

常用PVC桌面装饰材料燃烧热释放速率实验

刘辉¹, 王智星¹, 李海航^{1,2}, 陈明毅², 孟娜²

1. 中国计量学院质量与安全工程学院, 杭州 310018
2. 中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室, 合肥 230026

摘要 火灾中, 各类装饰材料成为助燃物引发更大灾情, 其燃烧后释放的有毒烟气也是造成人员伤亡的主要原因。本实验基于标准 ISO 9705 小尺寸热释放速率实验台, 利用耗氧原理分别测量厚度为 1、2 和 3 mm 的聚氯乙烯 (PVC) 桌面装饰材料试样的热释放速率, 分析燃烧特性。实验结果显示, 边长为 30 cm 的矩形试样能被 2 mL 的正庚烷引燃, 燃烧的最高温度大于 800°C; 不同试样的热释放速率最大值随着厚度的增加而减少, 分别为 5.82、4.41 和 2.83 kW/s, 但是热释放速率总值呈递增趋势; 随着试样厚度的增加, 引燃的时间推迟, 即引燃的难度增大; 材料燃烧过程中释放大量的黑烟和刺鼻的气味。

关键词 PVC; 装饰材料; 热释放速率

中图分类号 X932

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.01.014

Experimental study on heat release rate of PVC desktop decoration materials

LIU Hui¹, WANG Zhixing¹, LI Haihang^{1,2}, CHEN Mingyi², MENG Na²

1. College of Quality and Safety Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China
2. State Key Laboratory of Fire Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

Abstract This paper studies the heat release rate of PVC desktop decoration materials, aiming to provide reference for fire prevention and control. PVC desktop decoration materials have beautifying and protecting functions, so they are widely used in daily life. However, fire accidents caused by these materials cannot be underestimated in recent years. When a fire accident happens, all kinds of decoration materials not only are supporters of combustion, but also release toxic gas in the process of combustion which is the main reason for casualties. Therefore, the heat release rates of PVC decoration materials with thicknesses of 1, 2 and 3 mm were measured based on the oxygen consumption principle using ISO 9705 standard small size heat release rate test bench. The test results show that the PVC decoration materials can be ignited by 2 mL n-heptane, and the maximum temperature reached more than 800°C. The maximum heat release rate of different samples increased with the increase of thickness, being 5.82, 4.41 and 2.83 kW/s. The total heat release rate took on an increasing trend. With the increase of sample thickness, the ignition time was prolonged, that is, the materials were more difficult to be ignited. A large amount of black smoke and pungent odors were released in the combustion process.

Keywords PVC; decoration materials; heat release rate

收稿日期: 2014-05-26; 修回日期: 2014-09-10

基金项目: 国家质检公益性行业科研专项(201210040-02); 浙江省安全生产科技计划项目(2013A1011)

作者简介: 刘辉, 副教授, 研究方向为安全与环保技术, 电子邮箱: liuhui2003@126.com; 王智星(共同第一作者), 硕士研究生, 研究方向为火灾防治技术, 电子邮箱: wangzhixing211@126.com

引用格式: 刘辉, 王智星, 李海航, 等. 常用PVC桌面装饰材料燃烧热释放速率实验[J]. 科技导报, 2015, 33(1): 81-85.

聚氯乙烯(PVC)是世界上最早实现工业化生产的塑料制品之一,在加工过程中通过加入添加剂或采用适当的工艺和设备生产出各种塑料制品^[1]。PVC桌面装饰材料(俗称软玻璃)是一种常见的桌面美化保护层,因为其具有耐热度高、耐重压、抗老化、使用寿命长等优点,被广泛应用于家庭和办公室等场所的桌面上。作为一种室内装饰材料,当室内发生火灾时,其将作为燃料助长火灾的蔓延,且在燃烧过程中产生的有毒气体与烟雾,造成环境污染,危害生命安全,亟需对于此类PVC桌面装饰材料的火灾安全问题进行燃烧实验研究。国内外已经对不同装饰材料进行了大量的燃烧实验,Zhan等^[2]、徐亮等^[3]对热塑性材料的火灾特性进行了研究;彭小芹等^[4]对有机玻璃(PMMA)进行了热释放速率的实验分析;夏云春等^[5]对可燃性装饰材料燃烧特性做了实验研究。Shields等^[6]按照ISO 9705标准进行全尺寸火灾实验,模拟了在真实火灾条件下装饰材料的燃烧过程;Butler^[7]对PP等热塑性材料进行了燃烧实验,建立了一维热解燃烧模型。

在火灾实验研究中,材料的热释放速率是火灾危害分析中重要因素之一。火灾中材料燃烧的热释放速率将直接影响温度场的分布、烟气的蔓延状态、火灾的规模以及对设备的破坏程度^[8]。赵力增等^[9]基于耗氧原理对固体可燃物的热释放速率进行测量研究。本实验对市场常见的3种厚度的PVC桌面保护层进行热释放速率分析。

1 理论基础

1.1 耗氧原理

热释放速率作为评价火灾危险性的代表性参数,其中最常用的方法分别是基于氧消耗原理和质量损失速率,如小尺寸热释放速率实验的ISO 5660标准和全尺寸墙角实验的ISO 9705标准。一些研究火灾的实验室还发展了基于氧消耗原理的大型热释放速率测试方法,而基于质量损失速率的测试方法更常用于辅助作用^[10]。

每消耗单位质量的氧放出来的热量约为一常数,即 $\Delta H_f/r_o=(13.1\pm 0.6)$ MJ/kg。对此Huggett在1980提出了利用氧耗法测量热释放速率^[11],彭小芹等^[4]曾针对甲烷、乙烯等有机物耗氧燃烧热值做过对比,实验表明,不完全燃烧和燃料的不同对结果影响很小。本实验所使用的实验台是利用耗氧法测量热释放速率(heat release rate, HRR)。

1.2 热释放速率

热释放速率(kW/s)的测量,其计算表达式^[12]为

$$Q = E_o V_{298} c_{O_2}^a \left[\frac{\theta}{\theta(a-1)+1} \right] - \frac{E_o}{E_{C_3H_8}} Q_c \quad (1)$$

式中, θ 为耗氧系数, $c_{O_2}^a$ 为含水蒸气环境中氧的浓度, $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$, E_o 为消耗单位体积氧所释放的能量, $E_{C_3H_8}$ 为丙烷 C_3H_8 在25℃时燃烧消耗单位体积氧所释放的热量 $16.8 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-3}$, V_{298} (0.1 MPa, 25℃)为排烟管道内气体的体积流量, $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$, Q_c 为燃料燃烧的热产生率, a 为试件在空气中的燃烧反应的耗氧

扩展系数,取1.105。

$$\theta = \frac{c_{O_2}^0(1-c_{CO_2})-c_{O_2}(1-c_{CO_2})}{c_{O_2}^0(1-c_{CO_2}-c_{O_2})} \quad (2)$$

氧环境浓度的 $c_{O_2}^a$ 计算式为

$$c_{O_2}^a = c_{O_2}^0(1-c_{H_2O}^0) \quad (3)$$

试样在25℃时燃烧热为 $17.2 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-3}$, $c_{O_2}^0$ 为氧分析仪测得排烟管道中氧的初始浓度, c_{O_2} 为实验过程中,氧分析仪测得排烟管道内氧的浓度, c_{CO_2} 为实验过程中,由分析仪测得排烟管道内的 CO_2 的浓度, $c_{H_2O}^0$ 为环境中水蒸气的浓度。

2 实验

该实验台的尺寸是标准ISO 9705实验台的0.4倍,由燃烧室,集烟罩,排烟管道和风机组成,整体框架由不锈钢型材和板材焊接而成,采用对开放式发热炉体。燃烧室尺寸为 $1.2 \text{ m}\times 1.2 \text{ m}\times 1.2 \text{ m}$,在底部留有0.15 m的空隙便于通风,试样台平面是间距为0.01 m的铁丝网,距铁丝网下方0.04 m处放置点火源,实验装置如图1所示。

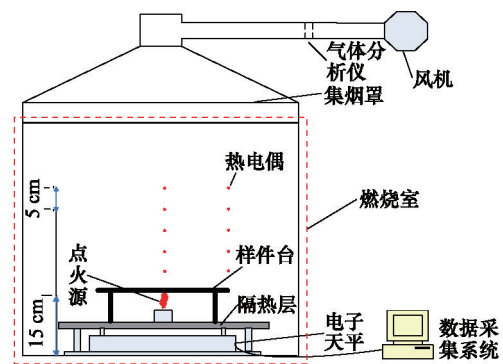


图1 实验装置

Fig. 1 Schematic of experimental equipment

实验采用正庚烷作为点火源燃料, $CH_3(CH_2)_5CH_3$ 体积分数为97.0%,密度(20℃)为 $0.6870\sim 0.6930 \text{ g/cm}^3$ 。实验时将2 mL正庚烷放入内直径为8 cm的圆形槽油盆中。并将圆形槽油盆置于燃烧平台正下方4 cm处。

实验测试所选用的PVC桌面装饰试样均为建材装饰市场常见材料。试样分别选取厚度为1、2和3 mm,考虑到实验平台尺寸,将实验材料裁剪为 $30 \text{ cm}\times 30 \text{ cm}$ 。

在测量材料燃烧的热释放速率同时,对材料燃烧过程中各点的温度变化进行分析,可以更好地说明材料的燃烧特性。实验中热电偶测温点分布在燃烧平台上方($30 \text{ cm}\times 30 \text{ cm}$),共10个点,分别位于矩形材料中心竖直上方和矩形左下角竖直上方,每竖排设置5个,上下相邻间隔为5 cm。因材料厚度不同,各测温点距离不同试样上表面的高度如表1所示。3种试样分别记作A、B、C。

表1 测温点距离材料上表面高度

Table 1 Distance between material surface and temperature measuring points

试样厚度/ mm	测温点距离材料上表面高度/cm				
	1	2	3	4	5
1(A)	24.9	19.9	14.9	9.9	4.9
2(B)	24.8	19.8	14.8	9.8	4.8
3(C)	24.7	19.7	14.7	9.7	4.7

3 结果与分析

该实验是小尺寸燃烧室内对裁剪后的样品进行热释放速率的检测,样品燃烧的耗氧量较实际火灾场景中的要小,故所测得的热释放速率也较实际火灾中的低。点火燃料正庚烷自身燃烧产生的热释放速率会对材料的实验结果造成误差,所以对2 mL的正庚烷的热释放速率单独进行了测量,得到的热释放速率如图2所示。热释放速率最大值达到1.03 kW/s,图2中虚线表示的是正庚烷热释放速率,平均值为0.37 kW/s。

在对PVC桌面装饰材料进行燃烧实验的过程中观察到,从正庚烷燃烧开始,取其功率为0.37 kW/s,根据重复实验的结果可得被测试样A,B,C分别在60~70,60~70,80~90 s被引

燃,材料的中心位置被火源烧穿后,继而向四周扩散燃烧。由图2可知,2 mL的正庚烷燃烧时间持续到270 s,即材料被引燃后,火源仍然提供了200 s的热源,当正庚烷燃烧完后,3种厚度试样又分别持续燃烧了约111,230和316 s,但所有材料均未燃烧彻底。在材料燃烧过程中产生了大量的黑烟,可以闻到刺鼻的辛辣味,在未燃烧完的材料中可以看见被熏黑的痕迹,且随着厚度增加,痕迹越明显,燃烧边缘有少量丝状物。实验材料燃烧前后对比如图3所示。研究中对不同厚度材料进行了多次实验以确保结果的准确性。

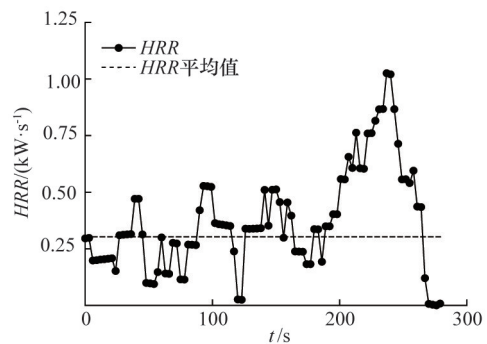


图2 正庚烷的热释放速率

Fig. 2 Heat release rate of n-heptane

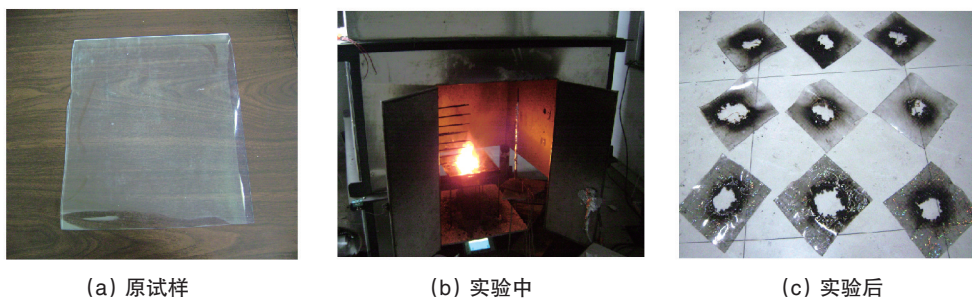


图3 材料实验前后对比

Fig. 3 Comparison of the material before and after the experiment

图4(a)是厚度1 mm的PVC桌面装饰材料燃烧的热释放速率(试样A),其中虚线是正庚烷燃烧的热释放速率(取平均值0.37 kW/s),材料在183 s时的热释放速率达到最大值6.19 kW/s,减去点火源的热释放速率平均值,即可得到实际的材料燃烧热释放速率最大值为5.82 kW/s。

因为材料在实验过程中并未彻底燃烧完,而是由点火源引燃中心部位,再向周围扩散,故设置在矩形材料一角的热电偶显示的温度变化并无明显差异,此处只对中心位置上方的温度变化作比较,温度变化见图4(b)。 θ_1 测量的是距离材料燃烧最近的位置,所以能很好地体现出被测材料燃烧过程中的温度变化,从图4(b)中可以看出温度最高时达到685℃, $\theta_2 \sim \theta_3$ 测量材料温度的距离依次增大,温度的变化越来越平缓,最高温度分别达到517,298,242和185℃。

图5(a)是厚度为2 mm的PVC桌面装饰材料燃烧的热释放速率(试样B),在177 s时达到最大值4.78 kW/s,减去点火源的热释放速率平均值0.37 kW/s,实际的材料燃烧热释放速率最大值为4.41 kW/s。虽然最大峰值略小于1 mm材料的峰值,但是由图4(a)和图5(a)比较可以观察到,图5(a)的波峰宽度要大于图4(a),即厚度2 mm的试样燃烧热释放速率总值仍大于厚度1 mm的试样。

图5(b)中 θ_1 显示材料在140 s时温度达到最大值823℃, $\theta_2 \sim \theta_3$ 最高温度分别为798,553,420,265℃。而 θ_1 和 θ_2 曲线间的距离明显小于图4(b),表明厚度2 mm的材料燃烧更剧烈,证实了厚度2 mm试样的燃烧热释放速率总值大于厚度1 mm试样的。

图6(a)是厚度3 mm的材料燃烧热释放速率在255 s达

到最大值 3.20 kW/s(试样 C), 减去点火源的热释放速率平均值, 实际的热释放速率为 2.83 kW/s, 峰值小于上述两种材料, 但是由图 6(a) 观察到, 波峰在三者中最宽, 表明热释放速率总值最大。图 6(b) 中曲线 θ_1 显示最高温度达到 663°C, $\theta_2 \sim \theta_5$

最高温度分别为 351, 252, 184, 157°C。与前两种试样不同的是, 曲线 θ_1 与 θ_2 距离较远, 可能是厚度 3 mm 的试样较前两者难点燃, 2 mL 的正庚烷提供的热源难以使其持续长时间的燃烧, 从它的最大温度小于前两种也可以证明这点。

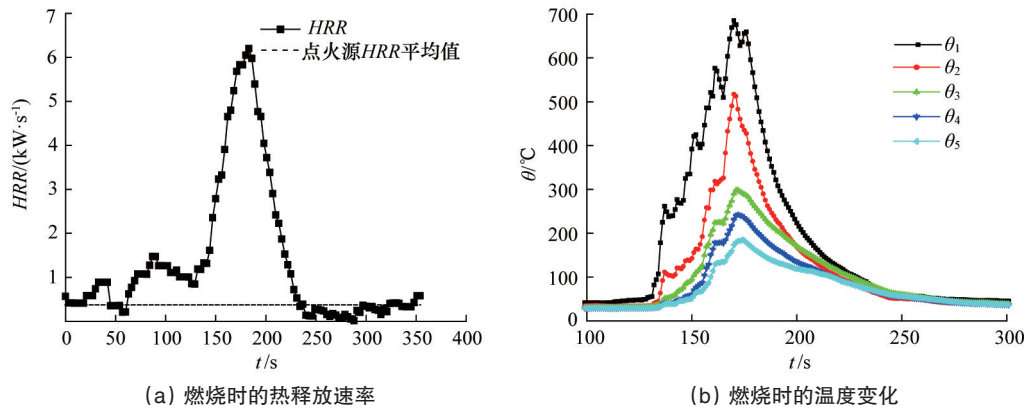


图 4 1 mm 度材料燃烧时的热释放速率及温度变化

Fig. 4 Heat release rate and temperature changes of the material with 1 mm thickness in the combustion process

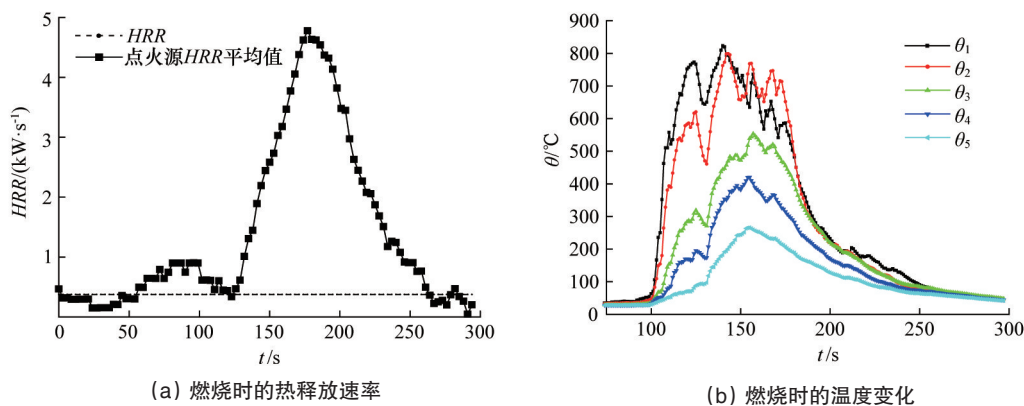


图 5 2 mm 材料燃烧时的热释放速率及温度变化

Fig. 5 Heat release rate and temperature changes of the material with 2 mm thickness in the combustion process

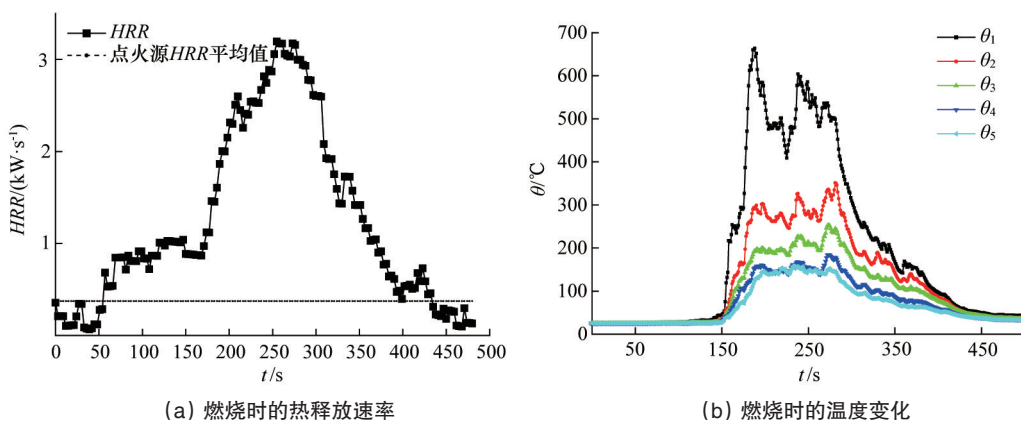


图 6 3 mm 材料燃烧时的热释放速率及温度变化

Fig. 6 Heat release rate and temperature changes of the material with 3 mm thickness in the combustion process

4 结论

通过对1、2、3 mm 3种不同厚度的PVC桌面装饰试样进行燃烧实验,测量其热释放速率,得出以下结论:

1) 随着厚度的增加,PVC桌面装饰材料被火源引燃的时间延后,燃烧时热释放速率最大值减小,但是热释放速率总值呈递增趋势。

2) 3种厚度的PVC桌面装饰材料燃烧产生的温度都达600℃以上,远超过人体所能承受的范围,虽然实验材料并未燃烧彻底,但是在真实火灾情况下其燃烧持续的时间内有可能引燃桌面上其他易燃物品。

3) 材料的燃烧实验过程中伴随着大量黑烟的产生,在发生火灾时,成为人员逃亡的阻碍,而产生的刺鼻气味更将造成人员窒息死亡。

参考文献(References)

- [1] 崔小明. 聚氯乙烯生产技术与国内外市场分析[J]. 江苏氯碱, 2008, 1(2): 15-25.
Cui Xiaoming. PVC production technology and market analysis of domestic and international[J]. Jiangsu Lujian, 2008, 1(2): 15-25.
- [2] Zhang J, Yang F K. Effects of surface flame spread of plywood lining on enclosure fire in a modified ISO room[J]. Journal of Fire Science, 2003, 21(4): 67-83.
- [3] 徐亮, 张和平, 万玉田, 等. 热塑性装饰材料大尺度火灾实验研究[J]. 中国科学技术大学学报, 2008, 38(5): 563-568.
Xu Liang, Zhang Heping, Wan Yutian, et al. Large-scale fire test on thermoplastic linings[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2008, 38(5): 563-568.
- [4] 彭小芹, 刘松林, 卢国建. 材料热释放速率的试验分析[J]. 重庆大学学报, 2005, 28(8): 122-125.
Peng Xiaoqin, Liu Songlin, Lu Guojian. Experimental analysis on heat release rate of materials[J]. Journal of Chongqing University, 2005, 28(8): 122-125.
- [5] 夏云春, 吴静. 普通可燃性装饰材料燃烧特性的实验研究[J]. 青岛科技大学学报, 2008, 29(2): 138-142.
Xia Yunchun, Wu Jing. Experimental study on the combustion characteristics of multi-type flammable decoration materials[J]. Journal of Qingdao University of Science and Technology, 2008, 29(2): 138-142.
- [6] Shields T J, Sileoek G W, Azhakesan M A. A comparison of fire retarded and non-fire retarded wood-based wall linings exposed to fire in an enclosure[J]. Fire and Materials, 1999, 23(2): 1-25.
- [7] Butler K M. A mixed layer pyrolysis model for polypropylene[C]//Proceedings of Fire Safety Sci-Proc of the Sixth Int Symp. Poitiers: [s.n.], 2000: 313-324.
- [8] 姚国红, 巩建军. 火灾烟气的危害[J]. 科普之窗, 2001, 9(5): 26-28.
Yao Guohong, Gong Jianjun. The dangers of fire smoke[J]. Window of Popular Science, 2001, 9(5): 26-28.
- [9] 赵力增, 刘万福, 葛明慧, 等. 固体可燃物热释放速率实验研究[J]. 消防科学与技术, 2008, 27(11): 793-795.
Zhao Lizeng, Liu Wanfu, Ge Minghui, et al. Heat release rate on solid combustible material[J]. Fire Science and Technology, 2008, 27(11): 793-795.
- [10] 程远平, 陈亮, 张孟君. 火灾过程中火源热释放速率模型及其实验测试方法[J]. 火灾科学, 2002, 11(2): 70-74.
Cheng Yuanping, Chen Liang, Zhang Mengjun. The models and experimental testing method of heat release rate of fuel during the development of fire[J]. Fire Safety Science, 2002, 11(2): 70-74.
- [11] Huggett C. Estimation of rate of heat release by means of oxygen consumption measurements[J]. Fire Mater, 1980, 4(1): 61-65.
- [12] 中华人民共和国公安部. GA 111—1995 中华人民共和国公共安全行业标准: 表面材料的实体房间火试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 1996.
The Ministry of Public Security of the People's Republic of China. GA 111—1995 The people's republic of china public security industry standards: Test method of surface material entity room fire[S]. Beijing: China Standard Press, 1996.

(责任编辑 赵业玲)

·学术动态·



2014中国科协热点学术问题报告会在北京举行

2014年12月8日,中国科协在北京举办2014中国科协热点问题学术报告会。中国科协党组成员、书记处书记、中国科协学术与学会专门工作委员会副主任沈爱民出席会议并讲话,中国科协八届常委会学术与学会工作专门委员会委员陈运泰院士主持报告会。

中国科学院院士、中国疾病预防控制中心副主任高福作“动物源性传染病的发生与控制:埃博拉与流感”学术报告。首都医科大学附属北京中医医院院长刘清泉作“传统医学在重大传染病防控中的应用”学术报告。中国气象科学研究院研究员张小曳作“我国雾-霾形成的根本性原因及对策思考”学术报告。黑迈数码科技有限公司首席执行官忻国华作“云设智造——互联网成就时尚平民化,平民时尚化”报告。

中国科协热点问题的学术报告会是科协年度性的重点学术活动,自2008年设立,每年1次。

在线直播见中国科协网 <http://www.cast.org.cn/n35081/n35473/n35518/16122618.html>。