

文章编号:1004-5309(2023)-0128-07

DOI:10.3969/j.issn.1004-5309.2023.02.07

RVVB 护套线弯折角度对过电流诱发短路故障的影响

金 运¹, 李 阳^{2*}, 余 韬¹, 郭鑫尧¹, 闫奕欣³

(1. 中国人民警察大学研究生院, 廊坊, 065000; 2. 中国人民警察大学物证鉴定中心, 廊坊, 065000;
3. 中国人民警察大学防火工程学院, 廊坊, 065000)

摘要: RVVB 护套线弯折处的内部导线应力有别于它处, 发生过电流故障时, 易在此处诱发短路故障。搭建了故障模拟电路, 研究弯折角度 α 、电流值对短路发生过程、临界电流值、短路时间的影响。结果表明: 相较于无弯折护套线, 弯折的护套线发生过电流故障时, 诱发短路故障的临界电流值降低了 6 A ($0.750I_e$), 即临界电流值 $I = 4.125I_e$; 当 $I \leq 4.125I_e$ 时, 在所有测试角度下, 护套线均不发生短路故障; 当 $I = 4.500I_e$ 时, 护套线仅在测试角度 $\alpha = 77^\circ$ 和 84° 诱发短路故障; 当 $I \geq 4.875I_e$ 时, 在所有测试角度下均诱发短路故障, 护套线弯折程度越大, 诱发短路所需时间越短, 且当 $I \geq 6.375I_e$ 时, 弯折角度对诱发短路时间的影响减弱, 所有测试角度下诱发短路的时间趋于一致。研究结果可为电气火灾防治与调查提供基础数据。

关键词: 电气火灾; 故障转化; 弯折角度; 短路时间

中图分类号: X93; X932

文献标识码: A

0 引言

过电流故障是指导线工作时的电流超过其安全使用额定电流而引发的故障。SFPE^[1]中指出, 根据焦耳定律, 当电流值 $I \leq 2I_e$ 时 (I_e 为导线额定电流), 线芯发热功率较低, 仅会造成绝缘层逐渐老化; 当 $3I_e \leq I \leq 7I_e$ 时, 线芯发热功率升高, 绝缘层炭化热解加速, 绝缘层间的电阻减小, 当达到击穿条件时, 诱发相间短路, 产生的电弧引燃绝缘层热解的高温气体, 以明火的形式引燃周围可燃物导致火灾。在实际生活中, RVVB 护套线是家用电气常用电源线, 当配线过细、负荷过大、电压过高时, 常会导致此种导线电流激增, 从而引发电流故障。火灾事故调查中, 对故障点周围用电器的分析, 存在护套线弯折的情况, 为绕开墙体、家电、家具等障碍物, 电源线会

以一定角度弯折敷设。不同弯折角度的导线, 弯折处内部应力出现差异, 当导线发生过电流故障时, 线芯发热对相间间距的影响, 决定着相间短路击穿的可能性。目前, 关于 RVVB 护套线不同弯折角度下过电流诱发短路故障的研究鲜有报道。

目前, 关于过电流故障诱发火灾的研究, 主要集中在单根导线发热燃烧及痕迹特征等方面。早在 1978 年 Ettling^[2]首次对导线熔断与火灾的关系进行了研究。Shea^[3]研究表明: 导线的聚氯乙烯绝缘层受热会分解并产生可燃气体, 短路的电弧可将其快速点燃。Babrauskas^[4]研究电气火灾时, 发现过负荷和绝缘过热等因素都属于最为基础的过电流故障。Wright 等^[5]对过电流单芯铜导线与多股铜导线进行实验研究, 并区分其熔痕特征。王博等^[6]借助 ZR-BV 铜线研究其过电流故障过程及熔痕特征。

收稿日期: 2022-08-02; 修改日期: 2022-12-21

基金项目: 中国人民警察大学校级科研重点专项项目 (2019sycxpd001)

作者简介: 金运 (1996—), 男, 中国人民警察大学研究生院硕士研究生, 研究方向为电气火灾调查相关领域。

通讯作者: 李阳, 博士, 副教授, E-mail: liyang02@cppy.edu.cn

Wang 等^[7]研究了单芯铜导线上火焰高度及蔓延速率与不同倍率电流值和空气压力的关系。林庆文等^[8]研究了过电流导线线芯发热、熔断、电弧引燃等故障特征并与视频分析相结合总结其变化规律。以上多为单芯导线故障研究,关于两相或三相护套线过电流诱发短路故障的研究较少。

在护套线发生电气故障引发的火灾方面,主要是美国和日本以热辐射加热护套线诱发短路的研究为主。Hoffmann 等^[9]研究电源线受到不同热辐射作用时护套线发生短路故障的可能性。Hagimoto 等^[10]利用标准锥形加热仪,对不同类型的护套线诱发短路故障进行了进一步研究。Babrauskas^[11]列举诱发过电流故障的各种因素,表明护套线故障的引燃机理还需深入研究。Novak 等^[12]在 Hoffmann 的基础上研究了辐射热通量、电压和气压与诱发故障时间的关系,利用数值热解模型预测诱发故障时间。Fisher 等^[13]研究了高温作用下电缆的诱发故障问题,提出了基于绝缘热解的诱发短路故障临界理论模型。Iwashita 等^[14]首次根据短路机理,对热辐射诱发护套线短路进行分类,即金属短接型短路和电弧路径型短路。司永轩等^[15]对比分析了中美学者在过电流故障引发火灾方面的研究。孙焯等^[16]在护套线过电流条件下,对护套故障时间、次数以及燃烧过程进行统计分析。李阳等^[17]研究了护套线过电流诱发短路过程及绝缘燃烧速率。Li 等^[18]研究了护套线过电流诱发的过程和机理,以及短路故障的初始击穿时间,并建立了初始击穿的平均时间和电流之间的数学方程。但以上研究均未考虑护套线弯折角度对过电流诱发短路故障的影响。

综上所述,目前国内外研究多集中在单根导线故障过程和燃烧痕迹特征,以及以热辐射加热护套线诱发短路故障的研究,缺乏护套线发生过电流故障时,护套线弯折角度对短路发生时间、现象的研究。火灾事故调查中,对故障点周围用电器的分析,存在护套线弯折的情况。因此本文模拟实际生活中设备电源线的实际铺设场景,搭建过电流诱发短路故障电路实验台,改变护套线敷设弯折角度,统计故障时电压电流瞬间波动,分析首次发生短路时间及现象与铺设角度 α 、电流值的变化关系,为电气火灾防治与调查提供理论数据支撑。

1 实验

1.1 实验材料

RVVB 导线:正泰电器公司生产的 RVVB 2×

1.0 mm² 铜芯软线(绝缘层材料为 PVC),额定电流为 8 A,导线其他参数如表 1 所示。

1.0 mm² 的 RVVB 导线的每股主线芯由多股细线芯绞合而成,分别由不同颜色 PVC 绝缘层包裹,RVVB 导线截面如图 1 所示。

表 1 实验导线规格

Table 1 Parameters of RVVB sheathed wire

线芯主成分	绝缘层材料	线芯直径(dc /mm)	线芯截面积(Ac /mm ²)	绝缘层厚度(δ_p /mm)	绝缘层截面积(Ap /mm ²)
Cu	PVC	1.13	1.0	0.8	15.50

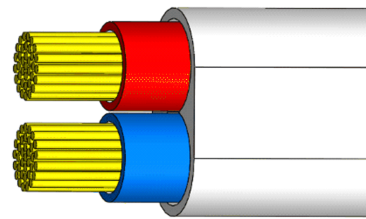


图 1 1 mm² RVVB 护套线导线截面示意图

Fig. 1 RVVB unmetallic sheathed cable of 1 mm² cross-sectional area

1.2 实验方法与设备

根据本课题组的前期研究^[18]可知,护套线水平敷设时,诱发短路故障的临界电流值为 $I = 5.250I_e$ 。故实验测试电流在 $5.250I_e$ 附近选取,设备电流输出调节精度 3 A,确定了 33 A,36 A,39 A,42 A,45 A,48 A,51 A 等 7 个过电流值,分别对应 $4.125I_e$, $4.500I_e$, $4.875I_e$, $5.250I_e$, $5.625I_e$, $6.000I_e$, $6.375I_e$ 。导线上下游各连 1 个 DELIXI(DZ47S-3PC63 型)额定电流 63 A 断路器,模拟实际生活中断路器额定电流设置过高的条件,设置通电时长上限为 2 h,每个电流值进行 5 组平行实验,实验装置如图 2 所示。针对实际建筑中,护套线多为直角弯折敷设的特点,实验角度 α 在 90°上下选取,通过固定两个断路器的直线距离,改变护套线长度的方式控制导线弯折角度,如式(1),可以计算得出不同长度护套线($y = 15$ cm,17 cm,19 cm,21 cm,23 cm)分别对应的 5 个弯折角度($\alpha = 77^\circ, 84^\circ, 90^\circ, 96^\circ, 101^\circ$)。通过电气火灾故障模拟及痕迹制备装置,调节设备电压、电流输出,进行过电流诱发短路故障实验,记录故障时的电流和电压波动,分析导线短路时间,普通相机(Canon 5DMark4)记录导线发热形变短路过程,高

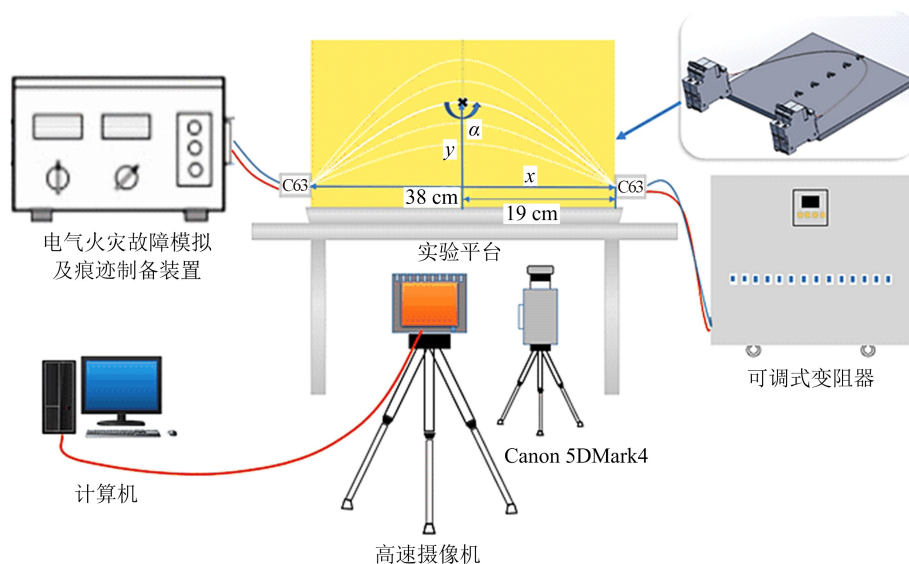


图 2 实验装置示意图

Fig. 2 Schematic of experimental apparatus

速摄像机(Phantom 640)捕获短路瞬间状态。

$$\alpha = 2\arctan \frac{y}{x} \quad (1)$$

式中: α 为导线转角角度; y 为空气开关中垂线从垂足向上延伸的距离,cm; x 为空气开关中点至空气开关的距离,cm。

2 结果与分析

2.1 弯折角度对诱发短路过程的影响分析

护套线过电流故障时,线芯发热加速绝缘层由内而外热解炭化,最终导致绝缘失效诱发短路故障。绘制故障时电流电压与时间关系的波形图,如图 3 所示。护套线发生此类故障时,均出现电流电压反复波动,伴有拉弧现象。

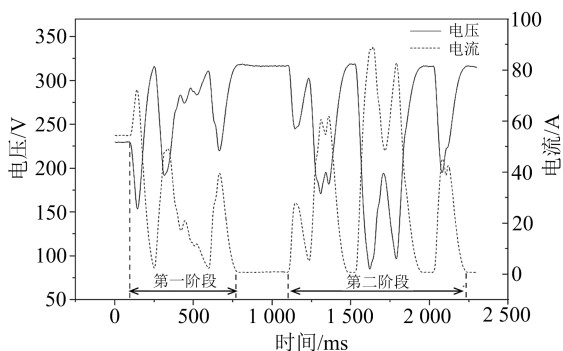


图 3 过电流诱发短路典型波形图

Fig. 3 Typical short-circuit waveform induced by overcurrent

根据前期研究,护套线水平敷设时,诱发短路故障临界电流值 $I = 5.250I_e$ [18]。在此基础上,本文发现护套线弯折敷设时,诱发短路的临界电流值至少降低 $0.750I_e$,即临界电流值 $I = 4.125I_e$ 。护套线水平敷设条件下, $I \leq 5.250I_e$ 时,无法诱发短路故障; $I \geq 5.625I_e$ 时,均诱发短路故障。护套线弯折敷设条件下在 $\leq 4.125I_e$ 时,护套线在 2 h 实验测试中,不同弯折角度下均无法诱发短路故障。当 $I = 4.500I_e$ 时,仅在弯折角度 $\alpha = 77^\circ$ 和 $\alpha = 84^\circ$ 时,五组实验中仅一组发生短路故障,发生短路故障时,故障点发出爆裂的声音,并带有刺目的亮光。当 $I \geq 4.875I_e$ 时,护套线在所有测试角度下,均可诱发过电流短路故障,且 5 组平行实验均会发生故障。

根据电弧击穿理论,影响护套线短路击穿的因素,主要包括:相间电压、绝缘炭化导电能力和相间间隙。当护套线发生过电流故障时,线芯逐渐发热,绝缘内层逐步热解炭化,导线间绝缘材料的导电能力逐渐增强。随着电流值的增大,线芯发热加剧,完全炭化达到诱发短路的条件。护套线发生过电流故障时,线芯产生的焦耳热是加速绝缘层炭化的主要热量,炭化程度影响击穿电弧的产生,故针对护套线内部传热特征,建立并分析传热模型,如图 4 所示。

为方便解释传热模型,做出以下几点假设:(1)护套线处于传热稳定状态;(2)护套线的内外绝缘层是一个整体;(3)线芯与绝缘内侧均匀传热。根据能量守恒定律,产生电弧击穿的绝缘层界面,引起其温

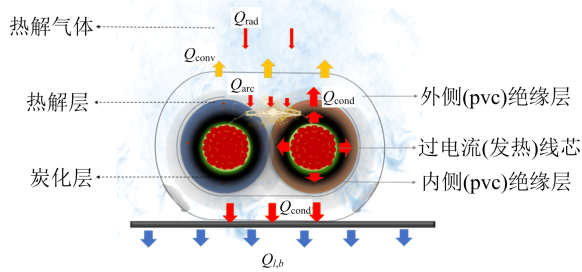


图 4 护套线过电流传热模型

Fig. 4 Heat transfer model before short circuit

度升高的能量主要来自高温线芯和 PVC 热解放出的热量,能量主要通过热传导的方式,使电弧击穿的绝缘层界面温度升高,最终电弧击穿炭化层诱发短路故障,其能量关系如式(2)所示。与水平敷设相比,护套线弯折角度发生相同过电流故障时,导线的相间电压未发生变化,线芯发热的功率几乎相同,理论上绝缘炭化过程较为相似,因此推断导线弯折角度使导线某部位线间间距减小,达到炭化击穿能量 Q_{arc} 的速度加快,故导致其诱发短路的时间和临界电流值均降低。 $I=4.500I_e$ 时,只有弯折较为严重的护套线发生短路故障,且弯折越严重,短路时间越短,也印证了以上的理论推断。

$$Q_{arc} = Q - Q_{cond} - Q_{conv} - Q_{l,b} \quad (2)$$

式中: Q_{arc} 是电弧击穿的绝缘层界面的能量; Q 是铜线芯产生的焦耳热; Q_{cond} 是焦耳热通过热传导作用在绝缘层的能量; Q_{conv} 是绝缘表层通过热对流作用在附近空气的能量; $Q_{l,b}$ 是贴地部分绝缘层通过热传导作用在地表的能量。

2.2 弯折角度对诱发短路时间影响分析

自实验开始至第一次短路瞬间出现电流电压波动的时间间隔,记为首次短路时间(t)。如图 5 所示。在 $I=4.875I_e$ 时,弯折角度对于首次诱发短路时间影响最明显,故分析 $I=4.875I_e$ 时五组角度的实验结果,探究弯折角度与诱发短路时间的关系。

如图 6 所示。在弯折角度 $77^\circ \leq \alpha \leq 101^\circ$ 之间, $I=4.875I_e$ 均可能诱发短路,随弯折角度减小,诱发短路所需时间缩短。当 $\alpha=77^\circ$ 时,诱发短路故障时间在所有结果中较低,且最大值与最小值差值仅为 11 s。随着护套线弯折角度的增大,诱发短路的时间随之增大,当 $\alpha=101^\circ$ 时,诱发短路的时间最大值变为 538 s,较 $\alpha=77^\circ$ 诱发短路故障时间最大增加了 81 s。故随着弯折角度减小,护套线发生过电流

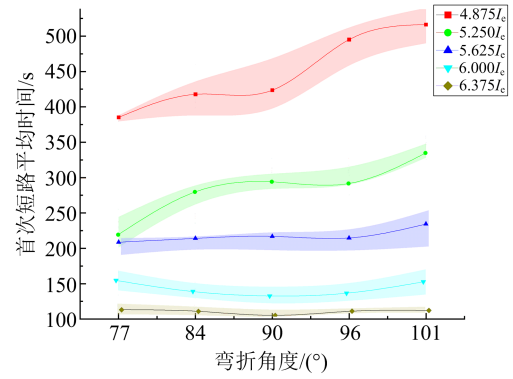
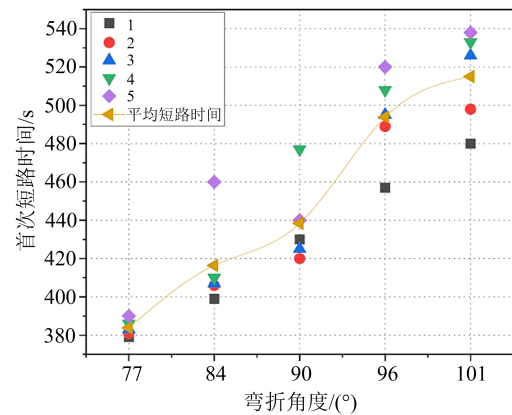


图 5 不同弯折角度的首次短路平均时间的关系

Fig. 5 First short circuit average time induced by different turning angles

图 6 不同弯折角度下 $I=4.875I_e$ 的首次短路时间Fig. 6 First short circuit time by different turning angles when $I=4.875I_e$

故障时间变短,从而引起火灾的所需时间随之减短。

护套线的弯折角度不仅改变线间间距,自身应力分布也受到影响,常温下导线内部铜芯在低于其宏观屈服极限的应力作用下,无法使其内部的位错克服障碍进行滑移,因此铜芯在宏观上不能发生塑性变形,但是随着线芯温度升高其内部的原子热运动加剧,位错在热激活的作用下越过障碍进行攀移,造成组织分布不均匀,从而改变自身不同位置的电导率,外侧拉伸区域电导率偏高,弯折中心电导率偏低。热作用下铜芯在非常小的外应力作用下也能发生塑性变形,弯折角度不同,线芯的横截面积也会变化,护套线弯折角度与线芯横截面积成正比,横截面积随弯折角度减小而减小。根据式(3)可得,线芯横截面积与电阻的大小呈反比。故护套线弯折角度越小,线芯升温速率越快,绝缘层热解炭化速率加快,为电弧短接创造有利条件。

$$R = \frac{\rho L}{S} \quad (3)$$

式中: R 为铜芯电阻 (Ω); ρ 为铜芯的电阻率 (Ω/m); L 表示铜线的长度 (m); S 表示铜芯的横截面积 (m^2)。

2.3 影响诱发短路时间主要因素分析

实验发现,影响诱发短路的时间,主要是以下两个因素相互作用的结果:

(1) 护套线弯折角度

在同一过电流值条件下,护套线热解炭化速率相同,护套线弯折角度越小,导致某一位线间距离越小,护套线横截面积与线间间距正相关,横截面积减小绝缘层热解炭化速度增大,从而诱发电弧短接时间随之减短。

护套线的弯折角度不仅改变线间间距,自身应力分布也受到影响,过电流故障时,随着线芯温度升高其内部的原子热运动加剧,位错在热激活的作用下越过障碍进行攀移,造成线芯内部组织分布不均匀,影响其自身电导率,从而改变线芯发热及绝缘炭化击穿的速度。

(2) 过电流值的大小

由传热方式可知,焦耳热是影响绝缘炭化击穿的主要能量之一。随着电流值的增大,线芯发热功率增大,护套线热解炭化速度加快,加速出现电弧短接的时间。

如图 7 所示 $I = 4.875I_c$ 时诱发短路故障的最大时间为 538 s,随着弯折角度缩小,诱发短路故障的最短时间降为 374 s,随着护套线弯折角度的减小,诱发短路故障的时间明显减少,故此阶段,导线弯折角度是影响诱发短路故障时间的主要因素;当 $4.875I_c < I < 6.375I_c$ 时,随着电流值增大,弯折角度对诱发短路时间的影响减小,不同角度下诱发短路故障时间的标准差由 53.81 s 变为 3.12 s,各组诱发短路故障的时间逐渐趋于一致,影响诱发短路故障时间的主要因素由护套线弯折角度向过电流值过渡;在 $I \geq 6.375I_c$ 时,由于过电流值过大,弯折角度对首次诱发短路时间的影响降低,此时过电流值是影响诱发短路故障时间的首要因素。

在不同弯折角度条件下对护套线发生首次诱发短路的平均时间进行拟合,可得到不同角度下,首次诱发短路平均时间与电流值的拟合关系,其拟合修正系数 R^2 拟合优度均接近 1,表明相同弯折角度

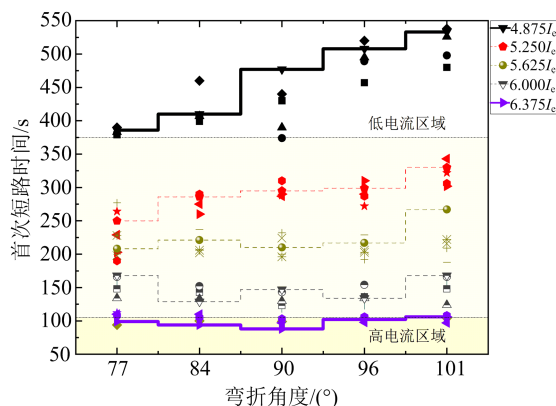


图 7 不同弯折角度的首次短路时间

Fig. 7 First short circuit time induced by different turning angles

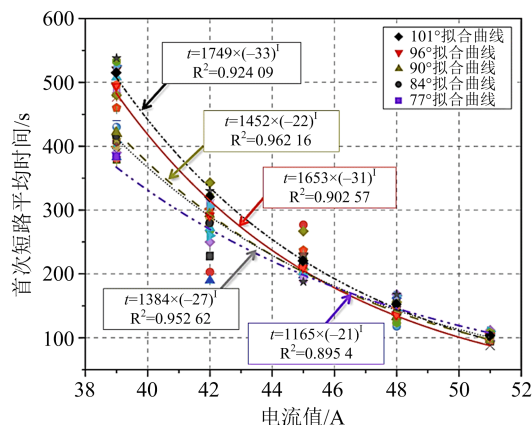


图 8 首次短路平均时间与电流值的拟合关系

Fig. 8 Fitting relationship between first short-circuit average time and current value

下,首次诱发短路平均时间随电流值增大,呈指数递减的变化趋势,如图 8 曲线所示。同时诱发短路的时间随着角度的减小或者过电流值的增大而降低,引燃附近可燃物的极限条件降低,从而增加火灾的危险性。

3 结论

本文模拟实际生活中设备电源线常见的弯折敷设场景,研究护套线负荷过大诱发短路故障时,护套线弯折角度 α 、电流值对短路发生过程、临界电流值、短路时间的影响并得出如下结论:

(1) 与水平敷设导线相比,弯折护套线发生过电流故障时,弯折状态并不会影响短路模式。两种敷设方式均是线芯先发热,热量促使绝缘层由内而外热解炭化,最终导致绝缘失效诱发短路故障,并且故

障时电流电压均呈反复波动模式,伴有拉弧现象。

(2)随着护套线弯折角度的减小,所需的临界电流值降低。相较于水平敷设,护套线弯折敷设更容易诱发短路故障,并且诱发短路故障的临界电流值降低 $6\text{ A}(0.750I_e)$,即临界电流值 $I=4.125I_e$ 。护套线水平敷设条件下, $I\leq 5.250I_e$ 时,无法诱发短路故障; $I\geq 5.625I_e$ 时,均诱发短路故障。护套线弯折敷设条件下,当 $I\leq 4.125I_e$ 时,所有测试角度下均不会发生短路故障;当 $I=4.500I_e$ 时,护套线

仅在测试角度 $\alpha=77^\circ$ 和 84° 诱发短路故障;当 $I\geq 4.875I_e$ 时,所有测试角度均会发生短路故障。

(3)随着电流值的升高,弯折角度对诱发短路故障时间影响减弱。测试角度下诱发短路故障时间的标准差由 53.81 s 变为 3.12 s ,所有测试角度下诱发短路时间趋于一致,平均短路时间由 538 s 降为 97 s 。

本文并未考虑护套线绝缘层材质与厚度对短路过程的影响,这是下一步的研究重点。

参考文献

- [1] Hurley M J, Gottuk D, Hall J R, Harada K, Kuligowski E, Puchovsky M, Torero J, Watts J M, Wieczorek C. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering: Electrical Fires[M]. 5ed, New York: Springer-Verlag, 2016.
- [2] Ettling B V. Electrical wiring in building fires[J]. Fire Technology, 1978, 14(4): 317-325.
- [3] Shea J J. Conditions for series arcing phenomena in PVC wiring[J]. IEEE Transactions on Components and Packaging Technology, 2007, 30(3): 532-539.
- [4] Barauskas V. Research on electrical fires: The state of the art[J]. Fire Safety Science, 2008, 9: 3-18.
- [5] Wright S A, Loud J D, Blanchard R A. Globules and beads: What do they indicate about small-diameter copper conductors that have been through a fire?[J]. Fire Technology, 2015, 51(5): 1051-1070.
- [6] 王博, 李阳, 司永轩, 徐学岩, 荣彦超. ZR-BV 单芯铜线过电流故障电弧熔痕特征研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2019, 15(12): 41-47.
- [7] Wang Z, Zhou T N, Wei R C, Wang J. Experimental study of flame spread over PE-insulated single copper core wire under varying pressure and electric current[J]. Fire and Materials, 2020, 44(6): 835-843.
- [8] 林庆文, 王鑫玉, 李阳, 冯骁, 何芬芬. 过电流铜包铝导线线芯发热及绝缘燃烧规律研究[J]. 消防科学与技术, 2021, 40(2): 168-171.
- [9] Hoffmann J M, Hoffmann D J, Kroll E C, Wallace J W, Kroll M J. Electrical power cord damage from radiant heat and fire exposure[J]. Fire Technology, 2001, 37(2): 129-141.
- [10] Hagimoto Y, Watanabe N, Okamoto K. Short-circuit faults on electrical wires exposed to external radiant heat[J]. Bull Japan Assoc Fire Sci Eng, 2004, 54(2): 25-31.
- [11] Babrauskas V. Mechanisms and modes for ignition of low-voltage, PVC-insulated electrotechnical products[J]. Fire and Materials, 2006, 30(2): 151-174.
- [12] Novak C J, Stoliarov S I, Keller M R, Quintiere J G. An analysis of heat flux induced arc formation in a residential electrical cable[J]. Fire Safety Journal, 2013, 55: 61-68.
- [13] Fisher R P, Stoliarov S I, Keller M R. A criterion for thermally-induced failure of electrical cable[J]. Fire Safety Journal, 2015, 72: 33-39.
- [14] Iwashita T, Keller M R, Hagimoto Y, Sugawa O. Leakage currents precede short circuits in PVC-insulated cable when exposed to external radiant heat[J]. Fire and Materials, 2017, 41(4): 339-348.
- [15] 司永轩, 刘玲, 金南江, 李阳. 中美过电流火灾物证鉴定技术研究综述[J]. 消防科学与技术, 2018, 37(3): 419-422.
- [16] 孙烨, 李阳, 王朴真, 杨雯, 林庆文. RVVB 护套线过电流诱发短路故障发生概率与起火燃烧过程分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2021, 17(3): 137-142.
- [17] 李阳, 金南江, 孙烨, 姜文宇, 张瑾. PVC 护套线过电流诱发短路过程及绝缘燃烧速率研究[J]. 安全与环境学报, 2022, 22(6): 3082-3086.
- [18] Li Y, Sun Y, Gao Y, Sun J, Lyu H F, Yu T, Yang S, Wang Y. Analysis of overload induced arc formation and beads characteristics in a residential electrical cable[J]. Fire Safety Journal, 2022, 131: 203626.

Influence of non-metallic sheathed cable's turning angle on short circuit occurrence induced by overcurrent

JIN Yun¹, LI Yang², YU Tao¹, GUO Xinyao¹, YAN Yixin³

(1. Graduate School, China People's Police University, Langfang 065000, China;

2. Institute of Forensic Science, China People's Police University, Langfang 065000, China;

3. College of FireProtection Engineering, China People's Police University, Langfang 065000, China)

Abstract: The turning angle of the non-metallic sheathed cable could change the stress distribution inside the cable. Theoretically, the different stress distribution is more likely to cause a short circuit on the overcurrent cable. In this work, the fault simulation circuit was conducted to study the effect of turning angle (α) on the current limit and required time under different overcurrent values. For a cable with various turning angles, compared to the horizontal cable (180°), the current limit with the turning situation decreased by 6 A ($0.750I_e$). A breakdown could be induced when the cable was at $4.125I_e$. When the flowing current rose to $4.500I_e$, a short circuit could occur at 77° and 84° . As this continuous luminous electric discharge, the circuit fault would inevitably be produced at $4.875I_e$. A short circuit due to overcurrent might need less time if the cable was bent more. When the current increased to $6.375I_e$, the time of short circuit occurrence at all testing angles had the same trend. With the current value increase, the impingement of the turning angle on the induced short circuit time decreased. This work provides information and data for electrical fire prevention and investigators to evaluate and identify the fire cause resulting from overcurrent cables.

Keywords: Electrical fire; Fault conversion; Turning angle; Short-circuit time