



移动阅读

贾廷贵, 娄和壮, 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, 45(S1): 346-352. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2019.1080

JIA Tinggui, LOU Hezhuang, LIU Jian, et al. Experimental study on thermal characteristics of spontaneous combustion process of coal with different moisture[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(S1): 346-352. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2019.1080

## 不同水分含量煤自燃过程热特性实验研究

贾廷贵<sup>1,2</sup>, 娄和壮<sup>1</sup>, 刘 剑<sup>1</sup>, 曲国娜<sup>2</sup>

(1. 辽宁工程技术大学 安全科学与工程学院, 辽宁 阜新 123000; 2. 内蒙古科技大学 矿业与煤炭学院, 内蒙古 包头 014010)

**摘 要:**煤自燃的发生发展是煤氧化放热与热量散失的动态过程,当放热量大于散失的热量,便促进煤氧反应加速,直至自燃。煤中水分的存在影响着煤氧化产热与松散煤体的热传导能力,因此,以神东布尔台 42201-1 工作面煤样为实验对象,开展了热重(Thermogravimetric, TG)和差示扫描量热法(Differential Scanning Calorimetry, DSC)联用实验,根据煤自燃过程中特征温度点划分出煤自燃进程,并分析煤中水分含量对煤自燃过程失重特性与放热特性的影响。采用激光闪射法测试分析了不同水分含量煤低温氧化过程中热扩散系数  $a$ 、比热容  $C_p$  与导热系数  $\lambda$  的变化规律,以升高单位温度引起的热扩散系数变化量与比热容变化量表征温度对热扩散系数与比热容的敏感度,并分析煤低温氧化过程热传导特性。结果表明:在实验的水分含量下,煤中水分含量的增加抑制了煤自燃过程,实验终止时煤自燃失重量随着水分含量的增大而减小,煤中过多水分含量阻碍了煤氧反应进行,放热量随煤中水分含量的增加而降低。在煤样各水分含量下,热扩散系数随温度的升高呈先减后增趋势,敏感度为 0 时的临界温度随水分含量的增加而增加。比热容随温度的升高呈减小趋势,且同等温度下,比热容的敏感度随水分含量的增大而增大。在同等温度条件下,煤低温氧化热扩散系数与导热系数随着煤中水分含量的增大呈减小趋势,而比热容随煤中水分含量的增大呈增大趋势,说明煤中水分的增加使得煤体温度上升所需热量增高,煤体间的热量传递速率变慢,削弱了煤自燃热传导特性。

**关键词:**煤自燃;热特性;水分含量;TG-DSC;激光闪射法

中图分类号:TD75 文献标志码:A 文章编号:0253-9993(2020)S1-0346-07

### Experimental study on thermal characteristics of spontaneous combustion process of coal with different moisture

JIA Tinggui<sup>1,2</sup>, LOU Hezhuang<sup>1</sup>, LIU Jian<sup>1</sup>, QU Guona<sup>2</sup>

(1. School of Safety Science and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China; 2. Institute of Mining and Coal, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China)

**Abstract:** The occurrence and development of coal spontaneous combustion is a dynamic process of coal oxidation heat release and heat loss. When the heat release is greater than the heat loss, it will promote the acceleration of coal oxygen reaction until spontaneous combustion. The presence of moisture in the coal affects the thermal oxidation of coal and the thermal conductivity of the loose coal. TG-DSC combined experiment were carried out on the coal sample of 42201-1 working face of ShendongBuertai coal. According to the characteristic temperature points during coal sponta-

收稿日期:2019-08-05 修回日期:2019-10-11 责任编辑:常明然

基金项目:辽宁省教育厅基金资助项目(LJ2017FAL002);辽宁省大学生创新创业训练计划资助项目(20171014700017)

作者简介:贾廷贵(1979—),男,内蒙古化德人,副教授。E-mail:jtg2000@126.com

通讯作者:娄和壮(1995—),男,辽宁庄河人,硕士研究生。E-mail:qililhz0405@126.com

neous combustion, the coal spontaneous combustion process was divided, and the influence of coal moisture content on the weightlessness and heat release characteristics of coal spontaneous combustion were analyzed. The laser flash method was used to test and analyze the variation law of thermal diffusion coefficient ( $a$ ), specific heat capacity ( $C_p$ ) and thermal conductivity ( $\lambda$ ) during low temperature oxidation of coal with different moisture content. The sensitivity of temperature to thermal diffusion coefficient and specific heat capacity is characterized by the variation of thermal diffusion coefficient and specific heat capacity caused by increasing unit temperature. And the heat conduction characteristics of coal at low temperature oxidation process was analyzes. Findings that the increase in the moisture content of coal inhibited the coal spontaneous combustion process under the experimental moisture content. At the end of the experiment, the weight loss of coal spontaneous combustion decreased with the increase of moisture content. It shows that too much moisture content in the coal hindered the coal oxygen reaction. The heat release decreases with the increase of moisture content of the coal. At each moisture content of the coal sample, the thermal diffusion coefficient decreases first and then increases with increasing temperature, and the critical temperature at sensitivity 0 increases with increasing moisture content. The specific heat capacity decreases with increasing temperature, and at the same temperature, the sensitivity of the specific heat capacity increases with increasing moisture content. Under the same temperature conditions, the low-temperature oxidation thermal diffusion coefficient and thermal conductivity of coal decreases with increasing moisture content, while the specific heat capacity increase with increasing moisture content. It shows that the increase of moisture content makes the heat required for the temperature rise of the coal body increase, and the heat transfer rate between the coal bodies becomes slow, which weakens the thermal conduction characteristics of coal spontaneous combustion.

**Key words:** coal spontaneous combustion; thermal characteristics; different moisture; TG-DSC; iaser flash method

煤矿井下煤自燃灾害不但是对资源的浪费,更是对矿井人员健康与安全的严重危害。煤自燃是一种动态多变的复杂物理化学过程,煤低温氧化逐渐积累的热量是引发煤自燃的动力源。目前,专家学者对煤自燃过程热特性进行了充分研究。文献[1]采用 TG/DTG 实验分析了煤氧复合过程,得到了华亭煤自燃过程的特征温度点。文献[2]实验细化了煤自燃过程 7 个特征温度点,并确定其相对应的温度范围。文献[3]亦采用特征温度点分析煤氧化燃烧过程。文献[4]采用 DSC 法测试了变氧环境长焰煤氧化放热历程,结果表明,放热量随  $O_2$  浓度的增加先增后减,在 16% 时最大。文献[5]实验研究了无烟煤在不同水分含量下的放热特性与初始放热温度。文献[6]实验研究了 [BMIM][BF<sub>4</sub>] 离子液体对抑制煤自燃反应进程的影响,得到离子液体对煤自燃的抑制作用随着煤变质程度的降低而逐渐增强的规律。文献[7]采用二分法逐步逼近模拟的不同粒度煤导热系数结果,与实验结果无限接近,得到小尺度粒度比大尺度粒径对导热系数影响较大的结论。文献[8]对变氧浓度与不同通风量的煤热物性参数进行实验研究,得到了  $O_2$  浓度对煤氧化过程传热特性影响较小,而通风量的增加整体上降低了煤热物性参数的大小。文献[9]对 -50~50 °C 低温环境的煤热物性参数进行测量,结果表明,热扩散系数随温度升高而降低,比热容与导热系数随温度升高而升高。文献[10]对预氧

化处理的煤热物性参数进行测量,结果表明,等温下预氧化处理的煤热物性参数均高于原煤样。文献[11]研究了咪唑类离子液体对煤热物性参数的影响,结果表明,等温下离子液体预处理的热物性参数均低于原煤样。上述研究成果或只对煤自燃失重放热过程进行研究,或只对煤热物性参数进行测量,并未统一整体地分析煤自燃热特性。文献[12]采用程序升温实验得到了煤自燃临界温度随煤中水分含量的增加先增后减,极值点在水分含量 12.01% 处。文献[13-15]分析了低温阶段水分含量对煤自燃宏观参数的影响。笔者采用热重分析法和差示扫描量热法(TG-DSC)联用与激光闪射法,针对不同水分含量下的煤自燃失重特性、放热特性与热传导特性进行实验研究,分析煤中水分存在对煤自燃进程造成的影响,为水分对煤自燃影响机理的研究提供参考。

## 1 煤样制备

选取神东布尔台 42201-1 工作面煤进行煤自燃过程热特性实验。将取自于井下工作面的新鲜煤样袋装密封送至实验室进行预处理,开袋后取出块煤的中心部分,粉碎研磨并筛选出 0.2~0.3 mm 粒径的煤样进行充氮保护,置于广口磨砂瓶贴好标签以备实验所需。采用水雾喷淋和 WHL-25 型台式电热恒温干燥箱干燥的方法制备出实验煤样,将煤样置于雾化池中央,启动水雾发生系统喷淋 1 h 后置于干燥箱,干

燥时间每隔 45 min 取出,采用 YX-GYFX7701 型全自动工业分析仪测试得到质量比分别为 17.72%, 13.88%, 11.73%, 7.50% 和 5.12% 五种不同水分含量的实验煤样,水分含量梯度为 3%,将 5 组煤样置于氮气环境下保存。

## 2 实验条件与方法

采用耐驰同步热分析仪 STA 449 F5 Jupiter<sup>®</sup> 实现热重分析法和差示扫描量热法联用,即 TG-DSC 同步热分析,实验原理如图 1(a) 所示,利用热天平记录煤自燃过程质量变化。每次称取 5 mg 煤样进行实验,每个水分含量工况下进行 3 次实验,最终结果取 3 次均值。通入 O<sub>2</sub> 与 N<sub>2</sub> 体积比为 0.27 的干气体,流量设定 100 mL/min,升温速率设定 10 °C/min,实验温度为 23~500 °C。

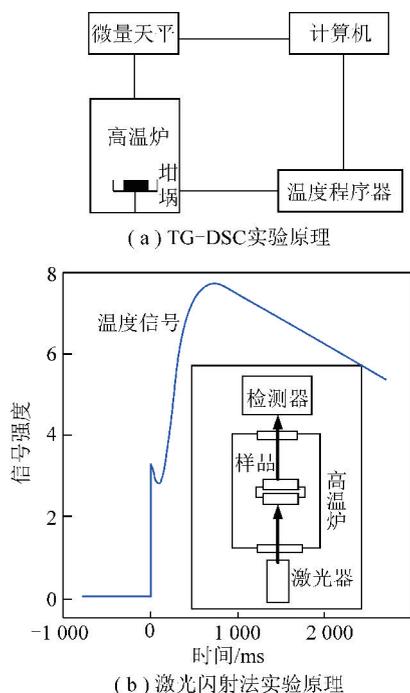


图 1 实验原理

Fig. 1 Test schematic

采用耐驰 LFA467 Hyper Flash 导热系数测量仪对不同水分含量煤自燃热传导特性进行实验分析,采用压片法制备成直径 12.70 mm、厚度 1.0~1.2 mm 的实验煤片以备研究。激光闪射法实验原理如图 1(b) 所示。装置主要部分为激光器、高温炉与检测器,通过底部激光器发射的脉冲激光照射煤样底部使之升温辐射散热,顶部检测器捕捉信号,根据 Cowan 传热模型式(1)可得到煤样氧化热扩散系数  $a$ :

$$a = 0.1388 \frac{D^2}{t_{0.5}} \quad (1)$$

式中, $a$  为热扩散率,mm<sup>2</sup>/s; $D$  为煤样厚度,mm; $t_{0.5}$  为半升温时间<sup>[16]</sup>,s。

气体流量设定 100 mL/min,升温速率设定 10 °C/min,实验温度 23~300 °C。在实验过程中,每隔 30 °C 进行激光闪射测量,每个温度点闪射 3 次,计算均值作为实验结果值。煤氧化比热容由实验煤样与标准样品对比计算得出。煤氧化导热系数根据式(2)计算得到。

$$\lambda = \rho C_p \quad (2)$$

式中, $\lambda$  为导热系数,W/(m·°C); $\rho$  为密度,g/cm<sup>3</sup>;  $C_p$  为比热容,J/(g·°C)。

## 3 实验结果与讨论

### 3.1 不同水分含量煤自燃失重特性

TG 曲线记录了煤自燃过程质量随温度升高的变化规律,不同水分含量煤自燃过程 TG 曲线如图 2 所示。各曲线都呈类似的变化趋势,即先减后增再减,可见煤自燃过程具有明显的阶段性,选择各阶段的特征温度点进行分析。实验初始温度为  $T_0$ ,温度升高煤样质量由平缓降低过渡到快速降低,在平缓降低段,煤中水分蒸发,吸附气体脱附,煤自燃过程处在蒸发脱附阶段,煤中虽存在煤吸氧行为,但主要以物理吸附进行<sup>[17-19]</sup>。随着温度升高吸附量降低,脱附气体大于吸附气体,煤重平缓降低。在快速降低段,仍存在物理吸附,但此时煤氧复合频率增加,煤耗氧速率加快,煤重快速降低,在到达干裂温度  $T_1$  时煤重降低至煤自燃过程的第 1 次质量最低时。在干裂温度  $T_1$  到活性温度  $T_2$  区间煤重基本保持不变,此时煤对 O<sub>2</sub> 的化学吸附加快,吸附量猛增,氧化反应渐增,煤分子结构中的小分子含氧官能团及烷基侧链、桥键等<sup>[20-22]</sup> 发生裂解。氧化反应产生气体加之煤中脱附气体与煤耗氧量形成一种动态平衡,煤重基本保持不变。自活性温度  $T_2$  到着火温度  $T_3$ ,煤重逐渐增加,煤自燃处于增重阶段,此时煤分子结构中活性基团增加,煤氧复合加快,煤分子结构中的环状大分子裂解增加,远大于产生气体量,煤重增加。在着火温度  $T_3$  时煤质量比达到最大,往后至终止温度  $T_4$  煤重迅速降低,煤自燃处于燃烧阶段,此时煤分子结构中芳环结构迅速氧化分解并开始燃烧,氧化速度激增,失重量明显降低。

随着煤中水分含量的增加,煤自燃过程 TG 曲线表现出差异性,采用特征温度点表征煤自燃过程,特征温度点的划分见表 1,  $T_0$  为实验初始温度,为 23 °C,  $T_1$  为干裂温度,  $T_2$  为活性温度,  $T_3$  为着火温度,  $T_4$  为终止温度,为 500 °C。根据特征温度点将煤自燃过程分为  $T_0 \sim T_1$  蒸发脱附阶段、 $T_1 \sim T_2$  氧化分解阶段、 $T_2 \sim T_3$  吸氧增重阶段、 $T_3 \sim T_4$  燃烧阶段。  $T_1$  随水分含量的增加先增后减,  $T_2$  先增后减再增,  $T_3$  先增后减。煤中水分含量的增加抑制煤氧结合,煤对

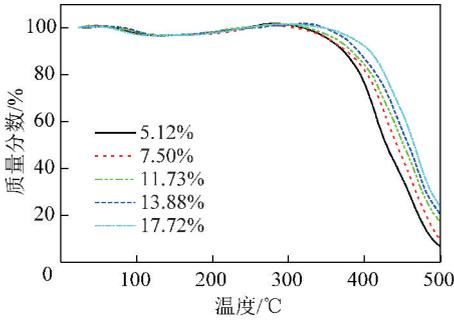


图 2 煤自燃过程 TG 曲线

Fig. 2 TG curves of coal spontaneous combustion process

O<sub>2</sub> 的物理吸附与化学吸附效率降低,延长了加热过程中水分蒸发,但在水分含量 13.88%与 17.72%时 T<sub>1</sub> 降低,这是由于煤中过多的水分增大了煤孔隙,煤氧结合加快。在水分含量 7.50%与 11.73%时 T<sub>2</sub> 增大,T<sub>3</sub> 后的燃烧阶段的 TG 曲线滞后,煤自燃吸氧增重阶段滞后,不利于煤自燃的发生发展。煤中水分含量的增加抑制了煤自燃燃烧过程,实验终止时失重量随着水分含量的增加而降低。

表 1 煤自燃过程特征温度点

Table 1 Characteristic temperature point of coal spontaneous combustion process

水分含量/%	初始温度 T <sub>0</sub> /°C	干裂温度 T <sub>1</sub> /°C	活性温度 T <sub>2</sub> /°C	着火温度 T <sub>3</sub> /°C	终止温度 T <sub>4</sub> /°C
5.12	23	112.65	164.91	281.33	500
7.50	23	113.76	178.82	282.85	500
11.73	23	125.26	181.85	286.71	500
13.88	23	118.67	170.52	317.17	500
17.72	23	113.89	175.99	295.83	500

### 3.2 不同水分含量煤自燃燃烧活化能变化

在煤低温氧化蒸发脱附阶段涉及有煤对气体间的物理吸附、脱附及水分蒸发等过程,煤氧间的化学反应进行缓慢,故此,采用 Coats-Redfren 方程一级反应计算煤自燃燃烧阶段活化能。煤中水分的存在影响着煤氧化反应的难易程度,活化能越小,煤氧之间有效碰撞所需能量越低,煤氧化反应越容易进行,反之,则有效碰撞所需能量越高,反应越不易进行。不同水分含量煤自燃活化能变化如图 3 所示,可以看出,水分含量 5.12%,7.50%,11.73%,13.88%和 17.72%的煤燃烧阶段活化能分别为 54.62,49.75,54.49,64.05,69.52 kJ/mol,随着煤中水分含量的增加,燃烧阶段得活化能先减后增,煤氧化反应变得困难,煤自燃进程得到抑制。

### 3.3 不同水分含量煤自燃放热特性

DSC 曲线记录了煤自燃过程中放热量的变化规

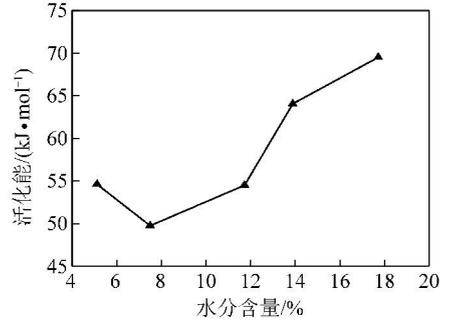


图 3 不同水分含量煤自燃燃烧阶段活化能

Fig. 3 Activation energy of spontaneous combustion stage of coal with different moisture

律,不同水分含量煤自燃过程 DSC 曲线如图 4 所示,可以看出,DSC 曲线亦呈现滞后性。在煤自燃蒸发脱附阶段,物理吸附产热量微不足道,此时煤中水分蒸发吸热占主导地位。在煤自燃增重阶段,煤分子结构中活性基团对 O<sub>2</sub> 的化学吸附逐渐增强并产生化学反应放出热量,并且放热速率逐渐增加。在煤自燃燃烧阶段,煤氧反应强烈,放热速率进一步加快,放热量增加。在实验温度范围内的不同水分含量煤自燃过程放热量变化如图 5 所示,煤中水分含量的增加,煤自燃放热量降低,水分含量 17.72%,相较于 5.12%降低了约 76%。煤自燃过程是放热过程,煤中水分随温度的增加蒸发吸热,消耗了一部分热量,这将不利于煤氧复合反应进程。

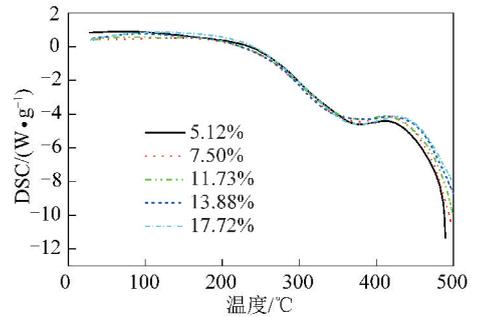


图 4 煤自燃过程 DSC 曲线

Fig. 4 DSC curves of coal spontaneous combustion process

### 3.4 不同水分含量煤自燃热传导特性

不同水分含量煤低温氧化过程热扩散系数随温度影响的变化情况如图 6(a) 所示。在煤样各水分含量下,温度升高热扩散率曲线呈先减后增的趋势。采用二次多项式  $a = m_0T^2 + m_1T + m_2$  对热扩散系数与温度间的关系进行拟合,式中  $m_0, m_1, m_2$  为系数,拟合公式见表 2,可见 R<sup>2</sup> 为 0.994~0.996,拟合效果较好。对于煤等介电体来说,其自身存在微晶结构,热扩散特性体现在微晶结构导热,在量子理论中,微晶结构的振动是量子化的,这种量子的振动称之为声子,热量在微晶结构中的扩散可以理解为声子与声子

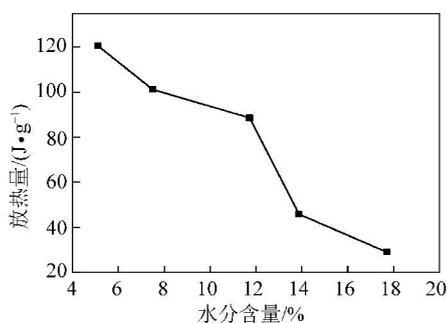


图5 不同水分含量煤自燃过程放热量

Fig. 5 Heat release from spontaneous combustion of coal with different moisture

之间以及声子与微晶结构,点阵缺陷等的碰撞。随着温度的升高,平均声子数增多,声子振动剧烈,碰撞几率增加,煤低温氧化热扩散系数降低。但当温度持续升高,位于煤微晶结构中的声子束缚在空间内,其数量不再随温度的升高而增加,煤低温氧化热扩散系数出现了高温极限值。在升高到同等温度条件下,煤样水分的增加降低了热扩散特性,热扩散系数减小,煤内部热流在颗粒与气体之间的接触接触热阻增高,使得煤低温氧化热扩散系数减小。

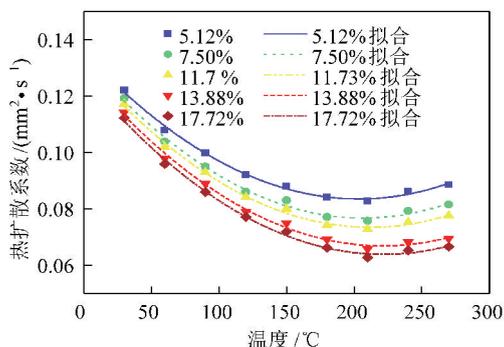
在煤样各水分含量下热扩散系数变化曲线呈现相同变化趋势。以升高单位温度引起得煤低温氧化热扩散系数变化量表征温度对热扩散系数的敏感度<sup>[10-11]</sup>,对表2中拟合公式分别求一阶导数得到不同水分含量下温度对热扩散系数的灵敏度变化如图6(b)所示,图中负号表示降低,正号表示增加。在实验煤样水分含量下,热扩散系数的高温极限点为207~231℃,即敏感度为0点,且高温极限点随水分含量的增加而增加。

表2 煤低温氧化热扩散特性的拟合公式

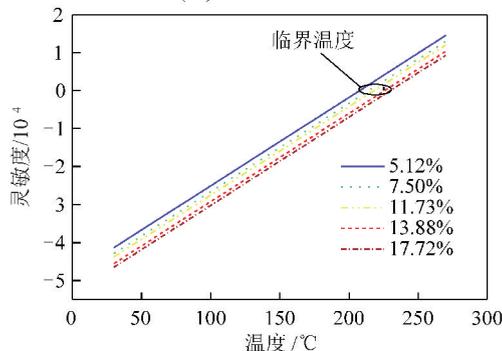
Table 2 Fitting formula of thermal diffusion characteristics of low temperature oxidation of coal

水分含量/%	拟合公式	$R^2$
5.12	$a=1.254 \times 10^{-6} T^2 - 5.102 \times 10^{-4} T + 0.136$	0.996
7.50	$a=1.326 \times 10^{-6} T^2 - 5.486 \times 10^{-4} T + 0.134$	0.994
11.73	$a=1.296 \times 10^{-6} T^2 - 5.490 \times 10^{-4} T + 0.132$	0.996
13.88	$a=1.263 \times 10^{-6} T^2 - 5.587 \times 10^{-4} T + 0.129$	0.995
17.72	$a=1.285 \times 10^{-6} T^2 - 5.696 \times 10^{-4} T + 0.127$	0.996

不同水分含量煤低温氧化比热容随温度影响的变化情况如图7(a)所示,在煤样各水分含量下,温度升高比热容曲线呈减小的趋势。采用二次多项式  $C_p = n_0 T^2 + n_1 T + n_2$  对比热容与温度间的关系进行拟合,其中  $n_0, n_1, n_2$  为系数,拟合公式见表3,  $R^2$  为0.993~0.995,拟合效果较好。比热容是一个只与分



(a) 热扩散系数变化



(b) 热扩散系数的灵敏度

图6 煤低温氧化过程热扩散特性的影响

Fig. 6 Effect of thermal diffusion characteristics of low temperature oxidation process of coal

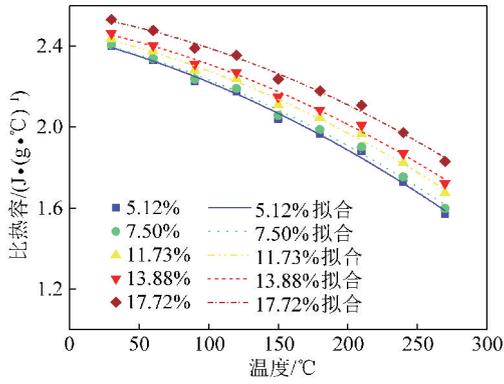
子的自由度有关的量,在温度升高过程中,煤中活泼的活性基团断裂使得煤分子自由度降低,煤低温氧化比热容减少。在相同温度下,比热容随水分的增加而增加,当煤中浸润不同含量水分,改变了煤中三相构成比例,而由于水分的比热容相较于其他两相较大,水分对煤氧化比热容的增加起到促进作用。

同样的,以升高单位温度引起得煤低温氧化比热容变化量表征温度对比热容的敏感度,对表3中拟合公式分别求一阶导数得到不同水分含量下温度对比热容的灵敏度变化,如图7(b)所示,图中负号表示降低,正号表示增加。可以看出,随着温度的升高,煤低温氧化比热容降低加快,且在同等温度条件下,温度对不同水分煤氧化比热容的灵敏度随水分的减小而增大。

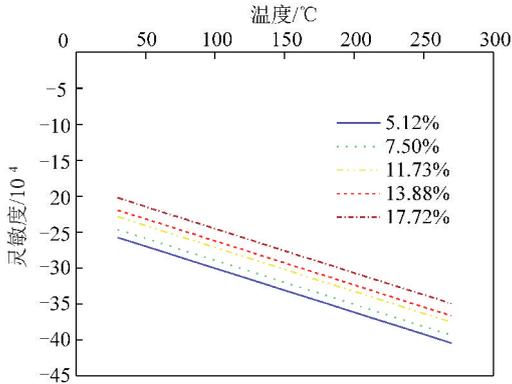
表3 煤低温氧化热储存特性的拟合公式

Table 3 Fitting formula of heat storage characteristics of low temperature oxidation of coal

水分含量/%	拟合公式	$R^2$
5.12	$C_p = -5.409 \times 10^{-6} T^2 - 0.002 T + 2.449$	0.995
7.50	$C_p = -5.409 \times 10^{-6} T^2 - 0.002 T + 2.450$	0.995
11.73	$C_p = -5.409 \times 10^{-6} T^2 - 0.001 T + 2.475$	0.994
13.88	$C_p = -5.409 \times 10^{-6} T^2 - 0.001 T + 2.500$	0.994
17.72	$C_p = -5.409 \times 10^{-6} T^2 - 0.001 T + 2.563$	0.993



(a) 煤低温氧化过程比热容变化



(b) 煤低温氧化过程比热容的灵敏度

图 7 煤低温氧化热储存特性的影响

Fig. 7 Effect of heat storage characteristics of low temperature oxidation process of coal

煤低温氧化导热系数随温度变化散点图如图 8 所示,在煤样各水分含量下煤低温氧化导热系数随温度的升高而增加,且等温下,导热系数随水分的增加而减小。可见煤中水分含量的增加使煤温上升需热量增高,煤体间的热量传递速率变慢,削弱了煤自燃热传导特性。将导热系数散点数据进行曲面拟合得到式(3), $R^2=0.9698$ ,拟合程度较好。

$$\lambda = 0.308 - 3.469 \times 10^{-5}T - 0.014M + 1.152 \times 10^{-6}T^2 + 3.583 \times 10^{-4}M^2 - 6.970 \times 10^{-6}TM \quad (3)$$

式中, $M$  为煤中水分含量,%。

## 4 结 论

(1) 采用 TG-DSC 联用对不同水分含量煤自燃过程失重与放热特性进行研究,煤自燃过程呈现阶段性,根据特征温度点划分为蒸发脱附阶段、增重阶段、燃烧阶段。煤中水分含量的增加使得煤自燃 TG 曲线、DSC 曲线呈滞后性,煤自燃进程缓慢,放热量降低,水分含量 17.72%,相较于 5.12%降低了约 76%,煤氧复合效率降低,不利于煤的自然发火。

(2) 采用激光闪射法对煤低温氧化过程热传导

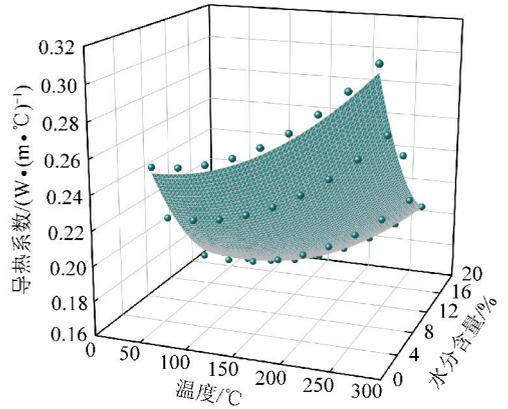


图 8 煤氧化热运输特性

Fig. 8 Coal oxidation heat transport characteristics

特性进行研究,在同等温度下,煤低温氧化热扩散系数、导热系数随水分含量的增大而减小。比热容随水分含量的增大而增大。在煤各水分含量下,煤低温氧化热扩散系数随温度的升高先减后增,极限点温度随水分含量的增加而增加;比热容随温度的升高而减小;导热系数随温度的升高而增加。

(3) 煤中水分的增加使煤温上升需热量增高,煤体间的热量传递速率变慢,削弱了煤自燃热传导特性。

## 参考文献 (References) :

[1] 张嫵妮,邓军,文虎,等. 华亭煤自燃特征温度的 TG/DTG 实验 [J]. 西安科技大学学报,2011,31(6):659-662,667.  
ZHANG Yann, DENG Jun, WEN Hu, et al. TG/DTG experiment of spontaneous combustion characteristic temperature of Huating coal [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2011, 31(6):659-662,667.

[2] 肖旸,马砺,王振平,等. 采用热重分析法研究煤自燃过程的特征温度 [J]. 煤炭科学技术,2007,35(5):73-76.  
XIAO Yang, MA Li, WANG Zhenping, et al. Study on characteristic temperature of coal spontaneous combustion process by thermogravimetric analysis [J]. Coal Science and Technology, 2007, 35(5):73-76.

[3] 余明高,袁壮,褚廷湘,等. 不同自燃倾向性煤自燃氧化特性实验研究 [J]. 火灾科学,2016,25(3):119-126.  
YU Minggao, YUAN Zhuang, CHU Tingxiang, et al. Experimental study on spontaneous combustion oxidation characteristics of different spontaneous combustion coals [J]. Fire Science, 2016, 25(3):119-126.

[4] 马李洋,杨宇轩,王晓霞,等. 长焰煤贫氧燃烧放热特性参数实验研究 [J]. 科学技术与工程,2016,16(1):10-12,16.  
MA Liyang, YANG Yuxuan, WANG Xiaoxia, et al. Experimental study on exothermic characteristics of oxygen-burning combustion in long flame coal [J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(1):10-12,16.

[5] 王亚超,袁泉,肖旸,等. 水分对白皎无烟煤氧化过程放热特性的影响 [J]. 西安科技大学学报,2018,38(5):721-727.

- WANG Yachao, YUAN Quan, XIAO Yang, et al. Effect of water on the exothermic characteristics of white anthracite oxidation process[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2018, 38(5): 721-727.
- [6] 邓军, 吕慧菲, 李达江, 等. [BMIM][BF<sub>4</sub>]对不同变质程度煤自燃热行为的影响研究[J]. 煤炭学报, 2019, 44(1): 254-262.
- DENG Jun, LÜ Huiifei, LI Dajiang, et al. Effect of [BMIM][BF<sub>4</sub>] on the thermal behavior of coal with different metamorphic degrees[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(1): 254-262.
- [7] 岳高伟, 李豪君, 王兆丰, 等. 松散煤体导热系数的温度及粒度效应[J]. 中国安全生产科学技术, 2015, 11(2): 17-22.
- YUE Gaowei, LI Haojun, WANG Zhaofeng, et al. Temperature and particle size effect of thermal conductivity of loose coal[J]. China Safety Science and Technology, 2015, 11(2): 17-22.
- [8] 王凯, 翟小伟, 王炜罡, 等. 氧浓度与风量对煤热物性参数影响的实验研究[J]. 西安科技大学学报, 2018, 38(1): 31-36.
- WANG Kai, ZHAI Xiaowei, WANG Weigang, et al. Experimental study on the influence of oxygen concentration and air volume on coal thermal property parameters[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2018, 38(1): 31-36.
- [9] 肖畅, 陈龙刚, 李青蔚, 等. 低温条件下煤的热物性参数实验研究[J]. 安全与环境学报, 2018, 18(6): 2190-2194.
- XIAO Yang, CHEN Longgang, LI Qingwei, et al. Experimental study on thermal properties of coal under low temperature conditions[J]. Journal of Safety and Environment, 2018, 18(6): 2190-2194.
- [10] 肖畅, 尹岚, 马砺, 等. 不同预氧化温度下煤样热物性参数的实验研究[J]. 西安科技大学学报, 2018, 38(3): 383-388.
- XIAO Yang, YIN Lang, MA Li, et al. Experimental study on thermal properties of coal samples under different pre-oxidation temperatures[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2018, 38(3): 383-388.
- [11] 邓军, 陈炜乐, 肖畅, 等. 咪唑类离子液体对煤热物性参数影响的实验研究[J]. 西安科技大学学报, 2018, 38(4): 523-529.
- DENG Jun, CHEN Weile, XIAO Yang, et al. Experimental study on the influence of imidazolium ionic liquids on thermal properties of coal[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2018, 38(4): 523-529.
- [12] 徐长富, 樊少武, 姚海飞, 等. 水分对煤自燃临界温度影响的试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(7): 65-68, 14.
- XU Changfu, FAN Shaowu, YAO Haifei, et al. Experimental study on the effect of water on the critical temperature of spontaneous combustion of coal[J]. Journal of Coal Science and Technology, 2015, 43(7): 65-68, 14.
- [13] 梁晓瑜, 王德明. 水分对煤炭自燃的影响[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2003, 22(4): 472-474.
- LIANG Xiaoyu, WANG Deming. Effect of moisture on coal spontaneous combustion[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science Edition), 2003, 22(4): 472-474.
- [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 water immersion on oxidation activation energy and thermal effect of coal[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(9): 2518-2524.
- [15] LI X C, SONG H, WANG Q, et al. Experimental study on drying and moisture re-adsorption kinetics of an Indonesian low rank coal[J]. Journal of Environmental Sciences, 2009, 21(9): S127-S130.
- [16] PARKER W J, JENKINS R J, BUTLER C P, et al. Flash method of determining thermal diffusivity, heat capacity, and thermal conductivity[J]. Journal of applied physics, 1961, 32(9): 1679-1684.
- [17] 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, 34(7): 26-29.
- MA Hanpeng, LU Wei, WANG Deming, et al. Study on physical adsorption of oxygen during spontaneous combustion of coal[J]. Coal Science and Technology, 2006, 34(7): 26-29.
- [18] 王德明, 辛海会. 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. Various elementary reactions and correlations in coal spontaneous combustion: Theory and application of coal oxidation kinetics[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(8): 1667-1674.
- [19] 杨漪, 邓军, 张阒妮, 等. 煤氧化特性的 STA-FTIR 实验研究[J]. 煤炭学报, 2018, 43(4): 134-143.
- YANG Yi, DENG Jun, ZHANG Huini, et al. STA-FTIR experimental study on oxidation characteristics of coal[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(4): 134-143.
- [20] 葛岭梅, 薛韩玲, 徐精彩, 等. 对煤分子中活性基团氧化机理的分析[J]. 煤炭转化, 2001, 24(3): 23-28.
- GE Lingmei, XUE Hanling, XU Jingcai, et al. Analysis of the oxidation mechanism of reactive groups in coal molecules[J]. Coal Conversion, 2001, 24(3): 23-28.
- [21] 张妮, 曾凡桂, 降文萍. 中国典型动力煤种热解动力学分析[J]. 太原理工大学学报, 2005, 36(5): 549-552.
- ZHANG Ni, ZENG Fangui, XIANG Wenping. Analysis of Pyrolysis kinetics of typical power coals in china[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2005, 36(5): 549-552.
- [22] 张卫清, 蒋曙光, 吴征艳, 等. 煤表面自燃特性结构综述[J]. 煤矿安全, 2012, 43(1): 15-18.
- ZHANG Weiqing, JIANG Shuguang, WU Zhengyan, et al. Overview of spontaneous combustion characteristics of coal surface[J]. Coal Mine Safety, 2012, 43(1): 15-18.