



中华人民共和国国家标准

GB/T 38302—2019

防护服装 热防护性能测试方法

Protective clothing—Thermal protective performance test method

2019-12-10 发布

2020-07-01 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	I
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 原理	2
5 实验人员的健康和安全	2
6 设备和材料	2
7 试样制备和调湿	6
8 校准和维护保养	7
9 测试步骤	8
10 结果计算	9
11 测试报告	12
附录 A (资料性附录) 热能暴露下的试样表观反应	13
附录 B (资料性附录) 热防护性能值(TPP)和热防护性能评估(TPE)的区别变化说明	14
附录 C (资料性附录) 热防护性能评估(TPE)测试过程举例	15
附录 D (资料性附录) 铜量热传感器的校准	18
参考文献	19

前 言

本标准按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

本标准由中华人民共和国应急管理部提出。

本标准由全国个体防护装备标准化技术委员会(SAC/TC 112)归口。

本标准起草单位：军事科学院系统工程研究院军需工程技术研究所、杜邦(中国)研发管理有限公司、公安部特种警用装备质量监督检验中心、国家消防装备质量监督检验中心、中国安全生产科学研究院。

本标准主要起草人：何晴芳、张燕、吴爽、徐兰娣、张勇、张明明、张婷婷、王昕、吴银、张俊、房琳、邹亮。

防护服装 热防护性能测试方法

1 范围

本标准规定了热防护材料的热防护性能值(以下简称为“TPP”)和热防护性能评估(以下简称为“TPE”)的测试方法,内容包含了原理、实验室人员健康与安全、设备和材料、试样的制备和调湿、校准和维护保养、测试步骤、结果计算等方面。

本标准适用于单层或多层材料的热防护性能测试,应用于暴露在对流及辐射热危害的从业人员的热防护材料的评估。

本标准不适用于非阻燃及遇高温易熔融、滴落等材料的测试。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件,仅注日期的版本适用于本文件。凡是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 6529 纺织品 调湿和试验用标准大气(ISO 139:2005,MOD)

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

热防护性能值 thermal protective performance

TPP

在测试热防护材料过程中,通过测得的该材料在累计时间上的传热反应曲线与 Stoll 曲线的交点来确定的累积能量。

注:单位:千瓦秒每平方米(卡每平方米) [$\text{kW} \cdot \text{s}/\text{m}^2$ (cal/cm^2)]。

3.2

热防护性能评估 thermal performance estimate

TPE

在测试热防护材料过程中,通过测得的该材料在一定时间上的传热反应曲线与 Stoll 曲线的相切(或近似相切)来确定的总累积能量。

注:单位:千瓦秒每平方米(卡每平方米) [$\text{kW} \cdot \text{s}/\text{m}^2$ (cal/cm^2)]。

3.3

Stoll 曲线 Stoll curve

一种用于预计达到二度烧伤的时间和热能关系的标准曲线。

注:能量值落在 Stoll 曲线上方易造成二度烧伤,而落在 Stoll 曲线下方不易引起二度烧伤。

3.4

热通量 heat flux

单位时间内在单位面积上传递的热量。

注:单位:千瓦每平方米(卡每平方米秒) kW/m^2 [$\text{cal}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$]。

3.5

热暴露反应 response to heat exposure

在热防护性能测试时,材料暴露于热源下的表现反应。

注:比如开裂、熔融、滴落、炭化、脆化、鼓包、收缩、黏结和燃烧等。

3.6

开裂 breakopen

材料受热后出现的面积不小于 3.2 cm^2 或任何方向尺寸不小于 2.5 cm 的空洞。

注:允许该空洞中存在单根纱。

3.7

脆化物 embrittlement

高温或不完全燃烧所形成的易脆的残余物。

3.8

热收缩 thermal shrinkage

物品或者材料高温下出现一个或多个方向尺寸的减少。

3.9

鼓包 bubble

材料表现为受热变形后形成凸起的状态。

4 原理

将试样水平放置并暴露于对流辐射组合热源,暴露的总热通量为 $(84 \pm 2) \text{ kW/m}^2 [(2.00 \pm 0.05) \text{ cal}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})]$ 。使用铜量热传感器测量并记录试样的温度随时间变化情况,结合铜的热学性能参数将温度变化情况换算为透过试样传递的热能,得到热能随时间变化的传热反应曲线。可采取以下两种测试方法表征材料的热防护性能:

- a) 第 1 个测试方法:铜量热传感器测的传热反应曲线与 Stoll 曲线相交点所对应的时间与材料暴露的总热通量的乘积(即:累积能量),得到试样的热防护性能值(TPP);
- b) 第 2 个测试方法:铜量热传感器在移出规定的对流辐射热后记录的传热反应曲线与 Stoll 曲线相切(或近似相切)时的暴露时间与总热通量的乘积即为试样的热防护性能评估(TPE)。

5 实验人员的健康和安全的

实验室人员的安全健康应符合以下条件:

- a) 样品的燃烧和高温测试可能会产生影响操作人员健康的烟雾和有毒气体,测试人员需佩戴防毒面罩。可将测试仪器安装在通风橱内或通风良好的区域内,每次测试后应排出烟雾和烟尘。但在试样燃烧过程中应避免火焰受通风影响。
- b) 在操作高温组件(如测试中的试样夹持架和传感器)时需佩戴防高温手套。
- c) 测试过程中要防止燃气泄漏以免发生爆炸。
- d) 辐射灯开启时操作人员需配戴防炫目眼镜。

6 设备和材料

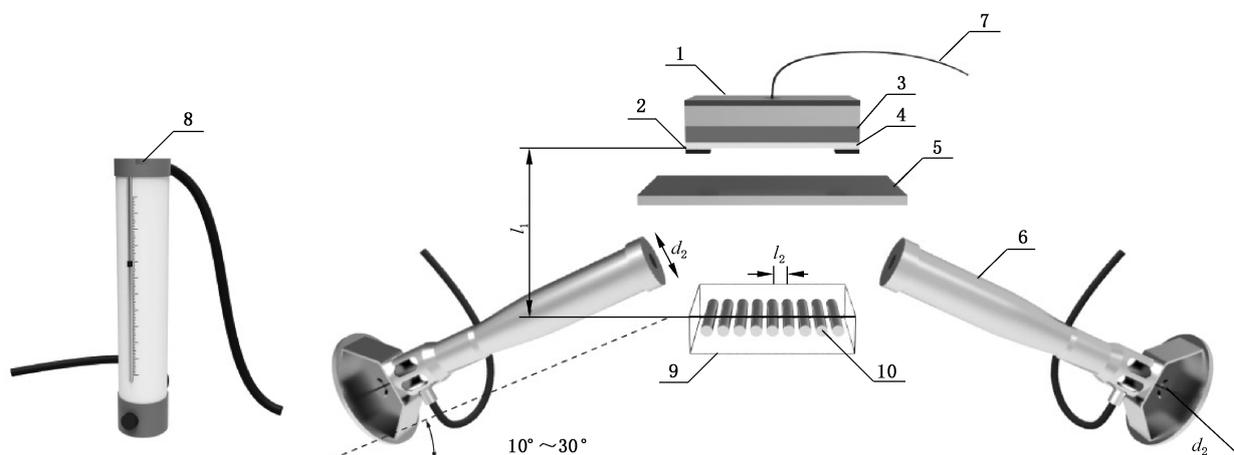


6.1 总体布置

测试仪器结构包括组合对流辐射热源、用于控制暴露时间的隔热遮板、试样和传感器支撑架结构、

试样固定器组件、铜量热传感器组件和数据采集/分析系统等,见图 1。

单位为毫米



说明:

1 —— 铜量热传感器;

2 —— 试样夹持架;

3 —— 可选隔距框;

4 —— 测试样品;

5 —— 隔热遮板;

6 —— 燃烧灯;

7 —— 传感器输出线;

8 —— 气体流量计;

9 —— 辐射灯外罩;

10 —— 辐射灯管;

l_1 —— 样品到辐射灯距离, (125 ± 10) mm;

l_2 —— 辐射灯管间距, (13.0 ± 0.5) mm;

d_1 —— 燃烧灯喷口直径, (38 ± 2) mm;

d_2 —— 燃烧灯喷孔直径, (1.2 ± 0.1) mm。

图 1 测试仪器总体布置图

6.2 燃烧气源

采用工业级丙烷(纯度为 95% 以上)或甲烷(纯度为 99% 以上)。

6.3 气体流量计

标准条件下量程为 0 L/min~6 L/min,精度为 4% 的气体流量计,建议使用质量流量计。

6.4 热源

6.4.1 燃烧灯

用于可燃气体(丙烷或甲烷)喷射的两台燃烧灯,其顶部喷口直径为 (38 ± 2) mm,喷孔直径为 (1.2 ± 0.1) mm。燃烧灯中心线与水平方向呈现 20° 到 45° 斜向上的角度(建议采用 20° 到 30° 以达到更稳定的测试效果)。两灯之间喷射的火源外焰交叉点位于试样的中心点。尺寸精度为 5%。

6.4.2 辐射灯

辐射灯由 9 只 500 W 并列排放的透明或半透明石英红外灯管组成。可通过控制器变换功率,距离试样正面 (125 ± 10) mm,灯管之间的中心距离为 (13.0 ± 0.5) mm。

6.4.3 辐射灯外罩

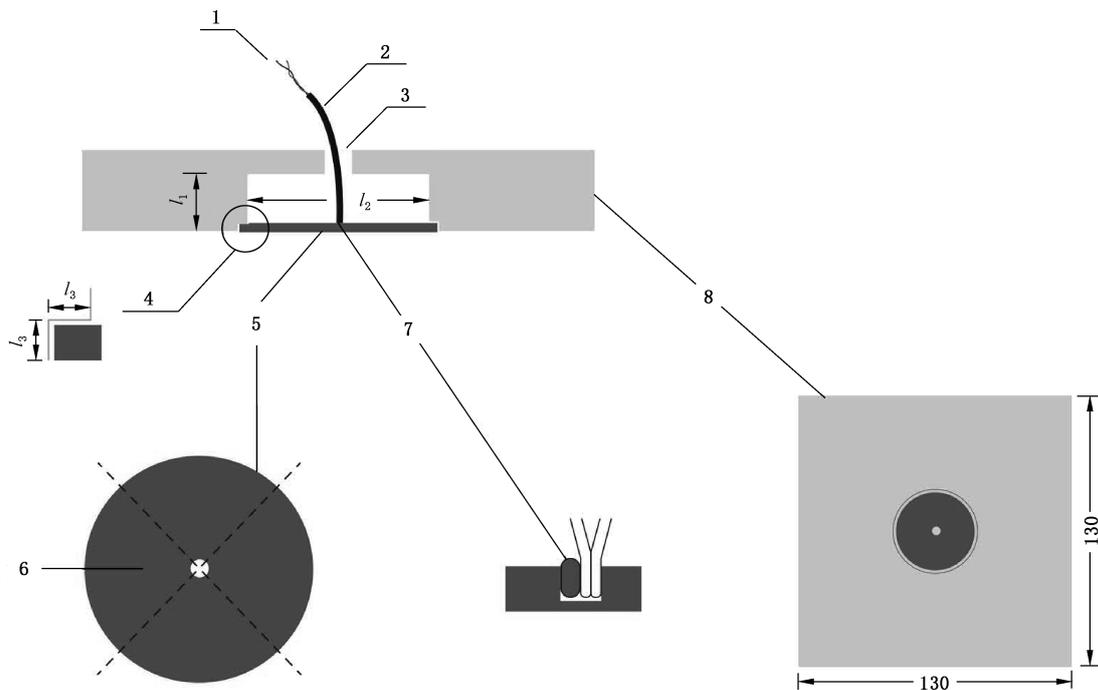
辐射灯外罩应采用冷却装置,防止局部过热和操作人员的灼伤。

6.5 铜量热传感器的构造

6.5.1 铜量热传感器的组成部件

铜量热传感器由以下几个部分组成,其形状如图 2 所示:

单位为毫米



说明:

- 1 —— 热电偶线;
- 2 —— J 型或 K 型热电偶;
- 3 —— 绝热板孔洞直径, (3.0 ± 0.1) mm ;
- 4 —— 凸缘;
- 5 —— 无氧铜,重 (18.00 ± 0.05) g,直径为 (40.0 ± 0.5) mm,厚度为 (1.6 ± 0.1) mm ;
- 6 —— 铜片中心钻孔放置热电偶,直径为 (1.2 ± 0.1) mm,进深为 (1.3 ± 0.1) mm ;
- 7 —— 铜片与热电偶的连接方式之一(铜插销);
- 8 —— 铜量热传感器的平面图;
- l_1 —— 铜片至绝热板孔洞之间的镂空高度, (9.5 ± 0.5) mm ;
- l_2 —— 铜片至绝热板孔洞之间的镂空直径, (37 ± 0.5) mm ;
- l_3 —— 铜片与绝热板相嵌的凸缘长度和高度, (1.6 ± 0.1) mm。

图 2 铜量热传感器的构造

a) 铜片:无氧铜材质,直径为 (40.0 ± 0.5) mm,质量为 (18.00 ± 0.05) g (未钻孔前),厚度为 $(1.6\pm$

0.1) mm,中心有一个 (1.2 ± 0.1) mm 直径, (1.3 ± 0.1) mm 进深的孔洞。

- b) 绝热板:铜片镶嵌在绝热板中间组成传感器。其厚度为 (13 ± 2) mm,导热系数值应小于 $0.15\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,具备高温稳定性和热冲击缓冲性。铜片固定在绝热板上。

注:目前普遍采用硅酸钙板。

- c) 热电偶:采用单个的J型(铁/铜镍型)或K型(镍铬/镍铝型)热电偶丝(直径不大于 0.25 mm)安装在铜片的中心孔洞中,组成铜量热计。其安装连接方式有三种,如图3所示:

热电偶丝通过铜插销的机械挤压(如图2)插入铜片中心孔洞,完成机械连接。

用高熔点焊料(温度高于 $280\text{ }^{\circ}\text{C}$)焊接热电偶丝与铜片。

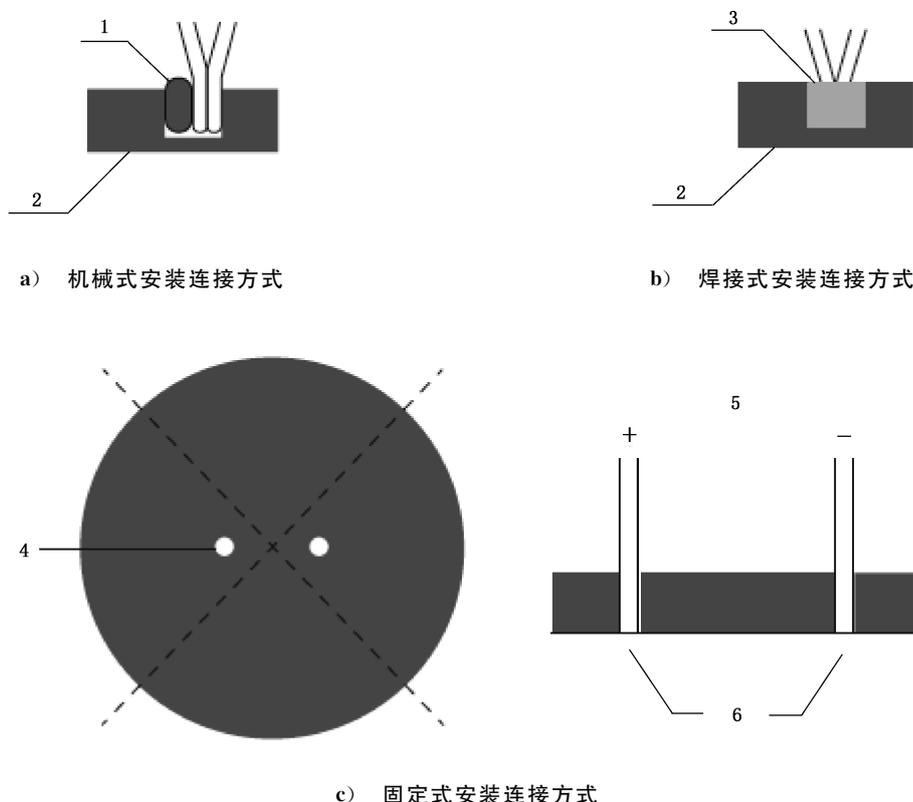
注1:由5% 铋-95% 铅(熔点大约为 $307\text{ }^{\circ}\text{C}$)和5% 铋-93.5% 铅-1.5% 银(熔点大约为 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$)构成的焊料较为合适。

注2:上文中确定的最低温度为 $280\text{ }^{\circ}\text{C}$ 与焊接点对应,需精准的焊接技术避免“冷”焊接接头(焊料未连接热电偶和铜片)。

固定式热电偶:在铜片中间部位钻2个孔洞,直径小于 0.6 mm ,用银焊料将两根正负极热电偶丝分别焊在两个孔洞中组成固定式热电偶。

- d) 铜量热传感器总重需达 $(1.00\pm 0.01)\text{ kg}$ 并且向下均匀受力。

单位为毫米



说明:

- 1——铜插销;
2——铜片;
3——高熔点焊料;
4——固定式安装部位:直径为 $0.02\text{ mm}\sim 0.6\text{ mm}$ 的孔洞;
5——热电偶丝的正负极;
6——银焊料填充部位。

图3 铜量热传感器的安装连接方式

6.5.2 铜量热传感器的表面处理

选用乙醇或丙酮等石油溶剂清洁铜片表面。单层涂覆铜片表面的黑色喷漆需采用耐高温(300 °C以上)无光并且吸收率大于 0.9 的喷漆。按照供应商建议的流程烘干和固化喷漆,达到厚薄均一、表面平整,可使用外部热源(例如辐射灯)加热固化。

6.6 试样夹持架

试样夹持架(见图 4,公差范围在±1 mm)需要三个完整的配件组成——上夹板、下夹板和隔距框(建议使用高温不变形、耐腐蚀材质)。进行非接触式测试时应使用隔距框。

单位为毫米

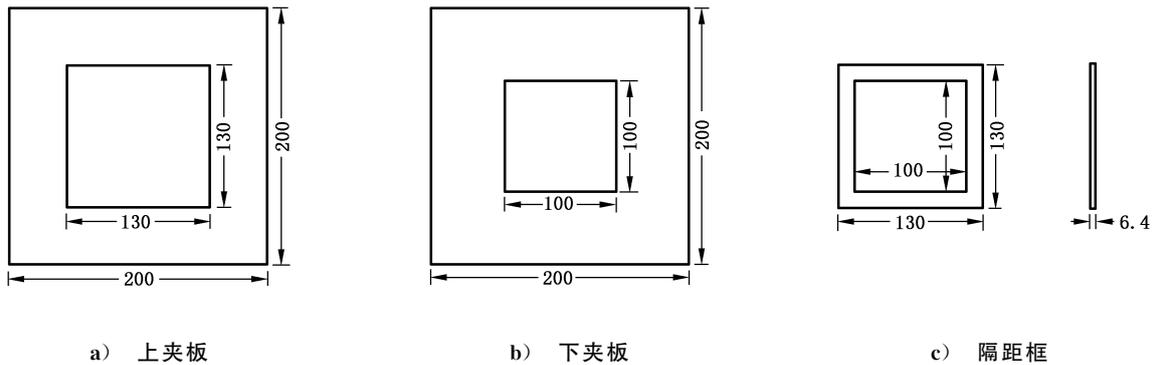


图 4 试样夹持架

6.7 隔热遮板

位于试样夹持架和热源之间,来回移动隔离热源。隔热遮板移出热源的响应时间不得大于 0.5 s。建议采用水冷方式防止过热。

6.8 数据采集分析系统

数据采集分析系统包含以下要求:

- a) 能指示或记录铜热量传感器上的温度响应;
- b) 通过温度响应计算产生的累积热量;
- c) 根据温度响应随时间的增长而与 Stoll 曲线相交来确定测试终点;
- d) 在温度达到 250 °C 之前,数据采集的最低频率不低于每秒 10 个;
- e) 采集的最小分辨率为 0.1 °C,精度为±0.7 °C;
- f) 转换 J 或 K 型热电偶的毫伏信号为温度,能冷端修正。

注:软件的设置需匹配不同的热电偶。

7 试样制备和调湿

7.1 取样

剪取试样时距离布边至少 100 mm,每个样本上剪取至少三块试样,每块试样尺寸为(150±2) mm×(150±2) mm,应平整不含接缝。多层试样不应含有易熔融材料并视作整体进行测试。其他如洗涤等条件另有规定,按相关的产品标准执行。

7.2 调湿和测试用标准大气

调湿和测试用标准大气应符合 GB/T 6529 的规定。

试样应在温度 $(20.0 \pm 2.0)^\circ\text{C}$ ，相对湿度 $(65.0 \pm 4.0)\%$ 的标准大气中放置 24 h。调湿后试样应在 30 min 内完成测试。测试时环境温度不大于 35°C 。

7.3 测试条件

所有测试和校准需在有通风罩或通风良好的区域以有效排出燃烧后的物质、烟气和废气。使用铜量热传感器测定总热通量定在 $(84 \pm 2) \text{ kW/m}^2 [(2.00 \pm 0.05) \text{ cal}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})]$ 。

8 校准和维护保养

8.1 校准



8.1.1 辐射灯热通量校准和火焰调节

8.1.1.1 辐射灯热通量校准

辐射灯预热 15 min 后,将标准辐射热流计放于铜量热传感器相同的空间位置上,调节功率达到输出热通量为 $(13 \pm 4) \text{ kW/m}^2 [(0.3 \pm 0.1) \text{ cal}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})]$ 。老化的辐射灯管如在调节相同热通量需要增加的电压幅度大于 5 V 时,应立即更换。

注:标准辐射热流计的型号通常为施米特-博特(Schmidt-Boelter)或者盖登(Gardon)。

8.1.1.2 火焰调节

取下标准辐射热流计,调节可燃气体气压至 40 kPa~70 kPa 之间。在辐射灯开启时{热通量为 $(13 \pm 4) \text{ kW/m}^2 [(0.3 \pm 0.1) \text{ cal}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})]$ }，以低气流量启动燃烧灯,调节燃烧灯针阀和风门,充分利用蓝色外焰均匀燃烧并聚焦于试样中心点下方,其形状如图 5 所示。

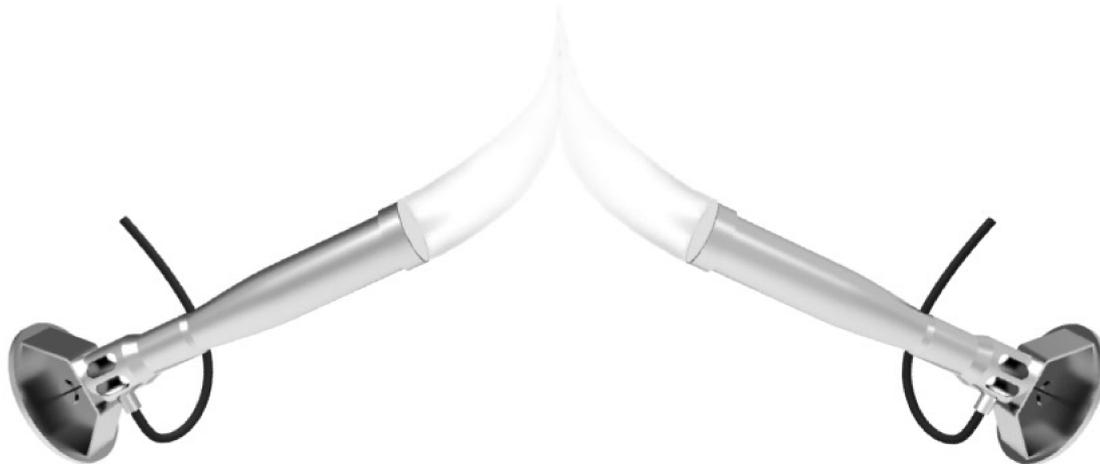


图 5 火焰状态示意图

8.1.2 总热通量的校准

8.1.2.1 确保传感器表面清洁平整、无沉积物。绝热板与铜片之间连接完整,无凹凸不平。铜片表面黑色涂层平整,无沉积、水泡等。否则,按照步骤 8.2 修复铜量热传感器表面。传感器温度稳定(1 分钟内

温度变化小于 1 °C)后进行校准。

8.1.2.2 在热源稳定后,启动数据采集系统,将达到起始温度范围的传感器(28 °C~33 °C)放在试样夹持架上。

8.1.2.3 铜量热传感器在热源上的暴露持续时间为 10 s,从隔热遮板移出瞬间计时开始。

8.1.2.4 采集数据停止后移出传感器,远离热源并冷却至室温。

8.1.2.5 程序通过 10.1 中的计算方法结合传感器记录的 0~10 s 的温度变化数据(温差大约为 144.5 °C~151.5 °C),得出的平均热通量值即为总热通量值。

8.1.2.6 如果 8.1.2.5 中测定的总热通量在 $(84 \pm 2) \text{ kW/m}^2 [(2.00 \pm 0.05) \text{ cal}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})]$ 范围内,该值作为总热通量校准值归入后续的试样计算中。如果总热通量值在范围外,需调节气体流量计,重复校准过程(参见 8.1.2.2~8.1.2.5)直到符合范围完成校验。

8.2 保养

8.2.1 传感器的表面修复:传感器表面沾有沉积物,或出现黑漆涂层不平整,或呈现裸铜,应及时使用溶剂和黑漆修复。溶剂使用时确保远离火源。重新涂覆后的传感器需按步骤 8.1.2.2~8.1.2.5 进行校准后使用。

8.2.2 试样夹持架的保养:保持试样夹持架的清洁,使用无水溶剂清洗焦油、煤烟或其他燃烧分解物。

9 测试步骤

9.1 热防护性能值测试(TPP)

9.1.1 热防护性能值为 3 个试样测试结果的平均值。

9.1.2 按步骤 8.1.2.2~8.1.2.5 校准热源,使总热通量达到 $(84 \pm 2) \text{ kW/m}^2 [(2.00 \pm 0.05) \text{ cal}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})]$,记录总热通量数据。随后取下试样夹持架,装上试样和传感器准备测试。建议在测试完成 3 组样品共 9 个试样后重新校准总热通量(可增加校准频次)。

9.1.3 试样正面朝向热源,背面放置铜量热传感器。多层试样的内层正对传感器。传感器和试样之间加隔距框即为非接触式,不加则为接触式测试,应在报告中注明。6.4 mm 厚的隔距框仅在非接触式测试时使用。

注:多层试样隔距框的使用——非接触式(加隔距框)测试通常用于模拟衣服内层和穿着者之间的空气层。在本项测试方法中,对于测试时间超过 60 s 的多层试样,不建议使用非接触式(加隔距框)测试。

9.1.4 测试前使用隔热遮板隔离热源。隔热遮板移出后,试样暴露于热源上方中心点处并开始记录数据。

9.1.5 当铜量热传感器测得的累积能量(计算方法见 10.2)与 Stoll 曲线相交后,中止测试,记录暴露时间,试样移出热源。Stoll 曲线计算公式见 10.1。

9.1.6 热防护性能值是暴露时间与校准总热通量的乘积(公式见 10.3)计算得出。

9.1.7 记录测试中观察到的现象(参见附录 A)。

9.1.8 将试样夹持架和传感器组件冷却至 28 °C~33 °C(模拟人体表皮的温度),再按步骤 9.1.3~9.1.7 进行剩余样品的测试。完成三个试样测试后取平均值记录为试样的热防护性能值。

9.1.9 剔除与平均值相差超过 $\pm 10\%$ 的测试结果,重新裁样补足三个试样进行测试。

9.2 热防护性能评估测试(TPE)

9.2.1 热防护性能值(TPP)和热防护性能评估(TPE)的区别和说明请参见附录 B。

9.2.2 一般需要三组试样完成热防护性能评估,一组试样确定评估时间,后两组试样作为评估时间验证。

- 9.2.3 按步骤 9.1.2 校准热源,记录下总热通量数值。
- 9.2.4 按步骤 9.1.3~9.1.5 热防护性能值方法测试试样,得到试样的最大暴露时间(t_{\max})。
- 9.2.5 将最大暴露时间除以 2 即为暴露时间(t_{trail})。
- 9.2.6 在设备软件中输入暴露时间(t_{trail}),装备样品准备测试。
- 9.2.7 当达到暴露时间(t_{trail})后,隔热遮板复位,试样离开热源,仪器依然记录数据。在此过程中,环境温度不可超过 35 ℃。

注:如果无法满足此要求,也可以将样品架整体设计为可取下的结构,当隔热遮板复位后,可快速手动将“样品架/试样/传感器”整体取下远离热源,但要持续记录数据。

- 9.2.8 试样在热源暴露结束后仪器持续采集数据的时间应不少于 30 s,以完全释放试样上的蓄积热能。当传感器上测量的传热反应曲线下降时便可手动停止采集数据。30 s 后传热反应曲线未下降时应延长采集时间(采集时间不超过 120 s)。
- 9.2.9 从传感器测得的传热反应曲线与 Stoll 曲线的下列关系来测定热防护性能评估。
- 如果 60 s (或 120 s)内传感器测量到的传热反应曲线超过 Stoll 曲线(即超出二度烧伤),需要减少暴露时间 t_{trail} 。取从前序较低暴露时间(首次最低暴露时间为 0 s)到当前暴露时间 t_{trail} 的中间值。设定此时间,重复步骤 9.2.6~9.2.8,直到试样的传热反应曲线与 Stoll 曲线相切,或当前的暴露时间 t_{trail} 和前序暴露时间差值不大于 0.5 s,此试样组的热防护性能评估为当前的暴露时间 t_{trail} 与校准总热通量数值的乘积(实例参见附录 C)。
 - 如果 60 s(或 120 s)内传感器测量到的传热反应曲线远低于 Stoll 曲线(即未能预计到二度烧伤),需要增加暴露时间 t_{trail} ,取当前暴露时间与前序较高暴露时间(首次最高暴露时间为 9.2.3 中的暴露时间 t_{\max})的中间值,设定此时间,重复步骤 9.2.6~9.2.8。直到试样的传热反应曲线与 Stoll 曲线相切,或当前的暴露时间 t_{trail} 和前序暴露时间差值不大于 0.5 s,此试样组的热防护性能评估为当前的暴露时间 t_{trail} 与校准总热通量数值的乘积(实例参见附录 C)。
- 9.2.10 记录测试中观察到的现象(参见附录 A)。
- 9.2.11 重复验证暴露时间 t_{trail} ,热防护性能评估是已验证的暴露时间 t_{trail} 与校准总热通量的乘积(公式见 10.4),取三个数值的平均值即为平均热防护性能评估。
- 9.2.12 剔除与平均值相差超过 ±10% 的测试结果,重新裁样补足试样进行测试。

10 结果计算

10.1 Stoll 曲线的公式

热能计算用式(1):

$$J_1 = (5.020\ 4 \times t_i^x) \times 10 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$J_2 = 1.199\ 1 \times t_i^x$$

式中:

- J_1 ——单位面积热能,单位为千瓦秒每平方米($\text{kW} \cdot \text{s}/\text{m}^2$);
- J_2 ——单位面积热能,单位为卡每平方厘米(cal/cm^2);
- t_i ——试样在热源暴露开始起经过的时间,单位为秒(s);
- x ——系数,0.290 1。

10.2 传感器的响应计算方式

10.2.1 初始温度下的铜片热容量的计算公式

计算见式(2):

$$c_p = 4.1868 \times \frac{A + B \times T + C \times T^2 + D \times T^3 + E/T^2}{63.546} \dots\dots\dots(2)$$

式中：

- c_p ——热容量(温度为 16 °C 和 1 085 °C 之间的铜热容),单位为焦每克摄氏度[J/(g · °C)];
- A ——系数,4.237 312;
- B ——系数,6.715 751;
- T ——测定温度的绝对值,用[测定温度(°C)+273.15]/1 000 计算,单位为开(K);
- C ——系数,-7.469 62;
- D ——系数,3.339 491;
- E ——系数,0.016 398。

10.2.2 测定暴露开始和结束时的温度与时间相关性的累积热量值

10.2.2.1 在温度随时间上升期间铜片的平均热容量:通过利用在 10.2.1 中确定的初始热容量和相关时间间隔期测定的温度计算所有传感器的平均热容量,如式(3)所示:

$$\overline{c_p} = \frac{c_{pT_{起始}} + c_{pT_{最终}}}{2} \dots\dots\dots(3)$$

式中：

- $\overline{c_p}$ ——平均铜片的热容量,单位为焦每克摄氏度[J/(g · °C)];
- $c_{pT_{起始}}$ ——起始温度时的铜热容量,单位为焦每克摄氏度[J/(g · °C)];
- $c_{pT_{最终}}$ ——终止温度时的铜热容量,单位为焦每克摄氏度[J/(g · °C)]。

10.2.2.2 使用式(4)计算测定的任何暴露期间内的累积热暴露:

$$Q = \frac{m \times \overline{c_p} \times (T_{最终} - T_{起始})}{S \times 10} \dots\dots\dots(4)$$

式中：

- Q ——铜量热传感器测得的累积热能,单位为千瓦秒每平方米(kW · s/m²);
- m ——铜片的质量,单位为克(g);
- $\overline{c_p}$ ——温度上升期间铜片的平均热容量,单位为焦每克摄氏度[J/(g · °C)];
- $T_{最终}$ ——一定时间热暴露后的铜片温度,单位为摄氏度(°C);
- $T_{起始}$ ——铜片的初始温度,单位为摄氏度(°C);
- S ——铜片的面积,单位为平方厘米(cm²)。

10.2.2.3 由于传感器设计时铜片质量恒定 18.0 g,暴露面积恒定 12.57 cm²,因此传感器的累积热能计算可简化成式(5):

$$Q = \frac{1.432 \times \overline{c_p} \times (T_{最终} - T_{起始})}{10} \dots\dots\dots(5)$$

式中：

- Q ——铜量热传感器测得的累积热能,单位为千瓦秒每平方米(kW · s/m²);
- $\overline{c_p}$ ——温度上升期间铜片的平均热容量,单位为焦每克摄氏度[J/(g · °C)];
- $T_{最终}$ ——一定时间热暴露后的铜片温度,单位为摄氏度(°C);
- $T_{起始}$ ——铜片的初始温度,单位为摄氏度(°C)。

注: 如果采用不同质量和暴露面积的铜片,式(5)中的常数 1.432 相应调整。

10.2.2.4 传感器校准计算的热通量公式

任何时间间隔的铜量热计入射热通量可以利用式(6)计算:

$$q = \frac{m \times \overline{c_p} \times (T_{\text{最终}} - T_{\text{起始}})}{k \times S \times (t_{\text{最终}} - t_{\text{起始}})} \quad \dots\dots\dots (6)$$

式中:

- q ——入射热通量,单位为千瓦每平方米(kW/m²);
- m ——铜片的质量,单位为克(g);
- $\overline{c_p}$ ——温度上升期间铜片的平均热容量,单位为焦每克摄氏度[J/(g·°C)];
- $T_{\text{最终}}$ ——一定时间热暴露后的铜片温度,单位为摄氏度(°C);
- $T_{\text{起始}}$ ——铜片的初始温度,单位为摄氏度(°C);
- S ——铜片的面积,单位为平方厘米(cm²);
- k ——针对热量计表面的黑色涂漆的值(通常为 0.9);
- $t_{\text{最终}}$ ——停止暴露时的时间,单位为秒(s);
- $t_{\text{起始}}$ ——开始暴露时的时间,单位为秒(s)。

对于质量为 18.0 g、暴露面积为 12.57 cm²、黑漆吸收率为 0.9 且校准采样间隔为 10 s 的铜盘/铜片,入射热通量简化为式(7):

$$q = 1.591 \times \overline{c_p} \times (T_{\text{最终}} - T_{\text{起始}}) \quad \dots\dots\dots (7)$$

式中:

- q ——入射热通量,单位为千瓦每平方米(kW/m²);
- $\overline{c_p}$ ——温度上升期间铜片的平均热容量,单位为焦每克摄氏度[J/(g·°C)];
- $T_{\text{最终}}$ ——一定时间热暴露后的铜片温度,单位为摄氏度(°C);
- $T_{\text{起始}}$ ——铜片的初始温度,单位为摄氏度(°C)。

注:如果采用具有不同质量和/或暴露面积的铜盘/铜片或校准时间间隔非 10 s,式(7)中的常数相应调整。

10.3 热防护性能值(TPP)的计算方式

10.3.1 热防护性能值计算如式(8):

$$\text{TPP} = t_{\text{交点}} \times F \quad \dots\dots\dots (8)$$

式中:

- TPP ——热防护性能值,单位为千瓦秒每平方米(kW·s/m²);
- $t_{\text{交点}}$ ——测试的累积能量与 Stoll 曲线相交的时间,单位为秒(s);
- F ——校准总热通量,单位为千瓦每平方米(kW/m²)。

10.3.2 取 9.1 测定的至少三个独立试样测试热防护性能值的平均值,并作为该试样的平均热防护性能值(TPP)[以 kW·s/m²(或 cal/cm²)计]报告。从实验室样本中测试的补充增加试样应纳入平均值中。

10.4 热防护性能评估(TPE)的计算方式

10.4.1 热防护性能评估的计算如式(9):

$$\text{TPE} = t_{\text{trial}} \times F \quad \dots\dots\dots (9)$$

式中:

- TPE ——热防护性能评估,单位为千瓦秒每平方米(kW·s/m²);
- t_{trial} ——传热反应曲线与 Stoll 曲线相切或近似相切点的暴露时间,单位为秒(s);
- F ——校准总热通量,单位为千瓦每平方米(kW/m²)。

10.4.2 取 9.2 测定的至少三个独立试样的热防护性能评估的平均值,并作为该试样的平均热防护性能评估(TPE)报告[kW·s/m²(cal/cm²)]。从实验室样本中测试的任何额外试样应纳入平均值中。

11 测试报告

测试报告应包括以下内容：

- a) 说明测试是按照本标准中方法一或方法二(TPP 或 TPE)要求进行；
- b) 试样的描述包括：名称、规格、送检单位、层数等；
- c) 试验条件包括：燃气种类、纯度、压力、环境温湿度等；
- d) 测试方式(接触式或非接触式)；
- e) 热暴露的情况：校准的热通量值(铜量热传感器应进行校准,参考附录 D)；
- f) 试样的预处理条件：洗涤/干燥或干燥清洁循环次数或指定的洗烫条件；
- g) 记录每个试样的热防护性能值或热防护性能评估及其平均值；
- h) 其他观察到的现象描述(参见附录 A)；
- i) 测试日期和人员。



附 录 A
(资料性附录)

热能暴露下的试样表观反应

A.1 第9章中热暴露反应对试样的可能影响可以纳入报告中。观察暴露对试样(包括多层试样的每一层)的影响,利用以下一种或多种情况描述此类影响:燃烧、开裂、熔融、滴落、炭化、脆化物、脆裂及鼓包、热收缩、黏结范围。

A.2 暴露试样的主观目视检查和评估,可以使用表A.1评级系统报告暴露期间对试样的主观观察。暴露于热源的测试表面被视为正面,面对传感器的表面视为背面,对于目视检查,将暴露试样(可移出试样架)平行放在具有合适照明度的平面上。表A.1中表观反应分类的主观评级可以采用1-2分的体系,1分表示有或观察到、2分表示没有或没有观察到。各个分类的指定等级的总值将用于测定试样等级。

表 A.1 目测评估报告样式

表观反应分类	正面	背面
燃烧		
开裂		
熔融		
滴落		
炭化		
脆化物		
脆裂及鼓包(凸起高度超过 1.5 cm 即为不合理鼓包态)		
热收缩		
黏结		

附 录 B
(资料性附录)

热防护性能值(TPP)和热防护性能评估(TPE)的区别变化说明

- B.1** 本测试方法最初设计为小样测试,旨在比较防护服材料的隔热性能,主要通过美国海军航空研究中心的 A.M.Stoll 和 M.A.Chianta 利用经验烧伤数据生成的二度烧伤模型发展出来的面料对比标准。
- B.2** 热防护性能值从本质上说只是材料传热性能的反映,未考虑热暴露后试样中蓄积的热能会继续传递给穿着者。如果未能及时脱掉衣服,很可能快速烧伤(按照模型,将在几分之一秒内烧伤)。
- B.3** 热防护性能评估(TPE)考虑了热暴露后试样中蓄积的热能,预测造成二度烧伤的能量值,适用于热防护材料的选择。
- B.4** 本标准结合了美国的诸多先进经验,并进行了技术更新介绍,将这两种方法均列入其中,供专业人士参考使用。



附录 C (资料性附录)

热防护性能评估(TPE)测试过程举例

C.1 按步骤 9.1.3~9.1.7 热防护性能方法测试试样,得到试样的最大暴露时间 t_{\max} 。在本例中,如图 C.1 所示为 12.5 s。

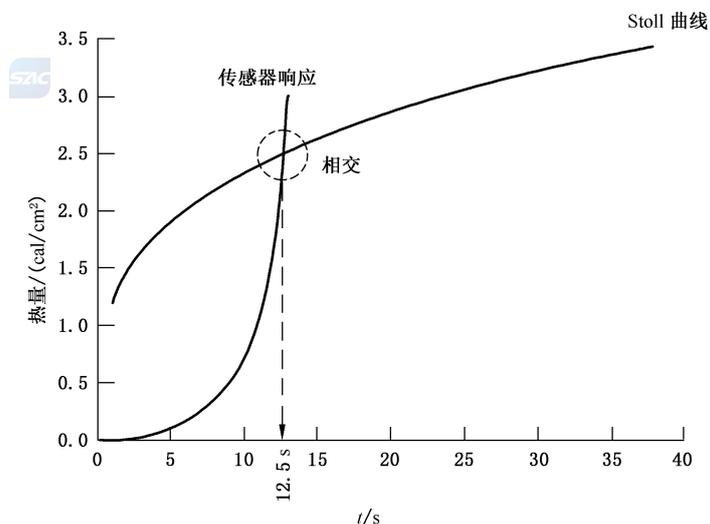


图 C.1 测试累积热能与 Stoll 曲线相交的示意图

C.2 通过 t_{\max} 除以 2 确定热防护性能评估测试的测试暴露时间 t_{trial} 。在本例中为 6 s (精确至秒)。将仪器设置为按暴露时间模式来进行测试,输入 6 s。等暴露结束后持续采集数据至 30 s 以上。本例中传感器响应的曲线如图 C.2 所示。

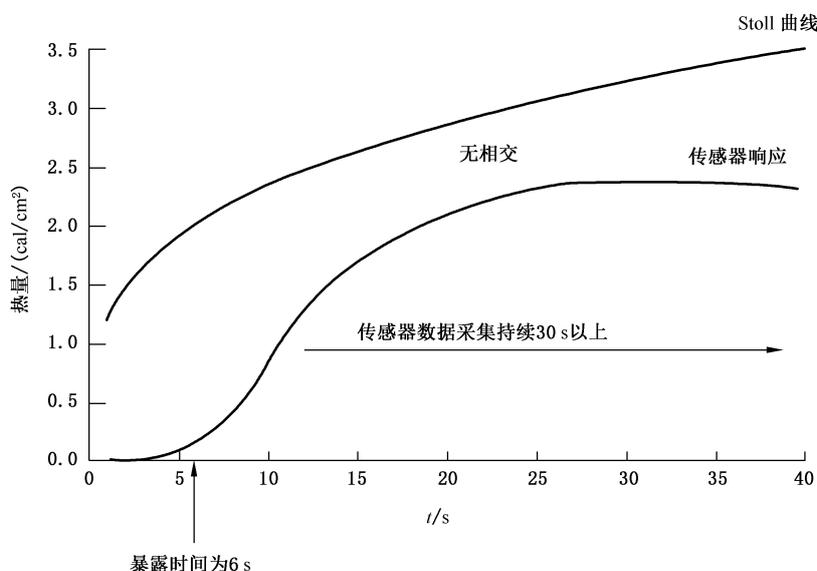


图 C.2 暴露时间为 6 s 时测试累积热能与 Stoll 曲线未相交的示意图

C.3 从图 C.2 中可以看出传感器并未与 Stoll 曲线相交,按实验要求,需要重新计算暴露时间。从前序最高暴露时间 12.5 s 和当前测试暴露时间 6 s 中取中间值 9 s (精确至秒)。重复 C.2 步骤,9 s 暴露时间

结束后持续采集 30 s 以上的数据,其测试响应曲线如图 C.3 所示。

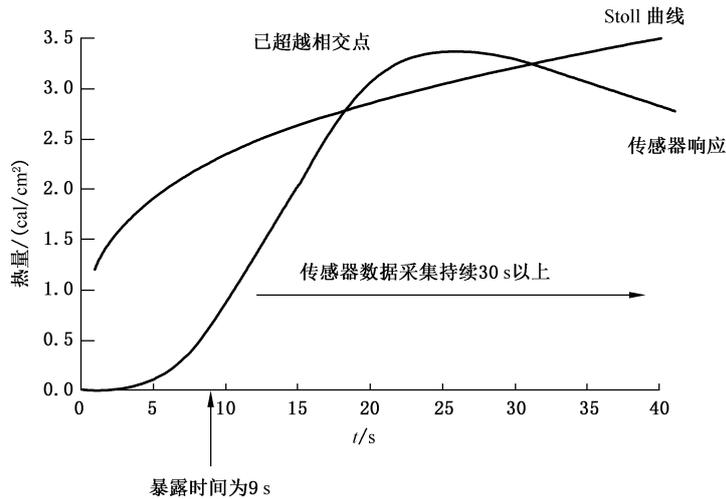


图 C.3 暴露时间为 9 s 时测试累积热能超过 Stoll 曲线的示意图

C.4 从图 C.3 中可以看出传感器已经越过 Stoll 曲线的相交点,按实验要求,仍需要重新计算暴露时间。从前序最低暴露时间 6 s 和当前测试暴露时间 9 s 中取中间值 8 s(精确至秒)。重复 C.2 步骤,8 s 暴露时间结束后持续采集 30 s 以上的数据,其测试响应曲线如图 C.4 所示。

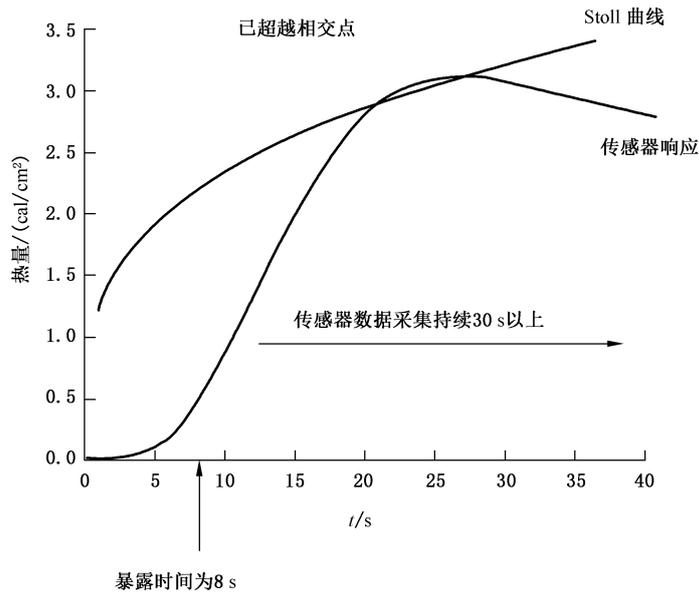


图 C.4 暴露时间为 8 s 时测试累积热能超过 Stoll 曲线的示意图

C.5 从图 C.4 中可以看出传感器已经越过 Stoll 曲线的相交点,按实验要求,仍需要重新计算暴露时间。从前序最低暴露时间 6 s 和当前测试暴露时间 8 s 中取中间值 7 s(精确至秒)。重复 C.2 步骤,7 s 暴露时间结束后持续采集 30 s 以上的数据,其测试响应曲线如图 C.5 所示。

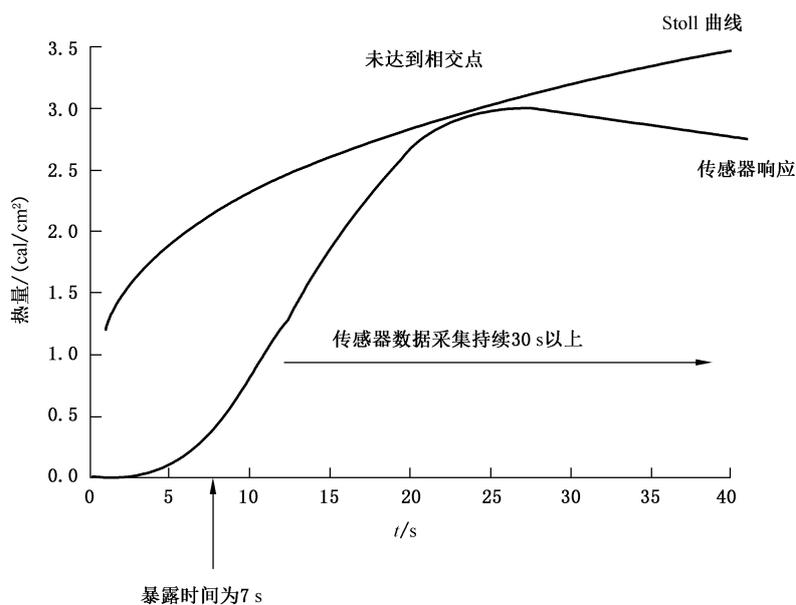


图 C.5 暴露时间为 5 s 时测试累积热能与 Stoll 曲线未相交的示意图

C.6 从图 C.5 中可以看出传感器未与 Stoll 曲线相交,按实验要求,仍需重新计算暴露时间。从前序暴露时间 8 s 和当前测试暴露时间 7 s 中取中间值 7.5 s (精确至秒)。但是这个时间差已经接近 0.5 s 的间隔,无需进行测试,仅通过步骤 9.2.8 中的公式进行计算即得热防护性能评估的数值。

$$7.5 \text{ s} \times 84 (\text{kW}/\text{m}^2) / 10 = 63.0 \text{ kW} \cdot \text{s}/\text{m}^2$$

$$[7.5 \text{ s} \times 2 \text{ cal}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s}) = 15 \text{ cal}/\text{cm}^2]$$

C.7 其余样品重复以上步骤即可。

C.8 计算平均值即为热防护性能评估的结果。

附 录 D
(资料性附录)
铜量热传感器的校准

D.1 空白传感器的校准

通过标准热流计(具有可追溯性)在不同范围的标准辐射热源 $[(13\pm 2)\text{kW}/\text{m}^2, (33\pm 4)\text{kW}/\text{m}^2, (84\pm 2)\text{kW}/\text{m}^2$ 的热源]下校准空白传感器(即未测试样品的铜量热传感器),以此来校验测试中传感器的有效性。

来自不同实验室的8个空白的参考传感器的校准测试数据如表D.1所示(列出表格仅供参考)。

表 D.1 空白传感器在不同标准辐射热源上与标准热流计比对的数据

实验室	空白传感器	标准辐射热源								
		$(13\pm 2)\text{kW}/\text{m}^2$			$(33\pm 4)\text{kW}/\text{m}^2$			$(84\pm 2)\text{kW}/\text{m}^2$		
		测试平均值 kW/m^2	标准热流计测试值 kW/m^2	误差 %	测试平均值 kW/m^2	标准热流计测试值 kW/m^2	误差 %	测试平均值 kW/m^2	标准热流计测试值 kW/m^2	误差 %
1#	1	12.65	12.85	2.50	33.49	34.70	3.45	84.74	82.63	2.6
	2	12.67	12.85	1.64	35.88	35.19	2.00	84.66	83.65	2.2
2#	3	12.72	12.85	1.10	33.76	34.42	3.64	87.15	83.80	1.98
	4	12.40	12.85	3.50	33.86	34.66	2.32	85.98	83.20	3.3
3#	5	12.56	12.85	2.30	35.18	35.09	0.69	85.12	82.17	3.6
	6	12.23	12.85	4.80	33.84	34.72	2.53	84.41	83.09	2.3
4#	7	12.65	12.85	1.60	33.13	34.12	3.67	81.54	83.05	2.3
	8	12.81	12.85	0.40	33.56	34.12	2.26	84.81	83.88	1.8

由表D.1所示,空白传感器与标准热流计的差异在5%以内。

D.2 其他传感器的校验

将已校验的空白传感器按8.1.2的所有步骤校准完成后,用已使用或待验传感器测定校准后的总热通量是否在 $(84\pm 2)\text{kW}\cdot\text{s}/\text{m}^2$ 范围内。如果超出范围,初步判定传感器已经失效。

注:待验传感器表面出现明显的凹凸不平或沾污等情况一律视为失效。

参 考 文 献

- [1] ISO 17492 Clothing for protection against heat and flame—Determination of heat transmission on exposure to both flame and radiant heat
- [2] ASTM F 2700-08 Standard test method for unsteady-state heat transfer evaluation of flame resistant materials for clothing with continuous heating
- [3] ASTM F 2703-08 Standard test method for unsteady-state heat transfer evaluation of flame resistant materials for clothing with burn injury prediction
- [4] NFPA 2112—2007 Standard on Flame—Resistant Garments for Protection of Industrial Personnel Against Flash Fire
-