

城市电力隧道电缆管孔密闭性检测 装置研制及试验应用

张成¹, 李宁¹, 金春峰², 马博翔¹, 杨麟¹, 姚林志¹, 李譔¹, 田岗²

(1. 国网北京市电力公司电缆分公司; 2. 中电投工程研究检测评定中心有限公司)

【摘要】文章根据气体直压法测试原理, 结合电缆管孔自身结构特点, 设计开发出一套适用于电缆管孔密闭性检测的装置, 该装置具有易操作、方便携带和可视化的特点。在其测试过程中, 通过采用自检模式、气泡模式和检测模式, 可以有效地实现对电缆管孔密闭性的准确检测。同时, 本研究还以某城市 110 千伏电力隧道的电缆管孔为例, 通过对工程现场电缆管孔的试验测试, 分析出电缆管孔 1# 和 2# 存在泄漏风险, 有效验证了该密闭检测装置的适用性和可行性, 可为今后类似工程的开展提供一定的技术参考。

【关键词】电力隧道; 电缆管孔; 密闭性; 封堵; 气压; 测试

中图分类号: TU69; TH6

DOI: 10.13655/j.cnki.ibci.2023.11.049

Development and Test Application of Cable Pipe Hole Airtightness Detection Device for Urban Power Tunnel

ZHANG Cheng¹, LI Ning¹, JIN Chun-feng², MA Bo-xiang¹, YANG Lin¹, YAO Lin-zhi¹, LI Xuan¹, TIAN Gang²

(1.State Grid Beijing Electric Power Company Cable Branch; 2.C+E Center for Engineering Research Test
and Appraisal Co., Ltd.)

【Abstract】According to the testing principle of gas direct pressure method, combined with the structural characteristics of cable pipe hole, this research designs and develops a set of device suitable for cable pipe hole airtightness testing, which has the characteristics of easy operation, portability, and visualization. In the process of testing, the self inspection mode, bubble mode and detection mode can be used to conveniently and effectively achieve accurate detection of the airtightness of cable pipe holes. At the same time, this study also takes the cable pipe hole of a 110 KV power tunnel in a city as an example, through the test of the cable pipe hole at the project site, it analyzes that the cable pipe hole 1# and 2# have leakage risks, effectively verifies the applicability and feasibility of the airtight detection device, which can provide a certain technical reference for the development of similar projects in the future.

【Keywords】power tunnel; cable pipe hole; airtightness; plugging; air pressure; test

1 引言

随着我国城市电力隧道的快速发展,许多大中型城市形成短则几十公里、长则上千公里的城市电力隧道敷设网。城市电力隧道埋深一般相对较浅,极易受到人类活动和自然环境的影响,时常出现结构破损和渗漏现象,尤其是城市早期的砖混电力隧道,普遍存在抗渗性差和结构老化等问题^[1-4]。加之当前,我国城市地下市政管线与隧道工程密布,不可避免会与电力隧道形成空间交叉。当一些燃气或给排水管道出现破损而发生泄漏时,极易向附近的电力隧道扩散,并在电力隧道内逐渐汇集,如果电力隧道与变电室之间隔墙上的电缆管孔封堵不严或存在空隙,则可能会造成可燃气体或积水进入输变电站,诱发燃爆或短路危险,危及电力隧道的运营安全,从

而将会严重影响城市电力的正常供应。

目前,工程上暂时还没有专门用于测试城市电力隧道电缆管孔封堵效果的检测装置,大多密闭性检测装置常用于机械密闭罐体的检测,对电力隧道电缆管孔封堵效果的检测并不适用。基于此,本研究针对城市电力隧道电缆管孔的自身特点,根据气体直压法测试理论^[5-6],设计和研制一套专门用于测试电缆管孔密封性能的测试装备,并通过相关试验加以验证分析,以求为今后类似工程的开展和设备的研制提供一定的技术参考。

2 测试机理

2.1 直压测试原理

根据实际电缆管孔自身结构和封堵物的特点,

通过分析各种测试原理的优劣,本研究主要考虑采用直压法原理进行设备研制和测试工作。所谓直压法就是将气源与被测件之间用压力传感器进行连接,直接测取注入气体后一定时间内被测件的气压变化,以此评估和判断被测件的泄漏情况^[7-8]。其测试原理如图1所示。此外,为了保证直压法测试方法的可靠性和准确性,一般会将直压法测试设置成四个阶段,即充气阶段、平衡阶段、测试阶段和排气阶段。其中,充气阶段就是向被测件内注入气体,逐步加载到测试压强;平衡阶段就是为了降低充气阶段结束后气流扰动对测试的影响,使之气压稳定在要求的测试压强范围内;测试阶段就是通过关闭气阀后,测试和记录给定时间内被测件的气压变化;排气阶段就是测试工作结束排除被测件内的气体。

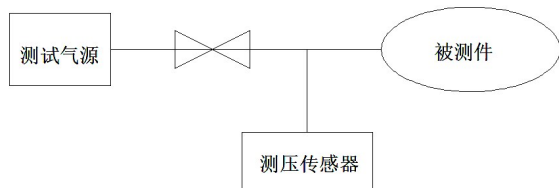


图1 气体直压测试简图

2.2 测试压力要求

电缆管孔位于电力隧道与变电站之间的隔墙上,在一般(无水)工况条件下,两侧气压是平衡的,均为大气压强,即管孔两侧相对压强为零;而在特殊(积水)工况下,如电力隧道内部积水,导致其内部出现水力压强作用,即管孔两侧存在水力压差。当电力隧道积水深度为 h 时,电缆管孔所受水力压强 P 为:

$$P=h\rho_{\text{水}}g \quad (1)$$

式(1)中: h 为积水深度,m; g 为重力加速度, m/s^2 ; $\rho_{\text{水}}$ 为水的密度, kg/m^3 。

据不完全统计,一些老旧电力隧道内部积水最大可达2m,即通过换算其水压最大可达20kPa。因此,为了保证电缆管孔封堵能够满足最不利水压的要求,本研究被测件的测试压强不应低于20kPa。

2.3 测试系统构成

鉴于城市电力隧道的电缆管孔处主要涉及穿墙套管、绝缘电缆和封堵物三部分,三者形成了半封闭的空间结构,可视为测试系统的被测件。为了测试

穿墙套管、绝缘电缆、封堵物以及三者之间接缝的整体密闭性,必须营造出封闭空间,对上述被测件进行封堵的结构,可视为测试系统的封堵件。为被测件与封堵件所构成的密闭空间提供气压与测试气压的设备,可视为测试系统的注压模块。用于控制和记录气压变化的系统,可视为测试系统的控制模块。因此,本研究测试系统的组成主要包括被测件、封堵件、注压模块和控制模块(见图2)。

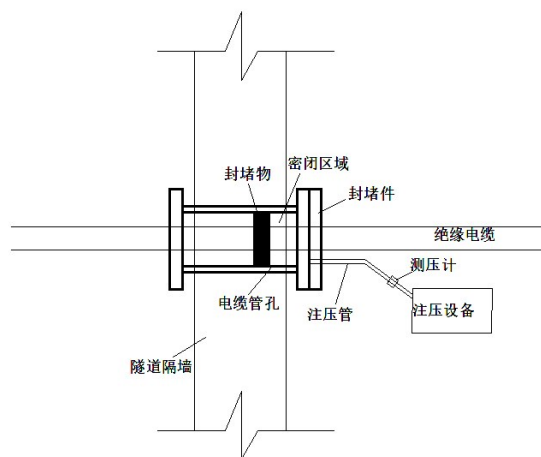


图2 测试系统组成

3 检测装置设计

3.1 装置组成

基于本研究的基本测试原理,将电缆管孔密闭性检测装置设计为三个主要部分,包括密闭检测仪、封堵工装和供电电池(见图3)。其中,密闭检测仪采用一体式小型化设计思想,具有操作简单和可视化的特点,其内部含有控制模块和压力模块,一方面可以通过控制模块调试和控制整个密闭性检测仪的操作系统,设置充气、平衡、检测和排气时间,显示系统测试结果和保存测试数据;另一方面可以通过压力模块为密闭性检测工作提供压缩空气,满足工件气体加压需求。封堵工装是根据电缆、穿墙管孔和管孔封堵物三者之间的位置关系和尺寸大小,采用两个半圆封堵板和硅胶垫等加工而成的封堵件,通过螺栓与电缆、穿墙管孔和管孔封堵物共同形成一个密闭性空间,辅助实现对电缆管孔密闭性的检测。供电电池采用箱体设计,内部设置有多组锂电池组,整体结构小巧,便于携带,总重量不大于4kg,供电时间长,一次充电可用8h。

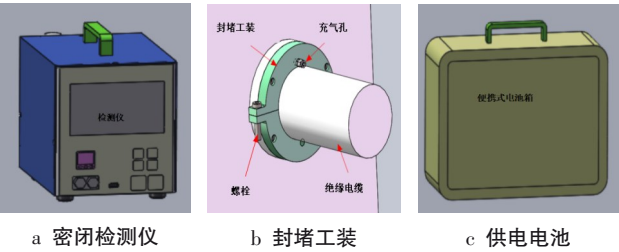


图3 电缆管孔密闭性检测装置

3.2 部件功能

密闭检测仪主要部件包括：触摸屏、数显压力表、操作按键、校准接口、数据输出接口、过滤器、调压阀、检测气出口、充气阀、排气阀、直接传感器、微型压力泵、PLC等。

①触摸屏可以设置充气、平衡、检测和排气的时间，显示测试结果和存储测试数据，并以声光形式提示操作者；数显压力表可以实时显示测试压力；校准接口可以外接标准漏孔，校准测试的准确性；数据输出接口可以外接U盘，输出测试的数据。

②在密闭检测仪操作按键中，仪器自检按钮主要是测试密闭检测仪的内漏情况；气泡模式按钮主要是向被测件内长时间充加气压，方便使用肥皂水查找封堵工装与被测件交界处的漏气点位置；单位切换按钮主要是根据需要切换显示单位，如kPa、Pa、Pa/s、mL/min等可进行任意切换；本地远程按钮中本地模式适用于仪器的单机操作使用，远程模式适用于仪器的远程控制使用。

③过滤器主要是过滤经过微型压力泵的压缩空气中的水分和杂质，保护气控阀和传感器；检测气出口则可以通过胶皮管连接被测件；精密调压阀主要是调节测试压力的大小。

④微型压力泵内置在检测仪内部，是检测仪加压设备；充气阀控制检测气路的通断，检测完成后，排气阀打开，检测件内的气体排出；PLC程序自动控制仪器的动作；精密调压阀调节测试压力的大小。

3.3 封堵工装

如图4所示，电缆管孔封堵工装（夹具）由两个半圆形的封堵板组成，封堵板之间通过螺栓锁紧，封堵板通过螺栓与电缆管孔的法兰连接；充气孔充入正压气体。半圆形封堵板加工有沟槽，内嵌开模密封垫，密封垫为硅橡胶材质，硬度较低，易于挤压变形，以达到封堵的效果。

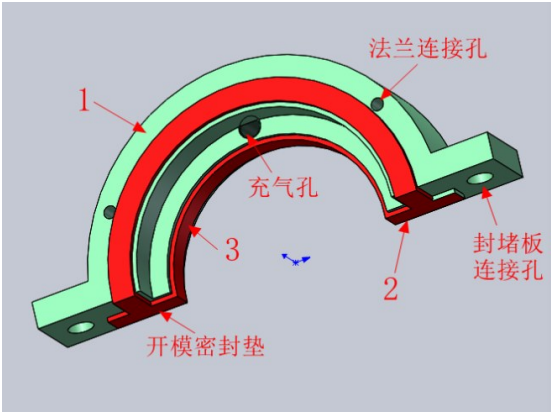


图4 封装结构示意图

3.4 操作界面

本密闭检测仪操作界面主要包括主页界面、参数界面、数据界面、曲线界面以及管理界面等五部分。其中，主页界面的测试压力框可以实时显示被测工件内的气压，中间框可以显示测试结果值，测试单位可以人为设定为流量或压力降；参数界面不仅可以设定检测时的充气、平衡、检测和排气时长，而且还可以设定压力降的上限和下限，当压力降大于合格上限值时，则判断为泄漏，反之，则无泄漏或满足密闭性要求；数据界面可以查看历史测试数据；曲线界面可以查看测试曲线数据；管理界面可以进行用户管理。



图5 操作界面

4 测试方法

4.1 封堵件安装

①对电缆管孔和电缆进行仔细检查，并测试它们是否存在漏电现象。

②若电缆管孔和电缆一切正常，无漏电现象，需注意拭去它们表面的灰尘和油污。

③量取电缆管孔和电缆尺寸，选取与电缆管孔法兰和电缆直径匹配的封堵工装，若电缆表面存在

凹凸不平现象,则需对其表面进行整平处理,一般可通过缠绕一定量的生料带加以实现。

④取一片封堵工装通过螺栓与电缆管孔的法兰相连,螺栓注意不要拧紧,余留一定的余量,同时封堵工装内侧的橡胶垫压紧电缆。

⑤取另一片封堵工装通过螺栓与上一片封堵工装相连,两片封堵工装间的螺栓注意不要拧紧。

⑥逐步拧紧两片封堵工装与电缆管孔法兰之间的螺栓,最后拧紧两片封堵工装之间的螺栓,并接好封堵工装与检测仪之间的充气管。

4.2 测试流程

①仪器开启:将密闭检测仪连接供电电池,调节供电电池电压到合理的测试电压,开启检测仪开关,根据测试要求,调节与设置检测仪测试工作参数。

②自检模式:检测仪测试参数调好后,方可进入检测仪自检模式,气阀此时处于关闭状态,通过注压实现对密闭检测仪自身密闭性进行检测,该过程主要涉及充气、平衡、检测与排气四个阶段,当仪器自检满足密闭性要求时,方可进入下一步操作。

③气泡模式:检测仪自检满足要求后,进入检测仪气泡模式,气阀此时处于开启状态,通过不断注压实现封堵工装与被测件之间接触的密闭性检测(喷洒肥皂水,观测是否有气泡生成),该过程主要涉及充气阶段,当封堵工装与被测件之间的接触满足密闭性要求时,方可进入下一步操作。

④检测模式:检测仪气泡测试满足要求后,则正式进入被测件密闭性检测模式,气阀此时处于开启状态,通过完成检测仪设定的充气、平衡、检测与排气四个阶段,并观测检测仪最终测试结果,当压力降满足要求时,即为合格,反之,即为不合格。

⑤仪器关闭:测试工作结束后,首先关闭检测仪开关,之后关闭电池开关,最后拔出电源线,其他相关设备拆除并整理入箱。

4.3 评定方法

为了较为合理地对电缆管孔密闭性测试结果进行评定,本研究参考《给水排水管道工程施工及验收规范》GB50268-2008 相关要求,同时考虑到电缆隧道满水状态时的水压状况,将电缆管孔密闭性评定标准制定如表 1 所示。即根据满足最大工作压力 20kPa 的要求,试验压力取 1.5 倍~2 倍最大工作压力,测试稳压时间取 3min,允许压力降取 0.75kPa~

1.00kPa,当试验压力降小于允许压力降时,则电缆管孔密闭性合格,反之,则为不合格。

表 1 电缆管孔密闭性评定标准

材料类型	最大工作压力/kPa	试验压力/kPa	测试稳压时间/min	允许压力降/kPa
组合材料	20	30~40	3	0.75~1.00

5 试验应用

5.1 试验工况

某 110kV 电力隧道的电缆管孔(法兰)外径为 318mm,内径为 222mm,法兰上螺栓孔洞共 12 个,螺栓孔洞对侧间距为 290mm,电缆直径 105mm。电缆管孔与法兰为钢质材料,外观质量良好;电缆外层为绝缘橡胶材料,表面存在凹凸不平现象;橡胶管塞是电缆管孔与电缆之间的封堵物,其材质为绝缘橡胶材料,橡胶管塞与电缆接触面状态良好,橡胶管塞与电缆管孔接触面存在缝隙。本次试验共检测 2 个电缆管孔,分别为电缆管孔 1[#]和电缆管孔 2[#],对它们分别采用封堵工装封堵,并用密闭检测仪加以检测测试(见图 6、图 7)。



图 6 封堵安装



图 7 试验测试

5.2 测试结果

本次试验测试的充气时间为100s,平衡时间为20s,检测时间为180s,排气时间为5s,总试验测试时间为305s,测试气压为30kPa,允许压力降为0.75kPa。最终测试结果由图8和图9中曲线可以看出,电缆管孔1#和电缆管孔2#均在测试平衡阶段气压就已降低为0kPa,反映出电缆管孔1#和电缆管孔2#存在明显的泄漏现象,需及时对电缆管孔1#和电缆管孔2#加以堵漏处理,以降低电力隧道运营安全的风险。

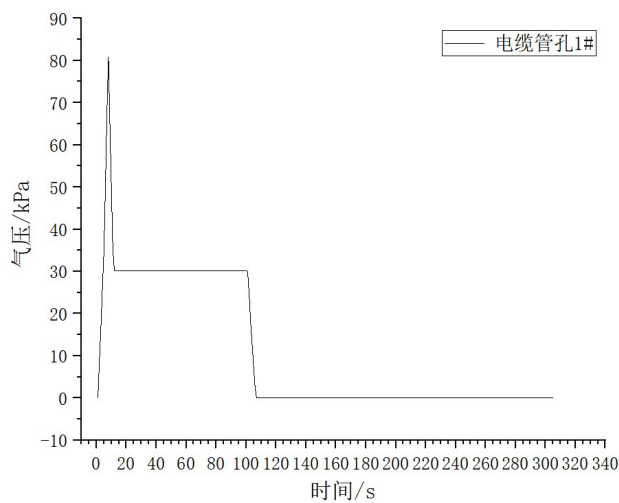


图8 电缆管孔1#测试曲线

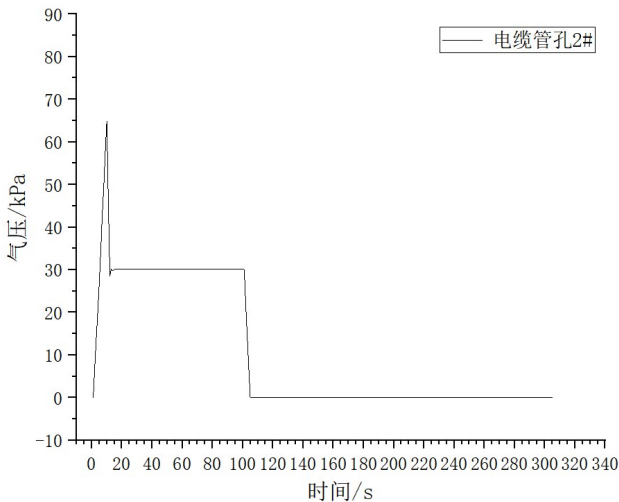


图9 电缆管孔2#测试曲线

6 结语

本研究针对电缆管孔自身特点,运用直压法测试理论,开发研制出一套用于电缆管孔密闭性检测的装置,该装置主要由密闭检测仪、封堵工装和供电

电池三部分组成,具有小型化、易操作、易携带和可视化的特点。此外,本研究还以某110千伏电缆管孔为例,进行现场试验测试研究,有效验证了电缆管孔检测装置的适用性和可行性。

参考文献

[1] 田野, 徐忠林, 杜颢, 等. 成都地区电力隧道运行现状及结构检测技术[J]. 现代隧道技术, 2020, 57 (S1): 1266-1271.

[2] 田岗. 横穿城市道路段电力隧道结构安全性分析及加固技术研究[J]. 工程质量, 2022, 40 (4): 26-31.

[3] 蒋雅君, 许阳, 陈鹏, 等. 电力电缆隧道结构病害及检测评估方法探讨[J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15 (1): 311-318.

[4] 王娟娟, 袁伟衡, 刘月, 郭佳. 北京市既有电力隧道发展现状与常见灾害分析[J]. 工程质量, 2016, 34 (11): 75-78.

[5] 华杰锋, 吕正南, 汤恒. 直压法在燃气具产品气密性检测中的应用及分析[J]. 中国检验检测, 2021, 29 (5): 35-37.

[6] 封龙高. 外压直压法气密性测试机理及其应用研究[D]. 杭州: 中国计量大学, 2017.

[7] 刘军. 产品气密性检测技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.

[8] 彭光正, 李振平. 直压法进行泄漏检测的研究[J]. 液压与气动, 2006 (6): 50-52.