

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2017.04.011

灰分对煤自燃特性影响的实验研究

李林¹, 陈军朝¹, 姜德义¹, 陈结¹, 范金洋¹, 褚廷湘^{1,2}

(1.重庆大学煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室,重庆400030;2.河南理工大学,河南焦作454000)

摘要:为了研究灰分对煤自燃能力的影响作用,利用绝热氧化实验装置对不同灰分含量煤样进行升温氧化实验,采用 R_{70} 、 T_{CPT} 、 B 3种指标表征灰分含量对煤样自发氧化过程的影响。结果表明:1)灰分含量越大,煤样低温氧化阶段温升速率越小,温升加速点温度越高,煤样的自发氧化过程越慢,煤越不易自燃;灰分含量大于40%后,煤自燃倾向性快速减弱。温升加速点是反应微观信息的零活化能温度的宏观累计结果,具有直观且滞后的特点。灰分越大,滞后越明显,温差越大。2) R_{70} 、 T_{CPT} 、 B 3种指标与灰分关系表现为二次函数。 R_{70} 和 T_{CPT} 两种指标显示灰分越大,自燃倾向性越弱,与实践经验相符。受水分权重影响, B 指标显示煤样在灰分小于40%时,灰分越大,煤样自燃倾向性越强,这与实践经验相悖。因此, B 在判定灰分对煤样自燃倾向性的影响时具有一定的局限性。

关键词:煤自燃;灰分;自燃倾向性

中图分类号:TD752.2

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2017)04-085-08

Experimental study of the impact of ash on spontaneous combustion characteristics of coal

LI Lin¹, CHEN Junchao¹, JIANG Deyi¹, CHEN Jie¹, FAN Jinyang¹, CHU Tingxiang^{1,2}

(1.State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China; 2. Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, Henan, P. R. China)

Abstract: In order to study the influence of ash on the ability of coal spontaneous combustion, we used coal samples with different ash content to carry out temperature rising oxidation experiments in adiabatic oxidation device, and characterized the effects of the different ash content on the coal spontaneous oxidation process with 3 indicators (R_{70} , T_{CPT} , B). The results indicate that (1) the larger the ash content is, the slower the coal spontaneous oxidation process is. In low-temperature oxidation stage, the smaller the heating rate is, the higher the acceleration point of temperature-rising is and the more difficult the coal is to burn spontaneously. When the ash content is greater than 40%, the coal spontaneous combustion tendency is rapidly weakened. The acceleration point of temperature-rising is the accumulated results of temperature

收稿日期:2016-10-25

基金项目:国家自然科学基金青年基金资助项目(51204216);博士点基金资助项目(20130191130003);国家科技支撑计划资助项目(2012BAK04B09)。

Supported by National Natural Science Foundation of China (51204216), Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China-Priority development areas (20130191130003) and National Key Technology Support Program (2012BAK04B09).

作者简介:李林(1979-),男,重庆大学副教授,博士,主要从事煤自燃机理和防治方面的教学与研究, (E-mail) daney0803@163.com。

of zero-activation which reflects microscopic information, and it is intuitive and delayed. The larger the ash content is, the more obvious the lag is and the greater the difference in temperature is. (2) The relationship between ash content and the 3 indicators (R_{70} , T_{CPT} , B) is quadratic function. R_{70} and T_{CPT} indicators show the larger the ash is, the weaker the coal spontaneous combustion tendency is, and that is in accordance with experience. Affected by the weight of water, B indicator shows when coal ash is less than 40%, the larger the ash content is, the stronger the coal spontaneous combustion tendency is, which is contrary to experience. Therefore, B indicator has certain limitations in the determination of the impact of ash on the coal spontaneous combustion tendency.

Keywords: coal spontaneous combustion; ash; coal spontaneous combustion tendency

煤的灰分是一项在煤质特性和利用研究中起重要作用的指标。中国煤中的灰分普遍较高,且变化也很大,灰分小于 10% 的特低灰煤全国仅约占探明储量的 17% 左右。随着煤炭资源的逐步紧张,不同灰分含量的煤都将逐步得到利用。煤自燃是矿山开采过程中常见的灾害之一,不同灰分含量对自燃能力的影响及影响程度尚未定论,因而急需加强对此方面的研究。

近年来,国内外学者已经对影响煤自燃能力的不同成分及结构进行了较为广泛的研究。刘伟等^[1]开展了挥发分对煤自燃特性的影响实验研究;杨永良等^[2]揭示了煤中可溶有机质对煤自燃的影响规律;Clemens 等^[3]从煤中的活性结构出发,忽略掉煤的复杂结构骨架,提出了包括 10 个反应序列的煤氧化学吸附反应模型;Mathews 等^[4]对比分析了煤的 133 种活性结构,研究各种活性结构在煤自燃过程中的全面体现;Liu 等^[5]采用量子化学计算方法验证了煤的活性反应位点在活性基团上;唐一博等^[6]分析了煤自燃模型化合物苯甲醚和苯甲醇的低温氧化;戴凤威^[7]等利用 Gaussian 03 程序在 B3LYP/6-311G 水平下研究煤结构中噻吩型有机硫与 O_2 反应机理;谢克昌等^[8-9]采用量子化学原理对煤中含硫化合物的脱除进行了研究;朱红青等^[10]研究了煤绝热氧化动力学特征参数与变质程度的关系;Dack 等^[11]研究过氧化物在煤氧吸附过程中生成机理,发现其由煤芳香或脂肪结构中的双自由基氧分子与游离碳原子耦合而成;王德明等^[12]建立了煤自燃过程中的 13 个基元反应及其反应顺序和继发性关系;戴广龙等^[13]研究了不同煤样在不同低温氧化温度下的微晶结构变化规律。上述研究均在探讨煤中不同结构对煤自燃的影响,而涉及灰分的内容却鲜有研究。目前,国内外针对灰分的研究集中在检测设备及技术的优化方面,对灰分影响自燃的机理有一些经验型的结论,缺乏科学的实验研究成果支撑。在此背景下,煤自燃过程中有关具针对性的分析煤中不同灰分含量及含量变化对煤自燃的影响实验研究需要加强。特别是关于减小灰分含量是否会增强煤体自燃能力及增强程度有待检验。

因此,笔者通过绝热氧化实验研究不同灰分含量对煤自燃特性的影响,分析灰分的作用机理,并讨论了 R_{70} 、 T_{CPT} 、 B 指标受灰分影响的变化情况,其成果对指导防灭火工作具有重要的参考价值。

1 实验概况

1.1 实验装置

模拟煤自燃实验的关键是热量积聚的环境条件,最理想的状态就是尽量使煤低温氧化强度增大,而产生的热量又完全保留在煤体中不向环境散失,因而本实验采用绝热氧化实验装置,其结构如图 1 所示。



图 1 绝热氧化实验装置实物示意图

Fig.1 Schematic of adiabatic oxidation reactive apparatus

1.2 实验煤样

实验所用煤样取自不同煤矿的工作面,取出后立即用保险膜包裹,再用锡箔纸包裹,最后在外层用胶纸缠紧。包裹好的煤样放入冰箱,最大限度地保持煤样的新鲜,维持煤样原始的性质。每组实验煤样 150 g,煤样工业分析数据如表 1 所示。

表 1 煤样参数表

Table 1 The table of coal sample parameters

| 煤样 | $A_d/\%$ | $M_{ad}/\%$ | $V_{daf}/\%$ | $c_{ad}/\%$ | $\omega(S)/\%$ |
|----|----------|-------------|--------------|-------------|----------------|
| A | 9.8 | 14.2 | 16.16 | 58.30 | 1.54 |
| B | 16.1 | 14.1 | 17.80 | 50.64 | 1.36 |
| C | 28.4 | 11.9 | 19.20 | 39.20 | 1.30 |
| D | 39.1 | 12.3 | 15.70 | 32.16 | 0.74 |
| E | 47.8 | 10.9 | 16.70 | 23.37 | 1.23 |
| F | 62.2 | 9.0 | 12.56 | 15.10 | 1.14 |

1.3 实验步骤

1) 实验时,将每个煤样粒度分散成 0~0.3 mm,并在氮气的环境条件下以 105 ℃ 的恒定温度干燥约 15 h。

2) 将煤样置于温度 40 ℃ 的绝热箱中,直到温度达到平衡。温度平衡后,立即将煤样放入反应器中,同时通入氮气稳定温度在 40 ℃。

3) 煤样温度稳定后,将绝热箱调到自动监控模式,同时通入稳定的 50 ml/min 氧气。绝热箱的限位开关限制温度在 180 ℃。

4) 煤样温度达到 180 ℃ 时,自动切断电源和氧气的供给,实验结束。

2 实验结果及分析

2.1 绝热氧化实验结果分析

为避免实验的偶然性,每组煤样均重复实验两次,所得曲线相似度极大,在规律上具有较好的一致性。将不同灰分煤样进行对比,所得绝热氧化曲线如图 2 所示。

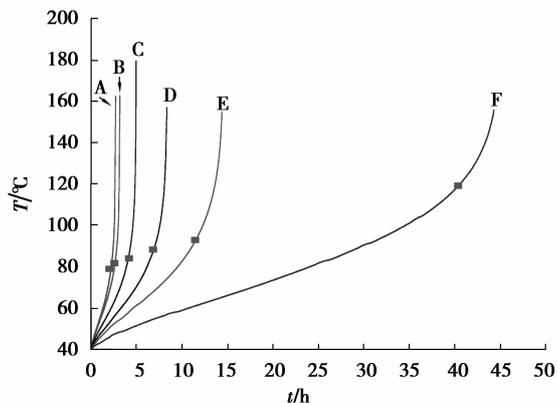


图 2 煤样绝热氧化升温曲线

Fig.2 Temperature rise curve of adiabatic oxidation test

煤的自加热和自燃倾向性难易程度可用多种指标来衡量,本节采用 R_{70} 值表征煤样的自加热氧化能力及自燃倾向性。 R_{70} 值是煤低温氧化过程中物理化学反应的体现,将煤样从 40~70 ℃ 的平均升温速率作为衡

量其自燃倾向性强弱的指标^[14]。定义图 2 中曲线斜率突变点(图中已标注)为温升加速点(T_1),所有的煤样实验开始时的温度均为 40 °C,由图 2 可知:

1)任一实验中,温升加速点前后曲线斜率呈现出阶段性的差异。低于温升加速点温度,煤样温度呈线性增大趋势;高于温升加速点温度,煤样温度呈指数增加,较短时间内便达到自燃温度。这是由于温升加速点之后,煤样开始发生本质性的改变,另一方面其水分逐渐蒸发,有效比表面积逐渐增加,加剧煤氧复合程度;一方面其逐步进入化学吸附与反应阶段,放热量急剧增大。

2)不同实验中,不同灰分含量的煤样绝热氧化升温曲线差异较大。灰分含量 9.8% 的煤样,其温升加速点温度仅为 75 °C, R_{70} 为 16.22 °C/h,仅用 2.7 h 便达到 160 °C;而灰分含量 62.2%,其温升加速点温度达到 125 °C, R_{70} 仅为 1.69 °C/h,需要 44.3 h 才能达到 160 °C。因而,煤样灰分含量对温升加速点及 R_{70} 具有显著的影响,灰分含量越大,煤样的自发氧化过程越慢,表现为低温氧化阶段温升速率越小。经计算求得煤样 R_{70} ,煤样灰分含量与 R_{70} 及温升加速点温度关系如图 3 所示。

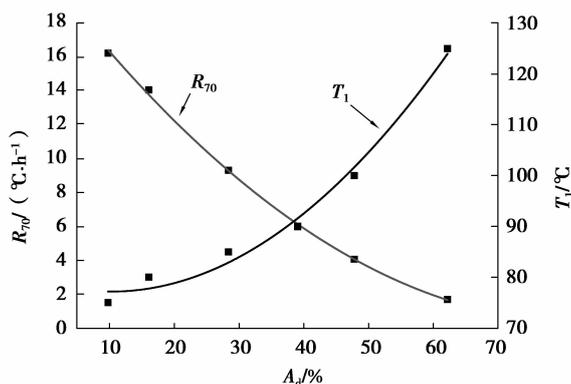


图 3 灰分与 R_{70} 、温升加速点的关系

Fig.3 The relationship between ash, R_{70} and the point of accelerated temperature

由图 3 可知:1)随着灰分含量的增大,温升加速点逐步上移, R_{70} 值则逐渐减小,即煤样的自加热能力在减弱,煤样自然发火时间在增长;2)曲线在灰分约为 40% 相交,相交前后曲线斜率有所差异,表现为:灰分含量大于 40%,温升加速点快速上移, R_{70} 值缓慢减小;3)随着灰分含量的减小,温升加速点逐渐趋于 70 °C 左右,说明煤自燃的本质属性是低温氧化性^[15],其过程关键是低温氧化阶段,即 70 °C 以下阶段(实际一般认为煤体温度达到 70 °C 左右时就已经开始自燃了)。

2.2 灰分影响机理

灰分是煤中的有害物质,主要来源于矿物质的燃烧,其对煤样自发氧化过程的影响如下:1)煤灰成分十分复杂,成分不同直接影响到灰分的熔点,熔点低的成分,自燃过程中熔化时会在炉内结成“覆盖物”,使得炭粒的内部孔隙与反应面积减小,从而抑制了煤氧复合,不利于加快煤体的燃烧速度;2)矿物质燃烧灰化时要吸收热量,使炉内热量积聚及温升速率变得缓慢,同一时期内一些活性结构因得不到充足的活化能而无法参与氧化反应,进而使煤样氧化放热强度降低,阻碍了燃烧和着火条件的产生;3)灰分本身也会改变煤样的多孔结构,使得在多孔结构中的热量和质量传递受到影响。因而,灰分是煤样发热量的重要影响因素,减小灰分含量有利于热质传递的改善,从而增强煤的活性,降低煤的燃点,提高煤的热效率。

图 3 中灰分与温升加速点温度 R_{70} 值的关系均符合二次函数,如下所示:

$$T_1 = a_1 A_d^2 + b_1 A_d + c_1, \quad (1)$$

$$R_{70} = a_2 A_d^2 + b_2 A_d + c_2, \quad (2)$$

式中: T_1 为温升加速点温度,°C; A_d 为灰分含量,%; $a_1, b_1, c_1, a_2, b_2, c_2$ 为常数,分别为 0.017 3, -0.354, 78.975, 0.003, -0.5, 21.135。由式(1)、(2)经计算可知:当 $A_d = 10.23$ 时, $T_1 = 77.164, R_{70} = 16.334$,此时温升加速点最低;当 $A_d = 83.33$ 时, $T_1 = 169.605, R_{70} = 0.302$,此时煤样自燃倾向性最低。由 Moreby 在分类指标知:

当 $R_{70} < 0.5 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{h}$, 煤体不易自燃, 代入式(2)可求 $74.81 \leq x \leq 91.43$ 。可以发现, 一定程度上增大灰分含量可以减少因煤自燃引起的火灾, 为煤矿的勘探测量、煤堆的发火预防预测提供服务, 但灰分又与其他特性如元素成分、发热量、结渣性、活性及发热量等有程度不同的依赖关系, 故应综合考虑实际情况将灰分含量控制在一定范围内。

2.3 灰分对宏微观特征温度的影响

从宏观与微观特征温度的规律性变化可以较好地反映灰分对煤自燃过程的影响。宏观方面, 将温升加速点温度作为宏观特征温度, 2.1 已详细分析。微观方面, 据煤自然活化理论, 随着温度的升高, 激发煤中活性结构所需的活化能逐渐由正转负, 即煤体开始由被动氧化转变为自发氧化反应。一些学者的研究已定义活化能为零时对应的温度为零活化能温度, 并拟合出了零活化能温度与 R_{70} 关系方程^[16], 如式(3)所示:

$$T_2 = -0.002 \ 5R_{70}^3 + 0.168R_{70}^2 - 3.187 \ 9R_{70} + 75.257, \tag{3}$$

式中: T_2 为零活化能温度, $^\circ\text{C}$ 。由式(3)可求得零活化能温度, 将此温度作为微观特征温度与宏观温升加速点温度对比, 如表 2 所示。

表 2 温度对比
Table 2 The temperature contrast

| 煤样 | 零活化能 温度/ $^\circ\text{C}$ | 温升加速点 温度/ $^\circ\text{C}$ | $R_{70}/(\text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{h}^{-1})$ | B 指数 | $T_{\text{CPT}}/^\circ\text{C}$ |
|----|------------------------------|-------------------------------|--|-------|---------------------------------|
| A | 57.48 | 75 | 16.22 | 106.4 | 109 |
| B | 58.19 | 80 | 14.05 | 74.3 | 120 |
| C | 55.08 | 85 | 9.31 | 54.0 | 139 |
| D | 62.09 | 90 | 5.98 | 41.9 | 162 |
| E | 61.89 | 100 | 4.06 | 77.7 | 171 |
| F | 74.38 | 125 | 1.69 | 178.7 | 183 |

由表 2 可知: 1) 零活化能温度受灰分含量的影响, 总体上呈现出随灰分含量的增大而升高的趋势, 且其均处于 $50 \sim 75 \text{ } ^\circ\text{C}$ 之间, 此进一步验证了煤自燃过程关键是低温氧化阶段的理论及 R_{70} 温度区间科学性和普遍适用性; 2) 零活化能温度与温升加速点之间存在一定的温差, 这是由于温升加速点是反应微观信息的零活化能温度的宏观累计结果, 具有直观且滞后的特点, 灰分含量越大, 滞后越明显, 温差也就越大, 如图 4 所示。

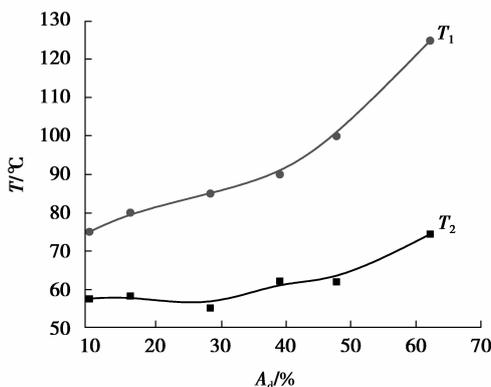


图 4 温度对比

Fig.4 The temperature contrast

从图 4 还可以发现,零活化能温度曲线随灰分含量的增大经历了两次加速,两次加速分别处于灰分含量约为 30% 和 40% 时。其第二次加速与温升加速点曲线具有较好的一致性,说明温升加速点的定义方法具有一定的科学性。而其第一次加速,二者并没有自发地吻合,具体原因有待进一步的研究。在工程实际中,通过测量煤样灰分含量,分析其零活化能温度与温升加速温度,实时检测煤体温度,将煤温控制在微观零活化能温度以下,避免煤样达到宏观温升加速阶段难以控制的局面。

3 讨 论

灰分不同的煤样间自加热和自燃倾向性必然有差异,对应的表征其强弱程度的指标值也必然有所不同。本节讨论其他指标在不同灰分含量下的变化情况,检验它们是否在规律性上与 R_{70} 自发的统一及是否符合实践经验。

1) T_{CPT} 指标分析。

交叉点温度是(T_{CPT})通过观测线性升温环境中煤样的温度变化,检测煤样中心温度变化曲线与环境温度曲线出现交叉的温度值。 T_{CPT} 温度越低,意味着发生显著氧化和自加热现象的起始(或临界)温度越低,即煤样具有较强自燃倾向性的特质;反之,则相反^[17]。实验所得 T_{CPT} 温度如表 2 所示,其随灰分含量变化关系如图 5 所示。由表 2 及图 5 可知:1) T_{CPT} 温度随着灰分含量增加而变高,表明煤样自加热和自燃倾向性因灰分含量增加而降低,这与实践经验是一致的;2) T_{CPT} 温升速率在灰分为 40% 后发生变化,变化后温升有所减缓。

上述 T_{CPT} 温度呈现出的规律,内在原因有两方面:一方面灰分含量越高,灰分灰化需要的时间越长,导致阶段性的滞留时间相应延长,从而推迟了出现交叉点温度的时间, T_{CPT} 温度就相对较高;另一方面实验煤样含水量各不相同,在较低温氧化过程中存在一个水分平衡阶段^[18],对煤样固有的自加热和自燃特性会造成一定的干扰。保持煤有一定的湿度,只要在其临界水平以上,可以发现煤的自热有明显的延时^[19]。Ogunsola^[20] 等将 T_{CPT} 温度随含水量变化分成两个阶段:低于 5% 时的不敏感阶段和较高含水量情形下的持续增大阶段。故水分对 T_{CPT} 温度干扰的主要原因为:a. 实验煤样均具有较高的含水量;b. 实验煤样随煤样灰分含量的增加而减小,水分蒸发的时间逐步缩短,加快了 T_{CPT} 温度出现的时间,即 T_{CPT} 温升速率有所降低。

2) B 值分析。

基于交叉点温度法建立的煤样自燃倾向性指标 B 与湿度和灰度的关系,关系式如下:

$$B = 21.48 \times M_{ad} + 0.98 \times A_d - 0.62 \times M_{ad}^2 - 0.58 \times M_{ad} \times A_d + 0.08 \times A_d^2 - 10.2, \quad (4)$$

式中: B 煤自燃倾向性指数; M_{ad} 为煤样水分,%; A_d 为煤样灰分,%。计算所得的 B 值如表 2 所示,其随灰分含量变化关系如图 6 所示。理想的 B 值在规律性上应与 T_{CPT} 温度吻合,但从图 6 发现,曲线在灰分含量 40% 左右发生反转,灰分含量低于 40%, B 值随灰分含量的增加而缓慢降低;灰分含量高于 40%, B 值随灰分含量的增加而快速

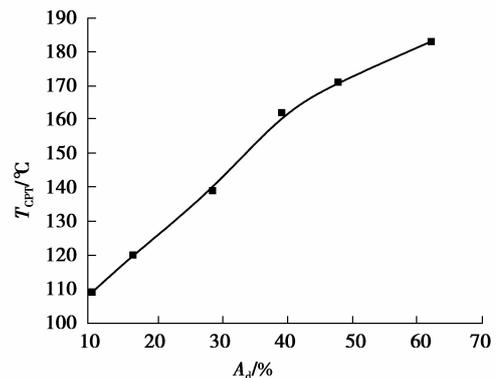


图 5 灰分与 T_{CPT} 关系

Fig.5 The relationship between ash and T_{CPT}

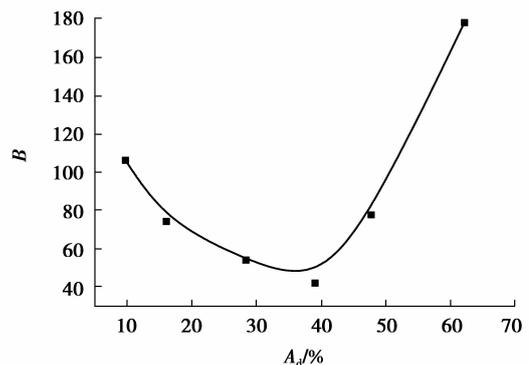


图 6 灰分与 B 关系图

Fig.6 The relationship between ash and B

增大。异常的原因为 B 值同时受控于水分和灰分,二者在不同阶段对 B 值影响权重不同。参考 T_{CPT} 温度曲线规律分析可知:灰分含量低于 40%,水分对 B 权重显著,但水分含量逐渐减小,其权重逐渐降低;灰分含量高于 40%,灰分替代水分成为主导因素,煤样自加热和自燃倾向性急速减弱, B 值急剧增大。

3) 评定结果对比。

经计算 R_{70} 、 T_{CPT} 及 B 值如表 2 所示。将图 5~6 曲线进行最优化数学拟合,选取拟合度高的模型,如下所示:

$$T_{\text{CPT}} = a_3 A_d^2 + b_3 A_d + c_3, \quad (5)$$

$$B = a_4 A_d^2 + b_4 A_d + c_4, \quad (6)$$

式中: $a_3, b_3, c_3, a_4, b_4, c_4$ 为常数,分别为 $-0.0129, 2.38, 85.53, 0.143, -8.97, 182.66$ 。通过对比 3 种指标的评定结果可知:3 种指标在规律性上并没有自发地统一,它们从不同的角度并且只是在一定程度上揭示了煤样自燃的难易程度而已,但它们与灰分关系均表现为二次函数。 R_{70} 和 T_{CPT} 两种指标显示灰分越大,自燃倾向性越弱,与实践经验相符;而由于受水分权重的影响, B 指标显示煤样在灰分小于 40% 时,灰分越大煤样自燃倾向性越强,这与实践经验相悖,因此,其在判定灰分对煤样自燃倾向性的影响时存在一定的局限性。

4 结 论

笔者采用 R_{70} 、 T_{CPT} 、 B 3 种指标表征灰分含量在绝热氧化实验中对煤样产生的影响,实验结果表明:

1) 煤样灰分含量对温升加速点及 R_{70} 具有显著的影响,随着灰分含量的增大,煤样的自发氧化过程越慢,温升加速点逐步上移, R_{70} 值则逐渐减小,灰分含量大于 40% 后,温升加速点快速上移, R_{70} 值缓慢减小,煤自燃倾向性快速减弱。

2) 零活化能温度与温升加速点间存在一定的温差,并且灰分含量越高,此温差越大。

3) 3 种指标在规律性上并没有自发地统一,它们与灰分关系表现为二次函数。 R_{70} 和 T_{CPT} 两种指标显示灰分越大,自燃倾向性越弱,与实践经验相符。受水分权重影响,灰分含量低于 40% 时, B 值随灰分含量的增加而缓慢降低,这与实践经验相悖,其在自燃倾向性判定方面存在一定的局限性。

参考文献:

- [1] 刘伟, 秦跃平, 杨小彬, 等. 挥发分对煤自燃特性影响的实验研究[J]. 煤炭学报, 2014, 39(5): 891-896.
LIU Wei, QIN Yueping, YANG Xiaobin, et al. Experimental study for impact of volatile matter on spontaneous combustion characteristics of coal[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(5): 891-896. (in Chinese)
- [2] 杨永良, 李增华, 季淮君, 等. 可溶有机质对煤低温氧化的影响[J]. 煤炭学报, 2013, 38(10): 1806-1811.
YANG Yongliang, LI Zenghua, JI Huaqun, et al. Experimental study for impact of volatile matter on spontaneous combustion characteristics of coal[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(10): 1806-1811. (in Chinese)
- [3] Clemens A H, Matheson T W, Rogers D E. Low temperature oxidation studies of dried New Zealand coals[J]. Fuel, 1991, 70(2): 215-221.
- [4] Mathews J P, Chaffee A L. The molecular representations of coal: a review[J]. Fuel, 2012, 96(7): 1-14.
- [5] Liu D, Li Z, Sun Q, et al. In situ FT-IR study of thiophene adsorbed on the surface of sulfided Mo catalysts[J]. Fuel, 2012, 92(1): 77-83.
- [6] 唐一博, 李增华, 杨永良, 等. 煤自燃模型化合物苯甲醚和苯甲醇的低温氧化[J]. 煤炭学报, 2014, 37(12): 2048-2052.
TANG Yibo, LI Zenghua, YANG Yongliang, et al. Low-temperature oxidation of anisole and benzyl alcohol by model compounds of coal spontaneous combustion[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 37(12): 2048-2052. (in Chinese)
- [7] 戴凤威, 邓存宝, 邓汉忠, 等. 噻吩结构与 O_2 反应机理的理论研究[J]. 煤炭学报, 2014, 39(4): 699-704.
DAI Fengwei, DENG Cunbao, DENG Hanzhong, et al. Theoretical study on the mechanism of the thiophene structure

- with O₂ reaction[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(4): 699-704. (in Chinese)
- [8] Ling L X, Zhang R G, Wang B J, et al. Density functional theory study on the pyrolysis mechanism of thiophene in coal[J]. Journal of Molecular Structure Theochem, 2009, 905(1/2/3): 8-12.
- [9] Ling L X, Zhang R G, Wang B J, et al. DFT study on the sulfur migration during benzenethiol pyrolysis in coal[J]. Journal of Molecular Structure Theochem, 2010, 952(1/2/3): 31-35.
- [10] 朱红青, 王海燕, 宋泽阳, 等. 煤绝热氧化动力学特征参数与变质程度的关系[J]. 煤炭学报, 2014, 39(3): 498-503.
ZHU Hongqing, WANG Haiyan, SONG Zeyang, et al. The relationship between oxidation kinetics characteristic parameters of coal adiabatic progress and metamorphic degree[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(3): 498-503. (in Chinese)
- [11] Dack S W, Hobday M D, Smith T D, et al. Free-radical involvement in the drying and oxidation of victorian brown coal[J]. Fuel, 1983, 62(12): 1510-1512.
- [12] 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 Xurao, 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. (in Chinese)
- [13] 戴广龙. 煤低温氧化过程中微晶结构变化规律研究[J]. 煤炭学报, 2011, 36(2): 322-325.
DAI Guanglong. Research on micro-crystalline structure change regularity in the coal low temperature oxidation process[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(2): 322-325. (in Chinese)
- [14] Wang H, Dlugogorski B Z, Kennedy E M. Analysis of the mechanism of the low-temperature oxidation of coal[J]. Combustion and Flame, 2003, 134(1/2): 107-117.
- [15] 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. (in Chinese)
- [16] 李林, Beamish, 姜德义, 等. 煤自然活化反应理论[J]. 煤炭学报, 2009, 34(4): 505-508.
LI Lin, Beamish, JIANG Deyi, et al. Self activation theory of spontaneous combustion of coal[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(4): 505-508. (in Chinese)
- [17] 王寅, 王海晖. 基于交叉点温度法煤自燃倾向性评定指标的物理内涵[J]. 煤炭学报, 2015, 40(2): 377-382.
WANG Yan, WANG Haihui. Physical nature of the indexes for ranking self-heating tendency of coal based on the conventional crossing-point temperature technique[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(2): 377-382. (in Chinese)
- [18] Küçük A, Kadiog˘ lu Y, Gülabog˘ lu M S. A study of spontaneous combustion characteristics of a turkish lignite: particle size, moisture of coal, humidity of air[J]. Combust and Flame, 2003, 133(2): 255-261.
- [19] 姜德义, 李林, Beamish. 湿度对煤自燃倾向性影响[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2008, 31(12): 1451-1454.
JIANG Deyi, LI Lin, Beamish. The effect of moisture content on the tendency of coal to combust spontaneously[J]. Journal of Chongqing University(Natural Science Edition), 2008, 31(12): 1451-1454. (in Chinese)
- [20] Ogunsola O I, Mikula R J. Effect of thermal upgrading on spontaneous combustion characteristics of western Canadian low rank coals[J]. Fuel, 1992, 71(1): 3-8.