

家用电线绝缘过热气体衍生物检测与流场影响研究

武 肖¹, 姚 平², 赵文彬¹

(1. 上海电力大学 电气工程学院, 上海 200090; 2. 江苏士林电气设备有限公司, 江苏 镇江 212200)

摘要: 为利用气体衍生物关键参数快速检出电线绝缘材料过热缺陷, 本文通过试验获得电线绝缘材料过热逸出气体衍生物浓度与绝缘材料温度关系曲线; 建立热电耦合仿真模型模拟电线参数、电线敷设方式和环境温度对电线绝缘温度的影响; 建立热流耦合仿真模型模拟过热缺陷位置、穿线管水平长度和气体类别对逸出气体衍生物流体场中传感器响应时间的影响, 并通过正交试验确定影响程度的权重。结果表明: 绝缘材料PVC过热缺陷逸出气体主要为CH₄、C₂H₂、CO; 电线参数的选型对绝缘材料温度影响最大; 检测气体种类对传感器响应时间的影响最大。

关键词: 绝缘材料; 气体衍生物; 过热缺陷; 流体场

中图分类号: TM215.1 DOI:10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2024.02.016

Study on detection and flow field effect of overheating gas derivatives in household wire insulation

WU Xiao¹, YAO Ping², ZHAO Wenbin¹

(1. College of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;

2. Jiangsu Shilin Electrical Equipment Co., Ltd., Zhenjiang 212200, China)

Abstract: In order to quickly detect the overheating defects of wire insulation materials by using the key parameters of gas derivatives, the relationship curves between the concentration of gas derivatives and the temperature wire insulation materials were obtained through experiments. A thermoelectric coupling simulation model was established to simulate the effects of wire parameters, wire laying mode and ambient temperature on wire insulation temperature. A heat-flow coupling simulation model was established to simulate the effects of overheating defect location, threading tube horizontal length, and gas class on the sensor response time of escaped gas derivatives in the fluid field. The weight of influence degree was determined by orthogonal test. The results show that CH₄, C₂H₂, and CO are the main gases escaping from overheating defects of PVC insulation material. The selection of wire parameters has the greatest influence on insulation material temperature. The type of detected gas has the greatest influence on the response time of sensors.

Key words: insulating material; gas derivatives; overheating defect; fluid field

0 引言

随着经济社会的持续发展, 电气化程度越来越高, 大功率电气设备的长时间运行加大了线缆负载, 易使线缆绝缘过热, 会导致电线绝缘材料逸出特征气体。已有研究表明, 过热绝缘材料聚氯乙烯(PVC)释放的气体由PVC热分解导致, 释放的气体会令SnO₂气体传感器阵列响应^[1-3], 这对PVC绝缘过热缺陷预警具有重大意义。近年来, 运用化学气体判别电气设备故障已成为研究热点^[4]。研究表明^[5], 气态衍生物SF₆、CO、NO和NO₂与绝缘缺陷类型密切相关, 如通过SF₆气体可识别电气设备故障类型^[6-8], 通过CO、NO和NO₂可识别开关柜绝缘缺陷^[9]。与传统检测方法相比, 气体检测法具有更高的可靠性, 不受环境和用电设备的干扰。由于PVC

绝缘逸出气体具有随时间累积的特性, 气体检测法更适宜监测长期存在但间歇性发生的局部过热缺陷。近年来, 国家电网设立多项通过逸出气体衍生物特征分析来进行带电装置状态监测的研究项目。通过分析逸出气体的组分、浓度等关键参数, 研究特征气体与正常运行状态的区别, 可为缺陷快速检出提供新思路, 拓展现有在线检测方法, 有效提升运行可靠性。

在居民用电方面, 电线大多为穿管密闭敷设, 给线路检测带来不便。PVC绝缘长时间过热不仅会导致线路老化、绝缘性能削弱^[10], 更有可能烧坏导线绝缘层, 而表皮破损将导致线路放电甚至局部短路。部分不符合标准的绝缘电线也是PVC绝缘产生过热缺陷的隐患之一^[11]。目前烟雾传感器、火焰

传感器监测产品可检测到大量的烟雾及明火产生^[12],但无法对PVC绝缘过热缺陷起预警作用,不能发现潜在隐患。通过对PVC绝缘过热逸出气体的检测能够科学、准确且快速检出过热缺陷隐患。因此,通过PVC绝缘过热气体衍生物检出PVC绝缘过热缺陷,辨别家用电线异常运行状态的研究极为迫切。

国内外学者对PVC绝缘温度过热气体衍生物的检测进行了研究,文献[13-14]采用热重法对PVC绝缘进行研究,发现随着热解温度的升高,PVC热解挥发组分产率有明显的增加。文献[15]主要利用气相色谱质谱技术研究PVC绝缘低温受热(未达到燃烧状态)条件下的热解产物。文献[16]通过软件的定性分析,得到PVC绝缘每个加热温度区间内各种析出组分的详细信息。文献[17]发现PVC逸出的有机物除来自PVC的分解,也与工艺上引入的杂质(聚合体系的组分、存在于单体中的杂质等)有关。文献[18-20]采用的是纯热重分析与热重结合红外光谱分析,热重分析仅能获取材料的质量变化,红外光谱通常只能对挥发性产物中的官能团进行定性。目前尚缺少对PVC绝缘热解过程挥发性气体产物具体物质种类定性定量的研究。

近年来,数值分析的发展为计算电缆温度分布提供了便利^[21-22],其中利用有限元法计算温度场已较为成熟^[23]。由于家装电线敷设在穿线管中,埋于墙内,难以实际测量相关参数,考虑到绝缘过热逸出气体衍生物在密闭穿线管内受流体场的影响,本研究分别建立电线穿线管敷设下热-电耦合、热-流耦合的二维有限元仿真模型,对电线温度场与穿线管内流体场进行仿真分析。提出利用PVC绝缘过热气体衍生物的检测技术开展居民室内电线过热缺陷早期检测的方法,希望能为智能型室内电器的研发提供理论依据和实验支撑。

1 气体衍生物试验与检测模型

1.1 样品与设备

执行标准为GB/T 5023.3—2008的聚氯乙烯单芯单股硬线,公牛集团股份有限公司;PVC穿线管, DN16型(外径为16 mm)、DN20型(外径为20 mm),联塑集团;101S系列实验室烘箱,尚诚仪器有限公司;LX-3200E型气相色谱仪,朗析仪器(上海)有限公司。

1.2 试验方法与仿真模型

1.2.1 试验方法

将10组长长度为5 m的PVC绝缘电线放置于实验室烘箱中进行烘焙,设定温度范围为30~120℃,

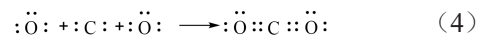
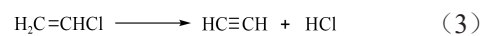
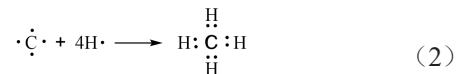
步长为10℃,待烘箱温度稳定至设定温度10 s后,抽取1 mL箱内气体,利用气相色谱仪进行气体检测。每组做3次平行试验,取气体浓度平均值。

PVC绝缘存在热失重现象,相对质量随温度的升高而下降,PVC热解过程涉及诸多反应,产物种类繁多^[24-25]。为此本文着重研究PVC热解的宏观动力学,把所有反应一起考虑。PVC总的热解反应转化率如式(1)所示。

$$\alpha = \frac{w_0 - w}{w_0 - w_\infty} \quad (1)$$

式(1)中: α 是PVC在热解过程中在 τ 时刻的总转化率; w_0 为PVC试样的初始质量; w 为PVC热解过程中在 τ 时刻的质量; w_∞ 为PVC热解完全时的剩余质量。

PVC绝缘主要由高分子材料PVC及塑化剂制成^[15,26],PVC化学式为 $-(CH_2-CH)_n-$ 。PVC受热时,会热降解生成HCl^[27]。PVC异常(缺陷)结构与支链结构的热反应,会脱去Cl自由基。Cl自由基非常活跃,能与聚合链进一步反应,生成众多含Cl化合物。脱去Cl自由基后,聚合物链中的C、O离子自由基也会组合成稳定的化学物质,如 CH_4 、 C_2H_2 、 CO ,其化学方程如式(2)~(4)所示。



1.2.2 仿真模型

(1)模型示意图

PVC电线由铜芯导体和PVC绝缘层组成,图1为电线横截面结构,其中, d 为实心导体直径, D 为绝缘层直径, δ 为PVC绝缘层厚度,模型结构的具体尺寸见表1。图2为穿线管与管内电线横截面示意图,穿线管垂直敷设时,管内电线受重力作用近似平均分布在穿线管内;穿线管水平敷设时,管内电线受重力作用近似平摊在穿线管内壁。

图3为“上走向”(线路为向上走向)穿线管及

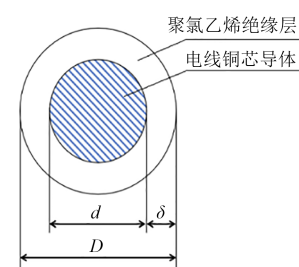


图1 电线结构

Fig.1 Wire structure

表1 模型结构尺寸

Tab.1 Structure and size of model

结构	外径/mm	厚度/mm
BV2.5 铜芯	1.784	—
BV2.5 聚氯乙烯绝缘层	3.384	0.800
BV4.0 铜芯	2.257	—
BV4.0 聚氯乙烯绝缘层	3.857	0.800
DN16 PVC穿线管	16.000	1.200
DN20 PVC穿线管	20.000	1.400

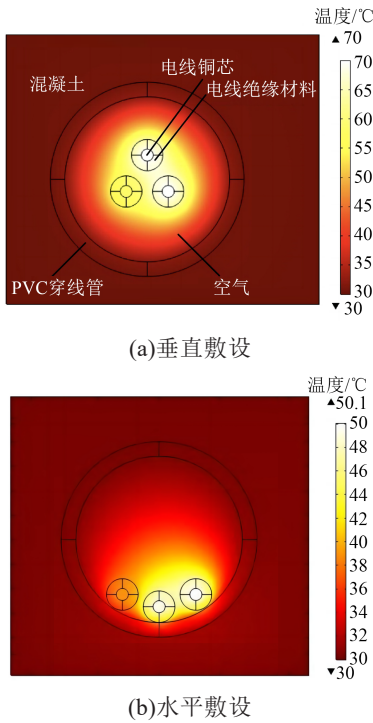
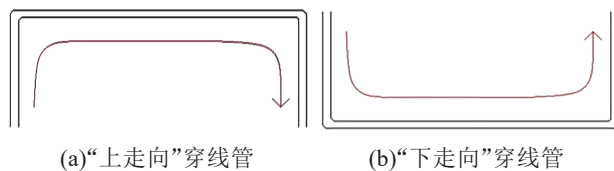


图2 管内电线敷设方式

Fig.2 Wire laying method in the pipe



(a)“上走向”穿线管 (b)“下走向”穿线管

图3 穿线管走向几何示意图

Fig.3 Geometric diagram of conduit routing

“下走向”穿线管(线路为向下走向)几何示意图。图4为逸出气体传感器检测原理示意图(以“上走向”穿线管为例),1、2、3为3个不同位置的过热缺陷点,考虑到安装问题,暂定传感器安装在靠近配电箱处的穿线管内。假设位置2发生过热缺陷,逸出气体将在流体场内随空气运动至传感器处。

(2)热场模型

电线铜芯可视为热场中的热源,在热场中存在有热源区域(包括铜芯、PVC绝缘)和无热源区域(包括电线穿线管、混凝土),电线敷设在穿线管内

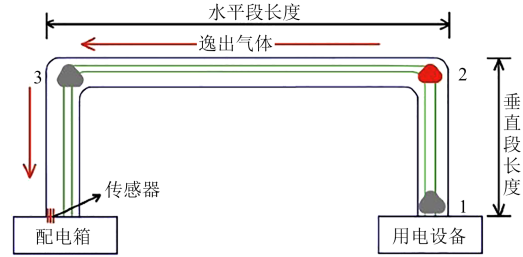


图4 PVC绝缘逸出气体传感方案

Fig.4 PVC insulation escape gas sensing scheme

时还存在与空气的对流换热,穿线管置于混凝土墙壁内。

线芯电阻损耗是热量的主要来源,家庭用电的额定电压为220 V、频率为50 Hz,因此不考虑集肤效应和邻近效应产生的附加损耗,只考虑导体电阻损耗(Q_R)^[28],如式(5)所示。

$$Q_R = I_w^2 R \tag{5}$$

式(5)中: I_w 为导体通过的电流; R 为导体交流电阻。

能量的传递主要有热传导、热对流、热辐射3种形式。电流通过线路铜芯产生的焦耳热对PVC绝缘传热主要涉及热传导^[29],如式(6)所示;电线对管内气体传热主要涉及热对流,如式(7)所示。

$$\Phi = -\lambda A \frac{\partial t}{\partial n} \tag{6}$$

$$Q_c = \alpha_c (\theta_w - \theta_0) F_c \tag{7}$$

式(6)~(7)中: Φ 为热传导换热量; λ 为导热系数; A 为换热面积; n 为等温线上的法向单位矢量; t 为物体温度; Q_c 为热对流传递热量; α_c 为对流散热系数; θ_w 为导体运行温度; θ_0 为周围空气温度; F_c 为单位长度导体散热面积。

对于整个模型的热场计算,还需要指定相应的边界条件,主要有3类边界条件:第1类狄利克雷边界条件即已知边界温度,第2类诺依曼边界条件即已知边界热流密度,第3类为对流边界条件,3类边界条件控制方程如式(8)~(10)所示^[26]。

$$T|_r = T_w \tag{8}$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_r + q_w = 0 \tag{9}$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_r = \alpha (T - T_f) \Big|_r \tag{10}$$

式(8)~(10)中: T 为温度变量,K; T_w 为给定温度,K; λ 为土壤导热系数,W/(m·K); n 为边界单位法线向量; q_w 为热流密度,W/m²; α 为PVC绝缘逸出气体与空气的对流换热系数,W/(m²·K); T_f 为穿线管内空气温度,K。

在本模型中,设置混凝土深层土壤温度为第1

类边界条件,温度为298.15 K;设置穿线管为第2类边界条件,其热流密度为0;设置PVC绝缘为第3类边界条件,管内空气温度为298.15 K。PVC绝缘与空气的对流换热系数为10 W/(m²·K)。

(3)流体场模型

设空气流动的广义雷诺数足够小,针对气体扩散建立了空气的动量传递过程,即纳维-斯托克斯方程^[31-32],如式(11)所示。

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} \right) = \nabla \cdot \left\{ \mu [(\nabla \mathbf{u}) + (\nabla \mathbf{u})^T] - \frac{2}{3} \mu (\nabla \cdot \mathbf{u}) \mathbf{I} \right\} - \nabla p + \rho \mathbf{g} \quad (11)$$

式(11)中: p 是流体压力; μ 是流体动力黏度; g 是重力加速度; $\rho(\partial \mathbf{u} / \partial t + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u})$ 为惯性力,其中 $\rho(\partial \mathbf{u} / \partial t)$ 为非定常项, $\rho \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u}$ 为对流项; $\mu[(\nabla \mathbf{u}) + (\nabla \mathbf{u})^T] - 2/3 \mu(\nabla \cdot \mathbf{u})\mathbf{I}$ 为粘性力,也称扩散项; ∇p 为压力项; ρg 为体积力项。

不同影响因素对电线绝缘缺陷的影响已引起研究者的广泛关注^[26]。电线的电阻损耗为热场中的热源,在COMSOL Multiphysics软件中通过设定电线负载电流和变换电线规格,实现热电耦合计算;设定电线负载电流和管内PVC逸出气体的自然对流运动,实现热流耦合计算。

流体场的边界条件设置中,壁条件为“无滑移”,且需要考虑重力的作用,其余与热场相同。

2 结果分析

2.1 气体衍生物试验结果分析

经过1.2.1所述试验方案,PVC绝缘逸出气体经气相色谱仪检测后,测得的主要气体成分为CH₄、C₂H₂、CO,具体数据及变化趋势如图5所示。

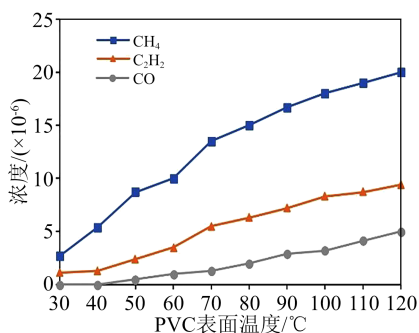


图5 逸出气体与PVC绝缘温度关系

Fig.5 Relation between escaping gas and PVC insulation temperature

从图5可以看出,CH₄、C₂H₂、CO浓度与PVC表面温度均呈正相关,其中CH₄浓度变化最明显,浓度上升速率也最快。PVC低温发热时逸出气体中CO

含量较少,传感器几乎检测不到浓度变化。CH₄与C₂H₂是空气中含量极少的气体,而在PVC逸出气体中大量存在,因此这两种有机气体更适合作为导线过热的观测对象,当导线材料温度接近70°C时,CH₄和C₂H₂浓度分别为13.5×10⁻⁶和5.5×10⁻⁶。

2.2 气体衍生物模型结果分析

GB/T 16895.15—2002对于建筑物电气装备规定,在环境温度为30°C,铜导体温度达到安全极限值70°C时,电线负载电流即为载流量。将热电仿真计算结果与标准对比,结果如表2所示。

表2 仿真计算结果与标准对比

导线标称面积/mm ²	载流量/A		相对误差/%
	标准	仿真模型	
2.5	24	24.4	1.7
4.0	32	32.6	1.9

从表2可以看出,仿真计算得到的载流量比GB/T 16895.15—2002规定的值略高,这是因为采用该标准计算出的载流量值相对保守,计算中直接将铜芯温度设为70°C,而在仿真模型中随着温度的变化不断修正电导率和内部损耗,计算结果相对准确。两者相对误差小于2%,符合工程上的使用标准,因此可通过改变仿真模型电线负载电流来计算不同工况下PVC绝缘温度。

2.2.1 电线PVC绝缘温度影响因素

穿管敷设的电线通常以回路为单位,火线、零线和地线3根电线组成一组回路,忽略地线带电这一特殊情况,即电流只通过火线、零线。考虑到线路长度与截面差过大,本实验通过COMSOL Multiphysics二维稳态温度场有限元仿真及计算,得到铜芯温度为70°C时电线附近的温度分布示意图如图6所示,不同电线负载电流下铜芯温度与PVC绝缘温度如图7所示。从图6~7可以看出,电线铜芯与PVC绝缘温差随电线负载电流的增加而变大,因此

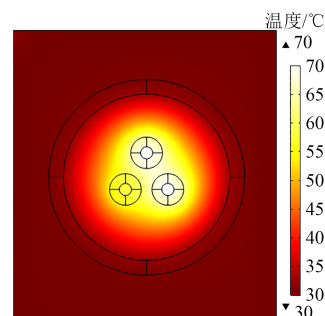


图6 电线温度分布示意图

Fig.6 Temperature distribution of wires

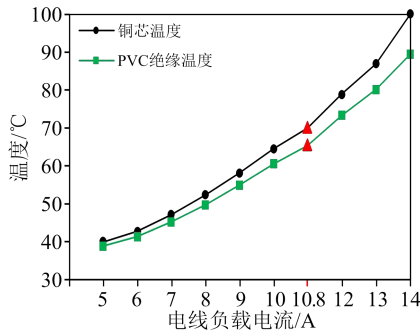


图7 铜芯温度与PVC绝缘温度关系曲线

Fig.7 Relationship between copper core temperature and PVC insulation temperature

可以通过研究电线PVC绝缘温度来判断电线负载余量。当铜导体温度达到安全极限值70℃时,电线负载电流即为载流量,电线铜芯与PVC绝缘存在4.661℃的温度差,即PVC温度达到65℃左右时,标志着电线负载电流已接近载流量,达到长期安全运行极限值。

(1)电线参数选型的影响

家装电气工程常用电线为BV2.5(导体标称截面为2.5 mm²)或BV4.0(导体标称截面为4.0 mm²),PVC穿线管为DN16(外径为16 mm)或DN20(外径为20 mm)。根据GB 50327—2020^[33],共选取8种工况对电线负载电流与PVC绝缘温度关系进行研究,分别为:DN16+3×BV2.5、DN20+3×BV2.5、DN16+3×BV4.0、DN16+6×BV2.5、DN20+3×BV4.0、DN20+6×BV2.5、DN20+3×BV2.5+3×BV4.0、DN20+6×BV4.0,不同工况下PVC绝缘温度关系曲线如图8所示。

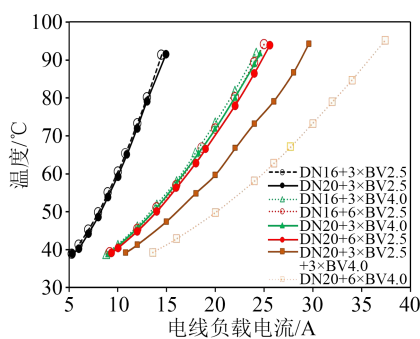


图8 电线工况与PVC绝缘温度关系

Fig.8 Relation between wire working condition and PVC insulation temperature

从图8可以看出,当电线负载电流一定时,导体标称截面、管内电线回路数和PVC穿线管外径均与PVC绝缘温度呈负相关。在负载电流为11 A的情况下,导体截面由2.5 mm²增至4.0 mm²时,以DN16+3×BV2.5、DN16+3×BV4.0工况为例,PVC绝缘温度由65℃降至42℃,降低了35.4%;回路数由1

组增至2组时,以DN16+3×BV2.5、DN16+6×BV2.5工况为例,PVC绝缘温度由65℃降至41℃,降低了36.9%;外径由16 mm增至20 mm时,以DN16+3×BV2.5、DN20+3×BV2.5工况为例,PVC绝缘温度由65℃降至63℃,降低了3.1%;回路数由1组增至2组时,以DN20+3×BV2.5、DN20+6×BV2.5工况为例,PVC绝缘温度由66℃降低至63℃,降低了4.5%。

(2)电线敷设方式的影响

电线在穿线管水平放置与垂直放置两种敷设方式下,PVC绝缘温度如图2所示。为研究两者之间的关系,进行了10组工况模拟,结果如表3所示。

表3 敷设方式与PVC绝缘温度关系

Tab.3 Relationship between laying method and PVC insulation temperature

工况	水平敷设温度/℃	垂直敷设温度/℃	温度增长率/%
1	61.78	65.34	5.76
2	62.12	65.62	5.64
3	63.14	66.75	5.72
4	63.53	67.09	5.61
5	62.26	66.00	5.65
6	65.33	69.28	5.71
7	69.11	73.28	5.69
8	70.93	75.24	5.73
9	73.39	77.82	5.70
10	74.77	79.28	5.69

从表3可以看出,铺设方式一定程度上会影响电线绝缘材料温度,电线负载一定的电流时,穿线管水平布置时电线绝缘材料温度更低,比垂直布置时低5.70%左右,即穿线管水平布置更不易引起电线绝缘材料过热缺陷。

(3)环境温度的影响

环境温度会一定程度上影响PVC绝缘温度,载流量随环境温度的升高而下降,因此电线负载一定的电流时,不同环境温度下PVC绝缘表面温度不同。本研究以30℃环境温度下的PVC绝缘温度为基准,其他温度下的PVC绝缘温度等于30℃下的数据乘以该环境温度的校正系数,如表4所示。

表4 PVC绝缘温度校正系数

Tab.4 Temperature correction coefficient of PVC insulation

环境温度/℃	校正系数
10	0.839 1
15	0.875 1
20	0.910 7
25	0.958 1
35	1.057 4

(4)多影响因素分析

通过正交分析研究电线参数选型、环境温度和电线敷设方式3种因素对PVC绝缘温度的影响程度。选用 $L_4(2^3)$ 正交表,共需要4组数据,进行三因素两水平分析,结果如表5所示。

表5 多影响因素表
Tab.5 Multifactor table

因素			PVC绝缘温度
电线参数选型	环境温度/ $^{\circ}\text{C}$	敷设方式	/ $^{\circ}\text{C}$
DN16+3×BV2.5	20	水平	78.21
DN16+3×BV2.5	30	垂直	91.12
DN20+6×BV4.0	20	垂直	35.81
DN20+6×BV4.0	30	水平	37.41

4组数据正交分析结果如表6所示, K_1 、 K_2 分别表示两水平所对应试验指标的数值之和,电线参数选型的水平1、2分别表示DN16+3×BV2.5、DN20+6×BV4.0;环境温度的水平1、2分别表示20 $^{\circ}\text{C}$ 、30 $^{\circ}\text{C}$;敷设方式的水平1、2分别表示水平敷设、垂直敷设。用 K 除以该水平出现的次数得到极差 R 。 R 值的大小代表某种因素对结果影响程度的大小, R 值越大,表示对结果的影响程度越大。

表6 正交分析结果
Tab.6 Orthogonal analysis result

统计量	因素		
	电线参数选型	环境温度	敷设方式
K_1	169.33	114.02	115.62
K_2	73.22	128.53	126.93
R	48.06	7.26	5.65

由极差值 R 得出影响程度从大到小的排序为:电线参数选型、环境温度、敷设方式。电线参数选型对PVC绝缘温度影响最大,在实际应用中应将其作为首要考虑因素。

2.2.2 PVC绝缘逸出气体影响因素

(1)过热缺陷位置的影响

在一定条件下,生成气体衍生物浓度越大,流经气体传感器的瞬时流速越大,因此气体衍生物在传感器处瞬时流速变化可反映气体体积浓度的变化。根据COMSOL仿真模拟数据变化规律,选择流速0.001 m/s作为流速基准值。假设当特征气体瞬时流速为0.001 m/s时达到检测标定浓度 c 。假设过热缺陷点温度为50 $^{\circ}\text{C}$,得到穿线管水平段长度为3 m的“上走向”穿线管不同位置过热缺陷发生时间与传感器处 CH_4 气体瞬时流速的关系曲线如图9所示(其中位置1、2、3为图4所指位置)。

从图9可以看出,过热缺陷点离传感器越远,过

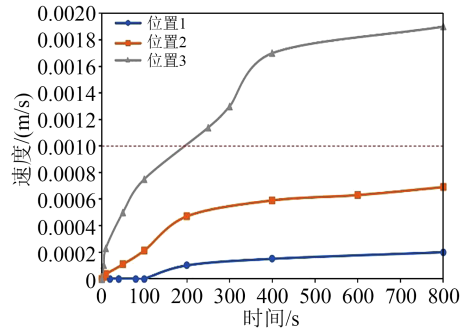


图9 过热缺陷位置与逸出气体流速的关系

Fig.9 Relation between location of overheating defect and velocity of escaping gas

热缺陷点经穿线管弯折90 $^{\circ}$ 角数量越多,PVC绝缘逸出气体浓度变化越平缓,通过富集效应达到 c 所需的时间越长。过热缺陷点位置3处过热缺陷发生197 s后传感器即可及时响应。缺陷点位置2根据图9中“位置2”线性拟合曲线得到公式 $y=9\times 10^{-7}x+9\times 10^{-5}$, x 表示过热缺陷发生时间, y 表示流经气体传感器的瞬时流速,可计算出达到 c 需要的时为1 011 s,即20 min内会及时响应。缺陷点位置1根据图9中“位置1”线性拟合曲线得到公式 $y=3\times 10^{-7}x-39\times 10^{-6}$,可计算出达到 c 需要的时间为3 233 s,即气体传感器大致需要54 min才能响应。两条曲线拟合程度的指标 R^2 分别为0.86、0.89,均大于0.75,拟合可信度高。根据特征气体浓度上升速率及达到平稳所需时间,可判别过热缺陷点在穿线管的大致位置。

(2)过热缺陷发热温度的影响

由2.1气体衍生物试验结果分析可知不同温度下PVC绝缘析出气体类别及浓度,这是通过气相色谱仪对析出气体直接检测得出的数据。本节对析出气体流体场进行仿真分析,计算析出气体到达智能配电箱侧气体传感器的气体瞬时流速,图10为水平长度为3 m的“上走向”穿线管在位置3发生过热缺陷400 s时PVC绝缘温度与析出气体流速的关系曲线图。

从图10可以看出,不同PVC绝缘在同一过热缺陷温度下传感器所能检测到的析出气体有限。一定时间内PVC绝缘过热缺陷发热的温度越高,PVC绝缘析出气体的总量越高,传感器响应越快。3种气体中针对 CH_4 气体传感器最灵敏、能检测的过热缺陷温度范围最广、过热缺陷温度最低,PVC绝缘低温过热缺陷温度为34 $^{\circ}\text{C}$ 时传感器就能快速检出; C_2H_2 气体传感器次之,将在允许长期运行的临界温度(70 $^{\circ}\text{C}$)响应;针对 CO 气体传感器需要PVC绝缘

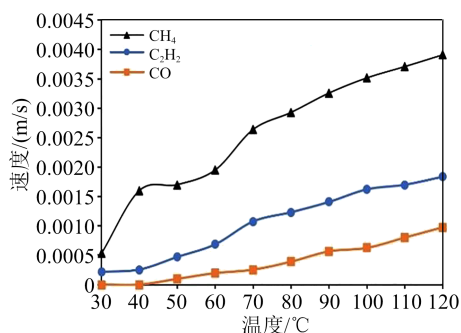


图10 PVC绝缘温度与气体流速的关系

Fig.10 The relationship between PVC insulation temperature and gas velocity

温度达到120℃才能响应,120℃已达到电线老化温度,无法有效检出潜在隐患。因此,CH₄气体是PVC绝缘过热气体衍生物检测的最优选择。

(3)逸出气体种类的影响

为模拟气体在不同走向穿线管中传感器处的瞬时流速与过热缺陷发生时间的关系,假设过热缺陷点温度为50℃,穿线管水平段长度为3 m,得到过热缺陷点3的过热发生时间与传感器处逸出气体瞬时流速的关系曲线如图11所示。

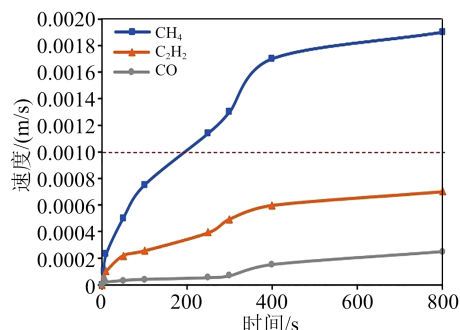


图11 逸出气体种类与气体流速的关系

Fig.11 Relationship between the type of escaping gas and gas velocity

已知CH₄、C₂H₂、CO的气体相对密度分别是0.554、0.908、0.967,由气体动力黏度得到气体流动性由强到弱依次为CH₄、C₂H₂、CO。

由于CH₄的气体相对密度远小于空气,考虑到重力做功,CH₄更适用于“下走向”穿线管。从图11可以看出,CH₄气体传感器最快响应,即CH₄气体产生的量最多,在“上走向”穿线管中含量变化最显著,因此是3种气体中最适宜作PVC绝缘过热缺陷预警的气体。C₂H₂与CO气体相对密度接近,由2.1的实验结果可知C₂H₂生成量大于CO,且C₂H₂的动力黏度较小,因此C₂H₂的气体传感器响应时间也较短。从图11可以看出,CH₄达到 c 需要197 s,根据图11中C₂H₂、CO的线性拟合公式 $y=9\times 10^{-7}x+0.0001$ 、

$y=3\times 10^{-7}x+10^{-5}$ 可知,C₂H₂、CO达到 c 分别需要998 s和3 300 s。两条曲线拟合程度的指标 R^2 分别为0.86、0.92,均大于0.75,拟合可信度高。

(4)穿线管水平段长度的影响

穿线管有垂直与水平两种敷设状态,垂直敷设状态穿线管长度基本不变,不会随户内布局而变化,因此只考虑水平穿线管对传感器响应时间的影响。图12是缺陷点位置3在过热缺陷点温度为50℃时CH₄气体在故障发生30 min时不同水平段长度“上走向”穿线管与传感器处逸出气体瞬时流速的关系曲线。

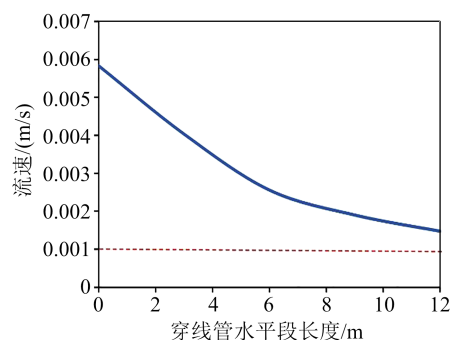


图12 穿线管水平长度与逸出气体流速的关系

Fig.12 Relation between horizontal length of threading pipe and velocity of escaping gas

从图12可以看出,逸出气体流速与穿线管水平段长度呈负相关。为保证故障发生在30 min内使传感器响应,当穿线管水平段长度为12 m及以上时,建议穿线管两侧均安装传感器,以便及时反映PVC绝缘过热缺陷。

(5)多影响因素分析

通过正交表研究过热缺陷位置、过热缺陷发热温度、逸出气体种类、穿线管水平长度4种因素对PVC绝缘PVC逸出气体使传感器响应的的时间。选用L₉(3⁴)正交表,共需要9组数据,如表7所示。正交分析结果如表8所示,过热缺陷位置的水平1、2、3分别为位置1、2、3;过热缺陷温度的水平1、2、3分别为50、70、90℃;气体种类的水平1、2、3分别为CH₄、C₂H₂、CO;管水平段长度的水平1、2、3分别为3、6、9 m。

不同过热气体衍生物在相同工况下逸出气体量不同,因此可从浓度差(检测气体种类)和温度(过热缺陷温度)两个扩散运动基本条件来进行流体场气体扩散研究。过热缺陷位置和穿线管水平段长度则影响了逸出气体运动至传感器处的距离。由极差值 R 得出影响程度从大到小的排序为:检测气体种类、过热缺陷位置、过热缺陷温度和穿线管

表7 多影响因素表
Tab.7 Multifactor table

组别	因素				响应时间 /min
	过热缺陷 位置	过热缺陷 温度/°C	气体 种类	穿线管水平段 长度/m	
1	1	50	CH ₄	3	56
2	1	70	C ₂ H ₂	6	98
3	1	90	CO	9	381
4	2	50	C ₂ H ₂	9	94
5	2	70	CO	3	125
6	2	90	CH ₄	6	14
7	3	50	CO	6	100
8	3	70	CH ₄	9	4
9	3	90	C ₂ H ₂	3	3

表8 正交分析结果
Tab.8 Orthogonal analysis result

统计量	因素			
	过热缺陷 位置	过热缺陷 温度	气体种类	穿线管水平段 长度
K ₁	535	250	74	184
K ₂	233	227	195	212
K ₃	107	398	606	479
R	143	57	177	98

水平段长度。绝缘过热气体衍生物检测种类的选择对传感器响应时间影响最大,在实际应用中应将其作为首要考虑因素,CH₄气体传感器能够在最短时间内检出电线过热缺陷,是应用中的首要选择。

3 结论

(1)逸出气体CH₄、C₂H₂、CO浓度与PVC绝缘温度均呈正相关,当导线材料温度接近70°C时,CH₄、C₂H₂、CO浓度分别为13.5×10⁻⁶、5.5×10⁻⁶、1.3×10⁻⁶,通过分析试验与仿真数据得出CH₄气体传感器是家用电线绝缘过热气体衍生物检测的最优选。

(2)热-电耦合温度场中,电线参数选型能锁定PVC绝缘过热缺陷温度范围,对绝缘温度的影响最大。

(3)热-流耦合流体场中,检测气体种类的选择是决定传感器响应时间的关键因素。

参考文献:

[1] KNOBLAUCH J, ILLYASKUTTY N, KOHLER H. Early detection of fires in electrical installations by thermally modulated SnO₂/additive-multi sensor arrays[J]. Sensors and Actuators B: Chemical,2015,217:36-40.
[2] LEE K, SHIM Y S, SONG Y G, et al. Highly sensitive sensors based on metal-oxide nanocolumns for fire detection[J]. Sensors,

2017,17(2):303.

[3] ZHANG H, YI J X, JIANG X. Fast response, highly sensitive and selective mixed-potential H₂ sensor based on (La, Sr)(Cr, Fe)O₃₋₈ perovskite sensing electrode[J]. ACS Applied Materials & Interfaces,2017,9(20):17218-17225.
[4] 张振宇,李永祥,杨罡,等. 开关柜故障衍生气体实验模拟及分析[J]. 武汉大学学报(工学版),2021,54(8):769-776.
[5] 任浩,屈剑锋,柴毅,等. 深度学习在故障诊断领域中的研究现状与挑战[J]. 控制与决策,2017,32(8):1345-1358.
[6] TANG J, LIU F, ZHANG X X, et al. Characteristics of the concentration ratio of SO₂ to SOF₂ as the decomposition products of SF₆ under corona discharge[J]. IEEE Transactions on Plasma Science,2012,40(1):56-62.
[7] 颜湘莲,王承玉,季严松,等. 气体绝缘设备中SF₆气体分解产物与设备故障关系的建模[J]. 电工技术学报,2015,30(22):231-238.
[8] 唐炬,陈长杰,刘帆,等. 局部放电下SF₆分解组分检测与绝缘缺陷编码识别[J]. 电网技术,2011,35(1):110-116.
[9] 张振宇,晋涛,王天正,等. 基于气体检测的空气开关柜绝缘缺陷识别[J]. 武汉大学学报(工学版),2021,54(8):761-768.
[10] 刘宏博,程璐,徐哲,等. 热老化对电容器用聚丙烯薄膜结构及电学性能的影响[J]. 绝缘材料,2023,56(2):96-103.
[11] 汤小林,刘健. 阻燃软电缆中PVC材料的耐老化分析[J]. 广东通信技术,2018,38(5):77-79.
[12] VASILIEV A A, GRIGORIEV G Y, LAGUTIN A S, et al. Contemporary technologies of early detection of fire in space vehicles[J]. Acta Astronautica,2017,135:76-82.
[13] 郑学刚,唐黎华,俞丰,等. PVC的热失重和热解动力学[J]. 华东理工大学学报,2003,29(4):346-350.
[14] 孙庆雷,时新刚,林云良,等. 聚氯乙烯的热解特性和热解动力学研究[J]. 燃料化学学报,2007,35(4):497-500.
[15] 贺劲龙. 聚氯乙烯绝缘材料低温加热实验研究[D]. 北京:中国地质大学,2016.
[16] 崔瑞. 电气线路材料低温热解火灾敏感气体的识别研究[D]. 北京:中国地质大学,2017.
[17] 区永和. PVC加工时逸出气体的研究[J]. 广州化工,1982(1):36.
[18] WANG C J, LIU H R, ZHANG J Q, et al. Thermal degradation of flame-retarded high-voltage cable sheath and insulation via TG-FTIR[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis,2018, 134:167-175.
[19] CHEN R Y, LU S X, ZHANG Y, et al. Pyrolysis study of waste cable hose with thermogravimetry/Fourier transform infrared/mass spectrometry analysis[J]. Energy Conversion and Management,2017,153:83-92.
[20] 张佳庆,过羿,冯瑞,等. 典型变电站阻燃低压电缆外护套材料火灾条件下热解固气产物特性及反应机理[J]. 清华大学学报(自然科学版),2022,62(1):33-42.
[21] 马人凤,朱永华,吴建东,等. 超高压直流电缆的国产化研究进展[J]. 绝缘材料,2016,49(11):1-8.
[22] 卞佳音,李永兰,单鲁平,等. 500kV电力电缆稳态热路模型分析及载流量计算[J]. 绝缘材料,2019,52(9):96-101.
[23] 赵鹏,关键昕,欧阳本红,等. 高压直流XLPE绝缘电缆载流量的数值算法及特性分析[J]. 绝缘材料,2023,56(1):90-95.
[24] 张大勇,王刚,荣立平,等. 烯丙基酚醛-双马来酰亚胺树脂胶粘

- 剂的制备及性能研究[J]. 化学与粘合,2022,44(4):298-301.
- [25] 胡诚成,倪勇. 热失重法快速评估交联聚乙烯材料热老化寿命的可靠性研究[J]. 电线电缆,2021(3):16-18,27.
- [26] 李欢,李建英,马永翔,等. 不同温度热老化对XLPE电缆绝缘材料晶体结构的影响研究[J]. 中国电机工程学报,2017,37(22):6740-6748,6787.
- [27] 祝玉婷. 聚氯乙烯有氧脱氯及催化热解制备碳纳米管实验研究[D]. 武汉:华中科技大学,2021.
- [28] 罗颢程. 非对称结构热电器件电学和力学特性的研究与优化[D]. 西安:陕西科技大学,2021.
- [29] 陈文教,郑志豪,徐研,等. 基于高导热管道提升排管敷设下的电力电缆载流量的研究[J]. 绝缘材料,2022,55(2):97-103.
- [30] 石大城,李乾,余志强,等. 基于电磁-热-流体耦合的隧道敷设电缆载流量分析[J]. 绝缘材料,2022,55(12):111-118.
- [31] 樊嘉伟,李红星. 基于COMSOL Multiphysics的十字状裂隙中流体运动特征分析[J]. 科学技术与工程,2020,20(8):2968-2974.
- [32] 全国建筑物电气装置标准化技术委员会,中国标准出版社. 建筑物电气装置国家标准汇编(第4版)[M]. 上海:中国标准出版社,2019.
- [33] 万留杰,王卫东,李康. PVC热解特性研究[J]. 河南工学院学报,2022,30(3):25-29.

收稿日期:2023-03-07;修回日期:2023-04-11。

作者简介:武肖(1997-),女(汉族),山西太原人,硕士生,主要从事电气运行状态检测的研究;赵文彬(1977-),男(汉族),内蒙古呼和浩特人,高级工程师,主要从事电气设备状态管理技术的研究。