

目 次

74486

前言	III
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 符号	2
5 试验原理	3
6 试验装置	3
7 待测制品的要求	5
8 试样制备及准备	6
9 试验环境	7
10 标定	7
11 试验程序	10
12 计算	11
13 试验报告	12
附录 A (资料性附录) 注释及操作员指导	19
附录 B (资料性附录) 分解、精度和误差	21
附录 C (资料性附录) 质量损失速率和有效燃烧热	25
附录 D (资料性附录) 垂直定位的测试	26
附录 E (资料性附录) 工作热流计的标定	28
附录 F (资料性附录) 有辅助气体分析的热释放速率计算	29
参考文献	32

前 言

本标准等同采用 ISO 5660-1:2002《对火反应试验 热释放、产烟量及质量损失速率 第 1 部分：热释放速率(锥形量热仪法)》(英文版)。

本标准等同翻译 ISO 5660-1:2002。

为便于使用,本标准做了下列编辑性修改:

- a) “本国际标准”一词改为“本标准”;
- b) 用小数点“.”代替作为小数点的逗号“,”;
- c) 删除国际标准的前言。

本标准代替 GB/T 16172—1996《建筑材料热释放速率试验方法》,因为国际上的发展原标准在技术上已过时;本标准与 GB/T 16172—1996 相比主要差异如下:

- 增加了术语定义中的条目;
- 增加了符号一章;
- 增加了辐射屏蔽和可选防护屏;
- 增加了对燃烧时间短暂材料数据采集周期的要求;
- 增加了对尺寸不稳定材料制备的要求;
- 增加了待测试样基材选用的要求及养护要求;
- 增加了非经常性标定并增补了预标定、工作标定的要求;
- 更改了最长数据采集时间和最短试验时间;
- 增加了质量损失速率的测试和计算;
- 增加了 6 个资料性附录。

本标准附录 A、附录 B、附录 C、附录 D、附录 E 和附录 F 均为资料性附录。

请注意本标准的某些内容有可能涉及专利的内容。本标准的发布机构不应承担识别这些专利的责任。

本标准由中华人民共和国公安部提出。

本标准由全国消防标准化技术委员会第七分技术委员会(SAC/TC 113/SC 7)归口。

本标准负责起草单位:公安部天津消防研究所。

本标准参加起草单位:公安部四川消防研究所。

本标准主要起草人:李晋、杜兰萍、张欣、张网、张羽、王钢、果春盛。

本标准于 1996 年首次发布,本次为首次修订。

本标准所代替标准的历次版本发布情况为:

- GB/T 16172—1996。

建筑材料热释放速率试验方法

1 范围

本标准规定了采用外部点火器,试样在水平定位受到可控制等级的热辐射时,测定热释放速率的方法。热释放速率的测量是通过燃烧产物气流中氧气浓度计算出的氧消耗量和燃烧产物的流量来确定的,同时也对试样引燃(持续有焰燃烧)时间进行了测量。

2 规范性引用文件

下列文件中的条款通过本标准的引用而成为本标准的条款。凡是注日期的引用文件,其随后所有的修改单(不包括勘误的内容)或修订版均不适用于本标准,然而,鼓励根据本标准达成协议的各方研究是否可使用这些文件的最新版本。凡是不注日期的引用文件,其最新版本适用于本标准。

GB/T 2918 塑料试样状态调节和试验的标准环境(GB/T 2918—1998, idt ISO 291:1997, Plastics—Standard atmospheres for conditioning and testing)

ISO 554 调节和/或试验用标准环境(Standard atmospheres for conditioning and/or testing—Specifications)

ISO 13943 消防安全 术语(Fire safety—Vocabulary)

ISO/TR 14697 建筑制品衬底的选择指南(Fire tests—Guidance on the choice of substrates for building products)

3 术语和定义

ISO 13943 确立的以及下列术语和定义适用于本标准。

3.1

基本平整表面 essentially flat surface

不平整处与平面相差不超过 ± 1 mm 的表面。

3.2

闪燃 flashing

在试样表面或其上方出现的火焰持续时间少于 1 s 的燃烧现象。

3.3

引燃 ignition

出现持续火焰(参见 3.10)。

3.4

辐射照度 irradiance

<在表面上一点>入射到试样表面某点处的面元上(包括该点和该单元区域)的辐射通量除以该面元的面积。

注:水平定位时试样上对流传热可以忽略。因此,本标准用术语“辐射照度”代替“热流”,这样可以更好地表明辐射是主要的热传递方式。

3.5

建筑材料 material

单一物质或均匀分布的混合物。如金属、石材、木材、混凝土、矿纤和聚合物。

3.6

定位 orientation

试验时试样暴露表面所处平面,铅垂或水平。

3.7

耗氧原理 oxygen consumption principle

燃烧时消耗的氧气质量与释放热量之间的比例关系。

3.8

建筑制品 product

要求给出相关信息的建筑材料、复合材料或组件。

3.9

试样 specimen

有代表性的带基材或处理过的用来试验的制品。

注:对于某些类型的制品,例如包含空气隙或接合点的制品,可不必制备代表最终使用情况的试样(见第7章)。

3.10

持续燃烧 sustained flaming

在试样表面或其上方出现持续时间超过 10 s 的火焰。

3.11

短暂燃烧 transitory flaming

在试样表面或其上方出现持续时间介于 1 s~10 s 的火焰。

4 符号

见表 1。

表 1 符号及其意义

符号	意义	单位
A_s	试样初始暴露的表面积	m^2
C	孔板流量计标定常数	$m^{1/2} \cdot g^{1/2} \cdot K^{1/2}$
Δh_c	净燃烧热	$kJ \cdot g^{-1}$
$\Delta h_{c,eff}$	有效净燃烧热	$MJ \cdot kg^{-1}$
m	试样的质量	g
Δm	总质量损失	g
m_t	试验结束时试样的质量	g
m_s	持续火焰期间试样的质量	g
$\dot{m}_{A,10-90}$	质量损失在 10% 到 90% 之间,单位面积上的平均质量损失速率	$g \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$
m_{10}	总质量损失为 10% 时试样的质量	g
m_{90}	总质量损失为 90% 时试样的质量	g
\dot{m}	试样的质量损失速率	$g \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$
\dot{m}_e	排气管道内的质量流量	$kg \cdot s^{-1}$
Δp	孔板两侧的压差	Pa
\dot{q}	热释放速率	kW
\dot{q}_A	单位面积热释放速率	$kW \cdot m^{-2}$

表 1 (续)

符号	意 义	单 位
$\dot{q}_{A,max}$	单位面积热释放速率的最大值	$\text{kW} \cdot \text{m}^{-2}$
$\dot{q}_{A,180}$	试样在 t_{ig} 时被引燃后, 180 s 内的单位面积平均热释放速率	$\text{kW} \cdot \text{m}^{-2}$
$\dot{q}_{A,300}$	试样在 t_{ig} 时被引燃后, 300 s 内的单位面积平均热释放速率	$\text{kW} \cdot \text{m}^{-2}$
$Q_{A,tot}$	整个试验期间单位面积的放热总量	$\text{kW} \cdot \text{m}^{-2}$
r_0	氧与燃料的化学当量比	1
t	时间	s
t_d	氧分析仪的滞后时间	s
t_{ig}	引燃时间(出现持续火焰)	s
Δt	取样周期	s
t_{10}	总质量损失达到 10% 的时间	s
t_{90}	总质量损失达到 90% 的时间	s
T_e	孔板流量计处气体的绝对温度	K
X_{O_2}	氧分析仪读数, 氧气的摩尔分数	1
$X_{O_2}^0$	氧分析仪初始读数	1
$X_{O_2}^1$	滞后时间修正前氧分析仪的读数	1

5 试验原理

本试验方法建立在观测基础上, 一般来说, 净燃烧热和燃烧所消耗的氧气质量成比例。这个关系是每消耗 1 kg 的氧气释放出的热量大约为 13.10×10^3 kJ。在环境大气条件下, 将试样置于规定的 $0 \text{ kW/m}^2 \sim 100 \text{ kW/m}^2$ 的外部热辐射条件下, 测量其燃烧时氧气浓度和排气流量。

本试验方法是通过有代表性的小试样, 来评估试验制品对火反应时的热释放速率特性。

6 试验装置

装置示意图见图 1。6.1~6.5 中给出了各部件的详细描述。

装置稍加改动, 试样便可在铅垂定位上进行试验。改动方式参见附录 D。

6.1 辐射锥

辐射锥额定功率为 5 kW, 由电加热管构成。电加热管应紧紧缠绕成圆锥台形状装配在双层耐热合金锥套中(见图 2), 内外锥壳内填以公称厚度为 13 mm、公称密度为 100 kg/m^3 的耐热纤维。辐射锥的辐射照度应通过控制 3 个热电偶(宜用 K 型不锈钢铠装热电偶, 也可用铬镍铁合金或其他高性能材料)的平均温度维持在设定水平上。3 支热电偶对称放置, 以非焊接方式与电加热管接触(见图 2)。3 支热电偶应采用外径为 1.0 mm~1.6 mm 的非暴露热节点的或外径为 3 mm 的暴露热节点的铠装热电偶。辐射锥应能在试样表面提供高达 100 kW/m^2 的辐射照度。在暴露试样表面的中心部位 $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 范围内, 辐射照度应均匀, 与中心处的辐射照度偏差不得超过 $\pm 2\%$ 。

6.2 辐射屏蔽层

辐射锥应有一个可抽取的辐射屏蔽层, 以保护试样在试验开始之前不受辐射。屏蔽层应由不燃材料制成, 总厚度不超过 12 mm。屏蔽层应为:

- 水冷并涂有一层表面发射系数 $\epsilon = 0.95 \pm 0.05$ 的耐磨无光黑色涂层, 或
- 非水冷, 可以是有反射顶面的金属或是陶瓷, 以将辐射传递降至最低。

屏蔽层应装有一个把手,或采用其他适宜快速插入和移出的方式。辐射锥的基座上应装有一个机械结构能使屏蔽层移动到位。

6.3 辐射控制

辐射控制系统应能做适当调节,在根据 10.1.2 描述标定期间,辐射锥热电偶的平均温度应保持在预设值 $\pm 10^{\circ}\text{C}$ 以内。

6.4 称重设备

根据 10.2.2 中描述的标定程序进行测量时,称重设备的精度为 $\pm 0.1\text{ g}$ 或更好。称重设备的量程应不低于 500 g 。当根据 10.1.3 进行标定时,称重设备在 $10\%\sim 90\%$ 的响应时间应小于 4 s 。当根据 10.1.4 进行标定时,称重设备的输出漂移在 30 min 内不应超过 1 g 。

6.5 试样安装架

试样安装架见图 3。试样安装架应为一个方形敞口盘,上端开口为 $(106\pm 1)\text{ mm}\times(106\pm 1)\text{ mm}$,深度为 $(25\pm 1)\text{ mm}$ 。安装架应采用厚度为 $(2.4\pm 0.15)\text{ mm}$ 的不锈钢板。包括一个便于插入和移出的把手,和一个保证试样的中心位置在加热器下方并能与称重设备准确对中的机械装置。安装架的底部应放置一层厚度至少为 13 mm 的低密度(公称密度 65 kg/m^3)耐热纤维垫。辐射锥下表面与试样顶部的距离应调节为 $(25\pm 1)\text{ mm}$,对于尺寸不稳定的材料,其与辐射锥下表面的距离应为 $(60\pm 1)\text{ mm}$ (见 7.5)。

6.6 定位架

定位架见图 4,是采用厚度为 $(1.9\pm 0.1)\text{ mm}$ 的不锈钢板制成的方盒,方盒内边尺寸为 $(111\pm 1)\text{ mm}$,高度为 $(54\pm 1)\text{ mm}$ 。用于试样面的开口为 $(94.0\pm 0.5)\text{ mm}\times(94.0\pm 0.5)\text{ mm}$ 。应以适当方式确保定位架与试样安装架之间能放置一个试样。

6.7 带流量测量仪的排气系统

排气系统应由工作温度适合的离心式风机、集烟罩、风机的进气和排烟管道,以及孔板流量计组成(见图 5)。集烟罩底部与试样表面的距离应为 $(210\pm 50)\text{ mm}$ 。在标准温度和压力条件下,排气系统的流量应不小于 $0.024\text{ m}^3/\text{ s}$ 。风机的建议安装位置见图 5。也可将风机放置在后面的位置,孔板流量计装在风机前,但应满足本条款其余部分的要求。

在集烟罩与进气管之间应装一内径为 $(57\pm 3)\text{ mm}$ 的节流孔板以提高气体的混合度。

为了采集气体样本,环形取样器应装在距集烟罩 $(685\pm 15)\text{ mm}$ 的风机进气管道内。环形取样器上应有 12 个直径为 $(2.2\pm 0.1)\text{ mm}$ 的小孔,以均化气流组分,小孔与气流方向相反,以避免烟尘沉积。

气流温度应由外径为 $1.0\text{ mm}\sim 1.6\text{ mm}$ 的铠装热电偶或外径为 3 mm 的露端型热电偶来测量,热电偶安装在孔板流量计的上游 $(100\pm 5)\text{ mm}$ 处、排气管轴线位置上。

如果按图 5 所示安装风机,排气流量应通过测量风机上方至少 350 mm 处的锐缘孔板[内径 $(57\pm 3)\text{ mm}$,厚度 $(1.6\pm 0.3)\text{ mm}$]两侧的压差来确定。如果风机装在比图 5 所示更远的下游,也可将孔板流量计装在环形取样器和风机之间。但是,这种情况下孔板流量计两侧直管段的长度至少应为 350 mm 。

6.8 气体取样装置

气体取样装置应包括取样泵、烟尘过滤器、除湿冷阱、排空的旁路系统、水分过滤器和 CO_2 过滤器。图 6 给出了一个实例的示意图。其他布置方式如果满足要求也可使用。氧分析仪的滞后时间 t_d 应根据 10.1.5 标定,且不应超过 60 s 。

注:如果使用了 CO_2 分析仪(可选的),计算热释放速率的公式与标准情形不同(参见第 12 章和附录 F)。

6.9 点火电路

采用一个 10 kV 互感器提供能量的火花塞或电火花点火器进行外部点火。火花塞的火花隙应为 $(3.0\pm 0.5)\text{ mm}$ 。电极长度和火花塞的位置应使火花隙位于试样表面中心上方 $(13\pm 2)\text{ mm}$ 处,对于尺寸不稳定的材料其距离应为 $(48\pm 2)\text{ mm}$ (见 7.5)。

6.10 点火计时器

点火计时器应能够分段计时,示值分辨力为1 s,计时误差小于1 s/h。

6.11 氧分析仪

应采用氧气量程为0%~25%的顺磁型氧分析仪。根据10.1.6标定时,氧分析仪在30 min内的漂移不应超过 50×10^{-6} ,且输出噪声也不应超过 50×10^{-6} 。由于氧分析仪对气流压力敏感,应调整分析仪上游的气流压力,使气流波动最小化,大气压力变化时,可利用绝对压力传感器对分析仪的读数进行补偿。分析仪和绝对压力传感器应置于等温环境中。根据10.1.5标定时,氧分析仪满量程的10%~90%的响应时间应小于12 s。

6.12 热流计

应使用工作热流计来标定辐射锥(见10.2.5)。标定时热流计应放置在与试样表面中心相同的位置。

热流计应选用热电堆式,设计量程为 $(100 \pm 10) \text{ kW/m}^2$ 。辐射接收靶应该是平整圆形的,直径约为12.5 mm,表面覆有发射系数 $\epsilon = 0.95 \pm 0.05$ 的耐磨的无光泽黑色涂层。接收靶应为水冷式。冷却温度不应使热流计的接收靶表面产生水分冷凝。

辐射达到接收靶前不应穿过任何窗孔。热流计应耐用,便于安装和使用,且在标定中稳定。热流计的精度应为 $\pm 3\%$,重复性为 $\pm 0.5\%$ 以内。

用两支与工作热流计类型相同、量程相似的热流计专门作为参照热流计(参见附录E)。工作热流计应按10.3.1进行标定。参照热流计之一应每年进行一次全面标定。

6.13 标定燃烧器

标定燃烧器的开孔是面积为 $(500 \pm 100) \text{ mm}^2$ 的方形或圆形,开孔上覆有金属丝网以使燃气扩散,管内充填陶瓷纤维以提高气流的均匀度。标定燃烧器应与可计流量的甲烷气源相连,甲烷纯度至少为99.5%。相应于5 kW的热释放速率,流量计的精度应为读数的 $\pm 2\%$ 。精度应根据10.3.3进行验证。

6.14 数据采集分析系统

数据采集分析系统应能记录氧分析仪、孔板流量计、热电偶和称重装置的输出,对于测氧通道的氧气测量精度应至少达到 50×10^{-6} ,对于温度测量通道应达到 0.5°C ,其他的测量通道应为仪器输出全量程的0.01%,时间的精度应至少为0.1%。系统应能够记录每秒的数据,系统对每个参数应至少能存储720个数据。每次试验记录的原始数据都应存储,以便恢复和检查。

6.15 防护屏(可选)

为了操作方便或确保安全,允许用防护屏防护加热器和试样安装架,但应保证防护屏的存在不影响引燃时间和按10.1.7对热释放速率的测量。

如果防护屏形成了一个封闭空间,存在爆炸的可能,应采取适当的防护措施保护操作人员,如在背向操作人员的方向安装泄压口。

7 待测制品的要求

7.1 表面特性

待测制品应符合下列条件之一:

- a) 暴露表面基本平整。
- b) 暴露表面的不平整是均匀分布的,即:
 - 1) 在一个有代表性的 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的面积内至少有50%的表面与暴露表面最高点所组成的平面间的距离在10 mm以内;或
 - 2) 对于含有宽度不超过8 mm、深度不超过10 mm裂纹、缝隙或孔洞的表面,其裂纹、缝隙或孔洞的总面积不得超过代表性的 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的暴露面积的30%。

当暴露表面不满足7.1a)或7.1b)的要求时,应对制品进行处理,尽可能满足7.1的要求。试验报

告应声明该制品是按加工后的形式进行试验的,并详述加工情况。

7.2 不对称制品

提交试验的制品,可以具有两个不同的表面,或可以包含以不同的顺序排列的不同材料层。如在实际使用时,任一表面都可能暴露的话,则两个表面均应测试。

7.3 燃烧时间短暂的材料

对于燃烧时间短暂(3 min 或更短)的试样,热释放速率的测量周期不应超过 2 s。对于燃烧时间较长的试样,测量周期可为 5 s。

7.4 复合试样

用于试验的复合试样应按 8.3 制备,并能代表最终使用的状况。

7.5 尺寸不稳定的材料

如果试样因膨胀或变形,在引燃之前接触到火花塞,或引燃之后接触到辐射锥下表面,这种情况下应使辐射锥的下表面和试样表面有 60 mm 的间隔。辐射锥标定(见 10.2.5)时热流计应位于辐射锥下表面 60 mm 处。需要强调的是:以这种间隔测得的引燃时间不能与 25 mm 间隔下测得的引燃时间相比较。

其他尺寸不稳定的制品(例如试验期间卷曲或收缩),应采用 4 根金属丝限制其过分的变形。金属丝的直径应为 (1.0 ± 0.1) mm,长度至少为 350 mm。试样应按第 8 章的规定制备。用一根金属丝将试样安装架和定位架组件缠紧,并保证与组件的 4 个边之一平行,且距离约为 20 mm。将金属丝两端拧紧,使金属丝和定位架固定。试验前去掉金属丝多余部分。其余 3 根金属丝应以同样的方式固定,并分别与其余 3 条边平行。

8 试样制备及准备

8.1 试样

8.1.1 除非另有规定,对于选定的每一种辐射照度和暴露表面,应有 3 个试样进行试验。

8.1.2 试样应能表征制品的特征,其尺寸为 100_{-2}^0 mm \times 100_{-2}^0 mm 的正方形。

8.1.3 公称厚度等于或小于 50 mm 的制品应采用其实际厚度进行试验。

8.1.4 对于公称厚度超过 50 mm 的制品,应对非暴露表面一侧进行切割,使其厚度减少到 50 mm。

8.1.5 当从表面不规则的制品切取试样时,表面的最高点应处于试样的中心部位。

8.1.6 组件试样的制备应按 8.1.3 或 8.1.4 中适用的规定进行。如材料或复合材料在使用时与特定的基材相接触,试验时也应将基材加上,固定方式可采取黏结或机械固定。在没有唯一的或特定的基材时,应根据 ISO/TR 14697 选用适当的基材进行试验。

8.1.7 厚度小于 6 mm 的制品,在试验时应加上能代表其最终使用条件的基材,使总的试样厚度不小于 6 mm。

8.2 试样的状态调节

试验前,应根据 ISO 554 将试样在温度 (23 ± 2) °C,相对湿度 (50 ± 5) %的条件下养护至质量恒定。

在相隔 24 h 的两次称量中,试样的质量之差不超过试样质量的 0.1% 或 0.1 g(取数值较大者),则认为达到恒定质量。

像聚酰胺这样需要养护超过一周才能达到平衡的材料,应根据 GB/T 2918 养护后再进行试验。养护时间不应少于一周,并应在试验报告中说明。

8.3 准备

8.3.1 试样包覆

用厚度为 0.025 mm~0.04 mm 的单层铝箔包住经过养护的试样,使光泽面朝向试样。铝箔应预先裁剪,使其能包覆试样的底面和侧面,并超出试样的上表面至少 3 mm。试样应放置在铝箔中间,将其底面和侧面包住,将多余的铝箔剪掉,使铝箔不超过试样上表面 3 mm。包覆之后,试样应放进试样

安装架,并盖上定位架。完成这个过程后应看不到铝箔。

对于柔软的试样,可使用与试验试样厚度相同的模拟试样来预制铝箔。

8.3.2 试样准备

所有试样应使用图4所示的定位架进行试验,并按下列步骤准备试样:

- a) 将定位架倒置于平面上;
- b) 将包好铝箔的试样暴露表面向下放入定位架内;
- c) 在顶部放上耐火纤维层(公称厚度13 mm,公称密度 65 kg/m^3),纤维层至少一层,不超过两层,超出定位架边缘即可;
- d) 将试样安装架置于耐火纤维层顶部,并装入定位架、压紧;
- e) 将定位架固定到试样安装架上。

9 试验环境

试验装置应放置在没有明显气流扰动的环境中。空气的相对湿度应在20%~80%、温度应在 15°C ~ 30°C 之间。

10 标定

10.1 预标定

10.1.1 概述

除10.1.7以外,锥形量热仪交付使用,或加热组件、辐射控制系统(10.1.2)、称重设备(10.1.3和10.1.4)、氧分析仪或气体分析系统(10.1.5和10.1.6)等主要部件进行了维修或更换时应进行预标定。10.1.7中确定防护屏作用的标定应在安装防护屏的同时进行。对于交付使用的,有防护屏的新仪器,标定应由制造商完成。

10.1.2 辐射控制系统响应特性

接通辐射锥和风机的电源。设置辐射照度为 $(50 \pm 1) \text{ kW/m}^2$,调节排气流量为 $(0.024 \pm 0.002) \text{ m}^3/\text{s}$ 。平衡后,记录辐射锥的平均温度。根据第11章的程序测试黑色聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)。PMMA试样的厚度至少应为6 mm。引燃后,前3 min内的平均热释放速率应大约为 530 kW/m^2 。试验期间,以5 s间隔记录辐射锥的平均温度。

10.1.3 称重设备的响应时间

进行此项标定时不应开启辐射锥。将装有 $(250 \pm 25) \text{ g}$ 的不燃称重标准件的试样安装架放置在称重设备上(称重标准件取代了在此项标定中没有使用的定位架)。用机械或电子方式调零。将质量为 $(250 \pm 25) \text{ g}$ 的第二个不燃称重标准件轻轻放置在试样安装架上,并记录称重设备的输出。达到平衡后,从试样安装架上轻轻地移去第二个不燃称重标准件,并再次记录称重设备的输出。称重设备的响应时间即为其输出从10%到90%之间变化所用时间的平均值。

10.1.4 称重设备的输出漂移

将辐射锥高度调节到带有定位架的试样试验时的高度。将隔热板放置在称重设备上。接通风机和辐射锥的电源。调节排气流量为 $(0.024 \pm 0.002) \text{ m}^3/\text{s}$,辐射照度为 $(50 \pm 1) \text{ kW/m}^2$ 。辐射锥温度达到平衡后,移开隔热板,将装有 $(250 \pm 25) \text{ g}$ 的不燃称重标准件的试样安装架放置在称重设备上(称重标准件取代了在此项标定中没有使用的定位架)。达到平衡后,用机械或电子方式调零。将质量为 $(250 \pm 25) \text{ g}$ 的第二个不燃称重标准件轻轻放置在试样安装架上。待达到平衡后,记录称重设备的输出。30 min后,再次记录称重设备的输出。称重设备的输出漂移即为初始值和最后值之间的绝对差值。

10.1.5 氧分析仪的滞后时间和响应时间

进行此项标定时不应开启辐射锥。开启风机,调节排气流量为 $(0.024 \pm 0.002) \text{ m}^3/\text{s}$ 。通过调节甲烷气体流量,使标定燃烧器的输出大约为5 kW,以此来确定氧分析仪的滞后时间。在集烟罩外点燃燃

烧器并使火焰稳定。迅速将燃烧器置于集烟罩下,持续 3 min。然后,从集烟罩下移去燃烧器并停止甲烷供气。记录这 3 min 内分析仪的输出。接通滞后是插入燃烧器与氧读数达到其最大偏差的 50% 的时间差。计算断开滞后与接通滞后类似。滞后时间 t_d 是至少 3 次接通滞后与断开滞后的平均值。对于给定时刻,应把间隔 t_d 后记录的浓度记为该时刻的氧气浓度。

氧分析仪的响应时间为氧分析仪的输出从 10% 到 90% 之间变化所用时间的平均值。

注: 标定氧分析仪滞后时间和响应时间,不需精确地控制甲烷流量,因为滞后时间和响应时间对氧气量的大小不敏感。

10.1.6 氧分析仪的输出噪声与漂移

进行此项标定时不应开启辐射锥。开启风机,调节排气流量为 $(0.024 \pm 0.002) \text{ m}^3/\text{s}$ 。将无氧氮气通入氧分析仪。60 min 后,切换到样品气。样品气是来自排气管道正常流量和压力下的干燥空气。达到平衡后,将氧分析仪的输出调节为 $(20.95 \pm 0.01)\%$ 。开始以 5 s 间隔记录氧分析仪的输出,持续 30 min。利用最小平方拟合方法拟合过数据点的直线来确定漂移。对于直线拟合,0 min 时和 30 min 时读数差的绝对值代表短期漂移。根据下列公式,通过计算直线周围数据的均方根偏差来确定输出噪声:

$$r. m. s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{n}}$$

式中:

x_i ——数据点和呈线性趋势的直线之间的绝对差值。

噪声值 $r. m. s$ 单位为百万分率。

10.1.7 防护屏的影响

评估防护屏对试验结果的影响,应根据第 11 章中描述的程序,用 6 个厚度为 $(25 \pm 0.5) \text{ mm}$ 的黑色聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA),在 $(50 \pm 1) \text{ kW}/\text{m}^2$ 的辐射照度下进行试验。前 3 次试验应在移去防护屏的条件下进行,其余 3 次试验则在有防护屏的条件下进行。根据双侧 t 检验取 5% 的显著性水平,如果两组试验 t_{ig} 、 $\dot{q}_{A,180}$ 和 $\dot{q}_{A,max}$ 的平均值相差从统计学来说是可忽略的,那么就可以使用防护屏。这里,对于 3 个变量 (t_{ig} 、 $\dot{q}_{A,180}$ 和 $\dot{q}_{A,max}$) 的 t 检验应根据下列程序进行:

a) 对于两组的 3 个试验,通过下式计算平均值:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^3 x_i}{3} \dots\dots\dots (1)$$

和

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^3 y_i}{3} \dots\dots\dots (2)$$

b) 计算合并标准差 s_p :

$$s_p = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^3 (x_i - \bar{x})^2 + \sum_{i=1}^3 (y_i - \bar{y})^2}{4}} \dots\dots\dots (3)$$

c) 计算 t 检验统计量:

$$t_s = \left| \frac{\bar{x} - \bar{y}}{0.816 \ 5s_p} \right| \dots\dots\dots (4)$$

如果试验统计量不超过 2.776,或两个平均值相同,则 t 检验是成功的。

10.2 工作标定

10.2.1 概述

每个试验日开始试验时,应按下列顺序进行标定。当辐射照度改变时,也应对辐射锥进行标定。

10.2.2 称重设备的精度

称重设备标定应使用试验试样质量范围内的称重标准件。关闭辐射锥并使装置在进行标定之前冷却到环境温度。将装有 (250 ± 25) g的不燃称重标准件的试样安装架放置在称重设备上,用机械或电子方式调零。将质量在50 g到200 g之间的称重标准件轻轻放置在试样安装架上。稳定后,记录称重设备的输出值。再增加上述量范围的称重标准件,重复这一过程至少4次。标定结束时,在试样安装架上的所有称重标准件的总质量应至少为500 g。称重设备的精度即为称重标准件的质量和称重设备记录的输出值之间的最大差。

10.2.3 氧分析仪

氧分析仪校零和标定。标定时辐射锥可以工作也可以关闭,但不应处于升温阶段。开启风机,调节排气流量为 (0.024 ± 0.002) m³/s。校零时,将纯氮气通入分析仪,使其流量和压力与样气的相同。将分析仪的示值调为 (0.00 ± 0.01) %。通入干燥的环境空气时,则应将示值调为 (20.95 ± 0.01) %,并将流量设置为测试试样时使用的流量。每个试样测试后,应利用干燥的环境空气确保分析仪的示值为 (20.95 ± 0.01) %。

10.2.4 热释放速率标定

进行热释放速率标定是为了确定孔板系数 C 。标定时辐射锥可以工作也可以关闭,但不应处于升温阶段。开启风机,调节排气流量为 (0.024 ± 0.002) m³/s。以5 s的时间间隔开始收集基线数据,至少持续1 min。根据甲烷的净燃烧热为 50.0×10^3 kJ/kg,将甲烷通入标定燃烧器,通过标定的流量计得到对应 $\dot{q}_b = (5 \pm 0.5)$ kW的流量。平衡后,以5 s的采样周期采集数据,持续3 min。利用3 min内测得的 \dot{q}_b 、 T_c 、 Δp 和 X_{O_2} 数值的平均值,根据第12章中的公式(5)计算孔板系数 C 。 $X_{O_2}^0$ 由1 min基线测量期间测得的氧分析仪输出的平均值来确定。

也可利用在称重设备上放置一个专用器皿,在专用器皿内放入液体燃料(如酒精)的方法代替该项标定。用消耗的燃料总质量乘以燃料的净燃烧热,除以火焰的持续时间,得到平均的理论热释放速率。

10.2.5 辐射锥标定

每个试验日开始试验或改变辐射照度时,应利用热流计对辐射锥产生的辐射照度进行测量,并由此调节辐射照度控制系统,以使其达到所需辐射照度(误差不超过 $\pm 2\%$)。当热流计插入标定位置时,不得使用试样或试样安装架。辐射锥稳定在设定温度至少运行10 min,确保处于平衡状态。

10.3 非经常性标定

10.3.1 工作热流计的标定

工作热流计的标定最多间隔100个工作小时,应参见附录E的程序对比参照热流计进行。对比应在 $(10, 25, 35, 50, 65, 75$ 和 $100)$ kW/m²的辐射照度下进行。工作热流计和参照热流计读数的一致性应在 $\pm 2\%$ 以内。如果在整个热流量量程范围内,两者读数通过修正,使不一致性控制在 $\pm 2\%$ 以内,则该工作热流计可继续使用,否则应予替换。

10.3.2 热释放速率测量的线性

最多间隔100个工作小时,应进行该项标定。标定时,利用10.2.4在5 kW时的标定结果,以同样的程序,对 $1 \times (1 \pm 10\%)$ kW和 $3 \times (1 \pm 10\%)$ kW的流量进行进一步的标定。在1 kW和3 kW时测得的热释放速率应与设置值相差在 $\pm 5\%$ 以内。

10.3.3 标定燃烧器用流量计的精度

每6个月,应对标定燃烧器用流量计的精度进行校验。根据10.2.4确定的标定常数,与前一次流量计校验后,首次热释放速率标定测得的标定常数相差大于5%时,也应对流量计的精度进行校验。流

量计精度的校验,使用的是一支与工作流量计串联的参照流量计,并按照 10.2.4 进行燃烧器标定。在 3 min 的数据采集期间,两支流量计的不一致性应在 $\pm 3\%$ 以内。如果两个测量之间的差超过 $\pm 3\%$,那么应对工作流量计进行再标定。

11 试验程序

11.1 一般预防措施

警告:应采取适当预防措施进行安全防护,燃烧试验中应注意,试验试样暴露在辐射锥下时存在散发有毒或有害气体的可能性。

试验过程中伴随高温和燃烧。因此,可能存在引燃外部的物体或衣物的危险。在插入和移去试验试样时,操作人员应使用防护手套。在高温情况下,接触辐射锥或与其相连的固定设备时,应使用防护手套。不应触摸火花点火器,因其带有 10 kV 的高电压。试验之前,为使装置运转正常应检查其排气系统,且应将燃烧产物排放到排气能力足够大的建筑排气系统中。某些类型试样的熔融物或尖锐碎片有可能喷溅,因此应注意保护眼睛不受伤害。

11.2 试验准备

11.2.1 检查 CO_2 过滤器和水分过滤器。如必要则更换吸附剂。排净冷阱中的凝结水。冷阱的正常工作温度不应超过 4°C 。

如果在检查期间打开过气体取样系统线路中的分离器或过滤器,宜检查气体取样系统的泄露情况(开启试样泵),如以与通入样品气相同的流量和压力通入纯氮气(气源尽可能接近环形取样器),此时氧分析仪读数宜为零。

11.2.2 按 6.5 或 7.5 的规定,调节辐射锥下表面和试样上表面之间的距离。

11.2.3 接通辐射锥(参见 A.4.1)和风机的电源。通常气体分析仪、称重设备和压力传感器的电源不应关闭。

11.2.4 调节排气流量为 $(0.024 \pm 0.002) \text{ m}^3/\text{s}$ 。

11.2.5 按 10.2 进行标定。升温期间及试验间歇期间,在称重设备的上方放置一个隔热层(例如,带耐热纤维垫的空试样安装架或水冷的辐射屏蔽层),以避免过多的热量传递到称重设备。

11.3 步骤

11.3.1 开始采集数据。采集 1 min 的基线数据。标准采集周期为 5 s,预计燃烧时间短暂(见 7.3)的情况除外。

11.3.2 将辐射屏蔽层放置到位(见 6.2)。移去保护称重设备的隔热层(见 11.2.5)。将根据 8.3 制备的试样安装架和试样放到称重设备上。

注:辐射屏蔽层在插入之前应冷却到 100°C 以下。

11.3.3 插入火花塞,根据屏蔽层的类型,按照下述规定,以正确的顺序移去辐射屏蔽层。

对于 6.2a)屏蔽层,移去屏蔽层,并开始试验。在 1 s 之内移去屏蔽层,插入并开启点火器。

对于 6.2b)屏蔽层,屏蔽层应在插入后 10 s 之内移去,并开始试验。在 1 s 之内移去屏蔽层,插入并开启点火器。

11.3.4 记录闪燃或短暂火焰出现的时间。当持续火焰出现时,记录时间,并关闭火花塞,移去火花点火器。如果在关闭火花塞之后火焰熄灭,重新插入火花点火器,并在 5 s 之内打开火花塞。在这种情况下,保持火花塞的工作状态至整个试验完成。在试验报告中记录上述情况(见第 13 章)。

11.3.5 下列情况下,停止采集数据:

- a) 持续燃烧 32 min 后(32 min 包括 30 min 的试验时间和 2 min 的试验后追加数据收集时间);
- 或

- b) 试样 30 min 内未被引燃;或
- c) X_{O_2} 回到试验前氧气浓度值的 0.01% 范围内,持续 10 min;或
- d) 试样的质量变成零。

任何上述情况出现均可终止试验,但最短的试验持续时间应为 5 min。观察并记录试样的变化,如熔化、膨胀和爆裂。

11.3.6 移去试样和试样安装架。将隔热层放置在称重设备上。

11.3.7 应采用 3 个试样进行试验并按第 13 章所述进行报告。应对 3 个试样在 180 s 内的平均热释放速率进行比较。若其中的一个与这 3 个的平均值之差超过 10%,则应另取 3 个试样进行试验。这种情况下,应报告这 6 个数据的算术平均值。

注:如果试样因熔化溢出试样安装架、爆炸性剥落、试样过度膨胀接触到火花点火器或辐射锥下表面,对试验数据的有效性有影响。

12 计算

12.1 概述

本条中的公式是基于图 6 气体分析系统,只测量了氧气的情况。对于有辅助气体(CO_2 、 CO 或 H_2O)分析装置,而未从氧气的取样线路中去除 CO_2 的情况,公式可参见附录 F。如果去除了 CO_2 (即使是单独对 CO_2 进行了测量),则应使用公式(5)~公式(7)。

12.2 耗氧分析的标定常数

每个试验日应进行 10.2.4 规定的热释放速率标定。如果某一次的标定常数 C 与前一次的差超过 5%,则表明装置可能存在问题。标定常数 C ,由下式计算:

$$C = \frac{\dot{q}_b}{(12.54 \times 10^3)(1.10)} \sqrt{\frac{T_e}{\Delta p}} \cdot \frac{1.105 - 1.5X_{O_2}}{X_{O_2}^0 - X_{O_2}} \dots\dots\dots(5)$$

式中:

\dot{q}_b ——供给甲烷的热释放速率,单位为千瓦(kW)(见 10.2.4)。

其中 12.54×10^3 是甲烷的 $\Delta h_c/r_0$,单位为千焦每千克(kJ/kg);1.10 是氧气和空气的摩尔质量比。

12.3 热释放速率

12.3.1 在进行其他计算之前,利用记录的氧分析仪数据和滞后时间,根据下式计算氧分析仪读数:

$$X_{O_2}(t) = X_{O_2}^1(t + t_d) \dots\dots\dots(6)$$

12.3.2 热释放速率 $\dot{q}(t)$,由下式计算:

$$\dot{q}(t) = (\Delta h_c/r_0)(1.10)C \sqrt{\frac{\Delta p}{T_e}} \cdot \frac{X_{O_2}^0 - X_{O_2}}{1.105 - 1.5X_{O_2}} \dots\dots\dots(7)$$

式中:

试样的 $\Delta h_c/r_0$ 取值为 13.1×10^3 kJ/kg,除非已知更准确的值,而且 $X_{O_2}^0$ 是根据 1 min 的基线测量期间测得的氧分析仪输出的平均值来确定的。

12.3.3 单位面积的热释放速率 $\dot{q}_A(t)$,由下式计算:

$$\dot{q}_A(t) = \dot{q}(t)/A_s \dots\dots\dots(8)$$

式中:

A_s ——试样的初始暴露面积,为 0.0088 m^2 。

12.4 排气管道的流量

排气管道内的质量流量 \dot{m}_e ,单位为千克每秒(kg/s),由下式计算:

$$\dot{m}_e = C \sqrt{\frac{\Delta p}{T_e}} \dots\dots\dots(9)$$

12.5 质量损失速率

12.5.1 每一时间间隔的质量损失速率 \dot{m} ,可以利用下列五点差分公式计算。

对于第一次采集($i=0$):

$$-\dot{m}_{i=0} = \frac{25m_0 - 48m_1 + 36m_2 - 16m_3 + 3m_4}{12\Delta t} \dots\dots\dots(10)$$

对于第二次采集($i=1$):

$$-\dot{m}_{i=1} = \frac{3m_0 + 10m_1 - 18m_2 + 6m_3 - m_4}{12\Delta t} \dots\dots\dots(11)$$

对于 $1 < i < n-1$ 的任何一次采集(这里 n 是采集的总次数):

$$-\dot{m}_i = \frac{-m_{i-2} + 8m_{i-1} - 8m_{i+1} + m_{i+2}}{12\Delta t} \dots\dots\dots(12)$$

对于与最后一次采集相邻的那次采集($i=n-1$):

$$-\dot{m}_{i=n-1} = \frac{-3m_n - 10m_{n-1} + 18m_{n-2} - 6m_{n-3} + m_{n-4}}{12\Delta t} \dots\dots\dots(13)$$

对于最后一次采集($i=n$):

$$-\dot{m}_{i=n} = \frac{-25m_n + 48m_{n-1} - 36m_{n-2} + 16m_{n-3} - 3m_{n-4}}{12\Delta t} \dots\dots\dots(14)$$

12.5.2 主要燃烧期(即燃料质量损失从 10%到 90%变化期间)的质量损失速率 $\dot{m}_{A,10-90}$,由下式给出:

$$\dot{m}_{A,10-90} = \frac{m_{10} - m_{90}}{t_{90} - t_{10}} \times \frac{1}{A_s} \dots\dots\dots(15)$$

式中:

$$m_{10} = m_s - 0.10\Delta m$$

$$m_{90} = m_s - 0.90\Delta m$$

$$\Delta m = m_s - m_i$$

注:有效燃烧热 $\Delta h_{c,eff}$ 的计算公式,参见附录 C。

13 试验报告

试验结果仅与特定试验条件下试样的特性相关。其结果并非评价制品在使用时潜在火灾危险性的唯一标准。

试验报告应尽可能全面,并应包括试验期间观察到的现象及出现的问题。报告中应清楚地叙述所有的测量部分。下面给出建议报告的内容。

在试验报告中也应给出下列基本信息:

- a) 实验室名称和地址。
- b) 委托试验单位名称和地址。
- c) 制造商/供应商的名称和地址。
- d) 试验日期。
- e) 试验者。
- f) 商品名和试样标识码/号。
- g) 组成或种类识别。

- h) 试样厚度¹⁾,单位为毫米(mm);质量¹⁾,单位为克(g)。对于复合材料和组件,应给出每种组分的公称厚度、密度及整个试样的密度。
- i) 试样颜色。
- j) 试样制备情况。
- k) 试样安装,测试表面,以及使用的特殊安装程序(如对于膨胀试样)。
- l) 孔板流量标定常数 C 。
- m) 辐射照度¹⁾,单位为千瓦每平方米(kW/m^2);排气流量¹⁾,单位为立方米每秒(m^3/s)。
- n) 相同条件下试验的重复试样数目(应最少是3个,除非是探索性试验)。
- o) 持续燃烧时间¹⁾,单位为秒(s)。
- p) 试验持续时间¹⁾,即根据11.3.5试验开始到结束的时间,单位为秒(s)。
- q) 整个试验记录的热释放速率曲线;单位面积热释放速率¹⁾,单位为千瓦每平方米(kW/m^2)。
- r) 引燃后,前180 s和300 s内或其他时间段热释放速率的平均值¹⁾ $\dot{q}_{A,180}$, $\dot{q}_{A,300}$ 和峰值¹⁾ $\dot{q}_A(\dot{q}_{A,\max})$,单位为千瓦每平方米(kW/m^2)。

对于未出现持续火焰的试样,从试验开始后最后一个热释放速率负值之后的下一个读数开始记录。某些试样未出现可见的持续火焰,但却显示出非零的热释放速率数值。一般说来,应该出现负值,因为在试样开始燃烧之前输出数据为 $0 \pm n$ (噪声)。

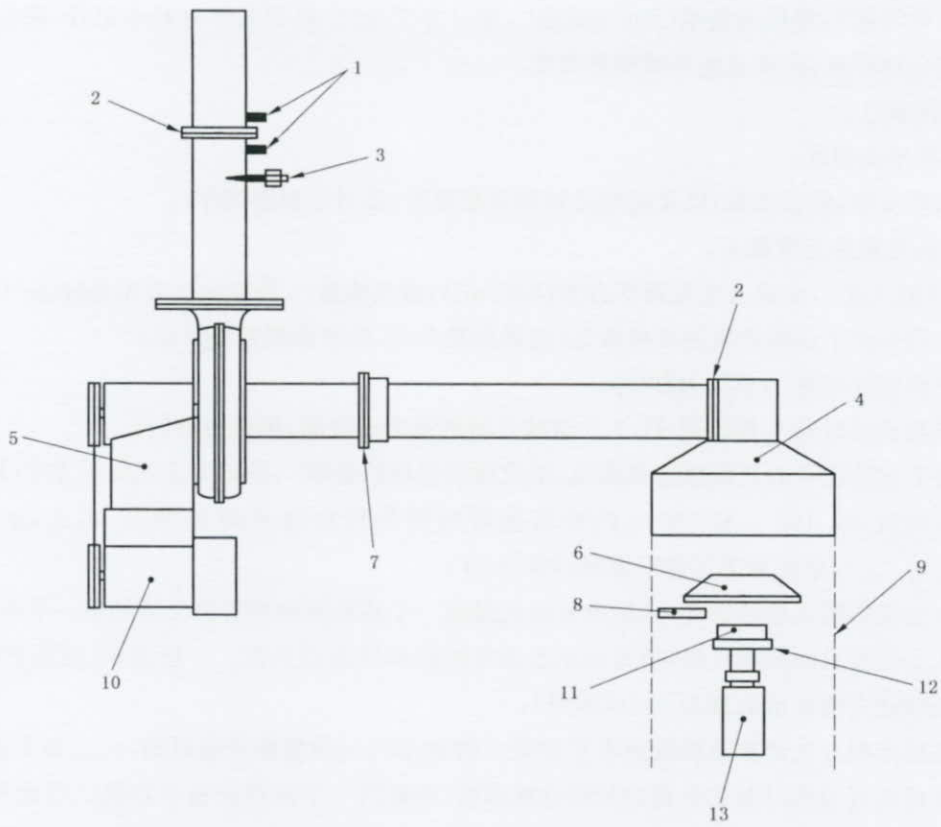
应利用梯形积分法计算热释放速率平均值。例如,以5 s的数据采集周期, $\dot{q}_{A,180}$ 如下得出:

- 1) 将最接近引燃时刻采集到的热释放速率值,或最后一个热释放速率负值之后的那次采集值作为积分计算的初值,然后将此初值之后的35次采集到的热释放速率值求和;如果试验在180 s内结束,这种情况下用实验时间内的平均值作为热释放速率的平均值;
 - 2) 将1)中的积分初值的一半,和此初值后的第36次采集到的热释放速率值的一半相加;
 - 3) 将1)中35次采集的求和值与2)中的求和值相加,再乘以采集周期(5 s),然后除以180。
- s) 试样的放热总量¹⁾,单位为兆焦每平方米(MJ/m^2)。放热总量应从试验开始后最后一个热释放速率负值的下一个读数开始计算,到试验记录的最后读数为止。

放热总量也可利用梯形积分法计算。此时,利用的第一次采集是试验开始出现最后一个热释放速率负值之后的那一次采集。

- t) 持续燃烧时的质量¹⁾ m_s ;试验后剩余质量 m_f ,单位均为克(g)。
- u) 试样的质量损失¹⁾,单位为克每平方米(g/m^2);试样平均质量损失速率 \dot{m} ,单位为克每平方米秒 [$\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$],根据引燃到试验结束期间的数据确定。
- v) 试样单位面积上平均质量损失速率¹⁾ $\dot{m}_{A,10-90}$,单位为克每平方米秒($\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$),根据质量损失10%~90%期间的数据确定。
- w) 对于所有的重复试样,将o)、p)、r)、s)、t)、u)和v)条中确定的数值取其算术平均。
- x) 其他现象¹⁾,如短暂燃烧或闪燃。
- y) 试验中出现的问题¹⁾。

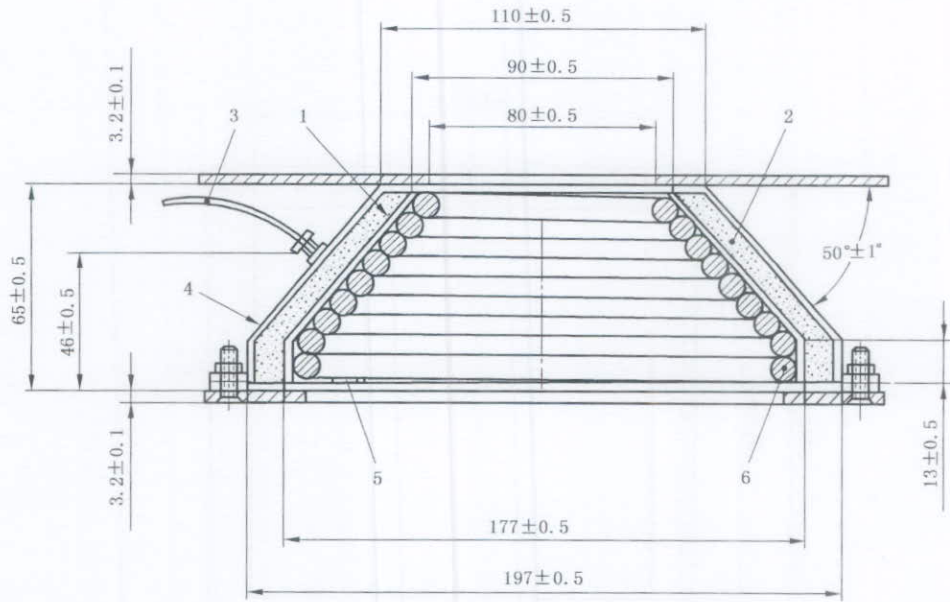
1) 每个试样均报告。



- 1——压力孔；
- 2——孔板；
- 3——热电偶(位于烟道中心线)；
- 4——集烟罩；
- 5——风机；
- 6——辐射锥；
- 7——环形取样器；
- 8——火花塞；
- 9——防护屏(可选)；
- 10——风机的电机；
- 11——定位架和试样；
- 12——试样安装架；
- 13——称重设备。

图 1 装置

单位为毫米



- 1—内锥壳；
- 2—耐火纤维衬层；
- 3—热电偶；
- 4—外锥壳；
- 5—衬垫片；
- 6—发热元件。

图 2 辐射锥

单位为毫米

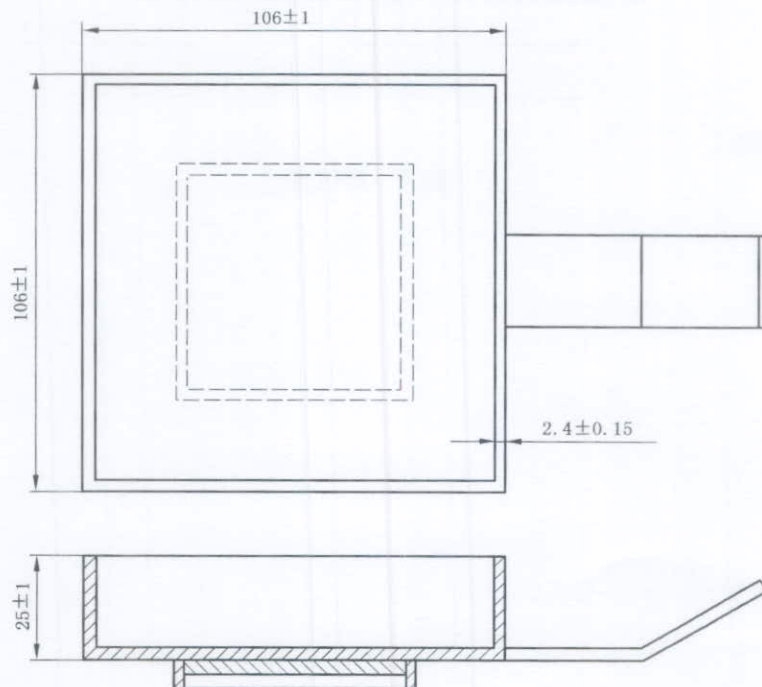
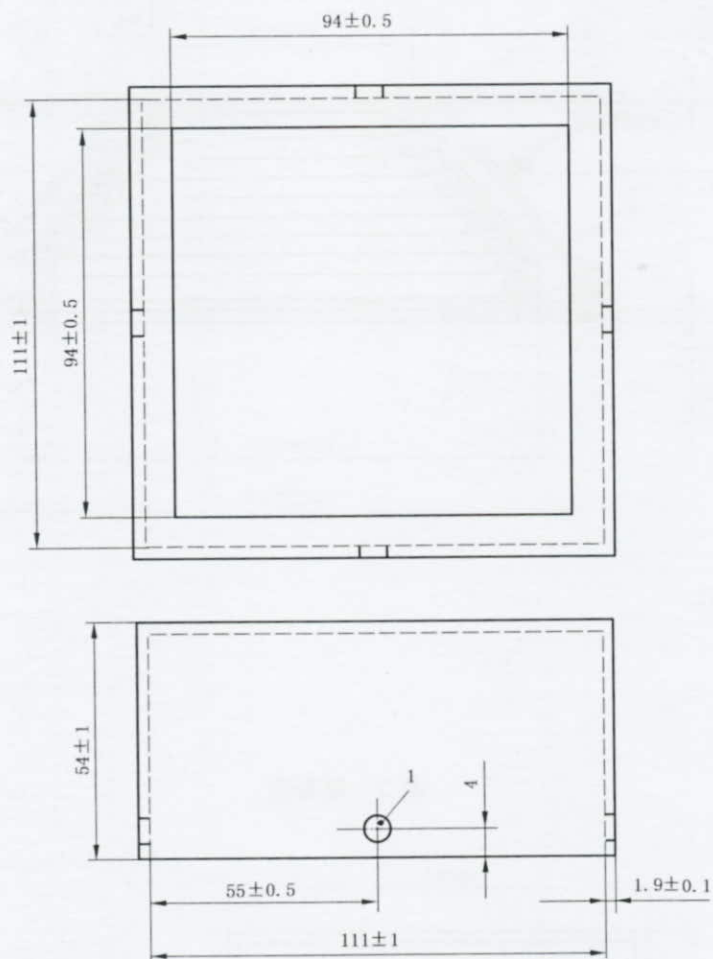


图 3 试样安装架

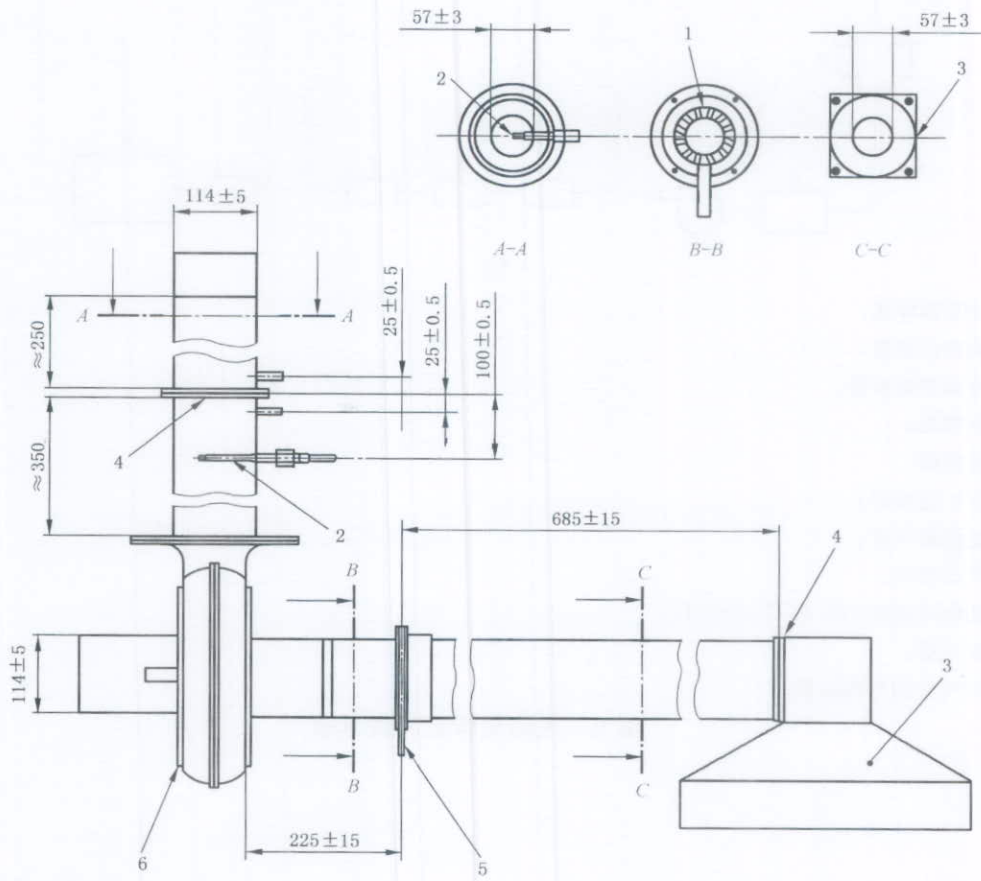
单位为毫米



1—10×32 螺丝孔。

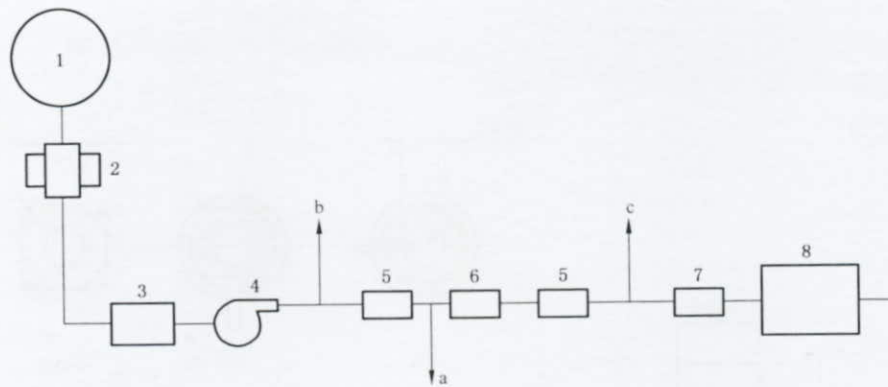
图 4 定位架

单位为毫米



- 1——环形取样器；
- 2——热电偶；
- 3——集烟罩；
- 4——孔板；
- 5——环形取样器(取样孔对着风机)；
- 6——风机。

图5 排气系统



- 1——环形取样器；
- 2——颗粒过滤器；
- 3——冷阱和排水管；
- 4——取样泵；
- 5——除湿器；
- 6——CO₂ 过滤器；
- 7——流量调节器；
- 8——氧分析仪；
- a——通向可选的 CO₂ 和 CO 分析仪；
- b——废气管；
- c——废气管的可选位置。

图 6 气体取样及测量系统

附 录 A
(资料性附录)
注释及操作员指导

A.1 简介

本附录的目的在于将有关这种方法的背景资料、装置和得到的数据,提供给试验操作员及试验结果的用户。

A.2 热释放速率的测量

A.2.1 热释放速率是确定火灾危险性的最重要的参数之一。在一个典型火灾中,许多由多种表面组成的制品对火灾的发展有影响,因而对该制品火灾危险性的评估变得十分复杂。当每一个分离表面要引燃时,首先宜确定其热释放速率。由于已经燃烧的制品会对邻近制品产生辐射影响,必须知道由它引发的火灾的大小,同时对每一个表面上的火焰蔓延也应进行评估。如果已知给定的辐射照度下单位面积的热释放速率,就可以利用这个试验数据,来计算整个表面的热释放速率(时间的函数)了。那么,总的放热量是所有材料所有表面上的热量总和。

A.2.2 使火灾放出的热量计算复杂化的因素有:

- a) 卷入火灾的每种单一材料的燃烧持续时间不同;
- b) 每个表面的几何尺寸;
- c) 材料的燃烧特性,比如:熔融、滴落或结构倒塌。

A.2.3 本试验方法没有规定辐射等级。宜根据每个被评价的制品分别确定辐射等级。在给定使用条件和具体制品时,通常需要根据一些全尺试验来确定用于计算热释放速率的时间。

对于研究性试验,建议使用火花点火器和 35 kW/m^2 的初始辐射照度;没有委托单位的进一步指定时,建议以 25 kW/m^2 、 35 kW/m^2 和 50 kW/m^2 的辐射照度进行试验。根据得到的结果决定是否需要进行其他不同辐射照度等级的试验。

A.3 工作原理的选择

A.3.1 目前已经开发了一些用于测量热释放速率的装置。传统上,最简单的方法是直接测量由热滞后空间模拟的绝热环境中烟气的焓。真正的绝热装置价格昂贵。燃烧室是以一种简易的方式隔热的,因而得到的热释放速率明显低于真实值,因此只能作为经验标定。另外,这种标定可能对可燃物的灰分比较敏感。更先进的设计是使用一个恒温仪器,它取代了燃烧室,在这样一个能够保持恒温的仪器内,对热释放速率进行测量。这种设计得到了更好的结果,但是,实际仪器复杂且价格昂贵。

A.3.2 无损失的直接测量热比较困难。但是,无损失地收集全部燃烧产物,测量烟气中的氧浓度就简单多了。利用耗氧原理的这种测量可以计算热释放速率。这种原理表明,对于大多数燃烧物每消耗 1 kg 氧气释放的热量等于 $13.1 \times 10^3 \text{ kJ}$ 。通常,对于大多数可燃物这个放热量的变化范围大约为 $\pm 5\%$ 。这个原理形成了本标准叙述的试验方法的基础。即使制品的有效组成变成了 CO 或烟灰,而不是 CO_2 ,这个方法依然有用;这种情况下,可以使用修正因子。

过高的 CO 浓度可能是由于氧气供给不足造成的,在本试验方法的正常工作条件下,这种情况不可能发生,因为进入的氧气量是足够的。

A.4 热锥的设计

A.4.1 各种热释放速率测量方法的经验表明,为了得到最小误差的辐射照度,试样宜放置在恒温调节

加热器,或水冷盘或开放的空气条件下。因为在固体表面附近,如果没有温度调节,由于试样火焰的加热作用,会使附近的空气温度升高,然后作为另外的辐射热源反作用于试样,进而可能导致误差。此外,当耗氧原理作为测量原理时,不适合使用燃气加热器,因为即使考虑了燃气的氧消耗,也会对氧气读数产生影响。

A.4.2 截锥形的加热器,最初是为 ISO 5657 研制的,在本标准中已经成型。这些改动包括提供较高的辐射照度、温度控制、流线改进,而且采用了一种更加坚固的设计。在水平定位方向,锥的形状近似采取火羽流的轮廓,中心位置开孔,使气流能够排出而不影响加热器。空气的卷吸作用保证了火焰不能到达锥的侧面。

A.4.3 由于加热器的形状呈锥形,所以此装置通常被称为锥形量热仪。

A.5 点火器

在许多装置中试验试样的引燃是利用气体点火器来实现的。气体点火器会影响热释放速率的计算。此外,其设计也有困难,因为点火器应处于试样中心,要求受气流影响不会熄灭且耐热,关键是不应有额外的热作用于试样。电火花点火器由于没有上述这些困难而被采用。火花点火器只需不定期的清洁及对电极进行调节。

A.6 背面的条件

接近燃烧终止时刻时,试样背面的热损失可能会影响燃烧速率,可通过使用一层绝热材料来减小其影响。

附录 B
(资料性附录)
分解、精度和误差

B.1 分解

甲烷标定研究表明,通常热释放速率±1.5%范围内呈线性波动(主要由于火焰自身的紊流),在1 kW~12 kW范围内,通过量热仪测得热释放速率值波动在5%以内,在5 kW~12 kW范围内的波动在2%以内。其他气体的标定的结果类似。将标定气体以一个稳定的速度输入燃烧器。但固体可燃物燃烧的均匀性是由表面高温分解是否均匀决定的。在某些情况下,燃烧均匀性可能显示出大幅度的波动。例如,聚乙烯(甲基丙烯酸甲酯)的波动性通常大于木制品。此外,对于固体材料,分解是由试样的热解过程决定的,而不受仪器限制。

B.2 响应的速度

任何用于测量热释放速率的方法,其响应速度是由最慢的响应元件决定的。在这种耗氧方法响应最慢的是氧分析仪。通常情况下,压力传感器和热电偶的响应时间较快。

B.3 精度

当在多个实验室进行试验时,B.3和B.4中的重复性极限 r 和再现性极限 R 根据ISO 5725:1986计算。

注:ISO 5725-1的最新版本提出 r 和 R 为 $1\times$ 关联标准偏差,而不是 $2.8\times$ 关联标准偏差。

根据ISO/TC 92/SC 1/WG 5在多个实验室进行了一系列试验。使用的草案功能上与本标准相同。试验的材料是:25 mm的黑色PMMA($\rho=1\ 180\text{ kg/m}^3$),30 mm的硬质聚氨酯泡沫($\rho=33\text{ kg/m}^3$),13 mm的粒子板($\rho=640\text{ kg/m}^3$),3 mm的硬纸板($\rho=1\ 010\text{ kg/m}^3$),10 mm的石膏板($\rho=1\ 110\text{ kg/m}^3$)和10 mm的耐火处理的粒子板($\rho=750\text{ kg/m}^3$)。每种材料以两种定位(水平和铅垂)和两种辐射照度(25 kW/m^2 和 50 kW/m^2)各进行了3次重复试验,在6~8个实验室进行了试验。

根据ASTM E05 SC 21 TG 60进行的类似系列试验得到的数据,对上述试验的数据进行了补充,再一次使用了功能相同的草案、相同的辐射照度、相同的定位方向和重复试样数目。因为ASTM试验中 r 和 R 的结果显示了与ISO/TC的结果基本类似的趋势,所以将这些数据作为组合数据集进行了分析。剔除了一种与实验室数据不同的(即对于 $\dot{q}_{A,180}$)ASTM数据。有6个实验室测试了下列材料:6 mm的耐火ABS($\rho=325\text{ kg/m}^3$),12 mm的粒子板($\rho=640\text{ kg/m}^3$),6 mm的黑色PMMA($\rho=1\ 180\text{ kg/m}^3$),6 mm的聚乙烯($\rho=800\text{ kg/m}^3$),6 mm的PVC($\rho=1\ 340\text{ kg/m}^3$)和25 mm的硬聚氨酯酸酯泡沫($\rho=28\text{ kg/m}^3$)。

根据ISO 5725:1986,利用这个完整的数据集,计算了关于5种变量的95%置信度的重复性极限 r 和再现性极限 R 数值。 r 和 R 的数值等于 $2.8\times$ 适当标准偏差。被选为代表试验结果的变量是: t_{ig} 、 $\dot{q}_{A,max}$ 、 $\dot{q}_{A,180}$ 、 $Q_{A,tot}$ 和 $\Delta h_{c,eff}$ 。描述 r 和 R 的是线性回归模型(ISO 5725:1986中的公式II), r 和 R 是上述5个变量对所有的重复试样和所有实验室的平均数的函数。回归方程在下面给出,同时也说明了得到拟合关系的平均值的范围。

在5 s~150 s范围内关于 t_{ig} 的结果是:

$$r = 4.1 + 0.125t_{ig} \quad \dots\dots\dots(B.1)$$

$$R = 7.4 + 0.220t_{ig} \quad \dots\dots\dots(B.2)$$

在 $70\text{ kW/m}^2\sim 1\ 120\text{ kW/m}^2$ 范围内关于 $\dot{q}_{A,max}$ 的结果是:

$$r = 13.3 + 0.131\dot{q}_{A,max} \dots\dots\dots (B.3)$$

$$R = 60.4 + 0.141\dot{q}_{A,max} \dots\dots\dots (B.4)$$

在 70 kW/m²~870 kW/m² 范围内关于 $\dot{q}_{A,180}$ 的结果是:

$$r = 23.3 + 0.037\dot{q}_{A,180} \dots\dots\dots (B.5)$$

$$R = 25.5 + 0.151\dot{q}_{A,180} \dots\dots\dots (B.6)$$

在 5 MJ/m²~720 MJ/m² 范围内关于 $Q_{A,tot}$ 的结果是:

$$r = 7.4 + 0.068Q_{A,tot} \dots\dots\dots (B.7)$$

$$R = 11.8 + 0.088Q_{A,tot} \dots\dots\dots (B.8)$$

在 7 kJ/g~40 kJ/g 范围内关于 $\Delta h_{c,eff}$ 的结果是:

$$r = 1.23 + 0.050\Delta h_{c,eff} \dots\dots\dots (B.9)$$

$$R = 2.42 + 0.055\Delta h_{c,eff} \dots\dots\dots (B.10)$$

这些公式的意义可以借助一个例子很好地说明。假设一个实验室测试了一个某种材料的试样,并确定了引燃时间为 100 s。如果现在同一实验室对同样的材料进行第二次试验, r 的估计值为:

$$r = 4.1 + 0.125 \times 100 = 17 \text{ s}$$

那么第二次试验结果落在 83 s 和 117 s 之间的可能性为 95%。那么,假设相同的材料由不同的实验室来测试, R 的估计值为:

$$R = 7.4 + 0.22 \times 100 = 29 \text{ s}$$

那么这个实验室的测试结果落在 71 s 和 129 s 之间的可能性为 95%。

B.4 精度(对于膨胀或变形材料的试验程序)

根据 ISO/TC 61/SC 4/WG 3 在多个实验室进行了膨胀或变形材料的一系列试验。使用的草案功能上与本标准相同,按照 7.5 条的规定,试样表面和辐射锥下表面之间的距离为 60 mm(代替标准的 25 mm)。在这些试验中试验的材料是:9.6 mm 的黑色 PMMA、4 mm 的 PVC、3 mm 的耐火聚丙烯、5.8 mm 和 7.8 mm 的聚碳酸酯。每种材料取 3 个重复试样以水平定位和 50 kW/m² 的辐射照度,在 10 个实验室进行了试验。

根据 ISO 5725:1986,对 3 个变量: t_{ig} 、 $\dot{q}_{A,max}$ 和 $Q_{A,tot}$,计算了 95%置信度的重复性极限 r 和再现性极限 R 数值。线性回归模型(ISO 5725:1986 中的公式 II)用来描述 r 和 R , r 和 R 是上述 3 个变量对所有的重复试样和所有实验室的平均数的函数。回归方程在下面给出,同时也说明了得到拟合关系的平均值的范围。

在 27 s~167 s 范围内关于 t_{ig} 的结果是:

$$r = 2.3 + 0.255t_{ig} \dots\dots\dots (B.11)$$

$$R = 2.3 + 0.652t_{ig} \dots\dots\dots (B.12)$$

在 83 kW/m²~855 kW/m² 范围内关于 $\dot{q}_{A,max}$ 的结果是:

$$r = 36.6 + 0.064\dot{q}_{A,max} \dots\dots\dots (B.13)$$

$$R = 36.6 + 0.330\dot{q}_{A,max} \dots\dots\dots (B.14)$$

在 27 MJ/m²~319 MJ/m² 范围内关于 $Q_{A,tot}$ 的结果是:

$$r = 15.5 + 0.008Q_{A,tot} \dots\dots\dots (B.15)$$

$$R = 15.5 + 0.125Q_{A,tot} \dots\dots\dots (B.16)$$

公式(B.11)和公式(B.12)与公式(B.1)和公式(B.2)的比较表明,由于试样表面和辐射锥下表面之间距离增加到 60 mm,引燃时间的重复性和再现性变得很差。其余两个变量的重复性看起来不受影响[见公式(B.3)和公式(B.7)与公式(B.13)和公式(B.15)的对比],但它们的再现性则因 60 mm 的距离而略显变差[见公式(B.4)和公式(B.8)与公式(B.14)和公式(B.16)的对比]。

B.5 误差

对于未知化学组分的固体试样,如建筑中使用的材料、家具等,已经证明使用耗氧原理 $\Delta h_c/r_0 = 13.1 \times 10^3 \text{ kJ/kg}$ 的标准值,得到了 $\pm 5\%$ 的期望误差范围。对于只有单一热解机制的均匀材料,通过氧弹仪测量确定 Δh_c 和通过最终元素分析得到 r_0 ,可以降低这个误差。然而,对于大多数试验,这是不实际的,因为试样通常是合成的、非均匀的或表现多次降解反应。但是,对于参照材料认真确定 $\Delta h_c/r_0$,可以大大地减少误差。

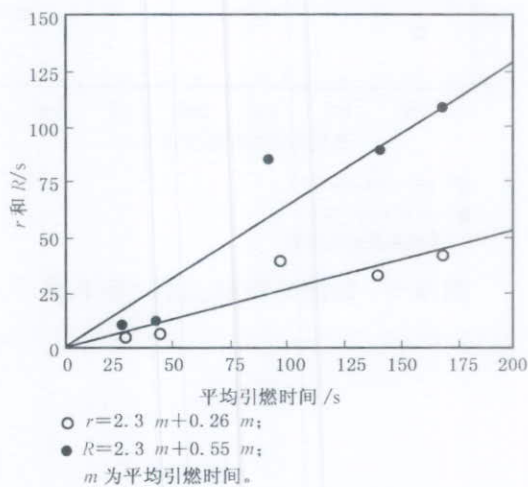


图 B.1 膨胀材料 t_{ig} 的 r 和 R 值

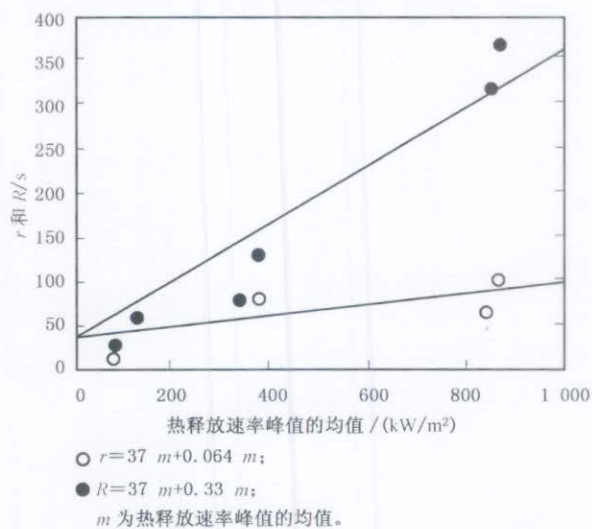


图 B.2 膨胀材料 $\dot{q}_{\Delta, \max}$ 的 r 和 R 值

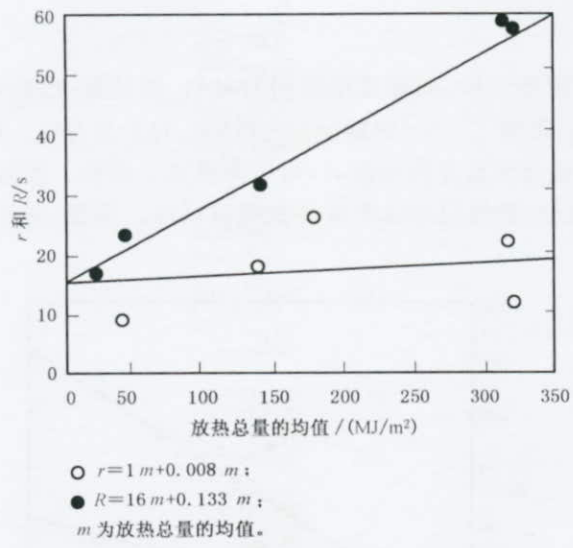


图 B.3 膨胀材料 $Q_{A,tot}$ 的 r 和 R 值

附录 C
(资料性附录)
质量损失速率和有效燃烧热

C.1 有效燃烧热

只具有单一降解模式的均质试样,燃烧期间的有效燃烧热是个常数,并且小于理论净燃烧热值。例如大多数有机液体具有单一降解模式,因此它的有效燃烧热恒定。相反,纤维素制品具有不只一种的降解模式,因此它的有效燃烧热是变化的。对于具有不只一种降解模式,或合成材料或非均质材料,有效燃烧热不一定是常数。有效燃烧热和质量损失速率可作为材料火灾特性的补充信息。

注:对于含水分或有分子结合水的材料,测得的质量损失将不能完全反映燃烧热。

C.2 符号

$\Delta h_{c,eff}$ ——有效净燃烧热,单位为兆焦每千克(MJ/kg)。

C.3 计算

对于从引燃时间开始,按每个时间间隔计算的质量损失速率 \dot{m} (见 12.5.1),可用于确定随时间变化的有效燃烧热值:

$$\Delta h_{c,eff} = \frac{\dot{q}(t)}{-\dot{m}} \quad \dots\dots\dots (C.1)$$

由于确定质量损失速率时采用了数值差分方法,这样比直接从仪器读数得到的测量噪声更大,因此最好计算 $\Delta h_{c,eff}$ 的平均值。为了得到这样的平均值,公式(C.1)中的分子和分母应分别进行平均,而不是计算比值的平均值。例如在整个试验上的平均 $\Delta h_{c,eff}$,由下式得出:

$$\Delta h_{c,eff} = \frac{\sum \dot{q}(t) \Delta t}{m_s - m_t} \quad \dots\dots\dots (C.2)$$

上面的求和是在引燃开始后的整个试验持续时间内进行的。

附录 D
(资料性附录)
垂直定位的测试

D.1 引言

本标准的正文部分只涉及水平定位的试验。本标准也适用于制品的最终使用方向是垂直的情况,如墙衬。因为这种试验方法不代表实尺制品的缩尺模型,而只是测试试样对规定的外部辐射的基本响应。对试样的总加热量是外部辐射热加上来自试样本身燃烧的热流之和。两种定位方式,来自试样本身燃烧的热流不同。应当注意的是,实验室规格试样的这种燃烧热流与实尺制品相比较,它们之间没有关系,而是因制品使用的不同而不同。实验室规格的热释放速率和实尺制品热释放速率之间的关系,宜确定一个试验辐射值,与实验室设定的辐射值相比,该值应更接近于实尺制品暴露在火灾中的辐射热流值。

标准的试验定位是水平的,因为对于大多数试样,水平定位使试样融化、滴落和散落带来的试验问题较少。由于热解物在火花隙处的分布更广,因此水平定位时引燃数据的再现性更好。在某些特定研究中,也可采用垂直定位方式,因为在这种方式下更便于安装光学高温计、试样热电偶及其他的专门仪器。垂直定位的测试需要对试验装置和试验步骤进行一些细微的调整。调整方式如下。

D.2 装置的调整

D.2.1 锥形辐射电加热器

为了在垂直定位上试验,锥形加热器组件应向上旋转 90° ,使热锥的下表面垂直,并平行于试样的暴露表面。

D.2.2 试样安装架

垂直定位试验中试样安装架与 6.5 所述不同。如图 D.1 所示,带有一个盛放少量熔化物的熔滴槽。

D.3 试样准备

按 8.3.1 中所述,将铝铂包覆的试样安装在垂直试样安装架中,背面衬以一层耐火纤维垫(公称密度 65 kg/m^3),纤维垫厚度根据试样厚度确定,但不应少于 13 mm 。在纤维垫层下面应放置一层硬的耐火纤维板。纤维板厚度应使一旦插上弹性钢丝卡(见图 D.1)后,所有组件能固定在一起。锥的高度要调整到使辐射锥的轴线与试样暴露表面的中心对准。

D.4 加热器的标定

应按 10.2.5 对垂直定位的加热器进行标定。热流计靶面朝向加热器,放置在与垂直试样表面中心相同的位置上。

注:下表面采用厚度为 $4.8\text{ mm}\pm 0.1\text{ mm}$ 的不锈钢板。其他部位采用厚度为 $1.59\text{ mm}\pm 0.1\text{ mm}$ 的不锈钢板。

D.5 试验步骤

垂直定位的试验步骤与第 11 章中所述的水平定位试验步骤基本相同。试验前垂直试样安装架的放置,应使试样的暴露表面平行于辐射锥的下表面且相距 25 mm 。放置 6.9 中所述的火花塞时,应使火花塞间隙位于试样暴露表面并距试样安装架顶部 5 mm 。

单位为毫米

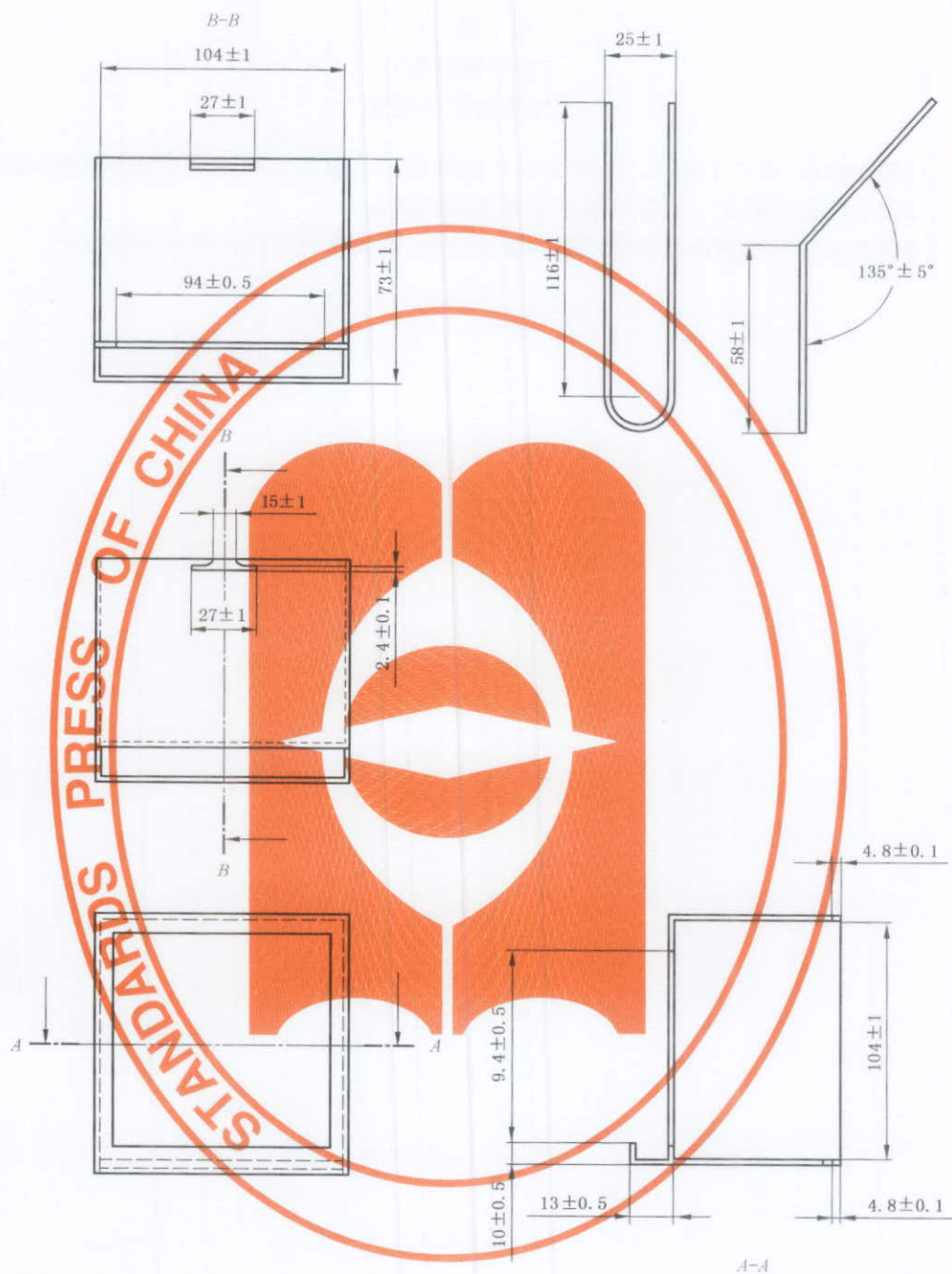


图 D.1 垂直定位的试样安装架

附录 E
(资料性附录)
工作热流计的标定

可利用锥形加热器(见 6.1)对 6.12 所述的工作热流计及标准参照热流计进行比较,比较时,可将热流计依次放置在标定位置上。要保证整个装置达到热平衡。

为了更好地防止标准参照热流计的灵敏度发生变化,建议使用两只标准参照热流计。

附录 F

(资料性附录)

有辅助气体分析的热释放速率计算

F.1 概述

第 12 章中计算热释放速率的公式,假设在测量 O_2 以前,已使用化学洗涤瓶将 CO_2 从气样中除去,如图 6 所示。某些实验室具备测量 CO_2 的能力,在这种情况下就不需要从 O_2 管线中除去 CO_2 ,其优点是避免使用价格昂贵并且需要认真处理的化学洗涤剂。

如果使用本附录中的公式计算热释放速率值,所用的辅助气体分析仪的响应时间,必须与氧分析仪的响应时间严格匹配。如果这个要求不能满足,就不应使用本附录的公式计算热释放速率。如果在系统中使用 CO_2 分析仪,则不应使用硅胶作干燥剂。

在本附录中,给出的公式只适用于对 CO_2 进行测量,且不从取样管线中除去的情况。包括以下两种情况:

- 干燥并过滤的样气被导入红外 CO_2 和 CO 分析仪(见图 6 中的可选项);
- 同时加上水蒸汽分析仪。

为避免水蒸汽冷凝,测定燃烧产物气流中 H_2O 浓度时,需要一个单独的取样系统。该系统中的过滤器、取样管线和分析仪均需加热。

F.2 符号

表 F.1 中给出本附录中使用的新符号。

表 F.1 符号及其意义

符号	意义	单位
M_a	空气的分子质量	kg/kmol
M_c	燃烧产物的分子质量	kg/kmol
M_{O_2}	氧气的分子质量(32 g)	kg/kmol
t_d^1	CO_2 分析仪的滞后时间	s
t_d^2	CO 分析仪的滞后时间	s
t_d^3	H_2O 分析仪的滞后时间	s
$X_{CO_2}^0$	CO_2 的初始读数	1
X_{CO}^0	CO 的初始读数	1
$X_{H_2O}^0$	H_2O 的初始读数	1
$X_{O_2}^a$	环境中 O_2 的摩尔分数	1
$X_{CO_2}^1$	滞后时间修正前 CO_2 的读数	1
X_{CO}^1	滞后时间修正前 CO 的读数	1
$X_{H_2O}^1$	滞后时间修正前 H_2O 的读数	1
X_{CO_2}	CO_2 的读数,摩尔分数	1
X_{CO}	CO 的读数,摩尔分数	1
X_{H_2O}	H_2O 的读数,摩尔分数	1
Φ	耗氧因子	1

F.3 测量 CO₂ 和 CO 的情况

正如氧分析仪, CO₂ 和 CO 的测定也应考虑在取样管线中的传输时间, 而进行如下转换:

$$X_{O_2}(t) = X_{O_2}^1(t + t_d) \quad \dots\dots\dots(F.1)$$

$$X_{CO_2}(t) = X_{CO_2}^1(t + t_d^1) \quad \dots\dots\dots(F.2)$$

$$X_{CO}(t) = X_{CO}^1(t + t_d^2) \quad \dots\dots\dots(F.3)$$

式中:

t_d^1 和 t_d^2 ——分别为 CO₂ 和 CO 分析仪的滞后时间, 通常与 O₂ 分析仪的滞后时间 t_d 不同(更小)。

排气流量按 12.4 中同样的方法进行计算:

$$\dot{m}_e = C \sqrt{\frac{\Delta p}{T_e}} \quad \dots\dots\dots(F.4)$$

热释放速率可由下式确定:

$$\dot{q} = 1.10 \left(\frac{\Delta p}{r_o} \right) X_{O_2}^1 \left[\frac{\Phi - 0.172(1 - \Phi) X_{CO} / X_{O_2}}{(1 - \Phi) + 1.105\Phi} \right] \dot{m}_e \quad \dots\dots\dots(F.5)$$

耗氧系数 Φ 根据下式得出:

$$\Phi = \frac{X_{O_2}^0(1 - X_{CO_2} - X_{CO}) - X_{O_2}(1 - X_{CO_2}^0)}{X_{O_2}^0(1 - X_{CO_2} - X_{CO} - X_{O_2})} \quad \dots\dots\dots(F.6)$$

环境中氧的摩尔分数是:

$$X_{O_2}^a = (1 - X_{H_2O}^0) X_{O_2}^0 \quad \dots\dots\dots(F.7)$$

在公式(F.5)中, 括号里该项分子中的第二项, 是对某些炭不完全燃烧成 CO 而不是 CO₂ 的校正。在锥形量热仪试验中, X_{CO} 通常非常小, 所以在公式(F.5)和公式(F.6)中可以被忽略。实际上, CO 分析仪通常不会明显地提升热释放速率测定的精度。因此, 即使没有 CO 分析仪, 忽略 X_{CO} , 公式(F.5)和公式(F.6)也可以使用。

F.4 同时测量水蒸汽的情况

在开放的燃烧系统中, 例如本方法使用的, 进入该系统的空气流量无法直接测量, 但可以通过排气管道中测量的流量推导。由于部分空气燃烧, 完全消耗掉这部分空气中的氧气, 因此需要假设体积发生膨胀。这种膨胀取决于燃料的组成及燃烧的实际化学当量。体积膨胀系数的平均值取 1.105 比较适宜, 该值对甲烷是合适的。

在 12.3.2 中的公式和公式(F.5)中已经使用了这个系数。对于锥形量热仪试验, 可以认为 99% 以上的燃烧产物由 O₂、CO₂、CO、H₂O 和不反应气体组成。不反应气体是指那些进入和离开系统化学性质都未发生改变的气体, 这里是指 N₂。如果测量 H₂O, 可以和 O₂、CO₂、CO(认为 3 种都是干燥气体)的测量一起来确定体积膨胀。排气管道中的质量流量通过下列公式可以更精确地给出:

$$\dot{m}_e = \sqrt{\frac{M_c}{M_a}} \times \sqrt{\frac{\Delta p}{T_e}} \quad \dots\dots\dots(F.8)$$

式中:

M_a ——可以取作 29 kg/kmol。

燃烧产物的分子量由下式计算:

$$M_c = [4.5 + (1 - X_{H_2O})(2.5 + X_{O_2} + 4X_{CO_2})] \times 4 \quad \dots\dots\dots(F.9)$$

热释放速率由下式计算:

$$\dot{q} = \frac{M_{O_2}}{M_C} \left(\frac{\Delta h_c}{r_0} \right) (1 - X_{H_2O}) X_{O_2}^a \left[\Phi - 0.172(1 - \Phi) \left(\frac{X_{CO}}{X_{O_2}} \right) \right] \left[\frac{1 - X_{O_2} - X_{CO_2} - X_{CO}}{1 - X_{O_2}^0 - X_{CO_2}^0} \right] \dot{m}_e$$

..... (F. 10)

H₂O 的读数必须按公式(F. 1)~公式(F. 3)中类似方式进行时间转换:

$$X_{H_2O}(t) = X_{H_2O}^1(t + t_d^3)$$

..... (F. 11)

74486

参 考 文 献

- [1] ISO 5657:1997, Reaction to fire tests—Ignitability of building products using a radiant heat source
- [2] ISO 5725:1986, Precision of test methods—Determination of repeatability and reproducibility for a standard test method by inter-laboratory tests(now withdrawn)
- [3] ISO 5725-1, Accuracy(trueness and precision) of measurement methods and results—Part 1:General principles and definitions
- [4] ISO 5725-2, Accuracy(trueness and precision) of measurement methods and results—Part 2:Basic method for the determination of repeatability and reproducibility of a standard measurement method
- [5] ISO/TR 3814:1989, Tests for measuring ‘reaction-to-fire’ of building materials—Their development and application
- [6] ISO/TS 14934-1, Reaction-to-fire tests—Calibration and use of radiometers and heat flux meters—Part 1:General principles
- [7] ASTM E 1354-99, Standard Test Method for Heat and Visible Smoke Release Rates for Materials and Products Using an Oxygen Consumption Calorimeter
- [8] BABRAUSKAS V. Development of the cone calorimeter—A bench-scale heat release rate apparatus based on oxygen consumption[J]. Fire and Materials, 1984, 8: 81-95
- [9] TWILLEY W H and BABRAUSKAS V. User’s guide for the Cone calorimeter. NBS Special Publication SP 745. National Bureau of Standards, U. S. , 1988
- [10] JANSSENS M L. Measuring rate of heat release by oxygen consumption[J]. Fire Technology, 1991, 27: 234-249
- [11] BABRAUSKAS V and GRAYSON S J eds. Heat release in fires. Barking: Elsevier Applied Science Publishers, 1992