

· 电力电缆温度监测专题 ·

防火带材对高压电缆载流量和温度监测影响研究

曹京荣¹, 徐超², 陈杰¹, 姜海波³, 李陈莹¹, 谭笑¹, 胡丽斌¹

(1. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103; 2. 国网无锡供电公司, 江苏 无锡 214000; 3. 国网江苏省电力有限公司, 江苏 南京 210024)

摘要:为评价防火带材对电缆载流量和温度的影响,搭建 220 kV 电缆载流量验证平台,结合热路模型试验分析了不同类型防火带材对高压电缆载流量及监测温度影响。分析数据表明,线芯温度稳定在 90 ℃ 时,陶瓷纤维、PVC 以及橡胶 3 类防火带材绕包内外温差与线芯和环境温差之比分别为 29.44%, 4.74% 及 4.52%, 橡胶类防火带材散热效果最优, PVC 防火带材稍逊于橡胶类防火带材, 两者散热性能远优于陶瓷纤维防火带材; 采用绕包陶瓷纤维, PVC 以及橡胶类防火带材电缆最大允许载流量为非绕包载流量的 81.9%, 96.2%, 96.4%, 且当电缆达到最大允许载流量时, 3 类防火带材表面温度分别为 38.7 ℃, 52.7 ℃, 52.9 ℃, 低于未绕包防火带材电缆外护层表面最高允许温度 55 ℃。因此, 对于分布式光纤测温系统, 电缆线路表面温度报警阈值应相应降低, 确保最大载流量情况下线芯温度不超过 90 ℃。

关键词:防火带材; 热路模型; 电缆载流量; 温度监测

中图分类号: TM73

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2019)01-0019-05

0 引言

近年来,国内外电力电缆火灾事故频频发生,造成较大经济损失及不良社会影响。为强化电力电缆运维管控,防止电力电缆火灾事故的发生和扩大,电缆本体及附件绕包防火带材作为电缆防火的重要技术手段,得到了广泛关注与研究,在 110 kV, 220 kV 高压电缆中已有应用。文献[1]试验验证了防火封堵材料会影响电缆散热,降低电缆载流量,指出在电缆容量设计时,应当考虑防火封堵材料对电缆的影响。文献[2]探讨了埋砂敷设防火措施对高压电缆载流量的影响,分析了不同埋砂热阻系数对电缆载流量的影响程度。绕包防火带材也会增加热阻,阻碍电缆正常散热,降低电缆的载流量,但目前绕包防火带材对电缆载流量和温度影响的定量研究尚属空白。

分布式光纤测温系统通过监测电缆表面温度计算电缆导体温度,是电缆状态监测和防火的重要手段^[3-4]。然而,对于防火带材绕包电缆,若分布式光纤测温系统以防火带材表面温度作为电缆外护层的参考温度,电缆载流量计算将产生偏差。因此,需要研究绕包防火带材对电缆温度监测和载流量的影响,进而重新确定电缆的最大允许载流量和温度监测报警阈值,确保最大负荷下电缆线路载

流量在安全范围之内。

目前国内外常用的电缆导体温度计算方法有热路法^[5-10]和数值分析法^[11-13],文献[14]基于等效热路提出了基于电缆外护层表面温度测量值的电缆导体实时温度计算方法,文献[15]针对海底电缆结构独特,敷设环境复杂的特点,通过有限元分析法计算海底电缆的载流量,比较了热循环试验验证与热路法计算结果的差异。国际电工协会(International Electrician Commission, IEC)有关标准、国家相关标准对电缆导体温度的计算都基于热路法。此种方法基于电缆稳态热路,计算电缆各层的损耗、热阻,通过各层温升线性叠加得到电缆的导体温度。当电缆外部绕包防火带材后,其热路模型发生改变,需要评价绕包防火带材对电缆温度监测和载流量计算的影响程度,确定不同防火带材的热阻,修正电缆的热路模型并计算其载流量。

文中在实验室搭建 220 kV 电缆载流量验证平台,有效还原电缆运行现场环境,进行高压电缆绕包橡胶、PVC、陶瓷纤维类防火带材对温度以及载流量试验研究,通过试验获得 3 种防火带材的热阻,并基于经典热路法定量分析绕包 3 种不同防火带材对电缆温度监测和最大允许载流量计算的影响,结果可为电力电缆防火带材应用提供直接参考,并为后续应用研究工作打下基础。

1 高压电缆稳态热路模型

电缆运行中的损耗主要包括导体电阻损耗、绝

收稿日期:2018-09-10;修回日期:2018-10-14

基金项目:国家电网有限公司科技项目“城市廊道电缆优化及运行技术研究”

缘层介质损耗、金属护套和铠装层损耗。当电缆长期通过电流达到稳态后,电缆各部分损耗热量和向周围环境媒质散发的热量相等。稳态状况下,电缆发热特性可利用热路或热流场的概念进行分析,其稳态等效热路模型^[16-18]如图1所示。

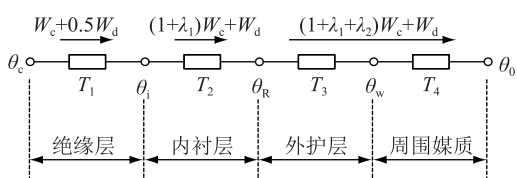


图1 电缆稳态热路模型

Fig.1 Steady-state thermal model of cables

图中: T_1, T_2, T_3, T_4 分别为绝缘层热阻、内衬层热阻、外护层热阻、外界媒质热阻; λ_1, λ_2 分别为金属护套损耗、铠装损耗与线芯损耗之比; W_d, W_c 分别为电缆单位长度介质损耗、线芯损耗; $\theta_0, \theta_w, \theta_c$ 分别为环境温度、电缆外表面温度、电缆导体工作温度。

对于高压单芯电力电缆,可根据线芯电流和外护层表面温度,推算出电缆线芯导体工作温度:

$$\theta_c = \theta_0 + \left(W_c + \frac{1}{2} W_d \right) T_1 + [(1 + \lambda_1) W_c + W_d] T_2 + [(1 + \lambda_1 + \lambda_2) W_c + W_d] T_3 \quad (1)$$

电缆线芯损耗 W_c 为:

$$W_c = I_c^2 R_c \quad (2)$$

式中: I_c 为线芯电流; R_c 为导体在 θ_c 温度时的交流电阻:

$$R_c = R_d [1 + \alpha (\theta_c - 20)] \quad (3)$$

式中: R_d 为线芯为 20 °C 电缆直流电阻; α 为电缆线芯的温度系数。

由式(1)和式(2)可推导出电缆稳态时长期允许载流量的计算公式:

$$I_c = \sqrt{\frac{(\theta_c - \theta_0) - W_d(0.5T_1 + T_2 + T_3)}{R_c(T_1 + (1 + \lambda_1)T_2 + (1 + \lambda_1 + \lambda_2)T_3)}} \quad (4)$$

对于绕包防火带材的电缆,采用热路法对其进行分析,则其等效热路模型如图2所示。

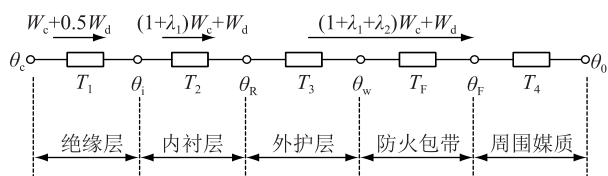


图2 电缆绕包防火带材后稳态热路模型

Fig.2 Steady-state thermal model of cables wrapped with fireproof belt

图中: T_F 为防火带材热阻。

对于高压单芯电力电缆,绕包防火带材后,其电缆线芯导体工作温度和长期允许载流量分别如

式(5)和式(6)所示:

$$\theta_c = \theta_0 + \left(W_c + \frac{1}{2} W_d \right) T_1 + [(1 + \lambda_1) W_c + W_d] T_2 + [(1 + \lambda_1 + \lambda_2) W_c + W_d] (T_3 + T_F) \quad (5)$$

$$I_c = \sqrt{\frac{(\theta_c - \theta_0) - W_d(0.5T_1 + T_2 + T_3 + T_F)}{R_c[T_1 + (1 + \lambda_1)T_2 + (1 + \lambda_1 + \lambda_2)(T_3 + T_F)]}} \quad (6)$$

2 不同类型带材热阻试验与计算

2.1 试验平台

为有效还原电缆现场运行环境,搭建了 220 kV 电缆载流量验证平台。以首尾连接的 YJL203-Z-127/220 1×630 mm² 高压电力电缆作为试验样品,总长度 17 m,利用热循环装备对试验样品进行升流加热,并采用热电偶、无纸记录仪进行温度测试。试验平台布置如图3所示。

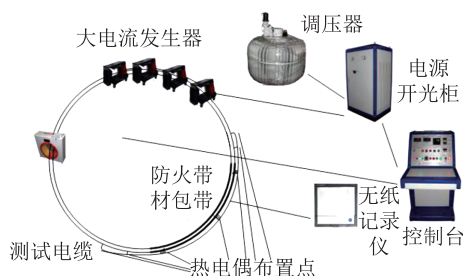


图3 试验场地布置

Fig.3 Test site layout

为对比分析不同电缆绕包防火带材的热阻和对电缆载流量的影响,采用目前广泛使用的陶瓷纤维、PVC、橡胶类防火带材进行试验检测,在电缆轴向方向取 5 个测试点,热电偶布置如图4所示。

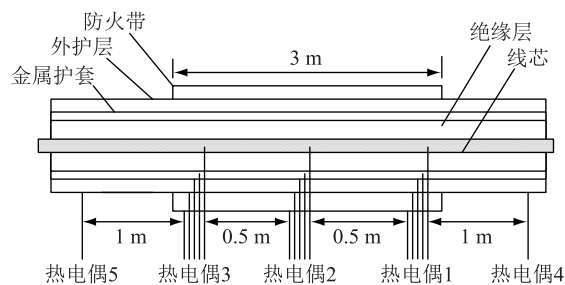


图4 试验电缆热电偶布置

Fig.4 Test cable thermocouple layout

2.2 试验结果

为了分析不同种类电缆绕包防火带材的散热效果和热阻,文中采用 2 种方式进行试验分析。方式 1: 电缆通过规定电流 (826 A), 温度稳定后, 记录

不同测点的温度数值;方式2:维持线芯温度90℃,测量不同测点的温度数值。

2种方式温度测量结果如表1所示。由此可见,线芯温度稳定在90℃时,陶瓷纤维、PVC以及橡胶类3种防火带材绕包内外表面温差与线芯-环境温度之比分别29.44%,4.74%和4.52%,橡胶类防火带材散热效果最优,PVC防火带材稍逊于橡胶类防火带材,两者散热性能远优于陶瓷纤维防火带材。

表1 高压电缆防火带材绕包温度测试结果

Table 1 Temperature test of high voltage cable wrapped with different fireproof belt °C

测试点	陶瓷纤维		PVC		橡胶	
	方式1	方式2	方式1	方式2	方式1	方式2
1 外护层外表面	43.3	59.2	39.1	50.9	35.1	46.7
1 绕包带材外表面	38.4	43.6	38.4	48.2	34.1	44.1
2 外护层外表面	44.1	61.4	39.2	51.1	35.1	47.2
2 绕包带材外表面	38.2	42.6	38.2	48.1	34.2	44.3
3 外护层外表面	43.7	60.1	39.1	50.7	35.1	47.5
3 绕包带材外表面	37.5	41.6	38.3	48.3	34.2	44.7
4 非绕包电缆表面	39.5	46.0	38	48.7	34.7	45.6
5 非绕包电缆表面	38.8	49.0	38.2	49.0	34.5	46.0
环境温度	33.0	30.1	32.6	33.1	34.5	28.8

试验方式2下,不同类型防火带材绕包电缆通过电流及外护层、绕包层温差如表2所示。电缆通过规定电流温度稳定后,不同防火带材电缆外护层外表面和绕包层表面温差在不同测试位置相差不大,为求不同测试防火带材的热阻,取3个温度测试均值进行计算,即 $\Delta\theta_{陶瓷}$ 为5.67℃, $\Delta\theta_{PVC}$ 为0.83℃, $\Delta\theta_{橡胶}$ 为0.93℃。

表2 不同防火带材电缆外护层和绕包层表面温差

Table 2 Surface temperature difference between cable sheath and cladding with different fireproof belt

带材类别	试验电流/A	测试点温差/°C			平均值
		1	2	3	
陶瓷纤维	826	4.9	5.9	6.2	5.67
PVC	786	0.7	1.0	0.8	0.83
橡胶	867	1.0	0.9	0.9	0.93

采用微欧姆计测试试验样品电阻为494.9 μΩ(环境温度32℃)。此时陶瓷纤维、PVC、橡胶类防火带材线芯温度均值分别为55.3℃,51.5℃和48.67℃,根据不同温度下电阻率计算公式,可得到电阻率 $R_{陶瓷}$ 为 $3.14 \times 10^{-5} \Omega/m$, R_{PVC} 为 $3.12 \times 10^{-5} \Omega/m$, $R_{橡胶}$ 为 $3.09 \times 10^{-5} \Omega/m$ 。文中采用电流源作为电源,被试电缆金属护套两端断开,因此其介质损耗和金属护套损耗忽略,即介质损耗 W_d 为0,金属

套损耗系数 λ_1 ,铠装层损耗系数 λ_2 均为0。

将电阻、电流以及其他参数带入如下公式:

$$\Delta\theta = [(1 + \lambda_1 + \lambda_2)W_c + W_d]T_F \quad (7)$$

计算可得单位长度陶瓷纤维、PVC、橡胶类防火带材的热阻; $T_{陶瓷}$ 为0.2647 K·m/W, T_{PVC} 为0.0431 K·m/W, $T_{橡胶}$ 为0.0400 K·m/W。

3 带材料类型电缆载流量和光纤测试温度影响分析

3.1 防火带材对载流量影响

为了分析绕包不同种类防火带材对电缆载流量的影响,根据试验参数和实际情况,计算电缆绕包陶瓷纤维、PVC以及橡胶类防火带材后的最大允许载流量。

假设该试验电缆在空气中水平平行敷设,间距为300 mm,环境温度为40℃。电缆直流电阻(线芯温度为20℃)为0.0283 Ω/km,交流电阻(线芯温度为90℃)为0.0383 Ω/km,导体与金属屏蔽之间的电容为0.138 μF/km,介质损耗为0.3495 W/m,金属套损耗系数为0.0711,导体与金属屏蔽之间热阻为0.6505 (K·m/W),非金属套热阻为0.0525 (K·m/W),外部环境总热阻为0.2851 (K·m/W)。根据式(5),电缆绕包防火带材前后的载流量计算结果如表3所示。

表3 高压电缆绕包防火带材最大允许载流量

Table 3 Maximum allowable capacity of high voltage cable wrapped fireproof belt

带材类型	计算载流量/A	带材类型	计算载流量/A
未包防火带材	1133	PVC	1065
陶瓷纤维	934	橡胶	1068

可以看到,该种高压电缆在空气水平敷设时,绕包陶瓷纤维、PVC以及橡胶类防火带材后,载流量分别降低199 A,68 A,65 A,为未绕包带材电缆载流量的82.4%,94.0%,94.3%,采用陶瓷纤维防火带材电缆最大允许载流量最低,采用PVC、橡胶类防火带材电缆允许载流量相当,大于陶瓷纤维防火带材电缆。可见,高压电缆线路绕包防火带材后散热性能下降,应根据现场情况调低电缆最大允许运行稳态载流量。

3.2 防火带材对线芯与带材表面温度影响

3.2.1 防火带材对线芯温度影响

对于分布式光纤电缆温度实时监测系统,考虑极限情况下(最大载流量1133 A)线芯90℃时,光纤测试电缆外护层表面最高温度为55℃,若电缆绕包具有保温性的防火带材,线芯温度将升高。当光

纤敷设在防火带材表面,以分布式光纤测量温度作为电缆外护层参考温度时,运用热路法计算3种防火带材在正常运行极限载流量下防火带材绕包处线芯稳态温度,结果见表4。

表4 防火带材表面温度为55℃时线芯温度
Table 4 Core temperature when the surface temperature of fireproof belt is 55℃

带材类型	线芯温度/℃	带材类型	线芯温度/℃
未包防火带材	90.0	PVC	92.3
陶瓷纤维	106.3	橡胶	92.1

可见,电缆在最大载流量情况下,陶瓷纤维、PVC、橡胶类防火带材绕包段线芯稳态温度均高于额定稳态允许值90℃,若采用分布式光纤测量温度作为电缆外护层参考温度,会对电缆载流量计算产生误差。陶瓷纤维防火带材热阻远高于PVC以及橡胶类防火带材,散热效果最差,对于采用陶瓷纤维带材绕包的电缆线路,建议重新计算电缆载流量,确保最大负荷下电缆线路温度处在安全范围内。

3.2.2 防火带材对带材表面温度影响

为有效指导运维,对于分布式光纤电缆温度实时监测系统,需要计算电缆达到最大载流量(线芯温度90℃)时带材表面最高允许温度。运用热路法计算线芯温度为90℃时,极限载流量下各种类型防火带材表面温度,结果如表5所示。

表5 线芯温度为90℃时3种防火带材表面温度
Table 5 Surface temperature of different kinds of fireproof belt when core temperature is 90℃

带材类型	带材表面温度/℃	带材类型	带材表面温度/℃
未包防火带材	55.0	PVC	52.7
陶瓷纤维	38.7	橡胶	52.9

可见,电缆在正常运行最大载流量情况下,线芯温度达到90℃时,陶瓷纤维、PVC、橡胶类防火带材绕包段带材表面温度均低于未绕包防火带材电缆外护层表面最高允许温度55℃。故对于分布式光纤电缆温度实时监测系统,其报警阈值应相应降低,确保最大载流量情况下线芯温度不超过90℃。

4 结语

文中搭建了220 kV电缆载流量验证平台,开展陶瓷纤维、PVC、橡胶类防火带材温升试验,结合温升试验数据及相关载流量、温度计算结果,得出如下结论:

(1) 橡胶类防火带材散热效果最优,PVC防火带材稍逊于橡胶类防火带材,两者散热性能远优于陶瓷纤维防火带材。

(2) 绕包防火带材会降低高压电缆最大允许载流量,绕包陶瓷纤维、PVC、橡胶类防火带材电缆的载流量为非绕包电缆的81.9%、96.2%、96.4%。

(3) 对分布式光纤电缆温度监测系统,当采用分布式光纤测量温度作为电缆外护层参考温度时,其报警阈值应相应降低,确保最大载流量情况下安全运行。

本文得到国网江苏省电力有限公司科技项目“高压电缆绝缘失效引发火灾关键因素及预警技术研究”资助,谨此致谢!

参考文献:

- [1] 张俊,祁祺. 硅酮防火封堵材料对电缆载流量的影响分析[J]. 公用工程设计,2017,3(1):56-58.
ZHANG Jun, QI Qi. Discussion on the effect of silicone fireproof plugging material on cable carrying capacity[J]. Public Utilities Design, 2017,3(1):56-58.
- [2] 林浩. 高压电缆埋砂敷设对电缆载流量影响的探讨[J]. 红水河,2010,29(3):117-120.
LIN Hao. Influence of HV cabling in sand on current carrying capacity of cable[J]. Hongshui River, 2010,29(3):117-120.
- [3] LI H J, TAN K C, SU Q. Assessment of underground cable ratings based on distributed temperature sensing [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(4): 1763-1769.
- [4] 张振鹏,赵健康,饶文彬,等. 电缆分布式光纤测温系统测量结果符合性的比对试验[J]. 高电压技术,2012,38(6):1362-1367.
ZHANG Zhenpeng, ZHAO Jiankang, RAO Wenbin, et al. Validate test for the calculation congruity of distributed temperature sensing system[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(6): 1362-1367.
- [5] Calculation of the current rating-thermal resistance; IEC 60287-2—2001[S].
- [6] 郑雁翎. 10 kV XLPE 电力电缆稳态温度场和额定载流量的计算[J]. 宝鸡文理学院学报(自然科学版), 2009,29(2):59-62.
ZHENG Yanling, The calculation of the steady-state temperature field and rated ampacity of 10 kV XLPE power cables[J]. Journal of Baoji University of Arts and Sciences (Natural Science), 2009,29(2):59-62.
- [7] 马国栋. 电线电缆载流量[M]. 北京:中国电力出版社,2003.
MA Guodong. Ampacity of cables[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2003.
- [8] ANDERS G J. Rating of electric power cables-capacity computations for transmission, distribution, and industrial applications [M]. IEEE Power Engineering Society, 1997.
- [9] CARLOS G. ANTONIO O F, JOSE G. Theoretical model to calculate steady-state and transient ampacity and temperature in buried cables[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2003, 16(3): 667-678.
- [10] Calculation of the current rating of electric cables; IEC

- 60287—1993[S].
- [11] 郑良华,于建立,周晓虎,等.直埋电缆群载流量和稳态温度场计算新方法[J].高电压技术,2010,36(11):2833-2837.
ZHENG Lianghua, YU Jianli, ZHOU Xiaohu, et al. New method to calculate ampacity and the steady-state temperature field of direct buried cable system [J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(11):2833-2837.
- [12] 牛海清,周鑫,王晓兵,等.外皮温度监测的单芯电缆暂态温度计算与试验[J].高电压技术,2009,35(9):2138-2143.
NIU Haiqing, ZHOU Xin, WANG Xiaobing, et al. Calculation and experiment of transient temperatures of single-core cables on jacket temperature monitoring[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(9):2138-2143.
- [13] 罗灵琳.单芯电缆暂态温度场及载流量实时计算方法的研究[D].重庆:重庆大学,2008.
LUO Linglin. Study on the transient-state temperature field and capacity real-time calculation method of single core cable[D]. Chongqing:Chongqing University,2008.
- [14] 刘毅刚,罗俊华.电缆导体温度实时计算的数学方法[J].高电压技术,2005,31(5):53-57.
LIU Yigang, LUO Junhua. Mathematical method of temperature calculation of power cable conductor in real time [J]. High Voltage Engineering, 2005,31(5):53-57.
- [15] 张磊,宣耀伟,乐彦杰,等.110 kV单芯海缆的载流量计算、温度场仿真及其热循环试验研究[J].高压电器,2016,52(6):135-140.
ZHANG Lei, XUAN Yaowei, LE Yanjie, et al. Capacity calculation, temperature simulation and thermal cycling experiment for 110 kV submarine cable [J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(6):135-140.
- [16] 梁永春,赵静,闫彩虹.沟槽电缆温度场和载流量的数值计算[J].高电压技术,2012,38(11):3048-3053.
LIANG Yongchun, ZHAO Jing, YAN Caihong. Numerical calculation of temperature field and ampacity of power cables in channel [J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(11):3048-3053.
- [17] 梁永春.高压电力电缆温度场和载流量评估研究动态[J].高电压技术,2016,42(4):1142-1150.
LIANG Yongchun. Technological development in evaluating the temperature and ampacity of power cables [J]. High Voltage Engineering,2016,42(4):1142-1150.
- [18] 张尧,周鑫,牛海清,等.单芯电缆热时间常数的理论计算与试验研究[J].高电压技术,2009,35(11):2801-2806.
ZHANG Yao,ZHOU Xin,NIU Haiqing,et al. Theoretical calculation and experimental research on thermal time constant of single-core cables [J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(11):2801-2806.

作者简介:



曹京荣

曹京荣(1987),男,硕士,工程师,从事电力电缆输电线路外绝缘、可靠性以及全寿命周期成本评估研究(E-mail: cjcjrq@126.com);

徐超(1987),男,硕士,高级工程师,从事输变电技术管理工作;

陈杰(1984),男,博士,高级工程师,从事输电线路状态检测技术研究。

Influence of fireproof belt on ampacity and temperature measuring of high voltage cable

CAO Jingying¹, XU Chao², CHEN Jie¹, JIANG Haibo³, LI Chenying¹, TAN Xiao¹, HU Libin¹

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Nanjing 211103, China;

2. State Grid Wuxi Power Supply Company, Wuxi 214000, China;

3. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210024, China)

Abstract: In order to evaluate the effect of fireproof belt on cable load and temperature, a 220 kV cable carrying capacity verification platform is built in the laboratory to analyze the current carrying capacity and monitoring temperature of high voltage cable for different kinds of fireproof belt. The experiment and theoretical analysis shows that: the temperature gap ratio between of out-and-in fireproofing strip and metal wire core and environment for ceramic fiber, PVC and rubber fireproof are 29.44%, 4.74% and 4.52%, meaning that rubber fireproof belt has the best heat dissipation effect, the PVC fireproof belt is slightly less than that of rubber fireproof belt, and the heat dissipation performance is far better than that of ceramic fiber fireproof belt. Wrapping fireproof belt will reduce cable carrying capacity, the carrying capacity wrapped with ceramic fiber, PVC and rubber fireproof are 81.9%, 96.2% and 96.4% of unwrapped cable. When the cable reaches maximum allowable load, the surface temperature of ceramic fiber, PVC and rubber fireproof are 38.7 °C, 52.7 °C and 52.9 °C respectively, lower than the maximum allowable temperature of cable sheath unwrapped fireproof belt. Therefore, in order to ensure the core temperature does not exceed 90 °C with maximum carrying capacity in the distributed optical fiber temperature measuring system, the alarm threshold should be reduced accordingly.

Keywords: fireproof belt; thermal model; cable carrying capacity; temperature measuring

(编辑 胡昊明)