引用本文　普子恒,郭讯,任志刚,等.110 kV阻燃电缆外护套电弧引燃情况下邻近电缆的损伤风险[J].消防科学与技术,2026,45(5):34－44.

Pu Ziheng,Guo Xun,Ren Zhigang,et al.The risk of damage to adjacent cables under the condition of arc ignition of the outer sheath of 110 kV flame retardant cable[J].Fire Science and Technology,2026,45(5):34－44.

110 kV阻燃电缆外护套电弧引燃情况下邻近电缆的损伤风险

普子恒[1]，郭　讯[1]，任志刚[2]，王　帅[2]，郭　卫[2]

（1. 三峡大学 电气与新能源学院，湖北 宜昌 443002；
2. 国网北京市电力公司电力科学研究院，北京 100075）

摘　要：探究高压电缆外护套发生电弧引燃时邻近电缆的损伤风险。首先，搭建高压电缆电弧引燃试验平台，采用110 kV阻燃电缆作为试验材料，选取典型故障电弧工况，开展电弧引燃试验，分析电缆外护套的引燃特性；然后，根据引燃试验数据建立等效火源仿真模型，利用护套燃烧的温升特性进行验证；最后，以典型电缆隧道为例，进行温度分布仿真和邻近电缆损伤风险评估。结果表明，4～10 A典型电弧工况下，火焰最高温度为310～725 ℃，等效火源功率约为128～275 W。故障电弧电流小于8 A时，隧道各层电缆无损伤风险；电弧电流在8 A及以上时，在电弧故障发生30 s后，故障电缆同侧的上层敷设电缆表面温度超过安全限值，存在损伤风险。

关键词：故障电弧；引燃特性；损伤风险；电缆燃烧

中图分类号：X934；TM247　　**文献标志码：**A　　**DOI：**10.20168/j.1009-0029.2026.05.0034.11

The risk of damage to adjacent cables under the condition of arc ignition of the outer sheath of 110 kV flame retardant cable

Pu Ziheng[1], Guo Xun[1], Ren Zhigang[2], Wang Shuai[2], Guo Wei[2]

(1. College of Electrical Engineering & New Energy, China Three Gorges University, Yichang Hubei 443002, China; 2. Beijing Electric Power Research Institute, State Grid, Beijing 100075, China)

Abstract: This paper explores the damage risk of adjacent cables when arc ignition occurs in the outer sheath of high voltage cables. Firstly, a high-voltage cable arc ignition test platform was built, the 110 kV flame retardant cable was used as the test material. The typical arc fault conditions were selected to carry out the arc ignition test, and the ignition characteristics of the cable outer sheath were analyzed. Then, the equivalent fire source simulation model was established according to the ignition test data, and the temperature rise characteristics of the sheath combustion were verified. Finally, taking a typical cable tunnel as an example, the temperature distribution simulation and the risk assessment of adjacent cable damage were carried out. The results show that the maximum flame temperature under 4~10 A typical arc condition is 310~725 ℃, and the equivalent fire source power is about 128~275 W. When the fault arc current is less than 8 A, there is no risk of damage to the cables in each layer of the tunnel; when the arc current is 8 A and above, the surface temperature of the upper laying cable on the same side of the fault cable exceeds the safety limit 30 s after the arc fault occurs, and there is a risk of damage.

Key words: fault arc; ignition characteristics; damage risk; cable combustion

基金项目：国家电网有限公司总部管理科技项目（520201250016-159-ZN）

作者简介：普子恒，三峡大学电气与新能源学院副教授，博士，主要研究方向为电网防灾减灾、输电线路智能运维，湖北省宜昌市西陵区，443002。

通信作者：郭讯，三峡大学电气与新能源学院硕士研究生，724925814@qq.com。

收稿日期：2025-08-13；　**修回日期：**2025-12-15

近年来,电缆火灾事故频发,其中由故障电弧引起的占比在70%以上。高压电缆产生故障电弧有两种情况,一是电缆主绝缘击穿引发电弧接地故障;二是电缆金属护层的感应电压击穿外护套产生故障电弧[1-2]。电缆主绝缘击穿引发爆燃时,其短路电流极大,会引发保护装置动作跳闸。而外护套击穿时,电缆仍处于正常供电状态,故障电弧会持续存在。外护套在电弧作用下受热分解,产生可燃气体,引发燃烧,最终可能导致同通道邻近电缆受到损伤[3-5]。因此,针对110 kV电缆外护套电弧接地故障,开展不同电流工况下的电缆外护套引燃试验,探究电弧持续作用下护套的引燃特性,对分析邻近电缆的损伤风险具有重要意义。

目前,研究人员对模拟电弧引燃电缆开展了大量的研究。刘旭晖等[6]针对悬浮电压击穿外护套工况,采用雅各布天梯电弧模拟故障电弧,从110 kV电缆外部成功将其引燃且火焰蔓延。李陈莹等[7]采用雅各布天梯电弧作为火源,通过加热器控制电缆表面温度,构建了电弧引燃110 kV电缆的PVC护套试验平台,探究了电缆在表面不同温度下的电弧特性、电缆引燃及火焰蔓延过程。徐志豪等[8]同样使用雅各布天梯电弧对1 kV配电电缆开展了引燃试验,结合火灾动力学仿真研究了电弧引燃电缆过程中的引燃特性。但是,实际电缆护套发生击穿时,引燃路径为从金属护层至外护套,高温电弧会引燃周围材料,这与天梯电弧从外部引燃电缆的过程有显著区别。此外,上述天梯电弧在电流幅值、持续时间等方面也与实际故障电弧存在差异,因此,当前亟须根据典型电缆故障特征开展研究,以深入分析电缆外护套电弧引燃特性。

110 kV电缆具有阻燃性,发生燃烧时火焰高度被限制,但燃烧产生的高温热气流,可能会对邻近电缆造成损伤。为评估此类风险,现有的研究成果主要使用数值模拟的方法来获取电缆隧道的温度分布。吴执等[9]对含有不同坡度的电缆隧道火灾进行了模拟试验研究,分析了电缆隧道发生火灾时的火焰蔓延速度以及温度分布情况等。安伟光等[10]和刘杰等[11]分别对T形和L形综合管廊中不同火源及通风情况的电缆火灾蔓延进行了数值模拟,分析火灾后廊道内温度场及烟气蔓延情况。王明年等[12]搭建了城市综合管廊火灾仿真模型,研究了电缆舱室截面尺寸对火灾发展的影响。然而,现有研究主要聚焦于电缆隧道发生火灾后的动态过程,未能与电缆的电弧引燃过程建立联系,火源功率设置与实际电缆的电弧故障火灾情况存在差异。因此,电缆电弧故障下隧道的温度分布和邻近电缆的损伤风险还需进一步研究。

基于此,本文搭建了高压电缆电弧引燃试验平台,开展不同电流工况下的电弧引燃试验,分析外护套的引燃特性。再根据护套的引燃特性,建立电缆引燃仿真模型;并利用电缆燃烧过程的温升特性作为验证数据,在仿真中实现了火源模型对电弧引燃电缆过程的等效;然后,利用该等效火源进行了电缆隧道动态燃烧仿真模拟,得出隧道内各层电缆的温度分布情况,从而进行不同电弧工况下邻近电缆的损伤风险分析。

1　试验原理及试验设计

1.1　试验原理

110 kV电缆通常为单芯电缆结构,如图1所示。

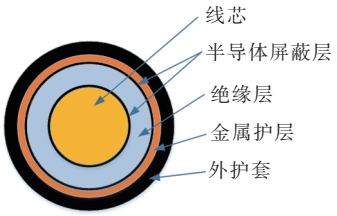


图1　110 kV单芯电缆结构图

Fig. 1　The 110 kV single-core cable structure diagram

为解决高压电缆金属护层感应电压过高的问题,实际运行中金属护层通常采用交叉互联的接地方式,将高压电缆均分为3小段,如图2所示。

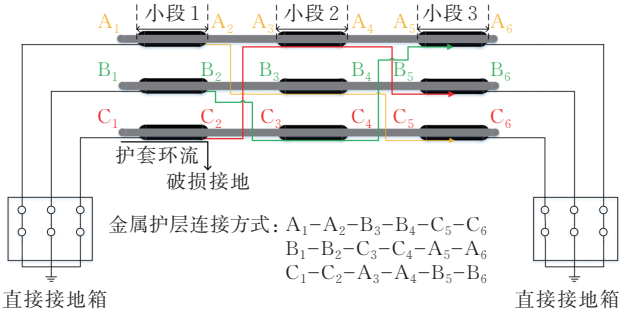


图2　金属护层交叉互联接线示意图

Fig. 2　Schematic diagram of metal sheath cross-connection wiring

以C_1-B_6为例,金属护层的连接路径为C_1-C_2-A_3-A_4-B_5-B_6,由于各段电缆长度大致相等,感应电压幅值近似相等,相位相差120°,在经过两次换位连接后,感应电压的矢量和为零,C_1与B_6之间无电位差,回路中环流接近于零。当线路中出现雷击等过电压时,金属护层会感应出很高的电压,若C_2处出现外护套破损,就会发生电弧接地故障,C_1与C_2间会存在电位差,金属护层经过接地点形成环流,而过电压的持续时间极短,消失之后,此段电缆金属护层的感应电压仍然存在,约为几十伏,足以维持电弧,回路等效阻抗约为几欧姆到十几欧姆,此时故障电流约为10 A。由于主绝缘未出现故障,仍是正常运行,负荷电流感应的护层电压可能使护层故障电弧持续存在。

常规的高压试验设备高压侧的额定电流较小，仅为微安级别，且持续时间短，而在电弧引燃试验中需要产生10 A左右的电流，对设备容量要求较高；但是在电弧形成之后，仅需较小的电压即可维持较长的电弧。在大气条件下，每厘米长电弧的维持电压只有30 V左右[13]。基于此原理，本文采用了熔丝引弧的方法，在电极与金属护层之间布置1根熔丝，将两端电流调整至试验设定值，此时熔丝两端电压较低。一段时间后熔丝会在电流热效应的作用下熔断，其两端电压跃升至电源电压，产生的金属蒸气在强电场的作用下被电离，形成导电通道，进而产生电弧。电缆外护套在高温作用下受热分解产生可燃气体并燃烧，从而实现电弧引燃110 kV电缆外护套的过程。

1.2　试验设计

本文所搭建的模拟电弧引燃的试验平台主要由交流电源装置、保护电阻、数据采集装置和引弧装置4个部分组成，如图3所示。

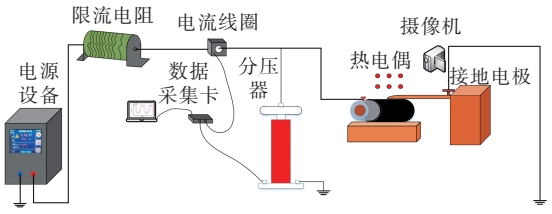


图3　模拟电弧引燃试验平台示意图

Fig. 3　Schematic diagram of the simulated arc ignition test platform

为满足试验条件，设计1台工频交流稳压电源箱，最大输出电流为10 A，额定电压为5 kV，可持续稳定供电；保护电阻选用额定功率10 kW、阻值100 Ω的波纹电阻；电缆型号为ZA-YJLW02-66/110 kV-1×400，长度为100 mm；数据采集装置分为电气量采集装置和温度采集装置；电气量采集装置由分压器和电流线圈组成，将二者测量到的数据上传至采集卡，采集频率为5 kHz；温度采集装置为K型热电偶，最高测量温度为1 300 ℃，在电缆表面上方5、10 cm位置各摆放3个热电偶，每一层热电偶左右间距均为5 cm；引弧装置由试验电极和熔丝组成，试验电极长度为15 cm，在电极另一端底部打孔，并在孔洞两侧打入螺丝，利用该小孔固定熔丝。为防止电缆外护套燃烧产生的炭化物堆积影响试验进行，将接地电极固定在步进电机上，通过控制步进电机使电极远离炭化物。在110 kV电缆样品外护套上预制一处直径为1 mm，连接金属护层的圆柱体缺陷，用1根熔丝连接金属护层和电极，护层为高压端，电极为接地端。为在金属护层接入电源输出端，在小样的一端切除了5 mm长的外护套，并在金属护层上打入螺丝，引弧装置如图4所示。考虑到实际故障电流水平为10 A左右，且电弧在电流较低时容易熄灭，难以持续，故本文选择4、6、8、10 A共4种电流工况进行试验，探究不同工况下电缆外护套的引燃特性。

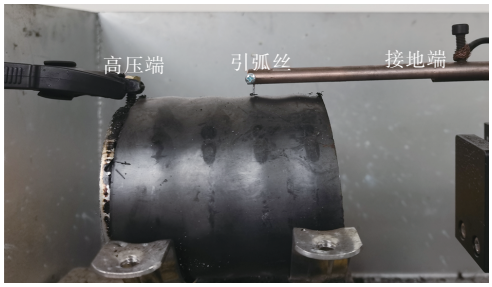


图4　引弧装置布置图

Fig. 4　Arc ignition device layout

试验电弧的产生需要靠熔丝熔断瞬间的高场强使间隙内的金属蒸气电离，而熔丝的规格会对电弧的产生造成影响，规格包括直径、长度等参数。由于电源设备升压需要一定的时间，熔丝较细时会导致过早熔断，此时电压较低，不足以维持间隙电弧，较粗时熔断时间过长，会使得设备发热严重，影响试验进程，均不利于试验的正常进行。基于此，选用不同规格的焊锡丝作为熔丝，焊锡丝熔点较低，在热量积累到一定程度时会瞬间熔断，而不同规格的焊锡丝在不同电流工况下的熔断时间有差异，因此在正式试验开始前，对不同规格焊锡丝在不同电流工况下的熔断效果进行测试，得到了如表1所示的试验结果，可基于该结果选择各试验工况下的焊锡丝。

表1　各电流工况下不同规格焊锡丝熔断时间

Table 1　Fusing time of solder wires of different specifications under different current conditions

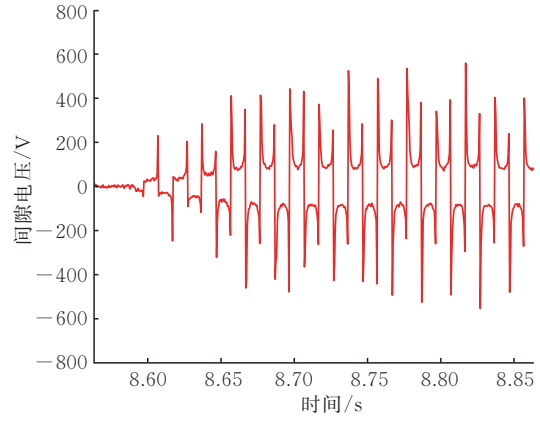
焊锡丝规格/mm	0.2	0.4	0.6	0.8
4 A熔断时间/s	3	34	65	＞300
6 A熔断时间/s	—	7	28	＞300
8 A熔断时间/s	—	—	—	45
10 A熔断时间/s	—	—	—	37

以4 A电流工况为例，当焊锡丝规格为0.2 mm时，由于其电阻与直径呈负相关，此时焊锡丝电阻较大，发热严重，在通流3 s时即会迅速熔融，无法维持到电流增加至更大工况，而回路中不可避免会出现一些接触电阻，这可能使0.2 mm焊锡丝提前熔断，导致试验失败；0.6 mm与0.8 mm焊锡丝熔断时间过长，试验设备发热过于严重，影响试验正常进行。因此，4 A电流工况下选用0.4 mm的焊锡丝。与此类似，对于其余3种电流工况来说，分别选用0.6、0.8、0.8 mm规格的焊锡丝。

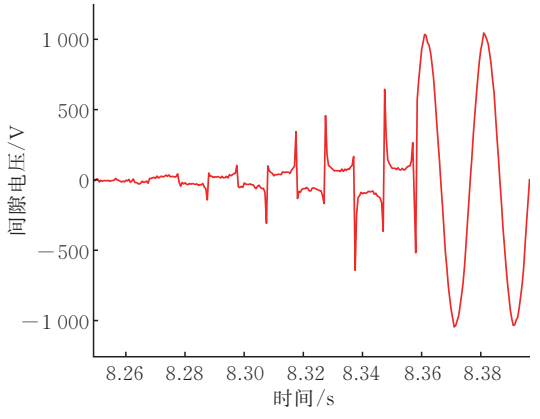
焊锡丝熔融后，在金属蒸气环境下，绝缘间隙是否能击穿燃弧与电源输出电压密切相关，而电弧形成

后的维持过程,则主要受电弧电流的影响。当间隙距离较大,而所采用的电弧电流较小时,可能由于输入能量低于耗散能量,而导致电弧熄灭。在引弧试验开始前,需将电极表面打磨光滑,尽量控制熔丝笔直无弯曲放置,这样可近似认为熔丝长度与电弧长度相等。电弧的长短会影响其向周围散出的热量,导致最后的试验结果不同,因此,试验的4种工况均使用相同长度的熔丝。根据110 kV电缆外护套的厚度为5 mm,进一步开展了焊锡丝熔融起弧试验,以5 mm为初始间距,0.5 mm为步长,测试了各电流工况下可维持燃弧过程的最大间距。

具体试验测试以10 A电流工况为例。在5 mm初始间距下,焊锡丝熔断瞬间在电缆导体和接地电极间实现击穿,产生电弧,间隙电压波形变化情况如图5所示。



(a)5 mm间距



(b)12.5 mm间距

图5　10 A电流工况下焊锡丝熔断瞬间间隙电压波形

Fig. 5　The gap voltage waveform at the moment the solder wire melts under 10 A arc conditions

焊锡丝熔断后间隙波形呈现“马鞍形”,即此刻间隙内形成电弧。在间距5 mm下,该电弧电流足够维持燃弧过程,因此电弧波形得以延续。当间隙距离增加至12.5 mm时,焊锡丝熔断瞬间在间隙内部充满了金属蒸气,间隙发生击穿,而当金属蒸气耗尽后,由于该电流工况下无法维持电弧的耗散能量,因此电弧很快熄灭,间隙电压波形如图5(b)所示,在约4个周波后电弧波形便已消失。

采用同样的方法对另外几种电流工况开展测试试验,各电流工况下可实现燃弧的最大间隙距离如表2所示,为了能在4种工况下起弧并持续燃烧,降低试验的偶然性,应在间隙长度最小值的基础上留有一定的裕度,故各电流工况下均选择6 mm长度的焊锡丝。

表2　不同电流工况下的最大燃弧间距

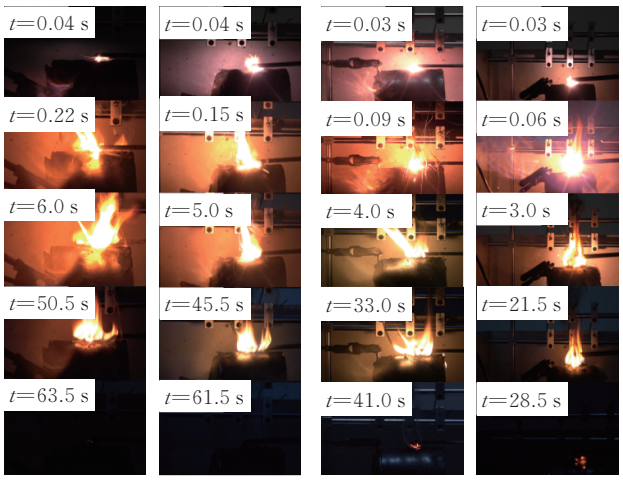
Table 2　Maximum arcing distance under various current conditions

电流/A	4	6	8	10
间距长度/mm	7.0	8.0	9.5	12.5

2　电缆引燃特性分析

2.1　单次燃弧过程分析

图6所示为110 kV电缆的单次燃弧过程,分别对应4～10 A共4种电弧电流工况。



(a)4 A　(b)6 A　(c)8 A　(d)10 A

图6　单次燃弧下电缆外护套引燃过程

Fig. 6　Ignition process of cable outer sheath under single arc

110 kV电缆外护套燃烧主要分为电弧引燃、电缆燃烧、余焰燃烧。图6中展示了焊锡丝熔断后的燃弧过程、电缆引燃瞬间、电弧作用下的电缆燃烧过程以及电弧自熄后的电缆燃烧情况。从图中可以看到,由于电弧温度极高,外护套均在极短的时间内被点燃,点燃时间与电流呈负相关的趋势,分别为0.22、0.15、0.09、0.06 s。外护套在燃烧过程中会逐渐形成膨胀炭化层,燃烧范围局限在电弧初始附着点周边,无熔融滴落物。

电缆燃烧后形成的炭化通道如图7所示。

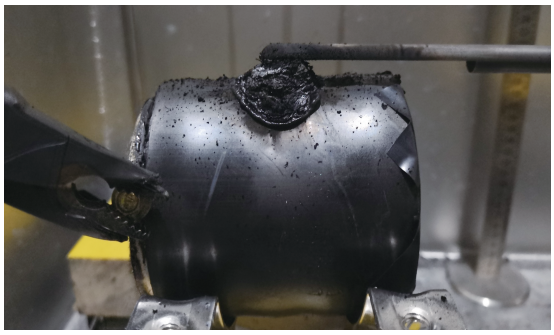


图7　外护套燃烧形成炭化通道

Fig. 7　The outer sheath burns to form a carbonized channel

在电缆燃烧过程中,PVC外护套作为110 kV电缆在小电流电弧故障下的主要燃烧物,在燃烧处产生炭化物,逐渐堆积于金属护层与接地电极间。由于该炭化物具有导电性,当所形成的炭化通道连接金属护层与接地电极后,电弧发生自熄,并在金属护层处形成了永久性接地故障。在更大电流的工况下,火焰燃烧更为剧烈,因而炭化物产生速度更快,电弧熄灭时间更早,各电流工况下电弧的熄灭时间为50.5、45.5、33.0、21.5 s。同时,在电弧熄灭后,由于电缆总体的燃烧时间较短以及外护套的阻燃性,使得各电流工况下的余焰燃烧时间较短,分别为13、16、8、7 s。

电缆上方所布置的6个温度监测点所测取的温升情况如图8所示。

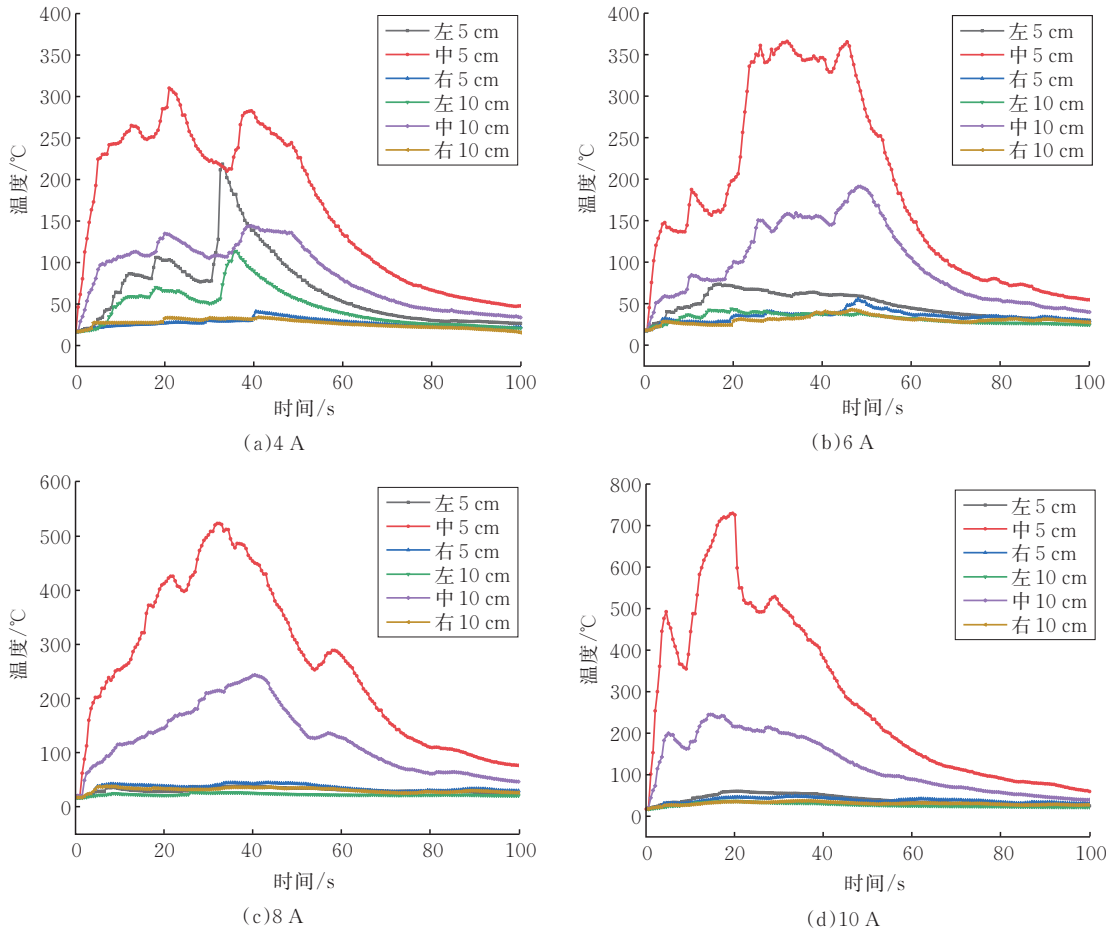


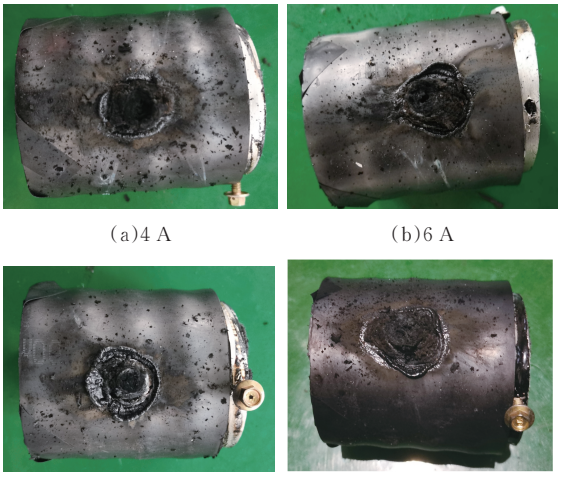
图8　单次燃弧下各测温点处温度曲线

Fig. 8　Temperature curves at each measuring point under single arc

可以看到,在4组电弧工况下,因燃烧区域集中在电弧周边,故整体上是中间位置的2个测温点温升相对更高。而在电缆燃烧过程中,火焰受热气流影响容易偏移,且电弧所产生的自由基和离子等也会对火焰的稳定产生影响,进而导致温升最显著的中间2个测温点所测取火焰温度曲线波动较大。其中4、6 A两种工况下,电缆燃烧过程火势更小,火焰更容易发生摆动和偏移,两侧的测温点也有较为明显的温升;而8、10 A电弧工况下,燃烧过程火势更大,火焰集中在电弧周边区域,偏移较小,两侧的测温点温升幅度较低。虽然燃烧过程火焰波动较大,但从温度变化最明显的中间处测温点温度数据可以看到,位于电弧正上方5 cm的最高温度受火势大小和爬升高度的影响,与电弧电流工况呈现明显的正相关趋势,分别为310、370、529、725 ℃。

图9为4种电流工况下电缆燃烧后的样貌图。焊锡丝熔断后,在孔洞间隙内产生电弧并引燃周边电缆外护套,外护套烧蚀后的炭化区域由所制造圆形孔洞

间隙向四周延伸,4组电弧工况下的电缆外护套表面烧蚀面积相差不大,直径约为2.6 cm。



(a)4 A　(b)6 A　(c)8 A　(d)10 A

图9　不同电弧工况下的电缆烧蚀样貌

Fig. 9　Cable ablation appearance under various arc conditions

4～10 A电弧工况下,电缆燃烧后的烧蚀量和质量损失如表3所示。由于单次燃弧时,电弧电流大小和电弧作用时间均不相同,因此可以看到,表3中除4 A电弧电流下的数据相对较小外,6～10 A电弧工况下的数据相差不大,无明显的规律性。

表3　单次燃弧下的电缆质量损失

Table 3　Cable quality loss under single arc

电流/A	4	6	8	10
烧蚀量/g	1.3	2.2	1.8	2.0
质量损失	0.17%	0.30%	0.24%	0.26%

2.2　多次重燃过程分析

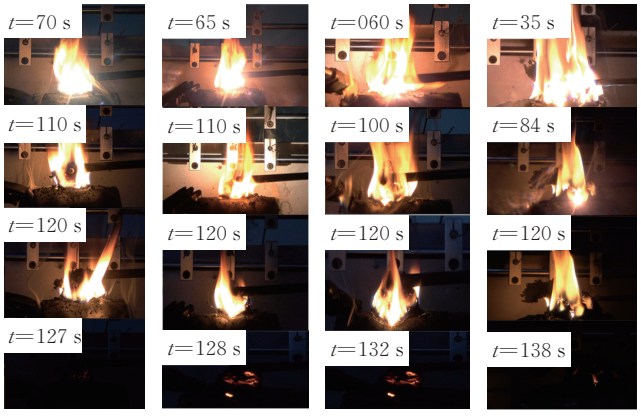
由于炭化通道的形成,各电流工况下的电弧持续时间各不相同,且时间较短。考虑到实际故障中,在发生单次燃弧后,可能只消耗了局部区域的PVC外护套,炭化通道周围区域可能仍有大量未燃烧或部分热解但未充分炭化的PVC材料残留,当系统再次出现过电压时,可能会发生二次燃弧。为进一步分析不同电流工况下外护套多次重燃的燃烧特性,需要控制电极远离炭化通道,保证电弧再次燃烧。电极移动速度会影响电弧的持续情况,若电极移动过慢,可能导致电极未移出炭化通道,速度过快时,电弧被迅速拉长,电流无法维持长电弧,可能导致熄灭。因此,为确定可用于开展电缆引燃试验的电极移动速度范围,对不同电流工况下的电极移动速度进行了测试试验。将初始速度定为1 mm/s,若该速度下可成功引燃,则以0.01 mm/s为步长,依次减少或增加电极速度进行试验测试,以确定该电流工况下的电极速度范围;若该速度下无法引燃,则采用二分法先找到可引燃的电极速度,再重复上述过程确定速度范围。各电流工况下的电极移动速度范围如表4所示,采用范围内的中位数作为电极移动速度。4～10 A下电极移动速度为0.12～1.08 mm/s。

表4　不同电流工况下的电极速度范围

Table 4　Electrode speed range under different current conditions

电流/A	4	6	8	10
速度范围/mm/s	0.04～0.19	0.11～0.73	0.46～1.28	0.61～1.55

电弧持续作用时,由于外护套难以延燃,电弧周围的PVC物质燃烧后,火势会迅速减小,考虑电缆燃烧最剧烈的时间段,选取多次燃弧的时间为120 s。电缆外护套在4种电流工况下均燃弧120 s,后将电源断开,探究各电流工况在多次燃弧过程中的引燃特性。图10为多次燃弧过程下的110 kV电缆燃烧发展过程。



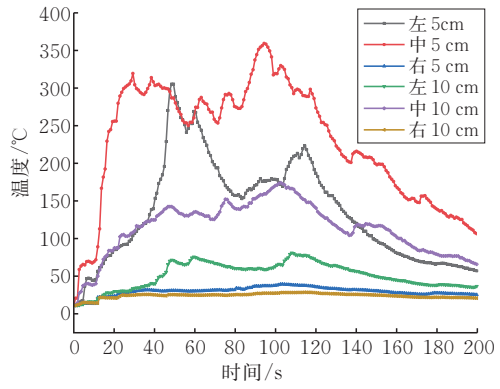
(a)4 A　(b)6 A　(c)8 A　(d)10 A

图10　多次燃弧下电缆外护套引燃过程

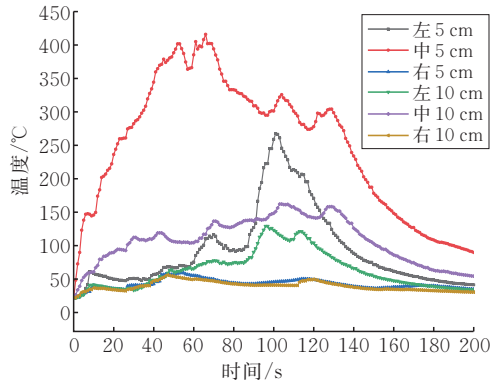
Fig. 10　Ignition process of cable outer sheath under multiple arc

该燃烧过程主要包括了电弧持续下的电缆剧烈燃烧过程和电弧切断前后的燃烧状态及火焰熄灭时刻。从图10中可以看到,4～6 A电流工况下,在电弧持续时间内,火势均较为稳定,未出现火势明显减小的情况;而电流越大,外护套烧蚀越严重,8～10 A电流工况下,电缆燃烧至约84～100 s时,电弧周边的PVC外护套消耗较大,火势出现明显下降。在120 s电弧切断后,由于110 kV电缆为阻燃型号,外护套难以维持燃烧,因此,在无电弧高温维持的情况下,火焰相继熄灭。电流越大,外护套越容易形成自持燃烧,余焰时间越长。

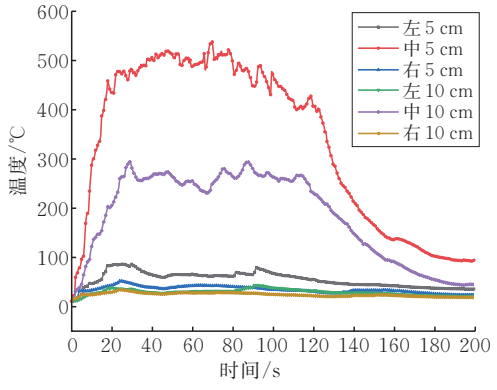
图11为多次燃弧过程中,各测温点处的温度变化情况,可以看到各测温点的温升情况整体上与单次燃弧时的温升过程较为接近,同样是位于中间位置的测温点温升最为显著,且火焰最高温度也有一定上升,分别为360、410、539、790 ℃。在4、6 A电流工况下,两侧测温点也有较为明显的温升过程。



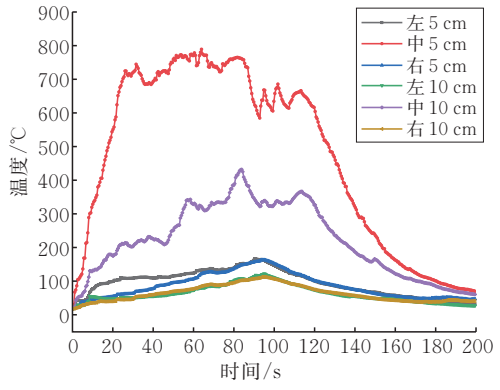
(a)4 A



(b)6 A



(c)8 A

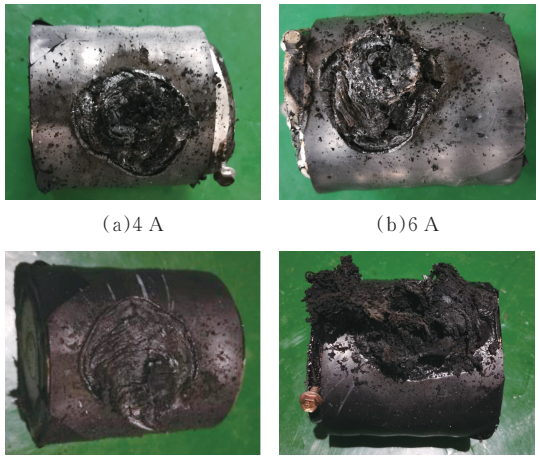


(d)10 A

图 11　多次燃弧下各测温点处温度曲线

Fig. 11　Temperature curves at each measuring point under multiple arc

图 12 为多次燃弧情况下电缆燃烧后的样貌。与单次燃弧的结果相比,可以看到电缆外护套表面的烧损明显增加,受损部位同样近似圆形,4～10 A 工况下的烧蚀区域直径约 6.3～7.5 cm。



(a)4 A　(b)6 A　(c)8 A　(d)10 A

图 12　多次燃弧下的电缆燃烧样貌

Fig. 12　Cable burning appearance under multiple arc

表 5 为多次燃弧情况下,4 组电弧电流工况下电缆烧蚀量、质量损失、炭化深度和炭化速率情况,可以看到,在相同的燃弧时间下,电缆的烧蚀程度加深,各测量数据均与电流呈正相关关系。

表 5　多次燃弧下的电缆质量损失

Table 5　Cable quality loss under multiple arc

电流/A	4	6	8	10
烧蚀量/g	7.5	8.2	8.6	13.2
质量损失	1.00%	1.05%	1.15%	1.73%
炭化深度/mm	3.2	4.0	4.8	5.0
炭化速率/mm/s	0.027	0.033	0.040	0.042

与文献[6]中的燃烧结果相比,孔洞形状相似,但是文献中电弧施加位置外护套被完全破坏,且在该位置附近较大范围有明显烧蚀痕迹,而本试验的烧蚀物会堆积在电极周围,无明显延燃过程。一方面是因为文献中的电弧作用时间长,约为 8 min,而本试验的电弧会发生自熄。另一方面是两者的能量传递方式不同,文献中的雅各布天梯电弧主要是通过热辐射和对流加热的方式引燃外护层,可以部分分解电弧非直接接触的邻近区域。本文试验结果与文献[7]呈现的大面积带状燃烧区域也有所区别,一方面同样是由于能量传递方式和燃烧时间不同,另一方面是因为文献[7]中对电缆表面分别进行了 100～200 ℃的预加热,使得电弧引燃和火焰蔓延变得更加容易,而实际运行中,电缆表面无法达到此温度。本文模拟真实电弧故障情况,所产生的电弧与电缆材料直接接触,通过热传导的方式引燃电缆,破坏范围主要在电弧周边,故烧蚀面积与文献相比相对较小。

3　隧道内故障点邻近电缆损伤风险分析

为进一步分析故障电缆燃烧过程对隧道各层电缆的温升影响，以及判断是否会对邻近电缆造成损伤，需要建立电缆引燃仿真模型。根据试验可知，外护套在电弧作用下发生燃烧时，火焰集中在电弧周围，此过程可在仿真中将电弧等效为一个火源，并利用试验电缆的温升特性作为验证依据，在仿真中实现火源模型对电弧引燃电缆过程的等效，在电缆隧道仿真模型的故障相电缆上施加该火源，进行电缆隧道动态火灾仿真模拟，根据隧道内各层电缆外护套的温度分布情况，对各层电缆在不同小电流电弧故障工况下的损伤风险进行分析。

3.1　仿真模型搭建

以某地区不同电压等级电缆混合敷设隧道为模型参考，电缆隧道内部布置情况如图13所示。

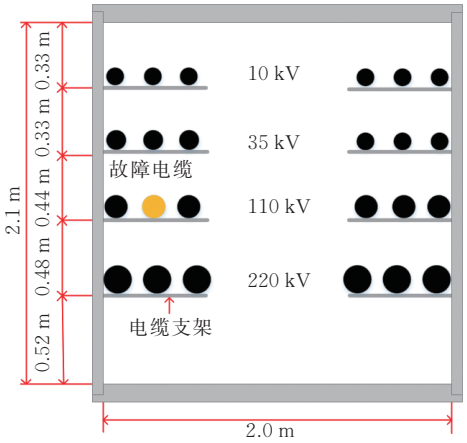


图13　电缆隧道布置图

Fig. 13　Cable tunnel layout

将110 kV故障相电缆设置于第3层中间相。根据实际电缆隧道布置，建立一段10.0 m×2.0 m×2.1 m（长×宽×高）的仿真模型，如图14所示。

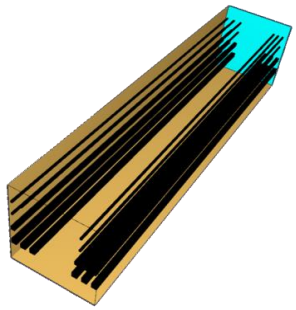


图14　电缆隧道仿真模型

Fig. 14　Cable tunnel simulation model

为模拟故障电弧的引燃过程，在故障电缆中间位置设置一孔洞，并在孔洞内部设置一圆柱体火源，用于等效电弧。孔洞直径设为1 cm，孔洞内部布置的火源直径为0.5 mm。在故障电缆上两层电缆外护套表面布置热电偶，用于测量电缆外护套在故障时的温度变化情况，以此分析电缆损伤风险。此外，将隧道两边设置为开放边界，空气自由流通，按照隧道内的温度监测数据，将初始环境温度设为30 ℃，隧道其余边界为混凝土。110 kV电缆的燃烧物主要为外护层，电缆内部因金属护层的阻挡不发生烧蚀，故采用简化的3层结构：铜芯、绝缘层、外护套，仅在外护套上设置燃烧反应，电缆各层的厚度及相关热参数如表6所示。根据试验选取的燃弧时间，将仿真时间设定为120 s。

表6　电缆各层材料参数

Table 6　Cable material parameters

材料名称	PVC	XLPE	铜导体
比热容/kJ•(kg•K)$^{-1}$	1.5	2.2	0.38
热导率/W•(m•K)$^{-1}$	0.5	0.43	387
密度/kg/m^3	1 500	920	8 940
110 kV各层厚度/mm	5	16	19

根据试验电缆尺寸，建立10 cm×5 cm×20 cm的仿真区域，对于非主要燃烧区域的孔洞两边部分，网格大小设置为1 cm×1 cm×1 cm；而对于燃烧部分的网格设置，网格敏感性分析表明，网格尺寸的经验值为特征火焰直径的1/16～1/4较为合适，应用中可取1/12～1/8。特征火焰直径D^*如式(1)所示。

$$D^* = \left(\frac{Q}{\rho_\infty c_p T_\infty \sqrt{g}} \right)^{\frac{2}{5}} \tag{1}$$

式中：Q为火源的热释放速率，kW；ρ_∞为空气密度，1.2 kg/m^3；c_p为空气比热容，取1 kJ/(kg•K)；T_∞为环境空气温度，293 K；g为重力加速度，9.81 m/s^2。

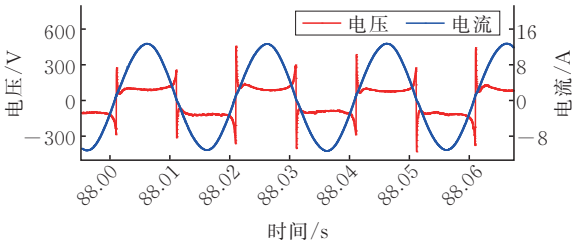
根据火源特征参数计算后，网格取值范围约为3.5～4.7 mm，为提高模型精确度，模型尺寸应尽量为网格尺寸的整数倍，使模型位于网格边界上。因此在本模型中，将孔洞范围内的整个燃烧区域网格设置为5 mm×5 mm×5 mm。

3.2　等效火源模拟方法及验证

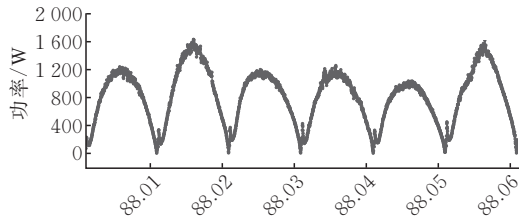
等效火源功率的选取则主要取决于电弧功率的大小。在燃弧过程中，电弧输入能量主要通过热传导、热辐射及对流换热3种方式耗散至周围环境，而仅有部分能量参与了电缆绝缘材料的引燃过程，故引入热转换系数，根据IEEE 1584《弧闪危害计算指南》将热转系数初值设定为0.4[14]，利用电弧功率和热转系数计算获得火源功率初值。

电弧产生后的正常燃弧过程中，弧长可能受周围气体流动和自生磁场等影响，不断伸长或缩短。弧长的变化会引起弧压数值的波动，若仅采用试验燃弧过程中某一时刻的弧压和电流计算电弧功率，难免与实际电弧功率存在偏差。因此，根据试验中各电

流工况下电缆的引燃时间，取各电流工况下电缆发生引燃前的电弧电压电流波形，计算每个时刻的瞬时电弧功率，绘制变化曲线并对其积分，利用电弧产生至电缆点燃期间电弧的总能量计算出该过程内的平均电弧功率，以此作为各工况下的电弧功率。以10 A电流工况为例，图15为110 kV电缆在引燃前的电弧电压、电流波形及功率波形，根据初始热转换系数，得到各电弧工况下的初始等效火源功率，如表7所示。



(a)电压、电流



(b)功率

图15　10 A工况下的电弧特征波形

Fig. 15　Arc characteristic waveform under 10 A condition

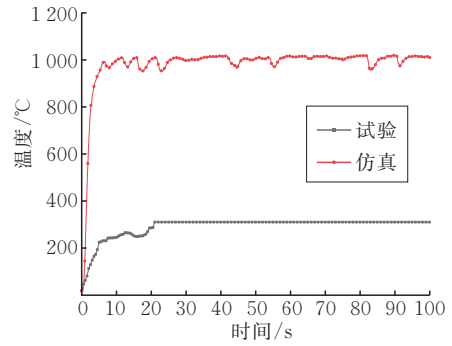
表7　电弧功率及初始等效火源功率

Table 7　Arc power and initial equivalent fire source power

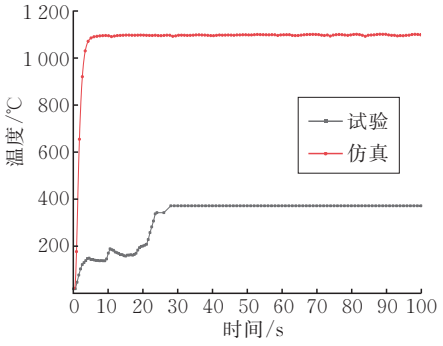
电流/A	4	6	8	10
电弧功率/W	440	535	669	907
初始火源功率/W	176	214	268	363

通过初始等效火源功率仿真的温度曲线与实际的燃烧温度曲线有区别。为了修正火源功率，需要将试验的温升特性曲线与仿真曲线进行比对。对于两种燃弧过程，单次燃弧与实际故障的发展过程较为吻合，且试验发现，电弧正上方5 cm处为火焰中心的温度。因此，选择单次燃弧下该处的温度曲线作为验证数据。

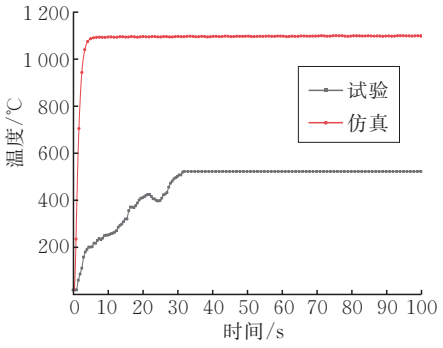
根据引燃试验所测取的温度曲线，由于热电偶位置固定，而火焰燃烧过程受电弧作用等影响，火柱爬升高度及位置的变化较为频繁，因此位于孔洞间隙正上方5 cm处的最大温升曲线均波动较大。而在仿真模拟计算中，当火源热释放速率达到最大数值后，火焰燃烧过程即趋于稳定，因此难以将试验数据与仿真数据直接进行比对验证。为此，对110 kV电缆在电弧作用下燃烧时的温升曲线进行简化处理，认为该温度曲线在达到最高数值后便不再变化。根据热转系数均为0.4时所计算的火源功率，进行了电缆引燃过程的数值模拟，并将仿真所得电缆燃烧温升数据与试验数据对比，如图16所示。



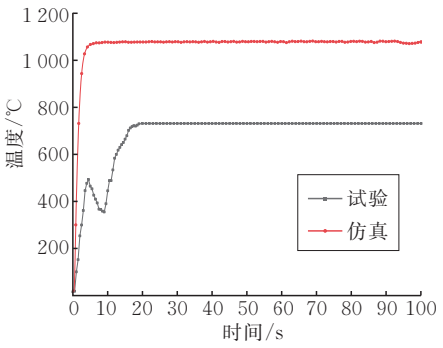
(a)4 A



(b)6 A



(c)8 A



(d)10 A

图16　仿真与试验对比验证

Fig. 16　Comparative verification between simulation and experiment

在各工况下，采用0.4热转换系数等效的火源功

率，仿真所测取的电缆燃烧温度均高于试验数据，且在默认1 s的火源热释放速率上升时间下，其温度上升速率也相差较大。

为提高仿真模拟中火源对电弧引燃电缆过程的等效性，根据仿真与试验温升数据差值，在以上初始火源功率基础上对热转系数和火源功率逐步调整，直至温升趋于平稳后的最大数值能与试验数据较好贴合。

对于110 kV电缆电弧等效火源，由图16可知，在初始火源功率下，不仅电缆引燃后温度趋于平稳时的温度相差较大，而且温度上升速率也差距较大，因此，在调整火源功率的基础上，对等效火源的上升过程也进行调整，即根据试验温升曲线特征点，计算各点温度与最高温度的比值，并使用该比值定义对应时间节点处热释放速率与最大热释放速率的比值，以此逐步确定火源的上升过程。图17为110 kV电缆在等效火源引燃情况下，仿真温升数据与试验数据的对比验证情况以及火源热释放速率变化曲线。

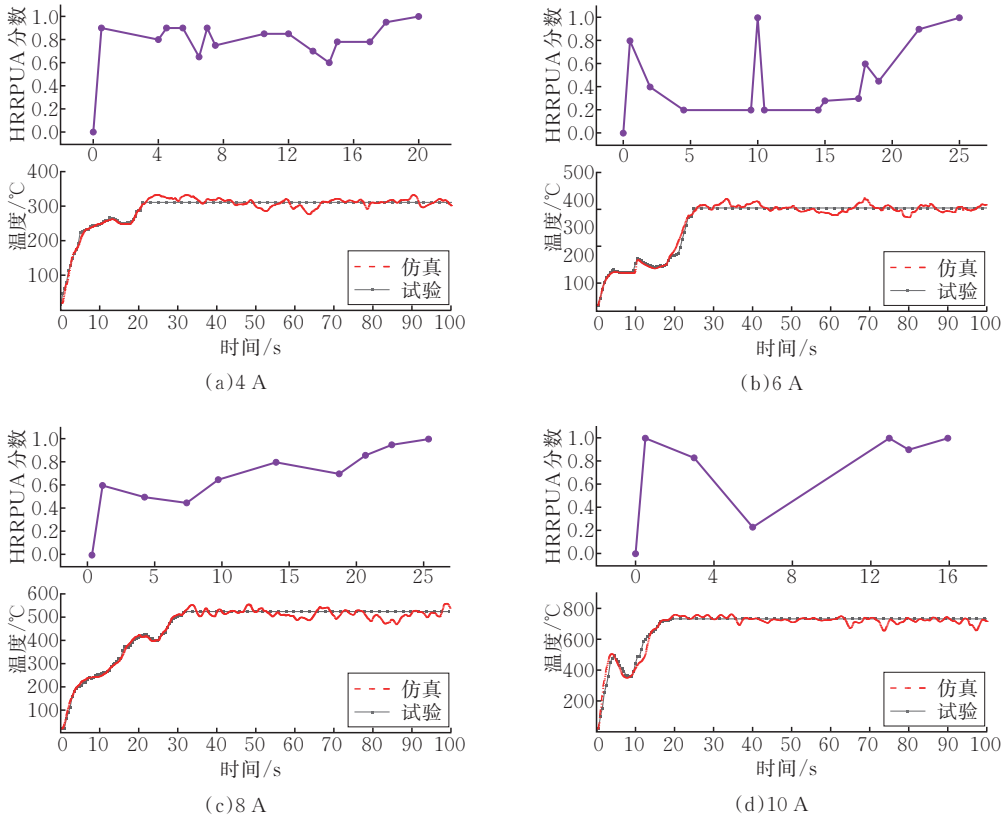


图17　110 kV电缆等效火源功率验证及热释放速率曲线

Fig. 17　110 kV cable equivalent fire source power verification and heat release rate curve

改进调整后的110 kV电缆小电流电弧热转换系数和等效火源功率见表8。可以看到，对于110 kV电缆的小电流故障电弧，4～10 A电流工况下的热转换系数相差不大，均接近于0.3。

表8　110 kV电缆电弧热转换系数和等效火源功率

Table 8　110 kV cable arc heat conversion coefficient and equivalent fire source power

电流/A	4	6	8	10
热转换系数	0.29	0.28	0.31	0.30
等效火源功率/W	128	150	205	275

3.3　邻近电缆损伤风险分析

由试验可知，在第3层中间相的110 kV电缆发生小电流电弧故障引燃后，故障点区域较小，被电弧引燃的范围主要集中在外护套击穿位置周围，因此与故障相同为第3层的相邻电缆外护套表面温升较小，不具有损伤风险。而外护套燃烧时火焰高度较低，因此对第1层电缆的影响较小，也不具有损伤风险。故障相电缆在电弧作用下引燃后，记录故障点上层电缆外护套表面温度变化情况，如图18所示。

根据试验获得的电缆引燃特性数据可知，在单次燃弧过程下，电缆燃烧后均会形成炭化通道，导致电弧自熄，其自熄时间范围为21.5～50.5 s，结合图17所示的隧道中各层电缆外护套温升曲线，参考IEC 60502，*Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages from* 1 kV（U_m=1，2 kV）*up to* 30 kV（U_m=36 kV）[15]中规定的电缆运行温度上限，PVC为70 ℃，在4～6 A电弧工况下，电弧能量较低，故障电缆燃烧时火势较小，上层电缆外护

套处温度均不超过70 ℃,而电弧电流上升至8～10 A时,在30 s左右上层电缆外护套温度均超过了70 ℃,护套会熔融软化。在多次燃弧过程下,仿真达到120 s时的故障点上层温度在4～10 A电流工况下的温度与单次燃弧下电弧自熄时的温差较小。综上,2种燃弧过程下,8 A及以上电流工况下,故障电缆同侧上层电缆存在损伤风险。

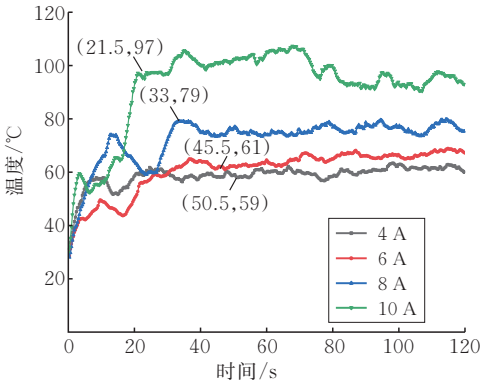


图18　故障点上层电缆外护套温度曲线

Fig. 18　Temperature curve of the outer sheath of the upper cable at the fault point

4　结　论

本研究通过试验与仿真,探究了110 kV阻燃电缆外护套电弧引燃对邻近电缆的损伤风险,主要结论如下。

1)单次燃弧过程中,火焰集中于电弧周边区域,在电弧正上方测量的温度最高,4～10 A下分别为310～725 ℃。且电弧会因炭化通道的形成发生自熄,自熄时间与电流呈负相关。多次燃弧下现象规律相似,但随作用时间累积,烧蚀程度进一步加剧。

2)根据护套的引燃特性,建立等效火源仿真模型,并利用电缆燃烧过程的温升特性作为验证数据,通过比对试验与仿真温升曲线,确定了4～10 A小电流电弧故障的热转换系数约为0.3,并据此得到了对应的等效火源功率范围约为128～275 W。

3)电弧电流达到8 A时,在电弧故障发生30 s后,故障点上层电缆表面会超出安全限值,存在损伤风险,隧道内的其他电缆无损伤风险。故障电弧电流在8 A以下时,隧道各层温度在安全限值以内,无损伤风险。

参考文献:

[1] 张佳庆, 张博思, 王刘芳, 等. 电线电缆带电燃烧研究进展[J]. 材料导报, 2017, 31(15): 1－9, 35.

[2] 张泽晋, 陈彦伊, 廖雁群, 等. 高压电缆外护套特征阻抗建模及破损检测方法[J]. 浙江电力, 2024, 43(9): 78－87.

[3] 刘凤莲, 卢金奎, 张涵轶, 等. 高压电缆接头防火隔爆措施的有效性研究[J]. 高压电器, 2023, 59(11): 258－268.

[4] 郭易鑫. 基于EMTP和BP神经网络的超高压电缆护套雷击感应电压研究[J]. 电瓷避雷器, 2022(6): 31－37.

[5] 舒中俊, 冯俊峰, 陈南, 等. PVC电缆及其护套原料燃烧性能的对比[J]. 消防科学与技术, 2006, 25(2): 247－249.

[6] 刘旭晖, 朱振宇, 郭玥, 等. 一种电弧引燃电缆的电气火源模拟方法[J]. 电力工程技术, 2022, 41(2): 136－142.

[7] 李陈莹, 陈杰, 张伟, 等. 电缆表面温度对电弧引燃电缆及火焰蔓延影响[J]. 消防科学与技术, 2022, 41(2): 180－184.

[8] 徐志豪, 朱振宇, 靖子洋, 等. 1 kV配电电缆的电弧引燃过程研究[J]. 火灾科学, 2023, 32(3): 135－143.

[9] 吴执, 张武超, 王琅, 等. 烟囱效应对电缆隧道火灾蔓延影响研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2023, 42(2): 60－66.

[10] 安伟光, 王涛, 梁凯, 等. T型地下综合管廊电缆火灾数值模拟[J]. 消防科学与技术, 2020, 39(8): 1120－1123.

[11] 刘杰, 应迪, 李秋平, 等. 风速和火源位置对L形综合管廊电缆舱室火灾蔓延特性影响[J]. 消防科学与技术, 2023, 42(7): 944－949.

[12] 王明年, 田源, 于丽, 等. 城市综合管廊电缆火灾数值模拟及影响因素分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2018, 14(11): 52－57.

[13] 关根志. 高电压工程基础[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.

[14] IEEE 1584, Guide for performing arc-flash hazard calculations[S].

[15] IEC 60502, Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages from 1 kV(U_m=1, 2 kV) up to 30 kV (U_m=36 kV)[S].

(责任编辑:毛　星)