

# 温度对车载高压电缆终端局部放电特性的影响研究

潘贵翔<sup>1</sup>, 辛东立<sup>2</sup>, 刘 骁<sup>2</sup>, 孙传铭<sup>1,2</sup>, 刘 凯<sup>2</sup>, 高国强<sup>2</sup>, 吴广宁<sup>2</sup>

(1. 中车青岛四方机车车辆股份有限公司, 山东 青岛 266111;

2. 西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 611756)

**摘要:** 电缆终端作为高速列车的一个重要设备, 在接触网与列车之间的能量传递中起着重要作用。然而由电缆终端界面缺陷引起的局部放电, 严重影响着电缆终端的绝缘性能与列车的行车安全。通过实验的方法, 制作了含有不同长度气隙的电缆终端试验品, 并在 27.5 kV 的电压条件下进行了实验, 探究了不同缺陷长度的电缆终端在不同环境温度下的局部放电特性。结果表明, 相同气隙长度的电缆终端在 27.5 kV 的电压条件下, 其局部放电量随着环境温度呈现出先上升后下降的趋势。根据这一特性可以知道在一定的电压等级之下, 电缆终端的放电量主要受温度影响, 当超过某一温度后, 由于温升导致的电缆终端内部压力变化成为影响局部放电量的主要因素, 并且随着气隙长度的增加, 同一温度下的局部放电起始电压呈现增加的趋势。

**关键词:** 高速列车; 高压电缆; 电缆终端; 界面; 气隙; 碳痕; 温度; 局部放电

**中图分类号:** TM 852 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2024)02-0051-07

**DOI:** 10.16527/j.issn.1003-6954.20240209

## Influence of Temperature on Partial Discharge Characteristics of Cable Terminals for High-speed Trains

PAN Guixiang<sup>1</sup>, XIN Dongli<sup>2</sup>, LIU Xiao<sup>2</sup>, SUN Chuanming<sup>1,2</sup>, LIU Kai<sup>2</sup>, GAO Guoqiang<sup>2</sup>, WU Guangning<sup>2</sup>

(1. CRRC Qingdao Sifang Co., Ltd., Qingdao 266111, Shandong, China; 2. College of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, Sichuan, China)

**Abstract:** As an essential equipment of high-voltage system of high-speed electric multiple units, cable terminal plays an important role in energy transmission. However, partial discharge caused by defects at the interfaces of cable terminal affect seriously the insulation performance of cable terminals and the safety of trains. Cable terminals containing air gaps of different lengths are fabricated by an experimental method. The experiments are conducted at 27.5 kV to investigate the partial discharge characteristics of cable terminals with different defect lengths under different ambient temperatures. The results show that the partial discharges of cable terminals with the same air-gap length show a tendency of increasing and then decreasing with the ambient temperature under the voltage condition of 27.5 kV. According to this characteristic, it can be known that the discharge of cable terminals is mainly influenced by the temperature under a certain voltage level. The change in pressure inside the cable terminal due to temperature rise becomes the primary factor impacting the partial discharge when a certain temperature is exceeded. The partial discharge initiation voltage at the same temperature shows an increasing trend as the air gap length increases.

**Key words:** high-speed train; high-voltage cable; cable terminal; interface; air gap; carbon trace; temperature; partial discharge

## 0 引言

随着科学技术的不断发展,高速列车的技术水平得到了突破性的发展。列车通过车顶的受电弓与接触网的滑动接触获取电能。车载高压电缆是传输电能的重要设备,电缆终端安装于高压电缆两端,主要用于均衡电场,防水、防尘<sup>[1]</sup>。电缆终端通常采用热缩型、冷缩型和预制式 3 种绝缘结构<sup>[2-3]</sup>,而中国高速列车车载电缆终端主要采用热缩型绝缘结构。组装电缆终端之前,需要将电缆两端一定长度内外护套、防水层和外半导层剥除,这一操作将导致其内部电场分布不均匀。为了调控其内部电场分布,电缆终端内部采用了应力控制管等多层电介质材料,因此其内部存在多个由高聚物电介质构成的界面。

相较于应用于电力系统的高压电缆终端,高速列车的高压电缆运行过程中周围环境多变,例如风、霜、雨、雪、温度骤变以及高速气流等,如此恶劣的运行环境易导致电缆终端内部产生界面缺陷。另外,高速列车运行过程中频繁合断真空断路器所产生的操作过电压频繁冲击高压电缆终端,加剧界面缺陷内部局部放电的发生和发展。

综上所述,电缆终端内部电场不均匀程度高、界面多、运行环境恶劣导致其成为绝缘薄弱环节,因此在运行过程中易发生绝缘击穿故障。

电缆终端的局部放电问题一直是国内外研究热点。电场分布的不均匀会导致局部放电的发生。影响电介质表面放电的因素有很多,例如介质的几何形状、材料以及介质的表面特性等。同时,固液界面处的放电也是一个热门话题,已经有了许多的研究成果,如文献[4-6]对绝缘板表面放电老化的研究以及文献[7-8]对固-界面放电的研究。电介质的表面并非完全平整,它是整个绝缘结构中最薄弱的一环。研究表明,界面压力、粗糙度、弹性模量和切向电场对电介质界面击穿强度有着显著影响<sup>[9-12]</sup>;同时,电介质的界面形状是通过影响电荷的运输来影响界面的击穿强度的<sup>[13]</sup>。

应用于高速列车的高压电缆终端常工作于恶劣环境之中,下面为研究温度对电缆终端局部放电特性的影响,制作了含不同长度气隙的电缆终端,在不同温度下测试其局部放电,获取了关键的局部放电

数据,分析了温度对电缆终端的影响特性。

## 1 试验平台及试样制备

### 1.1 电缆终端典型故障分析

图 1 为高速列车高压电缆终端发生的一些典型故障照片。由图 1 分析可知,绝缘击穿故障一般发生于应力控制管与电缆主绝缘构成的界面以及电缆终端高压端子与接地线之间,如图 1(c)所示故障为微小空间内产生的大量能量使得电缆终端伞裙裂开并形成裂口;图 1(d)的电缆终端内部高聚物被烧毁,并形成裂口;图 1(e)的缆芯主绝缘表面存在明显的电蚀痕迹,界面击穿时的短路电流会使电缆终端内部温度急剧升高。

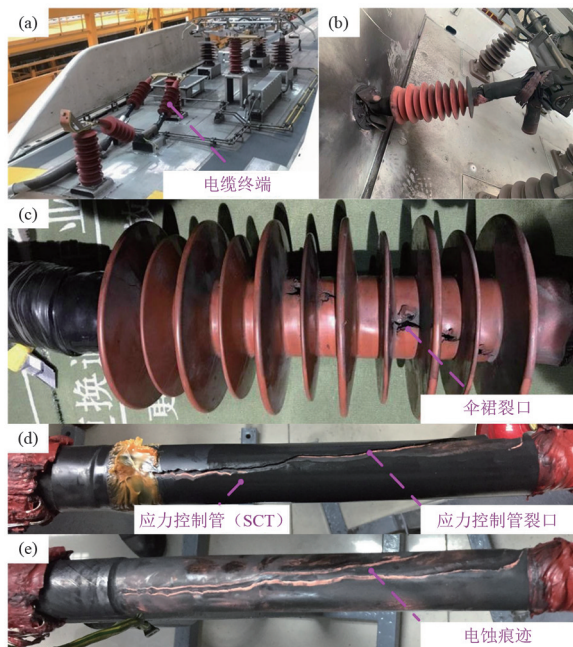


图 1 电缆终端典型故障

### 1.2 试验平台

所构建局部放电测试平台包含 3 部分:温控部分、电压施加部分和局部放电测试部分,如图 2 所示。

温控部分主要由程式温控箱构成,测试过程中可保持恒温恒湿。由于环境温度对电缆终端内部电介质材料力学性能的影响进而导致电缆终端绝缘状态发生变化,表现为局部放电量发生较为明显的变化。因此采用温控箱保持含有缺陷的电缆终端温度平衡,在温控箱侧壁预留两个直径为 150 mm 的通孔,试验过程中单独将含有预制缺陷的电缆终端置入温控箱内。

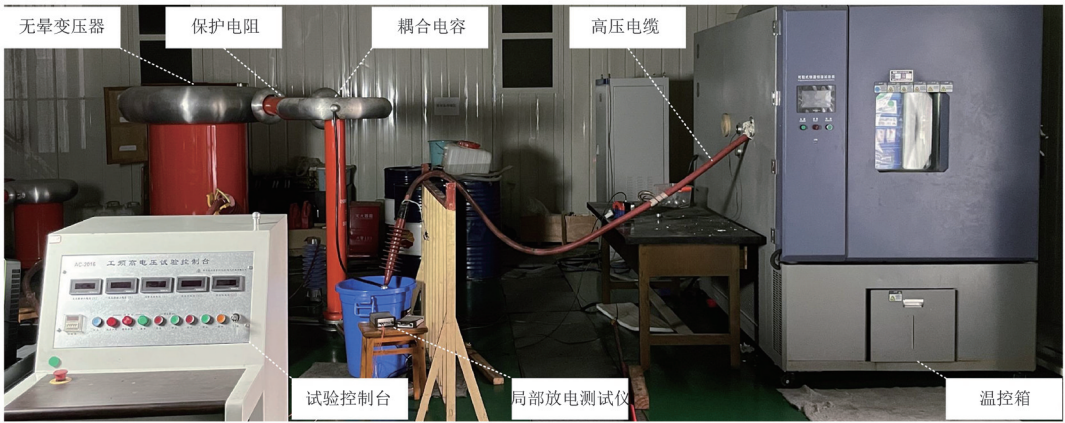


图 2 车载高压电缆局部放电测试平台

电压施加部分主要由隔离变压器、调压器、无晕变压器、保护电阻以及调压台构成。其中容量为 100 kVA 的无晕变压器额定电压为 200 kV, 额定电流为 1/250 A。电容分压器电容量为 510.4 pF, 分压比为 1000 : 1。5 kΩ 的限流保护电阻串入试验电路中防止试样击穿时所产生大电流对变压器等设备造成冲击。

采用欧米克朗 MPD-600 局部放电测试仪检测、记录和分析局部放电数据, 可准确记录试验电压  $V$ 、最大放电量  $Q_{\max}$ 、平均放电量  $Q_{\text{avg}}$ 、放电重复率  $n$  以及测试过程中放电变化趋势等多维信息。局部放电测试平台构建于屏蔽室内, 其环境温度及相对湿度分别为 20 °C 和 60%, 调试后的平台背景噪声低于 0.3 pC。

### 1.3 试样制备

目前, 应用于高速铁路的高压电缆终端多采用多层复合绝缘结构, 采用热缩工艺组装。图 3 为应用于高速铁路的高压电缆终端结构, 主要由绝缘管、应力控制管、绝缘胶和伞裙构成。绝缘管主要起绝缘作用, 应力控制管主要应用于电场调控和机械应力缓冲。

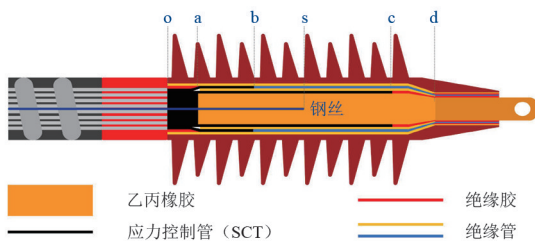


图 3 高压电缆终端结构

组装电缆终端前, 将电缆一端的外护套、防水层剥除至 o 点。在 o 点处, 将屏蔽层翻叠并集成

束。将电缆外半导体层裁切至 a 点处, 保留 oa 点间外半导体层。采用 400 目砂纸打磨电缆主绝缘表面以消除电缆挤出生产过程中屏蔽层挤压所产生的凹痕和突起, 增强电缆终端界面绝缘性能。完成以上操作后逐步套装和热缩应力控制管、绝缘管和伞裙, 在集束成束的屏蔽层套装绝缘管并安装铜端子以制作成接地线, 至此完成电缆终端组装。组装过程中, 在组装下一层高聚物电介质前, 向完成组装的电介质表面均匀涂抹硅脂以提高界面绝缘性能。

由于电缆终端放电击穿故障主要发生于应力控制管与电缆主绝缘构成的界面, 因此将气隙构建于这一界面, 模拟电缆终端内部界面气隙的产生, 并且研究其发展过程中温度对局部放电特性的影响。

如图 3 所示, 将光洁的钢丝按照预设长度敷设于电缆主绝缘表面 o 点与 s 点之间以构建界面气隙, o 点与 s 点之间距离即为气隙长度, 钢丝直径为 2 mm。后续依次套装和热缩各层应力控制管、绝缘管和伞裙构成电缆终端。为方便比较界面气隙长度, 以应力控制管长度  $l$  的百分比来描述, 即 40% $l$ 、70% $l$  和 100% $l$ 。为尽量降低和消除试样制作所导致的随机误差, 每种气隙长度的电缆终端制作 3 件试样。

### 1.4 试验方法

局部放电试验开始前, 将含有钢丝的电缆终端中的钢丝抽出以构建气隙, 抽出钢丝的电缆终端置入温控箱内, 在目标温度和相对湿度 60% 条件下静置 24 h 使其内部界面应力稳定。为研究温度对界面压力影响所导致的局部放电特性变化, 采用的目标温度分别为 0 °C、10 °C、20 °C、30 °C、40 °C。

试验开始后, 关闭温控箱电源, 采用逐步升压法

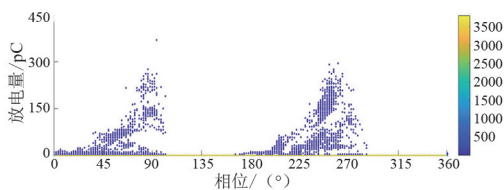
将施加于高压电缆的电压从 0 kV 以 1 kV/10 s 的速率缓慢升高至 27.5 kV。升高至目标试验电压后,保持电压恒定 1 min 以使局部放电达到相对稳定状态,之后对电缆终端局部放电进行测试,每次测试时间持续 25 s,每件试样在同一温度下测试 5 次。局部放电测试完成后缓慢降低试验电压至 0。

## 2 试验结果分析

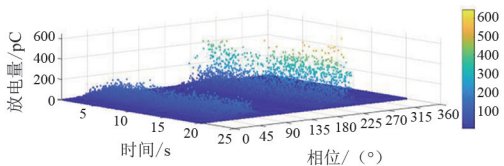
通过测试获得诸多局部放电图谱,为阐述和分析温度对试样局部放电特性的影响,选取了部分典型图谱进行展示和分析。

### 2.1 40%*l* 气隙试验结果

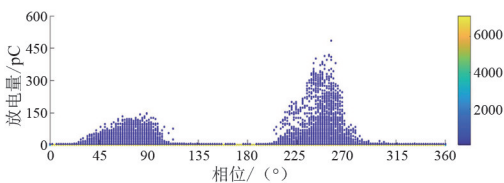
图 4 为不同温度下含有长度为 40%*l* 气隙试样的 PRPS 及 PRPD 图谱。总观试样在 0 ℃、20 ℃、40 ℃ 温度环境中局部放电图谱可知,电缆终端局部放电稳定。观察其 PRPD 图谱可知,局部放电主要发生于第一及第三象限,这一特征符合气隙内沿面放电的典型特征。环境温度为 0 ℃ 时,40%*l* 试样第一象限最大放电量  $Q_{\max}$  为 20 pC,第三象限最大放电量  $Q_{\max}$  为 72 pC,为第一象限的 3.6 倍,平均放电量  $Q_{\text{avg}}$  为 32.61 pC。第一和第三象限放电相位宽度均约 100°,相位具有明显对称性,而放电量的不对称性表明在此温度下电缆终端内部气隙体积较大。



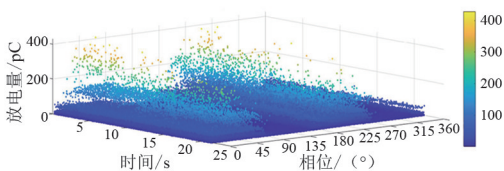
(d) 10 ℃ 下 40%*l* 试样局部放电 PRPD 图谱



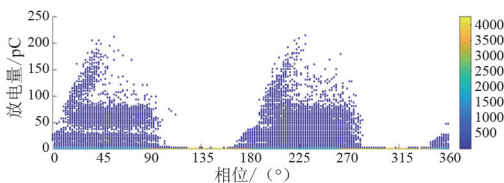
(e) 20 ℃ 下 40%*l* 试样局部放电 PRPS 图谱



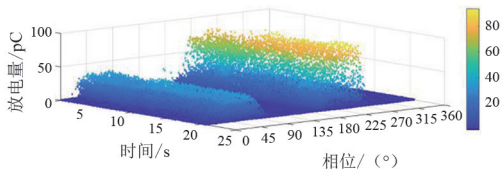
(f) 20 ℃ 下 40%*l* 试样局部放电 PRPD 图谱



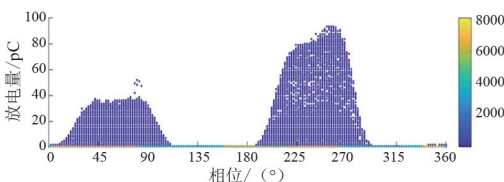
(g) 30 ℃ 下 40%*l* 试样局部放电 PRPS 图谱



(h) 30 ℃ 下 40%*l* 试样局部放电 PRPD 图谱

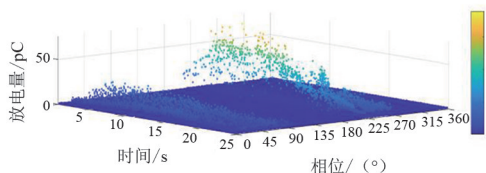


(i) 40 ℃ 下 40%*l* 试样局部放电 PRPS 图谱

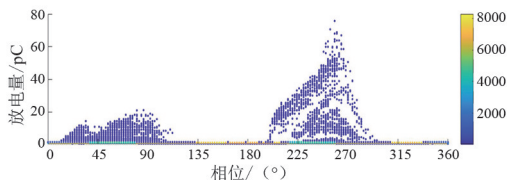


(j) 40 ℃ 下 40%*l* 试样局部放电 PRPD 图谱

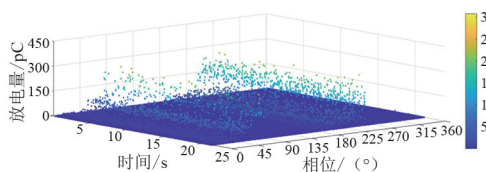
图 4 目标电压下 40%*l* 缺陷试样 PRPS 及 PRPD 图谱



(a) 0 ℃ 下 40%*l* 试样局部放电 PRPS 图谱



(b) 0 ℃ 下 40%*l* 试样局部放电 PRPD 图谱



(c) 10 ℃ 下 40%*l* 试样局部放电 PRPS 图谱

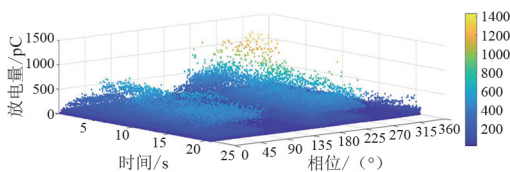
待环境温度提升至 20 ℃ 时,电缆终端试样中局部放电同样达到稳定状态,其放电对称性仍表现为气隙内部沿面放电的典型特征。相比之下,环境温度提升至 20 ℃ 时,其放电量大幅度提升,最大放电量  $Q_{max}$  提升至 500 pC,第一象限最大放电量为 150 pC,第三象限放电量为第一象限的 3.33 倍,此时与环境温度为 0 ℃ 时放电不对称性一致。

当环境温度进一步提升至 40 ℃ 时,观察局部放电 PRPS 图谱可知试样中的局部放电依旧稳定。但是与环境温度从 0 ℃ 上升到 20 ℃ 不同,当环境温度上升到 40 ℃ 时,电缆终端试样的局部放电量呈现下降趋势,最大放电量  $Q_{max}$  下降到约 100 pC,40 ℃ 时第一象限最大放电量  $Q_{max}$  为 60 pC,第三象限的最大放电量是第一象限的 1.66 倍,平均放电量  $Q_{avg}$  为 79.88 pC,其放电不对称性与 0 ℃ 与 20 ℃ 一致,但不称程度远低于 0 ℃ 和 20 ℃ 时。

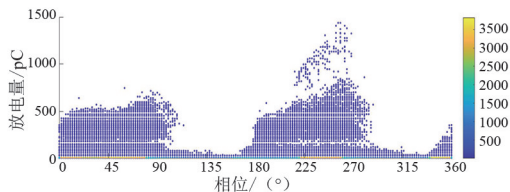
初步分析其放电不对称性的原因:相比于其他局部放电形式,如尖端放电和悬浮放电,气隙内部空间相较较大。在电场作用下自由电子在气隙内定向运动发生碰撞电离,形成电子崩,表现为局部放电。电压处于第一象限时,气隙内部已经发生局部放电。当施加电压进入第三象限时气隙中存留自由电荷及其他载流子促进了电子崩的形成和发展,因而放电在第三象限更易发生。

### 2.2 70%l 和 100%l 气隙试验结果

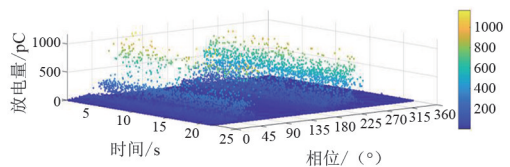
气隙长度为 70%l 和 100%l 的电缆终端试样在不同温度下的 PRPS 和 PRPD 图谱分别如图 5 和图 6 所示。观察两种气隙长度的试样放电图谱可知,当温度从 0 ℃ 上升到 40 ℃ 的过程中,两种电缆终端试样呈现出的局部放电特性与气隙长度为 40%l 的电缆终端试样一致。



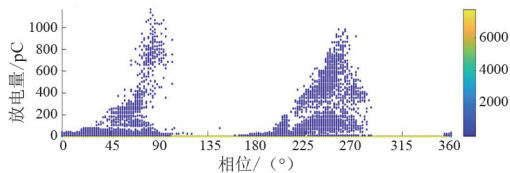
(c) 10 ℃ 下 70%l 试样局部放电 PRPS 图谱



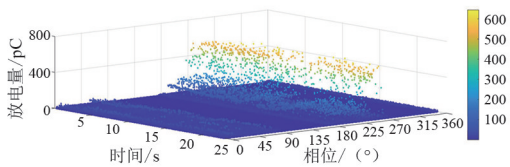
(d) 10 ℃ 下 70%l 试样局部放电 PRPD 图谱



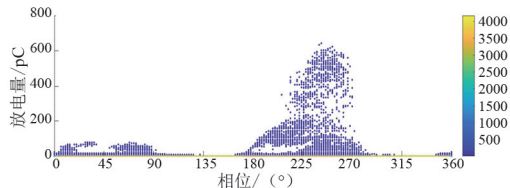
(e) 20 ℃ 下 70%l 试样局部放电 PRPS 图谱



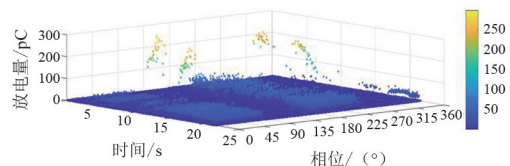
(f) 20 ℃ 下 70%l 试样局部放电 PRPD 图谱



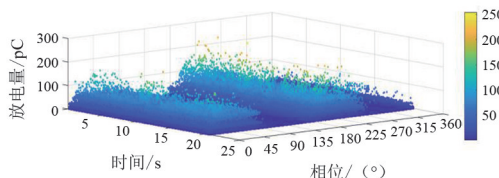
(g) 30 ℃ 下 70%l 试样局部放电 PRPS 图谱



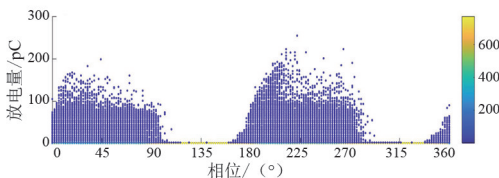
(h) 30 ℃ 下 70%l 试样局部放电 PRPD 图谱



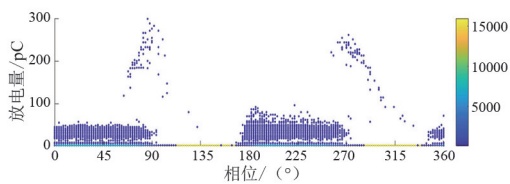
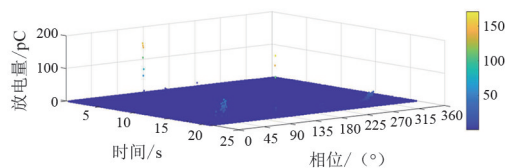
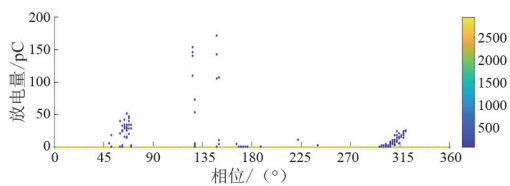
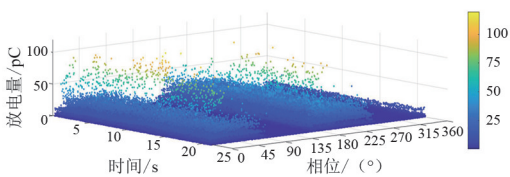
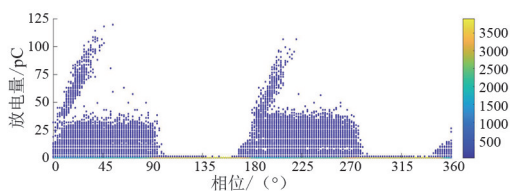
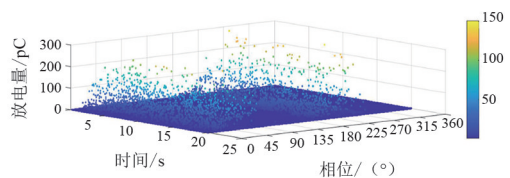
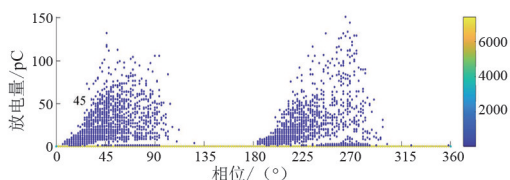
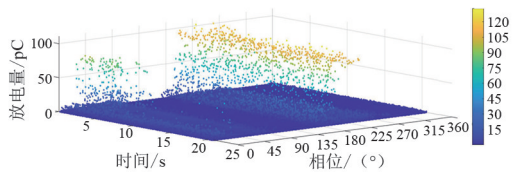
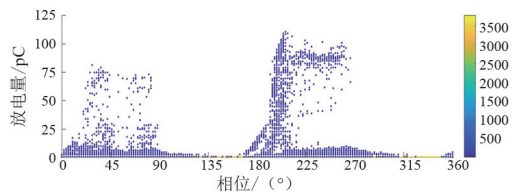
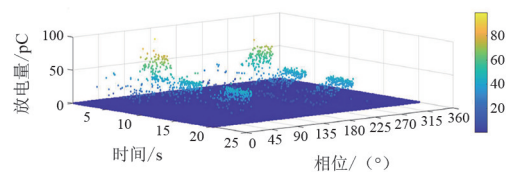
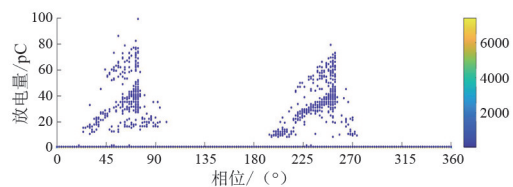
(i) 40 ℃ 下 70%l 试样局部放电 PRPS 图谱



(a) 0 ℃ 下 70%l 试样局部放电 PRPS 图谱



(b) 0 ℃ 下 70%l 试样局部放电 PRPD 图谱

(j) 40 °C 下 70%*l* 试样局部放电 PRPD 图谱图 5 目标电压下 70%*l* 缺陷试样 PRPS 及 PRPD 图谱(a) 0 °C 下 100%*l* 试样局部放电 PRPS 图谱(b) 0 °C 下 100%*l* 试样局部放电 PRPD 图谱(c) 10 °C 下 100%*l* 试样局部放电 PRPS 图谱(d) 10 °C 下 100%*l* 试样局部放电 PRPD 图谱(e) 20 °C 下 100%*l* 试样局部放电 PRPS 图谱(f) 20 °C 下 100%*l* 试样局部放电 PRPD 图谱(g) 30 °C 下 100%*l* 试样局部放电 PRPS 图谱(h) 30 °C 下 100%*l* 试样局部放电 PRPD 图谱(i) 40 °C 下 100%*l* 试样局部放电 PRPS 图谱(j) 40 °C 下 100%*l* 试样局部放电 PRPD 图谱图 6 目标电压下 100%*l* 缺陷试样 PRPS 及 PRPD 图谱

### 2.3 结果分析

分析 3 种电缆终端试样的局部放电规律,统计在不同温度下 3 种试样的平均放电电量如图 7 所示。

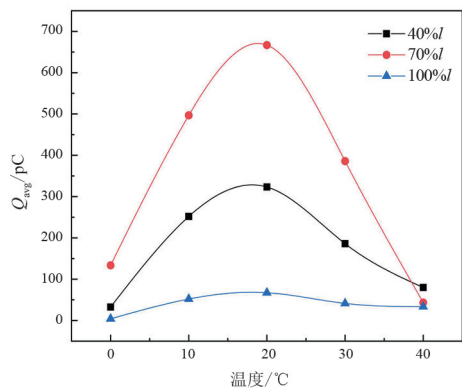


图 7 试样平均局部放电电量随温度的变化

观察曲线图可知,当温度由 0 °C 上升至 10 °C 并进一步上升至 20 °C 时,气隙长度为 40%*l*、70%*l* 和 100%*l* 的电缆终端试样平均放电电量  $Q_{avg}$  都有大幅增加,其中气隙长度为 40%*l* 的试样平均放电电量  $Q_{avg}$  从

32.61 pC 上升至 252 pC,最终增长至 323.2 pC,增幅高达 991%。气隙长度为 70% $l$  和 100% $l$  的试样的平均放电量  $Q_{\text{avg}}$  分别从 133.7 pC 和 4.022 pC 上升到了 667.0 pC 和 67.23 pC,增幅分别为 498.9%以及 1 671.15%。分析可知,温度对电缆终端试样的平均局部放电量有显著影响,温度上升时,3 种电缆终端试样的平均放电量均出现了大幅上升。

当温度从 20 °C 上升到 40 °C 时,观察到与温度从 0 °C 上升到 20 °C 不同,3 种气隙长度的电缆终端试样的平均放电量  $Q_{\text{avg}}$  都出现了大幅下降,40% $l$ 、70% $l$  和 100% $l$  的试样的平均放电量  $Q_{\text{avg}}$  分别从 323.2 pC、667.0 pC 和 67.23 pC 下降到了 79.88 pC、43.37 pC 和 33.61 pC,最大下降幅度达 1540%。

3 种试样在放电特性方面都表现出了随温度的非线性变化趋势。在环境温度连续升高的过程中,其平均放电量  $Q_{\text{avg}}$  先随温度的升高而升高,表现出典型的温升特性;但是当温度超过某一临界值时,试样的平均放电量  $Q_{\text{avg}}$  开始随温度的上升而下降。分析认为:1) 当温度较低时,由温升引起的电缆终端内部界面应力变化不大,而温升导致电子变得更容易被激发,电子电离程度加大,外部表现为平均局部放电量  $Q_{\text{avg}}$  的增加。2) 当温度继续上升,由热膨胀引起的电缆终端内部界面应力开始出现明显变化,界面之间的压力上升,导致电子的自由行程缩短,电子变得不容易被激发。此时,即使环境温度较高,电子的电离程度也变得相对较低,外部表现为试样的平均局部放电量  $Q_{\text{avg}}$  降低。

由上述分析可知,温度上升时自由电子更为活跃与界面压力增大对局部放电发展的抑制,两者之间存在竞争机制,通过调控两者之间的平衡可以有效提高电缆终端内部界面绝缘性能。

### 3 结 论

上面制备了在应力控制管和电缆主绝缘之间的界面处含有一定长度气隙的车载高压电缆终端试验样品,通过测试和分析了不同环境温度下含气隙的电缆终端试样局部放电特性。

试验结果表明,试样的局部放电特性随温度的升高而变化,其中放电量的变化更为明显,放电相位宽度次之。试样的局部放电量在环境温度为 20 °C 时达到最大值,在此环境温度中,电缆终端内部气隙

中局部放电最易发生。另外,虽然试样在 0 °C 和 40 °C 时的放电量低于 20 °C 时的放电量,但其影响机制不同。不仅温度对放电量有影响,温度也通过影响界面压力和能量陷阱的深度来影响局部放电特性。

研究结果表明,电缆终端的放电量随温度变化并未呈现单调变化,其放电对称性也随温度变化呈现出一定变化。环境温度通过影响气隙内自由电荷能量以及界面压力进而影响局部放电特性。因此,温度对于电缆终端内部界面处气隙的局部放电特性具有不可忽视的影响。

上述研究可为高速列车电缆终端绝缘结构的优化、绝缘性能提升提供依据,可为电缆终端生产厂家的工艺优化提供指导。

#### 参考文献

- [1] LAI Qingbo, CHEN Jie, HU Libin, et al. Investigation of tail pipe breakdown incident for 110 kV cable termination and proposal of fault prevention[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2019, 108: 104353.
- [2] YE Hanyu, FECHNER Tobias, LEI Xianzhang, et al. Review on HVDC cable terminations[J]. *High voltage*, 2018, 3(2): 79–89.
- [3] ORTON Harry. Power Cable Technology Review[J]. *High Voltage Engineering*, 2015, 41(4): 1057–1067.
- [4] LI Xiaonan, WU Guangning, YANG Yan, et al. Partial discharge characteristics of oil-paper insulation for on-board traction transformers under superposed interharmonic AC voltages[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2020, 27(1): 240–248.
- [5] SHIGEMITSU Okabe, GENYO Ueta, HARUHISA Wada, et al. Partial discharge-induced degradation characteristics of insulating structure constituting oil-immersed power transformers[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2010, 17(5): 1649–1656.
- [6] SHIGEMITSU Okabe, GENYO Ueta, HARUHISA Wada, et al. Partial discharge-induced degradation characteristics of oil-impregnated insulating material used in oil-immersed power transformers[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2010, 17(4): 1225–1232.
- [7] LI Chuanyang, SHAHSAVARIAN Tohid, BAFERANI Mohamadreza Arab, et al. Understanding of DC partial discharge: Recent progress, challenges, and outlooks[J]. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 2021, 8(3): 894–909.

## 参考文献

- [1] 夏晓健,金焱,乔汉文,等. 输变电设备腐蚀状况调查与分析[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2019, 31(2): 121-127.
- [2] 王志高,田倩倩,耿植,等. 四川电网输变电设备的腐蚀情况调查及防护措施[J]. 腐蚀与防护, 2021, 42(3): 34-37.
- [3] 潘玉霞,王玫,王志高,等. 大气腐蚀环境对四川电网输变电设备腐蚀的影响研究[J]. 材料保护, 2018, 51(4): 110-113.
- [4] WANG Z G, WANG M, JIANG J, et al. Atmospheric corrosion analysis and rust evolution research of Q235 carbon steel at different exposure stages in Chengdu atmospheric environment of China[J]. Scanning, 2020; 9591516.
- [5] 田倩倩,海潮,王志高,等. Q235 碳钢在四川典型大气污染环境中的腐蚀行为研究[J]. 西南民族大学学报(自然科学版), 2020, 46(5): 478-486.
- [6] 王志高,海潮,姜杰,等. Q235 钢在德阳大气环境中腐蚀行为研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2021, 41(6): 871-876.
- [7] 耿植,罗明才,王志高,等. 碳钢在四川典型盐化工环境中的大气腐蚀行为[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(12): 4772-4777.
- [8] 李成鑫,王志高,海潮,等. Q235 碳钢在宜宾不同大气环境中的腐蚀行为[J]. 腐蚀与防护, 2022, 43(12): 6-10.
- [9] 冶金工业信息标准研究院. 金属和合金 大气腐蚀试验现场试验的一般要求: GB/T 14165—2008[S]. 北京: 中国标准质检出版社, 2008.
- [10] 全国钢标准化技术委员会. 金属和合金的腐蚀 大气腐蚀性 第 1 部分: 分类、测定和评估: GB/T 19292.1—2018[S]. 北京: 中国标准质检出版社, 2018.
- 作者简介:  
王方强(1970),男,硕士,高级工程师,研究方向为电网环境监测。  
(收稿日期:2023-10-05)
- 
- (上接第 57 页)
- [8] LI Shuaibing, CAO Binglei, CUI Yi, et al. Terahertz-based insulation delamination defect inspection of vehicle cable terminals[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2023, 9(1): 1765-1774.
- [9] KANTAR Emre, PANAGIOTOPOULOS Dimitrios, ILDSTAD Erling. Factors influencing the tangential AC breakdown strength of solid-solid interfaces[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2016, 23(3): 1778-1788.
- [10] KANTAR Emre, ILDSTAD Erling, HVIDSTEN Sverre. Effect of elastic modulus on the tangential AC breakdown strength of polymer interfaces[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2019, 26(1): 211-219.
- [11] KANTAR Emre, MAUSETH Frank, ILDSTAD Erling, et al. Longitudinal AC breakdown voltage of XLPE-XLPE interfaces considering surface roughness and pressure[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(5): 3047-3054.
- [12] KANTARA Emre, HVIDSTENB Sverre, MAUSETHA Frank, et al. A stochastic model for contact surfaces at polymer interfaces subjected to an electrical field[J]. Tribology International, 2018, 17: 361-371.
- [13] HASHEMINEZHAD Majid, ILDSTAD Erling. Application of contact analysis on evaluation of breakdown strength and PD inception field strength of solid-solid interfaces[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2012, 19(1): 1-7.
- 作者简介:  
潘贵翔(1990),男,硕士,工程师,从事高速动车组高压系统设计工作;  
辛东立(1989),男,博士研究生,研究方向为电气设备绝缘状态检测及监测技术;  
刘 骁(1998),男,硕士研究生,研究方向为电气设备绝缘状态检测及监测技术;  
孙传铭(1981),男,博士研究生,研究方向为电气设备绝缘状态检测及监测技术,从事高速动车组高压系统及牵引系统设计工作;  
刘 凯(1990),男,博士,研究员,研究方向为电气设备绝缘状态检测及监测技术;  
高国强(1981),男,博士,教授,研究方向为电气设备绝缘状态检测及监测技术、先进功能电工材料、过电压及防护技术;  
吴广宁(1969),男,博士,教授,研究方向为电气设备绝缘状态检测及监测技术、先进功能电工材料、过电压及防护技术。  
(收稿日期:2023-06-16)