

文章编号:1004-5309(2023)-0085-09

DOI:10.3969/j.issn.1004-5309.2023.02.03

自然对流下含水率突变锯末阴燃转明火的实验研究

徐明睿, 乔艺骞, 尹增兵, 张林鹤, 陈海翔*

(中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室, 合肥, 230026)

摘要:多孔固体可燃物含水率不连续分布会对其阴燃过程产生影响,并可能会促进阴燃向明火转变。该文对自然对流条件下含水率突变的锯末材料阴燃转明火过程进行实验研究。实验样品前半部分保持干燥,后半部分含水率增加(干基含水率:11.83%~60.35%)。实验结果表明,当后半部分干基含水率小于 19.30% 时,阴燃能够自维持传播;当后半部分干基含水率在 20.40%~51.69% 之间时,阴燃蔓延过程中会在含水率突变处形成有利于气体聚集的空隙,并发生向明火的转变;当后半部分干基含水率大于 53.57% 时,不会发生转明火现象。固体内部温度和气体产物演化过程表明,含水率突变处发生阴燃转明火是高温、突变处形成的空隙和可燃气体聚集共同作用的结果。

关键词:阴燃;阴燃转明火;锯末;含水率

中图分类号: X932

文献标识码: A

0 引言

阴燃是一种燃烧速度较为缓慢、温度较低的无焰燃烧现象^[1],常发生在多孔固体燃料中,如泥炭、聚氨酯泡沫、木材等。在一定条件下,阴燃会发生向明火的转变(Smoldering Transited to Flaming, STF),例如森林火灾的余火复燃现象。发生阴燃向明火的转变后,燃烧的峰值温度急剧升高,蔓延速度急剧加快,火焰会迅速吞没燃烧物质,造成极大的危险,是严重的火灾安全隐患。例如 2019 年发生在四川凉山木里县的森林火灾,在明火已被扑灭后,大风导致余火复燃,造成 30 人死亡。

阴燃向明火的转变过程受到国内外学者的广泛关注。Ohlemiller^[2]研究发现外界风速达到 5 m/s 反向阴燃也不会发生向明火的转变,而正向阴燃在风速约为 2 m/s 时就会发生向明火的转变。Tse 等^[3]利用超声成像技术通过检测焦炭的渗透性来实

时跟踪阴燃前锋的位置,并通过温度和气体测量数据分析发现聚氨酯泡沫氧化形成焦炭,焦炭能够发生二次炭氧化(SCO)反应,为阴燃转明火提供了有利的位置、可燃气体和热量。Bar-Ilan 等^[4]改变外界气流流速、氧浓度和辐射热通量进行实验,发现降低外部流速、增加氧浓度和增加外部辐射热通量均会增加阴燃向明火转变的可能性。Putzeys 等^[5]使用渗透率的时间导数表征 SCO 反应的强度,并利用超声探头跟踪阴燃前锋和 SCO 反应的传播,同样证明阴燃转明火发生在由 SCO 反应形成的气孔中。Chao 和 Wang^[6]对聚氨酯泡沫进行水平阴燃实验研究,在自然对流条件下发生向明火的转化。Hagen 等^[7,8]使用棉花进行阴燃转明火实验,发现只有阴燃和 SCO 反应同时存在时才会发生转明火,且棉花阴燃转明火分为早期转变和晚期转变两种转变机制。Yamazaki 等^[9]使用生物质棒进行实验,发现发光区域长度是判断阴燃转明火的临界判据

收稿日期:2023-01-03;修改日期:2023-02-10

基金项目:国家重点研发计划项目(2020YFC1511600)

作者简介:徐明睿(1999—),女,中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室硕士研究生,研究方向为阴燃火灾。

通讯作者:陈海翔, E-mail:hxchen@ustc.edu.cn

之一。

上述阴燃转明火的实验研究主要说明 SCO 反应提供了可燃气体和热量,对阴燃向明火的转变起到决定性作用。但上述实验中实验材料都选用聚氨酯泡沫、纤维素绝缘材料等,且实验材料的含水率都是连续均匀的。在实际阴燃火灾场景中,发生阴燃的材料复杂多变,尤其是森林地下火灾和居室火灾,发生阴燃的材料很难保证含水率的连续均匀。路长等^[10,11]研究发现阴燃传播过程中遇到湿材料发生阴燃转明火的现象,对此他给出的解释是,阴燃传播过程中遇到含水部分时,阴燃传播速度变慢,温度降低,导致氧化反应减弱,消耗的氧气减少,从而氧气积聚,但与此同时热解反应仍产生大量的热解可燃气体,与积聚的氧气发生反应,从而发生阴燃向明火的转变。由此发现,不含水材料和含水率突变材料发生阴燃转明火的机理不同,前者主要是 SCO 反应强度高,增大聚氨酯泡沫的孔隙,形成有利于阴燃转明火的场所,同时生成大量可燃气体并释放热量,导致转明火;存在水分时,水分对阴燃传播的影响主要体现在水分蒸发吸收热量以及水蒸气能够参与化学反应这两方面,引发转明火的可燃气体主要由热解反应释放。但路长只对突变处阴燃转明火现象进行物理层面的解释,对可燃气体及氧气浓度大小的判断仅依据温度数据进行推测,并未测量阴燃传播过程中的实际气体浓度,缺少数据支撑;并且对于水分在转明火中的作用,仅考虑了水分蒸发对温度造成的影响,并未考虑水蒸气参与的化学反应。因此,前人对含水率突变材料阴燃转明火的研究并不充分,有必要进一步开展实验探究含水率突变处发生阴燃向明火转变的机理。

1 实验设计

1.1 实验台

实验装置如图 1 所示,主体燃烧室两端开口,四周封闭,放置于不锈钢支架上。燃烧室内部尺寸为 150 mm×150 mm×500 mm,四周包裹 30 mm 厚的绝缘板和 3 mm 厚的不锈钢框架。燃烧室可从上方打开,方便放置锯末样品,实验过程中使用铝箔胶带覆盖顶盖产生的间隙,以减少热损并防止气体逸出^[12]。燃烧室内部布置 30 根热电偶测量温度数据,位置如图 1 所示。实验过程中工业相机采集燃烧室正视图,采集频率为 1 Hz,MRU 6plus 红外烟气分析仪和氢气浓度检测仪放置在腔室尾部上方测

量 CH₄、CO、O₂、H₂ 等气体浓度数据(O₂ 浓度测量分辨率为 0.01 Vol%,CO、CH₄、H₂ 测量分辨率为 1 ppm)。加热板在放置样品前放入燃烧室最左端,与锯末样品紧密接触,设定温控箱温度为 500 °C,等加热板从室温加热到 500 °C 并保持 10 min 之后取出,确保锯末能够自维持阴燃。

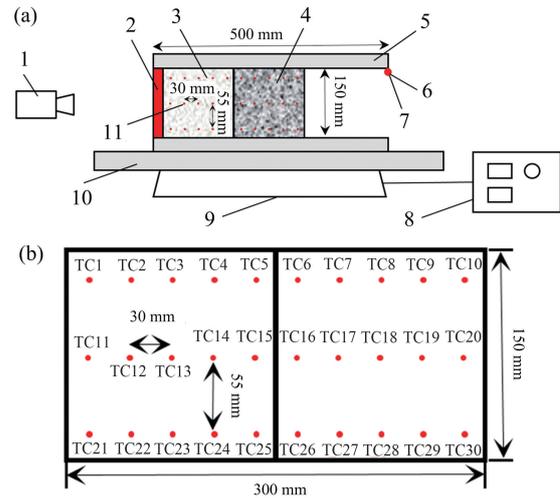


图 1(a)中 1 工业相机,2 加热板,3 干燥的锯末样品,4 含有水分的锯末样品,5 绝缘板,6 氢气浓度检测仪,7 红外烟气分析仪,8 数据采集系统,9 不锈钢支架,10 绝缘板,11 热电偶。

图 1 实验台示意图(a)及热电偶位置示意图(b)
Fig. 1 Diagram of the experimental setup (a) and diagram of the thermocouple positions (b)

1.2 实验材料

实验使用的锯末是以东北大兴安岭地区的红松木作为原材料、研磨形成的淡黄色粉末,粒径为 20 目~40 目,是一种具有吸湿性的多孔结构材料,易发生阴燃。干燥状态下自然堆积密度为 230 kg/m³。

实验中干燥锯末通过在 90 °C 的烘箱中干燥 48 h 获得,之后放置于密封箱中储存,干基含水率低于 5%。将自然状态下的锯末加足量水搅拌,锯末完全吸水后在密封箱中放置 24 h 使得水分分布均匀,之后将完全潮湿的锯末铺薄薄一层晾晒在自然通风的环境中,每隔 2 h 左右翻动一次,并测量含水率(含水率的测量使用赛多利斯 MA35M 水分测定仪,分辨率为 1 mg),直到获得所需要的含水率,然后将其放进密封箱密封保存,用于实验。对上述流程制备的含水锯末的含水率进行多次重复测量,计算其含水率误差在 5% 以内,满足实验要求。

根据前人的实验研究,长度为 30 cm 的样品更易成功阴燃点燃^[13],因此本文使用的实验样品长为 30 cm,宽和高均为 15 cm。实验放置锯末样品时,先在含水率突变处使用铁网隔开左右两个部分,以自然状态下的堆积密度分别放置干燥锯末和含水锯末,然后再将铁网取出。预实验结果表明,样品布设方式以及上文中加热器点火方式能够实现样品的自维持阴燃。

本工作对含水率突变的锯末材料阴燃进行了 28 组实验,实验工况表如表 1(表中样品含水率为赛多利斯 MA35M 水分测定仪两次测量所得的平均值)。实验在 7 月~9 月之间完成,环境温度在 28 °C~32 °C 之间,空气湿度维持在 50% 左右。实验在自然对流条件下进行,实验样品前半部分保持干燥,干基含水率小于 5%,后半部分干基含水率在 11.83%~60.35% 之间变化。后半部分干基含水率在 20.40%~51.69% 之间的 17 组实验中,有 15 组实验发生转明火,实验重复性良好。

2 实验结果与讨论

2.1 实验现象

本文对气相氧化反应和明火的界定参考前人文献^[11],气相氧化反应注重 O₂ 和热解可燃气之间的微观反应过程,而明火是一种相对宏观的燃烧状态,可以通过火焰辨别。明火一定是由气相氧化反应发展而来,但气相氧化反应可能会因为缺少可燃气体或氧气而终止,不能进一步转化成明火。通过保持锯末样品前半部分干燥,改变后半部分锯末的干基含水率进行阴燃实验,所得实验现象可以划分为以下三种:(1)当后半部分干基含水率(MC)小于 19.30% 时,锯末维持阴燃状态,在含水率突变处发生炽热燃烧(glowing)现象,但不会转化成明火,如图 2(a)所示;(2)当后半部分干基含水率在 20.40%~51.69% 时,含水率突变处会形成有利于可燃气体积聚的空隙,发生阴燃向明火的转变,如图 2(b)所示;(3)当后半部分干基含水率高于 53.57% 时,不会发生阴燃向明火的转变,如图 2(c)所示。

2.2 温度及阴燃传播速度

根据三种不同的实验现象,选取实验 26(前后含水率连续且干燥)、实验 10(前半部分干燥,后半部分含水率 33.34%)和实验 22(前半部分干燥,后半部分含水率 53.57%)这三组工况下的温度数据作为代表进行对比分析,如图 3 所示。当锯末含水

表 1 实验工况表

Table 1 Experimental conditions

序号	前半部分干基含水率 (%)	后半部分干基含水率 (%)	前半部分干基堆积密度 (kg/m ³)	后半部分干基堆积密度 (kg/m ³)	是否发生阴燃转变为明火	备注
1		11.83	216.80	165.60	否	
2		15.34	215.34	159.32	否	
3		18.94	218.90	155.28	否	
4		19.30	217.00	143.74	否	
5		20.40	213.74	136.68	是	
6		22.46	214.56	136.79	是	
7		24.51	216.83	137.54	是	
8		28.20	217.23	138.23	是	
9		30.67	211.35	130.17	是	
10		33.34	213.74	124.97	是	
11		34.46	216.73	124.68	是	
12		35.10	219.81	125.63	是	
13	<5	36.14	215.08	126.22	是	
14		36.33	221.10	124.84	是	
15		37.23	219.11	127.19	否	
16		40.23	207.00	128.40	是	
17		40.77	222.12	126.81	否	
18		42.27	219.78	126.98	是	
19		42.32	215.71	123.19	是	
20		51.31	218.89	118.24	是	
21		51.69	211.39	112.24	是	
22		53.57	214.54	97.43	否	
23		55.11	216.26	98.76	否	
24		57.03	212.79	96.76	否	
25		60.35	216.32	94.23	否	
26	<5		199.51		否	对照
27	12.19		185.16		否	对照
28	35.36		148.09		否	对照

率连续且干燥时,在材料中段,阴燃基本匀速向前传播,阴燃传播过程中最高温度达到 780 °C(发生在 $t=20\ 842$ s 时,TC27 处),发生 glowing 现象,即伴随发光发亮的焦炭表面氧化过程^[14],不会发生向明

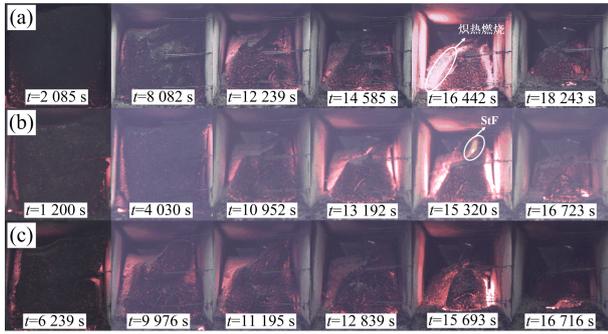


图 2 典型实验现象, 后半部分含水率

MC = (a) 19.30%, (b) 33.34%, (c) 53.57%

Fig. 2 Typical experimental phenomenon. The MC of the second half is (a) 19.30%, (b) 33.34%, (c) 53.57%

火的转化。当后半部分含水率适中时(在本实验中为 20.40%~51.69%), 阴燃在干燥部分传播时, 温度维持在 600 °C 左右, 传播到含水部分时, 含水率突变处温度有所升高, 达到 700 °C 左右, 随后在含水率突变处发生向明火的转变, 最高温度达 850 °C 左右(发生在 $t=15\ 452\ \text{s}$ 时, TC25 处)。当后半部分含水率继续上升, MC = 53.57% 时, 蒸发水分所需的

热量升高, 阴燃传播至含水率突变处时温度有所降低, 阴燃强度降低, 含水率突变处不会发生阴燃向明火的转变。为更清晰地对比不同含水率下阴燃传播至突变处的温度变化, 图 4 将上述三种工况下的 TC16 温度曲线进行对比。可以看出, 后半部分含水时阴燃传播速度明显加快。前后均干燥时, 实验 26 中 TC16 的峰值温度为 648 °C; 后半部分含水率适中时, 阴燃传播至突变处峰值温度升高, 实验 10 中 TC16 的峰值达到 722 °C; 后半部分含水率高于 53.57% 时, 阴燃传播至突变处峰值温度降低, 实验 22 中 TC16 温度降低至 568 °C。

在能够发生转明火的工况中, 阴燃传播至含水率突变处时温度会上升。这不同于路长^[11]实验中阴燃传播至含水率突变处温度下降的结果。本工作中为了模拟实际森林火灾中的场景, 采用锯末自然状态下的堆积密度进行实验。水分蒸发前锋蔓延过突变处后, 后半部分锯末干基堆积密度较低, 因此阴燃传播至突变处时供氧增强, 阴燃反应增强, 温度升高。路长^[11]在水平方向进行锯末阴燃实验, 样品前 4 cm 保持干燥, 后 6 cm 含水率在 24.40%~53.10%

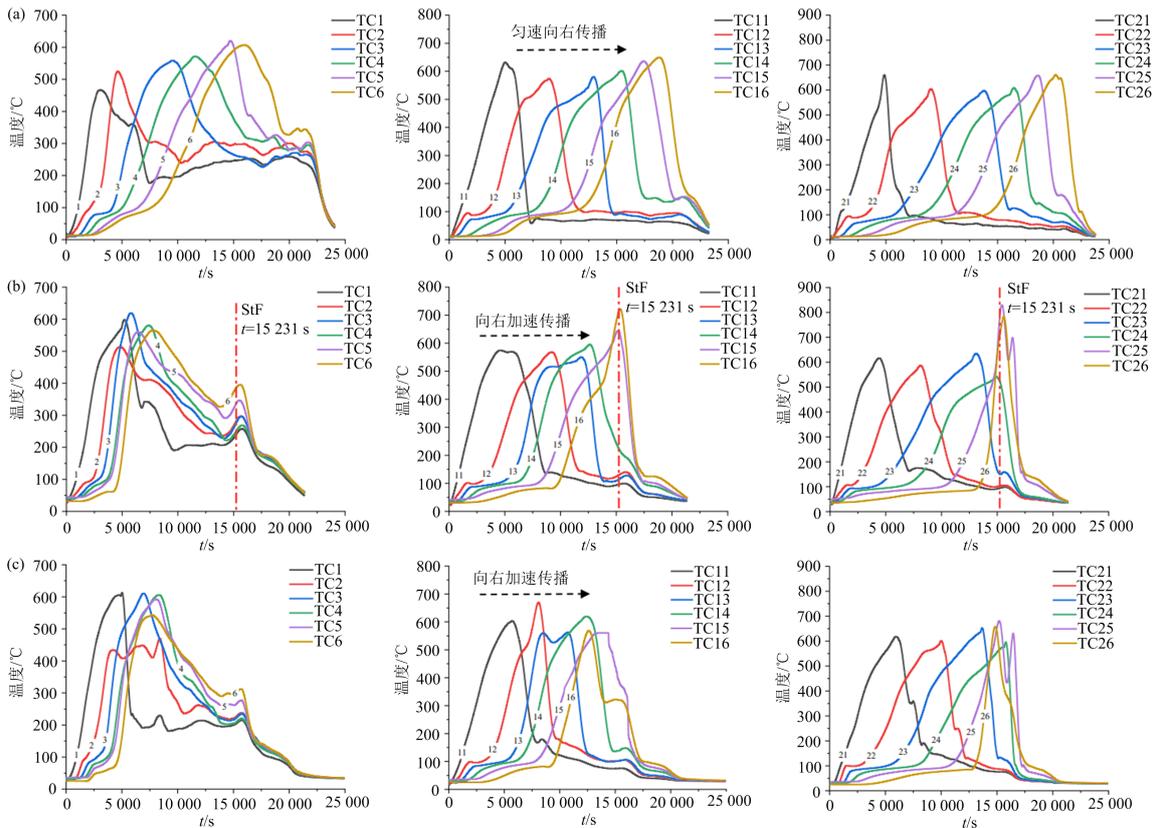


图 3 锯末阴燃过程中温度变化曲线 (a) 实验 26; (b) 实验 10; (c) 实验 22

Fig. 3 Temperature histories along sample (a) Experiment 26; (b) Experiment 10; (c) Experiment 22

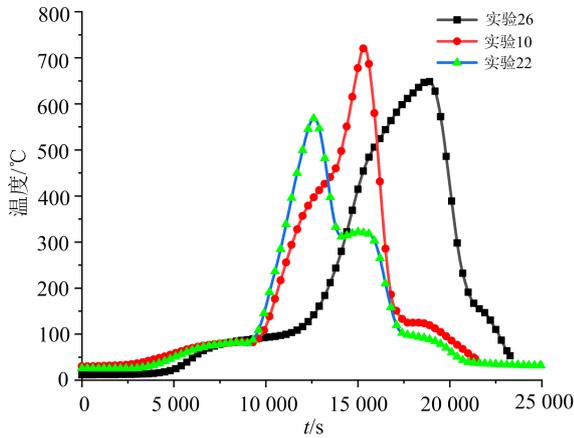
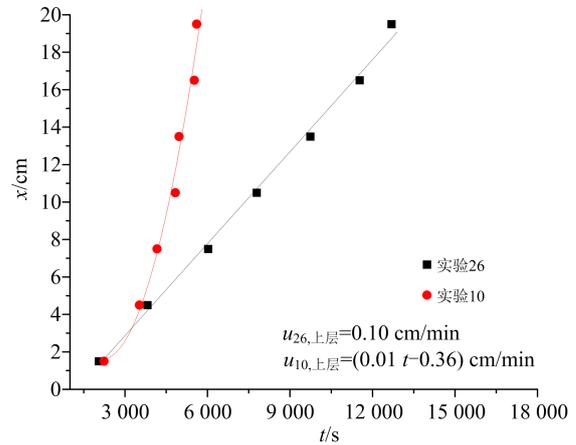


图 4 锯末阴燃过程中 TC16 的温度变化曲线
Fig. 4 Temperature histories of TC16

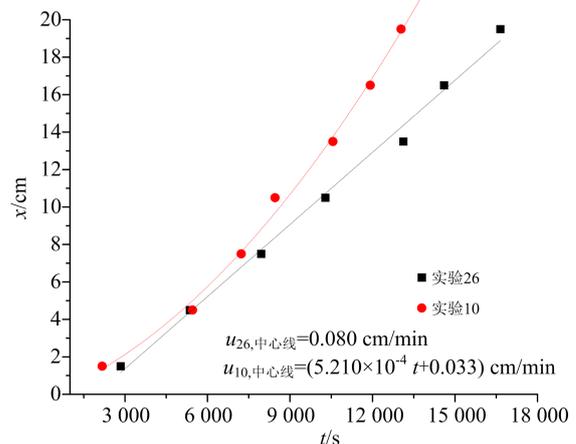
之间变化,但文中并未提及样品堆积密度的大小,因此推测与路长结果的不同是由于样品布置方式不同而导致温度结果的差异。

前人通常使用两根热电偶达到温度峰值的时间差以及两根热电偶之间的间距来计算阴燃传播速度,但由图 3 可以看出,阴燃达到峰值温度后,温度会维持相对稳定,并不会立刻下降,因此本文以 350 °C 作为阴燃特征温度计算阴燃传播速度^[11]。后半部分含水时,阴燃传播速度变化趋势类似,且阴燃传播速度数值相差不大。因此,为清晰对比样品后半部分干燥和含水这两种情况下的阴燃传播速度,下文对实验 26(锯末样品干燥且连续)和实验 10(锯末样品后半部分 $MC = 33.34\%$)的阴燃传播速度进行对比说明。

图 5(a)和图 5(b)分别展示了实验 26 和实验 10 的上层和中心线阴燃传播速度(由于后三列热电偶的温度受后方铁网热量积聚的影响,此处阴燃传播速度仅考虑 TC11~TC17;下层阴燃传播速度与中心线阴燃传播速度近似相等,此处不再单独分析下层传播速度)。由图 5 可以看出,实验 10 整体阴燃传播速度高于实验 26。实验 26 上层和中心线的阴燃传播速度近似为常数,实验 10 上层和中心线阴燃传播速度均随时间增加,近似为抛物线趋势。在实验 26 和实验 10 中,上层阴燃传播速度均高于中心线阴燃传播速度,这是因为初始状态下上层热电偶上方仅有 2 cm 的样品层,氧气供应量大于中心线处,且随着阴燃反应进行,样品体积收缩,上层热电偶处氧气供应会进一步增强。当样品后半部分含水时,阴燃传播速度逐渐加快是因为含水部分温度达



(a) 上层阴燃传播速度



(b) 中心线处阴燃传播速度

图 5 实验 26 和实验 10 阴燃传播速度对比

Fig. 5 Comparison of the smoldering spread rates in Experiment 26 and Experiment 10

到 100 °C 时,开始发生水分蒸发,后半部分的孔隙率增大,供氧增强,同时,推测水蒸气与焦炭发生反应(下文 2.4 中将进行展开分析),进一步促进了阴燃反应的进行,因此传播到含水部分时阴燃传播速度增大。

2.3 含水率突变处空隙的形成

实验现象表明,阴燃传播过程中在含水率突变处会形成空隙,并且阴燃向明火的转变发生在该空隙处,如图 6 所示。通过对不同含水率的锯末在自然状态下的堆积密度进行测量,发现随含水率逐渐升高,锯末的湿基堆积密度和干基堆积密度均逐渐降低,如图 7 所示。因此当阴燃传播至含水率突变处,水分蒸发后,后半部分锯末的干基堆积密度较小,孔隙较大,后半部分供氧增强,促进了阴燃反应的进行,进而促进含水率突变处空隙的形成。



(a) 37.19% (b) 46.86% (c) 51.69%

图 6 阴燃传播至含水率突变处形成空隙
Fig. 6 A crevice formed when smoldering spread to the location with the MC mutation

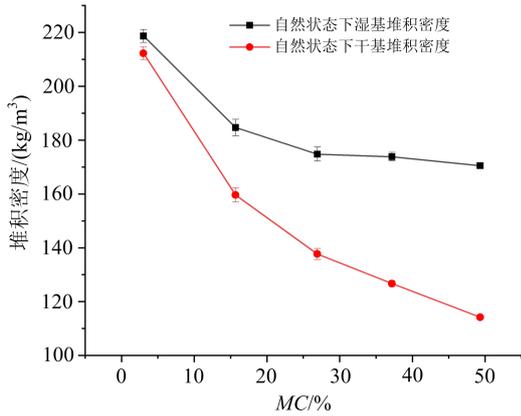
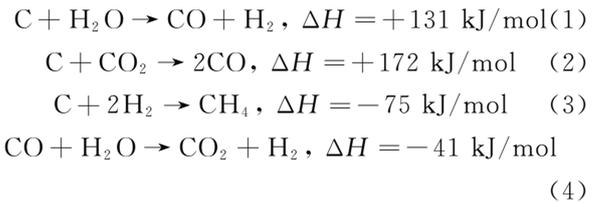


图 7 锯末堆积密度随含水率变化曲线
Fig. 7 Sawdust bulk density as a function of MC

2.4 气体浓度演化规律

为验证路长对可燃气体浓度的推测并探究水蒸气是否参与化学反应,对实验 26(前后锯末均干燥)与实验 10(前半部分干燥,后半部分 MC = 33.34%)这两种工况下,锯末阴燃生成的气体随时间的分布对比如图 8 所示。

实验 10 锯末阴燃过程中可燃气体浓度出现两个峰值,两个峰值出现时锯末的燃烧状态分别如图 9(a)和图 9(b)所示。第一个峰值发生在上层锯末消耗完全时,根据上文对阴燃传播速度的分析,后半部分含水时上层的阴燃传播速度较快,且随着上层锯末的消耗, O₂ 供应增强,促进阴燃反应的进行,因此 CH₄ 等可燃气体浓度逐渐增大达到峰值, O₂ 有所消耗,浓度降低。当上层锯末后半部分温度达到 100 °C 时,水分开始蒸发产生水蒸气,根据前人^[15]研究,水蒸气能够与焦炭发生反应,主要包括以下四个基元反应,



其中(1)是发生的主要反应,焦炭与水蒸气反应,生

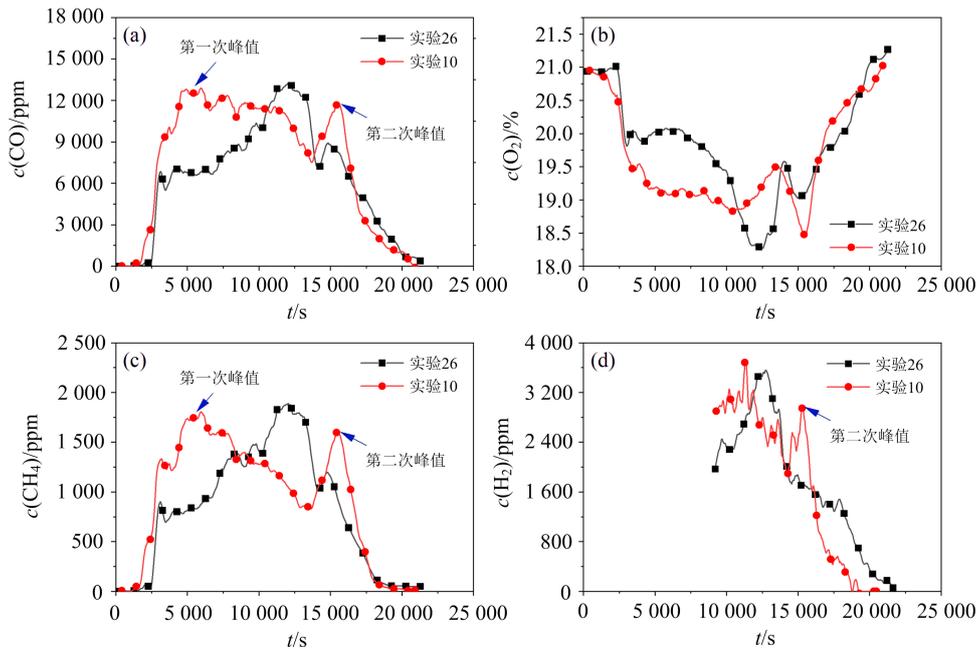


图 8 实验 26 和实验 10 锯末阴燃生成/消耗的气体 CO, O₂, CH₄, H₂ 随着时间的分布
Fig. 8 The evolution/consumption histories of gases, CO, O₂, CH₄ and H₂ during sawdust smoldering in Experiment 26 and Experiment 10

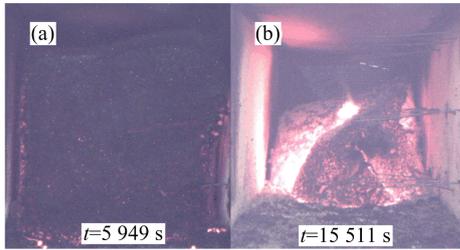


图9 实验10气体浓度两次达到峰值时样品的阴燃状态
Fig. 9 Smoldering state when gas concentration reached the peak in Experiment 10

成CO和H₂,且该反应吸热,温度升高促进反应向正方向移动。此外,由于焦炭中包含少量灰分且具有催化作用^[16],焦炭还会和CO₂和H₂发生副反应,生成CO和CH₄。与此同时,CO会和多余的水蒸气发生水煤气变换反应,但该反应需要催化剂参与,在本实验中反应强度低。由以上四步基元反应可以看出,焦炭和水蒸气反应的主要产物是CO和H₂,因此H₂浓度在t=11300s左右达到一个峰值。第二个气体浓度峰值出现在阴燃转变为明火时,此时最下层锯末TC27、TC28、TC29处温度在100℃左右,含水锯末仍在进行水分蒸发释放水蒸气,消耗部分热量导致局部氧化反应减弱,但热解反应仍在不断进行,释放出大量可燃热解气,这与路长的推测是一致的。除此之外,水蒸气也会参与化学反应,与灼热的焦炭反应生成H₂,H₂浓度同时达到第二个峰值,进一步增加可燃气体的量。因此,高温、可燃气体和氧气在空隙处相遇,引发了向明火的转变,消耗氧气,氧气浓度达到低峰。

为了更加清晰地分析实验10发生转明火的机理,我们用TC16代表形成空隙处的温度,与氧气浓度数据共同绘制在图10中。根据氧气浓度随时间的演化规律,可以将锯末整个燃烧过程划分为三个阶段:(a)随着锯末发生阴燃被消耗,发生体积收缩,供氧增强,阴燃反应逐渐增强,氧气有所消耗;(b)中层后半部分锯末温度达到100℃,水分开始蒸发,消耗部分阴燃产生的热量,因此焦炭的氧化反应减弱,消耗的O₂减少,O₂浓度有所回升,热解释放出大量可燃热解气;(c)空隙处开始发生可燃气体与O₂之间的气相反应,O₂浓度逐渐减小,随着气相反应热量积聚,空隙处温度迅速上升,并有足够的可燃气体供应,最终形成明火。

在实验26中,当温度达到锯末热解开始温度后,CO、CH₄等可燃气体的量开始逐渐上升;与此

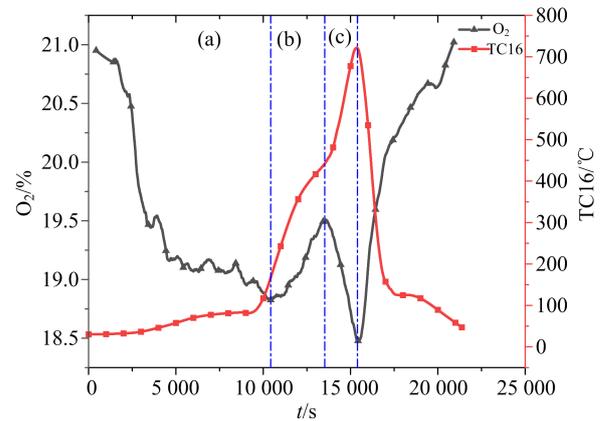


图10 实验10阴燃传播过程中O₂浓度和TC16温度变化曲线

Fig. 10 O₂ concentration and TC16 temperature curves during smoldering propagation in Experiment 10



图11 实验26气体浓度达到峰值时样品的阴燃状态
Fig. 11 Smoldering state when gas concentration reached the peak in Experiment 26

同时,锯末热解后生成的焦炭开始发生氧化反应,消耗部分氧气,氧气浓度有所下降。在t=12072s时,阴燃生成的可燃气体的量以及O₂的消耗量均达到峰值,此时阴燃状态如图11所示,锯末阴燃已传播至第五列热电偶处(TC5, TC15, TC25),阴燃产生的热量向前端及尾部的散失量达到最小,且此时上层锯末已消耗完,有充足的氧气用于阴燃反应,所以此时阴燃强度达到最大值,锯末呈现glowing状态,表明局部发生了气相氧化反应,但不足以进一步形成明火。

当后半部分含水率达到53.57%时(实验22),锯末阴燃生成的气体随时间的分布如图12所示。在t=3500s处的气体峰值是由于阴燃传播至第一列热电偶处,锯末坍塌导致局部供氧突然增强,阴燃反应增强,释放出较多可燃气体;在t=7500s左右的气体峰值代表阴燃强度达到最大,此时阴燃传播至第四列热电偶处(TC4, TC14, TC24),CO的浓度达到9545ppm,显著低于实验10中第一个气体峰

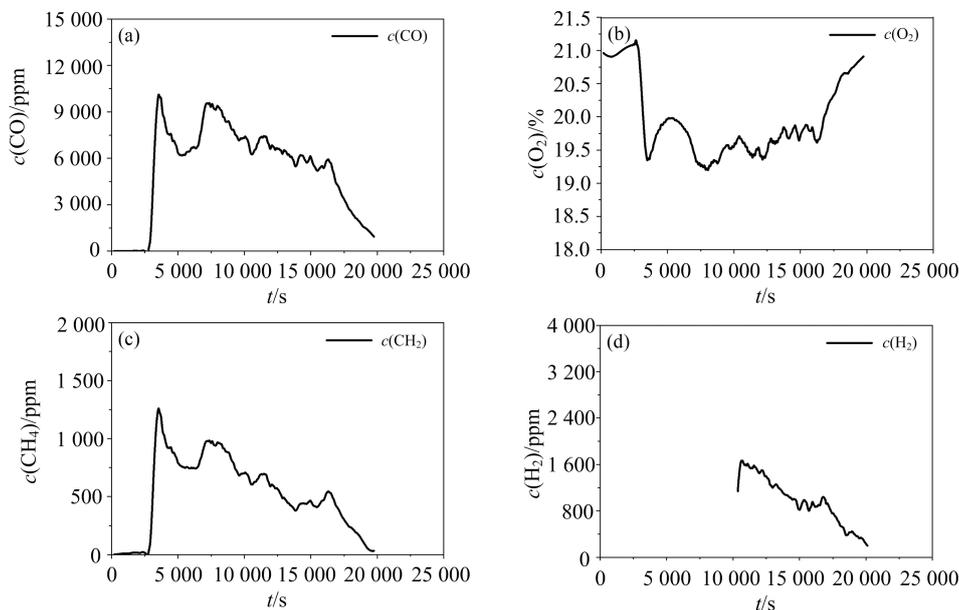


图 12 实验 22 锯末阴燃生成/消耗的气体 CO, O₂, CH₄, H₂ 随着时间的分布

Fig. 12 The evolution/consumption histories of gases, CO, O₂, CH₄ and H₂ during sawdust smoldering in Experiment 22

值处 CO 浓度 13 000 ppm 左右。随后阴燃继续向右传播, TC15, TC16 的峰值温度降低, 生成可燃气体浓度降低, 说明过多的水分在蒸发过程中吸收的热量降低了阴燃反应强度。锯末继续以阴燃的燃烧形式消耗完, 不再出现可燃气体峰值。因此可以推断后半部分 $MC \geq 53.57\%$ 时, 不再发生向明火转化的原因是可燃气体供应不足。

综合上述分析, 阴燃传播过程中含水率突变处转明火的机理不同于含水率连续材料转明火的机理。可燃气体来源方面, 含水率连续材料发生转明火主要由 SCO 反应提供可燃气体; 含水率突变时发生转明火主要由热解反应和焦炭与水蒸气的反应提供可燃气体。发生转明火的场所方面, 含水率连续材料阴燃过程中 SCO 反应导致渗透率增大, 形成有利场所; 含水率突变时发生转明火的场所是干基堆积密度不同产生的空隙。

3 结论

采用锯末材料进行阴燃实验, 保持前半部分锯

末干燥, 后半部分干基含水率在 $11.83\% \sim 60.35\%$ 之间变化, 研究含水率突变对阴燃传播行为的影响, 分析了温度、阴燃传播速度、气体浓度等数据, 研究发现:

(1) 在本实验中, 当后半部分干基含水率小于 19.30% 时, 阴燃自维持传播; 当后半部分干基含水率在 $20.40\% \sim 51.69\%$ 之间时, 阴燃蔓延过程中会在含水率突变处形成有利于气体聚集的空隙, 并发生向明火的转变; 当后半部分干基含水率大于 53.57% 时, 不会发生转明火。

(2) 当样品前半部分保持干燥, 后半部分干基含水率在 $20.40\% \sim 51.69\%$ 之间时, 含水率突变处发生阴燃转明火的机理如下: 含水率突变处由于前后两部分样品干基堆积密度的差异形成空隙, 空隙处供氧增强, 促进阴燃反应进行, 两侧焦炭呈现灼热的燃烧状态; 且后半部分水分消耗部分热量, 导致样品氧化反应减弱, 同时热解反应仍在不断进行, 释放出大量可燃热解气, 同时水蒸气与焦炭反应生成 H₂; 高温、可燃气体和 O₂ 在空隙处的积聚引发阴燃向明火的转变。

参考文献

- [1] Huang X Y, Rein G. Upward-and-downward spread of smoldering peat fire[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2019, 37(3): 4025-4033.
- [2] Ohlemiller T J. Forced smolder propagation and the transition to flaming in cellulosic insulation[J]. Combustion and Flame, 1990, 81(3-4): 354-365.

- [3] Tse S D, Carlo A, Nde-Pello F, Miyasaka K. Controlling mechanisms in the transition from smoldering to flaming of flexible polyurethane foam[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 1996, 26(1): 1505-1513.
- [4] Bar-Ilan A, Putzeys O M, Rein G, Fernandez-Pello A C, Urban D L. Transition from forward smoldering to flaming in small polyurethane foam samples[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2005, 30(2): 2295-2302.
- [5] Putzeys O, Bar-Ilan A, Rein G, Fernandez-Pello A C, Urban D L. The role of secondary char oxidation in the transition from smoldering to flaming[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2007, 31(2): 2669-2676.
- [6] Chao C Y H, Wang J H. Transition from smoldering to flaming combustion of horizontally oriented flexible polyurethane foam with natural convection[J]. Combustion and Flame, 2001, 127(4): 2252-2264.
- [7] Hagen B C, Frette V, Kleppe G, Arntzen B J. Transition from smoldering to flaming fire in short cotton samples with asymmetrical boundary conditions[J]. Fire Safety Journal, 2015, 71: 69-78.
- [8] Hagen B C, Meyer A K. From smoldering to flaming fire: Different modes of transition[J]. Fire Safety Journal, 2021, 121: 103292.
- [9] Yamazaki T, Matsuoka T, Kuwana K, Nakamura Y. Study on the flaming-transition behavior of a downwardly smoldering biomass stick utilizing low pressure [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2021, 38(3): 5073-5080.
- [10] 路长, 孟牒, 余明高, 安安. 不连续和含水材料阴燃及向明火转化过程研究[J]. 安全与环境学报, 2011, 11(4): 164-168.
- [11] 路长. 阴燃过程及其向明火转化的机理研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2005.
- [12] Wang Z Z, Liu N A, Yuan H, Chen H X, Xie X D, Zhang L H, Rein G. Smoldering and its transition to flaming combustion of polyurethane foam: An experimental study[J]. Fuel: A Journal of Fuel Science, 2022, 309: 122249.
- [13] 王珍珍. 自然对流条件下聚氨酯泡沫阴燃及其向明火转化的实验与数值模拟研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2021.
- [14] Gao J, Qi X B, Zhang D K, Matsuoka T, Nakamura Y. Propagation of glowing combustion front in a packed bed of activated carbon particles and the role of CO oxidation[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2021, 38(3): 5023-5032.
- [15] 刘梦杰. 焦炭与水蒸气的气化特性研究[D]. 鞍山: 辽宁科技大学, 2017.
- [16] Porada S, Czerski G, Dziok T, Grzywacz P, Makowska D. Kinetics of steam gasification of bituminous coals in terms of their use for underground coal gasification [J]. Fuel Processing Technology, 2015, 130: 282-291.

Experimental study on transition from smoldering to flaming of pine sawdust with discontinuous moisture contents

XU Mingrui, QIAO Yiqian, YIN Zengbing, ZHANG Linhe, CHEN Haixiang

(State Key Laboratory of Fire Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: The discontinuous distribution of moisture content (*MC*) of porous solid fuels can affect the smoldering process and even trigger the transition from smoldering to flaming. In this paper, the smoldering experiments of pine sawdust with discontinuous moisture contents under natural convection were conducted. The first half of the sample was dry, while the second half was wet (dry based *MC*: 11.83%~60.35%). The results showed that when the dry-based *MC* of the second half was less than 19.30%, smoldering propagated self-sustainably; when the dry-based *MC* of the second half was between 20.40% and 51.69%, a crevice conducive to gas accumulation formed at the *MC* mutation, and smoldering transitioned to flaming (STF); when the dry based *MC* of the second half was higher than 53.57%, no STF occurred. From the evolutions of temperatures and combustible gases, it can be concluded that transition from smoldering to flaming was caused by high temperature, the formed crevice and the combustible gases concentrated in the crevice at the same time.

Keywords: Smoldering; Transition to flaming; Pine sawdust; Moisture content