预氧化与浸水作用下气煤氧化燃烧特征试验研究*

郝建峰[1],张遵国[2],陈岳振[1],唐朝[2],丁林林[1],钱清侠[2],赵小龙[1]

(1.同煤大唐塔山煤矿有限公司, 山西 大同市 034400;
2.辽宁工程技术大学 安全科学与工程学院, 辽宁 葫芦岛市 125105)

摘要:为探究预氧化和浸水综合作用对煤氧化燃烧特征的影响,采用气煤开展不同预氧化温度和浸水条件下的热重分析试验,分析了不同预氧化温度和浸水条件下煤的氧化燃烧特征温度、活化能和反应速率,探讨了预氧化和浸水条件对煤氧化燃烧的作用机理。结果表明:与未氧化原煤相比,150 ℃和240 ℃预氧化作用下煤的燃烧失重阶段特征温度分别降低了2.8%、0.2%,活化能分别降低了4.9%、48.7%,预氧化增大了煤的自燃危险性,且温度越高越易复燃;与240 ℃预氧化煤相比,240 ℃高温预氧化煤再浸水会显著降低煤的氧化燃烧特征温度和活化能,氧化增重阶段和燃烧失重阶段的特征温度分别降低了65.2 ℃、16.3 ℃,燃烧失重阶段活化能降低了7.8 kJ/mol,煤自燃危险性增大。浸水处理后煤的燃烧反应速率会降低,原煤浸水煤样较原煤在燃烧阶段的指前因子($\ln A$)减小了6.3%,240 ℃预氧化再浸水处理煤样的$\ln A$则降低了60.4%。当煤体发生高温氧化时,不宜直接进行注水降温,应优先采用注低温氮气、液态二氧化碳等其他防灭火措施。

关键词:预氧化煤;浸水作用;热重分析;特征温度;活化能
中图分类号:TD75+2 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)03-0191-07

Experimental Study on the Oxidation and Combustion Characteristics of Gas-Coal Under Pre-Oxidation and Water Immersion Conditions

HAO Jianfeng[1], *ZHANG Zunguo*[2], *CHEN Yuezhen*[1], *TANG Chao*[2], *DING Linlin*[1], *QIAN Qingxia*[2], *ZHAO Xiaolong*[1]
(1.Tongmei Datang Tashan Coal Mine Co., Ltd., Datong, Shanxi 034400, China;
2.College of Safety Science and Engineering, Liaoning Technical University, Huludao, Liaoning 125105, China)

Abstract: To investigate the combined effects of pre-oxidation and water immersion on the characteristics of coal oxidation combustion, a thermogravimetric analysis was performed on gas-coal samples subjected to various pre-oxidation temperatures and water immersion conditions. The characteristic temperature, activation energy and reaction rate of coal oxidation combustion under different conditions were analyzed, and the mechanism of the effects of pre-oxidation and water immersion on coal oxidation combustion was discussed. The results indicate that, compared to unoxidized raw coal, the characteristic temperatures of the combustion weight loss stage decreased by 2.8% and 0.2% at 150 ℃ and 240 ℃ pre-oxidation temperatures, respectively, while the activation energies decreased by 4.9% and 48.7%, respectively. Pre-oxidation increased the risk of coal spontaneous combustion, with higher pre-oxidation temperatures leading to a greater propensity for reignition. Furthermore, compared to pre-oxidized coal at 240 ℃, additional water immersion of this high-temperature pre-oxidized coal significantly lowered its oxidative combustion characteristic temperature and activation energy. The characteristic temperatures for the oxidation weight gain stage and combustion weight loss stage decreased by 65.2 ℃ and 16.3 ℃, respectively. The activation energy of the combustion mass loss stage decreases by 7.8 kJ·mol^{-1}, indicating an increased risk of coal spontaneous combustion. The combustion reaction rate of coal decreases after water immersion. The value of pre-exponential factor($\ln A$) for raw coal after water immersion is reduced by 6.3% compared with raw coal, while for coal samples pre-oxidized at 240 ℃ and then treated with water immersion, $\ln A$ is decreased by 60.4%. When coal bodies undergo high-temperature oxidation, direct water injection for cooling is not recommended. Instead, other fire prevention and suppression measures such as injecting low-temperature nitrogen or liquid carbon dioxide should be prioritized.

Key words: Pre-oxidized coal, Water immersion, Thermogravimetric analysis, Characteristic temperature, Activation energy

---

* **收稿日期**:2025-04-27
基金项目:国家自然科学基金资助项目(52304220);辽宁省教育厅高校基本科研项目(LJ242410147082)
作者简介:郝建峰(1971—),男,山西大同人,高级工程师,主要从事矿井"一通三防"方面的技术管理和研究工作。E-mail:414250390@163.com
通信作者:张遵国(1986—),男,重庆大足人,博士,副教授,主要从事矿井灾害防治及CO_2地质封存方面的研究。E-mail:zhang_zung@163.com

0 引言

我国90%以上的煤层属于自燃或易自燃煤层,严重影响煤矿安全生产[1-2]。随着我国采煤设备向机械化、自动化方向发展,采煤工作面推进速度加快,可以将遗煤快速甩入窒息带[3-4],降低采空区自然发火的危险性。但采煤工作面进入末采阶段后,由于撤架时间较长,遗煤易发生氧化自燃[5],现场常采用注水降温措施防治采空区自然发火[6]。

国内外有关研究者对煤在不同预氧化条件下的氧化燃烧特征开展了大量研究。WANG 等[7]通过程序升温试验对预氧化煤的氧化特性进行研究,发现临界温度预氧化抑制了煤的二次低温氧化过程,促进了煤在高温阶段的氧化过程。ZOU 等[8]采用热重分析试验分析了不同变质程度预氧化煤样的氧化燃烧特征,发现预氧化煤被再次氧化时的活化能和特征温度都低于原煤,具有更易自燃的特性。GAO 等[9]对人工氧化煤和采空区自然氧化煤开展了热重分析和红外光谱试验,指出煤二次氧化过程吸收了一次氧化过程中释放的热量,煤具有更高的活性,导致一次氧化后更容易发生二次氧化。李金虎等[10]利用电子顺磁波谱和傅里叶变换红外光谱等微观手段分析了煤氧化过程中自由基和活性官能团的演化行为,指出预氧化煤降温过程中活性自由基和烷基官能团减少,抑制了煤的氧化反应活性。邓军等[11]对潘集矿原煤和氧化煤在不同温度下的表观活化能进行了计算,发现原煤和氧化煤的表观活化能在50～60 ℃范围内产生交叉,试验温度在50 ℃以下时氧化煤表观活化能小于原煤,试验温度超过60 ℃时氧化煤表观活化能大于原煤。部分学者对不同浸水条件下煤的氧化燃烧特征进行了研究。郑凯月等[12]对涡北煤矿浸水煤的氧化自燃特性开展了试验研究,认为经浸水风干后煤体的矿物质含量减少、活性官能团数量增加,TG-DSC 曲线(TG 曲线为程序升温过程测试样品质量百分比与温度的关系曲线、DSC 曲线为测量样品和参比物的功率差与温度关系曲线)特征温度降低、氧化放热量增加,自燃倾向性增强。邓存宝等[13]、乔玲等[14]对不同变质程度浸水煤的氧化自燃特性进行了试验研究,发现浸水煤着火活化能降低为原煤的0.51～0.89,具有更易自燃的特点。牛会永等[15]开展了浸水风干烟煤的微观结构及自燃升温特性研究,发现煤样浸泡90 d后,微孔对比表面积和总孔体积的贡献占比最大,且活化能随着浸水时间的增加越来越低。

综上所述,现有研究普遍是单独分析预氧化作用和浸水作用对煤氧化燃烧特征的影响。由于采空区注水普遍是在出现自燃征兆(煤已经发生氧化升温)的情况下进行,此时涉及预氧化作用和浸水双重作用,但考虑二者综合作用的研究成果鲜有报道。鉴于此,本文开展不同预氧化温度和预氧化煤浸水处理条件下的热重分析试验,分析了预氧化温度及预氧化后浸水处理对煤氧化燃烧特征温度、活化能、反应速率等氧化燃烧特征的影响。研究成果对煤矿自燃防治有重要的指导意义。

1 试验方案

1.1 试验煤样

(1) 煤样基础参数。试验煤样采自塔山煤矿二盘区8230工作面3#～5#煤层,煤样初始水分为1.70%,灰分为31.2%,挥发分为25.2%,固定碳为42.0%,坚固性系数为0.9。3#～5#煤层煤种为气煤,属Ⅱ类自燃煤层,自燃发火期为67 d。

(2) 煤样制备。将现场采集的新鲜块煤进行破碎、研磨及筛分,筛选出140目以下(≤0.1 mm)煤粉,并将煤粉放入真空干燥箱,在30 ℃的温度下干燥4 h后用密封袋真空保存。根据后续处理方式不同,制备成原煤、预氧化煤和浸水煤3种煤样。

原煤:30 ℃干燥4 h后的煤粉。

预氧化煤样:程序升温试验(最高温度150 ℃和240 ℃)处理后的自然冷却煤样。煤样预氧化温度的选取依据程序升温试验结果确定。取50 g原煤进行程序升温试验,初始温度为30 ℃,干空气流量为100 mL/min,升温速率为0.6 ℃/min,每隔15 min取一次气样进行分析。如图1所示,在120 ℃之后CO生成量迅速增大,至136 ℃的产生C_2H_4,在224 ℃时产生C_2H_2。这表明原煤在120～136 ℃时已经进入快速氧化阶段,在224 ℃后进入激烈氧化阶段。因此,选取150 ℃和240 ℃两个温度点为预氧化温度制备预氧化煤样,供后续试验研究使用。

浸水煤样:将原煤在蒸馏水中浸泡3 d后自然风干2 d,再在鼓风干燥箱中以40 ℃干燥48 h以上,至煤样质量变化率≤0.002 g/h,从而制备成原煤浸水煤样;预氧化后浸水处理煤样为预氧化煤样在升温至预氧化温度时直接取出迅速进行浸水处理,然后再进行干燥处理得到的煤样。

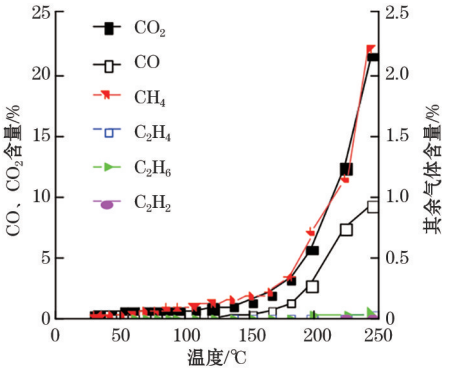


图 1　原煤程序升温试验气体产生规律

Fig.1　Gas generation law of raw coal temperature programmed test

1.2　试验设备及条件

（1）试验设备。试验采用 STA449F3 型 TG/DTA 综合热重分析仪进行热重分析。该设备采用智能等温技术和双杆天平设计，能自动进行气体切换和流量控制，温度范围为室温至 1600 ℃，样品容量为 200 mg，天平灵敏度为 0.1 μg。加热速率为 0.001～50 ℃/min，DTA 灵敏度为 0.001 ℃，真空度为 1.0 Pa，量热精度（准确度）为 1%。

（2）试验条件。设置升温速率为 5 ℃/min，反应气体氧气、氮气流量分别为 10 mL/min、40 mL/min，模拟遗煤在采空区中氧化自燃[16]。单次试验样品质量约为 10 mg，反应温度范围为 35～800 ℃。

1.3　氧化动力学求解方法

煤样在该试验条件下可反映出温度和时间的变化关系，因此采用非等温法研究煤的氧化过程。由此得到氧化燃烧过程反应动力学方程如下[17]：

$$\begin{cases}\ln\left[\dfrac{1-(1-\alpha)^{1-n}}{(T+273.15)^2(1-n)}\right]=\ln\left[\dfrac{AR}{\beta E}\left(1-\dfrac{2R(T+273.15)}{E}\right)\right]-\dfrac{E}{R(T+273.15)},n\neq1\\ \ln\left[-\dfrac{(1-\alpha)}{(T+273.15)^2}\right]=\ln\left[\dfrac{AR}{\beta E}\left(1-\dfrac{2R(T+273.15)}{E}\right)\right]-\dfrac{E}{R(T+273.15)},n=1\end{cases}\tag{1}$$

式中：α 为固体可燃物质燃烧分解的转化率，%，$\alpha=(w_0-w)/(w_0-w_\infty)$；$w_0$、$w$、$w_\infty$ 分别为 TG 曲线中煤样的初始质量、t 时刻未反应的试样质量、最终质量，g；n 为反应级数；E 为表观活化能，kJ/mol；T 为温度，℃；R 为气体反应常数，取8.314 J/(mol·℃)；A 为指前因子；β 为升温速率，℃/min。

2　试验结果与分析

2.1　预氧化温度对煤氧化燃烧特征的影响

通过热重试验得到不同预氧化温度条件下煤样的 TG-DSC 曲线，如图 2 所示。

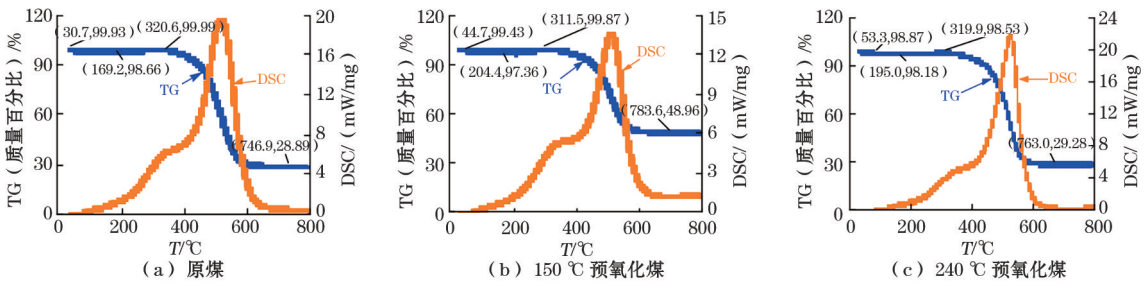


图 2　不同预氧化温度条件下煤样的 TG-DSC 曲线

Fig.2　TG-DSC curves of coal samples under different pre-oxidation temperatures

2.1.1　煤氧化燃烧特征温度变化

由 TG-DSC 曲线将煤的氧化自燃过程划分为失水失重阶段、氧化增重阶段和燃烧失重阶段三个阶段[13]，各阶段特征温度见表 1。

从表 1 可以看出，预氧化煤样的失水失重特征温度、氧化增重特征温度、燃尽温度均高于原煤，燃烧失重特征温度比原煤低。其中，与原煤相比，150 ℃和 240 ℃预氧化煤失水失重特征温度分别升高 14.0 ℃、22.6 ℃，增幅分别为 45.6%、73.6%；氧化增重特征温度分别升高 35.2 ℃、25.8 ℃，增幅分别为 20.8%、15.2%；燃烧失重特征温度分别降低 9.1 ℃、0.7 ℃，降幅分别为 2.8%、0.2%；燃尽温度分别升高 36.7 ℃、16.1 ℃，增幅分别为 4.9%、2.2%。这表明，预氧化作用使煤在失水失重阶段和氧化增重阶段的特征温度变高，减缓了煤再被氧化时的低温氧化进程[7]；而在燃烧失重阶段，预氧化作用使煤氧化燃烧特征温度略有降低，使煤可以在更低的温度下发生燃烧反应。

表 1 不同预氧化温度下煤样的氧化燃烧特征温度

Table 1 Characteristic temperatures of oxidative combustion of coal samples under different pre-oxidized temperatures

煤样	失水失重特征温度/℃	氧化增重特征温度/℃	燃烧失重特征温度/℃	燃尽温度/℃
原煤	30.7	169.2	320.6	746.9
150 ℃预氧化煤	44.7	204.4	311.5	783.6
240 ℃预氧化煤	53.3	195.0	319.9	763.0

2.1.2 煤氧化燃烧活化能变化

煤燃烧过程中的活化能大小可以反映煤燃烧的难易程度,活化能越小,煤越容易发生燃烧反应[19-20],自燃危险性越大。

计算得到不同预氧化作用下煤在燃烧失重阶段的活化能和指前因子($\ln A$)[20],结果见表 2。

表 2 不同预氧化温度下煤样的燃烧活化能

Table 2 Combustion activation energy of coal samples under different pre-oxidized temperatures

煤样	活化能/(kJ/mol)	$\ln A$	反应级数 n	相关度 R^2
原煤	156.9	24.1	2	0.97
150 ℃预氧化煤	149.1	22.6	2	0.98
240 ℃预氧化煤	80.6	24.7	1	0.96

由表 2 可知,原煤在燃烧失重阶段的活化能最大,为 156.9 kJ/mol;经过 150 ℃预氧化处理后的煤样在燃烧失重阶段的活化能降低为 149.1 kJ/mol,较原煤降低 4.9%;经过 240 ℃预氧化处理后的煤样在燃烧失重阶段的活化能最小,仅为 80.6 kJ/mol,较原煤降低 48.7%。这表明,预氧化作用会降低煤样在燃烧过程中的活化能,增大煤自燃危险性,使煤更容易发生燃烧反应,且预氧化温度越高,活化能降低越明显,煤越容易自燃。

2.1.3 煤氧化燃烧反应速率变化

煤燃烧过程中的指前因子大小反映燃烧反应速率的快慢。由表 2 可知,150 ℃预氧化煤燃烧过程 $\ln A$ 最低,240 ℃预氧化煤燃烧过程 $\ln A$ 与原煤相近;与原煤相比,150 ℃预氧化煤燃烧过程 $\ln A$ 减小了 6.6%,240 ℃预氧化煤燃烧过程 $\ln A$ 略微增大了 2.1%。

2.2 浸水条件对煤氧化燃烧特征的影响

通过热重试验得到原煤、150 ℃和 240 ℃预氧化作用后浸水煤样的 TG-DSC 曲线,如图 3 所示。

2.2.1 煤氧化燃烧特征温度变化

根据图 3 中的 TG-DSC 曲线可以得到原煤、150 ℃和 240 ℃预氧化煤浸水后的氧化燃烧特征温度,见表 3。

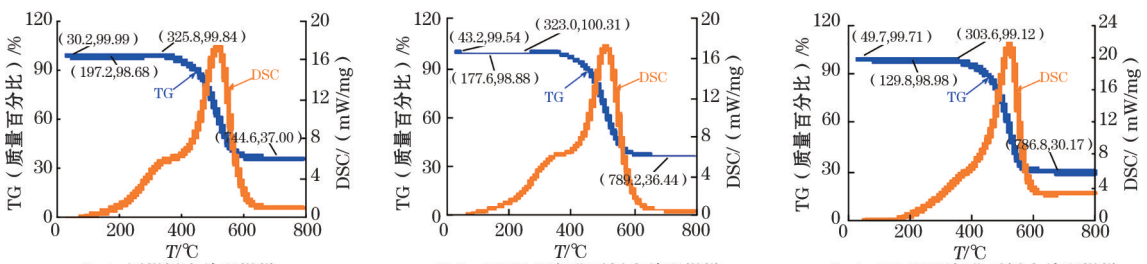


图 3 不同预氧化条件下浸水煤样的 TG-DSC 曲线

Fig.3 TG-DSC curves of water-immersed coal samples under different pre-oxidation conditions

表 3 不同预氧化条件下浸水煤样的氧化自燃特征温度

Table 3 Characteristic temperatures of oxidative combustion of water-immersed coal samples under different pre-oxidation conditions

煤样	失水失重特征温度/℃	氧化增重特征温度/℃	燃烧失重特征温度/℃	燃尽温度/℃
原煤浸水处理煤样	30.2	197.2	325.8	744.6
150 ℃预氧化后浸水处理煤样	43.2	177.6	323.0	789.2
240 ℃预氧化后浸水处理煤样	49.7	129.8	303.6	786.8

由表 3 可知,与原煤浸水处理煤样相比,150 ℃和 240 ℃预氧化后浸水处理煤样的失水失重阶段特征温度分别升高了 13.0 ℃、19.5 ℃,氧化增重阶段特征温度分别降低了 19.6 ℃、67.4 ℃,燃烧失重阶段特征温度分别降低了 2.8 ℃、22.2 ℃,燃尽温度分别升高了 44.6 ℃、42.2 ℃。

对比不同预氧化条件下浸水处理煤样各阶段特征温度可以发现,与 150 ℃预氧化后浸水处理煤样相比,240 ℃预氧化条件下浸水处理煤样的失水失重阶段特征温度高 6.5 ℃,氧化增重阶段和燃烧失重阶段特征温度分别低 47.8 ℃、19.4 ℃。表明预氧化温度越高,煤浸水后越容易发生氧化反应和燃烧反应,自燃危险性越大。

对比表 1 和表 3 可知,预氧化煤浸水处理后氧化增重阶段特征温度均显著降低。其中,150 ℃预氧化后的煤样经过浸水作用,氧化增重阶段的特征温度降低了 26.8 ℃,燃烧失重阶段的特征温度提高了 11.5 ℃;240 ℃预氧化后的煤样经过浸水作用,氧化增重阶段的特征温度降低了 65.2 ℃,燃烧失重阶段的特征温度降低了 16.3 ℃。这表明遗煤经过氧化后,直接注水降温会使煤样在干燥后更容易被氧化;尤其在较高预氧化温度条件下,直接注水降温还会促进煤在燃烧阶段的反应活性,自燃危险性增大。

2.2.2 煤氧化燃烧活化能变化

计算得到不同预氧化条件下浸水煤在燃烧失重阶段的活化能和指前因子($\ln A$),结果见表 4。

表 4 不同预氧化条件下浸水煤样的燃烧活化能

Table 4 Combustion activation energy of water-immersed coal samples under different pre-oxidation conditions

煤样	活化能/(kJ/mol)	$\ln A$	反应级数 n	相关度/R^2
原煤浸水处理煤样	148.2	22.7	2	0.97
150 ℃预氧化后浸水处理煤样	150.9	22.9	2	0.98
240 ℃预氧化后浸水处理煤样	72.8	9.0	1	0.96

由表 4 可知,与原煤浸水处理煤样相比,150 ℃预氧化后浸水处理煤样燃烧活化能略微增大了 2.7 kJ/mol,增幅为 1.8%;240 ℃预氧化后浸水处理煤样的燃烧活化能降低了 75.4 kJ/mol,降幅为 50.9%。这说明高温氧化预处理煤样浸水后,燃烧反应需要的能量大幅度降低,煤更容易发生自燃。

对比表 2 和表 4 发现,与原煤在燃烧阶段的活化能相比,原煤浸水煤样的活化能降低了 8.7 kJ·mol^{-1};150 ℃预氧化煤样比 150 ℃氧化后浸水处理煤样燃烧活化能略微增大了 8.7 kJ·mol^{-1},增幅为 1.2%;240 ℃预氧化煤样比 240 ℃氧化后浸水处理煤样燃烧活化能降低了 7.8 kJ·mol^{-1},降幅为 9.7%。整体而言,煤样经过浸水处理后,燃烧活化能降低,自燃危险性增大,煤更容易发生自燃。

2.2.3 煤氧化燃烧反应速率变化

由表 4 可知,与原煤浸水煤样相比,150 ℃预氧化后浸水处理煤样在燃烧阶段的 $\ln A$ 略微增大了 0.2,增幅为 0.9%;240 ℃预氧化后浸水处理煤样在燃烧阶段的 $\ln A$ 减小了 13.7,降幅为 60.4%。说明高温预氧化条件下进行浸水处理,会大幅度降低煤燃烧的反应速率。

对比表 2 和表 4 可知,与原煤相比,原煤浸水处理煤样在燃烧阶段的 $\ln A$ 减小了 6.3%,这表明浸水处理一定程度上可以降低煤的燃烧反应速率。尤其是高温预氧化处理后的煤样经过浸水处理(与 240 ℃预氧化煤样相比,240 ℃预氧化后浸水处理煤样在燃烧阶段的 $\ln A$ 减小了 63.6%),燃烧反应速率会大幅度降低。

3 讨论

3.1 预氧化作用对煤自燃危险性影响机理

由上述分析可知,预氧化作用使煤在失水失重阶段和氧化增重阶段的特征温度变高,减缓了煤再次氧化时的低温氧化进程;降低了燃烧失重阶段的特征温度和燃烧过程中的活化能,增大了煤自燃危险性,使煤更容易发生燃烧反应。产生该现象的主要原因是:一方面,煤的初次氧化过程消耗了大量的水分,煤中大部分由游离水堵塞的孔隙被疏通,增强了氧气在煤体内部的流通性,孔隙的疏通使煤有效比表面积增大[21],增大了煤与氧气的接触面积,加快了再次氧化燃烧反应速率;另一方面,煤预氧化后脂肪烃(—CH_3、—CH_2—、—CH_3/—CH_2—)、含氧官能团(C═O、—COOH)等活性基团增多[22-23],煤样微晶结构变得松散[23]、煤分子稳定性降低,氧化自燃活性升高,这些都增大了煤在高温条件下再次被氧化燃烧的反应程度。此外,煤初次氧化过程中,有机物质受热分解产生的可燃性物质附着在煤体孔隙表面,使煤再次氧化燃烧的进程缩短。

显然,现场采空区遗煤预氧化后将更容易发生自燃,且预氧化温度越高,煤的自燃危险性越大。因此,现场应注意采空区遗煤的氧化情况,尽可能减小采空区漏风,并及时采用防灭火措施降低采空区遗煤温度。

3.2 预氧化与浸水作用对煤自燃危险性影响机理

煤预氧化后再浸水会降低氧化增重阶段特征温度,使煤更容易被氧化;且高温预氧化煤再浸水会显著降低氧化增重阶段和燃烧失重阶段的特征温度,大幅减小煤燃烧反应活化能,具有更大的自燃危险性。其原因为:一方面,煤与水相互作用改变了煤分子轨道能级和体系能量,使其与氧分子反应时的活化能减小[14];另一方面,水分子与煤发生物理化学作用破坏了煤体结构,煤中孔隙更为发育,与氧气反应有效接触面积增大,使之更容易被氧化自燃。此外,预氧化煤再浸水处理后,煤样微晶结构会变得更松散[24]、煤分子稳定性降低。

综上所述,预氧化作用和浸水作用从官能团、孔隙特征、分子稳定性、分子能量等多方面对煤产生影响,导致煤的自燃危险性增大,作用机理如图 4 所示。

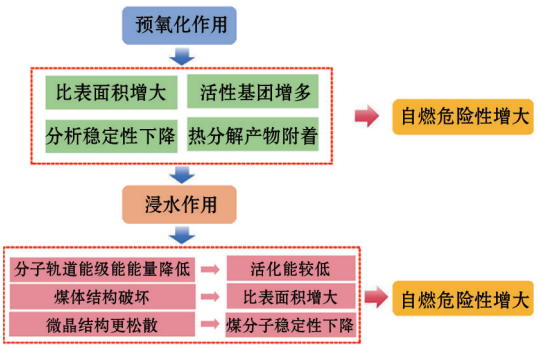


图 4 预氧化和浸水作用对煤自燃危险性影响机理

Fig.4 Effect mechanism of pre-oxidation and water immersion on spontaneous combustion risk of coal

因此,当现场煤体已经处于高温状态时,直接采取注水降温措施不仅会恶化工作面作业环境,还会使遗煤更容易复燃。此时,应优先采用注低温氮气、液态二氧化碳等其他防灭火措施。

4 结论

(1) 与未氧化原煤相比,经过 150 ℃和 240 ℃预氧化处理的煤的失水失重阶段特征温度分别升高了 45.6%、73.6%,氧化增重阶段的特征温度分别升高 20.8%、15.2%,预氧化作用减缓了煤再被氧化时的低温氧化过程。而在燃烧失重阶段,150 ℃和 240 ℃预氧化作用下煤氧化燃烧特征温度较原煤分别降低 2.8%、0.2%,活化能分别降低 4.9%、48.7%,煤自燃危险性增大,更容易复燃;且煤样预氧化温度越高,燃烧过程的活化能越低,越容易发生自燃。

(2) 煤预氧化后再浸水会降低氧化增重阶段特征温度,使煤更容易被氧化。与 240 ℃预氧化煤相比,240 ℃预氧化再浸水处理煤样氧化增重阶段和燃烧失重阶段的特征温度分别降低了 65.2 ℃、16.3 ℃,燃烧失重阶段活化能降低 7.8 kJ/mol,煤自燃危险性增大。

(3) 浸水处理会降低煤的燃烧反应速率,原煤浸水煤样较原煤在燃烧阶段的 $\ln A$ 减小了 6.3%,240 ℃预氧化再浸水处理煤样燃烧阶段的 $\ln A$ 降低幅度达到 60.4%。

(4) 预氧化作用和浸水作用会导致煤的自燃危险性增大。当煤体发生高温氧化时,不宜直接进行注水降温,应优先采用注低温氮气、液态二氧化碳等其他防灭火措施。

参考文献(References):

[1] 步允川,牛会永,邱天,等.预氧化浸水煤体表面结构变化及复燃特性[J].中国安全生产科学技术,2021,17(11):32-39.
BU Yunchuan, NIU Huiyong, QIU Tian, et al. Surface structure changes and re-ignition characteristics of pre-oxidized and water-immersed coal[J]. Journal of Safety Science and Technology,2021,17(11):32-39.

[2] 邓军,李鑫,王凯,等.矿井火灾智能监测预警技术近 20 年研究进展及展望[J].煤炭科学技术,2024,52(1):154-177.
DENG Jun, LI Xin, WANG Kai, et al. Research progress and prospect of mine fire intelligent monitoring and early warning technology in recent 20 years[J]. Coal Science and Technology,2024,52(1):154-177.

[3] 宋博,王大鹏,李雨成,等.基于不同漏风源浅埋煤层采空区自燃"三带"分布规律研究[J].中国安全生产科学技术,2022,18(6):38-44.
SONG Bo, WANG Dapeng, LI Yucheng, et al. Study on distribution law of spontaneous combustion"three zones"in goaf of shallow-buried coal seam based on different air leakage sources[J]. Journal of Safety Science and Technology,2022,18(6):38-44.

[4] 尚存久,杨腾龙,张有刚,等.浅埋深易自燃煤层沿空留巷采空区自燃三带分布特征[J].中国安全科学学报,2024,34(增刊 1):185-190.
SHANG Cunjiu, YANG Tenglong, ZHANG Yougang, et al. Distribution characteristics of three zones of spontaneous combustion in goaf area of gob-side entry retaining in shallowly buried and easily spontaneous combustion coal seam[J]. China Safety Science Journal,2024,34(Suppl.1):185-190.

[5] 文虎,王文,陶维国,等.超长综采工作面撤架期间煤自燃预测及防控技术研究[J].煤炭科学技术,2020,48(1):167-173.
WEN Hu, WANG Wen, TAO Weiguo, et al. Study on coal spontaneous combustion prediction and control technology during withdrawal period of super long fully-mechanized mining face[J]. Coal Science and Technology,2020,48(1):167-173.

[6] 韩学锋.含水承压破碎煤体渗透性演变与氧化动力特征研究[D].焦作:河南理工大学,2021.
HAN Xuefeng. Study on permeability evolution and oxidation dynamic characteristics of pressure bearing broken coal with different water content[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University,2021.

[7] WANG Kai, HU Lihong, SUN Weili, et al. Influences of the pre-oxidation time on coal secondary spontaneous combustion behaviors by temperature-programmed technique[J]. International Journal of Coal Preparation and Utilization,2023,43(1):190-202.

[8] ZOU Li, WANG Yungang, BAI Yanyuan, et al. Comparative analyses between raw and preoxidized pulverized coals: combustion behaviors and thermokinetic and microcharacteristics[J]. ACS Omega, 2021, 7(1): 1121-1131.

[9] GAO Dong, GUO Liwen, WANG Fusheng, et al. Investigation on thermal analysis and FTIR microscopic characteristics of artificially-oxidized coal and chronic naturally-oxidized coal during secondary oxidation[J]. Fuel, 2022, 327: 125151.

[10] 李金虎，孙建鸿，杨泽锋，等.预氧化影响煤自燃特性的不同观点与原因探究[J].中国矿业大学学报，2025，54(2)：423-436.
LI Jinhu, SUN Jianhong, YANG Zefeng, et al. Different perspectives and explanations regarding the influence of pre-oxidation on the spontaneous combustion characteristics of coal[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2025, 54(2): 423-436.

[11] 邓军，李青蔚，肖旸，等.原煤和氧化煤的低温氧化特性[J].西安科技大学学报，2018，38(1)：1-7.
DENG Jun, LI Qingwei, XIAO Yang, et al. Characteristics of low-temperature oxidation of raw and oxidized coals[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2018, 38(1): 1-7.

[12] 郑凯月，杨永良，苗国栋，等.浸水过程对采空区遗煤自燃特性影响机理[J].燃烧科学与技术，2021，27(6)：665-674.
ZHENG Kaiyue, YANG Yongliang, MIAO Guodong, et al. Influencing Mechanism of Water Soaking Process on Spontaneous Combustion Characteristics of Goaf Residual Coal[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2021, 27(6): 665-674.

[13] 邓存宝，乔玲，王雪峰，等.浸水褐煤的自燃特性及红外分析[J].中国安全科学学报，2018，28(8)：105-110.
DENG Cunbao, QIAO Ling, WANG Xuefeng, et al. Spontaneous combustion characteristics and infrared analysis of soaked lignite[J]. China Safety Science Journal, 2018, 28(8): 105-110.

[14] 乔玲，邓存宝，张勋，等.浸水对煤氧化活化能和热效应的影响[J].煤炭学报，2018，43(9)：2518-2524.
QIAO Ling, DENG Cunbao, ZHANG Xun, et al. Effect of soaking on coal oxidation activation energy and thermal effect[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(9): 2518-2524.

[15] 牛会永，刘轶康，王海燕，等.浸水风干烟煤微观结构及自燃升温特性实验研究[J].煤矿安全，2022，53(9)：17-24.
NIU Huiyong, LIU Yikang, WANG Haiyan, et al. Experimental study on microstructure and heating characteristics of water-soaked and air-dried bituminous coal[J]. Safety in Coal Mines, 2022, 53(9): 17-24.

[16] 李宗翔，张明乾，杨志斌，等.断层构造对煤结构及氧化自燃特性的影响[J].煤炭学报，2023，48(3)：1246-1254.
LI Zongxiang, ZHANG Mingqian, YANG Zhibin, et al. Effect of fault structure on the structure and oxidative spontaneous combustion characteristics of coal[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(3): 1246-1254.

[17] 杨晶.阻化剂抑制浸水煤自燃的特性研究[D].阜新：辽宁工程技术大学，2022.
YANG Jing. Study on the characteristics of inhibitors in inhibiting the spontaneous combustion of water-soaked coal[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2022.

[18] 邓军，张敏，易欣，等.煤矿采空区微生物驯化及抑制煤自燃特性[J].煤炭学报，2025，50(1)：379-391.
DENG Jun, ZHANG Min, YI Xin, et al. Microbial acclimatization and inhibition of coal spontaneous combustion in coal mine goaf[J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(1): 379-391.

[19] 聂百胜，白凯丹，何珩溢，等.地下煤层强制燃烧注气流量对含水煤燃烧动力学的影响[J].煤炭科学技术，2025，53(7)：134-145.
NIE Baisheng, BAI Kaidan, HE Hengyi, et al. Effect of gas injection in underground coal combustion on kinetic of water-containing coal[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(7): 134-145.

[20] 邓军，刘乐，王彩萍，等.贫煤氧化燃烧热效应及热动力学参数研究[J].煤矿安全，2021，52(12)：35-41.
DENG Jun, LIU Le, WANG Caiping. Research on thermal effect and thermo kinetic parameters during oxidation combustion of lean coal[J]. Safety in Coal Mines, 2021, 52(12): 35-41.

[21] 邓军，赵婧昱，张嫱妮，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.

[22] 梁文勖，胡志伟，边晓峰，等.遗煤二次氧化宏微观特征参数变化及动力学研究[J].煤矿安全，2023，54(3)：109-116.
LIANG Wenxun, HU Zhiwei, BIAN Xiaofeng, et al. Variation of macro and microscopic characteristic parameters and kinetics of secondary oxidation of residual coal[J]. Safety in Coal Mines, 2023, 54(3): 109-116.

[23] 丁徐琴.预氧化温度对烟煤微观结构及自燃特性影响研究[D].淮南：安徽理工大学，2024.
DING Xuqin. Effect of pre-oxidation temperature on microstructure and spontaneous combustion characteristics of bituminous coal[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2024.

[24] 何勇军.水浸烟煤低温氧化过程中微观结构变化规律研究[D].西安：西安科技大学，2016.
HE Yongjun. Study on microstructure variation of soaked bitumite on low temperature oxidation process[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2016.