Yan. Research advances about multi-field evolution of coupled thermodynamic disasters in coal mine goaf[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(6): 1715–1726.
- [22] ZHENG Y N, LI Q Z, ZHU P F, et al. Study on multi-field evolution and influencing factors of coal spontaneous combustion in goaf[J]. Combustion Science and Technology, 2023, 195(2):

- 247–264.
- [23] 余照阳. 高瓦斯易自燃采空区流场特征及遗煤氧化特性研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2018.
YU Zhaoyang. Flow field characteristics and residual coal oxidation characteristics of highly gassy and spontaneous combustion prone goaf[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2018.
- [24] 余照阳, 杨胜强, 胡新成. 基于采场三维相似模型的流场特性实验分析[J]. 煤矿安全, 2016, 47(5): 6–9.
YU Zhaoyang, YANG Shengqiang, HU Xincheng. Experimental analysis of flow field characteristics based on three-dimensional model[J]. Safety in Coal Mines, 2016, 47(5): 6–9.
- [25] 李林. 采空区煤自燃环境瓦斯运移积聚规律研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2021.
LI Lin. Study on methane migration and accumulation in spontaneous coal combustion environment of a coal mined-out area[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2021.
- [26] LI Lin, QIN Botao, MA Dong, et al. Unique spatial methane distribution caused by spontaneous coal combustion in coal mine goafs: An experimental study[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2018, 116: 199–207.
- [27] SU H T, ZHOU F B, SONG X L, et al. Risk analysis of coal self-ignition in longwall gob: A modeling study on three-dimensional hazard zones[J]. *Fire Safety Journal*, 2016, 83: 54–65.
- [28] SU H T, ZHOU F B, SONG X L, et al. Risk analysis of spontaneous coal combustion in steeply inclined longwall gobs using a scaled-down experimental set-up[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2017, 111: 1–12.
- [29] 宋万新. 含瓦斯风流对煤自燃氧化特性影响的理论及应用研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2013.
SONG Wanxin. Theoretical and applied studies for effects of methane-contained airflow on coal spontaneous combustion characteristics[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2013.
- [30] 周亮. 高瓦斯易自燃煤层采空区遗煤自燃预警研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2020.
ZHOU Liang. Study on gob coal spontaneous combustion early warning in high gassy and spontaneous combustion coal seam[D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology, 2020.
- [31] LI S K, TIAN F C, JIANG W Z, et al. Experimental investigation on coal desorption characteristics and spontaneous combustion properties evolution under the coupled effect of temperature and pressure[J]. *Fuel*, 2023, 351: 128829.
- [32] 常绪华. 采空区煤自燃诱发瓦斯燃烧(爆炸)规律及防治研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2014.
CHANG Xuhua. Law and prevention research of coal spontaneous combustion inducing gas burning or explosion in goaf[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2014.
- [33] MA L, GUO R Z, GAO Y, et al. Study on coal spontaneous combustion characteristics under methane-containing atmosphere[J]. *Combustion Science and Technology*, 2019, 191(8): 1456–1472.
- [34] 宋万新, 杨胜强, 蒋春林, 等. 含瓦斯风流条件下煤自燃产物 CO 生成规律的实验研究[J]. 煤炭学报, 2012, 37(8): 1320–1325.
SONG Wanxin, YANG Shengqiang, JIANG Chunlin, et al. Experimental research on the formation of CO during coal spontaneous combustion under the condition of methane-contained airflow[J]. *Journal of China Coal Society*, 2012, 37(8): 1320–1325.
- [35] 郝宇, 徐龙君, 陆伟, 等. 不同瓦斯气氛下煤自燃特性及动力学研究[J]. 煤炭转化, 2018, 41(4): 1–6.
HAO Yu, XU Longjun, LU Wei, et al. Research on spontaneous combustion characteristics and kinetics of coal under different gas atmospheres[J]. *Coal Conversion*, 2018, 41(4): 1–6.
- [36] ZHOU L, DAI G L, QIN R X, et al. Low-temperature oxidation characteristics of bituminous coal with different gas contents: a case study[J]. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 2021, 43(13): 1635–1648.
- [37] 邓军, 李鹏, 程文东, 等. 瓦斯对煤自燃特性参数影响的实验研究[J]. 煤矿安全, 2014, 45(11): 31–33, 37.
DENG Jun, LI Peng, CHENG Wendong, et al. Experimental study on influence of gas on characteristic parameters of coal spontaneous combustion[J]. Safety in Coal Mines, 2014, 45(11): 31–33, 37.
- [38] 刘敬. 不同瓦斯含量煤样自燃特性实验研究[J]. 煤矿安全, 2016, 47(5): 26–29.
LIU Jing. Experiment study on spontaneous combustion of coal under different gas adsorption pressure[J]. Safety in Coal Mines, 2016, 47(5): 26–29.
- [39] CAI J W, YANG S Q, HU X C, et al. The relationship between functional groups and gaseous productions and micropore structures development of coal oxidized at low temperature under methane-diluted atmospheres[J]. *Combustion Science and Technology*, 2019, 191(8): 1337–1353.
- [40] 胡新成. 含瓦斯氧化气氛对自燃氧化过程中煤微观理化特性及宏观热效应影响研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2018.
HU Xincheng. Micro physicochemical properties and macro thermal effect of coal influenced by methane-containing environment during oxidation[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2018.
- [41] LIU H W, WANG F, REN T. Research on the characteristics of the coal–oxygen reaction in a lean-oxygen environment caused by methane[J]. *Energy & Fuels*, 2019, 33(9): 9215–9223.
- [42] 邓军, 周佳敏, 白祖锦, 等. 瓦斯对煤低温氧化过程微观结构及热反应性的影响研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(1): 304–312.
DENG Jun, ZHOU Jiamin, BAI Zujin, et al. Effect of gas on microstructure and thermal reactivity of coal during low temperature oxidation[J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(1): 304–312.
- [43] 娄和壮, 贾廷贵. TG-DSC 联用研究瓦斯气氛对煤自燃热特性的影响[J]. 中国安全科学学报, 2019, 29(11): 77–82.
LOU Hezhuang, JIA Tinggui. Study on thermal characteristics of coal spontaneous combustion in gas atmosphere by TG-DSC coupling techniques[J]. *China Safety Science Journal*, 2019, 29(11): 77–82.
- [44] ZHANG Y T, ZHANG Y B, LI Y Q, et al. Low-temperature oxidation characteristics of coals at the methane-containing atmosphere[J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2022, 147(4): 3379–3389.
- [45] 张玉涛, 张园勃, 李亚清, 等. 低瓦斯气氛下煤氧化热效应和关键基团演变特性[J]. 中国矿业大学学报, 2021, 50(4): 776–783.

- ZHANG Yutao, ZHANG Yuanbo, LI Yaqing, et al. Thermal effect of coal oxidation and evolution properties of key functional groups of coal oxidation at low gas atmospheres[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2021, 50(4): 776–783.
- [46] 陆伟, 胡千庭. 煤低温氧化结构变化规律与煤自燃过程之间的关系[J]. *煤炭学报*, 2007, 32(9): 939–944.
LU Wei, HU Qianting. Relation between the change rules of coal structures when being oxidized and spontaneous combustion process of coal[J]. *Journal of China Coal Society*, 2007, 32(9): 939–944.
- [47] 徐长富, 殷文韬, 姚海飞. 基于活化能指标的煤自燃最佳含水率研究[J]. *安全与环境学报*, 2018, 18(4): 1301–1306.
XU Changfu, YIN Wentao, YAO Haifei. On the optimal moisture content rate for the coal spontaneous combustion based on the activation energy index[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2018, 18(4): 1301–1306.
- [48] 郝宇, 叶正亮. 不同甲烷气氛下煤自燃指标气体及活化能研究[J]. *工矿自动化*, 2019, 45(11): 65–69.
HAO Yu, YE Zhengliang. Research on index gas and activation energy of coal spontaneous combustion under different methane atmosphere[J]. *Industry and Mine Automation*, 2019, 45(11): 65–69.
- [49] 王德明, 辛海会, 戚绪尧, 等. 煤自燃中的各种基元反应及相互关系: 煤氧化动力学理论及应用[J]. *煤炭学报*, 2014, 39(8): 1667–1674.
WANG Deming, XIN Haihui, QI Xuyao, et al. Mechanism and relationships of elementary reactions in spontaneous combustion of coal: The coal oxidation kinetics theory and application[J]. *Journal of China Coal Society*, 2014, 39(8): 1667–1674.
- [50] 吕志广, 徐永亮, 刘泽健, 等. 不同气体环境长焰煤氧化进程基团演化特性[J]. *煤矿安全*, 2022, 53(2): 46–52.
LYU Zhiguang, XU Yongliang, LIU Zejian, et al. Groups evolution of long-flame coal oxidation process under various air ambience[J]. *Safety in Coal Mines*, 2022, 53(2): 46–52.
- [51] 刘超, 郑万成, 张镭, 等. 瓦斯对煤自燃过程中官能团演变的影响[J]. *能源与环保*, 2021, 43(7): 148–155.
LIU Chao, ZHENG Wancheng, ZHANG Lei, et al. Influence of gas on evolution of functional groups during coal spontaneous combustion[J]. *China Energy and Environmental Protection*, 2021, 43(7): 148–155.
- [52] XU Q, YANG S Q, TANG Z Q, et al. Optimum oxidation temperature of coal bed for methane desorption in the process of CBM extraction[J]. *Fuel*, 2020, 262: 116625.
- [53] XU Q, YANG S Q, HU X C, et al. Low-temperature oxidation of free radicals and functional groups in coal during the extraction of coalbed methane[J]. *Fuel*, 2019, 239: 429–436.
- [54] HU X C, YU Z Y, CAI J W, et al. The influence of methane on the development of free radical during low-temperature oxidation of coal in gob[J]. *Fuel*, 2022, 330: 125369.
- [55] 王彩萍, 邓军, 张熾妮. 影响煤氧化自燃的微观结构特征分析[J]. *西安科技大学学报*, 2016, 36(1): 8–12.
WANG Caiping, DENG Jun, ZHANG Yanni. Effect of micro structure characteristics on coal spontaneous combustion[J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2016, 36(1): 8–12.
- [56] HU X C, YU Z Y, CAI J W, et al. Crystalline structure development of coal during low-temperature oxidation under lean-oxygen environments caused by methane emission in gob[J]. *Fuel*, 2023, 335: 127044.
- [57] 董宪伟, 王福生, 孟亚宁. 煤的微观孔隙结构对其自燃倾向性的影响[J]. *煤炭科学技术*, 2014, 42(11): 41–45, 49.
DONG Xianwei, WANG Fusheng, MENG Yaning. Coal spontaneous combustion tendency affected by coal microscopic pore structure[J]. *Coal Science and Technology*, 2014, 42(11): 41–45, 49.
- [58] 唐一博, 王俊峰, 薛生, 等. 密闭火区内惰性环境下烟煤自燃特性变化[J]. *煤炭学报*, 2016, 41(2): 439–443.
TANG Yibo, WANG Junfeng, XUE Sheng, et al. Variation in spontaneous combustion properties of bituminous under inert environment of underground fire zone[J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(2): 439–443.
- [59] 李子文, 郝志勇, 庞源, 等. 煤的分形维数及其对瓦斯吸附的影响[J]. *煤炭学报*, 2015, 40(4): 863–869.
LI Ziwen, HAO Zhiyong, PANG Yuan, et al. Fractal dimensions of coal and their influence on methane adsorption[J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, 40(4): 863–869.
- [60] CHEN M Y, YANG Y P, GAO C H, et al. Investigation of the fractal characteristics of adsorption-pores and their impact on the methane adsorption capacity of various rank coals via N₂ and H₂O adsorption methods[J]. *Energy Science & Engineering*, 2020, 8(9): 3228–3243.
- [61] XIA T Q, ZHOU F B, GAO F, et al. Simulation of coal self-heating processes in underground methane-rich coal seams[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2015, 141: 1–12.
- [62] 李帅魁, 姜文忠, 田富超. 不同温度下气体竞争吸附特性对煤微观结构响应研究进展[J]. *煤矿安全*, 2022, 53(11): 167–175.
LI Shuakui, JIANG Wenzhong, TIAN Fuchao. Research progress on response of gas competitive adsorption characteristics on coal microstructure at different temperatures[J]. *Safety in Coal Mines*, 2022, 53(11): 167–175.
- [63] 郑苑楠. 采空区含瓦斯环境下煤自燃致灾机理研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2021.
ZHENG Yuannan. Study on disaster mechanism of coal spontaneous combustion in the goaf with gas environment[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2021.
- [64] ZHENG Y N, LI Q Z, ZHANG G Y, et al. Effect of multi-component gases competitive adsorption on coal spontaneous combustion characteristics under goaf conditions[J]. *Fuel Processing Technology*, 2020, 208: 106510.
- [65] 杨胜强, 秦毅, 孙家伟, 等. 高瓦斯易自燃煤层瓦斯与自燃复合致灾机理研究[J]. *煤炭学报*, 2014, 39(6): 1094–1101.
YANG Shengqiang, QIN Yi, SUN Jiawei, et al. Research on coupling hazard mechanism of mine gas and coal fire for a gassy and high spontaneous combustion propensity coal seam[J]. *Journal of China Coal Society*, 2014, 39(6): 1094–1101.
- [66] 秦跃平, 刘伟, 杨小彬, 等. 基于非达西渗流的采空区自然发火数值模拟[J]. *煤炭学报*, 2012, 37(7): 1177–1183.
QIN Yueping, LIU Wei, YANG Xiaobin, et al. Numerical simulation of impact of non-Darcy seepage on spontaneous combustion in

- goaf[J]. *Journal of China Coal Society*, 2012, 37(7): 1177–1183.
- [67] 贾廷贵, 姜和壮, 刘剑, 等. 综放采空区瓦斯与煤自燃多场耦合模拟研究[J]. *中国安全生产科学技术*, 2019, 15(9): 88–93.
- JIA Tinggui, LOU Hezhuang, LIU Jian, et al. Simulation study on multi-field coupling of gas and coal spontaneous combustion in goaf of fully mechanized caving face[J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2019, 15(9): 88–93.
- [68] 程卫民, 张孝强, 王刚, 等. 综放采空区瓦斯与遗煤自燃耦合灾害危险区域重建技术[J]. *煤炭学报*, 2016, 41(3): 662–671.
- CHENG Weimin, ZHANG Xiaoqiang, WANG Gang, et al. Reconstruction technology of gas and coal spontaneous combustion coupled hazard in fully mechanized caving goaf[J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(3): 662–671.
- [69] 徐宇, 李孜军, 翟小伟, 等. 开采过程中采空区煤自燃与瓦斯复合致灾隐患区域研究[J]. *煤炭学报*, 2019, 44(S2): 585–592.
- XU Yu, LI Zijun, ZHAI Xiaowei, et al. Potential coupled hazard zone of coal spontaneous combustion and gas in goaf under mining condition[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(S2): 585–592.
- [70] 邸帅, 王继仁, 郝朝瑜, 等. 多场耦合作用下瓦斯与煤自燃协同预防数值模拟[J]. *安全与环境学报*, 2018, 18(2): 497–503.
- DI Shuai, WANG Jiren, HAO Chaoyu, et al. Numerical simulation of synergistic prevention from the gas and coal spontaneous combustion under multifield coupling[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2018, 18(2): 497–503.
- [71] 肖峻峰, 樊世星, 卢平, 等. 高瓦斯易自燃工作面高抽巷瓦斯抽采与采空区遗煤自燃相互影响研究[J]. *中国安全生产科学技术*, 2016, 12(2): 20–26.
- XIAO Junfeng, FAN Shixing, LU Ping, et al. Research on interaction between gas extraction from high extraction roadway and spontaneous combustion of residual coal in the goaf for high gas and spontaneous combustion working face[J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2016, 12(2): 20–26.
- [72] 夏同强. 瓦斯与煤自燃多场耦合致灾机理研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2016.
- XIA Tongqiang. Multi-physics coupling mechanism of co-existence hazards for coal spontaneous combustion and gas[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2016.
- [73] XIA T Q, WANG X X, ZHOU F B, et al. Evolution of coal self-heating processes in longwall gob areas[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2015, 86: 861–868.
- [74] 周福宝, 夏同强, 史波波. 瓦斯与煤自燃共存研究(II): 防治新技术[J]. *煤炭学报*, 2013, 38(3): 353–360.
- ZHOU Fubao, XIA Tongqiang, SHI Bobo. Coexistence of gas and coal spontaneous combustion(II): New prevention and control technologies[J]. *Journal of China Coal Society*, 2013, 38(3): 353–360.
- [75] 邓军, 白祖锦, 肖旸, 等. 煤自燃指标体系试验研究[J]. *安全与环境学报*, 2018, 18(5): 1756–1761.
- DENG Jun, BAI Zujin, XIAO Yang, et al. Experimental investigation and examination for the indexical system of the coal spontaneous combustion[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2018, 18(5): 1756–1761.
- [76] ZHU H Q, SHENG K, ZHANG Y L, et al. The stage analysis and countermeasures of coal spontaneous combustion based on “five stages” division[J]. *PLoS One*, 2018, 13(8): e0202724.
- [77] 任万兴, 郭庆, 石晶泰, 等. 基于标志气体统计学特征的煤自燃预警指标构建[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(6): 1747–1758.
- REN Wanxing, GUO Qing, SHI Jingtai, et al. Construction of early warning indicators for coal spontaneous combustion based on statistical characteristics of index gases[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(6): 1747–1758.
- [78] 郭军, 刘华, 金彦, 等. 地下煤自燃隐蔽火源探测方法综述及新技术展望[J]. *中国安全科学学报*, 2022, 32(8): 111–119.
- GUO Jun, LIU Hua, JIN Yan, et al. Summary of underground hidden coal spontaneous combustion fire source detection methods and prospect of new technologies[J]. *China Safety Science Journal*, 2022, 32(8): 111–119.
- [79] 邓军, 肖旸, 陈晓坤, 等. 矿井火灾多源信息融合预警方法的研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2011, 28(4): 638–643.
- DENG Jun, XIAO Yang, CHEN Xiaokun, et al. Study on early warning method of multi-source information fusion for coal mine fire[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2011, 28(4): 638–643.
- [80] 张巨峰, 施式亮, 鲁义, 等. 大数据下瓦斯与煤自燃共生灾害智能预警系统: 数据特征、应用架构、关键技术[J]. *中国安全科学学报*, 2021, 31(9): 60–66.
- ZHANG Jufeng, SHI Shiliang, LU Yi, et al. Intelligent early warning system of gas and coal spontaneous combustion disaster based on big data: data characteristics, application structure and key technologies[J]. *China Safety Science Journal*, 2021, 31(9): 60–66.
- [81] 梁运涛, 田富超, 冯文彬, 等. 我国煤矿气体检测技术研究进展[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(6): 1701–1714.
- LIANG Yuntao, TIAN Fuchao, FENG Wenbin, et al. Research progress of coal mine gas detection technology in China[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(6): 1701–1714.
- [82] KONG B, LI Z H, YANG Y L, et al. A review on the mechanism, risk evaluation, and prevention of coal spontaneous combustion in China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24(30): 23453–23470.
- [83] TIAN FUCHAO, LIANG YUNTAO, ZHU HONGQING, et al. Application of a novel detection approach based on non-dispersive infrared theory to the *in situ* analysis on indicator gases from underground coal fire[J]. *Journal of Central South University*, 2022, 29(6): 1840–1855.
- [84] 朱红青, 胡超, 张永斌, 等. 我国矿井内因火灾防治技术研究现状[J]. *煤矿安全*, 2020, 51(3): 88–92.
- ZHU Hongqing, HU Chao, ZHANG Yongbin, et al. Research status on prevention and control technology of coal spontaneous fire in China[J]. *Safety in Coal Mines*, 2020, 51(3): 88–92.