

煤尘层最低着火温度变化规律实验研究*

刘天奇^{1,2,3}, 李雨成^{1,2,3}, 罗红波^{1,2,3}

- (1. 辽宁工程技术大学安全科学与工程学院, 辽宁 阜新 123000;
2. 辽宁工程技术大学矿山热动力灾害与防治教育部重点实验室, 辽宁 阜新 123000;
3. 辽宁工程技术大学煤炭资源安全开采与洁净利用工程研究中心, 辽宁 阜新 123000)

摘要:为研究煤尘层最低着火温度随煤样变质程度、煤尘粒径及煤尘层厚度的变化规律, 采用煤尘层最低着火温度测定系统进行实验研究, 结果表明: 随着煤样由褐煤到无烟煤变质程度逐渐增大, 煤尘层最低着火温度由 290 °C 上升到 400 °C 以上, 同时, 褐煤、长焰煤、不粘煤、气煤煤尘层着火时观察到明显的火焰。随着煤尘粒径不断减小, 不同煤质的煤尘层最低着火温度明显减小, 煤尘层厚度为 15 mm 时, 随着煤尘粒径由 0.5 mm 减小至 0.075 mm, 不同煤质煤尘层最低着火温度分别减小了 31.0%、26.7%、28.1%、25.8%、28.6%、27.8%、18.9% 和 15.0%, 煤尘粒径影响作用十分显著。随着煤尘层厚度的增大, 不同煤质在不同粒径下的煤尘层最低着火温度都减小, 其中无烟煤的变化最不明显。

关键词:煤尘层厚度; 着火温度; 变化规律; 煤尘粒径

中图分类号: X932 **文献标识码:** A

煤矿井下巷道中, 煤尘常常堆积成层, 这些沉积煤尘一旦在外力作用下形成悬浮煤尘云, 不仅有引发重大爆炸灾害事故的可能性^[1-2], 而且在明火等高温热源作用下有发生燃烧、爆炸的可能^[3-4], 隐患极大。煤尘层最低着火温度作为评价煤尘在特定工况下的爆炸敏感特性指标, 对相关爆炸危险因素(如煤尘层厚度等)的确定与抑爆措施(如岩粉抑爆等)的制定意义重大。与煤尘云一样, 煤尘层最低着火温度也可以反映出煤尘在高温环境下的着火爆炸敏感特性^[5-6], 但煤尘层与煤尘云的空间存在状态不同, 彼此不能互相替代, 因此研究其变化规律具有同样的科学价值。在煤尘层最低着火温度变化规律方面开展实验研究, 以期找出煤尘层着火温度的变化规律。

目前, 在煤尘爆炸敏感特性方面, 主要进行煤尘云和煤尘层最低着火温度、煤尘云最小着火能研究。陈金健^[7]采用 Godbert-Greenwald 加热炉研究了煤尘云最低着火温度特性, 并分析了磷酸二氢铵、磷酸二氢钙、磷酸二氢钾、碳酸氢钠、碳酸氢钾、碳酸钙等惰性粉尘对煤尘云着火的抑制效果; 李润之^[8]研究了煤尘本身的挥发分含量对煤尘层最低着火温度的影响, 得出随着挥发分增大, 煤尘层最低着火温度明显下降; 司荣军^[9]、屈姣^[10]、宋广鹏^[11]等实验研究了瓦斯含量对煤尘云着火温度的影响, 得出瓦斯浓度为 9.5% 时, 对煤尘云着火的促进作用最为剧烈; 平洋^[12]通过测试煤尘瓦斯耦合体系下最低着火温度, 发现煤尘粒径的减小对混合体系着火起到促进作用, 并计算出混合体系的最低着火温度理论值, 经验证与实测值基本一致。综上, 关于煤尘爆炸敏感特性方面的研究主要集中在煤尘云最低着火温度及其抑制技术研发, 对煤尘层最低着火温度变化规律的研究相对较少。

基于热板实验法, 使用煤尘层最低着火温度测定装置, 选用 8 种不同变质程度的煤尘(即褐煤、长焰煤、不粘煤、气煤、焦煤、瘦煤、贫煤和无烟煤), 对其煤尘层最低着火温度随煤样变质程度、煤尘粒径大小以及煤尘层厚度的变化规律进行实验研究, 为探索煤尘层着火敏感度提供理论依据。

* 收稿日期: 2017-09-27; 修回日期: 2017-10-30

基金项目: 国家自然科学基金(51774168, 51204089); 辽宁省自然科学基金(201602355); 辽宁省教育厅项目(LJYL002, 551610001276)

作者简介: 刘天奇(1990—), 男, 博士研究生, 主要从事矿井通风与粉尘放置理论及技术研究. E-mail: ltq613@163.com

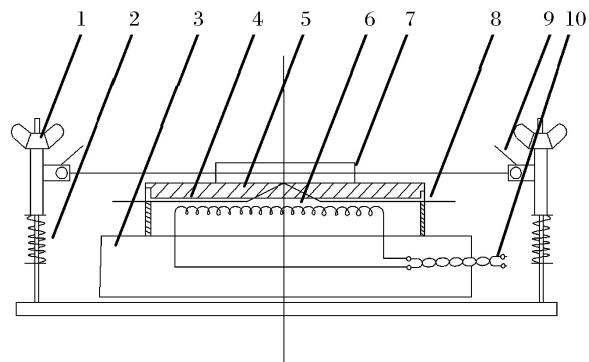
1 煤尘层最低着火温度测定实验系统

1.1 实验系统

目前,国际上煤尘层最低着火温度测定方法主要有美国提出的烘箱实验法和德国提出的热板实验法。德国提出的热板实验法先后被国际标准和我国标准所采纳,本研究使用的煤尘层最低着火温度测定装置正是基于热板法所研发的。采用的煤尘层最低着火温度测定装置如图1,结构如图2。实验装置主要由加热器及其底座、热板表面及其控制热电偶与记录热电偶、煤尘层热电偶等部件组成,通过计算机数据采集系统进行远程信号传输。其中,热板表面是由直径不小于200 mm、厚度不小于20 mm的圆形金属平板制成。平板上方安置金属环以形成固定厚度的煤尘层,金属圆环厚度规格有5、12.5和15 mm 3种。平板通过电加热器进行加热,并由安装在平板内靠近平板中心的热电偶控制温度。



图1 煤尘层最低着火温度测定装置
Fig.1 Coal dust layer MIT tester



1. Thermocouple height adjustment knob; 2. Spring; 3. Heater base; 4. Recording thermocouple on hot plate surface;
5. Hot plate surface; 6. Heater; 7. Metal ring; 8. Control thermocouple on hot plate surface;
9. Dust layer thermocouple; 10. Heater leads

图2 煤尘层最低着火温度测定装置结构

Fig.2 Structure of coal dust layer MIT tester

1.2 实验原理与过程

在煤尘粒径选取上,煤尘层最低着火温度实验所需煤样粒径为毫米级,远大于煤尘云最低着火温度实验所需微米级粒径。在煤矿现场,大粒径毫米级煤尘颗粒受重力作用较大更容易沉降,形成煤尘层。实验时,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。图3给出了3种典型的煤尘层温度-时间曲线,能够判定热板表面的煤尘层发生着火现象的基本热力学特征,实验测定的过程就是找寻满足这3种类型温升曲线的最小 T_1 值。在图3中, T 为煤尘层温度, $^{\circ}\text{C}$; T_1 为热板表面温度, $^{\circ}\text{C}$; t 为实验时间,min。综合图3中典型的煤尘层温度随时间变化情况,可以为煤尘层着火的判定与最低着火温度的确定提供充分有效的实验判据。

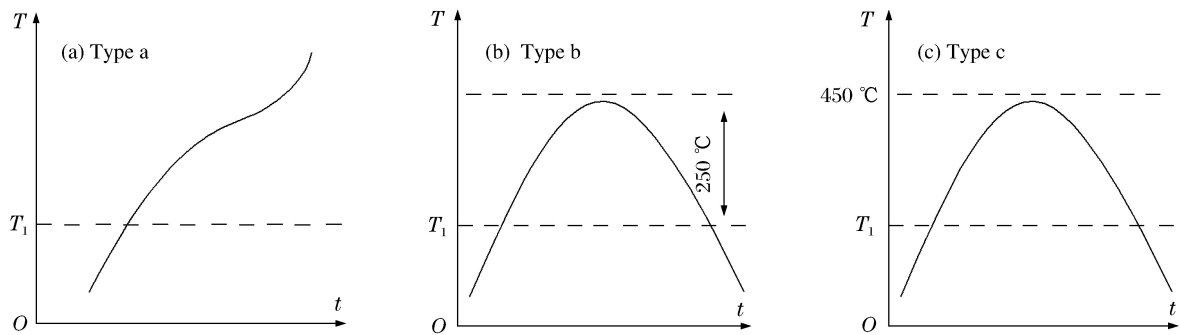


图 3 热板表面上煤尘层着火的典型温度-时间曲线

Fig. 3 Typical $T-t$ curve of coal dust layer on hot surface

2 煤尘层最低着火温度随煤样变质程度变化规律

选用褐煤、长焰煤、不粘煤、气煤、焦煤、瘦煤、贫煤和无烟煤共 8 种不同变质程度的煤样进行实验测定,以期找出煤尘层最低着火温度随变质程度的变化规律。选取煤尘粒径大小为 0.2 mm(即 80 目),在热板表面放置的金属圆环厚度为 5 mm,因此煤尘层厚度为 5 mm,该工况下测定的 8 种煤质的煤尘层最低着火温度见表 1。煤尘层最低着火温度测定装置的测定上限为 400 °C。

表 1 8 种煤质的煤尘层最低着火温度

Table 1 Coal dust layer MIT of 8 kinds of coal quality

| No. | Coal quality | Particle size/mm | Thickness/mm | Minimum ignition temperature/°C | Ignition type | Ignition time/min |
|-----|-----------------|------------------|--------------|---------------------------------|---------------|-------------------|
| 1 | Lignite | 0.2 | 5 | 290 | a | 18 |
| 2 | Long flame coal | 0.2 | 5 | 310 | a | 22 |
| 3 | Not sticky coal | 0.2 | 5 | 330 | a | 18 |
| 4 | Gas coal | 0.2 | 5 | 320 | a | 20 |
| 5 | Coking coal | 0.2 | 5 | 340 | c | 11 |
| 6 | Lean coal | 0.2 | 5 | 360 | c | 9 |
| 7 | Meagre coal | 0.2 | 5 | 370 | c | 13 |
| 8 | Anthracite | 0.2 | 5 | >400 | No fire | >30 |

从表 1 可以看出:随着煤质由褐煤到无烟煤变质程度逐渐增大,挥发分含量逐渐降低,煤尘层最低着火温度由 290 °C 不断上升,对于变质程度相对较高的瘦煤和贫煤,其煤尘层最低着火温度达到 360 和 370 °C,比褐煤升高 24.1% 和 27.6%。变质程度最高的无烟煤在粒径 200 μm 、煤尘层厚度 5 mm 的实验工况下,热板表面温度达设置最高值 400 °C 时仍未观测到着火现象,说明其煤尘层最低着火温度已超出实验装置的测定上限 400 °C。观测到着火现象的 7 种煤样在着火类型与着火时间上也存在明显差异。为进一步揭示煤尘层最低着火温度随煤样变质程度变化规律,分析煤尘层着火类型与着火时间可知:褐煤、长焰煤、不粘煤与气煤的煤尘层着火类型均为图 3 中所示的 a 类着火,而焦煤、瘦煤与贫煤的煤尘层着火类型为 c 类着火,说明随着煤样变质程度增大,煤尘层着火的判定标准有所不同。

图 4 为不同煤质煤样分别在热板表面温度设定为相应最低着火温度工况下的煤尘层温度-时间曲线,研究发现:褐煤、长焰煤、不粘煤与气煤的煤尘层在高温热板表面环境下持续 18~22 min 后均出现局部火焰或火星并伴有烟尘产生,焦煤、瘦煤与贫煤的煤尘层在高温热板表面环境下则没有出现明显的火星与燃烧现象,只是出现如图 4 所示的温升(煤尘层最高温度均在 9~13 min 内超过 450 °C),因此也被判定为最低热板表面温度工况下的着火。图 4 中 7 种煤质的煤尘层温度最终都趋于热板表面温度 T_1 而没有继续下降,这是因为在实验时间内设置 T_1 为恒定值。

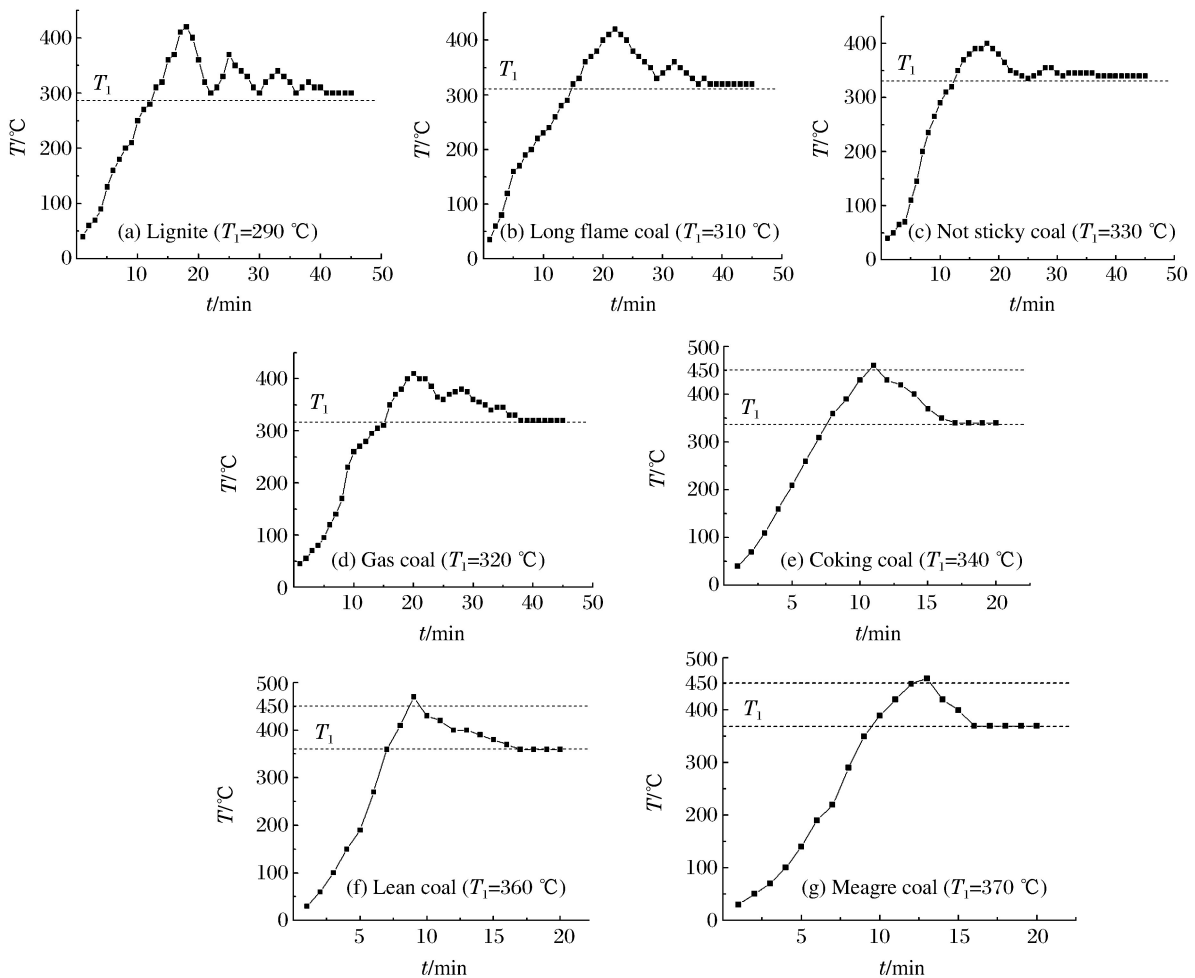


图4 煤尘层温度-时间曲线

Fig. 4 $T-t$ curve of coal dust layer

3 煤尘层最低着火温度随煤尘粒径与煤尘厚度变化规律

煤矿井下的煤尘层着火工况复杂多变,为进一步探究不同工况下煤尘层着火特性,确定影响煤尘层最低着火温度的敏感因素及其影响规律,制取粒径分别为 0.5 mm(32 目)、0.45 mm(40 目)、0.3 mm(60 目)、0.15 mm(100 目)、0.125 mm(120 目)、0.1 mm(150 目)、0.075 mm(200 目)的煤尘进行实验,通过更换金属环规格实现对 5、12.5 和 15 mm 3 种不同厚度煤尘层的最低着火温度的测定。为具体分析煤尘层最低着火温度随煤尘粒径与煤尘层厚度变化规律,进行了 8 种煤质的煤尘层在 8 种粒径、3 种厚度工况下的实验。不同煤尘层厚度 d 下 8 种煤质煤尘层最低着火温度 T_L 与粒径大小 r 的关系曲线如图 5 所示。

由图 5 分析可知:在 8 种煤尘粒径的实验工况下,无烟煤的煤尘层最低着火温度均最大,褐煤的煤尘层最低着火温度均最小,其余 6 种烟煤的煤尘层最低着火温度则介于两者之间。在同一煤尘层厚度下,随着煤尘粒径不断减小,8 种煤质的煤尘层最低着火温度明显减小,说明煤质的差异性对煤尘层最低着火温度的影响显著。

在煤尘层厚度为 15 mm 时,随着煤尘粒径由 0.5 mm 逐渐减小至 0.075 mm,8 种煤质煤尘层最低着火温度分别减小了 31.0%、26.7%、28.1%、25.8%、28.6%、27.8%、18.9% 和 15.0%,说明煤尘层最低着火温度受煤尘粒径的影响作用十分显著。不同煤质的煤尘层最低着火温度随煤尘粒径的变化幅度存在显著差异,其中变质程度最低的褐煤降低幅度最大(达 31.0%),而变质程度最高的无烟煤的降低

幅度最小(仅为 15.0%)。对这种差异形成机理进行分析可知:由于无烟煤样品中挥发分含量较低(仅为 7.65%),即便粒径由毫米级(0.5 mm)降低至微米级(75 μm),使煤尘颗粒之间的孔隙率减小同时使受热条件下可燃挥发分气体的释放速率增大,但这种着火促进效应对低变质褐煤作用更大,使无烟煤煤尘层最低着火温度的下降幅度远不如其他煤样,甚至仅为褐煤最低着火温度降幅的 50%,说明褐煤与其他煤样相比,受煤尘粒径变化的影响,其最低着火温度变化更为敏感,相同厚度 15 mm 的煤尘层,0.5 mm 粒径的褐煤最低着火温度(290 $^{\circ}\text{C}$)比 0.075 mm 粒径的无烟煤最低着火温度(340 $^{\circ}\text{C}$)还要低 50 $^{\circ}\text{C}$ 。因此,建议对褐煤矿井更应加强煤尘堆积的监管,并及时采取抑制与清理措施以防止发生爆炸事故。

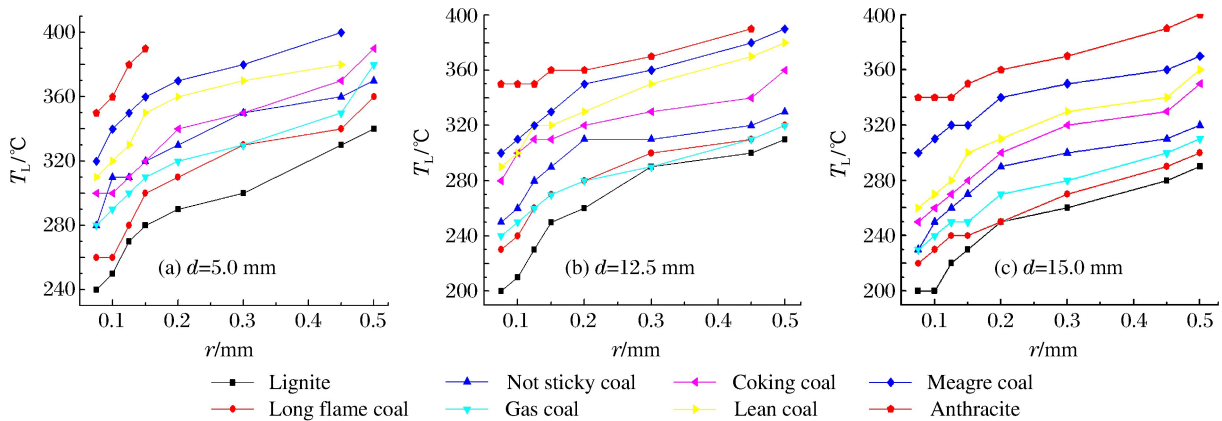


图 5 煤尘层最低着火温度与粒径关系

Fig. 5 T_L - r curve of coal dust layer

对比 5、12.5 和 15 mm 3 种不同厚度煤尘层条件下的 8 种煤质煤尘最低着火温度曲线,可知:随着煤尘层厚度增大,8 种煤质煤尘在不同粒径下的煤尘层最低着火温度都减小,说明煤尘层厚度的增加对煤尘着火甚至爆炸起到促进作用。其中,无烟煤最低着火温度随煤尘层厚度的变化最不显著,当无烟煤粒径为 75 μm 时,煤尘层厚度从 5 mm 增大至 15 mm,最低着火温度从 350 $^{\circ}\text{C}$ 下降至 340 $^{\circ}\text{C}$,降幅仅为 10 $^{\circ}\text{C}$ 。从煤尘着火机理角度分析煤尘层厚度对最低着火温度的影响作用,可知:由于煤尘层的着火过程是一个煤尘颗粒持续受热并积累能量的过程,一方面随着煤尘厚度的增大,有利于煤尘层热量的积累同时减少热量散失速率,另一方面煤尘层本身作为一种导热体,由于不同煤质的导热率与受热后温度上升速率的差异,使热量积累效果与升温幅度大不相同,这从本质上决定了所需着火温度的最小值各不相同。综上分析,建议煤矿及时清理沉积煤尘,避免形成过厚煤尘层,从而降低着火、爆炸危险性。

4 结 论

采用煤尘层最低着火温度测定系统,研究了煤尘层最低着火温度随煤样变质程度、煤尘粒径与煤尘层厚度的变化规律。

(1) 随着煤样由褐煤到无烟煤变质程度逐渐提高,煤尘层最低着火温度逐渐升高,由 290 $^{\circ}\text{C}$ 上升至 370 $^{\circ}\text{C}$ (无烟煤已经超出测定上限 400 $^{\circ}\text{C}$)。对煤尘层着火类型与着火时间的分析可知:褐煤、长焰煤、不粘煤与气煤的煤尘层着火类型均为图 3 中所示的 a 类着火,而焦煤、瘦煤与贫煤的煤尘层着火类型为 c 类着火,说明随着煤样变质程度增大,煤尘层着火的判定标准有所不同。

(2) 在同一煤尘层厚度下,随着煤尘粒径的不断减小,8 种煤质的煤尘层最低着火温度明显减小,在煤尘层厚度为 15 mm 时,随着煤尘粒径由 0.5 mm 逐渐减小至 0.075 mm,8 种煤质煤尘层最低着火温度分别减小了 31.0%、26.7%、28.1%、25.8%、28.6%、27.8%、18.9% 和 15.0%,说明煤尘层最低着火温度受煤尘粒径的影响作用十分显著。厚度 15 mm 的煤尘层,0.5 mm 粒径的褐煤最低着火温度

(290 °C)比 0.075 mm 粒径的无烟煤最低着火温度(340 °C)还要低 50 °C。因此,建议对褐煤矿井更应加强煤尘堆积的监管,并及时采取抑制与清理措施以防止发生爆炸事故。

(3) 对比 5、12.5 和 15 mm 3 种厚度下的煤尘层最低着火温度可知:随着煤尘层厚度的增大,不同粒径的煤尘层最低着火温度都减小,说明煤尘层厚度的增加对煤尘着火甚至爆炸起到促进作用。

参考文献:

- [1] 金龙哲. 矿井粉尘防治理论 [M]. 北京:科学出版社,2010:22-30.
JIN L Z. Dust prevention theory in mine [M]. Beijing:Science Press,2010:22-30.
- [2] 毕明树. 气体和粉尘爆炸防治工程学 [M]. 北京:化学工业出版社,2012:39-48.
BI M S. Gas and dust explosion prevention engineering sciences [M]. Beijing:Chemical Industry Press,2012:39-48.
- [3] 毕明树,李江波. 密闭管内甲烷-煤粉复合爆炸火焰传播规律的实验研究 [J]. 煤炭学报,2010,35(8):1298-1302.
BI M S,LI J B. Experimental study on flame propagation law of methane-pulverized coal compound explosion in closed tube [J]. Journal of China Coal Society,2010,35(8):1298-1302.
- [4] 宫广东,刘庆明,胡永利. 管道中煤尘爆炸特性实验 [J]. 煤炭学报,2010,35(4):609-612.
GONG G D,LIU Q M,HU Y L. Experimental study on explosion characteristics of coal dust in pipeline [J]. Journal of China Coal Society,2010,35(4):609-612.
- [5] 牛芳,刘庆明,白春华. 甲烷-煤尘爆炸物火焰传播特性 [J]. 高压物理学报,2012,26(4):455-461.
NIU F,LIU Q M,BAI C H. Flame propagation characteristics of methane-coal dust explosion [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics,2012,26(4):455-461.
- [6] 李雨成. 矿井粉尘防治理论及技术 [M]. 北京:煤炭工业出版社,2015:35-56.
LI Y C. Dust prevention theory and technology in mine [M]. Beijing:Coal Industry Press,2015:35-56.
- [7] 陈金健. 煤尘云最低着火温度及抑制技术研究 [D]. 太原:中北大学,2016.
CHEN J J. Study on lowest ignition temperature and suppression technology of coal dust cloud [D]. Taiyuan: North University of China,2016.
- [8] 李润之. 不同挥发分煤尘层最低着火温度变化规律研究 [J]. 安全与环境学报,2017,17(3):954-957.
LI R Z. Study on variation law of minimum ignition temperature of different volatile coal dust [J]. Journal of Safety and Environment,2017,17(3):954-957.
- [9] 司荣军,王春秋. 瓦斯对煤尘爆炸特性影响的实验研究 [J]. 中国安全科学学报,2006,16(12):86-91.
SI R J,WANG C Q. Experimental study on the effect of gas on coal dust explosion characteristics [J]. China Safety Science Journal,2006,16(12):86-91.
- [10] 屈姣. 甲烷和煤尘爆炸特性实验研究 [D]. 西安:西安科技大学,2015.
QU J. Study on explosion characteristics of gas and coal dust [D]. Xi'an:Xi'an Technology University,2015.
- [11] 宋广朋. 瓦斯煤尘共存的爆炸特性与传播研究 [D]. 青岛:山东科技大学,2011.
SONG G P. Study on ignition mechanism and experimental study of coal powder gas coupling system [D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology,2011.
- [12] 平洋. 煤粉瓦斯耦合体系着火机理和实验研究 [D]. 沈阳:东北大学,2011.
PING Y. Study on ignition mechanism and experimental study of coal powder gas coupling system [D]. Shenyang: Northeastern University,2011.

Variation Law for Minimum Ignition Temperature of Coal Dust Layer

LIU Tianqi^{1,2,3}, LI Yucheng^{1,2,3}, LUO Hongbo^{1,2,3}

(1. *College of Safety Science and Engineering, Liaoning
Technical University, Fuxin 123000, China;*

2. *Key Laboratory of Mine Thermodynamic Disasters and Control of Ministry
of Education, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China;*

3. *Research Center of Coal Resources Safe Mining and Clean Utilization,
Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)*

Abstract: In this paper we studied the variation of the minimum ignition temperature of coal dust layer with its metamorphism, particle size and thickness using the minimum ignition temperature measurement system. The results showed that, with the gradual increase of its degree of metamorphism, the minimum ignition temperature of coal dust layer varied from 290 °C to above 400 °C; and that when the coal dust layer of lignite, long flame coal, non-stick coal, gas coal were ignited, an obvious flame was observed; and that, as the coal dust particle size decreased, the minimum ignition temperature of different kinds of the coal dust layer exhibited a significant reduction trend. It was found that when the thickness of the layer is 15 mm, with the particle size decreasing from 0.5 mm to 0.075 mm, the minimum ignition temperature decreased by 31.0%, 26.7%, 28.1%, 25.8%, 28.6%, 27.8%, 18.9% and 15.0%, respectively, indicating a very obvious effect of the coal dust particle size. With the increase of the layer's thickness, the minimum ignition temperature of different kinds of the coal dust layer exhibited a decreasing trend, while the trend of anthracite was the least significant.

Keywords: thickness of coal dust layer; ignition temperature; change law; coal dust particle size