ICS 13.220.40
CCS C 80

# 中华人民共和国国家标准

GB/T 16172—2026
代替 GB/T 16172—2007

# 建筑材料热释放速率和产烟速率试验方法

**Test method for heat release rate and smoke production rate of building materials**

**[ISO 5660-1:2015, Reaction-to-fire tests—Heat release, smoke production and mass loss rate—Part 1: Heat release rate (cone calorimeter method) and smoke production rate (dynamic measurement), MOD]**

2026-01-28 发布　　2026-08-01 实施

国家市场监督管理总局
国家标准化管理委员会　发布

# 目　　次

前言 …… V
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 …… 4
6　试验装置 …… 4
6.1　通用要求 …… 4
6.2　辐射锥 …… 5
6.3　辐射屏蔽板 …… 6
6.4　辐射控制 …… 6
6.5　称重设备 …… 6
6.6　试样安装架 …… 6
6.7　定位架 …… 7
6.8　带流量测量仪的排烟系统 …… 8
6.9　气体取样装置 …… 9
6.10　点火电路 …… 10
6.11　点火计时器 …… 10
6.12　氧分析仪 …… 10
6.13　热流计 …… 10
6.14　标定燃烧器 …… 11
6.15　数据采集与分析系统 …… 11
6.16　防护屏(可选) …… 11
6.17　烟气测量系统 …… 11
6.18　烟气系统热电偶 …… 12
6.19　滤光片 …… 12
7　制品的测试要求 …… 12
7.1　表面特性 …… 12
7.2　不对称制品 …… 13
7.3　燃烧时间短暂的材料 …… 13
7.4　复合试样 …… 13
7.5　尺寸不稳定的材料 …… 13
7.6　需要在约束条件下测试的材料 …… 13
8　试样构建与制备 …… 14
8.1　试样 …… 14
8.2　试样的状态调节 …… 15

8.3 制备 …… 15
9 试验环境 …… 16
10 标定 …… 16
10.1 预标定 …… 16
10.2 工作标定 …… 17
10.3 烟密度计标定 …… 18
10.4 非经常性标定 …… 18
11 试验程序 …… 19
11.1 一般注意事项 …… 19
11.2 试验准备 …… 19
11.3 步骤 …… 20
12 计算 …… 20
12.1 通则 …… 20
12.2 耗氧分析的标定常数 …… 21
12.3 热释放速率 …… 21
12.4 排烟管道的流量 …… 21
12.5 质量损失速率 …… 21
12.6 烟气遮挡 …… 22
13 试验报告 …… 22
附录 A（资料性） 注释及操作员指导 …… 25
A.1 概述 …… 25
A.2 热释放速率的测量 …… 25
A.3 工作原理的选择 …… 25
A.4 辐射锥的设计 …… 25
A.5 引燃装置 …… 26
A.6 背面的条件 …… 26
A.7 光源 …… 26
A.8 光学元件上的烟尘沉积 …… 26
A.9 光密度计设计 …… 26
A.10 产烟速率测量原理 …… 27
A.11 体积流量的计算 …… 27
A.12 使用校准因子标定烟密度计 …… 27
附录 B（资料性） 补充计算——试样比消光面积质量损失率归一化 …… 29
附录 C（资料性） 分辨率、精密度和误差 …… 30
C.1 分辨率 …… 30
C.2 响应的速度 …… 30
C.3 精密度 …… 30
C.4 精密度(对于膨胀或变形材料的试验程序) …… 31
C.5 热释放测量误差 …… 32
C.6 烟气精密度 …… 33
C.7 产烟测量中的偏差 …… 34

附录 D（资料性） 质量损失速率和有效燃烧热 …… 35
D.1 有效燃烧热 …… 35
D.2 符号 …… 35
D.3 计算 …… 35
附录 E（资料性） 垂直定位的测试 …… 36
E.1 引言 …… 36
E.2 装置的调整 …… 36
E.3 试样准备 …… 36
E.4 辐射锥标定 …… 36
E.5 试验步骤 …… 36
附录 F（资料性） 有辅助气体分析的热释放速率计算 …… 38
F.1 概述 …… 38
F.2 符号 …… 38
F.3 测量 $CO_2$ 和 CO 的情况 …… 39
F.4 同时测量水蒸气的情况 …… 40
附录 G（资料性） 工作热流计的标定 …… 42
附录 H（资料性） 引燃的有效临界辐射照度计算 …… 43
H.1 概述 …… 43
H.2 过程 …… 43
参考文献 …… 44

# 前　言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则　第 1 部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件代替 GB/T 16172—2007《建筑材料热释放速率试验方法》，与 GB/T 16172—2007 相比，除结构调整和编辑性改动外，主要技术变化如下：

a) 更改了适用范围（见第 1 章，2007 年版的第 1 章）；
b) 增加了术语“热释放速率”“烟气遮挡程度”“消光系数”“产烟速率”“产烟量”及其定义（见 3.7、3.12、3.13、3.14、3.15）；
c) 增加了烟气测量相关的符号（见表 1）；
d) 增加了烟气测量的试验原理内容（见第 5 章）；
e) 增加了试验装置可选一氧化碳和二氧化碳测量模块的通用要求（见 6.1）；
f) 更改了带流量测量仪的排烟系统排气流量要求（见 6.8，2007 年版的 6.7）；
g) 增加了试验装置“烟气测量系统”“烟气系统热电偶”“滤光片”相关要求（见 6.17、6.18、6.19）；
h) 更改了需要限制发生严重变形材料的测试要求（见 7.5，2007 年版的 7.5）；
i) 增加了需要在约束条件下测试的材料的要求及其制备要求（见 7.6、8.3.3）；
j) 更改了称重设备的输出漂移校准质量（见 10.1.4，2007 年版的 10.1.4）；
k) 增加了烟密度计的标定要求（见 10.3）；
l) 增加了标定燃烧器用流量计的准确度标定替代可选方法（见 10.4.3）；
m) 增加了试验前消光系数零值设置及点火器清洁要求（见 11.2.6、11.2.7）；
n) 更改了“试验步骤”中试验数据报告要求（见 11.3.7，2007 年版的 11.3.7）；
o) 增加了公式解释中“无定位架测试时试样的初始暴露面积要求”（见 12.3.3，2007 年版的 12.3.3）；
p) 增加了“烟气遮挡”计算要求（见 12.6）；
q) 增加了“试验报告”有关烟气测量基本信息的要求（见第 13 章）。

本文件修改采用 ISO 5660-1：2015《对火反应试验　热释放速率、产烟速率和质量损失速率　第 1 部分：热释放速率（锥形量热仪法）和产烟速率（动态测量）》。

本文件与 ISO 5660-1：2015 相比做了下述结构调整：

——第 3 章的 3.14 对应 ISO 5660-1：2015 中第 3 章的 3.15；
——第 3 章的 3.15 对应 ISO 5660-1：2015 中第 3 章的 3.14；
——第 6 章的 6.19 中的公式增加编号（1），后续公式序号顺次调整；
——附录 F 对应 ISO 5660-1：2015 中附录 G；
——附录 G 对应 ISO 5660-1：2015 中附录 F。

本文件与 ISO 5660-1：2015 的技术差异及其原因如下：

——用规范性引用的 GB/T 5907（所有部分）替换了 ISO 13943（见第 3 章），增加标准的易读性，便于本文件的应用；
——更改了试验装置外部热辐射条件范围（见第 5 章、6.2，ISO 5660-1 中第 5 章、6.2），国内试验装置能力范围均可提供 100 $kW/m^2$ 的外部热辐射条件，且在材料生产及应用领域有开展 75 $kW/m^2$～100 $kW/m^2$ 条件下试验的实际需求；
——用规范性引用的 GB/T 40238 替换了 ISO 14697（见 8.1.6），增加可操作性，便于本文件的

应用；

——用规范性引用的 GB/T 40238 替换了 ISO 554(见 8.2)，增加可操作性，便于本文件的应用；

——更改了需要养护超过 1 周才能达到稳定的材料的养护要求。将“依据 GB/T 2918 养护后进行试验”由推荐条款更改为需要满足的要求条款，提高试验的严谨性及可操作性，便于本文件的应用。

本文件做了下列编辑性改动：

a) 根据试验方法实际使用情况，将标准名称改为《建筑材料热释放速率和产烟速率试验方法》；

b) 纳入了 ISO 5660-1:2015/Amd 1:2019 的修正内容，所涉及的条款的外侧页边空白位置用垂直双线(‖)进行了标示。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由国家消防救援局提出。

本文件由全国消防标准化技术委员会(SAC/TC 113)归口。

本文件起草单位：应急管理部天津消防研究所、应急管理部四川消防研究所、建研防火科技有限公司、中国科学技术大学、四川大学、山东非金属材料研究所。

本文件主要起草人：李晋、张欣、张网、刘丹、赵婧、王俊胜、杨亮、赵成刚、朱春玲、纪杰、付腾、王倩倩。

本文件及其所代替文件的历次版本发布情况为：

——1996 年首次发布为 GB/T 16172—1996，2007 年第一次修订；

——本次为第二次修订。

# 建筑材料热释放速率和产烟速率试验方法

## 1 范围

本文件描述了采用外部点火器，试样在水平定位、设定辐射照度条件下热释放速率和动态产烟速率的试验方法。

本文件适用于评价建筑材料及制品的燃烧性能。交通工具内饰材料、家居材料、电子产品材料及制品的燃烧性能评价可参考使用。

## 2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

GB/T 2918 塑料 试样状态调节和试验的标准环境(GB/T 2918—2018，ISO 291:2008，MOD)

GB/T 5907 消防词汇(所有部分)

GB/T 40238 建筑材料及制品燃烧试验 基材选取、试样状态调节和安装要求

## 3 术语和定义

GB/T 5907 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

**闪燃 flashing**

在试样(3.9)表面或其上方出现的火焰持续时间少于 1 s 的燃烧现象。

3.2

**引燃 ignition**

出现持续燃烧(3.10)。

3.3

**辐射照度 irradiance**

单位面积试样(3.9)上接收的辐射热通量。

注：水平定位时试样上对流传热能忽略。因此，本文件用术语“辐射照度”代替“热流”，这样能更好地表明辐射是主要的热传递方式。

3.4

**材料 material**

单一物质等均匀分布的混合物。

示例：金属、石材、木材、混凝土、矿产、聚合物。

[来源：GB 8624—2012，3.2]

3.5

**定位 orientation**

试验时试样(3.9)暴露表面所处平面，垂直或水平。

3.6

**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。

3.7

**热释放速率　heat release rate**

材料(3.4)或组件在单位时间内燃烧所释放的热量。

[来源:GB/T 5907.2—2015,2.6.33]

3.8

**制品　product**

要求给出相关信息的材料(3.4)、复合材料或组件。

[来源:GB 8624—2012,3.1,有修改]

3.9

**试样　specimen**

带基材或经处理用于试验具有代表性的制品(3.8)。

注:对于某些类型的制品,例如包含空气隙或接合点的制品,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(3.9)表面或其上方出现的火焰持续时间超过10 s的燃烧现象。

3.11

**短暂燃烧　transitory flaming**

在试样(3.9)表面或其上方出现的火焰持续时间介于1 s～10 s的燃烧现象。

3.12

**烟气遮挡程度　smoke obscuration**

光穿过烟气时其强度的衰减程度。

注:用百分比表示。

3.13

**消光系数　extinction coefficient**

单位光程中,入射光强度与透射光强度之比的自然对数。

3.14

**产烟速率　smoke production rate**

测量点的烟气体积流速与消光系数的乘积。

3.15

**产烟量　smoke production**

产烟速率(3.14)在一定时间内的积分值。

## 4　符号

下列符号适用于本文件。见表1。

**表1　符号及其意义**

| 符号 | 含义 | 单位 |
|---|---|---|
| $A$ | 试样暴露表面积 | $m^2$ |
| $A_s$ | 试样初始暴露表面积 | $m^2$ |
| $C$ | 孔板流量计标定常数 | $m^{1/2} \cdot g^{1/2} \cdot K^{1/2}$ |
| $D'$ | 光密度 | — |
| $F$ | 光密度标定系数 | $m^{-1}$ |
| $\Delta h_c$ | 净燃烧热 | kJ/g |

**表 1　符号及其意义（续）**

| 符号 | 含义 | 单位 |
|---|---|---|
| $\Delta h_{c,eff}$ | 有效净燃烧热 | MJ/kg |
| $I_0/I$ | 入射光强度与透射光强度的比值 | — |
| $k$ | 消光系数，即纳皮尔线性吸收系数 | $m^{-1}$ |
| $k_1$ | 测量的标定消光系数 | $m^{-1}$ |
| $k_2$ | 计算的标定消光系数 | $m^{-1}$ |
| $k_m$ | 实测的消光系数 | $m^{-1}$ |
| $L$ | 通过烟气的光程 | m |
| $m$ | 试样的质量 | g |
| $\Delta m$ | 总质量损失 | g |
| $m_f$ | 试验结束时试样的质量 | g |
| $m_s$ | 持续燃烧期间试样的质量 | g |
| $\dot{m}_{A,10-90}$ | 质量损失在 10%～90%，单位面积上的平均质量损失速率 | $g/m^2/s$ |
| $m_{10}$ | 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/s |
| $\dot{m}_e$ | 排烟管道内的质量流量 | kg/s |
| $M$ | 流过排烟管道的气体分子质量 | kg/mol |
| $\Delta p$ | 孔板两侧的压差 | Pa |
| $P_s$ | 产烟速率 | $m^2/s$ |
| $P_{s,A}$ | 试样表面单位面积产烟速率 | $s^{-1}$ |
| $\dot{q}$ | 热释放速率 | kW |
| $\dot{q}_b$ | 甲烷热释放速率 | kW |
| $\dot{q}_A$ | 单位面积热释放速率 | $kW/m^2$ |
| $\dot{q}_{A,max}$ | 单位面积热释放速率的最大值 | $kW/m^2$ |
| $\dot{q}_{A,180}$ | 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 | $kW/m^2$ |
| $\dot{q}_{A,300}$ | 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 | $kW/m^2$ |
| $Q_{A,tot}$ | 整个试验期间单位面积的放热总量 | $MJ/m^2$ |
| $r_o$ | 氧与燃料的化学当量比 | — |
| $S$ | 产烟总量 | $m^2$ |
| $S_A$ | 单位面积产烟总量 | $m^2/m^2$ |
| $S_{A,1}$ | 引燃前单位面积产烟总量 | $m^2/m^2$ |
| $S_{A,2}$ | 引燃后单位面积产烟总量 | $m^2/m^2$ |
| $t$ | 时间 | s |
| $t_d$ | 氧分析仪的延迟时间 | s |

表 1　符号及其意义（续）

| 符号 | 含义 | 单位 |
| --- | --- | --- |
| $\Delta t$ | 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 |
| $T_s$ | 测量点处烟气温度 | K |
| $\dot{V}_s$ | 测量点处烟气体积流量 | $m^3/s$ |
| $X_{O_2}$ | 氧分析仪读数，氧气的摩尔分数 | — |
| $X^0_{O_2}$ | 氧分析仪初始读数 | — |
| $X^1_{O_2}$ | 延迟时间修正前氧分析仪的读数 | — |
| $\rho$ | 密度 | $kg/m^3$ |
| $\sigma$ | 比消光面积 | $m^2/kg$ |
| 注：其中一些参数和单位的详细情况见 BS 7904:1998。 | | |

## 5　试验原理

本试验方法基于耗氧原理，净燃烧热和燃烧所消耗的氧气质量成比例，即每消耗 1 kg 的氧气释放出的热量大约为 $13.1\times10^3$ kJ。在环境空气、设定外部辐射照度(0 $kW/m^2$～100 $kW/m^2$)条件下，测量试样燃烧时氧气浓度和烟气流量。本试验方法的背景资料、装置及测量原理等见附录 A。

本试验方法通过有代表性的小试样评估制品对火反应的热释放速率特性。热释放速率是通过测量燃烧产物中氧气浓度、燃烧产物的流量后计算氧消耗量而确定的。

烟气测量基于布格定律(Bouguer's Law)，当光透射过一定体积的烟气时，光的强度随距离的增大呈指数级下降。在环境空气、设定外部辐射照度(0 $kW/m^2$～100 $kW/m^2$)条件下，测量试样燃烧时烟气遮挡程度、排烟气体流速和试样的质量损失速率。烟气遮挡程度是排烟管道中烟气透射光强度的分数，根据布格定律计算消光系数。产烟速率为测量点的烟气体积流速与消光系数的乘积，产烟量为产烟速率在一定时间内的积分值。产烟量与试样面积成正比，测试报告中产烟量和产烟速率均归一化到单位面积表示，相关补充计算见附录 B。

本试验方法是基于有代表性小试样的试验结果评估制品在良好通风条件下的产烟特性。动态产烟速率是通过测量燃烧产物气流导致激光光束的衰减而计算得到的，无论试样是否在燃烧，整个测试过程中都会记录烟气遮挡情况。

## 6　试验装置

### 6.1　通用要求

试验装置示意见图 1，各部件的详细描述按 6.2～6.19 的规定。装置响应速度、质量损失测量等相关信息见附录 C 和附录 D。

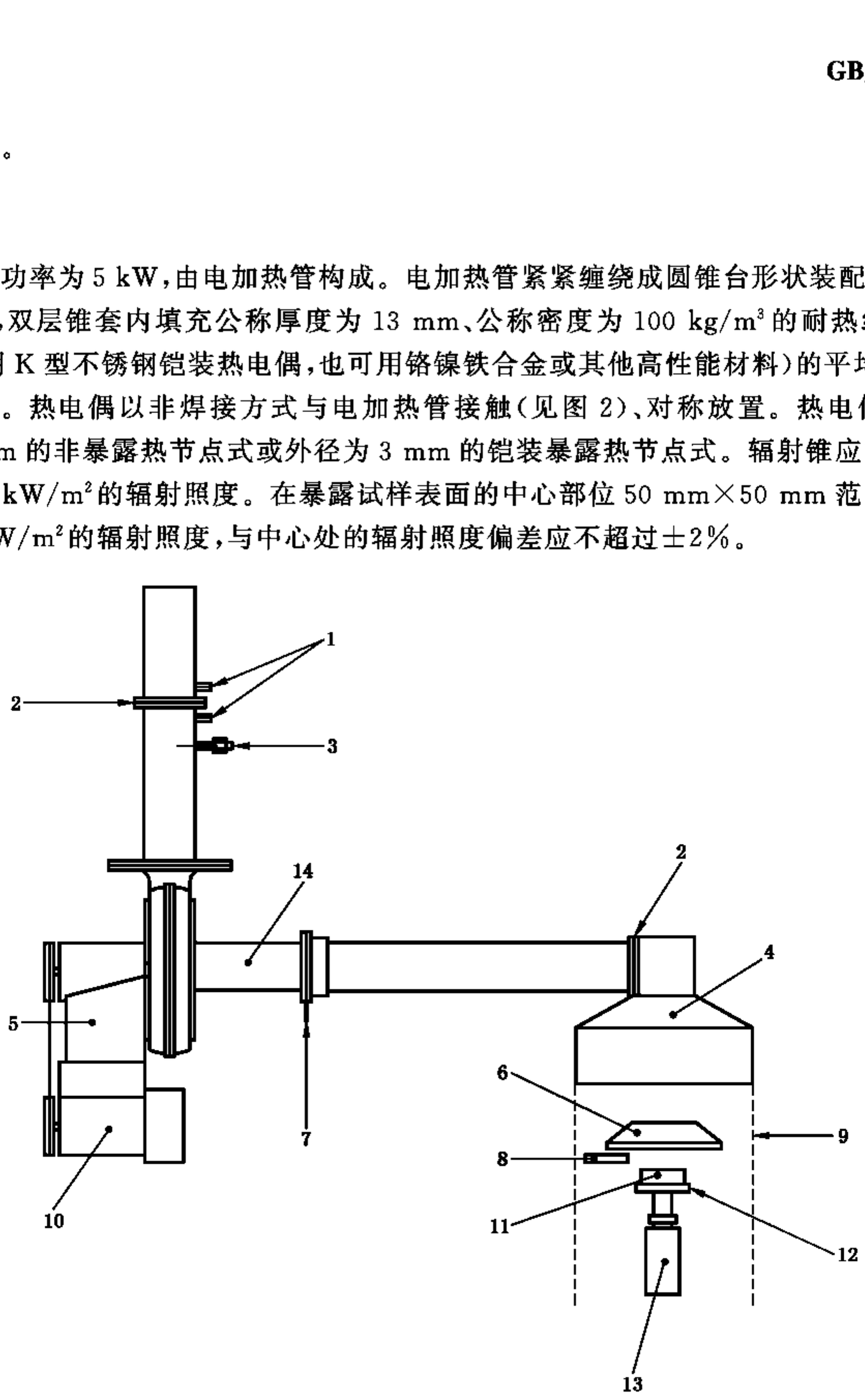
对试样进行垂直定位试验时，试验装置的改动见附录 E。

可选择加装一氧化碳和二氧化碳的测量模块，用于热释放速率的计算。附录 F 描述了装置、测试

过程和计算方法。

### 6.2 辐射锥

辐射锥额定功率为 5 kW，由电加热管构成。电加热管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)，双层锥套内填充公称厚度为 13 mm、公称密度为 100 kg/m³ 的耐热纤维。通过控制 3 支热电偶(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，使辐射照度维持在设定值。热电偶以非焊接方式与电加热管接触(见图 2)、对称放置。热电偶应采用外径为 1.0 mm～1.6 mm 的非暴露热节点式或外径为 3 mm 的铠装暴露热节点式。辐射锥应能在试样表面提供最高可达 100 kW/m² 的辐射照度。在暴露试样表面的中心部位 50 mm×50 mm 范围内辐射照度应均匀，对于 50 kW/m² 的辐射照度，与中心处的辐射照度偏差应不超过±2%。

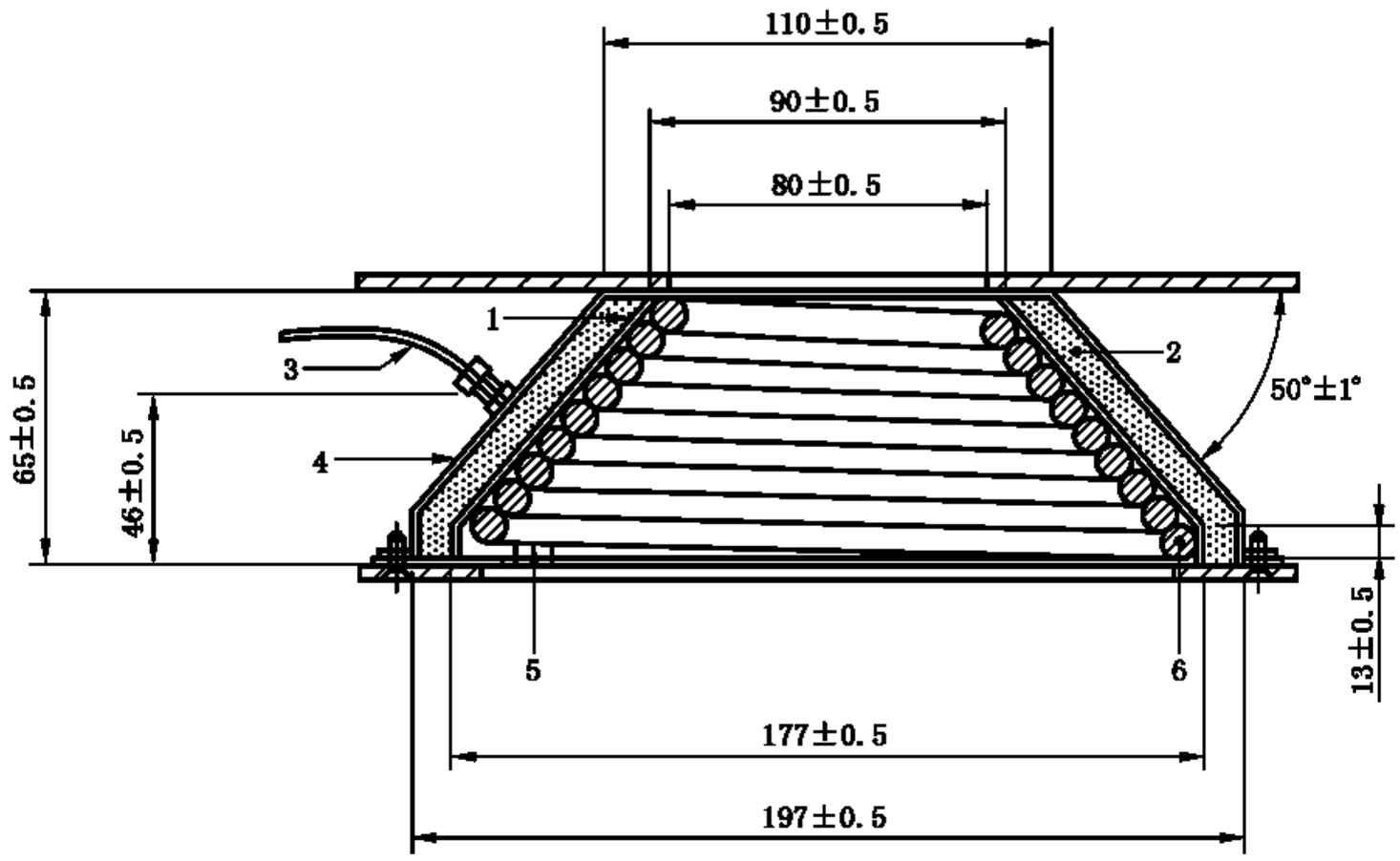



标引序号说明：

1——取压孔；
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；
14 ——烟气测量管段。

**图 1 装置**

单位为毫米




标引序号说明：

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**

### 6.3　辐射屏蔽板

辐射锥下方应安装一个可移动的辐射屏蔽板，以保护试样在试验开始之前不受热辐射。屏蔽板应由不燃材料制成，总厚度不超过 12 mm。屏蔽板应符合下列要求之一：

a)　水冷，涂有耐磨无光黑色涂层，其表面发射率 $\varepsilon=0.95\pm0.05$；

b)　非水冷，可是有反射面的金属、有陶瓷面的金属或陶瓷，以将辐射传递降至最低。

屏蔽板应装有把手，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机械结构能使屏蔽板移动。

### 6.4　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±10 ℃以内。

### 6.5　称重设备

根据 10.2.2 中标定程序进行测量时，称重设备的分辨率为 0.1 g，准确度为±0.3 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%～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 1.0 g。

### 6.6　试样安装架

试样安装架如图 3 所示，为一个方形敞口盘，上端开口为(106±1) mm×(106±1) mm，深度为

(25±1) mm。安装架采用厚度为(2.4±0.15) mm 的不锈钢板制成,包括一个便于插入和移出的把手、一个保证试样的中心位置在加热器下方并能与称重设备对齐的机械装置。安装架的底部放置一层低密度(公称密度 65 kg/m³)耐热纤维垫(厚度至少为 13 mm),用于将辐射锥下表面与试样顶部的距离调节为(25±1) 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±1) mm(见 7.5)。

单位为毫米

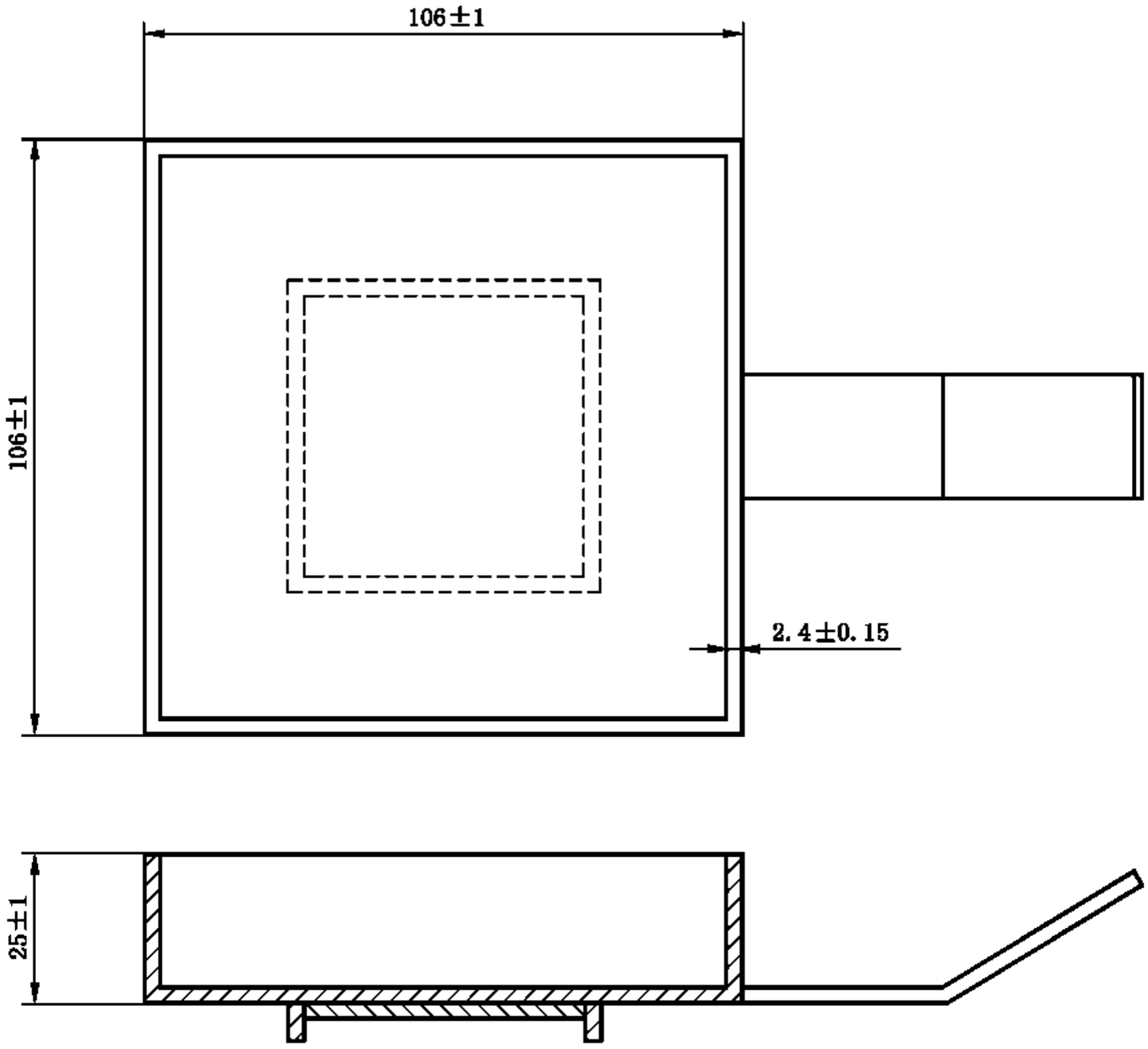
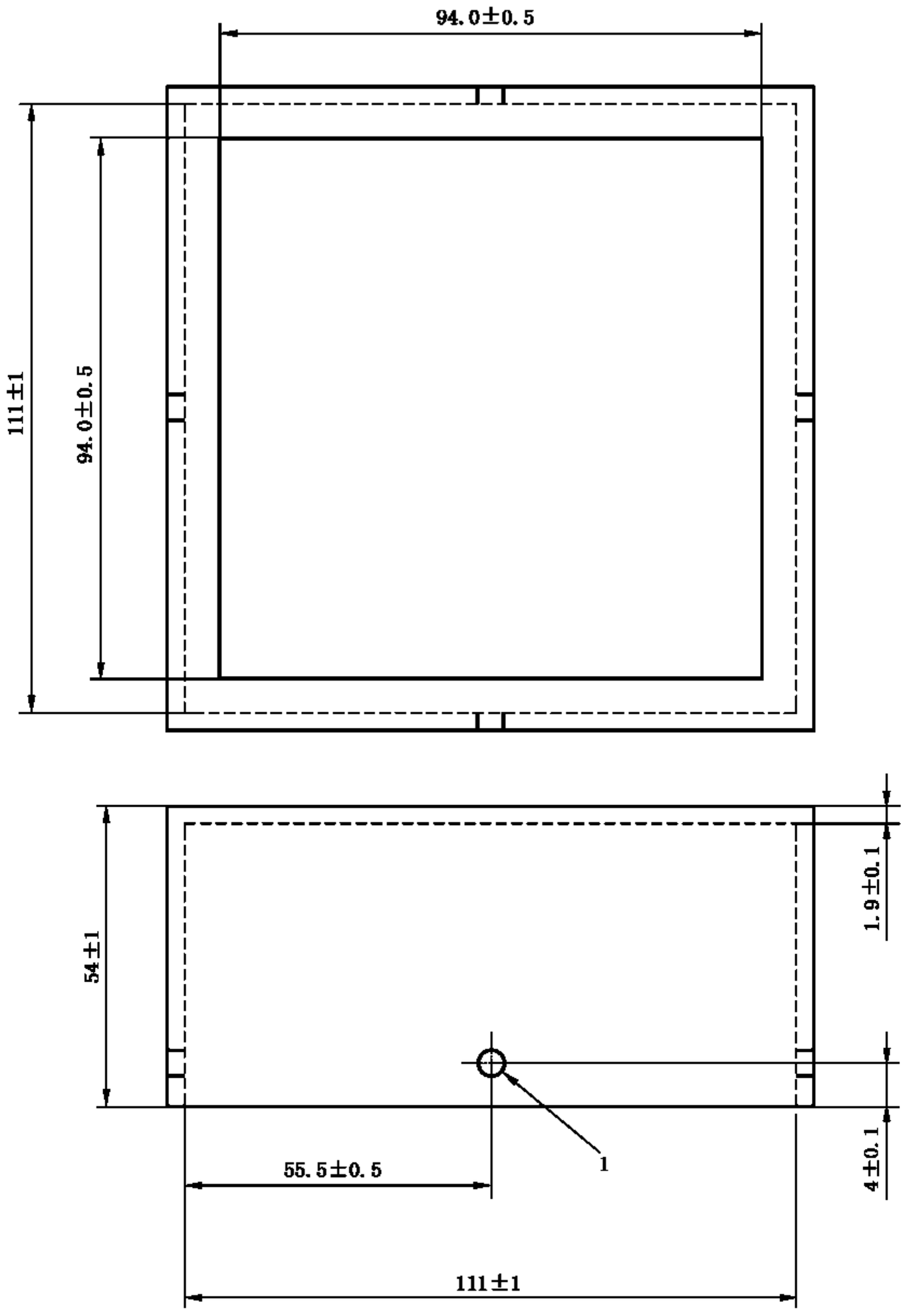



**图 3　试样安装架**

## 6.7　定位架

定位架见图 4,采用厚度为(1.9±0.1) mm 的不锈钢板制成,方盒内边尺寸为(111±1) mm,高度为(54±1) mm。试样暴露面的开口为(94.0±0.5) mm×(94.0±0.5) mm。

单位为毫米




标引序号说明：

1——4 个方向的定位孔(建议为 M3 或 10×32 螺丝孔)。

**图 4　定位架**

### 6.8　带流量测量仪的排烟系统

排烟系统应由耐高温离心式风机、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±50) mm。在标准温度和压力条件下，排烟系统的流量应不小于 0.035 $m^3/s$。风机的建议安装位置见图 5。也可将风机安装在孔板流量计下游，但应满足本条款其他要求。

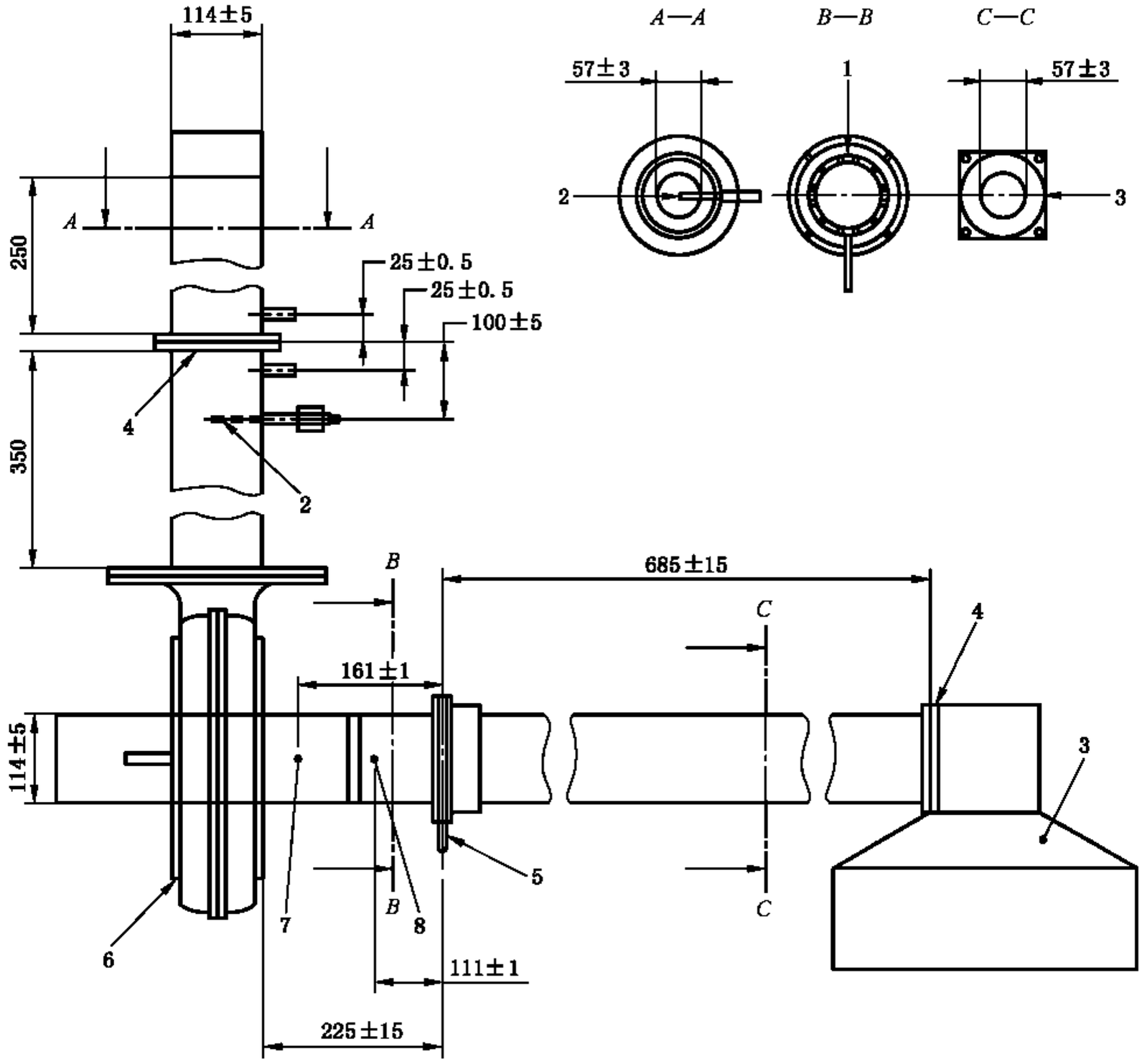
集烟罩与进气管之间应加装一内径为(57±3) mm 的节流孔板，提高气体的混合度。

环形取样器位于风机进气管道内，距离集烟罩(685±15) mm。环形取样器上应有 12 个直径为(2.2±0.1) mm 的取样孔，以使气流组分均匀，开孔方向应与气流流动方向一致，以避免烟尘沉积。

采用外径为 1.0 mm～1.6 mm 的铠装热电偶或外径为 3 mm 的露端型热电偶测量气流温度，热电偶安装在排烟管轴线上，孔板流量计的上游(100±5) mm 处。

按图 5 所示安装风机时，通过测量风机上方至少 350 mm 处的锐缘孔板[内径(57±3) mm，厚度(1.6±0.3) mm]两侧的压差确定风机流量。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。

单位为毫米




标引序号说明：

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，取样孔对着风机)；

6——风机；

7——烟气系统热电偶位置；

8——烟密度计位置。

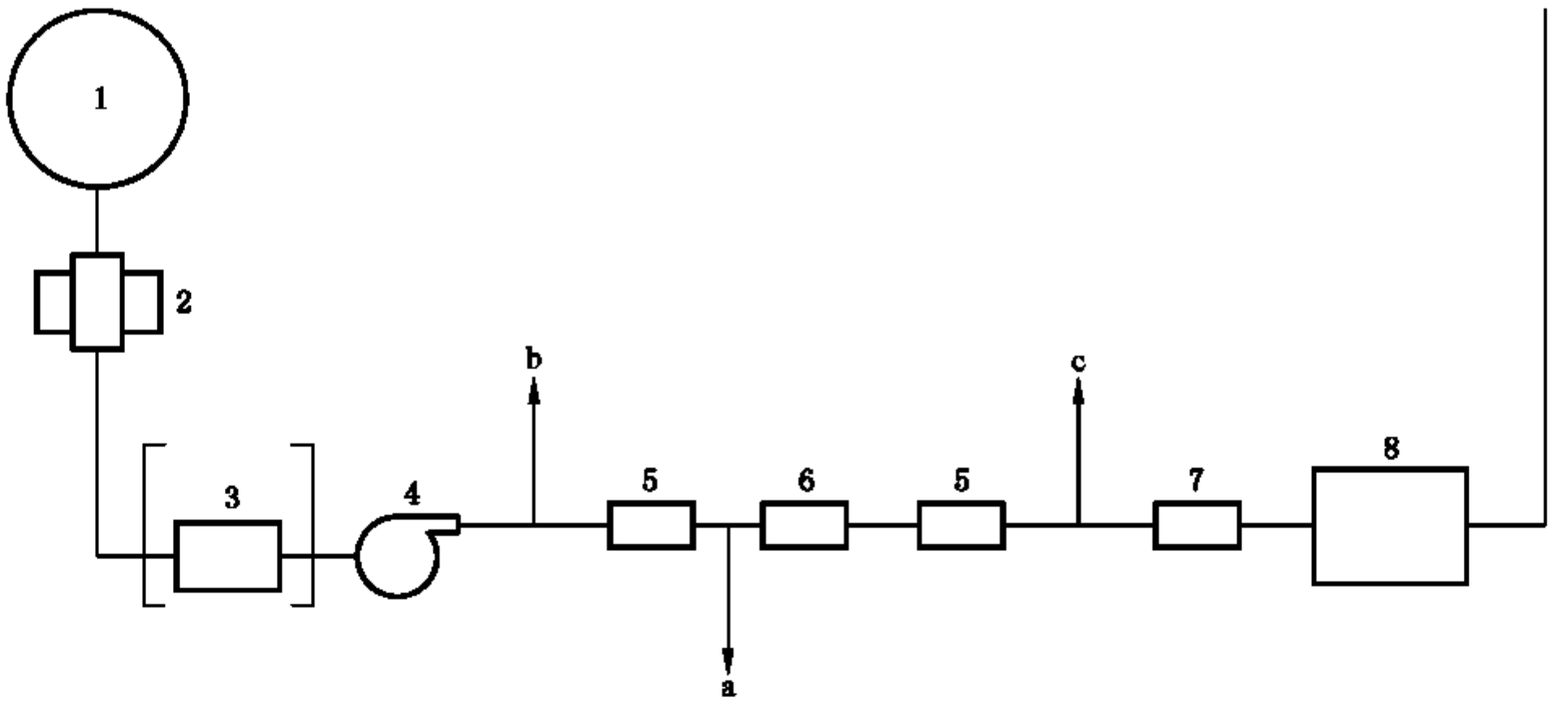
**图 5　排烟系统**

## 6.9　气体取样装置

气体取样装置应包括取样泵、烟尘过滤器、除湿装置、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。也可使用满足要求的其他布置方式。氧分析仪的延迟时间应根据 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)，计算热释放速率的公式与标准情形不同(见第 12 章和附录 F)。




标引序号说明：

1——环形取样器；

2——烟尘过滤器；

3——冷阱和排水管；

4——取样泵；

5——除湿装置；

6——$CO_2$过滤器；

7——流量调节器；

8——氧分析仪；

a——通向可选的 $CO_2$ 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实例**

### 6.10　点火电路

采用由 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。火花塞间隙应为(3.0±0.5) mm。电极长度和火花塞的位置应使火花间隙位于试样表面中心上方(13±2) mm 处，对于尺寸不稳定的材料其距离应为(48±2) mm(见 7.5)。火花宜连续可见。

### 6.11　点火计时器

点火计时器示值分辨力应为 1 s，计时误差小于 1 s/h。

### 6.12　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 μL/L，且输出噪声也不应超过 50 μL/L。由于氧分析仪对气流压力敏感，应调节分析仪上游的气流压力，最小化气流波动，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。

### 6.13　热流计

使用工作热流计标定辐射锥(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±10) $kW/m^2$。辐射接收靶应是平整圆形的，直径约为 12.5 mm，表面覆有发射率 $\varepsilon=0.95\pm0.05$ 的耐磨无光黑色涂层。采用水冷散热器对热流计进行保护，但不应使热流计的接收靶表面产生冷凝水。

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。热流计重复性为±0.5%以内。

用 2 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(见附录 G)。工作热流计应按 10.4.1 标定。每年至少应全面标定 1 支参照热流计。

### 6.14 标定燃烧器

标定燃烧器的开孔(方形或圆形)面积为(500±100) $mm^2$,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。标定燃烧器与可计流量的甲烷气源相连,甲烷纯度至少为 99.5%。对于 5 kW 的热释放速率,流量计或控制器读数的准确度应为±3%。准确度应根据 10.4.3 进行校验。

### 6.15 数据采集与分析系统

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,氧气测量准确度应至少达到 50 μL/L,温度测量准确度应达到 0.5 ℃,其他的测量通道应为仪器输出全量程的 0.01%,时间的准确度应至少为 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。

### 6.16 防护屏(可选)

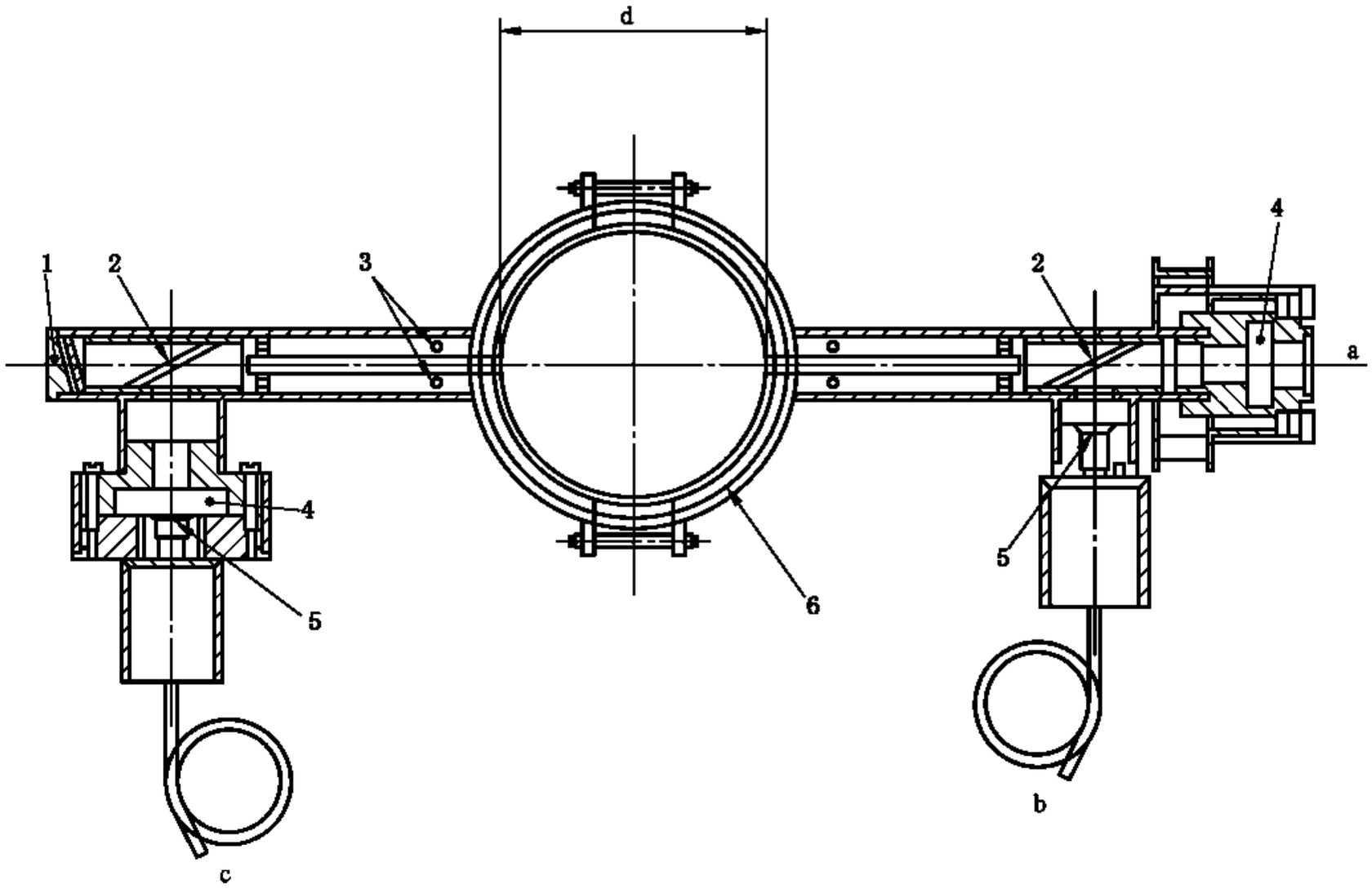
为了操作方便或确保安全,可用防护屏对加热器和试样安装架进行保护,但应保证防护屏的存在不影响引燃时间和按 10.1.7 对热释放速率的测量。

如果防护屏形成了 1 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。

### 6.17 烟气测量系统

烟气测量系统用于测量排烟管道内的激光光强度衰减情况。该系统包括 1 台氦氖激光器(0.5 mW～2 mW,带偏振器)、作为主光束和参考探测器的硅光电二极管,以及测量消光系数、设置系统零值的电子元件。烟密度计应水平安装在环形取样器下游(111±1) mm 处。在排烟管道两侧焊接 2 根细管作为烟气遮挡系统的光通道,使烟气易于沉积在管壁上从而保护光学元件。图 7 为 1 种烟气测量系统推荐布置。

注:在有准直光学器件的白光系统开展的试验,结果大致相似,但也存在例外情况。理论预测已被试验验证。如果准确度相同,能使用白光系统。




标引序号说明：

1——封盖；

2——光束分离器；

3——空气吹扫孔；

4——滤光片插槽；

5——白玻璃；

6——陶瓷纤维套；

a——He-Ne 激光束(0.5 mW)；

b——至补偿探测器；

c——至主探测器；

d——光路。

**图 7　典型烟气测量配置截面图**

### 6.18　烟气系统热电偶

烟气系统热电偶用于测量烟密度计附近的气流温度，为外径 1.0 mm～1.6 mm 的非接地铠装热电偶或外径 3 mm 的露端型热电偶，安装在排烟管道中心线、烟密度计下游 50 mm 处，如图 5 所示。

### 6.19　滤光片

滤光片用于标定烟气测量系统。2 个玻璃材质的中性密度色散滤光片，采用 632.8 nm 激光波长精密标定。滤光片不应为涂覆型(因为涂覆型滤光片对激光可产生干涉效应，且随时间递增)，滤光片标称光密度应为 0.3 和 0.8。消光系数值 $k$，按公式(1)计算：

$$k = (2.303D')\,L^{-1} \qquad \cdots\cdots(1)$$

式中：

$D'$——光密度；

$L$ ——光程(光束穿过排烟管道的距离)。

## 7　制品的测试要求

### 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。

注：基本平整指不平整处与平面相差不超过±1 mm。

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 mm×100 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) 对于存在宽度不超过 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应超过代表性的 100 mm×100 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，宜尽可能满足 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

待测制品有 2 个不同表面，或不同材料层以不同的顺序排列。如在实际使用时，任一表面都可能暴露，则 2 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，热释放速率的测量间隔不应超过 2 s。对于燃烧时间较长的试样，测量间隔可为 5 s。

### 7.4 复合试样

用于试验的复合试样应按 8.3 制备，并能代表实际应用方式。

### 7.5 尺寸不稳定的材料

试样因膨胀或变形，在引燃之前接触到火花塞，或者引燃之后接触到辐射锥下表面，试验时辐射锥的下表面和试样表面的间距应为 60 mm。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：用 60 mm 间距测得的引燃时间不应与 25 mm 间距测得的引燃时间相比较。如果用 60 mm 间距试验时，仍然在引燃前出现试样上表面接触到火花塞，或者引燃之后接触到辐射锥下表面的情况，则该试样不适合本文件的试验。

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 根金属丝捆扎，以限制其过大的变形。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 1 根金属丝将试样安装架和定位架组件缠紧，并保证与组件的四个边之一平行，且金属丝与边的距离约为 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。

如果 4 根金属丝也无法限制试样发生严重变形，应使用如图 8 所示的格栅，格栅由(0.8±0.1) mm 的细金属丝制成，金属丝间距为(20±2) mm。

对于熔融膨胀的材料，若熔融物溢出定位架或从定位架与试样安装架间渗出，则试验结果无效。因此，此类材料试验时不带定位架，应采用厚度为 0.1 mm 的铝材包裹，且上缘应超出试样表面上缘 10 mm。

### 7.6 需要在约束条件下测试的材料

需要采用约束方式达到安装密度条件后进行试验的材料，如纤维，应使用图 9 所示钢丝笼，以满足材料测试要求(见 8.3.3)。制作钢丝笼的钢丝网片由(1.0±0.1) mm 的钢丝焊接而成，钢丝间隔为(9±1) mm。

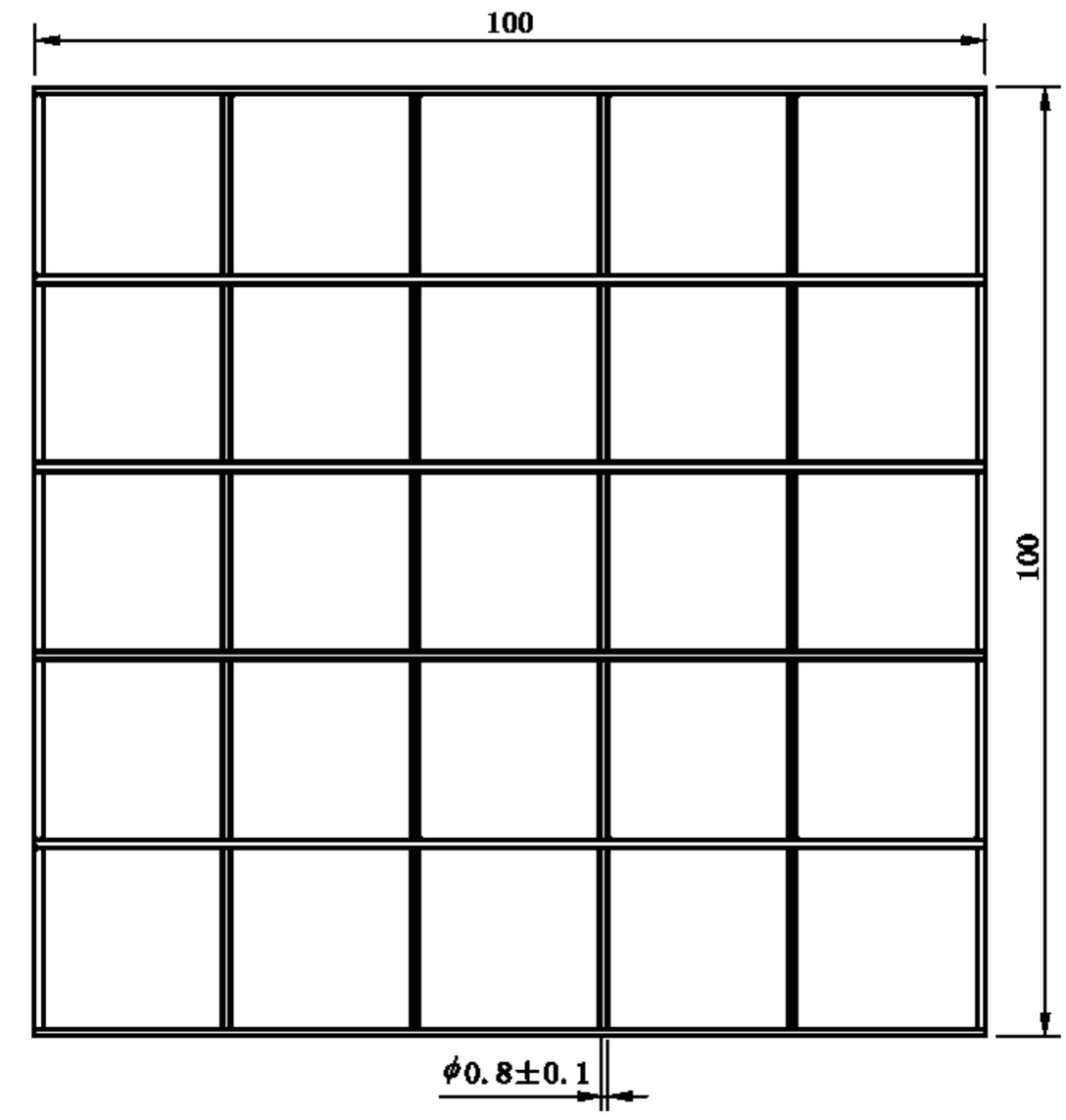



图 8　格栅

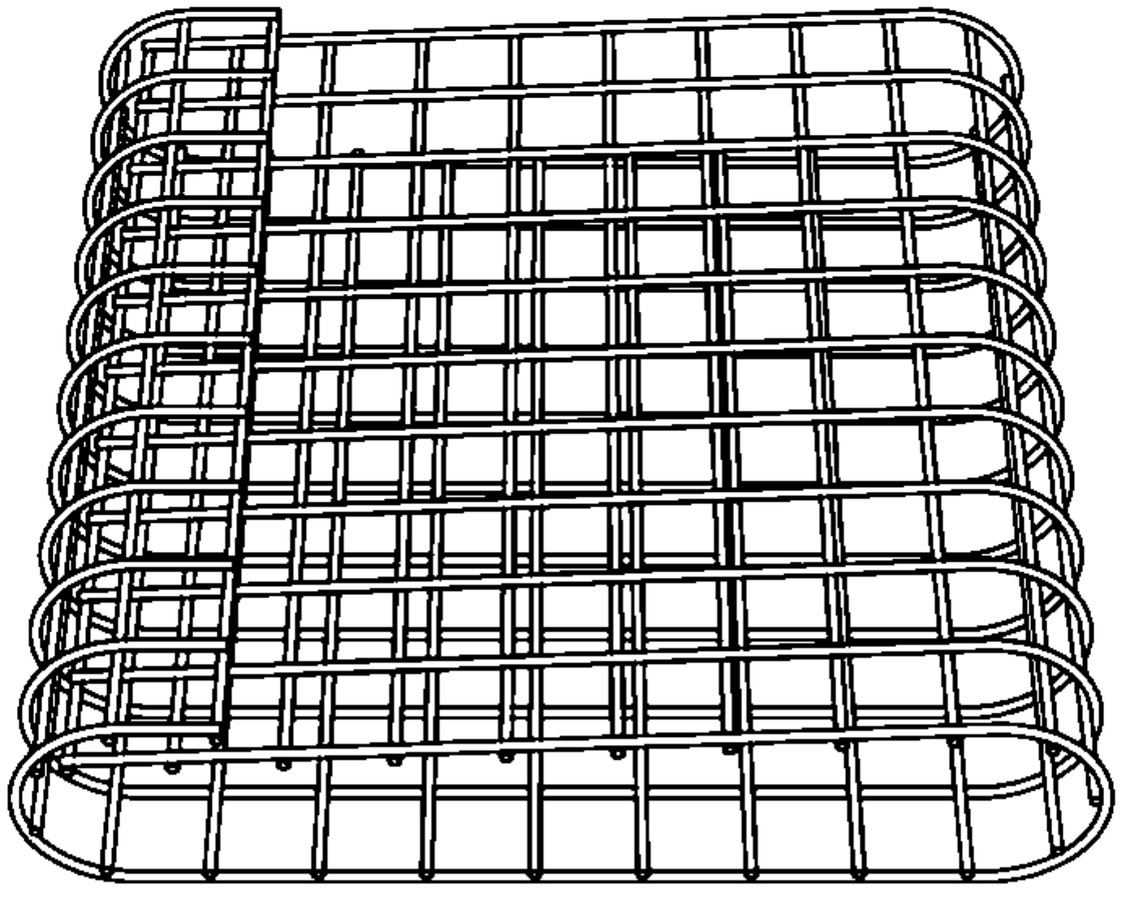


图 9　需要在约束条件下测试的材料用钢丝笼

## 8　试样构建与制备

### 8.1　试样

8.1.1　除非另有规定，对于选定的每 1 种辐射照度和暴露表面，应使用 3 个试样进行试验。

8.1.2　能表征制品特征的正方形试样，尺寸为 $100_{-2}^{0}$ mm×$100_{-2}^{0}$ mm。

8.1.3　公称厚度小于或等于 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 按 8.1.3 或 8.1.4 规定制备组件试样。如材料或复合材料在使用时与特定的基材相接触，应带基材开展试验，固定方式可采取粘结或机械固定。在没有唯一的或特定的基材时，应根据 GB/T 40238 选用适当的基材。

8.1.7 厚度小于 6 mm 的制品，试验时应加上能代表其实际应用的基材，使总厚度不小于 6 mm。厚度小于 6 mm 的试样可在特定情况下测试或直接放置在耐火纤维垫上方测试，并应在试验报告中说明。

## 8.2 试样的状态调节

试验前，应根据 GB/T 40238 将试样在温度(23±2) ℃、相对湿度(50±5)%的条件下养护至质量恒定。

在相隔 24 h 的 2 次称量中，试样的质量偏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 1 周才能达到稳定的材料，应根据 GB/T 2918 养护后再进行试验。养护时间不应少于 1 周，并应在试验报告中说明。

## 8.3 制备

### 8.3.1 试样包覆

经过养护的试样采用厚度为 0.025 mm～0.04 mm 的单层铝箔包覆。铝箔应预先裁剪，使其能包覆试样的底面和侧面，并超出试样上表面至少 3 mm。包覆时光泽面朝向试样，试样放置在铝箔中间，将其底面和侧面包住，剪掉多余铝箔，使铝箔超过试样上表面部分不大于 3 mm。包覆之后，将试样放进试样安装架、盖上定位架，此时应看不到铝箔。

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 试样制备

所有试样(熔融膨胀或需要在约束条件下测试的材料除外，见 8.3.3)应使用图 4 所示定位架进行试验，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 1 层，不超过 2 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(并反转试样安装架准备试验)。

### 8.3.3 需要在约束下测试的材料的制备

需要在约束下测试的材料按下列步骤制备：

a) 用钢丝网片围成可容纳 10 mm×100 mm×100 mm 实心模板的结构，钢丝笼如图 9 所示。钢丝网片尺寸为 241 mm×101 mm，由(1.0±0.1) mm 的钢丝制成，钢丝间距为(9±1) mm；
b) 移除实心模板，将试样放入钢丝笼；
c) 按 8.3.1 包覆试样，但不使用定位架。

## 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 ℃～30 ℃。

## 10 标定

### 10.1 预标定

#### 10.1.1 通则

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(见10.1.2)、称重设备(见10.1.3和10.1.4)、氧分析仪或气体分析系统(见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中确定防护屏影响的标定应在安装防护屏的同时进行。对于有防护屏的新仪器，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±1) kW/m$^2$，调节排气流量为(0.024±0.002) m$^3$/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试样的厚度应至少6 mm。用已知热释放速率的PMMA验证引燃后前3 min内的平均热释放速率的响应特性。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

此项标定不应开启辐射锥。将装有(500±25) g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)。记录称重设备的输出。用机械或电子方式调零。将质量为(250±25) g的第2个称重标准件轻轻放置在试样安装架上，并记录输出结果。达到平衡后，轻轻移去第2个称重标准件，并再次记录结果。称重设备的响应时间是输出值10%～90%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±0.002) m$^3$/s，辐射照度为(50±1) kW/m$^2$。辐射锥温度达到平衡后，移开隔热板，将装有(500±25) g的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，至少以5 s为时间间隔记录称重设备的输出，用机械或电子方式调零。将质量为(250±25) g的第二个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是初始12个数值的平均值和最后12个数值的平均值之差的绝对值。

#### 10.1.5 氧分析仪的延迟时间和响应时间

此项标定不应开启辐射锥。开启风机，调节排气流量为(0.024±0.002) m$^3$/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。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。连通响应延迟是打开燃烧器与氧读数达到其最终偏差的50%时的时间差。断开响应延迟的计算方法

与连通响应延迟类似。延迟时间 $t_d$ 是至少 3 次连通响应延迟与断开响应延迟的平均值。对于给定时刻，间隔 $t_d$ 后记录的浓度应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 10%～90%所用时间的平均值。

最终偏差是燃烧器点燃(或移除)后氧分析仪 1 min～3 min 内的平均氧浓度。

#### 10.1.6 氧分析仪的输出噪声与漂移

此项标定不应开启辐射锥。开启风机，调节排气流量为(0.024±0.002) $m^3/s$。将无氧氮气通入氧分析仪。60 min 后，切换到样气(即排烟管道中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±0.01)%。开始以 5 s 最大间隔记录氧分析仪的输出，持续 30 min。利用最小二乘法拟合通过数据点的直线来确定漂移。对于直线拟合，0 min 时和 30 min 时读数之差的绝对值代表短期漂移。按公式(2)，通过计算直线周围数据的均方根偏差来确定输出噪声：

$$\mathrm{rms}=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}x_i^2}{n}} \qquad \cdots\cdots(2)$$

式中：

rms ——输出噪声，单位为微升每升(μL/L)；

$x_i$ ——数据点和呈线性趋势的直线之间的绝对差值。

#### 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(不加定位架)，用 6 个厚度为 17 mm～26 mm 的黑色 PMMA，在(50±1) $kW/m^2$ 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。根据双边 $t$ 检验取 5%的显著性水平，如果 2 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 2 组试验(3 次为 1 组)，按公式(3)和公式(4)计算平均值。

$$\overline{x}=\frac{\sum_{i=1}^{3}x_i}{3} \qquad \cdots\cdots(3)$$

$$\overline{y}=\frac{\sum_{i=1}^{3}y_i}{3} \qquad \cdots\cdots(4)$$

b) 按公式(5)计算合并标准差 $S_p$。

$$S_p=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{3}(x_i-\overline{x})^2+\sum_{i=1}^{3}(y_i-\overline{y})^2}{4}} \qquad \cdots\cdots(5)$$

c) 按公式(6)计算 $t$ 检验统计量。

$$t_S=\left|\frac{\overline{x}-\overline{y}}{0.816\ 5\ S_p}\right| \qquad \cdots\cdots(6)$$

如果检验统计量不超过 2.776，或 2 个平均值相同，则 $t$ 检验是成功的。

### 10.2 工作标定

#### 10.2.1 通则

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 称重设备的准确度

称重设备标定应使用试验试样质量范围内的称重标准件。标定前关闭辐射锥并使装置冷却到环境温度。将装有(500±25) g 称重标准件的试样安装架放置在称重设备上,称量并用机械或电子方式调零。将 50 g~200 g 的称重标准件轻轻放置在安装架上。稳定后,记录称重设备的输出值。再增加上述质量范围的称重标准件。此过程至少重复 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。称重设备的准确度即为称重标准件的质量和输出值之间的最大差,应优于 0.3 g。

#### 10.2.3 氧分析仪

氧分析仪校零和标定。标定时辐射锥处于工作或关闭状态,但不应处于升温阶段。开启风机,调节排气流量为(0.024±0.002) $m^3/s$。校零时,将纯氮气通入分析仪,流量和压力与样气相同。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,应通入干燥空气使分析仪的示值为(20.95±0.01)%。

#### 10.2.4 热释放速率标定

热释放速率标定用来确定孔板流量计标定常数(以下简称标定常数)$C$。标定时辐射锥处于工作或关闭状态,但不应处于升温阶段。开启风机,调节排气流量为(0.024±0.002) $m^3/s$。以 5 s 的时间间隔开始采集基线数据,至少持续 1 min。根据甲烷的净燃烧热为($50.0\times10^3$) kJ/kg,将甲烷通入标定燃烧器,通过标定的流量计或控制器得到对应 $\dot{q}_b=(5.0\pm0.5)$ kW 的流量。甲烷以恒定的速率燃烧 3 min,以 5 s 的采样周期采集数据。利用 3 min 内测得的 $\dot{q}_b$、$T_e$、$\Delta p$ 和 $X_{O_2}$ 数值的平均值,根据公式(7)计算标定常数 $C$。$X^0_{O_2}$ 由 1 min 基线测量期间测得的氧分析仪输出的平均值确定。

也可使用液体燃料进行上述标定。在称重设备上放置 1 个专用器皿,将液体燃料(如乙醇)注入专用器皿进行测试。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,应利用热流计测量辐射锥产生的辐射照度,并将其调节至所需辐射照度(误差不超过±2%)。当热流计插入标定位置时,不应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 烟密度计标定

#### 10.3.1 使用中性密度滤光片标定

烟密度计标定,应确保 6.19 中规定的两个中性密度滤光片和 100%透射状态的读数正确(消光系数 $k$ 值在 0.1 $m^{-1}$ 范围内)。滤光片标定至少每年进行 1 次或在清洗保养后重新组装光学元件后进行。

#### 10.3.2 试验前标定

每次试验之前应设定消光系数的零值(100%透射)。

### 10.4 非经常性标定

#### 10.4.1 工作热流计的标定

对比参照热流计进行工作热流计的标定,时间间隔应不超过 100 个工作小时,标定程序见附录

G 或 ISO 14934-3。对比标定应在(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偏差应在±2%以内。否则,应重新标定工作热流计。如果在整个热流量程范围内,工作热流计与参照热流计的偏差不能控制在±2%以内,应更换工作热流计,并重新标定。

#### 10.4.2 热释放速率测量的线性

此项标定最大工作时间间隔应不超过 100 个工作小时。标定时,利用 10.2.4 在 5 kW 时的标定常数 $C$ 值,按同样的程序,以 1×(1±10%) kW 和 3×(1±10%) kW 的 2 种流量状态进一步标定。在 1 kW和 3 kW 时测得的热释放速率与设置值的偏差应在±5%以内。

#### 10.4.3 标定燃烧器用流量计的准确度

标定燃烧器用流量计的准确度应每 6 个月进行 1 次校验。当根据 10.2.4 确定的标定常数,与前一次流量计标定后首次热释放速率标定测得的标定常数相差大于 5%时,也应校验流量计的准确度。流量计准确度的校验,使用的是 1 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,2 支流量计的偏差应在±3%以内。否则,应按照制造商的建议重新标定工作流量计。

或者,将甲烷流量设定为对应于 $\dot{q}_b$=(5.0±0.5) kW 的流速,关闭甲烷,用参照质量流量计替换原流量计。打开甲烷并测量流速,两个流量计的偏差应在±3%以内。否则,应重新标定流量计。

## 11 试验程序

**警示——燃烧试验中试样暴露在辐射锥下存在散发有毒或有害气体的可能性,应采取适当安全防护措施。**

### 11.1 一般注意事项

试验过程中伴随高温和燃烧。因此,可能存在引燃外部物体的危险。在插入和移去试样时,操作人员应戴防护手套。在高温情况下,接触辐射锥或与其相连的固定设备时,应戴防护手套。不应触摸火花点火器,因其带有 10 kV 的高压电。试验前,检查装置的排烟系统是否正常运行,燃烧产物应排放到排烟能力足够大的建筑排烟系统中。某些类型试样试验时,有可能喷溅出熔融物或尖锐碎片,应保护眼睛不受伤害。

### 11.2 试验准备

11.2.1 检查 $CO_2$ 过滤器和水分过滤器。必要时更换吸附剂。排空冷阱中的凝结水。冷阱的正常工作温度不应超过 4 ℃。

如果在检查期间打开过气体取样系统线路中的过滤器,检查气体取样管路是否发生泄漏(开启试样泵),例如,通入与样气相同流量和压力的纯氮气(气源尽可能接近环形取样器),此时氧分析仪读数应为零。

11.2.2 按 6.6 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±0.002) $m^3/s$。

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板(例如,带耐热纤维垫的空试样安装架或水冷的辐射屏蔽板),以避免过多的热量传递至称重设备。

11.2.6 每次试验前应设置消光系数的零值。

11.2.7 如果点火器顶端有烟尘积聚,应在试验前清理。

### 11.3 步骤

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

11.3.2 将辐射屏蔽板放置到位(见 6.3)。移去保护称重设备的隔热板(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。

辐射屏蔽板在移入之前应冷却到 100 ℃以下。

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

对于 a)型屏蔽板(见 6.3),移去辐射屏蔽板,并开始试验。在 1 s 之内移去屏蔽板,插入并开启点火器。

对于 b)型屏蔽板(见 6.3),屏蔽板应在插入后 15 s 之内移去,并开始试验。在 1 s 之内移去屏蔽板,插入并开启点火器。

11.3.4 记录闪燃或短暂燃烧出现的时间。当持续火焰出现时,记录时间,并关闭点火器电源,移去点火器。如果在关闭火花点火器后不到 60 s 之内火焰熄灭,重新插入火花点火器,并在 5 s 之内打开点火器电源。在这种情况下,保持点火器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 的试验后追加数据采集时间)。仅对持续燃烧 30 min 时间段的数据进行分析处理。

b) 试样 30 min 内未被引燃。

c) $X_{O_2}$回到初始氧气浓度值减去 100 μL/L,持续 10 min。这 10 min 的开始时间为试验结束时间。

d) 试样的质量在 60 s 内均小于 0.1 g。这 60 s 的开始时刻即为试验结束时间。

出现任何上述情况均可终止试验,但最短试验持续时间应为 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。将隔热板放置在称重设备上。

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。应比较 3 个试样在 180 s 内的平均热释放速率。若其中 1 个结果与 3 个的平均值之差超过 10%,则应另取 3 个试样进行试验,平均值小于 10 kW/m$^2$时除外。这种情况下,应报告这 6 个数据的算术平均值。

试样未发生引燃,产烟速率试验数据仍有效。每次试验之前应按 11.2 规定的程序校验消光系数的零值。

如果试样熔化溢出试样架,发生爆裂,或者试样过度膨胀并接触火花点火器,或者试样上表面达到锥形加热器下缘平面,则试验数据无效。

注:本文件中热释放速率测量,通常采用引火源强制点燃方式。也可开展无引火源的非标准试验,用于评估不发生燃烧条件下的产烟速率。

## 12 计算

### 12.1 通则

12.2～12.5 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 $H_2O$)分析的装置,且未从氧气的取样管线中去除 $CO_2$的情况,计算见附录 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(7)～公式(9)计算。引燃的有效临界辐射照度计算见附录 H。

### 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 $C$，按公式(7)计算：

$$C=\frac{\dot{q}_b}{(12.54\times10^3)(1.10)}\sqrt{\frac{T_e}{\Delta p}}\,\frac{1.105-1.5\,X_{O_2}}{X^0_{O_2}-X_{O_2}} \qquad \cdots\cdots(7)$$

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$(12.54\times10^3)$是甲烷的 $\Delta h_c/r_o$，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延迟时间 $t_d$，按公式(8)计算氧分析仪读数：

$$X_{O_2}(t)=X^1_{O_2}(t+t_d) \qquad \cdots\cdots(8)$$

12.3.2 热释放速率$\dot{q}(t)$，按公式(9)计算：

$$\dot{q}(t)=(\Delta h_c/r_o)(1.10)C\sqrt{\frac{\Delta p}{T_e}}\cdot\frac{X^0_{O_2}-X_{O_2}}{1.105-1.5\,X_{O_2}} \qquad \cdots\cdots(9)$$

式中：

试样的 $\Delta h_c/r_o$ 取值为$(13.1\times10^3)$ kJ/kg，除非已知更准确的值，而且 $X^0_{O_2}$ 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 $\dot{q}_A(t)$按公式(10)计算：

$$\dot{q}_A(t)=\frac{\dot{q}(t)}{A_S} \qquad \cdots\cdots(10)$$

式中：

$A_S$——试样的初始暴露面积，为0.008 84 $m^2$。未使用定位架的情况(见 8.3.2)，$A_S$ 取 0.01 $m^2$。

### 12.4 排烟管道的流量

排烟管道内的质量流量 $\dot{m}_e$，按公式(11)计算：

$$\dot{m}_e=C\sqrt{\frac{\Delta P}{T_e}} \qquad \cdots\cdots(11)$$

式中：

$\dot{m}_e$——排烟管道内的质量流量，单位为千克每秒(kg/s)。

### 12.5 质量损失速率

12.5.1 每一时间间隔的质量损失速率$-\dot{m}$，可利用下列五点差分公式计算，见公式(12)～公式(16)。

对于第一次采集($i=0$)：

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

对于第二次采集($i=1$)：

$$-[\dot{m}]_{i=1}=\frac{3\,m_0+10\,m_1-18\,m_2+6\,m_3-m_4}{12\Delta t} \qquad \cdots\cdots(13)$$

对于 $1<i<n-1$ 的任何一次采集(这里 $n$ 是采集的总次数)：

$$-[\dot{m}]_i=\frac{-m_{i-2}+8\,m_{i-1}-8\,m_{i+1}+m_{i+2}}{12\Delta t} \qquad \cdots\cdots(14)$$

对于最后一次采集的前次采集($i=n-1$)：

$$-[\dot{m}]_{i=n-1}=\frac{-3\,m_n-10\,m_{n-1}+18\,m_{n-2}-6\,m_{n-3}+m_{n-4}}{12\Delta t} \quad \cdots\cdots(15)$$

对于最后一次采集($i=n$)：

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

12.5.2 主要燃烧期(即燃料质量损失从10%～90%变化期间)的质量损失速率$\dot{m}_{A,10\sim90}$，按公式(17)计算：

$$\dot{m}_{A,10\text{-}90}=\frac{m_{10}-m_{90}}{t_{90}-t_{10}}\times\frac{1}{A_S} \quad \cdots\cdots(17)$$

式中：

$m_{10}=m_s-0.10\Delta m$；

$m_{90}=m_s-0.90\Delta m$；

$\Delta m=m_s-m_f$。

注：有效燃烧热$\Delta h_{c,eff}$的计算公式，见附录D。

## 12.6 烟气遮挡

12.6.1 消光系数$k$，由烟密度计确定，按公式(18)计算：

$$k=\ln(I_0/I)\,L^{-1} \quad \cdots\cdots(18)$$

式中：

$I_0/I$ ——入射光强度与透射光强度的比值；

$L$ ——光程(光束穿过排烟管道的距离)。

12.6.2 暴露试样单位面积的产烟速率$P_{S,A}$，按公式(19)计算：

$$P_{S,A}=A^{-1}k\,\dot{V}_S \quad \cdots\cdots(19)$$

烟密度计处的体积流量$\dot{V}_S$，根据孔板流量计测得的质量流量$\dot{m}_e$，按公式(20)计算：

$$\dot{V}_S=(\dot{m}_e T_S)(12.2\times10^3 M)^{-1} \quad \cdots\cdots(20)$$

$T_S$由6.18中的热电偶测得。

如果有$O_2$、$CO_2$、CO或$H_2O$分析仪，$\dot{m}_e$和$M$由公式(F.9)和公式(F.10)确定。

12.6.3 未燃烧期间(引燃前)暴露试样单位面积的产烟总量$S_{A,1}$，按公式(21)计算：

$$S_{A,1}=A^{-1}\sum_{i=s}^{i=f}\dot{V}_S k\,\Delta t \quad \cdots\cdots(21)$$

燃烧期间(引燃后)暴露试样单位面积的产烟总量$S_{A,2}$，按公式(22)计算：

$$S_{A,2}=A^{-1}\sum_{i=s}^{i=f}\dot{V}_S k\,\Delta t \quad \cdots\cdots(22)$$

式中，$i$的取值$s$和$f$分别代表计算平均值的时间段的开始和结束时刻。因此，对于未燃烧情况，$s$是指试验开始时刻，$f$是指有持续火焰燃烧的开始时刻。对于燃烧的情况(必要时)，$s$是指持续燃烧开始的时刻，$f$是指燃烧阶段终止的开始时刻。

# 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。报告中应使用表1定义的单位。

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) 试验人员。

f) 商品名和试样标识码/号。

g) 成分或通用标识。

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，受热表面，以及使用的特殊安装程序(如对于膨胀试样)。

l) 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，试验重复试样的数目(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，上述参数也应报告，每个时间段的起始时刻是试验开始后最后一个热释放速率负值之后的下一个读数对应的时刻。有些试样未出现可见的持续火焰，但却出现非零的热释放速率数值。热释放速率通常会出现负值，因为在试样开始燃烧之前输出数据为 0±$n$(噪声)。

应利用梯形积分法计算热释放速率均值。例如，以 5 s 的数据采集周期为例，$\dot{q}_{A,180}$ 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，然后将此初值之后采集到的 35 次热释放速率值求和；如果试验在 180 s 内结束，用试验时间内的平均值作为热释放速率均值；

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($MJ/m^2$)。放热总量计算时间段：起始时刻为试验开始后最后一个热释放速率负值之后的下一个读数对应的时刻，终止时刻为试验记录的最后读数对应时刻。

放热总量也可利用梯形积分法计算。此时，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[$g/(m^2 \cdot s)$]，计算时间段为从引燃到试验结束。

v) 试样单位面积上平均质量损失速率[1)] $\dot{m}_{A,10\text{-}90}$，单位为克每平方米秒[$g/(m^2 \cdot s)$]，根据质量损失 10%～90%的数据确定。

1) 每个试样均报告。

w) 对于所有的重复试样，o)、p)、r)、s)、t)、u)和 v)条中确定的数值分别取算术平均值。

x) 附加现象[1)]，如短暂燃烧或闪燃。

y) 试验中出现的问题[1)]（必要时）。

z) 每个试样未燃烧期间暴露表面的单位面积产烟总量 $S_{A,1}$。

aa) 每个试样燃烧期间暴露表面的单位面积产烟总量 $S_{A,2}$。

bb) 每个试样暴露表面的单位面积产烟总量 $S_A = S_{A,1} + S_{A,2}$。

cc) 每个试样单位面积产烟速率随时间变化曲线（$P_{S,A}$，时间的函数），标识第一次点燃时间。

dd) 试验试样的暴露表面积（$A$）。

# 附 录 A
（资料性）
# 注释及操作员指导

## A.1 概述

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 热释放速率是评价火灾危险性的重要参数之一。若火灾中可燃物品的各表面由不同材质制成，会导致其火灾危险性评估困难。每种材质的表面若能被引燃，宜首先确定其引燃时间。由于已经燃烧的制品会对邻近制品产生辐射影响，应明确火灾规模，并评估每个表面上的火焰蔓延情况。如果已知给定的辐射照度下单位面积的热释放速率，就可利用这个试验数据计算整个表面的热释放速率(时间的函数)。那么，放热总量是所有表面上全部材料的燃烧热量总和。

A.2.2 计算火灾放出的热量比较复杂，其影响因素主要有：

a) 参与火灾的每种材料的持续燃烧时间；

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照度。宜根据每个被评价的制品分别确定辐射照度。在给定使用条件和具体制品时，通常需要根据一些全尺寸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；委托单位没有明确指定时，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其他辐射照度的试验。

## 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延迟空间模拟的绝热环境中烟气的焓。使用带防护的加热器可实现装置的真正绝热，但价格昂贵。由于燃烧室隔热方式简单，使测得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恒温仪器替代燃烧室，在一个能够保持恒温的仪器内测量热释放速率。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 无损失地直接测量热量比较困难。但是，无损失地收集全部燃烧产物，测量烟气中的氧浓度比较简单。利用耗氧原理的测量可计算热释放速率。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($13.1\times10^3$) kJ。通常，对于大多数可燃物放热量的误差大约为±5%。这个原理是本试验方法的基础。即使制品的燃烧产物主要为 CO 或烟灰，而不是 $CO_2$，本方法依然适用，这种情况下，可使用修正因子。

产物中 CO 浓度过高可能是由于氧气供给不足造成的，在本试验方法的正常操作条件下，氧气供应量充足，不可能发生这种情况。

## A.4 辐射锥的设计

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水冷盘或开放的空气条件下。如果没有温度调节，由于在固体表面附近试样火焰的加热作用，会

使附近的空气温度升高，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，也能对耗氧量产生影响。

A.4.2 截锥形的加热器，最初是为 ISO 5657 研制的，在本文件中已经改型。辐射锥的改进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 引燃装置

在许多装置中利用气体点火器引燃试验试样，但气体点火器会影响热释放速率的计算。此外，其设计难点在于：点火器宜处于试样中心，受气流影响不会熄灭且耐热，关键是不宜有额外的热作用于试样。由于电火花点火器克服了上述困难，只需不定期的清洁及对电极进行调节，因此采用电火花点火器作为引燃装置。

## 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。

## A.7 光源

烟气等气溶胶对光的遮挡作用表现为两种不同的现象：吸收和散射，为了深入研究可单独测量。但从防火安全角度考虑，通常只测量总的烟气遮挡。烟气遮挡指由于吸收和散射造成的光的总衰减。

最早期的火灾测试方法如 ASTM E 662 或 DIN 试验方法，使用白色光源和准直光学器件（带有感应光能的光电探测器）。然而，理论上讲，布格定律只适用于单色光，多色光不适用。试验研究已经证实了采用白光会导致误差的理论预测。

通过使用单色光源可避免这种误差，其可通过过滤器或单色光获得。激光为固有的单色光源，现有红光波长为 632.8 nm 的氦氖激光器即可提供单色光，使用更方便。激光光源还有其他优点：固有准直性足够高时，不需要透镜；激光光源具有窄光束的特点，能减少由于多次散射造成的误差。

## A.8 光学元件上的烟尘沉积

传统测量设备为光学元件设置了测烟窗口，但在试验过程中，烟尘会沉积在窗口部位，因此仪器需要进行基线校正。装置也可采取不同设计方法，如使用直径非常小的激光源。为了避免光学元件上的烟尘颗粒沉积，管道内部相对于试验环境形成负压。此外，选取狭长的光束管可使任何进入管道的颗粒沉积在管壁上，而不会沉积到离管道较远的光学元件上。

## A.9 光密度计设计

传统的烟密度计是单光束仪器，电源波动、老化等导致的光源强度变化会造成测量信号误差。带两个光电探测器的双光束设计具有更好的稳定性。一个探测器测量烟雾衰减光辐射，另一个探测器仅测量光源强度，不受任何烟气干扰。通过取这两个信号的比率，测量系统实现了很高的稳定性。现有装置采用双光束设计。

激光光密度计的两个组件彼此刚性安装，与排烟管道仅采用弹性垫片机械连接，这种方式可避免光密度计受排烟风机的振动影响。可使用的光密度计为：利用电子电路接收两个探测器信号并根据消光系数 $k$ 最终直接输出结果，或将两个探测器信号转换至数据采集系统并在数据还原过程中执行计算。

光密度计的标定方法为：将 2 个不同衰减值的滤光片插入光密度计预设插槽中。使用 2 个不同衰

减值的滤光片验证标定是线性的。光密度计光源前面另有一个插槽。这个滤光片插槽设计用于证明这两个光束是平衡的。如果探测器正确匹配、系统调试妥当，由于两个光束有同样的衰减，衰减源选取不应影响最终读数。

本部分中描述的装置使用了烟气直通系统，最大限度减少了烟气测量设备的常见问题，例如闭式烟气测量系统常见烟尘过载导致的过多管道壁沉积和非线性效应。已开展的大量对比实验已经证明现有设计不易造成此类问题。

## A.10 产烟速率测量原理

光密度计的测试数据常用消光系数 $k$ 表达，由公式(A.1)确定：

$$k = \ln(I_0/I)L^{-1} \qquad \text{(A.1)}$$

式中：

$I$ ——衰减的光强度；

$I_0$ ——无烟时的光强度；

$L$ ——光程(光束穿过排烟管道的距离)。

产烟速率 $P_s$，由公式(A.2)计算得出：

$$P_s = k\dot{V}_s \qquad \text{(A.2)}$$

式中：

$\dot{V}_s$——体积流量。

暴露表面单位时间产烟速率，按公式(A.3)计算：

$$P_{s,A} = P_s A^{-1} \qquad \text{(A.3)}$$

式中：

$A$——试样的暴露面积。

## A.11 体积流量的计算

排烟管道内的质量流量按第 12 章中所述计算。计算产烟速率所需体积流量可按公式(A.4)由质量流量导出：

$$\dot{V}_s = \dot{m}_e\rho^{-1} = \dot{m}_e \frac{T_s}{\rho_0 T_0} \qquad \text{(A.4)}$$

式中 $\rho$ 为光密度计处的气体密度，按公式(A.5)计算：

$$\rho = 1.293\ \text{kg/m}^3(273.15\ \text{K}/T_s) \qquad \text{(A.5)}$$

常温常压下空气的密度$\rho_0$为 1.293 kg/m$^3$，$T_s$ 是激光光密度计附近管道内的温度，由该位置处热电偶测量。压力变化不需要修正。

## A.12 使用校准因子标定烟密度计

采用滤光片标定烟密度计提高系统性能。烟密度计中使用的光电二极管具有较高线性度。商用滤光片的光密度通常为一个波长范围内的均值，而某频率激光的光密度值可能不是这个均值。滤光片仅限于作为系统功能的日常标定。用户可通过检查零和 100%透射率以及光电二极管的线性进行标定。

如果使用以正确波长校准过的滤光片，则可执行下面的程序。

将滤光片置于管道和探测器之间的光束中，进行 60 s 数据采集。按公式(A.6)得到测量的标定消光系数$k_1$：

$$k_1 = \ln(I_0/I)L^{-1} \qquad \text{(A.6)}$$

式中：

$L$——光程(光束穿过排烟管道的距离)。

修正值$k_2$按公式(A.7)得到：

$$k_2 = (2.303D')L^{-1} \quad \cdots\cdots(A.7)$$

式中：

$D'$——标定滤光片的光密度。

修正系数$k_2/k_1$用于修正所有后续测量的 $k$ 值，因此 $k$ 值按公式(A.8)计算：

$$k = (k_2/k_1)k_m \quad \cdots\cdots(A.8)$$

式中：

$k_m$——消光系数实测值。

校准因子 $F$ 按公式(A.9)计算：

$$F = (k_2/k_1)L^{-1} \quad \cdots\cdots(A.9)$$

$k$ 值按公式(A.10)计算：

$$k = F\ln(I_0/I) \quad \cdots\cdots(A.10)$$

# 附 录 B
（资料性）
## 补充计算——试样比消光面积质量损失率归一化

烟气数据应用于火灾模型，有时需要试样单位质量损失的产烟量数据，该数据与装置气流状况和试样质量无关。比消光面积定义为试样产生烟气的消光面积除以其质量损失，按公式(B.1)计算：

$$\sigma = k\,\dot{V}_s \Delta m^{-1} t \qquad \text{(B.1)}$$

式中：

$\sigma$ ——比消光面积，单位为平方米每千克($m^2/kg$)；

$k$ ——消光系数，单位为每米($m^{-1}$)；

$\dot{V}_s$ ——指定时段测量点处的烟气体积流量，单位为立方米每秒($m^3/s$)；

$\Delta m$ ——指定时段试样质量损失，单位为千克(kg)；

$t$ ——$\Delta m$ 对应时段，单位为秒(s)。

燃烧阶段指定时刻比消光面积可用产烟速率除以质量损失计算得到，按公式(B.2)计算：

$$\sigma = k\,\dot{V}_s (-\dot{m})^{-1} \qquad \text{(B.2)}$$

但是，当质量损失速率为零或很小时，不宜使用公式(B.2)。

质量损失速率$\dot{m}$按 12.5 所述计算。

燃烧阶段的平均比消光面积按公式(B.3)计算：

$$\overline{\sigma}_f = (m_{ig} - m_f)^{-1} \sum_{i=t_{ig}} \dot{V}_s k \Delta t \qquad \text{(B.3)}$$

式中：

$m_{ig}$ ——引燃时试样的质量；

$m_f$ ——试验结束时试样的质量。

报告的变量包括：

a) 每个试样燃烧阶段的 $\overline{\sigma}_f$；

b) 每个试样的 $\sigma$ 时间曲线。

平均比消光面积是火灾模拟中的一个重要参数，受火灾规模影响不大。因此，如果燃烧条件相似，由缩尺试验获得的 $\sigma$ 值接近实际火灾的情况。

烟气变量及其用途的补充信息见文献[12]和文献[27]。

注：对于含水分或结合水的材料，测量的质量损失不能完全代表燃烧的质量损失。

# 附 录 C
（资料性）
分辨率、精密度和误差

## C.1 分辨率

甲烷标定研究表明，在 1 kW～12 kW 范围内，甲烷功率呈现 5%以内的线性波动，在 5 kW～12 kW 范围内，甲烷功率呈现 2 %以内的线性波动，因此热释放速率在±1.5%范围内呈典型波动（主要由于火焰自身的紊流）。其他气体的标定结果类似，将标定气体以稳定的流速输入燃烧器。固体可燃物燃烧的均匀性由表面高温热降解是否均匀决定，表面热降解的不均匀性会导致热释放速率呈现显著波动。例如，PMMA 的波动性通常大于木制品。此外，对于固体材料，分辨率是由试样的热降解过程决定的，与仪表限值无关。

## C.2 响应的速度

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

## C.3 精密度

当多个实验室试验时，C.3 和 C.4 中的重复性限 $r$ 和再现性限 $R$ 根据 ISO 5725:1986 计算。

注：ISO 5725-1 的最新版本提出 $r$ 和 $R$ 为 1 倍相对标准偏差，而不是 2.8 倍标准偏差。

ISO 火灾安全技术委员会第一分技术委员会第五工作组（ISO/TC 92/SC 1/WG 5）在多个实验室进行了一系列试验。使用的试验方案与本文件相同。试验的材料是 25 mm 的黑色 PMMA（$\rho$＝1 180 kg/m$^3$）、30 mm 的硬质聚氨酯泡沫（$\rho$＝33 kg/m$^3$）、13 mm 的颗粒板（$\rho$＝640 kg/m$^3$）、3 mm 的硬纸板（$\rho$＝1 010 kg/m$^3$）、10 mm 的石膏板（$\rho$＝1 110 kg/m$^3$）和 10 mm 的阻燃颗粒板（$\rho$＝750 kg/m$^3$）。每种材料以两种定位（水平和垂直）和两种辐射照度（25 kW/m$^2$ 和 50 kW/m$^2$）各重复 3 次试验，6～8 个实验室完成了试验。

使用相同试验方案、辐射照度、定位方向和重复试样数量，美国材料与试验协会（ASTM）的锥形量热仪工作组（E05 SC21 TG60）开展了类似系列试验，补充了上述试验数据。ASTM 试验中 $r$ 和 $R$ 的结果趋势与 ISO/TC 的结果基本类似，所以将这些数据组合成数据集进行分析。剔除了一个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 的阻燃 ABS（$\rho$＝325 kg/m$^3$）、12 mm 的颗粒板（$\rho$＝640 kg/m$^3$）、6 mm的黑色 PMMA（$\rho$＝1 180 kg/m$^3$）、6 mm 的聚乙烯（$\rho$＝800 kg/m$^3$）、6 mm 的 PVC（$\rho$＝1 340 kg/m$^3$）和 25 mm 的硬聚异氰脲酸酯泡沫（$\rho$＝28 kg/m$^3$）。

根据 ISO 5725:1986，利用此数据集，计算了 5 个变量 95%置信度的重复性限 $r$ 和再现性限 $R$ 数值。$r$ 和 $R$ 的数值等于 2.8 倍标准偏差。被选为代表试验结果的 5 个变量是：$t_{ig}$、$\dot{q}_{A,max}$、$\dot{q}_{A,180}$、$Q_{A,tot}$和 $\Delta h_{c,eff}$。用线性回归模型（ISO 5725:1986 中的公式Ⅱ）拟合 $r$ 和 $R$，$r$ 和 $R$ 是上述 5 个变量中每个变量的所有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。

按公式（C.1）和公式（C.2）计算，得到在 5 s～150 s 范围内关于$t_{ig}$的结果：

$$r = 4.1 + 0.125\, t_{ig} \qquad \text{（C.1）}$$

$$R = 7.4 + 0.220\, t_{ig} \qquad \text{（C.2）}$$

按公式（C.3）和公式（C.4）计算，得到在 70 kW/m$^2$～1 120 kW/m$^2$ 范围内关于 $\dot{q}_{A,max}$的结果：

$$r = 13.3 + 0.131\,\dot{q}_{A,max} \quad \cdots\cdots (C.3)$$

$$R = 60.4 + 0.141\,\dot{q}_{A,max} \quad \cdots\cdots (C.4)$$

按公式(C.5)和公式(C.6)计算,得到在 70 kW/m$^2$～870 kW/m$^2$ 范围内关于 $\dot{q}_{A,180}$ 的结果:

$$r = 23.3 + 0.037\,\dot{q}_{A,180} \quad \cdots\cdots (C.5)$$

$$R = 25.5 + 0.151\,\dot{q}_{A,180} \quad \cdots\cdots (C.6)$$

按公式(C.7)和公式(C.8)计算,得到在 5 MJ/m$^2$～720 MJ/m$^2$ 范围内关于$Q_{A,tot}$的结果:

$$r = 7.4 + 0.068\,Q_{A,tot} \quad \cdots\cdots (C.7)$$

$$R = 11.8 + 0.088\,Q_{A,tot} \quad \cdots\cdots (C.8)$$

按公式(C.9)和公式(C.10)计算,得到在 7 kJ/g～40 kJ/g 范围内关于 $\Delta h_{c,eff}$ 的结果:

$$r = 1.23 + 0.050\Delta h_{c,eff} \quad \cdots\cdots (C.9)$$

$$R = 2.42 + 0.055\Delta h_{c,eff} \quad \cdots\cdots (C.10)$$

举例说明上述公式的意义。假设实验室测试了某种材料的试样,并确定了引燃时间为 100 s。如果同一实验室对同样的材料进行第 2 次试验,$r$ 的估计值为:

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

则第 2 次试验结果落在 83 s 和 117 s 之间的可能性为 95%。假设相同的材料由不同的实验室测试,$R$ 的估计值为:

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

则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%。

## C.4 精密度(对于膨胀或变形材料的试验程序)

使用相同的试验方案,ISO/TC 61/SC 4/WG 3 按照 7.5 的规定,在多个实验室开展了膨胀或变形材料的试验。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)。试验的材料为 9.6 mm的黑色 PMMA、4 mm 的 PVC、3 mm 的阻燃聚丙烯、5.8 mm 和 7.8 mm 的聚碳酸酯。每种材料以水平定位和 50 kW/m$^2$ 的辐射照度重复测试 3 个试样,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%置信度的重复性限 $r$ 和再现性限 $R$ 数值。线性回归模型(ISO 5725:1986 中的公式Ⅱ)拟合 $r$ 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。

按公式(C.11)和公式(C.12)计算,得到在 27 s～167 s 范围内关于 $t_{ig}$ 的结果:

$$r = 2.3 + 0.255\,t_{ig} \quad \cdots\cdots (C.11)$$

$$R = 2.3 + 0.652\,t_{ig} \quad \cdots\cdots (C.12)$$

按公式(C.13)和公式(C.14)计算,得到在 83 kW/m$^2$～855 kW/m$^2$ 范围内关于 $\dot{q}_{A,max}$ 的结果:

$$r = 36.6 + 0.064\dot{q}_{A,max} \quad \cdots\cdots (C.13)$$

$$R = 36.6 + 0.330\dot{q}_{A,max} \quad \cdots\cdots (C.14)$$

按公式(C.15)和公式(C.16)计算,得到在 27 MJ/m$^2$～319 MJ/m$^2$ 范围内关于$Q_{A,tot}$的结果:

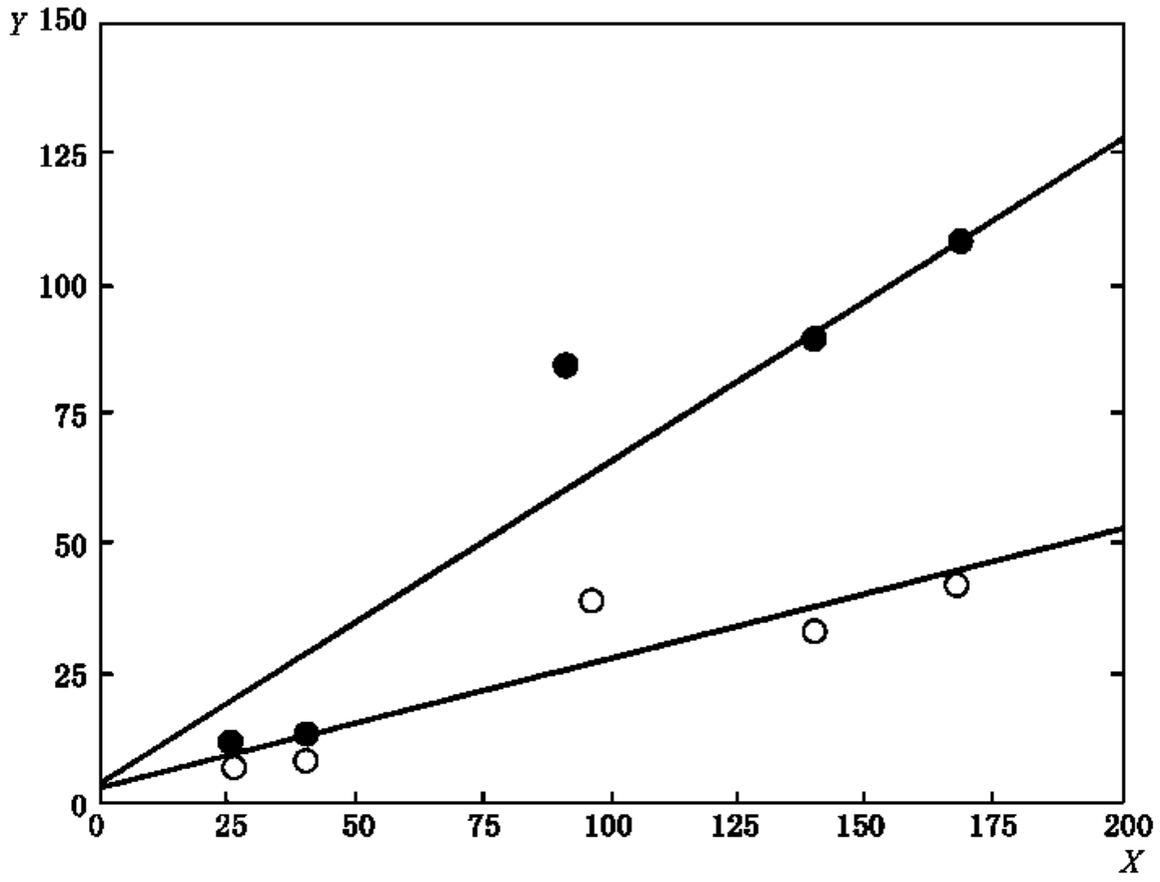
$$r = 15.5 + 0.008\,Q_{A,tot} \quad \cdots\cdots (C.15)$$

$$R = 15.5 + 0.125\,Q_{A,tot} \quad \cdots\cdots (C.16)$$

公式(C.11)和公式(C.12)与公式(C.1)和公式(C.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 2 个变量的重复性看起来不受影响[见公式(C.3)和公式(C.7)与公式(C.13)和公式(C.15)的对比],但它们的再现性较差[公式(C.4)和公式(C.8)与公式(C.14)和公式(C.16)的对比]。

### C.5 热释放测量误差

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 $\Delta h_c/r_o=(13.1\times10^3)$ kJ/kg 的标准值，得到了±5%的期望误差范围。对于只有单一热降解机制的均匀材料，通过氧弹量热仪测量确定 $\Delta h_c$ 和通过最终元素分析得到 $r_o$，可降低这个误差。然而，对于大多数试验，这是不实际的，因为试样通常是复合的、非均匀的或表现多次热降解反应。但是，对于参照材料谨慎确定 $\Delta h_c/r_o$，可有效减小误差。见图 C.1～图 C.3。




标引符号说明：

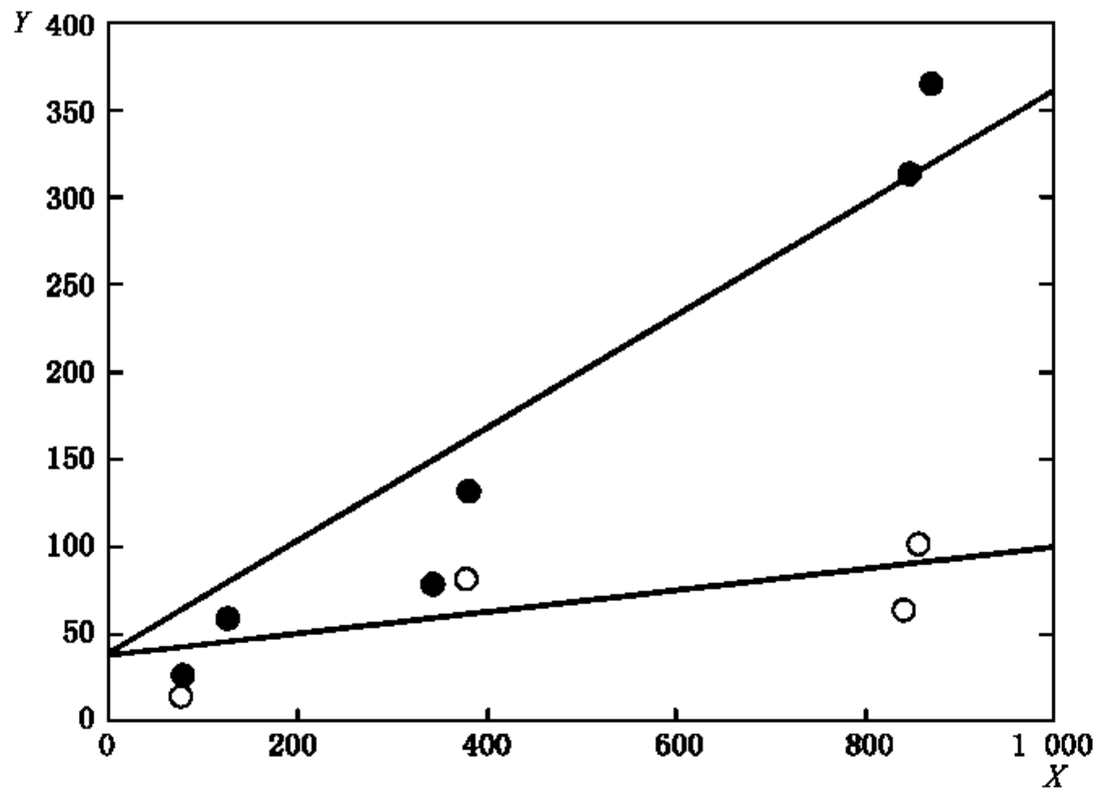
$X$ ——平均引燃时间(s)；

$Y$ ——$r$ 和 $R$；

○——$r=2.3+0.26X$；

●——$R=2.3+0.55X$。

**图 C.1 膨胀材料 $t_{ig}$ 的 $r$ 和 $R$ 值**




标引符号说明：

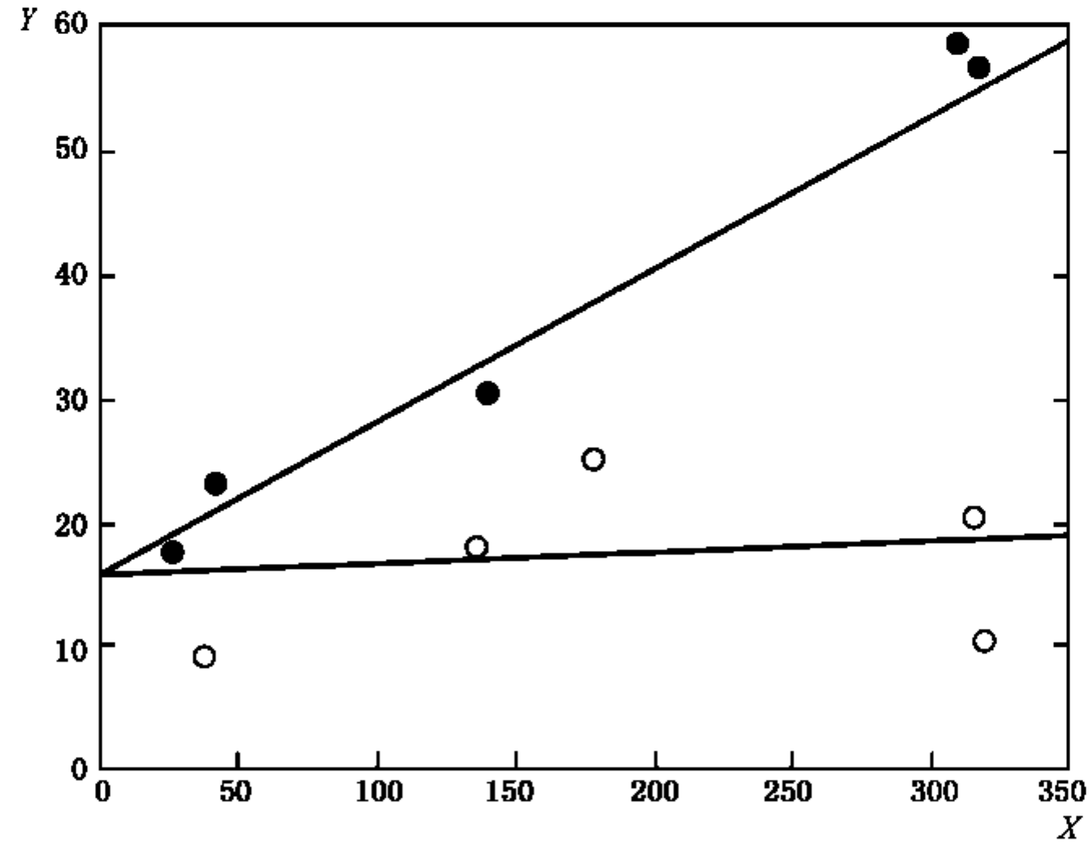
$X$ ——热释放速率峰值的均值(kW/m²)；

$Y$ ——$r$ 和 $R$；

○——$r=37+0.064X$；

●——$R=37+0.33X$。

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




标引符号说明：

$X$ ——放热总量的均值(MJ/m²)；

$Y$ ——$r$ 和 $R$；

○——$r=1+0.008X$；

●——$R=16+0.133X$。

**图 C.3　膨胀材料 $Q_{A,tot}$ 的 $r$ 和 $R$ 值**

## C.6　烟气精密度

欧洲防火研究 CBUF(软体家具燃烧性能)项目中，7 个实验室用 5 种模拟软垫家具复合材料的试

样开展了一系列试验。试验中，比消光面积($m^2/kg$)是基于烟气消光系数和试样的质量损失测定的，同时得到热释放数据。附录 B 解释了比消光面积。尽管这个参数为补充数据，各实验室仍给出了基于产烟测量方法的精确数据结果。

表 C.1 给出了软垫家具组件的试样组成。

**表 C.1　软垫家具材料组合**

| | |
|---|---|
| 组合 1 | 背面涂覆丙烯酸类织物(546 $g/m^2$)，未阻燃高弹性聚氨酯泡沫(21 $kg/m^3$) |
| 组合 2 | 阻燃棉织物(422 $g/m^2$)，阻燃改性高回弹泡沫(30 $kg/m^3$) |
| 组合 3 | 聚丙烯织物(264 $g/m^2$)，未阻燃聚氨酯泡沫(21 $kg/m^3$) |
| 组合 4 | 羊毛织物(432 $g/m^2$)，阻燃改性高回弹泡沫(30 $kg/m^3$) |
| 组合 5 | 同组合 1，但包括芳纶内衬(65 $g/m^2$) |

表 C.2 给出了重复性限 $r$、再现性限 $R$ 和均值 $m$。测试时根据 ISO 5725:1986 进行分析。

**表 C.2　比消光面积的重复性和再现性**

| 试样 | 实验室报告 | $m$ | $r$ | $R$ |
|---|---|---|---|---|
| 组合 1 | 6 | 399 | 93 | 366 |
| 组合 2 | 5 | 108 | 60 | 76 |
| 组合 3 | 6 | 499 | 91 | 112 |
| 组合 4 | 6 | 241 | 27 | 56 |
| 组合 5 | 5 | 341 | 93 | 333 |

ISO 5725:1986 中规定的线性回归模型可用来描述 $r$ 和 $R$ 与均值 $m$ 的关系。根据表 C.2 中的数据得到公式(C.16)和公式(C.18)：

$$r = 28.83 + 0.14m \quad \cdots\cdots (C.17)$$

$$R = 15.03 + 0.56m \quad \cdots\cdots (C.18)$$

## C.7　产烟测量中的偏差

本试验方法的偏差未知。

# 附 录 D
（资料性）
质量损失速率和有效燃烧热

## D.1 有效燃烧热

只具有单一热降解模式的均质试样，燃烧期间的有效燃烧热是常数且小于理论净燃烧热值。例如大多数有机液体具有单一热降解模式，有效燃烧热恒定。相反，纤维素制品具有不止一种热降解模式，其有效燃烧热是变化的。对于具有不止一种热降解模式的材料、复合材料或非均质材料，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：对于含水分或有结合水的材料，测得的质量损失不能完全反映燃烧热。

## D.2 符号

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

## D.3 计算

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，按公式(D.1)计算：

$$\Delta h_{c,eff} = \frac{\dot{q}(t)}{-\dot{m}} \qquad \cdots\cdots(D.1)$$

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 $\Delta h_{c,eff}$ 的均值。均值计算是对公式(D.1)中的分子和分母分别取平均，而不是计算比值的均值。例如在整个试验中的平均 $\Delta h_{c,eff}$，由公式(D.2)得出：

$$\Delta h_{c,eff} = \frac{\sum \dot{q}(t)\Delta t}{m_s - m_f} \qquad \cdots\cdots(D.2)$$

公式(D.2)的求和时间段为引燃开始后的整个试验持续时间。

# 附 录 E
（资料性）
垂直定位的测试

## E.1 引言

本文件正文部分只涉及水平定位试验。本文件也适用于制品的最终使用定位是垂直的情况，如墙衬。本试验方法不代表实尺制品的缩尺模型，只是测试试样对规定的外部辐射的基本响应。施加到试样上的总热量是外部辐射热与来自试样本身燃烧的热流之和。试验中两种定位方式下试样本身燃烧的热流不同。应当注意，实验室规格试样的燃烧热流与实尺制品燃烧热流没有对应关系，而取决于制品实际使用情况。为了确定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照度值，该值更接近于实尺制品暴露在火灾中的辐射热流值。

对于大多数试样，水平定位方式试样融化、滴落和散落带来的试验问题较少，因此标准的试验定位是水平定位。水平定位试验，在火花间隙处存在大量试样热降解烟气，引燃数据的再现性更好。垂直定位方式更便于安装光学高温计、试样热电偶及其他的专用仪器，因此在特定研究中可采用垂直定位方式。垂直定位的测试需要对试验装置和试验步骤进行细微调整，调整方式见下文。

## E.2 装置的调整

### E.2.1 辐射锥

为了在垂直定位上试验，辐射锥应向上旋转 90°，使辐射锥的下表面垂直，并平行于试样的暴露表面。

### E.2.2 试样安装架

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

## E.3 试样准备

按 8.3.1 中所述，将铝箔包覆的试样安装在垂直试样安装架中，用一层耐火纤维层（公称密度 65 $kg/m^3$）作背衬，纤维层厚度根据试样厚度确定，但不应小于 13 mm。耐火纤维层下面放置一层硬质耐火纤维板。插上弹性钢丝卡（见图 E.1）后，纤维板厚度应使所有组件能固定在一起。调整辐射锥高度使辐射锥的轴线与试样暴露表面的中心对准。

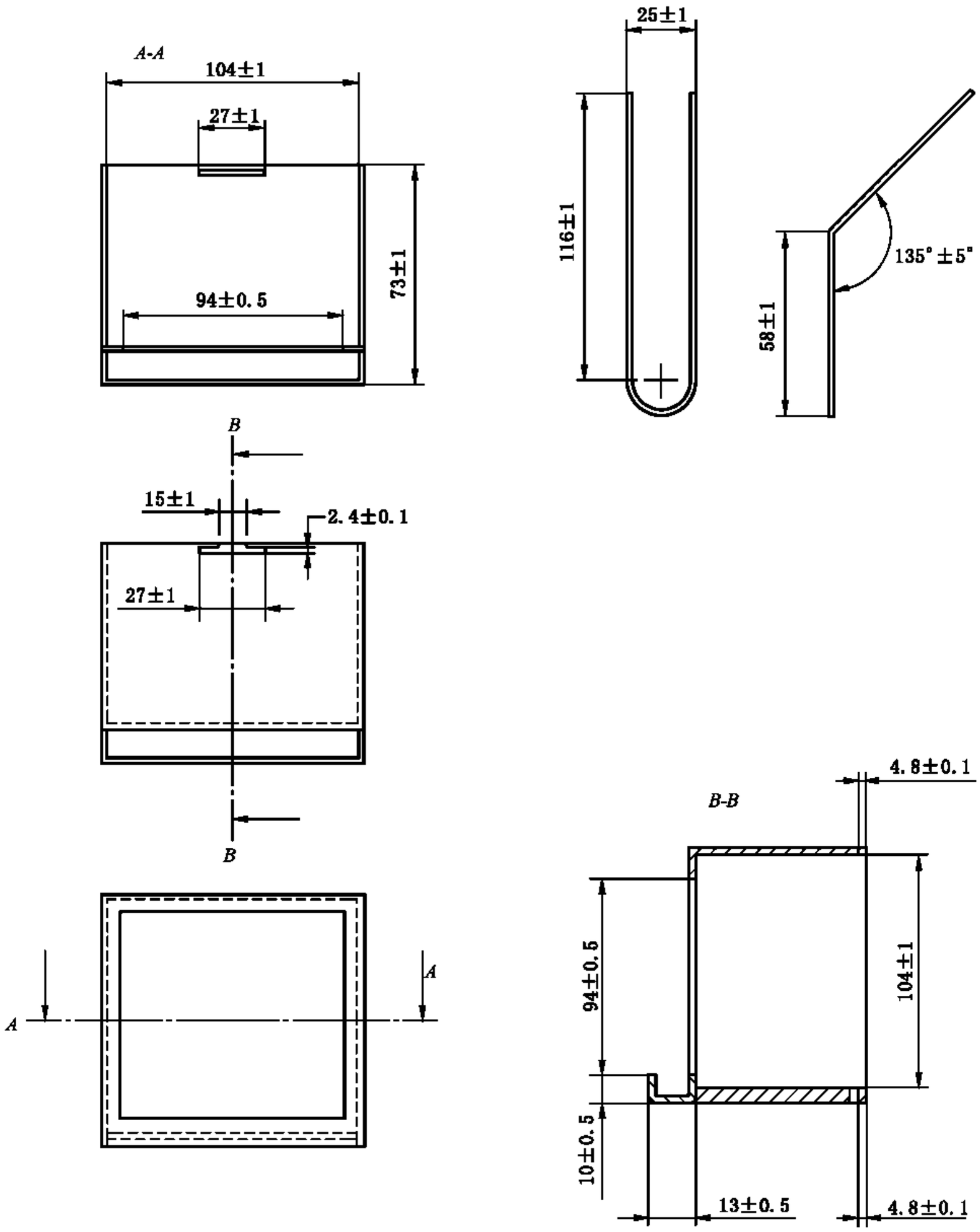
## E.4 辐射锥标定

按 10.2.5 标定垂直定位的辐射锥。热流计靶面朝向辐射锥，放置在与垂直试样表面中心相同的位置上。

## E.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 6.10 中的火花塞时，应使火花塞间隙位于试样暴露表面内并距试样安装架顶部 5 mm。

单位为毫米




注：下表面采用厚度为 4.8 mm±0.1 mm 的不锈钢板。其他部位采用厚度 1.59 mm±0.1 mm 的不锈钢板。

**图 E.1　垂直定位的试样安装架**

# 附 录 F
（资料性）
# 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 $O_2$ 之前，已使用过滤器除去样气中的 $CO_2/CO$，如图 6 所示。实验室具备测量 $CO_2/CO$ 的能力时，不需要从 $O_2$ 气路中除去 $CO_2/CO$，可省去采购化学洗涤剂的高昂费用，也无需对其进行处理。

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应与氧分析仪的响应时间严格匹配。否则，不应使用本附录的公式计算热释放速率。如果系统使用了 $CO_2/CO$ 分析仪，则不应使用硅胶作干燥剂。

本附录给出的公式只适用于测量 $CO_2/CO$，且不从取样管线中除去的情况。包括以下两种情况：

——部分干燥并过滤的样气输送至红外 $CO_2$ 和 CO 分析仪（见图 6 中的可选项）；

——同时加上水蒸气分析仪。

为避免水蒸气冷凝，测量燃烧产物气流中 $H_2O$ 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 |
|---|---|---|
| $E$ | 消耗单位质量氧气的燃烧热（$\Delta h_c/r_o$） | MJ/kg |
| $E_{CO}$ | 消耗单位质量氧气的 CO 燃烧热 | MJ/kg |
| $H$ | 相对湿度 | % |
| $M_a$ | 空气的相对分子质量 | kg/kmol |
| $M_e$ | 燃烧产物的相对分子质量 | kg/kmol |
| $M_{O_2}$ | 氧气的分子质量 | kg/kmol |
| $p$ | 环境压力 | Pa |
| $T_a$ | 环境温度 | K |
| $t_d^1$ | $CO_2$ 分析仪的延迟时间 | s |
| $t_d^2$ | CO 分析仪的延迟时间 | s |
| $t_d^3$ | $H_2O$ 分析仪的延迟时间 | s |
| $X_{CO_2}^0$ | $CO_2$ 的初始读数 | — |
| $X_{CO}^0$ | CO 的初始读数 | — |
| $X_{H_2O}^0$ | $H_2O$ 的初始读数 | — |
| $X_{O_2}^a$ | 环境中 $O_2$ 的摩尔分数 | — |
| $X_{CO_2}^1$ | 延迟时间修正前 $CO_2$ 的读数 | — |

表 F.1　符号及其意义（续）

| 符号 | 意义 | 单位 |
| --- | --- | --- |
| $X^1_{CO}$ | 延迟时间修正前 CO 的读数 | — |
| $X^1_{H_2O}$ | 延迟时间修正前 $H_2O$ 的读数 | — |
| $X_{CO_2}$ | $CO_2$ 的读数，摩尔分数 | — |
| $X_{CO}$ | CO 的读数，摩尔分数 | — |
| $X_{H_2O}$ | $H_2O$ 的读数，摩尔分数 | — |
| $\Phi$ | 耗氧因子 | — |

## F.3　测量 $CO_2$ 和 CO 的情况

### F.3.1　仪器仪表

二氧化碳分析仪应为红外型，且测量范围至少为 0%～10%。分析仪的线性度应为量程的 1%或更好。分析仪的响应时间应不超过 20 s(如根据 10.1.5 测量)。从分析仪到数据采集系统的输出分辨率应为 100 μL/L 或更高。

一氧化碳分析仪应为红外型，且测量范围至少为 0%～1%。分析仪的线性度应为量程的 1%或更好。分析仪的响应时间应不超过 20 s。从分析仪到数据采集系统的输出分辨率应为 10 μL/L 或更高。

### F.3.2　二氧化碳分析仪校准

试验当日应进行二氧化碳分析仪的零值和满量程校准。零值校准使用纯氮气(无 $CO_2$)，分析仪输出应为(0.00±0.02)%。满量程值校准，分析仪输出应为标定气体值 $V_{CO_2}/V_{air}$ 的 0.02%以内。校准程序如下。

a)　零值校准：将纯氮气通入分析仪，使其流量和压力与试验样气的相同。当分析仪达到平衡，将分析仪的示值调节为(0.00±0.02)%。

b)　满量程校准：标准气体的二氧化碳含量应为 5%～10%。将气体通入分析仪，使其流量和压力与试验样气的相同。当分析仪达到平衡，将分析仪的示值调节为标准气体二氧化碳含量的±0.02%。

### F.3.3　一氧化碳分析仪校准

试验当日应进行一氧化碳分析仪的零值和满量程校准。零值校准使用纯 $N_2$(无 CO)，分析仪输出应为(0.000±0.002)%。满量程值校准，分析仪输出应为标定气体值 $V_{CO}/V_{air}$ 的 0.002%以内。校准程序如下。

a)　零值校准：将纯氮气通入分析仪，使其流量和压力与试验样气的相同。当分析仪达到平衡，将分析仪的示值调节为(0.000±0.002)%。

b)　满量程校准：标准气体的一氧化碳含量应为 0.5%～1.0%。将气体通入分析仪，使其流量和压力与试验样气的相同。当分析仪达到平衡，将分析仪的示值调节为标准一氧化碳含量的±0.002%。

### F.3.4　计算

与氧分析仪一样，$CO_2$ 和 CO 的测定也应考虑在取样管线中的传输时间，按公式(F.1)～公式(F.3)

转换：

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

$$X_{CO_2}(t)=X^1_{CO_2}(t+t^1_d) \quad \cdots\cdots(F.2)$$

$$X_{CO}(t)=X^1_{CO}(t+t^2_d) \quad \cdots\cdots(F.3)$$

式中：

$t^1_d$ 和 $t^2_d$——分别为 $CO_2$ 和 CO 分析仪的延迟时间，通常与 $O_2$ 分析仪的延迟时间 $t_d$ 不同(更小)。

排烟管道内的质量流量按公式(F.4)计算，与 12.4 中方法相同：

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

热释放速率按公式(F.5)确定：

$$\dot{q}=1.10\cdot E\cdot X^a_{O_2}\left[\frac{\Phi-\left(\frac{E_{CO}-E}{2E}\right)(1-\Phi)X_{CO}/X_{O_2}}{(1-\Phi)+1.105\Phi}\right]\dot{m}_e \quad \cdots\cdots(F.5)$$

耗氧因子 $\Phi$ 按公式(F.6)计算：

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

环境中氧的摩尔分数按公式(F.7)计算：

$$X^a_{O_2}=(1-X^0_{H_2O})\,X^0_{O_2} \quad \cdots\cdots(F.7)$$

式中 $X^0_{H_2O}$ 按公式(F.8)计算：

$$X^0_{H_2O}=\frac{H}{100\cdot p}\exp\left(23.2-\frac{3\,816}{T_a-46}\right) \quad \cdots\cdots(F.8)$$

在公式(F.5)中，括号里该项分子中的第二项，是对某些碳不完全燃烧成 CO 而不是 $CO_2$ 的修正。在试验中，$X_{CO}$ 通常非常小，所以在公式(F.5)和公式(F.6)中可被忽略。实际上，CO 分析仪不会明显地提升热释放速率测定的准确度。因此，即使没有 CO 分析仪，忽略 $X_{CO}$ 将其设为 0，公式(F.5)和公式(F.6)也可使用。

## F.4 同时测量水蒸气的情况

在开放的燃烧系统中(如本方法使用的)，进入该系统的空气流量无法直接测量，但可通过排烟管道中测量的流量推导。燃烧时部分空气中的氧气耗尽，因此需假设气体体积发生膨胀，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(9)和公式(F.5)中已经使用了膨胀系数。对于锥形量热仪试验，可认为 99%以上的燃烧产物由 $O_2$、$CO_2$、CO、$H_2O$ 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 $N_2$。如果测量 $H_2O$，可将其与 $O_2$、$CO_2$、CO(认为 3 种都是干燥气体)的测量值一同用来确定体积膨胀。排烟管道中的质量流量通过公式(F.9)可更精确地给出：

$$\dot{m}_e=\sqrt{\frac{M_e}{M_a}}C\sqrt{\frac{\Delta p}{T_e}} \quad \cdots\cdots(F.9)$$

式中：

$M_a$——取值为 29 kg/kmol。燃烧产物的相对分子质量 $M_e$ 按公式(F.10)计算：

$$M_e=[4.5+(1-X_{H_2O})(2.5+X_{O_2}+4\,X_{CO_2})]\cdot 4 \quad \cdots\cdots(F.10)$$

热释放速率按公式(F.11)计算：

$$\dot{q}=\frac{M_{O_2}}{M_C}\cdot E\cdot(1-X_{H_2O})\,X^a_{O_2}\left[\Phi-\left(\frac{E_{CO}-E}{2E}\right)(1-\Phi)\left(\frac{X_{CO}}{X_{O_2}}\right)\right]\left(\frac{1-X_{O_2}-X_{CO_2}-X_{CO}}{1-X^0_{O_2}-X^0_{CO_2}}\right)\cdot\dot{m}_e$$

$$\cdots\cdots(F.11)$$

$H_2O$ 的读数应按公式(F.12)进行时间转换，与公式(F.1)～公式(F.3)中转换方式类似：

$$X_{H_2O}(t) = X^1_{H_2O}(t + t^3_d) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (F.12)$$

# 附 录 G
（资料性）
# 工作热流计的标定

可利用辐射锥(6.2)对 6.13 中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，标定过程中确保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 2 只标准参照热流计。

# 附 录 H
（资料性）
引燃的有效临界辐射照度计算

## H.1 概述

临界辐射照度是支持引燃所需的最小热通量。可利用辐射锥和点火器组件部分(或本文件的试验装置)凭经验确定有效临界辐射照度,将试样暴露在不同的辐射照度下,测量最初出现持续火焰的时间。反复试验确定有效临界辐射照度。

## H.2 过程

应按第 8 章热释放试验相同的方法进行试样制备,但不使用定位架。

每组连续试验中,将新试样暴露于不同的辐射照度下,测量并记录试样烟气出现持续火焰的时间。反复试验确定最小热通量。初始试验步长为 5 $kW/m^2$,然后再精确到 1 $kW/m^2$。

确定出现持续火焰的热通量最低值,及未发生引燃的热通量最高值。引燃的有效临界辐射照度是出现持续火焰的最小热通量值与 15 min 内未发生引燃的最大热通量值的均值。例如,如果试样在 30 $kW/m^2$ 的辐射照度下 15 min 内被引燃,则在 25 $kW/m^2$、20 $kW/m^2$、15 $kW/m^2$ 和 10 $kW/m^2$(以该顺序)的辐射照度下重复相同的过程,直到 15 min 内未发生引燃。

如果试验结果显示交叉,即发生引燃的热通量最低值小于未发生引燃的热通量最高值,则每个辐射照度应重复 3 次试验取其均值。将 2 个均值的平均值作为发生引燃的有效临界辐射照度。

# 参 考 文 献

[1] GB 8624—2012 建筑材料及制品燃烧性能分级

[2] ISO 14934-3 Fire tests—Calibration and use of heat flux meters—Part 3: Secondary calibration method

[3] ASTM E 1354-99 Standard test method for heat and visible smoke release rates for materials and products using an oxygen consumption calorimeter

[4] ASTM E662 Standard test method for specific optical density of smoke generated by solid materials

[5] BS 6809:1987 Method for calibration of radiometers for use in fire testing

[6] BS 7904:1998 Guide to Smoke measurement units—their basis and use in smoke capacity test methods

[7] DIN 50055:1989 Light measuring system for testing smoke development

[8] Babrauskas V.Development of the cone calorimeter—A bench-scale heat release rate apparatus based on oxygen consumption,Fire and Materials,8,1984:81-95

[9] Twilley W.H.& 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,Fire Technology,27,1991:234-249

[11] Babrauskas V. & Grayson S. J. eds. Heat release in fires, Interscience Communications Ltd,London,1992

[12] Östman B.A.-L.& Tsantaridis L.D.Smoke production in the cone calorimeter and the room fire test.Fire Safety Journal 17,1991:27-43

[13] Laureys. K. & Schoonacker F. Wentenschappelijke evaluatie van opaciteitsmeetsystemen voor pyrolyse en verbrandingsgassen.University of Gent Faculty of Applied Sciences,1989 [Scientific Evaluation of Smoke Opacity Measuring Systems for Pyrolysis and Combustion Gases]

[14] Marnix S. P. Wiskundige studie van het dynamisch gedrag van rookopaciteitsme etsystemen, (mathematical study of the dynamical behaviour of smoke opacity measuring systems), University of Gent Faculty of Applied Sciences,1989

[15] Chow W. K. & Lai K. F. Optical measurement of smoke, Fire and Materials, 16, 1992: 135-139

[16] Mulholland G.How well are we measuring smoke? Fire and Materials,6,1982:65-67

[17] Babrauskas V. & Wetterlund I. Choice of optical calibration filters for laser photometers. Fire Safety Journal,24,1995:197-199

[18] Babrauskas V.& Mulholland G.Smoke and soot data determinations in the cone calorimeter,in Mathematical Modeling of Fires (ASTM STP 983),P83-104,American Society for Testing and Materials, Philadelphia,1987

[19] Babrauskas V.The cone calorimeter(Section 3/Chapter 3),P3-37-3-52,in The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Second Edition, National Fire Protection Association, Quincy, MA 1995

[20] Marshall N.R.& Harrison R.Comparison of smoke particles generated within a small scale hood and duct smoke test apparatus with those in a cumulative apparatus,BRE Note N67/91,Fire Re-

search Station, Borehamwood, 1991

[21] Sundström, B Fire safety of upholstered furniture-final report on the CBUF(combustion behaviour of upholstered furniture), (Appendix A5), Interscience Communications, London, UK, : 307-325

中 华 人 民 共 和 国
国 家 标 准
建筑材料热释放速率和产烟速率试验方法
GB/T 16172—2026
*
中国标准出版社出版发行
北京市朝阳区和平里西街甲2号（100029）
网址：www.spc.net.cn
服务热线：400-168-0010
2026 年1月第1版
*
书号：155066·1-83605

版权专有 侵权必究

GB/T 16172-2026