



中华人民共和国国家标准

GB 8965.4—2022

防护服装 防电弧服

Protective clothing—Arc flash protective clothing



2022-12-29 发布

2024-01-01 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	III
引言	IV
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	2
4 要求	3
5 试验方法	7
6 标识与包装	8
附录 A (资料性) 电弧危害能量计算方法和示例	10
附录 B (规范性) 面料电弧防护性能测试方法	16
参考文献	29



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。

本文件为 GB 8965《防护服装》的第 4 部分。GB 8965 已经发布了以下部分：

- GB 8965.1—2020 防护服装 阻燃服；
- GB 8965.2—2022 防护服装 焊接服；
- GB 8965.3—2022 防护服装 熔融金属飞溅防护服；
- GB 8965.4—2022 防护服装 防电弧服。

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。

本文件由中华人民共和国应急管理部提出并归口。

引 言

在作业环境中,火焰和热伤害的典型形式包括直接接触火焰、焊接过程接触火焰和高温固体、接触飞溅的各类熔融金属、电弧放电导致人体受热能伤害等。由于不同火焰和热伤害的作用形式、特点不同,对躯体防护提出了差异化的需求,也发展出了不同的防护服装类别。本文件在考虑国内外不同类型火焰和热伤害防护产品应用需求和技术现状的基础上,分别制定了主要类型防护服装的技术要求。所编制的 GB 8965 系列产品标准,拟由 4 个部分构成。

- 第 1 部分:阻燃服。目的在于明确在有明火、散发火花,或在有易燃物质并由轰燃风险的场所使用的防护服装的技术要求。
- 第 2 部分:焊接服。目的在于明确焊接及相关作业场所用防护服装的技术要求。
- 第 3 部分:熔融金属飞溅防护服。目的在于明确金属冶炼、铸造等存在熔融金属飞溅危害场所用,避免或减少熔融金属对作业人员造成损伤的防护服装的技术要求。
- 第 4 部分:防电弧服。目的在于明确防护电气作业及相关作业场所中,可能遭受电弧瞬间能量及其热伤害的防护服装的技术要求。

防护服装 防电弧服

1 范围

本文件规定了电气作业及相关作业场所防电弧服的要求、标识与包装,描述了试验方法。

本文件适用于防护电气作业及相关作业场所中,可能遭受电弧瞬间能量及其热伤害的防护服。

本文件不适用于电气作业及相关场所的绝缘防护服、电磁防护服及带电作业屏蔽服。

本文件不包含防电弧面罩、防电弧头罩、防电弧手套和防电弧鞋罩等个人防电弧用品。

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 2912.1 纺织品 甲醛的测定 第1部分:游离和水解的甲醛(水萃取法)
- GB/T 3291.1 纺织 纺织材料性能和试验术语 第1部分:纤维和纱线
- GB/T 3291.2 纺织 纺织材料性能和试验术语 第2部分:织物
- GB/T 3291.3 纺织 纺织材料性能和试验术语 第3部分:通用
- GB/T 3916—2013 纺织品 卷装纱 单根纱线断裂强力和断裂伸长率的测定(CRE法)
- GB/T 3917.3 纺织品 织物撕破性能 第3部分:梯形试样撕破强力的测定
- GB/T 3920 纺织品 色牢度试验 耐摩擦色牢度
- GB/T 3921 纺织品 色牢度试验 耐皂洗色牢度
- GB/T 3922 纺织品 色牢度试验 耐汗渍色牢度
- GB/T 3923.1 纺织品 织物拉伸性能 第1部分:断裂强力和断裂伸长率的测定(条样法)
- GB/T 4669—2008 纺织品 机织物 单位长度质量和单位面积质量的测定
- GB/T 4802.1 纺织品 织物起毛起球性能的测定 第1部分:圆轨迹法
- GB/T 4802.3 纺织品 织物起毛起球性能的测定 第3部分:起球箱法
- GB/T 5296.4—2012 消费品使用说明 第4部分:纺织品和服装
- GB/T 5455—2014 纺织品 燃烧性能 垂直方向损毁长度、阴燃和续燃时间的测定
- GB/T 7573 纺织品 水萃取液 pH 值的测定
- GB/T 7742.1 纺织品 织物胀破性能 第1部分:胀破强力和胀破扩张度的测定 液压法
- GB/T 8628 纺织品 测定尺寸变化的试验中织物试样和服装的准备、标记及测量
- GB/T 8629—2017 纺织品 试验用家庭洗涤和干燥程序
- GB/T 8630 纺织品 洗涤和干燥后尺寸变化的测定
- GB 8965.1—2020 防护服装 阻燃服
- GB/T 12704.1 纺织品 织物透湿性试验方法 第1部分:吸湿法
- GB/T 12903 个体防护装备术语
- GB/T 13640 劳动防护服号型
- GB/T 17592 纺织品 禁用偶氮染料的测定
- GB 18401—2010 国家纺织产品基本安全技术规范
- GB/T 18885—2020 生态纺织品技术要求

GB/T 20097 防护服 一般要求

GB 20653 防护服装 职业用高可视性警示服

GB/T 21294 服装理化性能的检验方法

GB/T 23344 纺织品 4-氨基偶氮苯的测定

FZ/T 70007 针织上衣腋下接缝强力试验方法

FZ/T 81007 单、夹服装

AATCC 135—2018 织物经家庭洗涤后尺寸变化的测定(Dimensional Changes of Fabrics after Home Laundering)

ASTM D1776/D1776M-20 纺织品调节和试验的标准实施规程(Standard Practice for Conditioning and Testing Textiles)

3 术语和定义

GB/T 12903、GB/T 3291.1~3291.3、GB 8965.1—2020 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

电弧 electric arc

电流通过某些绝缘介质(例如空气)所产生的瞬间火花和能量。

注：电弧是一种气体放电现象。

3.2

电弧危害 arc hazard

由电弧释放巨大能量引起的对人员造成伤害或者对设备造成损坏。

3.3

防电弧服 arc flash protective clothing

用于保护可能暴露于电弧或相关热危害中人员躯干、四肢的防护服。

3.4

电弧危害能量 arc hazard energy

瞬时电弧电压值乘以瞬时电弧电流值,再乘以电弧释放的增量时间所得到的叠加。

3.5

斯托尔曲线 Stoll curves

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

[来源：GB/T 38302—2019,3.3]

3.6

电弧热防护性能值 arc thermal performance value; ATPV

依据斯托尔曲线,入射到材料上、有50%的可能性使足够的热量穿透试样引起二度烧伤的能量值。

注1：电弧热防护性能值是用来反映材料电弧防护性能的指标之一,单位为卡每平方厘米(cal/cm^2)。

注2：电弧危害能量单位英制和公制转换公式为 $1 \text{ cal}/\text{cm}^2 = 4.19 \text{ J}/\text{cm}^2$ 。

3.7

破裂 breakopen

材料上形成一个或多个孔,热能可以通过这些孔穿过材料的一种反应(现象)。

注：当出现任意一个面积大于 1.6 cm^2 或任意方向上长度大于 2.5 cm 的洞时,样品被认为破裂。横跨开口或孔的单根纱线并不能影响孔洞大小的评价结果。在多层阻燃材料的样品测试中,所有层都破裂才能判定测试结果为破裂。在多层样品的测试中,如果某些层是可燃的,当这些层暴露在外时,判定测试结果为破裂。

3.8

破裂阈能 breakopen threshold energy

E_{BT}

入射到材料上、有 50% 的可能性造成材料破裂的能量值。

注：破裂阈能是用来反映材料电弧防护性能的指标之一，单位为卡每平方厘米(cal/cm^2)。

3.9

电弧防护级别 arc rating

材料暴露于电弧释放时防护能力的高低。

注：防护级别由材料的 ATPV 或 EBT 两者中较低值来确定(见表 1)，用于界定材料电弧防护性能等级。

4 要求

4.1 材料

4.1.1 面料

4.1.1.1 电弧防护性能

面料电弧防护性能按照表 1 中的规定分为 4 个级别。单层或多层面料的面料电弧防护性能应符合表 1 的要求。电弧防护级别由面料的电弧热防护性能值 ATPV 和破裂阈能 EBT 两者中的较低值来确定。

注 1：国际上目前没有防电弧服整体防电弧性能的测试方法，因此以面料的电弧防护性能作为防电弧服的电弧防护性能。

注 2：选购和配置防电弧服时，电弧危害能量计算方法和示例参照附录 A。

表 1 面料电弧防护性能

级别	单位面积质量 g/m^2	电弧热防护性能值(ATPV) cal/cm^2	破裂阈能(E_{BT}) cal/cm^2
1 级	≤ 200	$6 \leq \text{ATPV} < 8$	$6 \leq E_{\text{BT}} < 8$
2 级	≤ 290	$8 \leq \text{ATPV} < 25$	$8 \leq E_{\text{BT}} < 25$
3 级	≤ 600	$25 \leq \text{ATPV} < 40$	$25 \leq E_{\text{BT}} < 40$
4 级	无要求	$\text{ATPV} \geq 40$	$E_{\text{BT}} \geq 40$

4.1.1.2 阻燃性能

面料的阻燃性能在洗涤前和经过 5.3 规定的洗涤程序洗涤后，都应符合表 2 的要求。

表 2 面料阻燃性能要求

项目		指标
阻燃性能	续燃时间/s	≤ 2
	阴燃时间/s	≤ 4
	损毁长度/mm	≤ 100
	熔融、滴落	无

4.1.1.3 理化性能

面料的理化性能应符合表 3 的要求。表中未标注“机织物”或“针织物”的技术要求，对所有类型面料均适用。

表 3 面料理化性能要求

项 目		指 标	
断裂强力(机织物)(洗前,洗后)/N	单位面积质量 $\leq 200 \text{ g/m}^2$	≥ 300	
	单位面积质量 $> 200 \text{ g/m}^2$	≥ 450	
撕破强力(机织物)/N	单位面积质量 $\leq 200 \text{ g/m}^2$	≥ 25	
	单位面积质量 $> 200 \text{ g/m}^2$	≥ 35	
胀破强力(针织物)/kPa		≥ 200	
透湿量(仅考核单层面料)/[$\text{g}/(\text{m}^2 \cdot 24 \text{ h})$]		$\geq 5\ 000$	
起球/级		≥ 3	
水洗尺寸变化率(机织物)/%		$-3.0 \sim +3.0$	
松弛尺寸变化率(针织物)/%		$-5.0 \sim +5.0$	
热稳定性/%		≤ 5	
色牢度/级	耐皂洗		$\geq 3-4$
	耐摩擦	干法	$\geq 3-4$
		湿法	≥ 3
	耐汗渍		$\geq 3-4$
甲醛含量/(mg/kg)	直接接触皮肤	≤ 75	
	非直接接触皮肤	≤ 300	
pH		4.0~8.5	
可分解致癌芳香胺染料		不应检出	
异味		无	

4.1.1.4 外观质量

防电弧服面料的外观质量应符合 GB 8965.1—2020 中 5.6 的规定。

4.1.2 里料

如防电弧服使用里料,里料的阻燃性能在洗涤前和经过 5.3 规定的洗涤程序洗涤后,应符合表 4 的规定。

表 4 里料理化性能要求

项 目		指 标
阻燃性能	续燃时间/s	≤ 2
	阴燃时间/s	≤ 4
	损毁长度/mm	不应烧通
	熔融、滴落	无

表 4 里料理化性能要求 (续)

项目	指标
热稳定性/%	≤5
甲醛含量/(mg/kg)	≤75
可分解致癌芳香胺染料	不应检出
异味	无

4.1.3 缝纫线

4.1.3.1 强力

缝纫线单线强力应不小于 10 N。

4.1.3.2 耐热性

缝纫线经耐热性测试,应无熔融和烧焦现象。

4.1.4 辅料及附件

4.1.4.1 若使用拉链、钩、扣、粘扣带时,应使用耐高温材料,其表面需加防电弧面料掩襟,设计时应便于连接和解脱。

4.1.4.2 应尽量少使用服装辅件和配饰,若必须使用,面积应尽可能小。若使用金属部件,金属部件不应与身体直接接触。如果使用橡筋类的辅料,包裹布应使用面料。若使用里料或口袋布时,里料和口袋布要求应阻燃、不熔融。

4.1.4.3 使用反光材料或荧光材料时,其材质应是阻燃材料,其阻燃性能应与面料阻燃性能一致,反光材料的逆反射系数应符合 GB 20653 对反光材料的反光性能要求,使用荧光材料的,荧光材料的颜色性能应符合 GB 20653 对基底材料或组合性能材料的颜色性能要求。

4.1.4.4 若使用外露的配件或标识,其基布材料应是阻燃材料。企业标识采用绣花等工艺的,按 5.3 规定试验时,应无熔融和烧焦现象。

4.1.4.5 防电弧服的领子、挂面、袖头、下摆袂、腰头、袋盖等部位可以敷衬,敷衬部位不应渗胶,按 GB/T 8629—2017 中 4N 方法水洗 20 次后,不应有起泡、脱层现象。

4.2 款式

防电弧服的款式应简洁、实用,在如下款式中选用:

- a) 褂式;
- b) 下装分离式;
- c) 衣裤连体式。

4.3 号型尺寸

4.3.1 防电弧服的号型按 GB/T 13640 的号型范围选定,超出 GB/T 13640 范围按档差进行设置。根据款式及使用要求,按 GB/T 13640 中的控制部位设定防护服成品尺寸,成品防电弧服的尺寸测量位置及主要部位尺寸极限偏差应符合 FZ/T 81007 的规定。

4.3.2 配用的头罩、手套、鞋套等尺寸可以自行确定,但不可影响四肢及头部的活动和工作。

4.4 结构设计

- 4.4.1 防电弧服及配用的防护用品应完整地覆盖身体暴露区域,服装应为长袖设计以保护整个上身。
- 4.4.2 防电弧服的设计及连接部位应能保证方便和快速的穿脱,避免紧身设计。
- 4.4.3 分体式上衣长度应盖住裤子上端 20 cm 以上,领口、袖口采用可调式闭合结构。
- 4.4.4 必须有外衣袋时,袋口应有袋盖或闭合件封口,袋盖长应大于袋口长度 2 cm 以上,闭合件应有防电弧面料遮盖。
- 4.4.5 服装的设计应对使用者在使用和工作中不会造成任何的行动障碍,在不影响设计强度及防护效果的情况下,尽量减轻防护服的质量,减少外部的带、袪及其他装饰物。
- 4.4.6 防电弧服应该在显著部位标示面料 ATPV 和 E_{BT} 中的较低值。低于 10 cal/cm^2 的数据应精确到 0.1 cal/cm^2 。

4.5 缝制

4.5.1 针距

各种缝纫、锁眼、钉扣针距应符合表 5 的规定。

表 5 针距要求

项目		针距密度	备注
明暗线	细线	不少于 12 针/3 cm	—
	粗线	不少于 9 针/3 cm	—
绗缝线		不少于 9 针/3 cm	—
锁眼	细线	不少于 12 针/1 cm	—
	粗线	不少于 9 针/1 cm	—
钉扣	细线	每眼不少于 8 根线	缠脚线高度与止口厚度相适应
	粗线	每眼不少于 6 根线	
注: 细线为 20 tex 及以下缝纫线;粗线为 20 tex 以上缝纫线。			

4.5.2 缝制工艺

- 4.5.2.1 各部位缝制应线路顺直,整齐、平服、牢固、松紧适宜。
- 4.5.2.2 领子、袋盖应平服,面料和里料应松紧适宜,不反翘。
- 4.5.2.3 袖袖应圆顺、平服、前后基本一致。
- 4.5.2.4 拉链缉线应整齐,拉链带顺直。
- 4.5.2.5 四合扣上下扣松紧应适宜,牢固,不脱落。
- 4.5.2.6 领子部位不应有跳针。其余部位 30 cm 内不应有连续跳针或两处及以上单跳针。链式线迹不应有跳针。
- 4.5.2.7 多层面料绗缝的,应平整、无褶皱。
- 4.5.2.8 对称部位应基本一致。

4.6 防电弧服外观

防电弧服外观应符合 GB 8965.1—2020 中 5.6 的规定。

4.7 防电弧服水洗后的尺寸变化率

机织物面料制成的防电弧服成品水洗后的尺寸变化率应符合表 6 的规定。

表 6 防电弧服水洗后尺寸变化率的要求

部 位	水洗尺寸变化率/%	备 注
领大	-1.0~1.0	只考核立领
胸围	-2.5~2.5	—
衣长	-2.5~2.5	—
腰围	-1.5~1.5	—
裤长	-2.0~2.0	—

4.8 防电弧服接缝强力

机织物类面料制成的防电弧服,肩缝、袖子与衣身、裤后裆接缝强力应不小于 225 N,其他部分接缝强力不小于 100 N,针织物类服装的裤后裆缝和腋下接缝强力应不小于 74 N。

4.9 防电弧服甲醛含量

防电弧服甲醛含量应符合:直接接触皮肤的服装不大于 75 mg/kg,非直接接触皮肤的服装不大于 300 mg/kg。夏装的整体,春秋装和冬装的服装领口、袖口、裤管所用材料的理化性能应满足直接接触皮肤面料的要求。

4.10 防电弧服 pH

防电弧服 pH 应为 4.0~8.5。

5 试验方法

5.1 单层或多层防电弧服面料电弧热防护性能值和破裂阈能按附录 B 规定测试。检测时应同时测试面料的电弧热防护性能值和破裂阈能。

5.2 防电弧服面料的单位面积质量按 GB/T 4669—2008 中的方法 3 测试。

5.3 面料和里料的阻燃性能按 GB/T 5455—2014 中条件 A 规定的方法测试。如果防电弧服面料为多层组成,则将每一层单独测试。若面料中包含非阻燃功能的功能层,功能层不应有熔融、滴落现象。防电弧阻燃面料应与非阻燃面料分开洗涤,以避免从其他织物上沾染可燃物质。如无特殊说明,本文件中面料和里料的洗涤应使用 GB/T 8629—2017 中规定的 A 型自动洗衣机,使用正常搅拌方式洗涤 12.5 h,漂洗 8 h,并悬挂干燥。漂洗过程中应换水两次,每次换水前脱水 2 min。洗涤所用洗衣粉应为中性,pH 为 7.0~7.5。或使用 A 型自动洗衣机并使用中性洗涤剂按 GB/T 8629—2017 中 4 N 方式洗涤 50 次,并悬挂干燥。如服装注明为不可洗涤的服装,则测试前可不经洗涤预处理。

5.4 面料的断裂强力按 GB/T 3923.1 规定测试。如果防电弧服面料为多层组成,则只测试最外层面料

的断裂强力。

5.5 面料的撕破强力按 GB/T 3917.3 规定测试。如果防电弧服面料为多层组成,则只测试最外层面料的撕破强力。

5.6 面料的胀破强力按 GB/T 7742.1 规定测试,测试面积为 7.3 cm²。

5.7 面料的透湿量按 GB/T 12704.1 规定测试。

5.8 机织物类面料的起球试验按 GB/T 4802.1 规定测试;针织物类面料的起球试验按 GB/T 4802.3 测试。

5.9 面料的尺寸变化率和松弛尺寸变化率按 GB/T 8628 和 GB/T 8630 规定测试,采用 GB/T 8629—2017 中的 4 N 程序,机织物采用悬挂晾干的方式干燥,针织物采用平铺晾干方式干燥。如果使用说明上为轻柔洗涤或手洗,则采用 4 G 或 4 H 程序洗涤。洗涤次数为 1 次。

5.10 面料和里料的热稳定性按 GB 8965.1—2020 附录 A 规定,在温度(180±2)℃条件下进行测试。

5.11 面料的耐皂洗色牢度按 GB/T 3921 规定测试。

5.12 面料的耐摩擦色牢度按 GB/T 3920 规定测试。

5.13 面料的耐汗渍色牢度按 GB/T 3922 规定测试。

5.14 面料、里料、成品的甲醛含量按 GB/T 2912.1 规定测试。

5.15 面料、里料、成品的 pH 值按 GB/T 7573 规定测试。

5.16 面料、里料的可分解致癌芳香胺染料按 GB/T 17592 和 GB/T 23344 规定测试。

5.17 面料、里料的异味按 GB 18401—2010 中 6.7 的规定测试。

5.18 缝纫线强力按 GB/T 3916—2013 中方法 A 或方法 B 的规定测试。

5.19 缝纫线耐热性能按 GB 8965.1—2020 中 6.19 的规定测试。

5.20 防电弧服接缝断裂强力,机织物类服装按 GB/T 21294 规定的方法测试,针织物材料制成的服装接缝强力按 FZ/T 70007 规定的方法测试,测试位置为裤后裆缝和腋下接缝,每个部分各取一个样。

5.21 防电弧服水洗后的尺寸变化率按 GB/T 8628 和 GB/T 8630 规定测试,采用 GB/T 8629—2017 中的 4 N 程序洗涤,洗涤次数为 1 次。机织物采用悬挂晾干的方式干燥,针织物采用平铺晾干的方式干燥。

6 标识与包装

6.1 标识

6.1.1 每件(套)防电弧服上应有耐久性标签,并附合格证及制造商提供的使用说明。

6.1.2 耐久性标签应符合 GB/T 5296.4—2012 中 7.2 的要求。每件(套)防电弧服耐久性标签应有产品名称、产品款号、材料组分、材料为本质阻燃织物或后处理阻燃织物的说明、有无使用 GB/T 18885—2020 附录 E 中规定的禁用阻燃剂的说明、图形符号、洗涤方法、生产日期、批次、有效期、制造商名称、生产地址等,不可洗涤服装应注明“不可洗涤”。

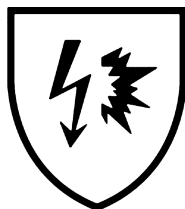
6.1.3 制造商提供的使用说明,应符合 GB/T 5296.4—2012 要求,并包含但不限于如下内容:

- a) 制造商名称、生产地址、联系资料;
- b) 适用及不适用条件;
- c) 使用要求、穿着指导、注意事项;
- d) 保养、储存、洗涤、熨烫说明;
- e) GB/T 20097 中规定的其他的制造商提供的信息。

6.1.4 合格证应包含产品名称、产品款号、材料组分、材料为本质阻燃织物或后处理阻燃织物的说明、有无使用 GB/T 18885—2020 附录 E 中规定的禁用阻燃剂的说明、本文件编号、电弧防护性能级别和

ATPV 或 E_{BT} 中的较低值、洗涤方法、生产日期、批次、有效期、制造商名称、生产地址、出厂检验合格证等,不可洗涤服装应注明“不可洗涤”。

6.1.5 防电弧服图形符号依据 GB/T 20097,应采用图 1 形式并在图形符号下方标注本文件编号、电弧防护性能级别、ATPV 或 E_{BT} 中的较低值。



电弧防护性能级别: __级

ATPV 或 E_{BT} : __ cal/cm²

图 1 防电弧服图形符号

6.2 包装

产品包装容器应规整牢固、无破损,内外包装应设防潮层。组合尺寸配套,产品数量准确,折叠规整,码放整齐。箱内应放入制造商包装检验单,包装检验单应包括产品名称、号型、制造商名称、数量、检验员、检验日期。箱外注明产品名称、数量、质量、体积、生产日期、制造商名称和有效期。

附录 A

(资料性)

电弧危害能量计算方法和示例

A.1 概述

根据典型作业工况下的系统电压、故障电流、电弧持续时间和操作距离等相关影响因素,计算预计可能的电弧危害能量。选购和配置的防电弧服的电弧能量值不低于计算的电弧事故能量值。

注 1: 本附录中所涉及的经验公式来自 IEEE 1584—2018、NFPA 70E—2018。

注 2: 本附录中曲线拟合计算方法及计算示例参考《中低压配电网不停电作业适应性技术研究》相关成果。

A.2 电弧危害能量计算步骤

电弧危害能量计算需要经过以下步骤,分别是:

- a) 收集系统和安装数据,如系统容量、系统单线图、系统接地情况和工作环境等;
- b) 确定系统运行的模式,如系统分合闸情况、系统运行方式(是否存在并列或备用运行)等;
- c) 计算作业点短路电流,如计算低压配电系统作业点三相短路电流;
- d) 计算电弧电流,电弧电流主要取决于三相短路电流,由于电弧阻抗的存在,计算的弧闪电流将会比短路电流小,尤其是低压系统;
- e) 调研保护装置的特性并确定电弧持续时间,通过调研系统内二次保护装置的时间-电流特性,确定电弧持续时间;
- f) 根据实际情况(电压等级、母线结构)确定作业点可能产生电弧位置的极间距离;
- g) 根据作业工况确定人员躯干至电弧点的工作距离,烧伤度的评定是以人体皮肤的烧伤面积来判定的,头部和躯干的皮肤面积占人体总面积的很大部分,而且这部分皮肤的烧伤对日常生活的影响是最大的,因此电弧防护是基于在一定的工作距离上,在人员的脸部和躯干产生的事故能量,而不是指在手部或胳膊上的事故能量;
- h) 根据电弧危害能量计算公式计算作业中可能产生的电弧能量;
- i) 在计算事故能量的方程式中引入由一个电弧源至人体,并能够产生二度烧伤的距离,并以此计算电弧防护用品保护范围。

A.3 电弧危害能量计算方法

A.3.1 经验公式计算方法

A.3.1.1 概述

经验公式计算方法参考 IEEE 1584—2018,适用于频率 50 Hz、系统电压 380 V~15 000 V,短路故障电流 700 A~106 000 A、导体间隙 13 mm~152 mm 的场合。计算步骤为:

- a) 计算电弧电流 I_a ;
- b) 计算典型事故能量 E_n ;
- c) 计算实际事故能量 E 。

A.3.1.2 计算电弧电流 I_a

电弧电流采用公式(A.1)计算。

$$\lg I_a = K + 0.662 \lg I_{bf} + 0.096 6V + 0.000 526G + 0.558V(\lg I_{bf}) - 0.003 04G(\lg I_{bf}) \dots\dots\dots (A.1)$$

式中：

- I_a ——电弧电流,单位为千安(kA);
- K ——常数,开放结构为 0.153;封闭式结构为 0.097;
- I_{bf} ——短路故障电流,单位为千安(kA);
- V ——系统电压,单位为千伏(kV);
- G ——导体极间距离,单位为毫米(mm),见表 A.1。

1 kV 及以上电弧电流采用公式(A.2)计算。

$$\lg I_a = 0.004\ 02 + 0.9831 \lg I_{bf} \dots\dots\dots (A.2)$$

表 A.1 元器件和电压级别因子

系统电压 V	元器件类型	典型导体间隙 G mm	距离指数 x
220~1 000	敞开式结构	10~40	2.000
	封闭式结构	32	1.473
	电机控制柜和仪表盘	25	1.641
	线缆	13	2.000
1 000~5 000	敞开式结构	102	2.000
	封闭式结构	13~102	0.973
	线缆	13	2.000
5 000~15 000	敞开式结构	13~153	2.000
	封闭式结构	153	0.973
	线缆	13	2.000

A.3.1.3 计算典型事故能量 E_n

在电弧持续时间 0.2 s、工作距离 610 mm 的典型条件下,典型事故能量采用公式(A.3)计算。

$$\lg E_n = K_1 + K_2 + 1.081 \lg I_a + 0.001\ 1G \dots\dots\dots (A.3)$$

式中：

- E_n ——典型电弧放电时间和工作距离的事故能量,单位为焦每平方厘米(J/cm²);
- K_1 ——常数,开放结构为 -0.792,箱型结构为 -0.555;
- K_2 ——常数,未接地及高压电阻接地系统为 0,接地系统为 -0.113;
- I_a ——电弧电流,单位为千安(kA);
- G ——导体间隙,单位为毫米(mm),见表 A.1。

典型事故能量采用公式(A.4)计算。

$$E_n = 10^{\lg E_n} \dots\dots\dots (A.4)$$

A.3.1.4 计算实际事故能量 E

实际事故能量采用公式(A.5)计算。

$$E = 4.184 C_f E_n (t/0.2) (610^x / D^x) \dots\dots\dots (A.5)$$

式中：

- E ——实际事故能量,单位为焦每平方厘米(J/cm²);

- C_f ——系数,1 kV 以下为 1.5,1 kV 以上为 1.0;
- E_n ——典型事故能量,单位为焦耳每平方厘米(J/cm^2);
- t ——电弧时间,单位为秒(s);
- x ——距离指数,见表 A.1;
- D ——操作距离,单位为毫米(mm)。

A.3.2 曲线拟合计算方法

A.3.2.1 概述

曲线拟合计算方法,适用于频率 50 Hz、系统电压 380 V、短路故障电流 15 000 A~50 000 A 的开放环境作业与封闭环境作业场合。

A.3.2.2 计算电弧能量

开放环境下电弧能量采用公式(A.6)计算。

$$E_{in,open} = 4\,314.9D^{-1.968} [0.001\,1I_b^2 - 0.025\,9I_b + 0.976\,8] \dots\dots\dots (A.6)$$

封闭环境下电弧能量采用公式(A.7)计算。

$$E_{in,close} = 505.46D^{-1.463} [0.001\,6I_b^2 + 0.011\,1I_b + 0.932\,8] \dots\dots\dots (A.7)$$

式中:

- $E_{in,open}$ ——开放环境下电弧能量,单位为卡每平方厘米(cal/cm^2);
- D ——距离电弧距离,单位为厘米(cm);
- I_b ——三相短路电流,单位为千安(kA);
- $E_{in,close}$ ——封闭环境下电弧能量,单位为卡每平方厘米(cal/cm^2)。

A.3.3 Lee 氏高压理论计算模型

当系统电压超过 15 kV 或导体间隙超过经验计算模型适用范围时,采用公式(A.8)计算。当电压超过 15 kV,可认为电弧电流和短路故障电流相同。

$$E = 2.142 \times 10^6 VI_{bf}(t/D^2) \dots\dots\dots (A.8)$$

式中:

- E ——实际事故能量,单位为焦耳每平方厘米(J/cm^2);
- V ——系统电压,单位为千伏(kV);
- I_{bf} ——短路故障电流,单位为千安(kA);
- t ——电弧时间,单位为秒(s);
- D ——操作距离,单位为毫米(mm)。

A.4 电弧危害能量计算公式使用示例

在某 10 kV 操作作业时,系统电压 V 为 10 kV,短路故障电流 I_{bf} 为 10 kA,电弧持续时间 t 为 0.25 s,操作距离 D 为 0.7 m,有接地保护。

系统电压小于 15 kV,采用 A.3.1 的经验公式计算方法,算得:

$$\lg I_a = 0.004\,02 + 0.983 \times \lg I_{bf} = 0.004\,02 + 0.983 \times \lg 10 = 0.987$$

电器柜为封闭式结构, $K_1 = -0.55$;其他接地系统, $K_2 = -0.113$;系统电压在 5 kV~15 kV 之间的电器柜, $G = 153$ mm。

$$\lg E_n = K_1 + K_2 + 1.081 \times \lg I_a + 0.001\,1G = -0.555 - 0.113 + 1.081 \times \lg 0.987 + 0.001\,1 \times 153 = 0.567$$

$$E_n = 3.692\, J/cm^2$$

1 kV 以上系统, $C_f=1$; 系统电压在 5 kV~15 kV 之间的电器柜, $x=0.973$ 。

$$E=4.184C_fE_n(t/0.2)(610^x/D^x)=4.184\times 3.692\times (0.25/0.2)(610^{0.973}/700^{0.973})=16.9\text{ J/cm}^2$$

A.5 典型作业工况电弧危害能量计算示例

根据 GB 26859 和 GB 26860 的相关设定, 选取部分典型作业工况, 计算可能出现的电弧危害能量, 见表 A.2、表 A.3。

表 A.2 380 V 系统典型工况电弧危害能量计算表

序号	作业种类	作业项目	预估最大 短路电流 kA	电弧 时间 ms	产生电弧 部位的极 间距离 mm	产生电弧时作 业人员身体 距离电弧距离 mm	电弧 能量 cal/cm ²
1	带电作业	架空线路绝缘杆作业法 项目及临近带电作业	28.87	250	150	700	1.13
2	带电作业	架空线路绝缘手套 作业法项目	28.87	250	20	500	5.63
3	带电作业	接触低压金属配电箱 (表箱)带电作业项目	28.87	250	20	300	22.56 *
4	倒闸操作	接触低压金属配电箱 (表箱)的电气操作	28.87	250	20	300	22.56 *
5	维护	邻近或交叉电力线作业	28.87	250	150	1 000	0.55
6	停电检修	室内停电检修工作	28.87	250	20	700	5.7
7	停电检修	架空线路装、拆接地线, 停电检修工作	28.87	250	150	700	1.13
8	巡检	室内 0.4 kV 设备及线路日常 巡视及非直接接触的检测工作	28.87	250	20	700	5.7
9	巡检	室外 0.4 kV 设备及线路日常 巡视及非直接接触的检测工作	28.87	250	150	700	1.13
10	巡检	直接接触室内运行 设备的带电检测项目	28.87	250	20	400	14.81 *
11	巡检	直接接触室外运行 设备的带电检测项目	28.87	250	150	400	3.45

注 1: 未标 * 的计算结果为采用 A.3.1 方法计算, 标 * 的计算结果为采用 A.3.2 方法计算。

注 2: 本表采用了典型工况进行计算可能的电弧能量, 但是实际事故的能量有可能超过预计可能电弧能量。因此在根据各表选择和使用个人电弧防护用品时, 可能出现无法完全避免伤害的情况。

注 3: 表中的数据无法涵盖所有应用情况, 在使用时充分考虑其和实际情况的差异。使用者可根据相关原理或商业软件自行评估。计算结果不作为任何的规范要求。

表 A.3 10 kV 系统典型工况电弧能量计算表

序号	作业种类	作业项目	预估最大短路电流 kA	电弧时间 ms	产生电弧部位的极间距离 mm	产生电弧时作业人员身体距离电弧距离 mm	电弧能量 cal/cm ²
1	带电作业	架空线路绝缘杆作业法项目及临近带电作业	9.09	250	300	700	3.44
2	带电作业	架空线路绝缘手套作业法项目	9.09	250	300	500	6.71
3	电缆不停电作业	电缆线路设备上不停电作业	9.09	250	125	300	20.75
4	倒闸操作	10 kV 设备上开关柜、配电站、开闭所内等倒闸操作	9.09	250	125	300	10.01
5	倒闸操作	10 kV 设备上柱上开关、跌落式熔断器、隔离开关及刀闸等倒闸操作	9.09	250	300	700	3.96
6	维护	邻近或交叉电力线作业	9.09	250	300	1 000	1.69
7	维护	室内设备维护	9.09	250	125	700	3.81
8	维护	室外设备维护	9.09	250	300	700	3.44
9	停电检修	室内 10 kV 设备及线路停电检修工作	9.09	250	125	700	3.81
10	停电检修	架空线路装、拆接地线、停电检修工作	9.09	250	300	700	3.44
11	巡检	室内 10 kV 设备及线路日常巡视及非直接接触的检测工作	9.09	250	125	700	3.81
12	巡检	室外 10 kV 设备及线路日常巡视及非直接接触的检测工作	9.09	250	300	700	3.44

注 1：本表的计算结果为采用 A.3.1 方法计算所得。
 注 2：本表采用了典型工况进行计算可能的电弧能量，但是实际事故的能量有可能超过预计可能电弧能量。因此在根据各表选择和使用个人电弧防护用品时，可能出现无法完全避免伤害的情况。
 注 3：表中的数据无法涵盖所有应用情况，在使用时充分考虑其和实际情况的差异。使用者可根据相关原理或商业软件自行评估。计算结果不作为任何的规范要求。

A.6 直流电电弧的计算

直流电电弧的计算方法参考 NFPA 70E—2018 附录 D 中 D.5 的公式，如公式(A.9)、公式(A.10)所示，该计算方法的系统电压不大于 1000 V。

$$I_{arc} = 0.5 \times I_{bf} \dots\dots\dots (A.9)$$

$$IE_m = 0.01 \times V_{\text{sys}} \times I_{\text{arc}} \times T_{\text{arc}} / D^2 \quad \dots\dots\dots (A.10)$$

式中：

I_{arc} ——电弧电流，单位为安培(A)；

I_{bf} ——系统短路电流，单位为安培(A)；

IE_m ——预估电弧事故能量，单位为卡每平方厘米(cal/cm²)；

V_{sys} ——系统电压，单位为伏特(V)；

T_{arc} ——电弧时间，单位为秒(s)；

D ——工作距离，单位为厘米(cm)。

附录 B

(规范性)

面料电弧防护性能测试方法

B.1 基本要求

B.1.1 本测试方法旨在测定一种面料或面料组合的电弧防护级别。本测试方法中,测定面料在暴露于电弧闪爆时及闪爆后,透过测试面料的总热量。用铜塞热量计来测定试样的暴露热能和热交换值。用铜的已知热物理特性来确定传输到和透过试样的各种热能。

B.1.2 测试面料的电弧防护性能,通过测试过程中穿透测试面料的总热量进行评估。

B.1.3 通过本测试方法测定的热能传递值是评定面料电弧防护级别的基础。本测试方法所测定的电弧防护级别是在斯托尔曲线模型下,该电弧闪爆能量有 50%可能造成人体二度烧伤或面料破裂(测试样品在达到皮肤烧伤预测情况之前出现破裂现象)的能量值。

B.1.4 测试面料应按 B.6.4.7 中所描述的记录要求,记录测试样品在电弧闪爆时所观察到的情况。

B.1.5 由于电弧闪爆的不确定性,在各传感器上可观察到不同的热传递值。按 B.6 要求评估各传感器的结果。

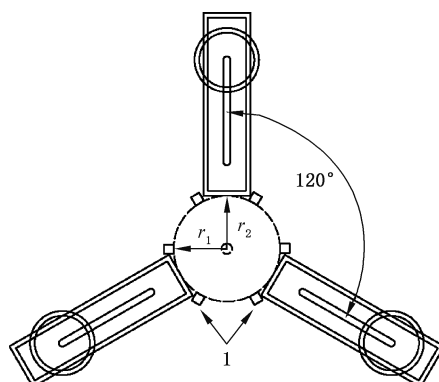
B.1.6 本测试方法中,除因电弧闪爆导致样品移动外,样品应保持垂直、稳定。本检测方法规定了一组标准电弧闪爆参数。不同的电弧闪爆条件下会产生不同的结果。除了标准闪爆情况以外,其他设定的电弧闪爆参数也应记录在检测报告中。

B.2 设备

B.2.1 概述

B.2.1.1 测试设备由电源总线、电弧控制器、记录仪、电弧电极、三组双传感器平板和监控传感器组成。

B.2.1.2 双传感器平板的布局。由三组双传感器等间隔排列,如图 B.1 所示。每组双传感器平板包含两个监控传感器。监控传感器放置于双传感器平板的两侧,如图 B.2 所示。



标引序号说明：

1 —— 监控传感器；

r_1 —— 双传感器平板距电弧电极中心线的半径距离；

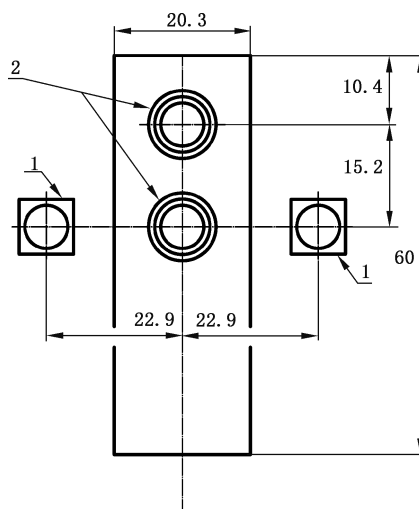
r_2 —— 监控传感器距电弧电极中心线的半径距离。

r_1 、 r_2 在 20 cm~60 cm 之间。

典型情况下两个平板传感器夹角为 120° 。

图 B.1 监控传感器和三组平板传感器布局(俯视图)

单位为厘米



标引序号说明：

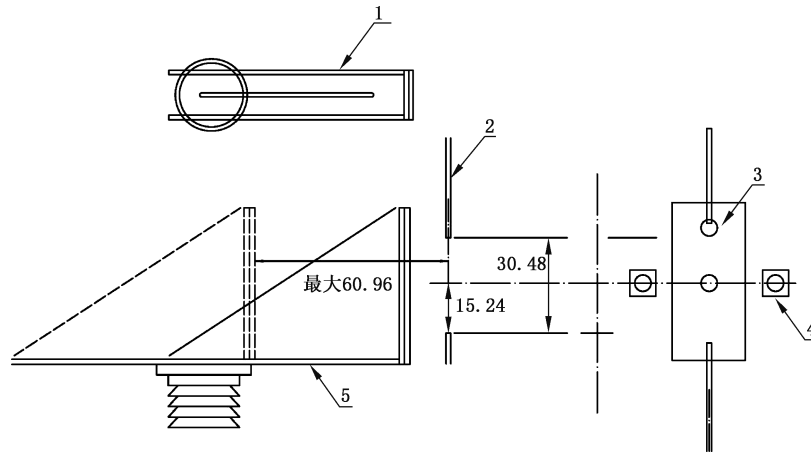
1 —— 监控传感器；

2 —— 传感器。

图 B.2 监控传感器和双传感器平板结构(平面图)

B.2.1.3 双传感器平板的结构。双传感器平板和监控传感器应固定在热绝缘材料上,该材料的导热系数小于 $0.15 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,具备耐热稳定性和抗热冲击性。平板厚度值应不小于 1.3 cm。

B.2.1.4 每组双传感器平板的尺寸为 $(20.3 \pm 1.3) \text{ cm} \times (54.6 \pm 1.3) \text{ cm}$,如图 B.2 所示。每组双传感器平板和监控传感器应调整至离电弧电极中心线 20.0 cm~60.0 cm 的位置,如图 B.2、图 B.3 所示。



标引序号说明：

- 1 —— 具备调节和锁定功能的滑动装置；
- 2 —— 电极；
- 3 —— 传感器；
- 4 —— 监控传感器；
- 5 —— 安装在热绝缘线上可移动的双传感器平板。

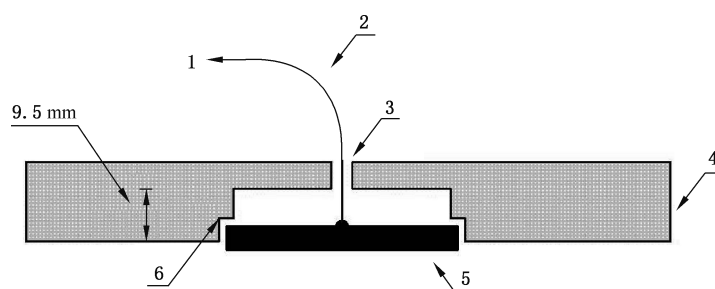
图 B.3 可滑动双传感器平板

B.2.1.5 如图 B.2 所示，在每个平板上安装两个传感器，各传感器应与平板的表面平齐等高。

B.2.1.6 根据测试要求可安装额外的热量计作为监控器和平板传感器，但这些额外增加的热量计所记录的信息不能用于评定 ATPV 值、 E_{BT} 值和燃烧状态，仅用作参考。

B.2.2 传感器

B.2.2.1 平板传感器和监控传感器由铜塞热量计组成。铜塞热量计应使用电气用铜，并配备一个热电偶线，如图 B.4 和图 B.5 所示安装。

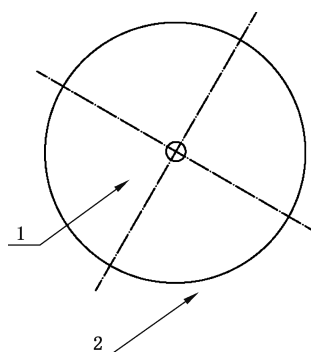


标引序号说明：

- 1 —— 信号的数据采集；
- 2 —— 热电偶，可选 K 类（镍铬-镍铝）或 J 类（铁-铜镍）；
- 3 —— 直径为 3.2 mm 的孔；
- 4 —— 最小厚度为 1.3 mm 的绝缘板；
- 5 —— 电气用铜片，质量为 18 g，直径为 4 cm，厚度为 1.6 mm；
- 6 —— 平台，尺寸为 1.6 mm×1.6 mm。

电气用铜片需要固定到位。

图 B.4 铜塞热量计和热电偶的局部放大图



标引序号说明：

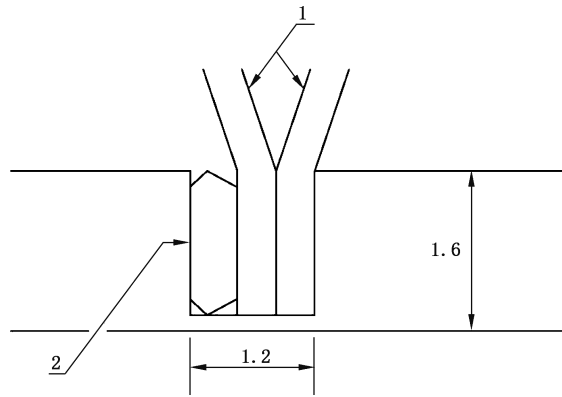
- 1 —— 中心热电偶位置，孔径为 1.2 mm，孔深为 1.3 mm；
- 2 —— 电气用铜片，质量为 18 g，直径为 4 cm，厚度为 1.6 mm。

图 B.5 铜塞热量计

B.2.2.2 在铜塞热量计的外表面应喷涂一层热辐射系数大于 0.9 的黑色耐高温油漆涂层。使用前，应对涂层进行干燥，使涂层均匀一致（目测应无表面厚薄不均及厚点），可使用外部热源进行加热以去除残留在涂层表面的有机物，如加热灯。

B.2.2.3 在铜塞热量计上安装热电偶线，如图 B.6 所示。

B.2.2.4 额外增加的热量计只有在校准过且与 B.2.2.1 要求一致的情况下才可以使用。额外的热量计可与标准的铜塞热量计不同，但这些不同之处应记录在测试报告中。



标引序号说明：

1 —— 独立的热电偶线，线径为 0.254 mm；

2 —— 梯形铜塞。

热电偶线的固定，需要将热电偶线电线置于孔中，并以梯形铜塞加以固定。

图 B.6 热电偶线安装的局部放大图

B.2.3 电源和电极结构

B.2.3.1 标准的电源和电弧电极结构如图 B.7 所示，电弧电极应为垂直方向。

B.2.3.2 电弧电极由直径 19 mm 的不锈钢棒(303 合金或 304 合金)制成，长度为 45 cm。

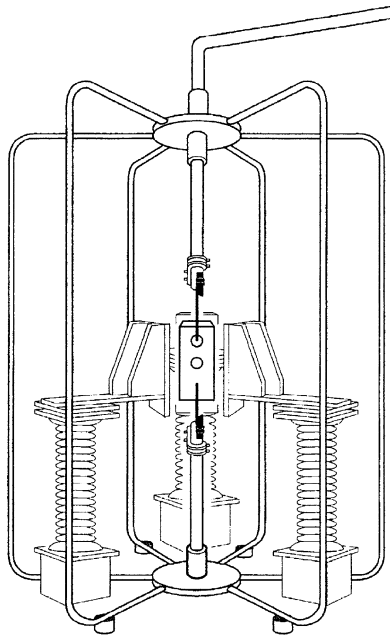


图 B.7 测试平板的电源和电弧电极结构示意图

B.2.3.3 通过熔断丝连接电极的正负两极产生电弧。熔断丝在测试过程中会被熔化，因此应采用小质量的熔断丝，以降低熔融金属造成烧伤的概率。熔断丝应为铜导线，其直径应不大于 0.5 mm。

B.2.4 电源供应

电源应能满足在 30.5 cm 的间隙产生电弧放电,频率为 50 Hz 的交流电,电弧电流在 4 000 A~25 000 A 之间,电弧持续时间应为 0.05 s~1.5 s。测试回路的 X/R (电抗/电阻) 比值就是测试电流值,测试电流应包含一个直流分量,该直流分量由测试电流的第一峰值产生,最大为 2.3 倍的对称均方根值。

B.2.5 测试电路控制系统

测试电路控制系统应使每次测试电流在重复电弧闪爆时与目标值的偏离不超过 2%。在重复测试时,电路的闭合开关应能在 0.2 个周期内回到电流波形闭合点,这样的闭合角能产生最大的不对称电流,其 X/R 比值如 B.2.4 中所述。测试中需要测定电弧的电流、周期和电压,并用图表形式记录和保存电弧电流、周期、电压和热能值。

B.2.6 数据采集系统

B.2.6.1 数据采集系统应能记录测试所需要的电压、电流和热量计的数值。

B.2.6.2 每个热量计的温度数据(热量输出值)采集频率应不小于 20 个/s,采集系统能记录的最高温度应不低于 400 °C,最小分辨率为 0.1 °C,精度为 ± 0.75 °C。

B.2.6.3 电流和电压数据的采集频率应不低于每秒 2 000 个,最小分辨率为测试所施加电压和电流值的 1%。

B.2.7 数据采集系统保护

鉴于本测试方法存在一定破坏性,应在热量计的输出端使用安全保护隔离措施。

B.3 安全防护措施

B.3.1 测试设备会释放大量的能量,并且电弧会产生强光。应注意保护工作区域的人员安全,工作人员应处于保护屏障的后方或有一个安全距离,以防止触电和接触到熔融金属。如需对试验进行直接观察的工作人员需要佩戴相应的防护眼镜。如果测试在室内进行,应有通风系统带走燃烧产物、烟和废气。气流会干扰电弧,会降低热量计表面的热通量,可以用非可燃性材料对试验区域的设备进行遮蔽。户外测试时,应该防止测试样品暴露在潮湿和有风的环境中。测试设备的启动装置应放置在不受电弧闪爆影响的地方,测试设备应对地绝缘以确保达到需要的测试电压。

B.3.2 测试设备、电极和热量计会在测试过程中发热,当需要接触和处置这些物体时,应佩戴手套和袖套。

B.3.3 如果样品在燃烧或者释放可燃气体时要特别小心,应准备一个灭火器,确保所有材料起火时可以及时扑灭。

B.3.4 每次测试完成后应及时关闭电源,以防止测试设备和所有其他试验设备产生意外的电弧。测试设备和其他实验室设备应绝缘接地。在数据采集完成后、人员进入之前,应对测试区域进行通风。在烟气和废气排完之前,任何人不可以进入测试区域。

B.4 试样的制备

B.4.1 双传感器面板测试样品

在双传感器平板上装夹的测试样品,洗涤后的尺寸长度应不小于 61 cm、宽度应不小于 30.5 cm。测试样品的长度方向应沿面料的经向或纬向进行裁剪。

B.4.2 测试样品的洗涤

B.4.2.1 规定数量的测试面料洗涤后作为测试样品,应使用 AATCC Test Method 135—2018 方法中的程序 3, IV, A, iii, 允许在洗涤过程中出现织物收缩。

- a) 按此程序连续洗涤 3 次后,根据前述程序进行烘干,勿过度烘干。
- b) 测试样品可平铺在制样台上,并适当按压使其恢复平整。
- c) 如使用其他洗涤程序,应在测试报告上记录。

B.4.2.2 对于那些除了洗涤还需要清洁的面料,可按制造商推荐的操作方法进行 3 次清洁,完成后烘干,并在报告上记录。

B.4.3 测试样品的预处理

按照 ASTM D 1776/D1776M-20 对面料进行预处理。

B.4.4 测定样品的单位面积质量

测试样品在洗涤、烘干后并剪裁成测试规定尺寸,随机选出 3 个样品,用如下方法确定单位面积质量。

- a) 从测试样品上沿对角线随机冲切至少 3 个圆形测试样品,直径在 38 mm~76 mm 之间,这些样品应不包含相同的经纬纱。
- b) 在天平上称量这些样品,天平的精度为 0.001 g。
- c) 用公式(B.1)计算每个测试样品的单位面积质量。

$$AD = \frac{m}{\pi \times (d/2)^2} \dots\dots\dots (B.1)$$

式中:

- AD —— 圆形测试样品的单位面积质量,单位为克每平方米(g/m²);
- m —— 圆形测试样品的质量,单位为克(g);
- π —— 3.141 59;
- d —— 圆切样品直径,单位为米(m)。
- d) 测试结果取 3 个样品单位面积质量的平均值。

B.5 试验程序

B.5.1 测试参数

电弧电流应为(8±1)kA,电极间距为 30.5 cm,电弧电极的中心线至样品表面距离为 30.5 cm。如使用其他的测试参数,可根据需要在报告中记录。

B.5.2 测试步骤

B.5.2.1 在同一面料上裁取 21 个样品,每次测试用 3 个样品,分别固定于 3 组双传感器平板上。

B.5.2.2 用一定范围内的人射能量进行至少 7 次测试来评估面料的电弧防护级别。测定 ATPV 值需要至少 20 个人射能量的平均值,人射能量由满足 b)~d)要求的监控和平板传感器测得。

- a) 通过增加或减少电弧持续时间来获得人射能量的范围。
- b) 双传感器平板在电弧闪爆时测得的人射能量(该值为两个监控传感器的平均值)应至少有 15%超过斯托尔曲线预测的二度烧伤标准(由 B.6.1.4 确定)。
- c) 双传感器平板在电弧闪爆时测得的人射能量(该值为两个监控传感器的平均值)应至少有

15%低于斯托尔曲线预测的二度烧伤标准(由 B.6.1.4 确定)。

- d) 双传感器平板在电弧闪爆时测定的入射能量(该值为两个监控传感器的平均值)应至少有 50%落在最终 ATPV 值的 $\pm 20\%$ 公差范围内(由 B.6.1.4 确定,见 B.5.2.6)。此范围内的值通常会同时存在超过和不超过斯托尔曲线标准的情况。

B.5.2.3 所有数据点应都是有效的,但当用于平板和监控传感器的铜塞热量计温度显示超过 400 °C 时,表示存在测试/数据采集设备故障或样品装夹错误,此时数据无效。

B.5.2.4 当测试次数满足最小次数要求时,所有有效的数据点都应采用,不应随意舍弃。

B.5.2.5 样品破裂或多层样品内层点燃的数据处理,按下述方法进行。

- 当样品破裂或多层样品内层点燃时,所采集到的数据点是有效的,可用于判定 ATPV 值。
- 如果面料发生两处及以上破裂是在入射能量小于 1.2 倍的 ATPV 值时观察到的,应确定为破裂,对此情况,应进行 7 次以上的测试方可做出破裂的结论,对有高于或低于斯托尔曲线标准的破裂处理,见 B.6.2。

B.5.2.6 为使 50%的数据点落在测试样品最终 ATPV 值的 20%公差范围内,应采用迭代法。在前两次电弧闪爆后,如果 6 个测试结果既有高于又有低于斯托尔曲线标准时,可确定 ATPV 值的一个预估值,用此预估值作为后续测试的测试参数,使 50%传感器平板的测得结果落在测试样品最终 ATPV 值的 20%公差范围内。标准情况下,21 个数据点中应至少有 11 个的入射能量值在最终 ATPV 值的 20%公差范围内,才可认为所有数据有效。所以,如果在此范围内的数据点少于 11 个,应增加测试次数至达到 50%数据点在此范围内为止。

B.5.2.7 以平板传感器上测得的平均热量值与斯托尔曲线上对应点的最大差值作为自变量,并以每组平板测得的平均入射能量为因变量,通过最小二乘法拟合的曲线可用来指导选择适当的入射闪爆能量。 y 截距值即为最终 ATPV 值的预估值。

B.5.2.8 多层阻燃面料的 ATPV 值确定,按下述方法进行。

- 如果多层阻燃面料除最内层(即最靠近传感器平板)外的任意阻燃层出现熔融情况时的入射能量小于此多层面料测得的 ATPV 值,则此入射能量确定为熔融能量(E_{ab}),当最内层也出现熔融或破裂时,则确定为破裂阈能(E_{BT}),破裂阈能测定方法见 B.6.2,破裂判定标准见 3.7。
- 应通过 B.6.2 的破裂测定方法确定阻燃层出现熔融情况时的熔融能量(E_{ab})。通过上述测试方法确定的熔融能量(E_{ab})即为 E_{BT} ,并同时按 B.6.1.4 进行预示烧伤情况的评定。

通过破裂测定方法确定的阻燃层熔融能量(E_{ab})应不等于多层面料的 E_{BT} 。

如果在测定熔融能量(E_{ab})时,没有平板测试结果预示是烧伤(即没有超过斯托尔曲线标准的数据),则应记录测定 E_{ab} 之前的 ATPV 值。

如果在测定熔融能量(E_{ab})时,任意平板测试结果在预示是烧伤时小于 E_{ab} 值(即有超过斯托尔曲线标准的数据),则应按 B.6.1.4 重新确定一个 ATPV 值,除非任意平板上样品出现熔融应作为超过斯托尔曲线标准处理。

B.5.3 热传递的测定

B.5.3.1 将传感器的温度调至 25 °C ~ 35 °C。

B.5.3.2 将样品在自然垂落的状态下装夹到测试平板上,不能有预加张力,装夹方式应允许面料在电弧闪爆时出现收缩。面料夹紧装置如图 B.8 所示,由 4 个夹子组成,夹子应能将样品装夹在平板上并允许样品在电弧闪爆时出现收缩。夹紧装置上的每个夹子应通过施加 4.4 N ~ 6.7 N 的力将面料固定在面板上。只要能满足上述要求,也可采用其他的装夹方式。如果测试样品是多层面料,样品的装夹方式应与其结构设计的分层保持一致。

B.5.4 样品信息

记录样品的信息,包括样品唯一性编号、样品的分层顺序(从最外层开始依次列出)、材料类型、试验



前(洗涤、熨烫预处理之后)的实际单位面积质量、机织/针织类型、颜色以及测试样品的数量。

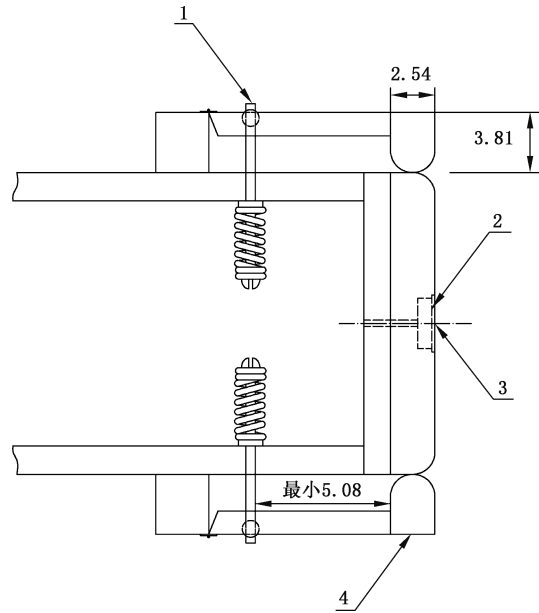
B.5.5 熔断丝安装

将熔断丝安装在电极上。

B.5.6 人员安全要求

应采取安全措施,确保所有人员在安全区域内。

单位为厘米



标引序号说明:

- 1 —— 标准弹簧夹组件;
- 2 —— 热量计;
- 3 —— 测试平板;
- 4 —— 夹具。

在测试平板的每一边上安一个夹具,每块测试平板至少需要 4 个夹具,每个夹具上的夹紧力为 4.4 N~6.7 N。

图 B.8 面料样品装夹组件

B.5.7 电弧闪爆测试

对测试样品进行电弧闪爆测试。

B.5.8 闪爆后要求

闪爆后及时切断设备电源,并在数据采集完成后将试验区域进行通风换气、对设备采取接地措施。

B.5.9 明火和阴燃处理

扑灭所有明火和阴燃,对预定让样品燃烧至尽的情况除外。

B.5.10 参数和样品状态的记录

B.5.10.1 记录热量、电流、电压、时间等参数和面料的测后状态。

B.5.10.2 在电弧闪爆即将发生前、发生过程中和发生后 30 s 时,记录每个热量计上传感器的读数。

B.5.10.3 当确定了电弧闪爆的触发时间点时,将每个热量计在此时间点前和此时间点测得的温度数据平均后得到每个传感器的热量计初始温度, $T_{\text{初始}}(\text{℃})$ 。

B.5.10.4 按公式(B.2)计算每个铜塞热量计在初始温度时的热容:

$$C_p = \frac{A + B \times t + C \times t^2 + D \times t^3 + E/t^2}{63.546} \dots\dots\dots (\text{B.2})$$

式中:

C_p —— 初始温度时的热容,单位为卡每克摄氏度[cal/(g·℃)];

A —— 系数,4.237 312;

B —— 系数,6.715 751;

t —— (实测温度 + 273.15)/1 000,单位为开尔文(K);

C —— 系数,-7.469 62;

D —— 系数,3.339 491;

E —— 系数,0.016 398。

B.5.10.5 确定所有(监控和平板传感器上)铜塞热量计在每个时间点的铜塞热容。具体做法是:按 B.5.10.3 测得的初始温度算得初始热容和在各时间点测得温度算得最终热容,通过公式(B.3)计算每个传感器的平均热容。

$$\overline{C_p} = \frac{C_{pT\text{初始}} + C_{pT\text{最终}}}{2} \dots\dots\dots (\text{B.3})$$

式中:

$\overline{C_p}$ —— 平均热容,单位为卡每克摄氏度[cal/(g·℃)];

$C_{pT\text{初始}}$ —— 初始温度时的热容,单位为卡每平方厘米(cal/cm²);

$C_{pT\text{最终}}$ —— 终止温度时的热容,单位为卡每平方厘米(cal/cm²)。

B.5.10.6 将按 B.5.10.3 测得的初始温度、各时间点上的温度和按 B.5.10.5 确定的铜塞热容,通过公式(B.4)计算每个时间点上测得的人射能量,单位为 cal/cm²。

$$Q = \frac{m \times \overline{C_p} \times (T_{\text{最终}} - T_{\text{初始}})}{S} \dots\dots\dots (\text{B.4})$$

式中:

Q —— 入射热量,单位为卡每平方厘米(cal/cm²);

m —— 铜盘/铜塞的质量,单位为克(g);

$\overline{C_p}$ —— 平均热容,单位为卡每克摄氏度[cal/(g·℃)];

$T_{\text{最终}}$ —— 铜盘/铜塞在最终时间点上的最终温度,单位为摄氏度(℃);

$T_{\text{初始}}$ —— 铜盘/铜塞在初始时间点上的起始温度,单位为摄氏度(℃);

S —— 铜盘/铜塞的接触表面积,单位为平方厘米(cm²)。

B.5.10.7 当铜盘/铜塞质量为 18.0 g,暴露面积为 12.57 cm² 时,计算总热量的公式可简化为公式(B.5)。

$$Q = 1.432 \times \overline{C_p} \times (T_{\text{最终}} - T_{\text{初始}}) \dots\dots\dots (\text{B.5})$$

式中:

Q —— 总热量,单位为卡每平方厘米(cal/cm²);

$\overline{C_p}$ —— 平均热容,单位为卡每克摄氏度[cal/(g·℃)];

$T_{\text{最终}}$ —— 铜盘/铜塞在最终时间点上的最终温度,单位为摄氏度(℃);

$T_{\text{初始}}$ —— 铜盘/铜塞在初始时间点上的起始温度,单位为摄氏度(℃)。

B.5.10.8 监控传感器半径(r_2)不为 30.5 cm 时,对于在电弧闪爆时测得的人射能量温度上升值应乘以

一个 $(r_2/30.5)^2$ 的系数。

B.5.10.9 每块平板对应一个时间点的总入射能量是由单位时间内 2 个监控热能传感器测定的结果平均而得。

B.5.10.10 对应一个时间点的透过样品传递到平板上的总热量是由单位时间内 2 个平板热能传感器测定的结果平均而得。

B.5.11 特殊测试要求

如有特殊测试需要,可检查并调节传感器,并调节电极至适当的位置和间距。

B.6 结果说明

B.6.1 热传递

B.6.1.1 时间初始点(即电弧触发时间点)的确定

因为进行此类测试时通常会伴有电干扰,在电弧触发时很难获得可靠的触发信号。然而,通过分析可确定每次测试的电弧触发时间点。对每个传感器的曲线,绘出从曲线起点至曲线升温区上某一点的连线与曲线本身的差异,找出差异中的最大值。出现最大值的这个点是推算该传感器电弧触发时间点的最佳点。虽然在一次测试过程中这些触发时间点通常是非常一致的,但还是宜用这些点或所有传感器的中位数作为所有传感器的初始点。

注:只要符合要求,也可采用其他方法确定时间初始点。

B.6.1.2 平板传感器测定值曲线的绘制

绘制每个平板热量计对应于各时间点的平均热量计测定值,按 B.5.10 测定。

B.6.1.3 监控传感器的入射能量(E_i)

计算每组平板监控传感器的平均值,来确定每组平板的平均入射能量。从整个数据采集过程中,记录每组平板传感器平均入射能量的最大值,该值即为传递到每组平板的入射能量(E_i)。

B.6.1.4 预示二度皮肤烧伤的评定(斯托尔曲线比较法)

将通过 B.5.10.6 确定的每组平板各时间点的平均热量值与斯托尔曲线经验模型相比较,如果平板传感器测得的热量值超过自电弧触发时间点起至热量确定时间内的斯托尔反应值,则评定为预示二度皮肤烧伤。按公式(B.6)计算斯托尔反应值。如果一组平板在任意时间点中超过斯托尔反应值,记录为 1,如果没有超过,记录为 0。

$$S_r = 1.199 1 \times t_i^{0.290 1} \dots\dots\dots (B.6)$$

式中:

S_r —— 斯托尔反应值,单位为卡每平方厘米(cal/cm^2);

t_i —— 从电弧触发时间点起至热量确定的运行时间,单位为秒(s)。

B.6.1.5 电弧热防护性能值(ATPV)的确定

B.6.1.5.1 按 B.5.2 所述的步骤,应通过至少 20 个平板测定的数据计算电弧热防护性能值。如果在特定的测试条件下收集了超过 20 个数据点,则所有有效结果都应用于计算电弧热防护性能值。

B.6.1.5.2 对测试数据结果进行逻辑回归分析。以监控传感器上得到的最大平均入射能量作为每组平板的连续变量 X。相应的 Y 值是 X 值与斯托尔反应值的比较结果,若超过为 1,未超过为 0(按 B.6.1.4

规定)。

B.6.1.5.3 通过逻辑回归方法确定的斜率和截距来按公式(B.7)倒推计算出有 50%可能性超过斯托尔反应值的数值,该值即为电弧热防护性能值的结果,或与斯托尔曲线相交的入射能量值。

$$\text{ATPV} = \left| \frac{I}{S} \right| \dots\dots\dots (\text{B.7})$$

式中:

ATPV —— 电弧热防护性能值,单位为卡每平方厘米(cal/cm^2);

I —— 通过逻辑回归方法确定的截距,单位为卡每平方厘米(cal/cm^2);

S —— 通过逻辑回归方法确定的斜率。

B.6.1.6 热衰减系数(HAF)的确定

B.6.1.6.1 通过 B.6.1.2 确定每组平板的最大平均热量,并通过 B.6.1.3 确定监控传感器的最大平均入射能量,用最大平均热量除以最大平均入射能量的数值为每组平板测试样品的入射能量透过率($E_{\text{transmitted}}$)。

B.6.1.6.2 每组平板热衰减系数的数据点(haf)按公式(B.8)计算。

$$\text{haf} = 100 \times (1 - E_{\text{transmitted}}) \dots\dots\dots (\text{B.8})$$

式中:

haf —— 每组平板热衰减系数的数据点;

$E_{\text{transmitted}}$ —— 测试样品的入射能量透过率。

B.6.1.6.3 通过计算所有热衰减系数数据点的平均值来确定热衰减系数,至少要应用代表 20 组平板的 20 个数据点。

B.6.1.6.4 计算数据点的标准偏差(Std)和平均值的标准误差(由使用的平板数量的平方根与标准偏差的比值算得),并通过公式(B.9)和公式(B.10)计算 95%的置信区间。

$$\text{UCL} = \text{HAF} + \frac{t_{95\%} \times \text{Std}}{\sqrt{N}} \dots\dots\dots (\text{B.9})$$

$$\text{LCL} = \text{HAF} - \frac{t_{95\%} \times \text{Std}}{\sqrt{N}} \dots\dots\dots (\text{B.10})$$

式中:

UCL —— 置信上限;

HAF —— 热衰减系数;

$t_{95\%}$ —— 置信水平为 95%、自由度为($N-1$)的 t 分布;

Std —— 数据点的标准偏差;

N —— 使用的平板数量($N=20$; $t_{95\%}=2.093$)。

LCL —— 置信下限。

B.6.2 破裂阈能(E_{BT})的确定

B.6.2.1 用确定电弧热防护性能值相同的方法确定破裂阈能,通过测试平板破裂信号和按 B.6.1.3 确定的入射能量(E_i)确定。呈现破裂状态的样品分布应:至少 15%的样品由于较低的入射能量而没有破裂,至少 15%的样品由于较高的入射能量而已经破裂,有 50%~70%的样品的入射能量在所测定 E_{BT} 值的 20%公差范围内。如果在这些范围内没有足够的的数据,则应在一定的入射能范围内进行补充测试,并记录面料测后状态。应至少有 20 个数据点的入射能量符合上述分布。

B.6.2.2 以下方法可用于确定面料的破裂阈能,采用此方法时,无须考虑所产生的入射能量及其与斯托尔曲线或电弧热防护性能值的关系。本方法可有效地应用于多层面料破裂阈能的确定。

B.6.2.3 一组平板样品在测试过程中出现了破裂,记录为 1,没有出现破裂的记录为 0。

B.6.2.4 对测试数据结果进行逻辑回归分析。以监控传感器上得到的最大平均入射能量作为每组平板的连续变量 X 。相应的 Y 值为平板面料的破裂状态,破裂为 1,未破裂为 0。

B.6.2.5 通过逻辑回归方法确定的斜率和截距按公式(B.11)倒推计算出有 50%可能性面料破裂的数值,该值即为破裂阈能(E_{BT}),或预示破裂的入射能量值。

$$E_{BT} = \left| \frac{I}{S} \right| \dots\dots\dots (B.11)$$

式中:

E_{BT} ——破裂阈能,单位为卡每平方米(cal/cm^2);

I ——通过逻辑回归方法确定的截距,单位为卡每平方米(cal/cm^2);

S ——通过逻辑回归方法确定的斜率。

B.6.3 电弧等级

B.6.3.1 如果在测定电弧热防护性能值(ATPV)范围内没有出现破裂,则将面料样品的电弧热防护性能值(ATPV)记录为电弧等级。否则,按 B.6.2 规定补充足够的平板试验以测定破裂阈能(E_{BT})。

B.6.3.2 如果测定的 E_{BT} 值等于或小于测定的 ATPV 值,则将 E_{BT} 值记录为测试样品的电弧等级。

B.6.3.3 如果测定的 E_{BT} 值大于测定的 ATPV 值,则将 ATPV 值记录为测试样品的电弧等级。

B.6.4 多层面料内层点燃的确定

B.6.4.1 可按破裂的确定方法测定内层 50%可能性点燃的能量值,这是通过测试平板内层点燃信号和按 B.6.1.3 确定的入射能量(E_i)确定。内层点燃的样品分布应:至少 15%样品的入射能量在不会点燃内层的范围内,至少 15%样品的入射能量在肯定点燃内层的范围内,有 50%~70%样品的入射能量在测定的内层点燃能量值的 20%公差范围内。如果在这些范围内没有足够的的数据,应在一定的入射能范围内进行补充测试,并记录面料测后状态。应至少有 20 个数据点的入射能量符合上述分布。

B.6.4.2 以下方法可用于确定多层面料的内层点燃状态,采用此方法时,无需考虑所产生的入射能量、该入射能量和斯托尔曲线或电弧热防护性能值的关系以及破裂状态。本方法可适用于单层或多层内层面料点燃的确定。

B.6.4.3 一组平板出现内层点燃,记录为 1,未出现点燃记录为 0。

B.6.4.4 对测试数据结果进行逻辑回归分析。以每组平板传感器测得的平均入射能量的最大值作为连续变量 X 。相应的 Y 值为平板面料内层点燃状态,点燃记录为 1,未点燃记录为 0。

B.6.4.5 通过逻辑回归方法确定的斜率和截距按公式(B.11)倒推计算出内层有 50%可能性点燃的数值,该值即 Ignition50 值或预示内层点燃的入射能量。

B.6.4.6 测试的电气参数。电弧电压、电弧电流、电弧持续时间以及结果的一致性可能因为测试实验室的不同而不同。按 B.2.6 要求,当给定完全相同的测试参数时,每次测试不应有超过 2%的差异,超过 2%差异的测试应重新检测。

B.6.4.7 测后样品状态。在电弧闪爆之后,将样品进行冷却,观察面料上的闪爆后影响,将面料样品从测试平板上小心取下,并注意观察因电弧闪爆产生的附加效果。可用以下一个或多个术语进行描述:破裂、熔融、滴落、炭化、脆化、收缩、点燃。

参 考 文 献

- [1] GB 26589 电力安全工作规程 电力线路部分
- [2] GB 26860 电力安全工作规程 发电厂和变电站电气部分
- [3] GB/T 38302—2019 防护服装 热防护性能测试方法
- [4] ASTM F1959/F1959M-14el Standard Test Method for Determining the Arc Rating of Materials for Clothing
- [5] IEC 61482-1-1:2019 Live working—Protective clothing against the thermal hazards of an electric arc—Part 1-1: Test methods—Method 1: Determination of the arc rating(ELIM, ATPV and/or EBT)of clothing materials and of protective clothing using an open arc
- [6] IEC 61482-1-2:2014 Live working—Protective clothing against the thermal hazards of an electric arc—Part 1-2: Test methods—Method 2: Determination of arc protection class of material and clothing by using a constrained and directed arc (box test)
- [7] IEC 61482-2:2018 Live working—Protective clothing against the thermal hazards of an electric arc—Part 2: Requirements
- [8] IEEE 1584—2018 IEEE Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations
- [9] NFPA 70E—2018 Standard for Electrical Safety in the Workplace
- [10] 《中低压配电网不停电作业适应性技术研究》验收报告(国家电网公司科技项目)
-