

自流平饰面防火聚苯乙烯板烟气产生规律研究

于水军^{1,2,3} 杨岱霖¹ 魏月贝¹ 谢高超¹

(1.河南理工大学安全科学与工程学院,焦作 454003;2.煤炭安全生产河南省协同创新中心,焦作 454003;
3.河南省煤矿瓦斯与火灾防治重点实验室,焦作 454003)

摘要 聚苯乙烯板作为建筑外墙外保温系统的核心材料,发生火灾时火焰蔓延速度快,容易产生大量有毒烟气,影响建筑火灾安全。以 α 石膏和粉煤灰作为自流平砂浆基材,加入不同掺量的氢氧化镁阻燃剂,研究自流平饰面防火聚苯乙烯板的烟气产生规律。结果表明,涂覆自流平砂浆的聚苯乙烯板燃烧级别均能达到V-0级,平均烟密度最大值比聚苯乙烯板低4~13倍,烟密度峰值到达时间延长60~120s,并有效降低CO的浓度;氢氧化镁的加入可以降低饰面层中产生的SO₂浓度,随着氢氧化镁含量的增加,饰面层阻燃和抑烟效果更佳;水胶比为0.30,砂胶比为0.50,粉煤灰取代率为30%,减水剂掺量为0.2%,氢氧化镁掺量为10%的饰面层阻燃和抑烟性能最好。

关键词 聚苯乙烯板,火灾安全,烟气规律,烟密度,阻燃性能

中图分类号 TQ328.4;TU545

文献标识码 A

文章编号 1006-3536(2020)07-0184-

04

DOI:10.19817/j.cnki.issn 1006-3536.2020.07.042

Study on the law of smoke generation from self-leveling fireproof PS board

Yu Shuijun^{1,2,3} Yang Dailin¹ Wei Yuebei¹ Xie Gaochao¹

(1.School of Safety Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003;
2.Coal Production Safety Collaborative Innovation Center in Henan Province, Jiaozuo 454003;
3.Henan Province Key Laboratory of Prevention and Curve of Methane & Fires, Jiaozuo 454003)

Abstract Polystyrene(PS) board is the core material of building exterior insulation system. When fire occurs, the flame spreads quickly, and it is easy to produce a large amount of toxic fumes, which affected the fire safety of building. Gypsum and fly ash were used as self-leveling mortar base materials, and different amounts of magnesium hydroxide flame retardant were added to study the smoke generation law of self-leveling fireproof PS board. The results shown that the burning grade of PS board coated with self-leveling mortar can reach V-0 level, the average smoke density was 4~13 times lower than that of PS board, and the peak value of smoke density was extended by 60~120s, and effectively reduced the concentration of CO, magnesium hydroxide can reduce the surface layer of SO₂ concentration. With the increase of magnesium hydroxide content, the flame retardant and smoke suppression effect of the veneer layer was better. The water-to-binder ratio was 0.30, the sand-to-binder ratio was 0.50, and the fly ash substitution rate was 30%. The decorative layer with a water reducing agent content of 0.2% and a magnesium hydroxide content of 10% had the best flame retardant and smoke suppressing properties.

Key words polystyrene board, fire safety, smoke law, smoke density, flame retardant

随着全球经济的快速发展,传统能源日益枯竭,推行节能减排势在必行^[1]。在建筑能耗中,发展建筑外墙保温技术已成为建筑节能技术的重点^[2]。聚苯乙烯泡沫板(EPS)作为建筑外墙外保温系统的核心材料,具有轻质、保温性能优良且导热系数低的特点。然而,其氧指数偏低,燃烧热值高,遇火易燃烧并释放大量有毒烟气^[3],因此需要对聚苯乙烯板进行阻燃处理。国内外对聚苯乙烯板的阻燃处理主要

通过聚合阻燃^[4]、浸渍阻燃^[5]、包覆阻燃^[6]和后处理涂层阻燃^[7]等方式。自流平砂浆饰面层作为非膨胀型防火涂层的一种,相较于其他阻燃方式,具有隔热、隔绝空气、不产生有毒气体、推迟点燃时间及延缓燃烧速率等特点^[8],且不影响聚苯乙烯材料性能;石膏本身具有防火性能优良、质轻及收缩裂缝少等优点^[9],且粘结性强^[10],作为饰面层基材可以解决传统防火涂层易脱落的问题。向自流平砂浆中添加

基金项目 国家重点研发计划(2018YFC0807900);教育部长江学者和创新团队发展计划项目(IRT0618)

作者简介 于水军(1962-),男,教授,研究方向为建筑节能新材料和燃烧理论与火灾科学。

氢氧化镁阻燃剂,可以提高材料整体的阻燃和抑烟效果^[11-12]。

已有的研究主要集中在聚苯乙烯板改性后的阻燃性能和力学性能上,对材料燃烧产烟特性研究较少。本研究以 α 石膏和粉煤灰作为自流平砂浆基材,加入不同掺量的氢氧化镁阻燃剂,研究自流平饰面防火聚苯乙烯板的烟气产生规律,为聚苯乙烯板的阻燃抑烟处理提供依据,也为资源化利用粉煤灰和盐石膏等废渣提供新途径。

1 实验部分

1.1 原料与仪器

聚苯乙烯板,河南某泡沫塑料公司提供; α 石膏,濮阳某建材公司生产,以废渣盐石膏为原料制成,主要成分为 $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$;粉煤灰,焦作电力集团公司提供;骨料,粒径为 80~140 目的石英砂;聚羧酸减水剂,焦作某建材公司提供;氢氧化镁,河南某阻燃材料公司提供。

水平垂直燃烧测试仪(SCZ-3 型),南京上元分析仪器有限公司;建筑材料燃烧烟密度试验机(XU8228 型),郑州希欧仪器厂生产;燃烧分析仪(M-9000 型),上海英盛分析仪器有限公司。

1.2 实验样板的制备

通过前期正交试验选出流动性、表面硬度和抗折、抗拉强度优良的砂浆配合比,最优配合比为:水胶质量比为 0.30,砂胶质量比为 0.50,粉煤灰取代率为 30%,减水剂掺量的质量分数为 0.2%。采用自流平的工艺把砂浆涂覆在聚苯乙烯板上,记为 EPS-1;在这配比的基础上分别加入 8%、10% 和 12% 掺量的氢氧化镁,制成砂浆后涂覆在聚苯乙烯板上,分别记为 EPS-2、EPS-3 和 EPS-4;普通聚苯乙烯板作为对照组,记为 EPS-0。聚苯乙烯板涂覆石膏基自流平砂浆后,在温度 $(23 \pm 5)^\circ\text{C}$ 、湿度 $(50 \pm 5)\%$ 条件下养护至恒重(相邻 24h 两次称量差不超过 0.5%)。

1.3 测试方法

UL-94 垂直燃烧测试:采用 SCZ-3 型水平垂直燃烧测试仪,按照 GB/T 8333—2008 规定的实验方法进行试验,试样尺寸 $250\text{mm} \times 20\text{mm} \times 20\text{mm}$ 。烟密度测试:采用 XU8228 型建筑材料燃烧烟密度试验机,按照 GB 8627—2007 规定的实验方法进行试验,样品尺寸为 $80\text{mm} \times 80\text{mm} \times 6\text{mm}$,每种样品重复测 3 次,分别求其平均烟密度。燃烧烟气密度测定:采用 M-9000 型燃烧分析仪,在密闭燃烧箱进

行燃烧测试,用分析仪采集烟气密度数据,样品尺寸为 $80\text{mm} \times 80\text{mm} \times 6\text{mm}$ 。

2 结果与讨论

2.1 自流平砂浆饰面层对聚苯乙烯板燃烧性能的影响

在 UL-94 垂直燃烧测试中发现,EPS-0 在点燃后迅速燃烧,火焰为橙红色,并伴有大量浓黑烟和熔融滴落现象,融滴为燃烧状态。表 1 为聚苯乙烯板阻燃处理前后的 UL-94 测试结果,由表 1 可见,自流平饰面防火聚苯乙烯板的燃烧级别均能到达 V-0 级,燃烧时没有熔融滴落产生,燃烧后均有黑色碳渣残留。除了 EPS-1 有微量黑烟,EPS-2、EPS-3 和 EPS-4 均无黑烟释放。撤离火焰后,阻燃饰面层表面有微小裂纹产生,表面有气孔破裂痕迹,这主要是由石膏的微孔结构和加热脱水性,以及粉煤灰的疏松多孔性造成的。在点燃过程中,聚苯乙烯板热分解的速度由快到慢依次为 $\text{EPS-0} > \text{EPS-1} > \text{EPS-2} > \text{EPS-3} > \text{EPS-4}$ 。以上实验结果表明,加入氢氧化镁阻燃剂后,聚苯乙烯板的阻燃效果更佳。

表 1 聚苯乙烯板阻燃处理前后的 UL-94 测试结果

编号	UL-94 燃烧等级	融滴状况	烟雾释放
EPS-0	NO-rating	Yes	浓黑烟
EPS-1	V-0	No	微量黑烟
EPS-2	V-0	No	无
EPS-3	V-0	No	无
EPS-4	V-0	No	无

2.2 自流平砂浆饰面层对聚苯乙烯板产烟特性的影响

聚苯乙烯约在 300°C 下,首先脱氢,接着 C—C 键裂解形成链端碳自由基,自由基随后逐步消除苯乙烯单体,直到聚合物分子链完全降解,或者自由基被终止^[13]。图 1 为聚苯乙烯板烟密度实验曲线,由图可知,EPS-0 遇火迅速受热分解,产生大量烟气,在约 60s 时烟密度达到最高值 67%,随着时间的推移,烟密度逐渐降低。图 2 为自流平饰面防火聚苯乙烯板烟密度实验曲线,由图可知,对聚苯乙烯板进行阻燃处理能有效地降低燃烧时的烟气产生量,EPS-1 的整体变化趋势和 EPS-0 相同。不同点在于,EPS-1 的烟密度的峰值较低,且烟密度峰值到达时间从 60s 推迟到了 105s。说明饰面层能够有效降低烟密度和推迟峰值到达时间,这是由于饰面层中的二水石膏可吸收大量的热量,失去结晶水变成半水石膏,并且生成水蒸汽形成窒息层,稀释氧气浓

度,从而延缓聚苯乙烯的热分解。

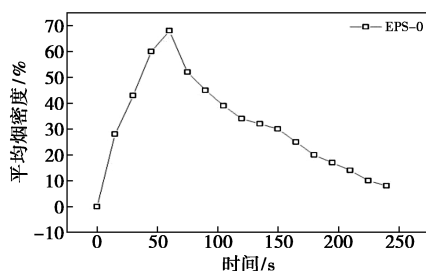


图 1 聚苯乙烯板烟密度实验曲线

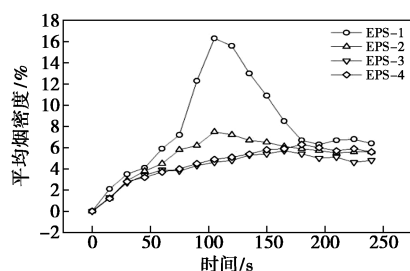


图 2 自流平饰面防火聚苯乙烯板烟密度实验曲线

由图 2 还可以看出, EPS-2 和 EPS-1 相比, 由于加入了 8% 的氢氧化镁, 烟密度从 16 降到 7.5。EPS-3 和 EPS-4 的整体趋势相同, 整体烟密度比 EPS-1 均降低, 且峰值到达时间均延迟。从整体上看, 尽管 EPS-4 的峰值到达时间较 EPS-3 长, 但 EPS-3 的整体烟密度较 EPS-4 低。结合图 1 和图 2, 可得出抑烟能力由大到小为: $\text{EPS-3} > \text{EPS-4} > \text{EPS-2} > \text{EPS-1} > \text{EPS-0}$ 。分析其原因: 氢氧化镁具有较高的热稳定性与分解反应热, 当混有氢氧化镁的浆体层与火焰接触时, 氢氧化镁发生分解反应失去化合水而吸收大量的热^[14], 从而延缓聚苯乙烯板的分解, 推迟烟密度峰值到达时间; 氢氧化镁分解释放出的水汽还能稀释材料表面的氧气浓度, 同时分解生成的 MgO 也是良好的耐火材料, 能在材料表面形成炭层, 阻隔内层聚苯板与氧化高温环境的接触^[15]。

2.3 自流平砂浆饰面层对聚苯乙烯板燃烧烟气成分的影响

在实际火灾中, 有毒烟气是人员伤亡的主要原因之一^[16]。因此, 本研究选取材料燃烧产生的有毒烟气中较有代表性的 CO 和 SO₂ 进行研究。聚苯乙烯燃烧不产生 SO₂, 饰面层中粉煤灰的加入可以降低成本, 但是阻燃处理后的聚苯乙烯板燃烧会产生 SO₂。聚苯乙烯板阻燃处理前后的 CO、SO₂ 的体积分数随时间变化如图 3 和图 4 所示。

从图 1 可知, EPS-0 在 60s 时烟密度达到峰值, 而图 3 表明, EPS-0 的 CO 浓度在 80s 才达到峰值。

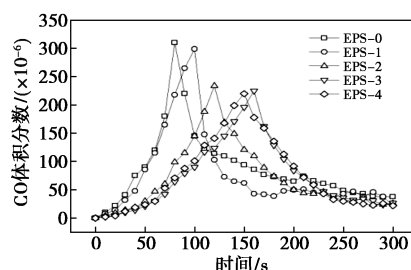


图 3 燃烧烟气 CO 体积分数变化曲线

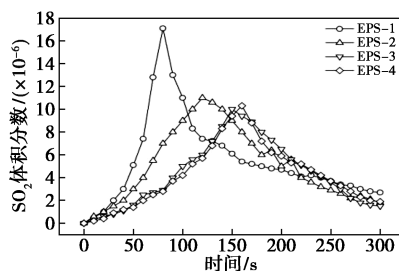


图 4 燃烧烟气 SO₂ 体积分数变化曲线

原因是聚苯乙烯板在轰燃之前产生的 CO 在氧气足够的情况下会反应生成 CO₂, 轰燃结束之后从完全燃烧开始转变为不完全燃烧, 而不完全燃烧会继续产生 CO。

由图 4 可见, EPS-1、EPS-2、EPS-3 和 EPS-4 的 CO 和 SO₂ 的体积分数随时间变化的整体趋势相同, 不同在于 EPS-2、EPS-3 和 EPS-4 的峰值较 EPS-1 小, 到达峰值时间均比 EPS-1 长。前者的原因是氢氧化镁和石膏水蒸汽形成窒息层, 稀释氧气浓度, 从而使 CO 峰值到来时间延迟; 后者则是由于氢氧化镁中和酸性物质能力强, 可较快地中和饰面层产生的酸性气体 SO₂。

综合 UL94、烟密度以及燃烧烟气的实验结果可见, 随着氢氧化镁掺量的增加, 聚苯乙烯板的阻燃和抑烟性能更佳; 当氢氧化镁掺量达到 12%, 阻燃和抑烟性能相比 10% 掺量的氢氧化镁变化不大, 甚至有所降低, 因此氢氧化镁最佳掺量为 10%。这是因为起到充填作用的粉煤灰和氢氧化镁的质量分数增加, 起连接作用的石膏体量减少, 导致材料粘结不紧密, 力学性能降低, 使燃烧过程中饰面层的裂纹变大, 聚苯乙烯板直接受热的区域增大, 从而影响饰面层的阻燃和抑烟性能。

3 结论

(1) 涂覆自流平砂浆的聚苯乙烯板在垂直燃烧测试中燃烧级别均能到达 V-0 级, 并可延缓内层聚苯乙烯板的分解。

(2) 在烟密度测试中, 自流平砂浆饰面层能有效

抑制烟气的产生,其平均烟密度最大值比聚苯乙烯板低4~13倍,烟密度峰值到达时间延长60~120s。

(3)燃烧烟气测试表明,饰面层能降低CO浓度3%~29%,并延长CO峰值到达时间20~100s,氢氧化镁可以降低饰面层产生SO₂的浓度;随着氢氧化镁掺量的增加,阻燃和抑烟效果更佳,氢氧化镁的临界掺量为10%。

(4)自流平砂浆的最佳配比为:水胶比为0.30,砂胶比为0.50,粉煤灰取代率为30%,减水剂掺量为0.2%,氢氧化镁掺量为10%。

参考文献

- [1] Zhao Z, Chang R, Zillante G. Challenges for China's energy conservation and emission reduction[J]. *Energy Policy*, 2014, 74:709-713.
- [2] Yuan J, Farnham C, Emura K. Optimal combination of thermal resistance of insulation materials and primary fuel sources for six climate zones of Japan[J]. *Energy and Buildings*, 2017, 153:403-411.
- [3] 吕子安,连晨舟,季春生,等.火灾中材料产烟毒性的分析[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2004(2):278-281.
- [4] Khanal S, Zhang W, Ahmed S, et al. Effects of intumescent flame retardant system consisting of tris (2-hydroxyethyl) isocyanurate and ammonium polyphosphate on the flame retardant properties of high-density polyethylene composites [J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2018, 112:444-451.
- [5] Hamdani-Devarenes S, El Hage R, Dumazert L, et al. Water-based flame retardant coating using nano-boehmite for expanded polystyrene (EPS) foam [J]. *Progress in Organic*

Coatings, 2016, 99:32-46.

- [6] 于水军,陈亮,魏月贝.无机包覆聚苯乙烯泡沫板烟气产生规律研究[J]. *安全与环境学报*, 2018(2):523-526.
- [7] Fang Y, Cui P, Ding Z, et al. Properties of a magnesium phosphate cement-based fire-retardant coating containing glass fiber or glass fiber powder[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 162:553-560.
- [8] 李博,卢明超.防火涂料阻燃/抑烟技术的研究现状及进展[J]. *化工新型材料*, 2018(4):227-229.
- [9] 于水军,魏月贝,杨岱霖.基于正交试验的粉煤灰石膏基自流平砂浆性能研究[J]. *硅酸盐通报*, 2018(10):3217-3222.
- [10] Yang L, Zhang Y, Yan Y. Utilization of original phosphogypsum as raw material for the preparation of self-leveling mortar[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 127:204-213.
- [11] Lu Y, Wu C, Xu S. Mechanical, thermal and flame retardant properties of magnesium hydroxide filled poly(vinyl chloride) composites; the effect of filler shape[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2018, 113:1-11.
- [12] Yew M C, Ramli Sulong N H, Yew M K, et al. Influences of flame-retardant fillers on fire protection and mechanical properties of intumescent coatings[J]. *Progress in Organic Coatings*, 2015, 78:59-66.
- [13] 邓小波,于广和.绝热用模塑聚苯乙烯泡沫塑料燃烧特点分析[J]. *化工新型材料*, 2013(11):183-184.
- [14] Tang H, Zhou X, Liu X. Effect of magnesium hydroxide on the flame retardant properties of unsaturated polyester resin[J]. *Procedia Engineering*, 2013, 52:336-341.
- [15] 黄雅妮.氢氧化镁无机阻燃剂的改性研究进展[J]. *材料导报*, 2014(S1):364-367.
- [16] 杨森,邓小波,刘建志,等.外墙外保温用模塑聚苯乙烯泡沫塑料熔融滴落物燃烧特性分析[J]. *化工新型材料*, 2014(10):89-91.

收稿日期:2019-03-13

修回日期:2020-05-04

(上接第183页)

3 结论

(1)由4种异氰酸酯制备的单组分聚脲中,MDI型活性最大,但易产生气泡,其次是TDI型,HMDI型和IPDI型反应活性较小;拉伸强度大小顺序为HMDI型>IPDI型>TDI型>MDI;断裂伸长率大小顺序为MDI型>IPDI型>TDI型>HMDI型;而硬度大小顺序为MDI型>HMDI型>IPDI型>TDI型,吸水率大小顺序为TDI型>IPDI型>MDI型>HMDI型。

(2)MDI型和TDI型单组分聚脲的耐热性能较佳,但MDI型单组分聚脲膜表面有大量气泡缺陷影响力学性能,综合比较,TDI型单组分聚脲的性能较佳。

参考文献

- [1] 张荣.新型材料SK单组分聚脲在引大渡槽中的应用[J]. *农业*

科技与信息, 2017(22):116-118.

- [2] 廖有为.单组分聚脲(脲)弹性体涂层研制及其表面保护性能研究[D].北京:机械科学研究总院,2011.
- [3] 李波,冉千平,孙德文,等.不同潜固化型单组分聚脲密封胶制备及其性能研究[J]. *中国建筑防水*, 2014(21):37-40.
- [4] 卞雷雷,赵栋,吴达会.噻唑烷潜固化剂改性聚氨酯预聚体性能研究[J]. *聚氨酯工业*, 2010, 25(2):21-24.
- [5] 陈红,谭春斌,高峻,等.多官能度噻唑烷的合成及其改性聚氨酯材料[J]. *高分子学报*, 2014(11):1465-1471.
- [6] 陈海良,张芳,陈伟.共混二异氰酸酯在聚氨酯弹性体中的应用[J]. *聚氨酯工业*, 2010, 25(4):32-35.
- [7] Kojio K, Mitsui Y, Furukawa M. Synthesis and properties of highly hydrophilic polyurethane based on diisocyanate with ether group[J]. *Polymer*, 2009, 50(15):3693-3697.
- [8] 刘丹,袁永朝,曹红宝.红外光谱法研究聚氨酯脲氢键[J]. *化学推进剂与高分子材料*, 2009, 7(6):60-63.
- [9] 王鹏,刘波,张成斌,等.HMDI型吸水膨胀聚氨酯弹性体的研制[J]. *化工新型材料*, 2017, 45(4):236-238.
- [10] 王珩,史玥,张杨,等.含氟丙烯酸改性水性聚氨酯的合成及性能研究[J]. *聚氨酯工业*, 2018, 33(4):30-33.

收稿日期:2019-03-25

修回日期:2020-04-28