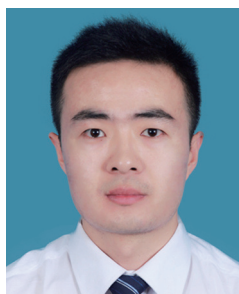


新型低热阻材料提高穿管敷设电缆载流量的试验研究

电缆载流量与其敷设方式和周围媒质的散热性能紧密相关。在各种敷设方式中，穿管电缆是制约电缆线路载流量的瓶颈。通过在管道内填充新型低热阻媒质，可以显著改善穿管电缆的散热环境，降低线芯温度，提升载流能力。利用经试验场电缆载流量试验验证的载流量计算软件，计算和分析了电缆周围媒质热阻系数对其载流量的影响。分别在试验场和运行线路上，进行了电缆载流量的试验研究。研究表明，单回路穿管敷设时填充低热阻新材料，可使电缆载流量提高8%左右。

沈杨杨/华南理工大学电力学院 林 俊 牛海清/广东电网公司佛山供电局
刘 坚/广州骏拓科技有限公司 李光明/广东威恒电力技术开发有限公司



沈杨杨/硕士研究生

关键词/Keywords

电缆·
载流量·
热阻系数·
穿管·

载流量是电缆负荷调度的依据，不仅与电缆本体的结构材料有关，还与电缆的敷设方式和外部环境条件有关。外部环境包括埋深处的环境温度和电缆周围媒质的散热能力。电缆环境温度与当地的气候条件、季节等有关，而电缆周围媒质的散热能力与热阻系数有关。

在10 kV配电网中常采用直埋、穿管和电缆沟三种敷设方式，其中穿管敷设的载流量最低。文献[1]采用了基于有限差分法的载流量程序软件，计算了在直埋、穿管和穿管填充导热介质三种不同敷设方式下，单根电缆的载流量，分析了管道内介质热阻系数与载流量的关系，但计算并未涉及多回路集群敷设。文献[2]对穿管敷设单芯电缆进行了大电流试验，得到了填充导热介质降低电缆温度的结论，但未由此深入分析填充介质对载流量的提升作用。

本文利用经试验场电缆载流量试验验证的计算软件，计算和分析了电缆周

围媒质热阻系数对穿管电缆载流量的影响。在管道内填充已研制的新型低热阻材料，分别进行了试验场和运行现场的电缆载流量试验；对比电缆导体温度与外皮温度的变化，进一步分析和计算了新型低热阻系数材料对穿管敷设电缆散热性能的改善和载流能力的提高。以期使用该低热阻材料填充电缆管道，改善电缆周围的散热环境，从而达到提升电缆载流量的目的。

电缆周围散热介质对电缆载流量影响的理论计算分析

本文根据IEC 60287相关标准编制^[3-7]，开发了三芯电缆载流量计算软件，其计算的正确性已经通过试验场电缆载流量试验的验证^[8]。

1. 直埋敷设和穿管敷设的载流量对比

载流量与电缆敷设方式有关。受散热条件影响，穿管敷设电缆的载流量明显低于直埋电缆。同时载流量受回填土壤热阻系数的影响也较大。本文通过软件计算了截面积为240 mm²的10 kV三芯电缆，在直埋和穿管两种敷设方式下的载流量，并绘制了载流量随外部土壤热阻系数的变化曲线，如图1所示。计算条件为：单回路水平敷设，电缆埋深0.7 m，间距200 mm，环境温度30℃。实测表明，地下水位较高的珠三角地区土壤热阻系数介于0.6~1.2 K·m/W之间，若考虑水分迁移，沙质土壤热阻系数可以达到2.5 K·m/W^[1]。

文献[2]提出，穿管敷设电缆载流量

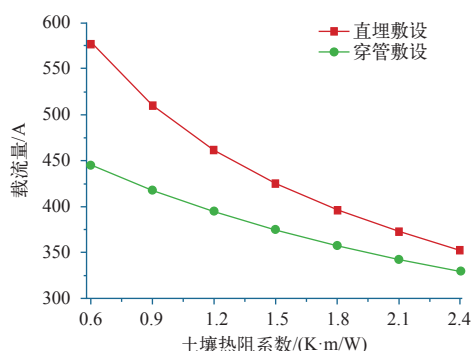


图1 单回路直埋与穿管电缆载流量的比较

最大仅为直埋敷设时的90%，但是没有给出回填土壤的热阻系数。由计算可知，当回填土壤热阻系数为1.8 K·m/W时，穿管电缆载流量为直埋电缆的90%。随着回填土壤热阻系数的降低，这一比例呈下降趋势。

2. 管道内填充介质对穿管敷设电缆载流量的影响

在10 kV配电电缆敷设常用的直埋、穿管和电缆沟三种方式中，穿管敷设的载流量最低^[2]，成为长距离电缆线路的输电瓶颈。主要是穿管敷设中，管道内不流动的空气散热性能差引起的。若在管道内填充低热阻材料，可以预见不仅能保持穿管敷设方式的优点，而且能提高穿管电缆的载流量。

本文计算了管道内回填不同热阻系数介质时，穿管敷设方式下10 kV三芯电缆的载流量，提升载流量的比例如图2所示。计算条件为：10 kV三芯电缆截面积为240 mm²，埋深0.7 m，环境温度30℃，管道材质为PE，内径取148 mm，外径取

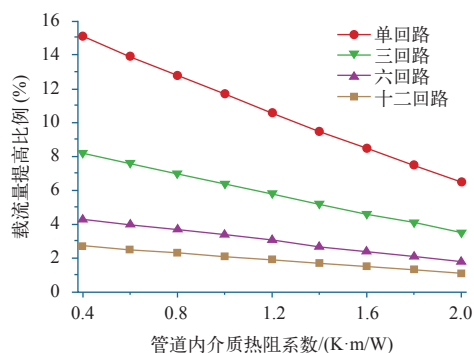


图2 管道内填充低热阻介质提升载流量的比例

160 mm，管道外土壤热阻系数1.2 K·m/W。由于穿管敷设10 kV配电电缆大多为多回路集聚敷设，本文也研究了回填材料对穿管敷设多回路电缆载流量的影响。

由软件计算可知，单回路穿管敷设管道内为空气时载流量为395 A。管道内填充低热阻介质后，可以显著改善电缆散热条件，提升电缆载流量。单回路和多回路的计算结果见图2。当填充介质的热阻系数小于1.8 K·m/W时，可使单回路载流量提升7.5%以上。随着回路数的增加，由于电缆间的相互热影响作用，填充低热阻介质对载流量的提升作用显著下降。载流量与管内介质热阻系数近似成线性关系。管道内填充介质热阻系数每降低0.1 K·m/W，单回路载流量提高约2.2 A，三回路载流量提高约1 A。

低热阻材料提高穿管电缆载流量的试验

1. 新型低热阻材料介绍

通过上述的计算分析可知，优良的低热阻填充介质可以显著改善电缆周围的散热环境，提升电缆载流量。但是结合工程实际，该材料需满足一定的理化性能要求^[2]。

JT型电缆低热阻保护介质是文献[9]的作者研制的一种新型SH凝胶体材料，用于穿管敷设电缆的导热填充保护，具有较好的初始流动性、适中的碱度和低泌水率等技术特点。材料配制工艺简单，易于现场施工与操作，采用水、膨润土、石灰粉、水泥和细砂为主要成分，通过调整它们的比例，形成凝胶固结体^[9]。

2. 管内填充低热阻材料的载流量对比试验

本文试验在型号为YJV22-8.7/15-3×240的穿管敷设电缆上进行。文献[2]对穿管敷设电缆在填充导热介质前后分别进行大电流试验。将试验电缆分为长度各20 m的穿管段和穿管填充段，后者的管道内填充新型低热阻材料。

实验中加载不同的持续负荷电流，用热电偶测量电缆导体和外皮温度，试验持续至温度到达稳定。考虑到测量的分散性和误差的存在，本实验每段电缆采用七个热电偶监测电缆导体温度，

三个热电偶监测外皮温度；先将监测的温度数据进行筛选，再取其平均值作为导体温度和外皮温度的试验值。

给电缆加载持续负荷电流，监测导体温度的情况，试验持续至导体温度达到稳态（1 h内变化不超过1℃），记录负荷电流以及导体温度、外皮温度和环境温度等，并在试验过程中测量土壤热阻系数。需要说明的是，470 A试验前和530 A试验期间，试验场以雷阵雨天气为主，有明显降雨过程，致使土壤湿度较大，热阻系数有所降低。

第一次试验加载470 A持续负荷电流。加载电流后试验电缆的导体温度、外皮温度的上升过程如图3所示。试验达到稳态时穿管段和穿回填段的电缆导体温度和外皮温度如表1所示。第二次试验和第三次试验分别加载530 A、540 A负荷电流，其试验结果如表1所示。

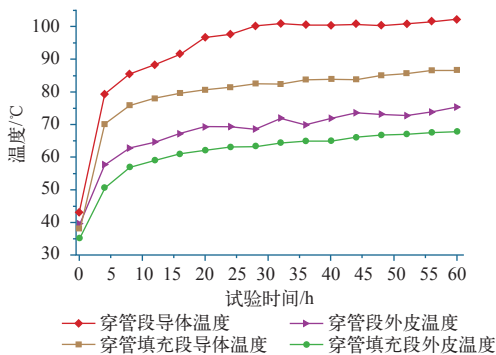


图3 470 A持续负荷试验电缆温度曲线

由表1和图3可知，在470 A持续负荷温升试验中，管道内填充低热阻材料后电缆导体温度下降了17.3℃，外皮温度下降了16.4℃，降温明显。这是因为填充介质热阻系数较低，良好的导热性能有利于电缆的散热。第二、三次试验验证了上述结论。

表1 试验达到稳定时电缆导体和外皮的温度

电流/A	敷设方式	导体温度/℃	温降/(%)	外皮温度/℃	温降/(%)
470	穿管	100.5		85.4	
	穿管回填	83.2	17.3	69	16.4
530	穿管	99.6		86.1	
	穿管回填	87.2	12.4	67.8	18.3
540	穿管	134.9		113.6	
	穿管回填	104.8	30.1	83.6	30

3. 低热阻填充材料对穿管电缆载流量的提升

为研究穿管回填与不回填材料载流量的差别，将电缆外部的媒质（包括管道内空气或回填材料、管道壁和管道外土壤）等值为均一媒质，根据加载的电流、实测的电缆外皮温度以及电缆结构等参数，反推电缆周围媒质的等值热阻系数^[10]；根据该均一媒质的等值热阻系数、电缆埋深、环境温度及电缆结构等参数，计算试验电缆的载流量。三次试验穿管回填及不回填材料情况下，电缆周围媒质的等值热阻系数及由此计算的载流量如表2所示。

表2 新型低热阻介质对穿管敷设电缆载流量的提升

加载的试验电流/A		470	530	540
实测的土壤环境温度/℃		28.9	29.5	29.2
反推的电缆周围媒质	穿管	1.49	1.19	1.22
	穿管回填	0.92	0.8	0.86
等值热阻系数/(K·m/W)	穿管	381	402	395
	穿管回填	433	433	428
计算的载流量/A				
提高比例/(%)		9.1	7.6	8.5

通过填充新型低热阻材料的三次对比试验可以得出，穿管敷设条件下，在管道内回填新型低热阻系数材料后，电缆载流量可提高约8%。

运行线路的低热阻材料应用试验

为研究新型低热阻系数材料在实际运行电缆上的效果，在佛山110 kV沙涌变电站实际运行中的10 kV电缆出线穿管敷设段，进行填充低热阻散热介质对比试验。穿管段长约30 m，管道周长44 cm。选取展旗、冠华和甘蔗三条线路，将各自穿管段分为两部分，长度分别为15 m，在其中一部分管道内填充低热阻材料，另一部分不做处理。分别采用热电偶测量回填及不回填段电缆的外皮温度，并进行对比。甘蔗线某天的负荷电流和电缆温度曲线如图4所示。

在穿管敷设的同一条线路上，填充新型低热阻材料段的电缆外皮温度明显低于未填充段电缆外皮温度，表明该介质材料能够有效改善电缆外部的散热环境。

表3中列举了三条实际运行的穿管敷设电缆线

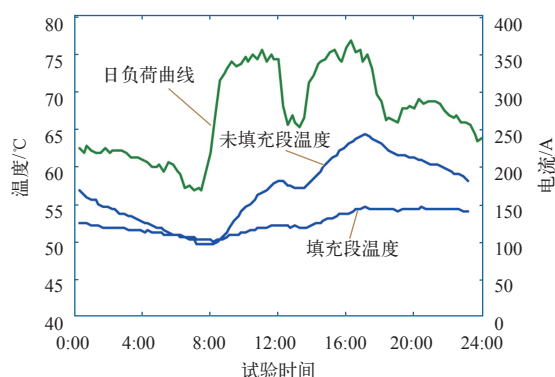


图4 管内填充低热阻介质对电缆外皮温度的影响

表3 运行电缆试验结果

电缆线路	管内状态	电缆表皮温度/℃	温差/℃
展旗线	无填充	76.5	15.1
	填充介质	61.4	
冠华线	无填充	68.5	13.5
	填充介质	55.0	
甘蔗线	无填充	64.5	10.3
	填充介质	54.2	

路,对新材料降低电缆表皮温度的作用进行了说明,其中表皮温度取峰值。对比可知,电缆的温度越高,新型材料的降温作用越明显。

运行线路试验说明,回填新型低热阻介质改善了电缆周围的散热条件,在负载电流不变的情况下,电缆的温度明显降低。因此管道内回填低热阻系数材料,可有效提高电缆的载流量。

结束语

本文利用经验证的三芯电缆载流量软件计算,分析了管道内填充介质对单回路和多回路集群穿管敷设电缆载流量的影响。软件计算表明,管道内填充低热阻介质可以显著提升单回路穿管电缆的载流量;管道内填充低热阻介质也可提升多回路电缆载流量,但回路数越多,提升效果越不明显。

试验场和运行线路试验证明,电缆穿管敷设时,新型低热阻材料的应用,可以明显改善电缆的散热环境,提高电缆载流量。相比没有回填材料,单回路管内填充介质后,其载流能力提高8%左右。建议在穿管方式的输电瓶颈处采用新型低

热阻材料进行管道回填,以有效提高电缆线路的载流量。

参考文献

- [1] 戴南洲,刘坚,王晓兵.一种提高电缆载流量的管道填充介质[J].广东电力,1999,12(3):54-55.
- [2] 王晓兵,蚁泽沛.管道内填充介质提高载流量的研究[J].高电压技术,2005,31(1):79-80.
- [3] IEC 60287-2-1-1994 Calculation of the current rating of electric cables, part 2: thermal resistance, section 1: calculation of thermal resistance [S]. Geneva: IEC Publication, 1994.
- [4] IEC 60287-1-2-1994 Calculation of the current rating of electric cables, part 1: current rating equations (100% load factor) and calculation of losses. section 1: general [S]. Geneva: IEC Publication, 1994.
- [5] IEC 60287-1-1 Electric cables-calculation of the current rating, part 1: current rating equations (100% load factor) and calculation of losses, section 1: general [S].
- [6] IEC 60287-1-2 Electric cables-calculation of the current rating, part 1: current rating equations (100% load factor) and calculation of losses, section 2: sheath eddy current loss factors for two circuits in flat formation [S].
- [7] IEC 60287-2-1 Electric cables-calculation of the current rating, part 2: thermal resistance, section 1: calculation of thermal resistance [S].
- [8] 赵健康,雷清泉,王晓兵,等.复杂运行条件下交联电缆载流量研究[J].高电压技术,2009,35(12):3123-3128.
- [9] Fan Youbin, Meng shaoxin, Miao Fugui, et al. Calculation of current rating for medium and low voltage XLPE cable in clustered layout [C]. 2008 Annual Report Conference on Electrical Insulation Dielectric Phenomena, Quebec City, Canada: IEEE, 2008: 122-124.

(收稿日期:2014-11-06) EA