



过热表面烟草粉尘阴燃实验研究

张小良, 何 锐, 曹新光, 宋慧娟

(上海应用技术大学 城市建设与安全工程学院, 上海 201418)

摘要 为了研究烟草粉尘阴燃发生的影响因素,运用锥形量热仪测定粉尘的热释放速率,改进现有的粉尘层最低着火温度测试仪,将 3 组不同粒径的烟草粉尘置于热表面上进行阴燃实验研究。结果表明 制丝粉、切片粉、卷包烟末热释放速率峰值分别为 90、91、75 kW/m²,切片粉火焰传播速度最快。峰值最低的卷包烟末于 50 s 左右率先热释放,切片粉制丝粉随后分别于 75、80 s 左右进行热释放。阴燃过程可进行阶段性分析,其中水分蒸发燃料氧化放热阶段粉尘温度相对稳定攀升,于氧化放热阶段温度突变,因此控制阴燃的产生,必须于水分蒸发燃料氧化放热阶段之前控制其发展趋势,做出相应有效的预警方案;粉尘顶层率先发生阴燃,随后阴燃逐渐向下传播直至粉尘完全燃尽。粉尘层达到阴燃温度时,顶层升温速率最高,中层底层在未发生阴燃时,顶层阴燃有预热作用。阴燃时间和实验持续时间都是随着粒径的增大而增大。粒径越小阴燃各阶段持续时间越短,致使阴燃越迅速越难控制。

关键词 烟草粉尘; 阴燃; 粉尘层; 一维传热

中图分类号 X932 **文献标志码** A

文章编号 1008-5548 (2017) 06-0047-06

Experimental study of tobacco dust smoldering on superheated surface

ZHANG Xiangliang, HE Rui,

CAO Xinguan, SONG Huijuan

(College of Urban Construction and Safety Engineering,
Shanghai Institute of Technology, Shanghai 201418, China)

Abstract: To study the influencing factors on the occurrence of burning, the cone calorimeter was used to test the determination of dust's heat release rate and improve the existing test device for ignition temperature of dust layer, 3 groups of the tobacco dusts in different particle sizes smoldering on the surface of the heat were studied through experiments. The result shows that the heat release

rate peaks of sliced tobacco dust, picadura dust and rolled tobacco powder are 90, 91 and 75 kW/m² respectively and the flame propagation speed of the picadura dust is the fastest. The rolled tobacco powder whose peak is the lowest begins to smoke around 50 s, taking the lead among these three tobacco dusts in heat release, then the picadura dust and sliced tobacco dust release the heat at 75 s and 80 s respectively. The smoldering process can be analyzed in stages, in the stage of water evaporation and fuel oxidation, the dusts' temperature rise stably, and the temperature jumps in the stage of exothermic oxidation. Thus, to control the smoldering, we must take measures and make the corresponding effective early warning scheme to control the trend of its development before the stage of water evaporation and fuel oxidation; The first occurrence of dust smoldering is on the top layer, then the smoldering spread down until the dust completely burnt out, when the dust layer reached the smoldering temperature, the top layer's heating rate is the highest, when the middle and bottom layers are not smoldering, the top layer preheats them. The smoldering time and duration of experiment are increased with the increase of particle size, each stage's smoldering duration decreases with the decreasing of particle size which make the dust smolder faster and harder to control.

Keywords: Tobacco dust; smoldering; dust layer; one-dimensional heat transfer

近年来,烟草生产企业由阴燃引发的火灾事故频发,对于阴燃机理的研究刻不容缓。哈尔滨天阳国际烟草公司位于哈尔滨市黎明乡的烟丝仓库于 2011 年 5 月 3 日和 2012 年 2 月 24 日先后 2 次发生由烟丝阴燃引起的火灾事故,第 2 次事故大火整整燃烧了 5 个多小时。2013 年 12 月 23 日贵州省安顺市夏云镇农厂老烟草公司闲置仓库发生阴燃事故,产生明火导致火灾,无人员被困,但由于火势猛烈,火势于 2 h 后才得以控制。

关于粉尘阴燃,国内周乐刚^[1]对石松子粉粉尘层的阴燃进行了研究,对石松子粉、玉米淀粉、煤粉进行热分析实验,研究 3 种粉尘在高纯氢气气氛下的热解过程,得到 3 种不同粉尘在各个热解阶段的热解特性。钟仙芳^[2]对烟草的燃烧特性参数进行研究,建立了

收稿日期 2017-09-08, 修回日期 2017-12-11。

基金项目 国家自然科学基金项目青年科学基金项目,编号 51304137。

第一作者简介 张小良 (1978—),男,博士,教授,硕士生导师,研究方向为工业安全与爆炸防护。E-mail jyyzxl@126.com。

通信作者简介 何锐 (1991—),男,硕士研究生,研究方向为工业安全与爆炸防护。E-mail 136071143@qq.com。

燃烧特性指数和表观动力学模型,分析烟叶不同部位,得出热解和燃烧性能最佳的是中部烟叶。胡国威^[3]选取了玉米秸粉、玉米面、玉米秸粉热解炭粉、活性炭粉、石墨粉 5 种固体可燃物为研究对象,对其主要的参数进行测量,通过热分析的方法研究 5 种物料热解及燃烧特性,分析燃烧过程特性差异的原因。郑克朋^[4]构建了煤阴燃实验平台,对煤阴燃的燃烧特性进行研究,应用到了露天矿煤火的治理案例当中。杨玖玲^[5]选用泥炭作为阴燃实验材料,利用泥炭竖向阴燃实验台研究无机物含量和泥炭床初始高度对阴燃峰值温度、阴燃热解反应峰和氧化反应峰的传播速度以及阴燃床形变的影响。者香等^[6]实验研究了含水率对泥炭阴燃蔓延速率的影响,结果表明含水率对阴燃峰值温度影响不大,对温度前锋阴燃速率影响明显。贾宝山等^[7]、孙文策等^[8]对炭粒、纤维质燃料阴燃点燃过程和强迫对流阴燃传播过程进行深入的理论研究,并对锯末等在自然对流条件下水平和竖直阴燃进行了多次实验。王信群^[9]对谷物纤维及粉尘阴燃进行了实验研究,结果表明在通风量较低的情形下,谷物粉尘也容易发生阴燃,阴燃早期主要特征气体为 CO、CO₂,阴燃速度与通风量成正比,与试样松散密度成反比。莫善军等^[10],自行搭建全尺寸阴燃实验台进行聚氨酯软泡点燃实验,分析聚氨酯软泡在不同的热量输送实验条件下测试阴燃引燃温度和升温速率的演变规律,通过小尺寸、全尺寸实验对比,寻找两者之间的差异性。Song 等^[11]通过 4 步化学反应模型验证孔隙率对煤阴燃动力学的影响。国外,Ratu 等^[12]设计实验研究空气流速对纤维素物质阴燃的反向传播影响。Urban 等^[13]研究了高温液态金属颗粒落在由粉末混合物组成的燃料床上的阴燃实验,结果表明较小的粒子需要较高的温度来点燃。Mohamad 等^[14]针对印度尼西亚泥炭阴燃导致的火灾问题,研究如何提高扑灭阴燃火灾效率。

烟草粉尘属于丙类可燃物,一旦阴燃发生,可转化成明火甚至造成除尘器爆炸等重大事故。国内外关

于烟草粉尘的阴燃机理研究相对较少,进行的理论公式推导也存在较大的局限性,部分公式所做假定也缺乏普遍性,研究各类烟草粉尘层在热表面上的阴燃形成、阴燃传播及其影响因素,实验研究是个行之有效的研究方法。本文中设计改进了现有的粉尘层最低着火温度测试仪以及实验装置台,并在实验台上对不同粒径烟草粉尘层进行阴燃实验研究,对比分析实验结果的差异性,研究热表面上烟草粉尘层阴燃燃烧过程,对烟草粉尘层阴燃过程实验数据以及现象进行分析。通过实验研究验证阴燃的阶段理论,同时研究烟草粉尘层的阴燃特性,以期为工业生产中抑制烟草粉尘阴燃提出有效的预警方案,减少烟草阴燃发生的概率,避免阴燃转换为明火燃烧的情况,减少烟草生产中的危害与隐患。

1 实验设计

1.1 实验装置

设计改进现有的粉尘层最低着火温度测试仪以及实验装置台,自制圆柱金属环,采用的材料为金刚网,金刚网有耐热、透气、可塑性好的特点,可以根据自己的需求来制定规格大小。根据实验要求采用不同高度的金属环方便调整热电偶的高度,网环呈现网格框架,四周透风保证氧气供应,对标自然通风情况。实验用探针为 1 mm 铠装 K 型热电偶,实验粉尘堆积高度 50 mm,热电偶设置高度分别为 0、10、20、30、40 mm 处,烟草粉尘堆积高度为 50 mm,根据工贸行业重点可燃性粉尘目录(2015 版)[安监总厅管四〔2015〕84 号]中烟叶粉尘的粉尘层引燃温度为 280 ℃,将热表面温度设置为 280 ℃,图 1 为实验装置示意图。

1.2 实验材料

1.2.1 材料选择

实验样品为切片、制丝以及卷包工艺除尘器收集的烟草粉尘,粒径大小关系为切片粉粒径最小,制丝粉次之,卷包烟末粒径最大,实验粉尘实物图如图 2。

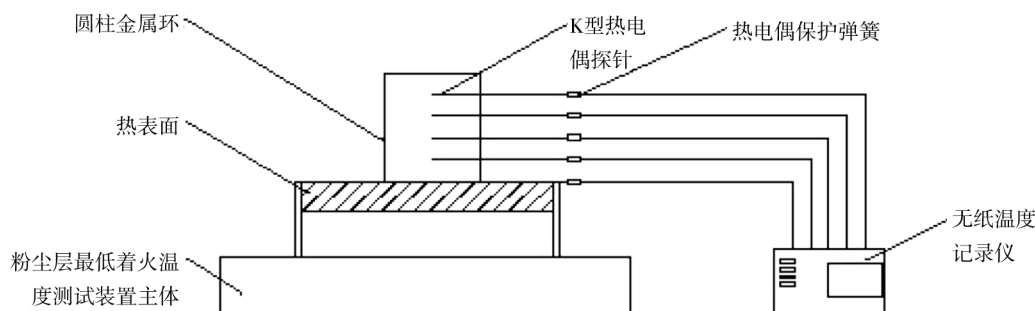


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Experimental device diagram



图 2 实验样品实物图

Fig. 2 Physical drawings of experimental samples

切片工艺属烟草加工前处理阶段,包括润叶松散、筛片、除杂以及切烟丝等工序,切丝设备加工工艺产生的粉尘粒径最小;制丝工艺包括备料(烟片、烟梗)、回潮、贮叶、切丝、烘丝、叶丝梗丝混合、加香、加料、贮丝等工序,工艺流程产生的粉尘粒径相对切片粉更粗;卷包工艺包括卷接和包装两部分,前者包括喂丝、烟支卷制、滤嘴接装等工序,后者指采用多种包装材料和包装机械,将经烘焙后水分合格的烟支,包装成符合产品质量标准、便于贮运和销售的成品。卷接和包装通常在一套设备上一起完成,该工艺阶段均为成品烟丝,未对烟丝进行细加工,工艺所产粉尘粒径最粗,多为梗状烟末。具体粉尘粒径大小如表 1 所示。

表 1 粉尘粒径大小

Tab. 1 Dust particle size

物料名称	粒径大小
切片粉	1~200 μm
制丝粉	特征长度 1 μm~1 mm
卷包烟末	特征长度 0.5~1.5 cm

1.2.2 热释放速率测定

实验用锥形量热仪测定热释放速率(HRR)。HRR 是指在规定的实验条件下,在单位时间内材料燃烧所释放的热量,因此,热释放速率表达了火源释放热量的快慢和大小,也是火源释放热量的能力,HRR 越大火焰的传播越快。热释放速率测定过程可简化为一维不稳定导热,粉尘水平放置于高热流外部辐射功率下的锥形量热仪中进行实验。假定垂直于 y 轴和 z 轴的表面完全绝热,只考虑 x 方向的导热,粉尘下表面绝热。在此条件下,粉尘样品的热传递方程及边界、初

始条件可以表示如下。

能量方程：
$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{\rho c} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} ; \tag{1}$$

边界条件： $x=0$ 处，

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} = \varepsilon q'' - h(T_s - T_\infty) - \varepsilon \sigma (T_s^4 - T_\infty^4) , \tag{2}$$

$$x=L \text{ 处, } -k \frac{\partial T}{\partial x} = 0 ; \tag{3}$$

初始条件： $t=0$ 时， $T=T_0=T_\infty$ 。(环境温度)式中， T 表示温度，K； T_s 为样品上表面温度，K； t 为时间，s； L 为样品厚度，m； k 为样品导热系数，W/(m·K)； ρ 为样品密度，kg/m³； c 为比热，J/(kg·K)； q'' 为粉尘上表面辐射热通量，W/m²； ε 为材料表面发射率； h 为对流传热系数，W/(m²·K)； σ 为斯蒂芬·波尔兹曼常数($\sigma=5.67 \times 10^{-8}$ W/(m²·K⁴))。

3 种烟草粉尘热释放速率曲线如图 3 所示。制丝粉、切片粉、卷包烟末热释放速率峰值分别为 90、91、75 kW/m²，切片粉火焰传播速度最快。峰值最低的卷包烟末于 50 s 左右率先热释放，切片粉制丝粉随后分别于 75、80 s 左右进行热释放。

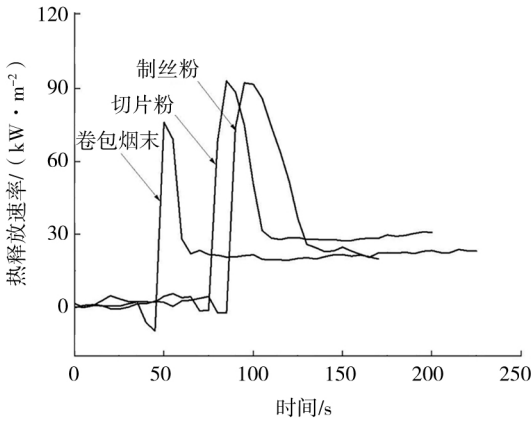


图 3 3 种烟草粉尘热释放速率曲线

Fig. 3 Heat release rate curve of 3 kinds of tobacco dust

由图 3 可以看出,烟草粉尘在燃烧测试时,3 种粒径烟草粉尘热释放速率曲线趋势相近,受到锥形量热计的辐射热后,处于吸热阶段,该阶段的初始线形微量波动,基本趋于平缓。在粉尘吸收足够热量后,卷包烟末温度率先快速升高,随后是切片粉和制丝粉,烟草粉尘受热发生碳化、分解现象,析出可燃性气体,并引起瞬间的突发性燃烧,随之释放出较大的热量,所以该阶段的波形呈现出较陡的曲线升高变化。随着粉尘的继续燃烧,以及辐射热的继续,有更多的热量释放出来,线形呈现出继续升高的现象,当 HRR 的曲线上升到峰值高度后,烟草粉尘经过充分的燃烧,有效成分烧尽,波形在短时间内呈现出从高峰迅速下降趋势,整个过程曲线并未出现双峰或 3 峰现象,随着时间的进行,曲线走向变得更加平缓,直至燃烧结束。

2 阴燃实验结果及分析

2.1 不同粒径粉尘阴燃过程

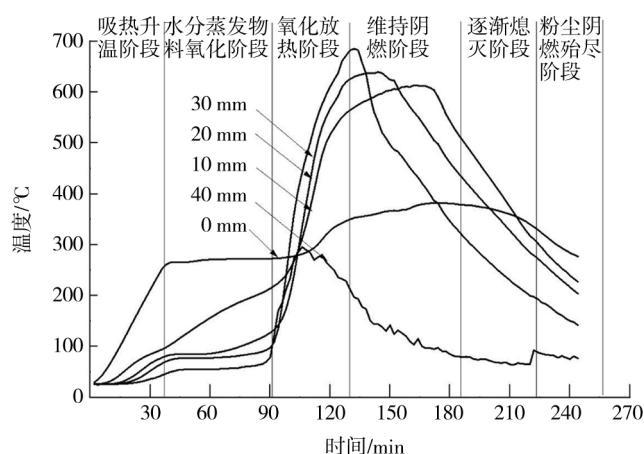
阴燃传播是多维的、不规则的,但多维的阴燃过程是由多个一维阴燃传播过程组合的。实验采用加热板的方式可以理解为一维阴燃传播。

图 4 为 3 个试样粉尘层阴燃过程中各监测点处的温度随时间的变化曲线。对比可以看出,3 组粉尘层的阴燃过程相似,都是于粉尘顶层率先发生阴燃,随后阴燃逐渐向下传播直至粉尘完全燃尽,造成此种现象的原因是阴燃发生需要 2 个条件:一是足够的温度条件;二是足够的氧浓度条件。当温度条件满足时,顶层氧气供应充足,首先在粉尘层顶部发生阴燃,然后逐渐向下传播。

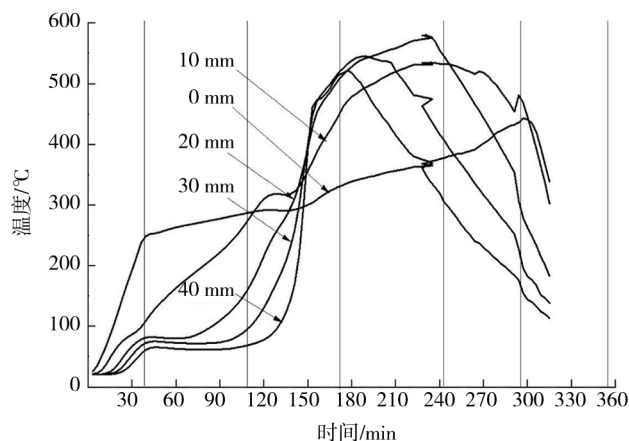
从图 4 可以看出,可将阴燃过程分为吸热升温、水分蒸发燃料氧化放热、氧化放热、维持阴燃、逐渐熄灭、粉尘燃烧殆尽共 6 个阶段。粒径最小的切片粉各个阶段持续时间最短,也是最早完成全部阴燃过程。需要指出的是,切片粉实验时,由于实验采用自然堆积的方式,加热板升温,实验过程至水分蒸发燃料氧化放热阶段,于 1.5 h 时温度迅速增长,水分蒸发迅速,粉尘层膨胀,增大内部孔隙率,最终致使粉尘结构发生变化,造成粉尘塌陷,热电偶裸露,因此切片粉 40 mm 处未监测阴燃数据。

从图 4a 可以看出,10、20、30 mm 处线中前期温度较低的 30 mm 线反而温度最早开始超越 280 °C,可见阴燃燃烧是从上往下开始的,阴燃产生的热远远高于加热板提供的热量,位于顶部位置的热电偶探测的温度变快最快,30 mm 温度最高,同时由于燃烧旺盛燃烧速率快,峰值维持时间也最短,基本上到达峰值后就开始下降,接下来是 20、10 mm 依次达到峰值

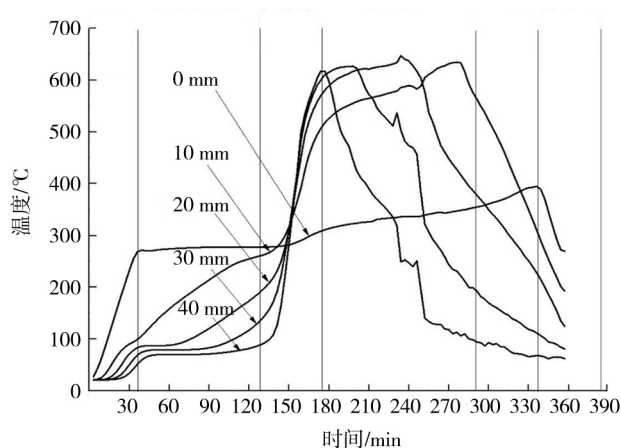
温度,但温度均未超过 30 mm 最高温度,且 10 mm 最高温度值也未达到 20 mm 最高温度值。0 mm 开始稳定在 280 °C,由于在 10、20、30 mm 处温度达到峰值区间也有一定的上升,反向热传导造成热板温度小幅波动。



a 切片粉



b 制丝粉



c 卷包烟末

图 4 3 种烟草粉尘层阴燃过程温度-时间关系曲线

Fig. 4 Curve of temperature-time of three kinds of tobacco dust layer smoldering process

从图 4b 可以看出,前期传热存在一个过程,30、40 mm 高度粉尘温度增幅不大,但在加热时间接近 2.5 h 时温度瞬间升高,从斜率可以看出层高 40 mm 温度变化速率高于其他测试点。温度发生剧烈变化的温度点在 280 ℃左右,阴燃开始产生大量的热,使探测点温度急速上升,上部氧气含量充足保证了阴燃快速发展。由于制丝粉粒径大于切片粉,孔隙率较高,从上向下的氧气传输相较切片粉更充分,因此,粉尘层阴燃更彻底,阴燃所产生的温度稳定在 550 ℃左右,下层阴燃持续时间相对更久,氧气对阴燃的产生以及持续时间存在巨大影响。

从图 4c 可以看出,20、30、40 mm 位置达峰值时间差很小,根据前 2 组实验可知,最后 10 mm 处线将先于 0 mm 线降温低于 280 ℃,前期加热阶段,从下至上依次升温,当各层高全面到达 280 ℃时,

温度开始急速上升。卷包烟末多为梗状粉尘,颗粒大而多孔,保证 20、30、40 mm 处氧气的充足供应,所以达到阴燃温度后几乎同时开始迅速阴燃放热。

2.2 结果分析与讨论

整合 3 组实验各层高峰值温度、达峰值所用时间和阴燃持续时间于表 2。对比热释放速率卷包烟末最快达到峰值温度,阴燃实验达到峰值温度所用时间,最短为切片粉。切片粉颗粒粒径最小,自然堆积经高温热表面烘烤,水分蒸发物料氧化过程,使粉尘层膨胀,增大内部孔隙率以及外部反应表面积,最后造成粉尘塌陷,致使粉尘呈现不规则状态,接触氧气面积相对较高,保证切片粉的快速阴燃所需的氧气含量。3 组阴燃实验最高温度出现在切片粉层高 30 mm 处,原因在于切片粉的快速阴燃,材料进行氧化放热速率最快,短时间内完成大量的热量释放。

表 2 烟草粉尘阴燃实验对比
Tab. 2 Comparison of tobacco dust smokering experiment

热电偶距离/mm	参数	切片粉	制丝粉	卷包烟末
0	峰值温度/℃	382.1	443.5	395.1
	达峰值温度所需时间/h	2.53	4.56	5.36
	阴燃持续时间/h	—	—	—
10	峰值温度/℃	615.8	535	636
	达峰值温度所需时间/h	2.43	3.55	4.37
	阴燃持续时间/h	2.06	3.29	3.39
20	峰值温度/℃	639.2	580.8	646.7
	达峰值温度所需时间/h	2.22	3.49	3.53
	阴燃持续时间/h	1.58	2.41	2.54
30	峰值温度/℃	686.8	549	628.3
	达峰值温度所需时间/h	2.12	3.07	3.19
	阴燃持续时间/h	1.36	2.19	2.20
40	峰值温度/℃	—	521	619.4
	达峰值温度所需时间/h	—	2.58	2.54
	阴燃持续时间/h	—	1.45	1.60

分析表 2 中阴燃持续的时间,卷包烟末各层高分别为 3.39、2.54、2.20、1.60 h,均为 3 组实验的最高。从图 4 阴燃实验持续的时间可以看出,卷包烟末超过 360 min,可知粒径越大阴燃持续时间越长,实验持续的时间也越长。造成这种现象的原因包括 2 个方面,一是切片粉水分蒸发物料氧化后造成的粉尘塌陷,接触氧气的面积较大;二是卷包烟末大多为梗状烟末,

对比粉末更耐燃烧。因此,粒径越小,阴燃各阶段持续的时间越短,致使阴燃越迅速也就越难控制。

3 结论

1) 制丝粉、切片粉、卷包烟末热释放速率的峰值分别为 90、91、75 kW/m²,切片粉火焰传播的速
(下转第 58 页)

- Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2010, 23 (2) : 237-241.
- [32] 郑昱. 聚丙烯料仓静电爆炸事故原因分析及设备改造效果[J]. 安全、健康和环境, 2016, 11 (4) : 5-8.
- [33] CHOI K S, MOGAMI T, SUZUKI T, et al. A novel bipolar electrostatic ionizer for charged polypropylene granules used in a pneumatic powder transport facility[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2016, 40 : 502-506.
- [34] 还传庚, 唐卫泽, 宫宏, 等. 聚烯烃料仓防静电燃爆治理技术的应用[J]. 安全、健康和环境, 2011, 11 (4) : 16-19.
- [35] 隋忠兴. 聚氯乙烯粉体静电控制与消除 [J]. 天津化工, 2014, 28 (2) : 38-40.
- [36] 廖剑锋. 聚烯烃粉体颗粒静电原理及消除技术的应用[J]. 广州化工, 2010, 38 (5) : 243-245.
- [37] 王伟标, 黄中信, 潘红亮, 等. AJS-2 粉体静电消除器在本地法聚丙烯装置上的应用[J]. 安全、健康和环境, 2002, 2 (4) : 10-11.
- [38] 高作峰, 赵延年. 防爆粉体静电消除器 [J]. 电气开关, 2013, 51 (4) : 92-93.
- [39] 施忠华, 刘绳海. 涤纶聚酯切片生产包装静电危害防治对策[J]. 石油化工安全环保技术, 2009, 25 (4) : 51-53.
- [40] 陈后中, 叶丽华, 宫宏. 静电消除系统在 PET 切片打包过程中的应用[J]. 聚酯工业, 2015, 28 (4) : 48-51.
- [41] 宫宏, 刘全桢, 孙立富, 等. 聚酯包装过程中静电的消除方法: 201410146593.2[P]. 2014-04-11.

(上接第 51 页)

度最快。峰值最低的卷包烟末于 50 s 左右率先热释放, 切片粉制丝粉随后分别于 75、80 s 左右进行热释放。

2) 不同粒径烟草粉尘热表面上阴燃可进行阶段分析, 水分蒸发燃料氧化放热阶段粉尘温度相对稳定攀升, 于氧化放热阶段温度突变, 因此控制阴燃的产生, 必须于水分蒸发燃料氧化放热阶段之前控制其发展趋势, 做出相应有效的预警方案, 减少烟草阴燃发生的概率。

3) 烟草粉尘于顶层率先发生阴燃, 随后阴燃逐渐向下传播直至粉尘完全燃尽, 氧气是影响烟草粉尘阴燃产生、发展的决定性因素。粉尘层达到阴燃温度时, 顶层升温速率最大, 中层底层在未发生阴燃时, 顶层阴燃有预热作用, 因此升温速率相对放缓。

4) 粒径越大阴燃持续时间越长, 实验持续时间也越长。粒径越小阴燃各阶段持续时间越短, 致使阴燃越迅速也越难控制。

影响粉尘阴燃因素复杂多变, 如实验环境温度、粉尘湿度、环境湿度、粉尘密度、气-固导热系数、热容以及粉尘表面上的空气对流状况等均可对阴燃产生发展造成影响, 本实验重点在不同粒径过热表面的实验研究, 后续建议进行系统的烟草阴燃条件研究, 揭示烟草粉尘阴燃机理。

参考文献 (References) :

- [1] 周乐刚. 可燃粉尘热解动力学及阴燃过程模型研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2013.

- [2] 钟仙芳. 烟草燃烧特性研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2013.
- [3] 胡国威. 五种固体可燃物阴燃过程特性实验研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2012.
- [4] 郑克朋. 煤田火区煤阴燃特性及治理研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2017.
- [5] 杨玖玲. 泥炭阴燃及阴燃气体生成规律的实验与机理研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2017.
- [6] 香者, 赵伟涛, 陈海翔. 含水率对泥炭阴燃速率的影响[J]. 燃烧科学与技术, 2016, 22 (2) : 136-140.
- [7] 贾宝山, 葛少成, 石亮. 纤维质燃料正向阴燃传播的数值分析[J]. 中国安全科学学报, 2007, 17 (1) : 34-39.
- [8] 孙文策, 郭晓平, 解茂昭, 等. 自然流动条件下竖直阴燃的传播和气体成分[J]. 燃烧科学与技术, 2002, 8 (2) : 188-191.
- [9] 王信群, KLEMENS R, WOLANSKI P, 等. 谷物纤维及粉尘阴燃实验研究[J]. 粮食与饲料工业, 2009 (4) : 14-15.
- [10] 莫善军, 袁灼新, 梁栋, 等. 开敞条件下多孔可燃物阴燃实验研究 [J]. 中山大学学报, 2013, 52 (4) : 89-94.
- [11] SONG Z Y, FAN H R, JIANG J J, et al. Insight into effects of pore diffusion on smoldering kinetics of coal using a 4-step chemical reaction model[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2017, (48) : 312-319.
- [12] RATU H, FADHILAH F, SHERLY V, et al. Effect of air flow velocity in smoldering combustion with opposed propagation on cellulosic material[J]. Procedia Engineering, 2017, 170: 528-535.
- [13] URBAN J L, ZAK C D, SONG J Y. Smoldering spot ignition of natural fuels by a hot metal particle[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2017, 36 (2) : 3211-3218.
- [14] MOHAMAD L, RAMAFHAN P, FAHRI A, et al. Experimental study of the effect of water spray on the spread of smoldering in Indonesian peat fires [J]. Fire Safety Journal, 2017, 91: 671-679.