

采用阻燃材料提高居民住宅火灾安全性的探讨

屈伟, 吴玉章

(中国林科院木材工业研究所; 中国林科院林业新技术研究所; 国家林业局木材科学与技术重点实验室, 北京 100091)

摘要: 阻燃材料可以从降低火灾载荷、降低烟气毒性和建立防火隔离等方面, 最大限度地降低火灾危害。针对居民住宅高层化、居住人口老龄化等新特点, 有目的、有目标地使用阻燃材料, 使居民住宅装修防火标准等同于公共场所, 将被动防火变为主动防火, 是减少住宅火灾和降低生命及财产损失的有效手段。

关键词: 住宅; 火灾; 阻燃材料; 火灾载荷; 烟气毒性

中图分类号: TS6; TU11 文献标识码: B 文章编号: 1001-8654 (2018) 03-0016-05

Applying Flame Retardant Materials to Improve Residential Fire Safety

QU Wei, WU Yu-zhang

(Research Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry (CAF); Research Institute of Forestry New Technology, CAF;

Key Lab of Wood Science and Technology of State Forestry Administration, Beijing 100091, China)

Abstract: Residential fire brings tremendous threats to human lives and property safety. New features occurred in residential fires like high-rising residential buildings, aged residents and so on. To apply flame retardant materials in residential buildings could be able to minimize fire hazards by decreasing fire load, reducing smoke toxicity and building fire isolation areas. The authors suggested that fire protection standards for residential buildings should be required as high as public buildings, and passive-proof ways should be changed into active-proof.

Key words: high-rise residential buildings; fire; flame retardant materials; fire load; smoke toxicity

居民住宅是人们生活、栖息的主要场所, 一旦发生火灾, 往往造成比较严重的人员伤亡和财产损失。资料显示: 2016年, 住宅火灾死亡的人数占火灾死亡总人数的80.2%, 远超厂房、仓储等其他场所。居民住宅火灾除了可燃物多、火势蔓延迅速、疏散困难等特点外, 还表现出一些新特点。

一是居民住宅高层化, 高温烟气形成“烟囱效

应”, 导致一户起火, 整栋受灾^[1]; 二是人口老龄化, 老年人普遍体弱、行动不便、记忆衰退, 既容易因用火用电不慎引发火灾事故, 又因逃生能力弱而易受伤, 逐渐成为居民住宅火灾中伤亡人员的主体^[2]。2007—2010年居民家庭火灾死亡人数中, 60岁以上老人占36.05%。

针对居民住宅火灾表现出的新特点, 必须科学地使用阻燃材料, 才能变被动防火为主动防火, 降低火灾载荷, 在火灾初期抑制火势蔓延, 增加逃生时间, 建立防火隔离区, 更有效地降低高层住宅火灾的串联风险。材料的研发和生产厂商, 也应开发和生产阻燃木质门、家具、地板等, 以提高居民住宅的防火安全性。

收稿日期: 2017-08-18; 修改日期: 2017-10-25

基金项目: 国家自然科学基金“以木质素为炭源的膨胀层品质的研究”(31570549); 国家自然科学基金“模拟火灾中阻燃木质材料的有害烟气成分及其毒性预测研究”(31170528)。

作者简介: 屈伟(1987—), 男, 中国林科院木材工业研究所助理研究员。

1 居民住宅火灾危险性分析

1.1 装饰装修及生活用品材料的燃烧行为

住宅室内装饰装修中使用易燃、可燃材料，是加快火势蔓延的主要原因，主要涉及家具、家电、及吊顶、墙面、地面装饰用材料，包括塑料、木质材料、植物纤维或人造纤维材料。这些材料大量填充到居室中，成为住宅火灾的重大隐患，一旦被引燃，会猛烈燃烧并迅速蔓延，产生大量有害成分的浓烟，是火灾现场人员窒息或中毒的主要原因^[3-6]。

锥形量热仪是评价材料燃烧性能的装置，在材料评价、材料设计和火灾预防等方面，其测试数据具有重要的参考价值，评价结果与大型燃烧实验结果之间存在良好的相关性，可模拟真实火灾环境^[7]。辐射强度 15~50 kW/m²，相当于中小规模的火灾^[8]；辐射强度 75 kW/m²，相当于室内火灾达到轰然阶段

的热辐射程度。

根据文献，室内装饰装修可燃易燃材料的锥形量热仪数据，列于表 1^[8-10]，其中塑料制品、实体木材、木质复合材料的辐射强度为 50 kW/m²；室内织物的辐射强度为 30 kW/m²。

1) 材料燃烧放热形成的热辐射是火灾危害表现之一，是造成火势扩大和蔓延的祸首。

热辐射对相邻材料构成加热源，使其热分解并燃烧，燃烧范围扩大，热量不断蓄积而形成高温，造成火势蔓延。因此，室内可燃材料的燃烧热值越高，数量越大，对火灾的危害越大；并且，热辐射形成的高温烟层气将造成人体直接烧伤。释热速率（HRR）是表征材料燃烧放热的指标。HRR 越大，表征单位面积材料燃烧释放的热量越多，热辐射能量越高，将导致火势扩大和蔓延。

表 1 室内装饰装修可燃易燃材料燃烧性能指标

Tab.1 Flammability of flammable and combustible materials used in indoor decorations

类别	材料名称	引燃时间 TTI/s	热释放速率HRR/(kW·m ⁻²)		有效燃烧热 EHC/(MJ·kg ⁻¹)	比消光面积 SEA/(m ² ·kg ⁻¹)	质量损失速率 MLR/(g·s ⁻¹)	CO产率 COY/(kg·kg ⁻¹)	CO ₂ 产率 CO ₂ Y/(kg·kg ⁻¹)
			平均	峰值/时间					
塑料	聚乙烯 (LDPE)	56	390.0	1 383/435	24.8	286	0.140	0.0144	1.61
	聚丙烯 (HDPP)	21	236.6	275.2/345	10.1	930	0.207	0.0555	0.64
	聚苯乙烯 (HIPS)	37	508.8	841/445	24.4	1 020	0.185	0.1060	0.80
	聚氯乙烯 (PVC)	74	128.7	150.8/420	6.1	919	0.186	0.0657	0.39
	丙烯腈-丁二烯-苯乙烯 (ABS)	48	173.2	240.1/565	9.4	1 761	0.206	0.1000	0.42
	聚酰胺 (PA66)	55	292.6	365.9/695	24.5	222	0.106	0.0134	1.78
	聚酯 (RG30W)	59	92.8	135.5/965	8.7	1 077	0.095	0.1552	0.74
	实体木材	杉木	10.4	84.9	198.6/15	13.8	61	0.065	-
杨木		11.0	94.5	187.7/183	11.8	43	0.096	-	-
马尾松		17.7	114.2	283.7/289	12.2	64	0.120	-	-
落叶松		26.3	99.3	212.7/28	11.3	34	0.079	-	-
樟子松		11.0	86.5	195.5/22	9.0	178	0.088	-	-
泡桐		13.5	92.5	196.4/18	12.5	22	0.064	-	-
辐射松		17.4	96.6	195.0/22	11.1	55	0.100	0.0200	1.75
木质复合材料	杨木胶合板	21.7	112.8	262.4/43	10.2	5	0.100	-	-
	桉木胶合板	17.6	83.5	217.6/898	11.9	11	0.030	0.0300	1.57
	中密度纤维板	28.4	118.9	244.9/41	11.1	6	0.093	-	-
	强化木地板	41.7	133.2	274.4/46	11.0	8	0.099	-	-
室内织物	棉布	10	16.40	166.54	-	-	0.012	-	-
	牛仔褲	20	24.17	225.75	-	-	0.014	-	-
	毛衣	26	20.95	317.03	-	-	0.020	-	-
	麻绳	17	14.94	191.56	-	-	0.010	-	-
	海绵	2	21.47	297.67	-	-	0.010	-	-

不同塑料的燃烧机理不同,在燃烧过程中释放的热量、发烟量以及毒性等具有各自特性。聚氯乙烯(PVC)在 25 kW/m^2 下不燃烧,但辐射强度提高到 50 kW/m^2 时,引燃时间(TTI)较长(74 s),且HRR较低(128.7 kW/m^2);聚乙烯(PE)、聚丙烯(PP)与聚苯乙烯(PS),引燃后形成较强烈的释热过程并持续较长时间,逐渐形成明显的释热峰(pkHRR)^[11]。表明PE、PP、PS等材料均有较高的HRR值,一旦燃烧,放热较快较多,为火势扩大和蔓延提供充足热能,使火灾的危害程度进一步加大。

实体木材和木质复合材料的TTI较短,热释放速率和峰值降低。这主要是由于生物质材料的热稳定性差,受热后易分解,所以引燃时间较短。材料引燃后即发生脱水炭化过程,是一个强烈的放热过程,火势增强,多数材料的pkHRR就发生在引燃后。

脱水炭化结束后,会在燃烧物表面形成炭化层,炭化层具有隔热隔氧作用,使释热速率降低,并以较低速率维持燃烧过程。因此,对木质材料而言,抑制引燃更具现实意义。

2) 材料燃烧释放的烟气是火灾危害表现之二。

包括:① 毒性,人员吸入大量的烟尘和有毒气体产生窒息或昏迷;② 遮光性,烟气中的游离炭、干馏粒子、液滴等对光线有吸收、折射、散射作用,导致火灾现场的可视度降低,严重妨碍人员的疏散和消防队员灭火救援行动。

锥形量热仪试验方法中,以比消光面积(SEA)表征挥发单位质量物质所产烟的能力。由表1可知,七种热塑性塑料中,丙烯腈-丁二烯-苯乙烯(ABS)的SEA最大,达到了 $1\ 700\text{ m}^2/\text{kg}$ 以上,PVC、PS和PBT在 $1\ 000\text{ m}^2/\text{kg}$ 左右,说明这些材料燃烧过程中产烟能力较强。

另外,PBT和部分ABS的CO产率最高,ABS、PA的CO₂产率最高,说明这些材料燃烧过程中烟气毒性较大。相对而言,实体木材及木质复合材料在发烟以及CO产率方面,都低于热塑性塑料。

综上所述,热塑性塑料一旦被引燃后释热强烈,产烟能力较强,烟气毒性也较大。实体木材及木质复合材料在燃烧放热、发烟以及CO产率方面,都低于热塑性塑料,其危险性在于燃烧后期有一个快速释热过程,对火势增长、火灾蔓延具有一定的促进作用。

1.2 居民住宅火灾行为

住宅内部包括卧室、客厅、厨房和卫生间等空间。厨房经常使用燃气或电气;卧室及客厅通常放置大量织物、塑料制品、纸制品、木质家具、家电、以及吊顶、铺地、窗帘、墙壁装饰材料,是火灾载荷最大的区域。客厅与卧室也会因吸烟以及电器过载等原因发生火灾,因此,住宅中卧室、客厅、厨房是防火的重点区域。

基于FDS 5.0建立了厨房和卧室火灾模型,模拟分析结果表明^[12]:当厨房起火时,1.5 m处的温度变化比较平缓,没有达到 $65\text{ }^\circ\text{C}$,部分燃烧扩大比率为10%~15%,也就是说,当厨房由于用火不慎而引发火灾时,火在厨房内燃烧比较充分,火灾产生的高温往往局限于厨房内,对客厅和卧室的热辐射不大,不会对室内居民造成严重伤害。

当卧室起火时,1.5 m处的温度变化比较剧烈,着火后250 s左右就能超过 $65\text{ }^\circ\text{C}$,在350 s时可达 $100\text{ }^\circ\text{C}$,在445 s时甚至超过 $200\text{ }^\circ\text{C}$,部分燃烧扩大比率达到44%。且由于卧室内放置大量的棉被、衣服等可燃物,火灾荷载较大,燃烧产生的高温或火焰很容易将其他卧室、客厅引燃。

2 阻燃材料在居民住宅防火过程中的作用

GB 20286-2006《公共场所阻燃制品及组件燃烧性能要求和标识》和GB 50222-2001《建筑内部装修设计防火规范》,对办公楼、仓库、地下建筑、宾馆、剧院、酒吧等公共设施内装修材料的阻燃等级有明确规定,且强制实施;对居民住宅则属非强制性。

GB 50222-2001总则中,明确了“建筑内部装修设计应妥善处理装饰效果和使用安全的矛盾,积极采用不燃性材料和难燃性材料,尽量避免采用在燃烧时产生大量浓烟或有毒气体的材料,做到安全适用,技术先进,经济合理”。我国高层商品房多为十几层甚至是三十几层的高层建筑,加之居民的消防意识淡薄,因此,高层居民住宅的火灾安全防范应等同于公共场所,有目的地强制使用阻燃材料,以减少居民住宅恶性火灾事故的发生。

2.1 阻燃材料可以降低火灾载荷

通常情况下,衣物、床上用品等数量多且最容易点燃,但无法选择阻燃制品;而家电、地板、家

具及门、窗和窗帘等,可以选择由阻燃材料制成的制品。通过添加阻燃成分的方式,可以使塑料、纤维织物、木质材料等释热量显著降低。

例如,将含磷的扩链剂BPPO加入到聚氨酯中,随着加入量的增加,HRR峰值逐渐降低^[13];采用磷酸盐阻燃剂AEDTMPA处理棉纤维,可以使其pkHRR从205.8 kW/m²降低到14.8 kW/m²,仅为原来的1/14^[14];在纸张表面通过静电层层自组装的方法构建阻燃层,当达到20层时,pkHRR和THR均降为原来的50%左右^[15];采用阻燃胶黏剂,当涂布量大于250 g/m²时,木质材料的热释放峰完全消失^[16]。

由此可见,材料经过阻燃处理,可以有效降低热释放速率和热释放总量,从而降低火灾载荷。

2.2 阻燃材料可以降低火灾烟气毒性

火灾中除了热量和高温带来的危害,烟气中的有毒物质,以及高密度烟气的遮光性危害不容忽视^[17]。数据显示,火灾中75%的死亡是由于有毒烟气的吸入。早期的阻燃剂多为气相阻燃剂(含卤阻燃剂),往往给人以发烟较高的印象。气相阻燃剂通过影响燃烧反应中的自由基,使可燃物质不完全氧化,不完全燃烧的产物增加。不完全燃烧产物包括:一氧化碳、氰化氢、碳氢化合物、氧化有机物、大环分子(多环芳烃)和烟尘等。相对于完全燃烧产物(二氧化碳和水),不完全燃烧产物的毒性增加^[18-19]。

在过去的40年,人们对阻燃材料的要求已经从抑燃变为降低发烟量和毒性^[20]。固相阻燃剂以及阻燃剂中抑烟成分的广泛使用,使得更多的燃烧产物转化成炭,保留在固相中,有效地降低了有毒烟气的产率。尤其是对燃烧本身具有较高烟气毒性的材料,效果更加明显。

将铁酸盐加入聚氨酯发泡材料中,铁酸盐可以与包含磷的基团反应,将其固定在固相中,减少有毒气体的产生,同时促进炭质层的产生,进一步减少有毒气体的挥发,总烟释放量下降15%左右^[21]。

2.3 借助阻燃材料设计室内防火分隔

居民住宅的特点,是卧室、客厅、厨房和卫生间各自独立,各个活动空间之间通过门而隔离开来。一旦发生火灾,门是火灾蔓延的主要通道,使用防火门,对控制火灾从一个活动区域向另一个区域蔓延将发挥重要作用。

卧室和客厅是两个重要的防火区间,多数居民住宅中卧室、客厅和阳台相通。因此,在卧室之间、卧室与客厅之间、卧室和厨房之间以及厨房和卧室之间建立一道防火门,可以防止火灾从一个区域扩展到另一个区域。

防火门要求具有一定的阻燃性,即其表面不易被引燃,即便引燃后释热速率不能太高,以使火灾控制在某一区域内,为人员撤离火场争取有效的逃生时间。研究表明,第一次发出火警信号,只有29%的人做出逃生行为反应,大部分处在犹豫、验证火灾信息等状态中,一般持续5~25 min不等。使用阻燃材料,可以使有效的逃生时间大幅度增加^[22-23]。

日常生活中的衣物、床上用品、书籍等为非阻燃制品,这些物品多储存在柜类家具中,若制作柜类的材料选择阻燃材料,一旦发生火灾,柜类等可以将这些可燃物与外界火源有效隔离开,降低可燃材料被迅速引燃的可能性,对抑制火灾的迅速发展和蔓延也有积极作用。

经过适当阻燃处理,木质材料在50 kW/m²辐射强度下,烟气温度小于100 °C^[24],而日常生活中常见的棉、麻、纸等的燃点在200~300 °C,可以抑制由衣物等燃烧对火势的助长作用,有效降低火灾的危险程度。

在卧室或客厅内建立独立的防火区间,将可燃物收纳于其中,不仅起到保护作用,还起到降低火灾载荷的作用,达到防止火灾蔓延的目的。

3 结语

居民住宅火灾对人们生命财产安全带来巨大威胁。针对居民住宅火灾的新特点,将居民住宅装修防火标准等同于公共场所,强制性地使用阻燃材料,是有效减少住宅火灾和降低生命财产损失的手段,也体现了对生命的敬畏和尊重。

阻燃材料可以从降低火灾载荷、降低烟气毒性和建立防火隔离等三个方面,最大限度地降低火灾危害,应推广使用阻燃材料制造木门及室内家具、装饰装修材料。

参考文献:

[1] 张梅红,赵建平.超高层建筑防火设计问题探讨[J].消防科学与技

- 术, 2010, 29(3): 217-219.
- [2] 方江源. 人口老龄化对消防工作的影响和对策浅析[J]. 消防技术与产品信息, 2012(6): 57-60.
- [3] A A Stec, T R Hull. Assessment of the fire toxicity of building insulation materials[J]. Energy and Buildings, 2011, 43(2-3): 498-506.
- [4] Y Alarie. Toxicity of fire smoke[J]. Crit. Rev. Toxicol., 2002, 32(4): 259-289.
- [5] Y Alarie. The toxicity of smoke from polymeric materials during thermal decomposition[J]. Annu. Rev. Pharmacol. Toxicol., 1985, 25 (1): 325-347.
- [6] 杨立中, 方伟峰, 邓志华. 火灾中的烟气毒性研究[J]. 火灾科学, 2001, 10 (1): 29-33.
- [7] T Fateh, T Rogaume, J Luche, et al. Characterization of the thermal decomposition of two kinds of plywood with a cone calorimeter - FTIR apparatus[J]. J Anal Appl Pyrolysis, 2014, 107(6): 87-100.
- [8] 舒中俊, 徐晓楠, 李响. 聚合物材料火灾燃烧性能评价-锥形量热仪试验方法[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
- [9] 王真, 吴玉章. 木材及木质重组材料燃烧发烟规律的研究[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2015, 37(1): 173-176.
- [10] 裴蓓, 余明高, 陈立伟, 等. 室内织物燃烧性能试验研究[J]. 热科学与技术, 2013, 12 (4): 349-352.
- [11] 王庆国, 张军, 周宇, 等. 几种热塑性塑料的燃烧行为研究[J]. 中国塑料, 2002, 16(12): 55-59.
- [12] 李庆功, 伍东, 谢飞, 等. 居民住宅火灾危险及安全防护措施探析[J]. 消防科学与技术, 2009, 28 (6): 457-460.
- [13] G Wu, J Li, Y Luo. Flame retardancy and thermal degradation mechanism of a novel post-chain extension flame retardant waterborne polyurethane[J]. Polym Degrad Stab, 2016, 123: 36-46.
- [14] D Zheng, J Zhou, L Zhong, et al. A novel durable and high-phosphorous-containing flame retardant for cotton fabrics[J]. Cellulose, 2016, 23 (3): 2211-2220.
- [15] O Köklükaya, F Carosio, J C Grunlan, et al. Flame-retardant paper from wood fibers functionalized via layer-by-layer assembly[J]. ACS Appl Mater Interfaces, 2015, 7 (42): 23750-23759.
- [16] X X Ma, Y Z Wu, H L Zhu. The fire-retardant properties of the melamine-modified urea-formaldehyde resins mixed with ammonium polyphosphate[J]. J Wood Sci, 2013, 59 (5): 419-425.
- [17] Q Zhang, J Zhan, K Zhou, et al. The influence of carbon nanotubes on the combustion toxicity of PP/intumescent flame retardant composites[J]. Polym Degrad Stab, 2015, 115: 38-44.
- [18] T R Hull, A A Stec, K Lebek, et al. Factors affecting the combustion toxicity of polymeric materials[J]. Polym Degrad Stab, 2007, 92 (12): 2239-2246.
- [19] A A Stec, T R Hull, K Lebek, et al. The effect of temperature and ventilation condition on the toxic product yields from burning polymers[J]. Fire Mater, 2008, 32(1): 49-60.
- [20] T R Hull. The development of sustainable fire retardant materials[J]. Materials China, 2016, 35 (5): 321-332.
- [21] X Liu, D-M Xu, Y-L Wang, et al. Smoke and toxicity suppression properties of ferrites on flame-retardant polyurethane - polyisocyanurate foams filled with phosphonate[J]. J Therm Anal Calorim, 2016, 125 (1): 245-254.
- [22] G Proulx, I M A Reid. Occupant behavior and evacuation during the chicao cook county administration building fire[J]. J Fire Prot Eng, 2006, 16(4): 283-309.
- [23] R F Fahy, G Proulx. Toward creating a database on delay times to start evacuation and walking speeds for use in evacuation modeling[C]. 2001: 175-183.
- [24] 王真, 屈伟, 吴玉章. 阻燃三聚氰胺改性脲醛树脂胶对胶合板发烟特性的影响[J]. 木材工业, 2016, 30(6): 19-22.

(责任编辑 向琴)

(上接第15页)

2) 钉直径 由表2可见, 无论是结构胶合板还是 OSB, 连接节点的动态抗压性能, 基本随圆钉直径的增大而提高。随着圆钉直径增加, 圆钉长度和承载力亦增加, 节点破坏由覆板和圆钉共同作用, 提高了节点抗压强度。

当覆板厚度 >10 mm 时, 随钉直径增加, 钉连接节点的动态抗压性能明显增强。主要原因是当覆板厚度和钉长度相差较大时, 节点破坏发生在覆板材料断裂或钉弯曲、脱落, 进而影响动态抗压性能。

3 结论

1) 对于两种覆板, 随着覆板厚度和圆钉直径的增大, 工字梁翼缘连接节点处的静态和动态承载性能基本呈现增强的趋势。

2) 本试验范围内, 22 mm 厚 OSB 与 3.8 mm 直径圆钉连接节点的静态承载力和动态抗压性能均最

佳; 16 mm 厚结构胶合板与 3.8 mm 直径圆钉连接时, 节点的动态抗拉性能最强。在实际生产中, 应根据覆板厚度选择圆钉直径。

3) 连接覆板与工字梁, 可优先选用 16 mm 厚结构胶合板, 或 22 mm 厚 OSB 覆板。

参考文献:

- [1] Forintek Canada Corp, Forintek special publication. Performance of wood-frame building construction in earthquakes SP-40[R], 1999.
- [2] Ruy A. Sã Ribeiro, Pellicane P J. Modeling load-slip behavior of nailed joints[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 1992, 4(4): 385-398.
- [3] 林利民, 唐伟, 王厚军, 等. 轻型木结构建筑胶合板覆板的握钉力性能[J]. 木材工业, 2005, 19(5): 4-6.
- [4] Jason V Smart. Capacity resistance and performance of single-shear of single-bolted and nailed connections: an experiment investigation[D]. Virginia: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2002.
- [5] Ekiert C Hong J. Framing-to-sheathing connection tests in support of NEESWood project[D]. New York: State University of New York at Buffalo, 2006.

(责任编辑 孟凡丹、向琴)