

## Research on vertical flame spread characteristics over flame retardant rigid polyurethane polymer

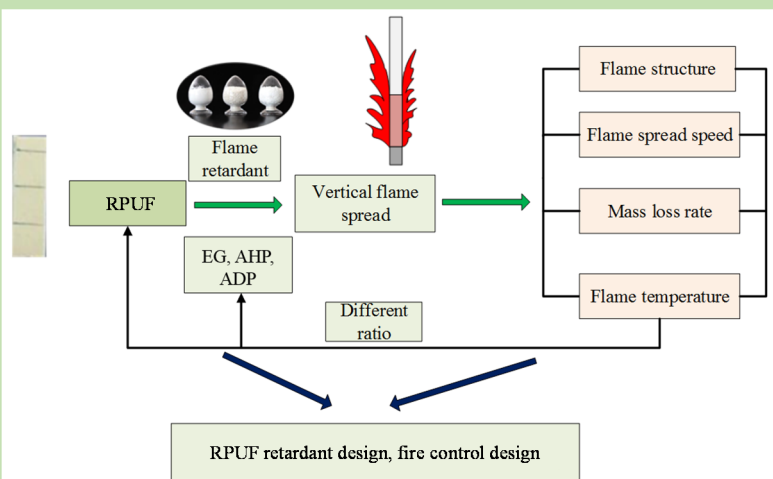
Xinjie HUANG<sup>1,2\*</sup>, Chunjie WANG<sup>1</sup>, Jinda GAO<sup>1</sup>, Cheng CHEN<sup>1</sup>, Gang TANG<sup>1</sup>, Changlong WANG<sup>1</sup>

1. School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Technology, Ma'anshan, Anhui 243002, China

2. School of Safety Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China

**Abstract:** Based on the frequent occurrence of fire accidents on insulation materials rigid polyurethane (RPUF), which can cause great economic loss and casualties, RPUF was prepared by one-step water-blown method and hope to reduce the fire hazards in reality. A small and medium-scale insulation flame spread experimental platform was built, which was used to reveal the flame spread characteristics over RPUF and flame retardant RPUF. The flame structure, flame spread speed, flame temperature and mass loss rate etc. characteristics were analyzed. The results showed that the surface of all the samples was charred during flame spread. The non-flame retardant RPUF showed the largest combustion intensity, while the flame retardant expanded graphite (EG), aluminum hypophosphite (AHP) and aluminum diethylhypophosphite (ADP) resisted the flame spread in some degree, respectively, which was shown in the reduced flame spread speed, mass loss rate, and flame temperature parameters etc. It was also found that RPUF/AHP5 flame spread could sustain a period, while after 20 s the extinguishment was formed. It was because that, the flame retardant RPUF/AHP5 released non-combustion gas when heated, and AHP decomposed into the phosphorus-containing compound, which promoted the formation of charcoal in the polyurethane molecular chain. At the same time, flame retardant RPUF/ADP5 samples distinguished during flame spread, however, the distinguish degree was lower than that of flame retardant RPUF/AHP5. Meanwhile, the surface temperature had two peaks during the flame spread over RPUF/EG5, which were attributed to the instability of the char layer. When the temperature was higher than 400 °C, the char layer was oxidized immediately and the heat penetrated the char layer, and unburned material continued to pyrolysis, therefore, the second temperature peak was formed.

**Key words:** rigid polyurethane; expanded graphite; aluminum hypophosphite; aluminum diethylhypophosphite; vertical flame spread



收稿: 2019-07-14, 修回: 2019-11-10, 网络发表: 2020-01-08, Received: 2019-07-14, Revised: 2019-11-10, Published online: 2020-01-08  
基金项目: 安徽省自然科学基金青年基金资助项目(编号: 1608085QE113); 中国博士后科学基金资助项目(编号: 2018M640536); 安徽省级大学生创新创业训练计划项目(编号: 201810360266)  
作者简介: 黄新杰(1981-), 男, 安徽省合肥市人, 博士, 副教授, 主要从事材料燃烧性能研究, E-mail: hxj501@mail.ustc.edu.cn

**引用格式:** 黄新杰, 王纯洁, 高金达, 等. 阻燃硬质聚氨酯泡沫塑料垂直火蔓延特性研究. 过程工程学报, 2020, 20(7): 843-851.  
Huang X J, Wang C J, Gao J D, et al. Research on vertical flame spread characteristics over flame retardant rigid polyurethane polymer (in Chinese). Chin. J. Process Eng., 2020, 20(7): 843-851, DOI: 10.12034/j.issn.1009-606X.219257.

# 阻燃硬质聚氨酯泡沫塑料垂直火蔓延特性研究

黄新杰<sup>1,2\*</sup>, 王纯洁<sup>1</sup>, 高金达<sup>1</sup>, 陈成<sup>1</sup>, 唐刚<sup>1</sup>, 王昌龙<sup>1</sup>

1. 安徽工业大学建筑工程学院, 安徽 马鞍山 243002

2. 中国矿业大学安全工程学院, 江苏 徐州 221116

**摘要:**通过一步合成法制备了阻燃硬质聚氨酯泡沫, 自主搭建保温材料火蔓延实验台, 采用中小尺寸实验对比研究了阻燃及非阻燃硬质聚氨酯的垂直火蔓延特性, 分析了火焰结构特性、火蔓延速度、火焰温度、质量损失速率等参数的变化规律。结果表明, 火蔓延过程中, 材料表面均出现了炭化现象, 垂直双面燃烧过程中聚氨酯纯样 RPUF 燃烧最剧烈, 阻燃剂膨胀石墨(EG)、次磷酸铝(AHP)和二乙基次膦酸铝(ADP)的加入, 抑制了材料的燃烧和蔓延, 使材料燃烧的火蔓延速度、质量损失速率及温度等参数都相应降低。RPUF/AHP5 垂直双面火蔓延过程中, 火焰稳定性差, 在 20 s 后出现熄灭现象, 原因是阻燃剂次磷酸铝(RPUF/AHP5)受热挥发出难燃气体。AHP 降解后形成的含磷化合物可促进聚氨酯分子链成炭, 导致产生熄灭现象。而 RPUF/ADP5 火蔓延过程中, 同样出现了熄灭现象, 其熄灭的程度低于阻燃剂次磷酸铝(RPUF/AHP5)试样。RPUF/EG5 火蔓延过程中试样表面温度存在两个峰值, 由于 RPUF/EG5 燃烧生成的炭层不稳定所致。当温度高于 400 °C 时炭层被迅速氧化, 热量穿透炭层使内部未燃样品热解, 生成温度的第二个峰值。

**关键词:**硬质聚氨酯; 膨胀石墨; 次磷酸铝; 二乙基次膦酸铝; 垂直火蔓延

中图分类号: TQ325.7

文献标识码: A

文章编号: 1009-606X(2020)07-0843-09

## 1 前言

近年来, 聚氨酯(RPUF)泡沫保温材料因其优良的隔热保温和防水性能<sup>[1]</sup>, 在建筑、航空、汽车制造、交通运输、医药、农业等领域得到广泛应用。然而, 聚氨酯泡沫具有极易着火、火蔓延速度快、产烟量大且烟气毒性等特点, 使聚氨酯类建筑火灾事故频频发生, 造成了巨大的财产损失和人员伤亡。因此, 降低聚氨酯泡沫材料的火灾危害性, 揭示其燃烧规律, 从根本上控制火灾的蔓延和扩大, 成为当前研究的热点。

通过对聚氨酯泡沫进行阻燃处理, 能最大程度降低其燃烧性。姜浩浩等<sup>[1]</sup>将聚磷酸铵(APP)添加到 RPUF 中, 发现一定程度上可降低 RPUF/APP 泡沫复合材料的燃烧烟密度, 提高复合材料的火灾安全性能。膨胀石墨(EG)作为一种有效膨胀型阻燃剂, 广泛应用于聚苯乙烯泡沫、环氧树脂和聚丙烯树脂阻燃<sup>[1]</sup>。高明等<sup>[1]</sup>将膨胀石墨、微胶囊红磷(MRP)和硼砂添加到硬质聚氨酯泡沫塑料中, 发现硼砂对抑制 RPUF 热释放及烟气释放有明显效果, 且 EG/MRP/硼砂质量比为 4:2:1 及以上时, RPUF 阻燃抑烟效果较好。杨旭峰等<sup>[6]</sup>以次磷酸钠(一水)和硫酸铝(十八水)为主要原料, 合成了高效无卤阻燃剂次磷酸铝(AHP), 重点研究了 AHP 在聚氨酯泡沫中的阻燃作用。Jia 等<sup>[7]</sup>通过阻燃剂对 RPUF 进行分子结构调控, 提

高其阻燃特性。Tabatabaee 等<sup>[8]</sup>使用磷二醇阻燃剂对 PU 材料进行阻燃处理, 提高了材料的成碳率及气体稀释效应。

目前国内外许多学者对聚氨酯的阻燃性进行了一定的研究, 多数通过阻燃剂与聚氨酯材料不同比例混合, 或对聚氨酯材料进行分子结构调控等技术进行阻燃, 但关于阻燃型硬质聚氨酯材料的热解及火蔓延的研究较少。在日常生活中, 为满足不同的生活及生产需要, 阻燃型硬质聚氨酯的应用范围逐渐扩大, 因此, 有必要对其开展相关研究工作。

本工作对自制的 5 种阻燃及非阻燃硬质聚氨酯材料在垂直放置情况下进行中小尺寸火蔓延实验, 研究分析了不同试样的燃烧及火蔓延特性参数, 如火蔓延速度、火焰高度、火焰温度等的变化规律。考察了阻燃聚氨酯燃烧特性机理, 为阻燃聚氨酯防火设计提供参考。

## 2 实验

### 2.1 实验材料

聚醚多元醇(LY-4110)和 33wt% 的三乙烯二胺溶液(A33, 工业级, 中国化工企业), 多亚甲基多苯基多异氰酸酯(PAPA, 工业级, 万华化学集团有限公司), 二月桂酸二丁基锡(LC, 化学纯, 空气化工有限公司), 硅油泡沫稳定剂(AK-8805, 工业级, 济宁恒泰化工有限公司),

三乙醇胺( $C_6H_{15}NO_3$ , 化学纯, 济南晟轩化工有限公司), 可膨胀石墨(青岛岩海碳材料有限公司), 次磷酸铝(AHP, 武汉汉业化工有限责任公司), 二乙基次膦酸铝(ADP, 江苏利思德新材料有限公司), 实验室自制蒸馏

水。  
通过一步合成法制备阻燃硬质聚氨酯复合材料, 将制成的聚氨酯泡沫裁成长 60 cm、宽 4 cm、厚 2 cm 的试样。具体材料及相关物料配比如表 1 所示。

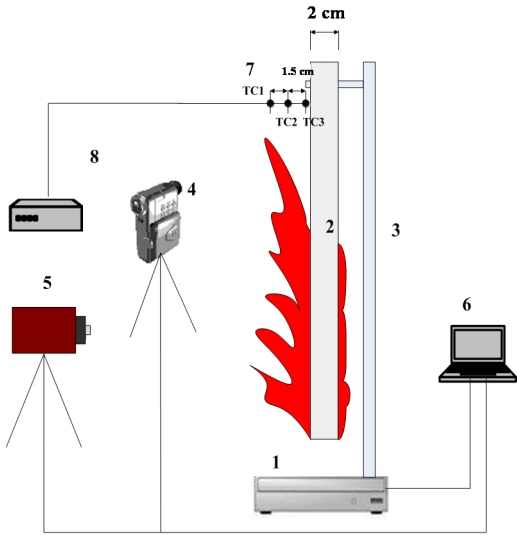
表 1 聚氨酯试样的配方组成  
Table 1 Formulation of polyurethane samples

Sample	Mass weight/g										Density/( $kg/m^3$ )
	LY-4110	PAPA	LC	AK-8805	A33	H <sub>2</sub> O	C <sub>6</sub> H <sub>15</sub> NO <sub>3</sub>	EG	AHP	ADP	
RPUF	100	150	0.5	2	1	2	3	0	0	0	58.8
RPUF/EG5	100	150	0.5	2	1	2	3	5	0	0	59.7
RPUF/EG10	100	150	0.5	2	1	2	3	10	0	0	61.5
RPUF/AHP5	100	150	0.5	2	1	2	3	5	0	0	59.0
RPUF/ADP5	100	150	0.5	2	1	2	3	0	0	5	55.0

2.2 实验方法

本实验在中小尺寸火蔓延实验台中进行, 如图 1 所示。实验台包括热电偶(K 型和 R 型, 合肥科博教学用品有限公司)、YB502 电子天平(上海精密仪器仪表有限公司)、HFM-4U 热流计(北京东方顶峰科技有限公司)、TP700-32 数据采集仪(合肥远中计量检测仪器有限公司)、FDR-AX40 摄像机(日本 SONY 公司)、T610 红外摄像机(美国 FLIR 菲力尔公司)、石膏板(纸面, 马鞍山市德高建材商贸有限公司)、支架(自制)及电脑等实验装置。

本实验在安徽省马鞍山市进行, 当地地理气象条件如表 2 所示。实验开始时, 在聚氨酯试样表面每隔 5 cm 画一组平行线, 用于记录热解前锋位置。使用火机气点火装置对聚氨酯末端点火, 火机气使用丁烷气体, 点火器内径 8 mm, 产生的火焰高度为 25 mm, 点火时间约 5 s。摄像机拍摄整个火蔓延过程, 通过电子天平记录火蔓延过程中聚氨酯质量变化情况, 电子天平的精度为 0.01 g。每组实验进行 3 次, 取平均值进行实验分析。



1. Electronic balance 2. RPUF 3. Stent 4. Camera 5. Infrared camera  
6. PC 7. Thermocouple 8. Data acquisition device

图 1 竖直双面火蔓延实验简图  
Fig.1 Schematic diagram of flame spread of vertical with two sides

表 2 马鞍山地理气象条件  
Table 2 Geographical and meteorological conditions in Ma'anshan

Place	Altitude/m	Atmospheric pressure/kPa	Absolute oxygen concentration/( $kg/m^3$ )	Ambient temperature/ $^{\circ}C$	Relative humidity/%
Ma'anshan	75	101.8	0.269	12~16	30~42

3 结果与讨论

3.1 火蔓延形态

为了研究阻燃及非阻燃型硬质聚氨酯材料的火蔓延特性, 分别分析了五种试样在燃烧开始后的 0, 5, 10, 15, 20, 25 s 时的火焰形态, 如图 2 所示。从图可看出,

未加阻燃剂的 RPUF 燃烧过程最剧烈, 在火蔓延初始阶段, 火焰区上方空气受热上升, 材料内部空气压力变小, 火焰自材料底部卷吸四周环境空气, 使火焰向上蔓延并沿高度方向逐渐向内收缩<sup>[4]</sup>。对比加入不同含量 EG 的试样可以发现, 加入 10 g EG 的 RPUF/EG10 试样火焰长度及燃烧剧烈程度明显小于 RPUF/EG5, 且燃尽区的

火焰较早熄灭。

试样 RPUF/AHP5 点燃后一段时间内火蔓延得以维持,但在 20 s 后出现突变现象,材料剧烈燃烧生成的烟气流吹灭了上方的火焰,使火焰快速熄灭,而试样上方仍存在部分材料未燃烧。出现此现象的原因一方面是加入的阻燃剂 AHP 受热挥发出难燃气体,从而减缓燃烧的进行;另一方面由于 AHP 降解后形成的磷化氢氧化形成的磷酸、偏磷酸等含磷化合物促进聚氨酯分子

链成炭,在试样表面固定下来形成覆盖效应,隔绝氧气和热量,抑制燃烧区域物质和能量的交换,最终使火焰快速熄灭<sup>[9]</sup>。对比试样 RPUF/ADP5 可发现,其在约 20 s 时出现火焰不稳定状态,在烟气带动下火焰到达试样顶端。但与 RPUF/AHP5 不同的是,火焰到达顶端后再次点燃下方未燃试样且燃烧剧烈。综合以上特性,5 种试样的燃烧强烈程度为 RPUF>RPUF/EG5>RPUF/EG10>RPUF/ADP5>RPUF/AHP5。

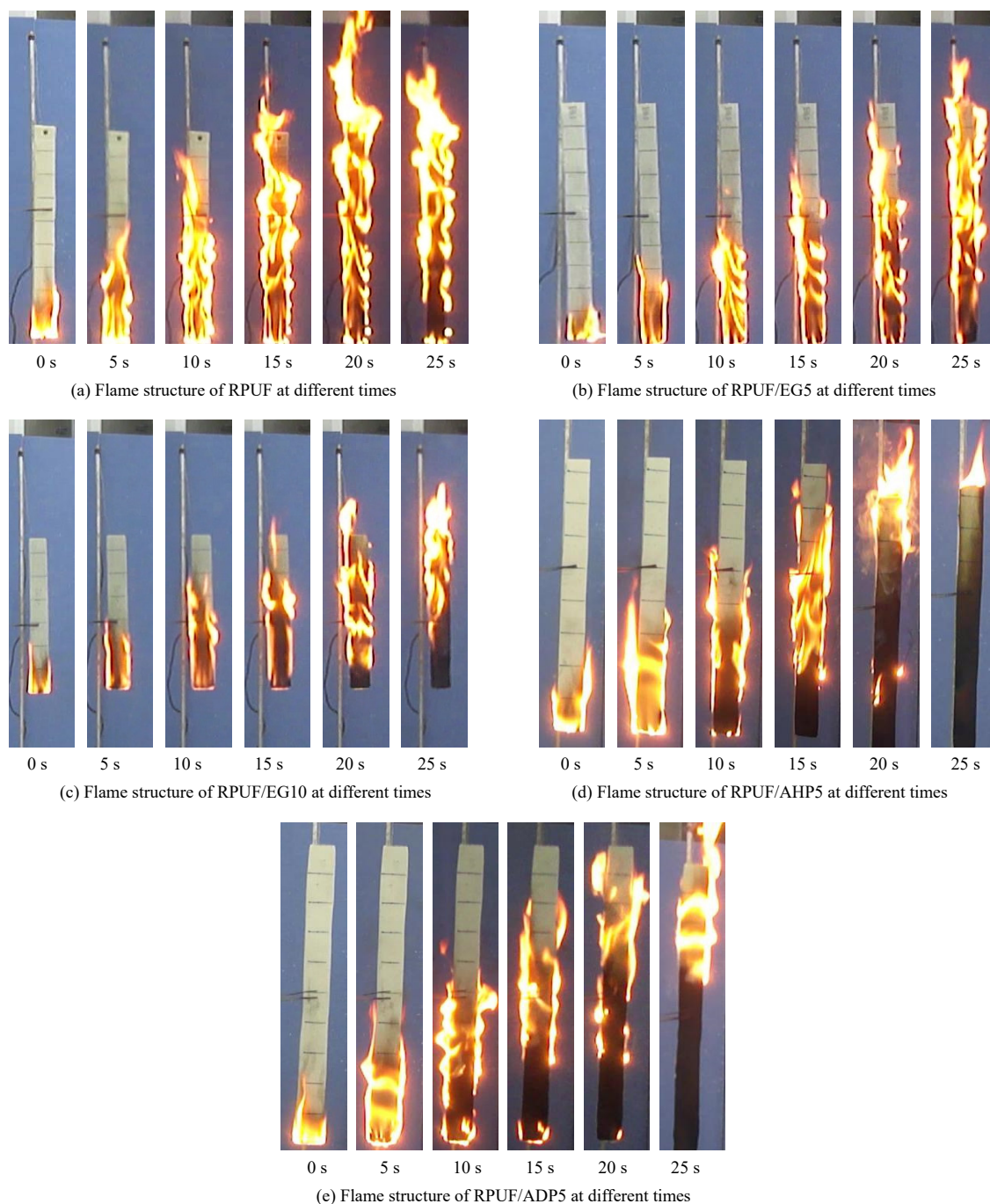


图2 5种聚氨酯试样不同时刻的火焰形态图

Fig.2 Flame structures of five polyurethane samples at different times

### 3.2 火蔓延速度特性

火蔓延速度是表征材料燃烧剧烈程度的一个重要特性参数。5 种试样在燃烧过程中热解前锋到达试样顶端前火蔓延速度和热解前锋位置随时间的变化如图 3 所示。由图可以看出, 试样 RPUF 在 15 s 后出现加速蔓延的现象[图 3(a)]; RPUF/EG5 的火蔓延速度存在阶段性加速[图 3(b)]; 而 RPUF/AHP5 以较慢的速度向上蔓延一段距离, 火焰被烟气吹到试样顶端后迅速熄灭[图 3(d)]; RPUF/EG10 火蔓延速度最小, 在燃烧初始阶段火

蔓延速度逐渐增加, 达到最大值后逐渐减小[图 3(c)]; RPUF/ADP5 在燃烧行为发生 20 s 内, 火焰以较快的速度蔓延, 而后速度逐渐降低[图 3(e)]。这主要由于火蔓延过程中存在贴壁效应, 使火蔓延速度变化较大<sup>[10]</sup>。平均火蔓延速度大小为 RPUF>RPUF/EG5>RPUF/ADP5>RPUF/AHP5>RPUF/EG10。

垂直火蔓延过程中的火焰高度如图 4 所示。可以看出, 火焰高度由热解段和预热段的长度组成, 热解前锋为其两个阶段的分界点。

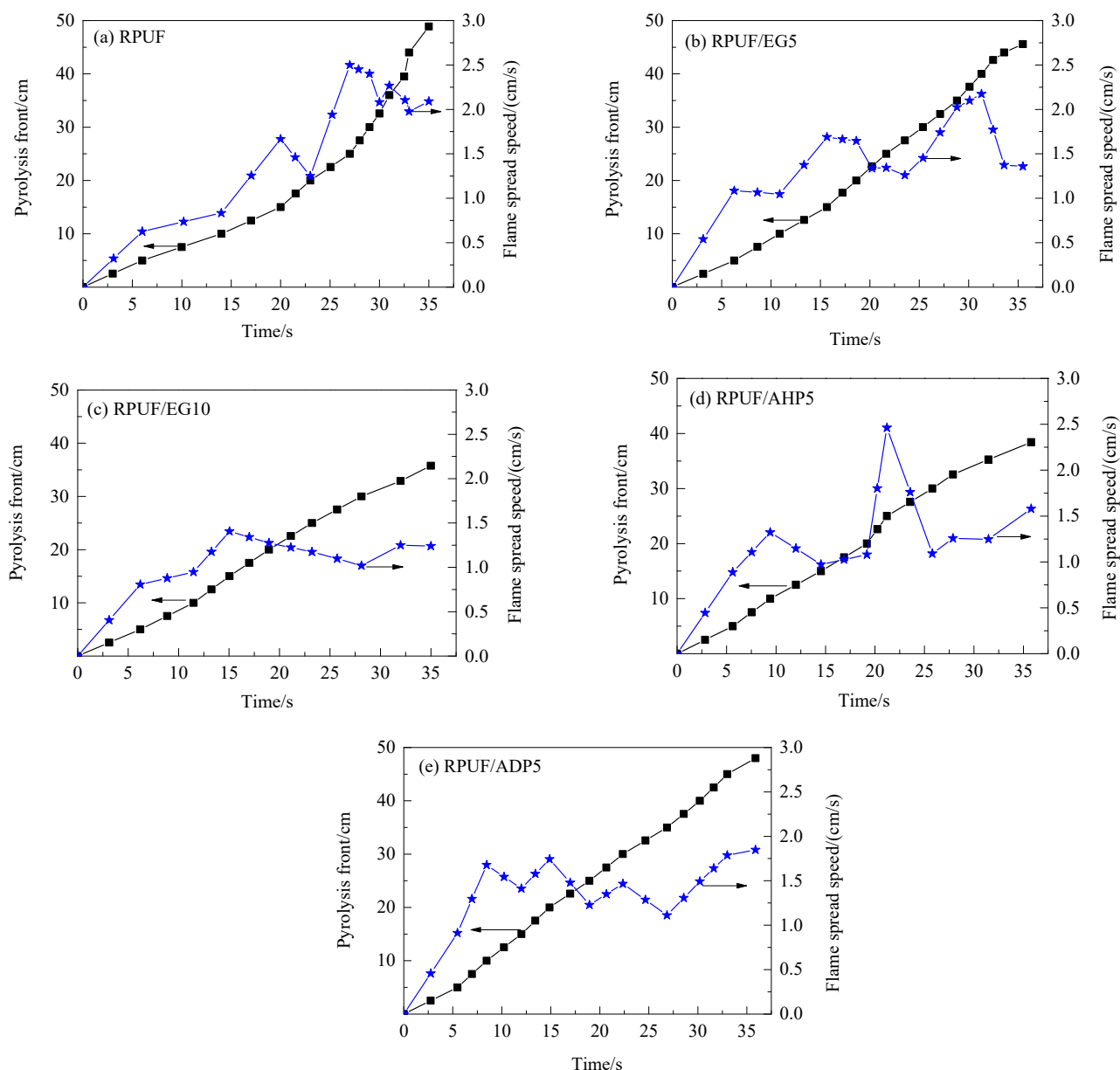


图 3 5 种聚氨酯试样热解前锋位置和火蔓延速度随时间的变化  
Fig.3 Changes of pyrolysis front position and flame spread speed of five polyurethane samples with time



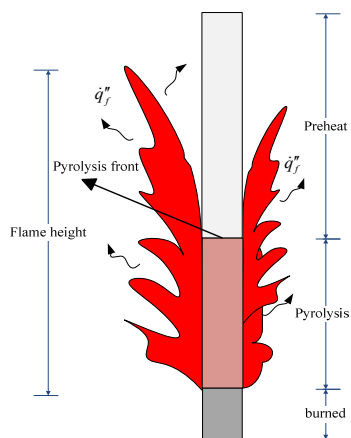


图4 试样竖直双面燃烧火焰形态示意图

Fig.4 Schematic diagram of the vertical double-sided combustion of sample

图5为5种硬质聚氨酯材料火蔓延过程中火焰高度随时间的变化。5种聚氨酯试样在火蔓延过程中均存在发展阶段、稳定阶段和衰减阶段。其火焰高度与燃烧的剧烈程度变化规律一致。随着阻燃剂的添加,火焰高度在稳定阶段降低非常明显。而不同阻燃剂之间对火焰高度的影响,在本次实验中不是很明显。

### 3.3 质量损失速率

图6为5种聚氨酯试样火蔓延过程中的质量损失。其质量变化量的大小顺序为 RPUF>RPUF/EG5>RPUF/EG10>RPUF/ADP5>RPUF/AHP5。这主要是由于阻燃剂的添加降低了可燃材料聚氨酯的比例,与此同时,不同阻燃剂对其燃烧抑制的机理不同,使材料燃烧

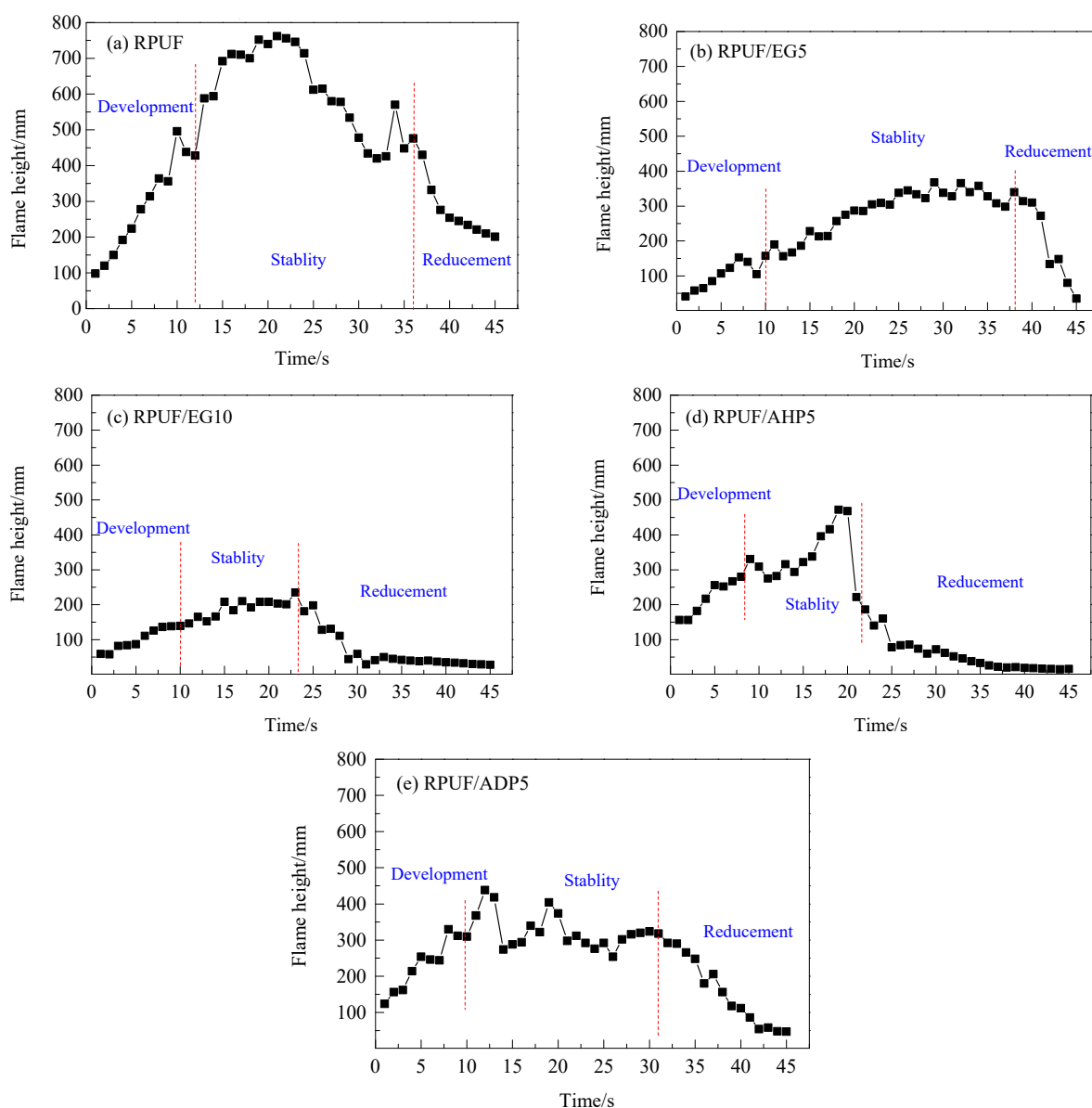


图5 5种聚氨酯试样火蔓延过程中火焰高度随时间的变化

Fig.5 Flame height changes with time during flame spread of five polyurethane samples

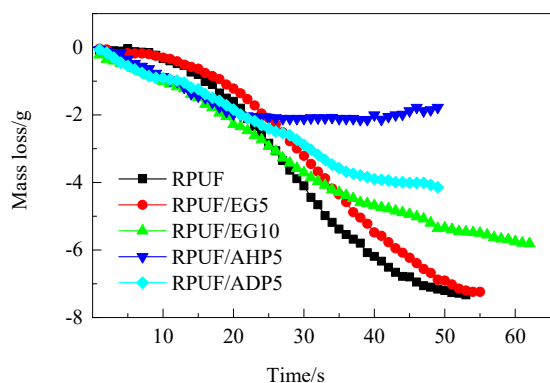


图 6 5 种聚氨酯试样火蔓延过程中的质量损失  
Fig.6 Mass loss during flame spread of five polyurethane samples

的持续时间及材料的燃烧深度等参数均不同, 最终导致了质量变化的不同。其变化特性与 3.1 节中燃烧的剧烈程度的变化一致, 可反映燃烧过程中质量变化的大小。

5 种聚氨酯试样火蔓延过程中质量损失速率如图 7 所示。由图可知, 发展阶段试样燃烧相对稳定, 随着火焰向上蔓延, 质量损失速率逐渐增大, 当热解前锋到达试样顶端时质量损失速率达最大值, 随后 RPUF 与 RPUF/EG5 试样质量损失速率逐渐减小, 而 RPUF/EG10 和 RPUF/AHP5 的质量损失速率在较短时间内迅速减小。出现该现象的原因一方面是热解前锋到达试样顶端后维持燃烧所需的燃料减少, 另一方面是加入阻燃剂的硬质聚氨酯泡沫燃烧产生大量不可燃气体, 与周围空气

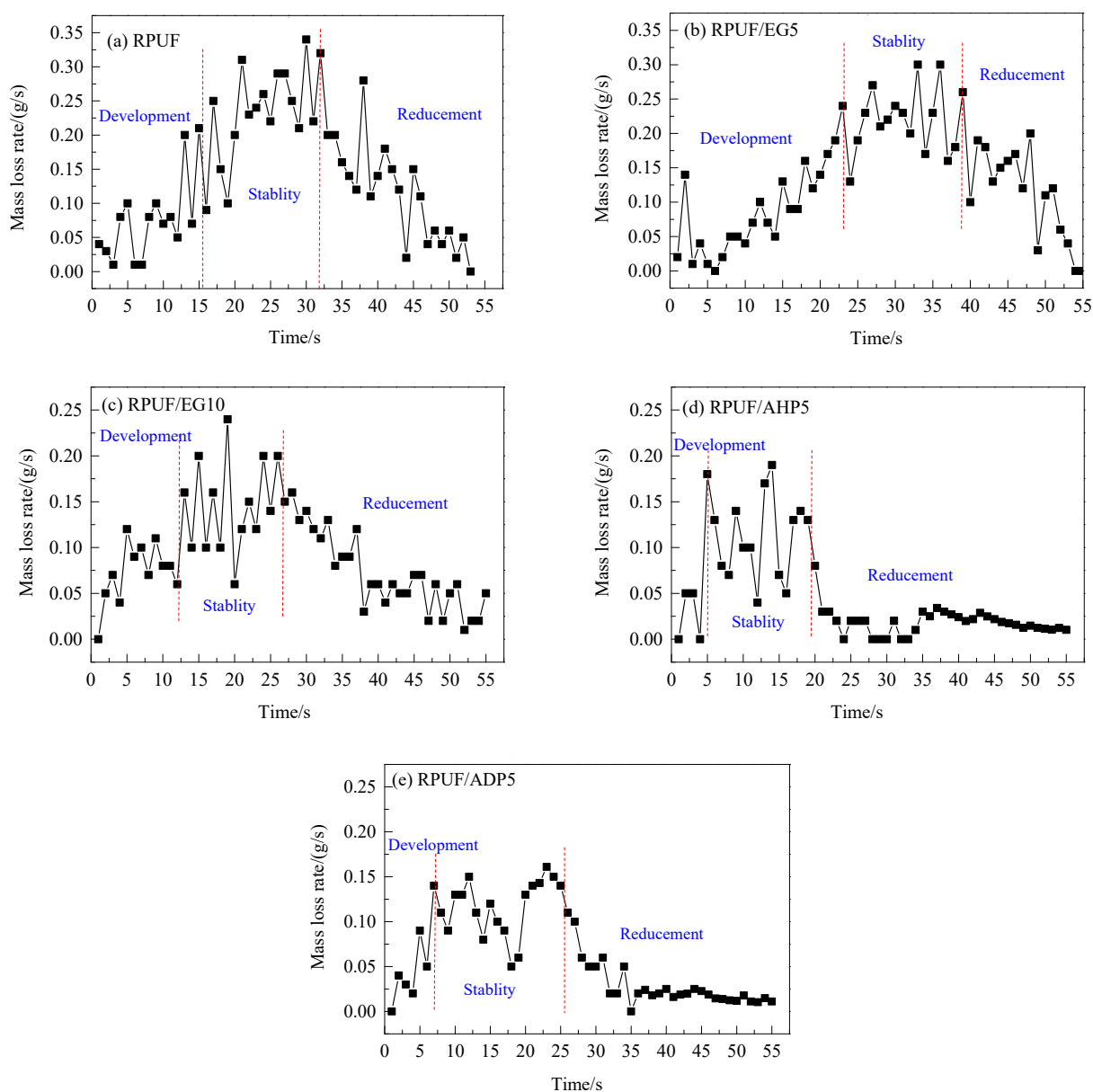


图 7 5 种聚氨酯试样火蔓延过程中的质量损失速率  
Fig.7 Mass loss rates during flame spread of five polyurethane samples

混合后降低了卷吸空气的氧气浓度,当氧气浓度降到某一临界值时火焰迅速熄灭。

质量损失速率分为3个阶段,即发展阶段、稳定阶段和衰减阶段。对应于稳定阶段的质量损失速率,有若干个质量损失速率峰值组成,主要由于受到火蔓延过程中火焰高度的变化,即存在稳定阶段所造成的。火焰高度在稳定阶段存在一定波动,导致形成若干个质量损失速率峰值。试样在稳定阶段的质量损失情况,很大程度上决定了最终的质量变化量。RPUF和RPUF/EG5在稳定阶段的质量损失速率及时间跨度均明显大于其他试样,结合图6可知其质量变化量明显高于其他试样。

### 3.4 火焰温度

热电偶测量的试样表面温度及烟气羽流温度随时间的变化如图8所示,分别测定了5种聚氨酯试样表面及距试样表面1.5和3 cm处的温度值。由图可知,试样表面及烟气羽流温度均随火蔓延时间先增大后减小。由图8(b)可知,试样RPUF/EG5火蔓延过程中表面温度存在两个峰值,原因是其燃烧过程中不断在表面生成炭层,一定程度上炭层可减缓热量向材料内部传递,但相对于RPUF/EG10,RPUF/EG5加入的阻燃剂的量较少,生成的炭层不稳定,在外加热流的作用下仍能发生氧化燃烧,当温度高于400℃时炭层氧化分解速度加快,被迅速氧化,随后变薄出现裂纹,最终热量穿透炭层使内部未燃样品迅速热解燃烧,生成温度的第二个峰值<sup>[11]</sup>。

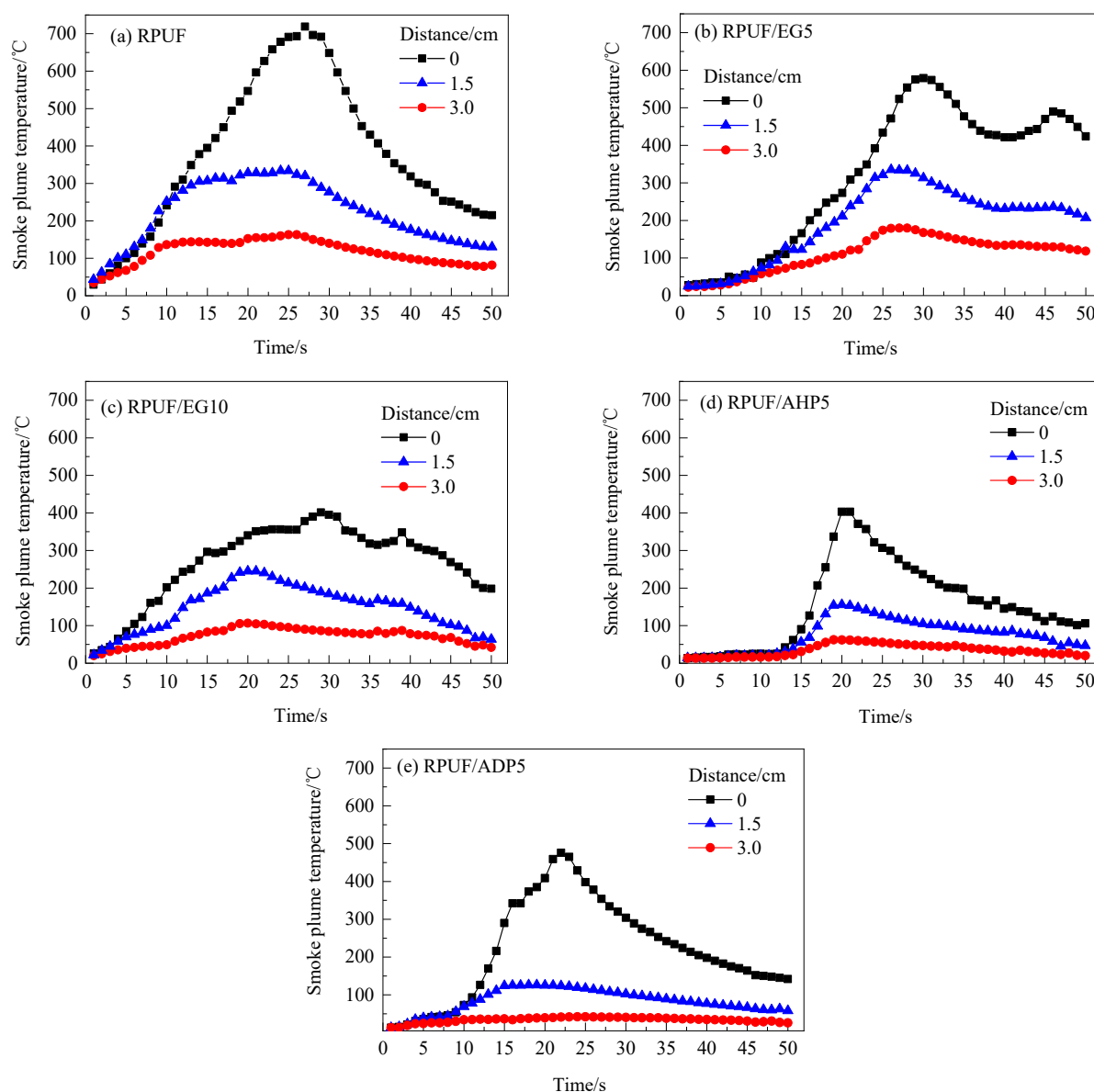


图8 5种聚氨酯试样火蔓延过程中表面及烟气羽流温度随时间的变化

Fig.8 Changes of surface and smoke plume temperatures of five polyurethane samples with time during flame spread



对比加入磷系阻燃剂的 RPUF/AHP5 和 RPUF/ADP5 可以发现, 两种试样烟气羽流温度均较低, 且距试样表面 3 cm 处温度约为 50℃。其原因一方面是火焰的贴壁效应, 火焰横向发展受限; 另一方面是次磷酸盐在高温情况下受热分解生成难燃的磷酸盐固体, 阻燃剂中含有的  $\text{Al}^{3+}$  促进材料反应生成焦炭, 炭层阻止了试样内部氧和热传递, 加剧试样表面向上火焰的贴壁效应, 限制了火焰向四周扩展, 从而使试样表面温度高而距离试样表面越远处温度越低。通过对比温度大小及持续时间可知, 5 种试样最高火焰温度为表面 0 cm 处, 其大小为  $\text{RPUF} > \text{RPUF/EG5} > \text{RPUF/ADP5} > \text{RPUF/AHP5} > \text{RPUF/EG10}$ 。这从另一方面反映出材料的燃烧剧烈程度。

## 4 结论

对 5 种阻燃及非阻燃型硬质聚氨酯试样, 在垂直方向上进行中小尺寸燃烧特性实验, 研究了添加不同阻燃剂对聚氨酯泡沫火蔓延特性的影响, 得到以下结论:

(1) 通过对垂直火蔓延形态进行观察, 5 种试样的燃烧强烈程度大小为  $\text{RPUF} > \text{RPUF/EG5} > \text{RPUF/EG10} > \text{RPUF/ADP5} > \text{RPUF/AHP5}$ 。

(2) 材料垂直火蔓延过程中, 质量变化量大小如下  $\text{RPUF} > \text{RPUF/EG5} > \text{RPUF/EG10} > \text{RPUF/ADP5} > \text{RPUF/AHP5}$ 。这从另一方面证实了燃烧的剧烈程度。

(3) 阻燃添加剂的加入可抑制火蔓延速度, 其平均火蔓延速度为  $\text{RPUF} > \text{RPUF/EG5} > \text{RPUF/ADP5} > \text{RPUF/AHP5} > \text{RPUF/EG10}$ 。

## 参考文献

- [1] Chen X L, Ma C Y, Jiao C M. Enhancement of flame-retardant performance of thermoplastic polyurethane with the incorporation of aluminum hypophosphite and iron-graphene [J]. *Polymer Degradation & Stability*, 2016, 129: 275–285.
- [2] 姜浩浩, 刘新亮, 邹勇, 等. 硬质聚氨酯泡沫/聚磷酸铵复合材料的制备及阻燃性能研究 [J]. *塑料工业*, 2019, 47(1): 89–93.  
Jiang H H, Lin X L, Zou Y, et al. Preparation and flame retardant properties of rigid polyurethane foam/ammonium polyphosphate composites [J]. *Plastic Industry*, 2019, 47(1): 89–93.
- [3] 张淼, 李迎春, 孔宇飞, 等. EG 阻燃热固性聚苯乙烯泡沫保温板的性能 [J]. *工程塑料应用*, 2017, 45(6): 42–45.  
Zhang M, Li Y C, Kong Y F, et al. Performances of thermosetting polystyrene foam thermal insulation board retardanted by EG [J]. *Engineering Plastics Application*, 2017, 45(6): 42–45.
- [4] 冯古雨, 曹海建, 张坤, 等. 可膨胀石墨对环氧树脂的阻燃改性 [J]. *材料科学与工程学报*, 2016, 34(5): 772–775.  
Feng G Y, Cao H J, Zhang K, et al. Flame retardation of epoxy resin with expansible graphite [J]. *Journal of Materials Science and Engineering*, 2016, 34(5): 772–775.
- [5] 高明, 任学军, 王昊, 等. 复合型阻燃剂处理硬质聚氨酯的燃烧特性 [J]. *华北科技学院学报*, 2015, (5): 103–106.  
Gao M, Ren X J, Wang H, et al. Combustibility of the rigid polyurethane foam treated with the composite flame retardant [J]. *Journal of North China Institute of Science and Technology*, 2015, (5): 103–106.
- [6] 杨旭峰, 曹阳, 张伟伟, 等. 次磷酸铝阻燃剂的合成及应用 [J]. *精细化工*, 2014, 31(1): 99–102.  
Yang X F, Cao Y, Zhang W W, et al. Synthesis and applications of aluminium hypophosphite flame retardant [J]. *Fine Chemicals*, 2014, 31(1): 99–102.
- [7] Jia D K, Hu J, He J Y, et al. Properties of a novel inherently flame-retardant rigid polyurethane foam composite bearing imide and oxazolidinone [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2019, 136(37): 47943.
- [8] Tabatabaei F, Khorasani M, Ebrahimi M, et al. Synthesis and comprehensive study on industrially relevant flame retardant waterborne polyurethanes based on phosphorus chemistry [J]. *Progress in Organic Coatings*, 2019, 131: 397–406.
- [9] Braun U, Balabanovich A I, Schartel B, et al. Influence of the oxidation state of phosphorus on the decomposition and fire behavior of flame-retarded epoxy resin composites [J]. *Polymer*, 2006, 47(26): 8495–8508.
- [10] 黄新杰, 刘伟, 陈功建, 等. 不同放置角度的建筑装饰材料 PMMA 的火焰蔓延特性 [J]. *过程工程学报*, 2018, 18(3): 454–460.  
Huang X J, Liu W, Chen G J, et al. Flame spread characteristics over building decoration material of PMMA with different placed angles [J]. *The Chinese Journal of Process Engineering*, 2018, 18(3): 454–460.
- [11] 亓延军. 常用有机外墙外保温系统火灾特性研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2012: 94.  
Qi Y J. Fire properties of commonly used organic exterior insulation systems [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2012: 94.