

doi: 10.11799/ce202004021

济北矿区煤尘层最低着火温度变化规律分析

赵文彬¹, 刘 晴¹, 毛庆福², 宋 蕾¹, 郭玉印², 曹卫星²

(1. 山东科技大学 安全与环境工程学院, 山东 青岛 266590;

2. 山东济矿鲁能煤电股份有限公司阳城煤电, 山东 济宁 272502)

摘 要: 为了探究埋深、粒径对煤尘层最低着火温度的影响, 选取济北矿区煤样, 在对深部煤层物化性质研究的基础上, 通过热板实验测得不同埋深、粒径的煤最低着火温度。结果表明: 在实验温度范围内, 煤尘层厚度为 5mm, 埋深增加, 其挥发分含量上升, 由 33.65% 增至 38.9%, 煤尘层最低着火温度从 330℃ 降至 270℃, 煤尘层着火现象肉眼可观测到。随煤样粒径不断减小, 不同埋深煤样的煤尘层最低着火温度明显减小, 在煤尘层同为 5mm 时, 随煤样粒径由 180 μm 逐渐减小到 75 μm , 3 种不同埋深煤样煤尘层最低着火温度分别减小了 16%、19%、25%, 差异显著。

关键词: 埋深; 红外光谱; 粒径; 挥发分; 着火温度

中图分类号: TD75 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-0959(2020)04-0108-05

Variation law of minimum ignition temperature of coal dust layer in Jibei Mining Area

ZHAO Wen-bin¹, LIU Qing¹, MAO Qing-fu², SONG Lei¹, GUO Yu-yin², CAO Wei-xing²

(1. School of Safety and Environment Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;

2. Yangcheng Coal and Electricity, Shandong Jinyuan Luneng Coal and Electricity Co., Ltd., Jining 272502, China)

Abstract: In order to explore the influence of buried depth and particle size on the minimum ignition temperature of coal dust layer, coal samples from Jibei Mining Area are selected. Based on the physicochemical properties of deep coal seams, the minimum ignition temperature of coal with different depths and particle sizes is measured by hot plate experiments. The results show that in the experimental temperature range, the thickness of the coal dust layer is 5mm, the buried depth increases, the volatile content increases from 33.65% to 38.9%, and the minimum ignition temperature of the coal dust layer decreases from 330℃ to 270℃. The phenomenon of layer fire can be observed with the naked eye. As particle size of the coal sample decreases continuously, the minimum ignition temperature of the coal dust layer of different buried coal samples is significantly reduced. When the coal dust layer is 5mm, as the coal sample particle size decreases from 180 μm to 75 μm , the minimum ignition temperature of the coal dust layer of three different buried depths decreases by 16%, 19% and 25% respectively, the difference is significant.

Keywords: buried depth; infrared spectrum; particle size; volatile; ignition temperature

矿井生产过程中, 产生大量煤尘, 以积聚状态覆盖在设备表面及地面, 形成一层煤尘层容易引起火灾事故。煤尘层的最低着火温度反映了煤的着火敏感性, 其空间存在状态不同于煤尘云, 目前对煤

尘云的研究较多, 研究煤尘层最低着火温度规律也具有一定的科学价值。随浅部煤炭资源减少, 煤层开采深度逐渐增加, 煤的物理化学性质发生变化, 煤氧化蓄热环境改变, 煤的自燃氧化活性也发生改

收稿日期: 2019-05-21

作者简介: 赵文彬(1976—), 男, 山东泰安人, 博士后, 副教授, 现在主要从事矿井灾害与防治方向的研究, E-mail: Zhwb1976@163.com。

引用格式: 赵文彬, 刘 晴, 毛庆福, 等. 济北矿区煤尘层最低着火温度变化规律分析 [J]. 煤炭工程, 2020, 52(4): 108-112.

变。本文在对不同埋深、粒径煤自燃特性研究的基础上,分析其煤尘层温升蓄热过程中的最低着火温度的变化规律,对了解深部煤层自燃规律具有重要的现实意义。

邓军^[1,2]通过程序升温系统来测得煤的自燃温度,进而得到煤自燃预报指标体系。李大伟^[3]、余明高^[4]通过实验指出煤粒径越小,其吸附表面积越大,吸氧量也就越大。Weiguo Cao^[5]利用恒温热板系统对褐煤煤尘进行实验,发现当煤尘堆积厚度一定时加热板温度对煤尘层内部温度的累积影响较大,温度越高,越有利于粉尘层内部温度的累积,达到最高温度所需的时间也越短。姜秀民、杨海平等^[6]通过热分析法实验发现煤颗粒粒度对着火温度产生影响,随着煤粒径减小,其比表面积越大,燃烧和热解速率越快,转化率越高,着火温度越低。

1 不同埋深煤的煤质分析

1.1 煤样的选取

为保证获取样品的均质性及代表性,分别选取济北矿区同一煤层埋深分别为440m、670m、880m三个不同水平赋存稳定且受地质构造影响较小的区域取样。煤样制备前后及储存中,为减少外界条件影响,将其放置于不吸水、不透气的阴凉处密封容器中^[7]。为对比不同粒径对煤粉层最低着火温度的影响,将三个不同埋深的煤样破碎,筛分为75 μm 、106 μm 、120 μm 、180 μm 不同粒径测定物化性质及煤粉层最低着火温度。

1.2 不同埋深煤的工业分析

对不同埋深煤样的工业分析(见表1)可以看出,不同埋深的3种煤样工业分析数据差异较明显,工业分析表明,该煤层属于中高挥发烟煤,随埋深增加挥发分含量由浅部33.65%增加至深部的38.9%;固定碳含量由浅部的56.87%将至深部的48.32%;该煤层为低灰分煤,其灰分含量由浅部的6.12%增加至深部的10.26%。

表1 济北矿区不同埋深煤样的工业分析

编号	煤样 埋深/m	水分 $M_{\text{ad}}/\%$	挥发分 $V_{\text{ad}}/\%$	固定碳 $FC_{\text{ad}}/\%$	灰分 $A_{\text{ad}}/\%$
1 [#]	470	3.36	33.65	56.87	6.12
2 [#]	640	2.86	35.73	54.48	6.93
3 [#]	880	2.52	38.9	48.32	10.26

1.3 不同埋深煤的 FTIR 分析

同种煤在埋深发生变化时,其官能团数量随之变化,其吸收峰的强度也会发生变化,同一种官能团的光谱位置是一定的,为了进行分析比较,根据张辛亥^[8,9]、戴广龙^[10]、褚廷湘^[11]等用傅里叶变换红外光谱仪对得出的红外光谱图进行了详细分析,得出实验煤样主要谱峰的特征见表2。三种不同埋深煤样傅里叶红外光谱如图1所示。

表2 煤在红外光谱中峰的归属

编号	谱峰位置/ cm^{-1}	官能团	归属
1	3967~3684	—OH	—OH 伸展振动, 羟基、醇、酚类
	3624~3610 3400		
2	2922~2918	—CH ₃ 、CH ₂ —	甲基、亚甲基不对称伸缩振动
3	2858~2847	—CH ₂ —	亚甲基对称伸缩振动
4	1736~1722	C=O、—CO—O—	醛、酮、酯类羧基
5	1706~1705	C=O、—CHO	芳香酮、醛类羧基
6	1604~1599	—C=C—	芳环中 C=C 伸缩振动
7	1449~1439	—CH ₂ —	亚甲基剪切振动
8	3056~3032	—CH	芳烃—CH 基伸缩振动
9	1379~1373	—CH ₃	甲基剪切振动
10	1110~1330	Ar—O—C	醇、醚、酯氧键伸缩振动
11	1026~912		矿物质
12	860~700		取代苯类
13	753~743	—CH ₂ —	亚甲基平面振动
14	1640~1650	—CO—N—	酰胺
15	1770~1720	C=O	脂肪族中酸酐伸缩振动

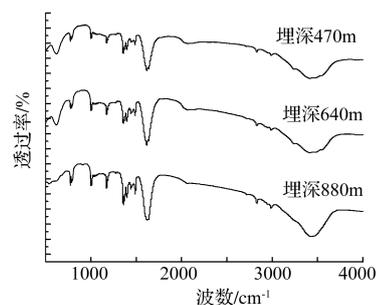


图1 三种不同埋深煤样傅里叶红外光谱图

由表2和图1分析可得:

1) 芳香烃: 在3040 cm^{-1} 处有芳香烃CH振动; 在700~860 cm^{-1} 处有芳香烃CH基振动和芳香烃面外变形振动。

2) 脂肪烃: 在1380 cm^{-1} 、1430 cm^{-1} 处有脂肪烃的次甲基、甲基对称和不对称伸展振动及弯曲振动; 在2860 cm^{-1} 处有环烷烃的次甲基对称伸缩

振动。

3) 含氧官能团: 在 $1110\sim 1330\text{cm}^{-1}$ 处出现很弱的醚键褶皱振动; 在 $1720\sim 1770\text{cm}^{-1}$ 处出现 $\text{C}=\text{O}$ 脂肪族中酸酐伸缩振动; 在 3690cm^{-1} 处有 $-\text{OH}$ 羟基伸缩振动。

由此可见, 对 3 种不同埋深煤样的红外光谱: 从埋深 470m 到埋深 880m, 芳香烃含量整体呈现上升趋势; 脂肪烃含量呈上升趋势, 煤样吸收强度均随着埋深增加逐渐增大, 脂肪烃侧链断裂产生 H_2 量增加, 煤分子更容易与 O_2 发生氧化反应, 煤自燃倾向性增加; 埋深增大, 煤中含氧官能团的含量增大。含氧官能团具有较高的反应活性, 易与氧气发生复合反应发出大量的热, 促进煤的自燃。因此, 随着埋深增加, 含氧官能团增多, 煤自燃倾向性增大。

2 煤尘层最低着火温度测定实验

2.1 实验装置

根据国际标准《粉尘层最低着火温度测定方法》(GB/T 16430—1996)^[12], 利用 FCZ-I 粉尘层着火温度测定系统测定煤尘层最低着火温度。主要部件为不锈钢材料制作的热板, 热板由下部的加热器加热, 并由安装在平板内靠近平板中心的热电偶控制温度, 热表面控制热电偶的结点在平板表面下 $1\text{mm}\pm 0.5\text{mm}$ 处; 以同样的方法及要求将热表面记录电偶安装在热表面控制热电偶附近, 并连接到温度记录仪, 用来记录实验过程中的温度。在热板上放一个盛粉环用来放置煤尘, 本次试验采用高度为 5mm 的盛粉环。

2.2 实验原理及过程

煤尘层是指在静止沉积状态的煤尘, 煤尘层最低着火温度是指能引燃一定厚度的煤尘层并且可以维持火焰传播的最低温度^[13]。目前国际上煤尘层最低着火温度测定方法, 主要有美国矿务局的烘箱实验法和德国的热板实验法, 其中德国的热板实验法已被国际标准和我国标准所接纳^[14]。

基于《粉尘层最低着火温度测定方法》(GB/T 16430—1996)中的规定, 首先将热板加热到预定温度, 然后将煤尘自然堆放在盛粉环内, 在向煤尘层最低着火温度测定装置的热板表面中放置煤尘时, 不能用力按压。实验过程中观察是否有产生明火或

煤尘内部温度是否超过热板温度 20°C 。每次实验至少维持恒温 0.5h, 满足煤尘着火条件的最低热板温度即为煤尘层的最低着火温度。若能证明反应没有发生有焰或无焰燃烧, 以下过程都认为是着火: ①能观察到粉尘有焰燃烧或无焰燃烧; ②温度达到 450°C ; ③高出热表面温度 250°C 。

3 实验结果及分析

3.1 最低着火温度随煤样埋深变化规律

选用济北矿区埋深同一煤层埋深分别为 470m、640m、880m 共 3 种煤样进行实验测定, 并从中找到在埋深影响下煤着火敏感性的变化规律。选取煤尘粒径为 $75\mu\text{m}$, 煤尘层厚度为 5mm, 热板表面温度设定最高值 400°C , 在相同实验工况下测定 3 种不同埋深煤样的煤尘层最低着火温度, 结果见表 3。

表 3 不同埋深煤尘层最低着火温度

煤样编号	埋深/m	挥发分/%	最低着火温度/ $^\circ\text{C}$
1 [#]	470	33.65	330
2 [#]	640	35.73	310
3 [#]	880	38.9	270

不同埋深煤样在热板表面测定最低着火温度的煤尘层温度-时间曲线如图 2 所示, 实验发现, 3 种煤样煤尘层在高温热表面环境下持续 30min 内均出现有焰燃烧或无焰燃烧现象, 为①类着火, 判断着火依据相同。图 2(a)(b)(c)中温度曲线波动剧烈, 是因为 3 种实验煤样挥发分含量均较高, 其煤尘在受热过程中易发生着火现象, 但热表面上的煤尘层很薄, 表面积较大, 散热速度快, 火星很快就会熄灭, 温度下降; 同时热表面上的煤尘层其他区域又会由于热量的集聚而出现有焰或无焰燃烧现象, 温度又会升高, 这个过程依次反复进行, 所以位于热表面中心的热电偶温度探头测得的温度出现反复波动现象。

3 种不同埋深煤样灰分含量都较低, 从表 3 和图 2 可以看出, 煤样埋深越深, 挥发分含量逐渐增大, 由 33.65% 增至 38.9%, 煤尘层最低着火温度由浅部的 330°C 降为深部的 270°C , 影响显著。其原因是煤在进行燃烧时, 首先其中的水分脱除, 紧接着逸出挥发分。挥发分能在较低的温度下析出并燃烧产生焦炭, 且挥发分与空气的混合物着火温度很低,

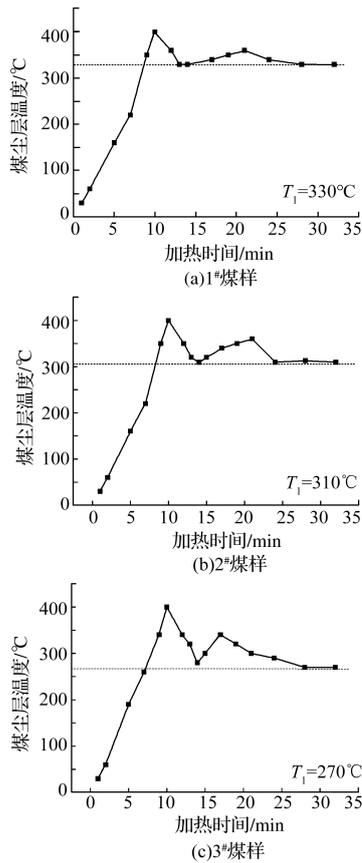


图2 不同埋深煤尘层温度-时间曲线

在高温下先着火,产生的热量传递给周围的煤粉颗粒,迅速提高焦炭温度,为其着火燃烧提供有利条件;煤样颗粒由于挥发分的析出其内部孔隙和反应面积增大,为焦炭的快速燃烧提供有利条件。故挥发分含量越高,煤的着火敏感性更强,但由于成煤的复杂性,挥发分对煤着火敏感性的影响只能在灰分质量分数相当的情况下表现在总体趋势上。

结合表2和图1看出,随埋深增加,煤样中的羟基、脂肪烃、芳香烃等还原性官能团含量整体呈上升趋势,煤在氧化过程中与氧结合的能力增强,煤自燃倾向性更大,更容易发生自燃现象。煤中不稳定的含氧官能团和脂肪侧链裂解之后形成的产物和芳香烃裂解产生的 H_2 ,这些是挥发分的主要来源。挥发分含量越高,煤样中的含氧官能团和脂肪烃含量也就越多,煤分子更容易与 O_2 发生氧化反应,煤着火敏感性更强。

3.2 最低着火温度随煤样粒径变化规律

为探究尘层最低着火温度随煤尘粒径的变化规律,在相同试验工况下进行4种粒径的实验,3种

不同埋深煤样最低着火温度与粒径的关系如图3所示。

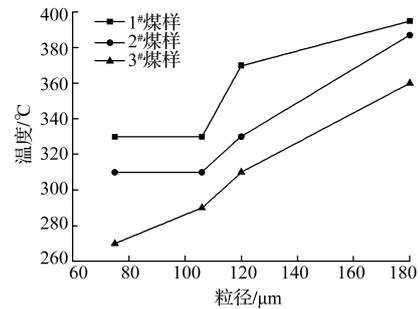


图3 煤尘层最低着火温度与粒径关系

从图3看出,4种粒径在相同试验工况下,1#煤样的煤尘层最低着火温度均最高,3#煤样的均最低,2#煤样的煤尘层最低着火温度介于1#和3#之间。在同一煤尘厚度的情况下,随着煤样粒径的减小,其最低着火温度都明显减小,说明煤样的埋深与煤尘层最低着火温度的影响关系明显。

在煤尘层同为5mm时,随煤样粒径有 $180\mu m$ 逐渐减小到 $75\mu m$,3种不同埋深煤样煤尘层最低着火温度分别减小了16%、19%、25%,差异显著,说明煤尘层最低着火温度受煤样粒径的影响明显。不同埋深煤样的煤尘层最低着火温度对粒径变化的趋势相同,但幅度差异较大,其中挥发分含量最低的1#煤样变化最小,为16%,而3#煤样挥发分含量最高,其变化幅度也最大,高达25%。这是因为随埋深增加,挥发分含量增加,煤变质程度降低,粒径减小,煤尘比表面积增大,活化能减小,更易与 O_2 发生反应;煤尘颗粒间的孔隙率减小,在受热条件下挥发分气体的释放速率也增大,煤样的着火敏感性更强。故1#煤样的煤尘层最低着火温度下降幅度小于3#煤样。在粒径变化的情况下,挥发分含量最高的3#煤样最低着火温度变化更为敏感。

4 结论

基于国标《粉尘层最低着火温度测定方法》(GB/T 16430—1996),利用热板系统研究煤样的着火敏感性,得出煤尘层最低着火温度与煤样埋深及粒径间的变化规律。

1) 在粒径相同的情况下,随着煤样埋深的增加,挥发分含量逐渐增加,煤尘层最低着火温度逐渐降低。煤样埋深由470m增至880m,挥发分含量

由 33.65% 增至 38.9%，煤尘层最低着火温度从 330℃ 降至 270℃。

2) 在同一煤尘厚度情况下，3 种不同埋深煤样的最低着火温度随着煤样粒径的减小而明显下降。在煤尘层同为 5mm 时，随煤样粒径有 180 μm 逐渐减小到 75 μm ，3 种不同埋深煤样煤尘层最低着火温度分别减小了 16%、19%、25%，差异显著。因此建议在采深较深的矿井生产工作中，更应加强对煤尘积聚的监管工作，及时进行煤尘产生抑制工作和清理工作，防止发生矿井火灾事故。

参考文献：

- [1] 邓军, 张燕妮, 徐通模, 等. 煤自然发火期预测模型研究 [J]. 煤炭学报, 2004(5): 568-571.
- [2] 李大伟, 王德明, 顾俊杰, 等. 煤物理吸氧量随温度及粒径变化规律的试验研究 [J]. 煤炭科学技术, 2008(2): 42-44.
- [3] 余明高, 马梳珍, 褚廷湘. 煤粒径对气体产生规律和自燃倾向性影响研究 [J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2016, 35(1): 1-9.
- [4] Weiguo Cao, Wei Cao, Yuhuai Peng, et al. Experimental study on the combustion sensitivity parameters and pre-combusted changes in functional groups of lignite coal dust [J]. Powder Technology, 2015(283): 512-518.
- [5] 姜秀民, 杨海平, 刘辉, 等. 粉煤颗粒度对燃烧特性影响热分析 [J]. 中国电机工程学报, 2002(12): 143-146, 161.
- [6] GB 474—2008, 煤样的制备方法 [S].
- [7] 陈允魁. 红外吸收光谱法及其应用 [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1993.
- [8] 张辛亥, 罗振敏, 张海珩. 煤自燃性的红外光谱研究 [J]. 西安科技大学学报, 2007(2): 171-174, 186.
- [9] 戴广龙. 煤低温氧化及自燃特性的综合实验研究 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2010.
- [10] 褚廷湘, 杨胜强, 孙燕, 等. 煤的低温氧化实验研究及红外光谱分析 [J]. 中国安全科学学报, 2008(1): 171-177.
- [11] GB/T 16430—1996, 粉尘层最低着火温度的测定方法 [S].
- [12] GB 15577—2018, 粉尘防爆安全规程 [S].
- [13] 张辛亥, 白亚娥, 李青蔚, 等. 基于活化能指标研究不同变质程度烟煤的自燃倾向性 [J]. 矿业安全与环保, 2016, 43(1): 5-7, 11.

(责任编辑 赵巧芝)