

动车组高压电缆组件终端不干性密封胶溢出故障原因分析

许万涛¹, 唐兆祥¹, 王天宇¹, 陈冬梅²

(1. 中车青岛四方机车车辆股份有限公司技术中心, 山东 青岛 266111;

2. 青岛科技大学高分子科学与工程学院, 山东 青岛 266042)

摘要: 在动车组高压电缆终端组件中, 不干性密封胶的外溢可能导致终端密封失效, 进而引发电击穿事故, 对行车安全构成威胁。为预防此类事故, 首要任务是深入剖析密封胶溢出的原因。通过对密封胶进行微观结构、流变特性及热重分析, 对比故障件、正常件和新件之间的差异。研究发现, 故障件的密封胶存在相分离, 且一种聚合物含量偏高, 导致非均匀团聚和黏度分离。流变分析结果表明, 随着温度的升高, 故障件密封胶的模量和黏度的下降幅度高于正常件和新件, 是溢出的主要原因。为预防和控制此类故障, 建议引入红外光谱和热重分析监测密封胶各组分比例, 使用流变分析法监测黏度-温度曲线, 确保高压电缆终端处于最佳密封状态。

关键词: 不干性密封胶; 高压电缆终端; 流变性能; 故障分析; 密封

Analysis of the cause of high-voltage cable component terminal sealant leakage failure in EMUs

XU Wantao¹, TANG Zhaoxiang¹, WANG Tianyu¹, CHEN Dongmei²

(1. CRRC Qingdao Sifang Co., Ltd., Technical Center, Qingdao 266111, China; 2. College of Polymer Science and Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266042, China)

Abstract: In the high-voltage cable terminal assembly of EMU, the overflow of non-drying sealant may lead to the failure of terminal sealing, even trigger electric breakdown accidents, posing a threat to driving safety. To prevent such accidents, the primary task is to deeply analyze the reasons for the overflow of sealant. By comparing the differences in microstructure, rheological properties, and thermogravimetric analysis of sealant among faulty parts, normal parts, and new parts. The article finds that the sealant of faulty parts exhibits phase separation, with a high content of a certain polymer, leading to uneven agglomeration and viscosity separation. The rheological analysis results show that the modulus and viscosity of the faulty sealant decrease more significantly than those of normal and new parts as the temperature rises, which is the main reason for the overflow. To prevent and control such failures, it is recommended to introduce infrared spectroscopy and thermogravimetric analysis to monitor the component ratios of the sealant, and rheological analysis to monitor the viscosity-temperature curve, ensuring that the high-voltage cable terminal is in the best sealing condition.

Keywords: non-drying sealant; high voltage cable terminal; rheological property; fault analysis; seal

0 引言

在现代轨道交通车辆上, 高压电缆组件扮演着至关重要的角色, 其终端部分尤其关键。终端的绝缘部分由应控片、应控管、应控密封胶泥、绝缘支撑管及伞裙等组件构成, 实现电场应力控制、电气间隙密封、绝缘密封且增强防水性能^[1-6]。其中, 应控密封胶泥属于不干性密封胶泥, 又称密封腻子, 以其高弹性、黏接性和密封性, 确保在常温下长期保持黏接性能, 不硬化、不干涸, 同时具备出色的耐油、耐水和耐化学品性能, 良好的电绝缘性和耐老化性, 以及在宽温度范围内的性能稳定性。这些特性使得它成为电缆接头和终端密封的理想选择, 能有效防止水分和气体侵入, 保护电缆绝缘层, 延长电缆使用寿命, 防止环境因素导致的电缆故障, 从而保障电缆系统的安全运行, 降低因密封不良引发的电缆终端故障, 提高系统的可靠性和维护效率^[7-9]。

为了满足这些要求, 密封胶泥必须具备极低的液体/气体透过率、低导热率以及在使用温度范围内的阻尼特性。同时, 它需要填充所有缝隙, 与接触部件保持良好的黏附性, 无腐蚀性, 保持永久塑性和黏弹性, 且在使用温度范围内黏度变化小。动车组高压电缆终端采用的不干性密封胶主要由丁基橡胶构成, 结合增黏剂、润湿剂、补强无机填料和腐蚀抑制剂, 形成复杂的非硫化共混物, 以满足上述性能需求^[10-11]。

实际运行中, 动车组高压电缆终端偶发电击穿和胶泥溢出等故障, 引起了广泛关注。近年来, 众多学者对终端的故障原因进行了深入研究。文献[12]指出热缩工艺和密封工艺是导致故障的主要因素, 提出增加端部密封、预热伞裙等改进措施, 并在实验中得到了验证, 显著提高了电缆终端的绝缘性能和可靠性。文献[13]分析了高压套管和伞群的缺陷, 提出更换电缆、改进工艺等措施, 避免了放电故障的再次发生。文献[14]探讨了运行速度和环境对电缆终端振动的影响, 建议优化制造工艺和设计, 加强振动老化研究, 以降低绝缘失效风险。文献[15]通过仿真和实验揭示了

气隙和金属杂质对温度提升的影响, 为缺陷识别提供了理论依据。文献[16]中的实验揭示了气隙缺陷在电热场作用下会加速绝缘劣化, 强调了制造工艺和运行维护的重要性。文献[17]建立了220 kV电缆终端的耦合场模型, 分析了内部缺陷对电场和温度场的影响, 为故障分析和维护提供了理论支持。文献[18]提出了加强人员培训, 严格质量控制和研发检测手段的预防措施。

然而, 导致动车组高压电缆终端密封胶泥溢出的原因未见报道。为此, 本文采用对比分析方法, 对出现溢胶故障的组件、运行正常的组件以及未使用密封胶的组件进行研究, 旨在揭示故障的根本原因, 并提出有效的预防措施, 以进一步提升动车组高压电缆组件的稳定性和安全性, 为轨道交通系统的持续优化提供科学依据。

1 实验方法与条件

1.1 实验样品

分别取未出现故障和出现溢胶故障的高压电缆终端(相同制造商和型号)进行纵向切割, 刮取其橙色密封胶泥, 将未出现故障的样本标记为“正常件”, 将出现溢胶故障的样本标记为“故障件”。同时, 将未使用过的相同型号密封胶泥标记为“新件”。

1.2 红外光谱分析

仪器型号为Bruker Tensor 27, 密封胶泥用ATR附件直接测试, 分辨率为 4 cm^{-1} , 扫描32次。

1.3 热重分析(TGA)

仪器型号为Metler Toledo TGA/DSC 3, 方法参照GB/T 14837.1—2014《橡胶和橡胶制品 热重分析法测定硫化胶和未硫化胶的成分 第1部分: 丁二烯橡胶、乙烯-丙烯二元和三元共聚物、异丁烯-异戊二烯橡胶、异戊二烯橡胶、苯乙烯-丁二烯橡胶》。

1.4 流变性能表征

1) 旋转流变法。仪器型号为TA HR20, 测

试所用夹具均为平行板（珀尔帖板，铝质），直径20 mm，间隙500 μm ，流动稳态扫描：温度90 $^{\circ}\text{C}$ ，剪切速率 $10^{-4} \sim 10^2 \text{ Hz}$ ；恒温振幅扫描：温度25 $^{\circ}\text{C}$ 、90 $^{\circ}\text{C}$ ，角频率1.0 rad/s，应变0.01%~100.0%；温度斜坡振幅扫描：25~120 $^{\circ}\text{C}$ ，升温速率5 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ，IsoStrain模式，运动方向为拉伸。

2) 热流动速率法。熔体流动速率仪（仪器型号为GT-7100），120 $^{\circ}\text{C}$ ，压力1.2 kg，预热4 min，对比流动状态。

3) 热形变法。以密封胶自身黏性粘附在垂直放置的金属板上，在恒温120 $^{\circ}\text{C}$ 环境中放置1 h后观察变化。

2 结果与讨论

2.1 密封胶物质成分分析

(1) 红外光谱分析结果显示故障件胶料组分分布不均匀

该密封胶泥的红外光谱如图1所示，三种样品的主要物质成分未见明显区别，但故障件、正常件的光谱与新件光谱的匹配度分别为91.3%、93.8%（多次测量平均值），说明故障件的成分变化较正常件大。为了分析故障件成分变化较大的原因，计算了各个红外光谱中主要吸收峰强度相对值，即同一张光谱中各吸收峰面积或峰高与该光谱中1 466 cm^{-1} （归属于亚甲基）吸收峰面积进行对比，结果如图2所示。

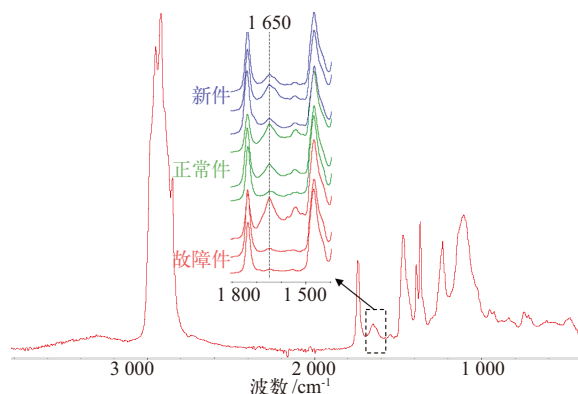


图1 密封胶泥红外光谱

Fig. 1 Infrared spectrum of sealant

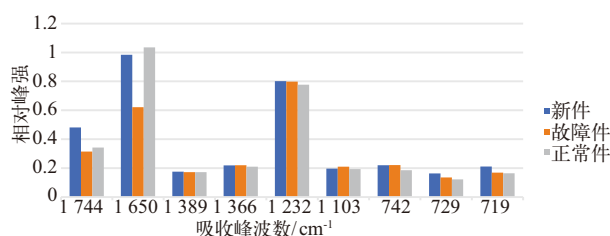


图2 红外光谱中主要吸收峰强度相对值对比

Fig. 2 Comparison of relative values of main absorption peak intensities in infrared spectrum

结果显示，除了1 744 cm^{-1} 、1 650 cm^{-1} 吸收峰外，其他吸收峰的吸光度比值在三种样品中基本一致，说明其所代表的基团含量在三种样品中相近。1 744 cm^{-1} 吸收峰归属于酯羰基，故障件和正常件的酯羰基含量比新件分别低35%、30%，说明密封胶在使用过程中酯类物质因与丁基胶极性相差较大而逐渐析出，含量减少。1 650 cm^{-1} 吸收峰归属于碳碳双键，正常件含量比新件高5%（因酯类物质析出，非极性物质占比提高），而故障件含量比新件低37%。由图1中的局部放大图可见，故障件的3个测试点中有1个点碳碳双键含量高于正常件或新件，而另外2个点的碳碳双键吸收峰几乎消失，由于光谱中未发现不同于正常件或新件的吸收峰，因此推断这是故障件胶料组分分布不均所致。该推测在流变分析及热膨胀实验中得到验证。

(2) 热重分析结果显示故障件的聚合物比例异常

通过热重分析法对比分析密封胶中聚合物、有机小分子化合物及无机填料的含量。结果显示，正常件与故障件的有机小分子化合物含量均比新件低1%~3%（占整个组分比例），这是密封胶泥在使用过程中小分子物质（如酯类化合物等）不断向外迁移所致。在高于300 $^{\circ}\text{C}$ 与氮气气氛的聚合物失重过程分为两个阶段，如图3所示，这两个阶段的失重速率达到最大时的温度分别是358~374 $^{\circ}\text{C}$ 和422~425 $^{\circ}\text{C}$ ，这表明密封胶中存在至少两种类型的聚合物。这一结论得到了差示扫描量热曲线的支持，后者显示了两个玻璃化转变台阶，玻璃化转变温度分别为-77 $^{\circ}\text{C}$ 及

-47 ℃。通过计算低温分解聚合物含量与高温分解聚合物含量的比值，发现正常件与新件的含量比例接近，而故障件的比例高出约15%，这表明故障件中两种聚合物的比例存在异常。这一结果通过在每种样品上进行三次独立取样和测量得出，如图4所示。

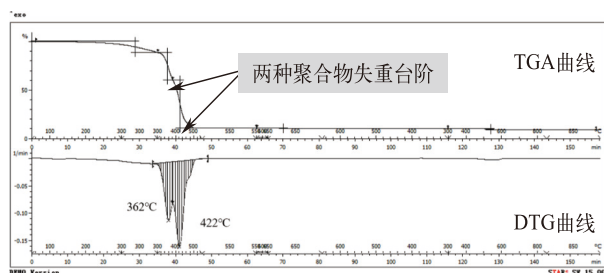


图3 密封胶热重分析结果

Fig. 3 Thermogravimetric analysis results of sealant

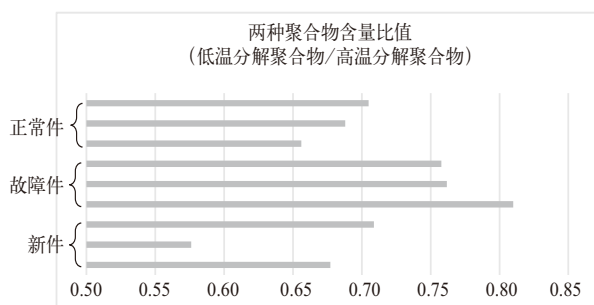
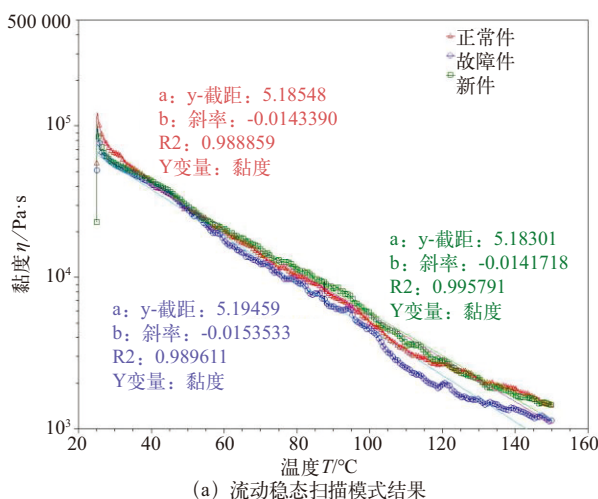


图4 两种聚合物含量比值对比

Fig. 4 Comparison of two polymer content ratios



2.2 密封胶流变性能分析

采用旋转流变法及热流动速率法对比分析密封胶的微观聚集态结构及宏观流变特性。在旋转流变法中，通过流动稳态扫描模式对比材料黏度、通过恒温振幅扫描模式对比动态模量，通过温度斜坡振幅扫描模式对比力学性能随温度变化的规律。采用热流动速率法对比材料在高温及压力作用下的流动特性。

(1) 流动扫描结果显示故障件黏度下降幅度最大

用温度斜坡振幅扫描模式分析黏度随温度变化趋势，结果如图5a所示。低温段（25~55 ℃）内，正常件、故障件与新件的黏度相同；55~100 ℃时，故障件黏度低于新件及正常件；高于100 ℃时，随温度升高故障件黏度下降较快，而正常件与新件的变化趋势相近。

将正常件、故障件及新件置于120 ℃恒温箱中4 h，记为老化后样品，放置室温后与初始样品进行对比分析。流动稳态扫描模式结果如图5b所示，零切黏度由大到小的顺序为：新件（初始）>故障件（初始）>正常件（初始）>新件（老化后）>正常件（老化后）>故障件（老化后），可见故障件老化后黏度下降幅度最大。

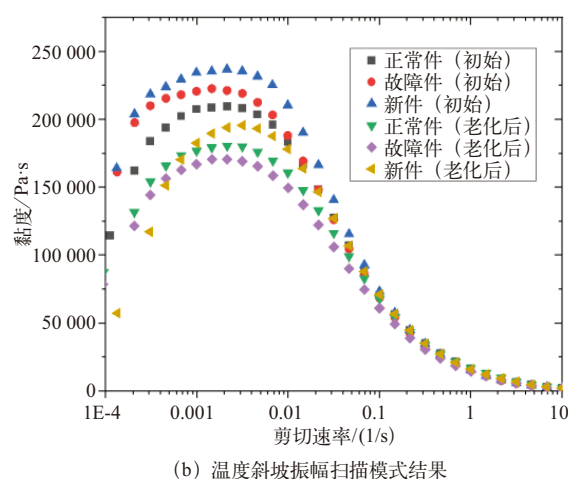


图5 密封胶不同扫描模式结果

Fig. 5 Results of different scanning modes of sealant

(2) 恒温振幅扫描结果显示故障件随温度升高模量下降幅度最大

分别在25℃和90℃恒温条件下,通过振幅扫描模式测量密封胶线性黏弹性区间的储能模量和耗能模量,如图6所示。结果显示,三种样品的模量值在相同的数量级上。90℃模量较25℃的下降了一个数量级。故障件在25℃下的模量值最高,而在90℃下最低,表明其模量下降幅度最为显著。这一结果表明,故障件在低温条件下最“硬”,而在高温下则变得最“软”。

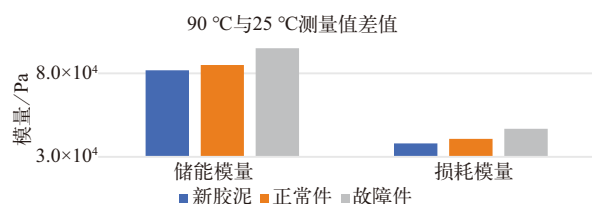


图6 密封胶恒温振幅扫描结果

Fig. 6 Results of constant temperature amplitude scanning mode for sealant

(3) 温度斜坡振幅扫描结果显示密封胶在约80℃时有应力软化转变

温度斜坡振幅扫描(拉伸模式)的结果如图7所示。在70~80℃的温度区间内,轴向力出现了台阶状的快速下降。这表明,在该温度区间,样品表面发生了聚集态的转变,聚合物从高弹态转变为黏流态,或者填料网络发生了变化。通过对比发现,故障件的转变温度最低,而新件的转变温度最高,这说明故障件的软化温度最低。

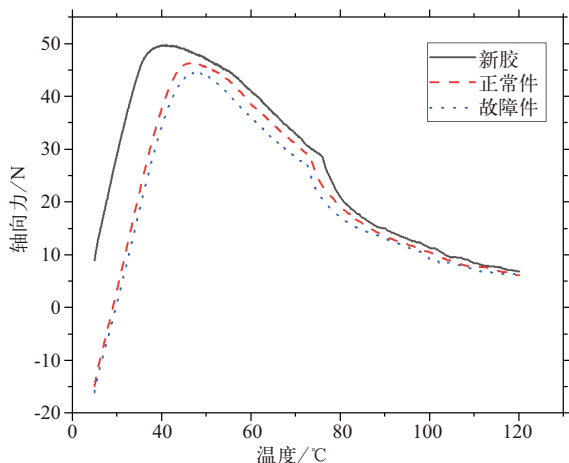


图7 密封胶旋转流变曲线

Fig. 7 Rotational rheological curve of sealant

(4) 热流动速率结果显示故障件高温受压条件下最易流动

热流动速率法以恒定压力(1200g)、恒定温度(120℃)条件下,对比分析相同质量的密封胶通过内径为2.095mm、长为8.000mm的金属口模的时间。故障件、正常件及新件的流出时间分别为105s、122s和131s,故障件流出时间最短,新件最长。

2.3 密封胶热膨胀性对比

密封胶以自身黏性粘附在垂直放置的金属板上,在恒温120℃环境中放置1h后,正常件与新件均有明显均匀膨胀,故障件整体膨胀率小,且出现结团等异常现象,如图8所示。

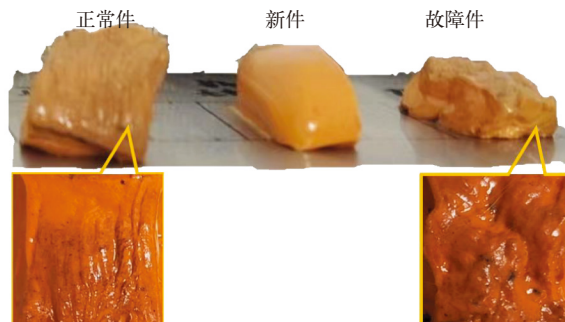


图8 密封胶120℃加热1h后现象

Fig. 8 Phenomenon of sealant after heating at 120℃ for 1 h

3 结束语

在动车组高压电缆组件终端中,密封胶的密封性能对电气安全至关重要。密封胶的外溢现象直接导致其密封性劣化,因此,深入探究外溢原因并制定相应的预防策略是保障系统安全运行的关键。文中通过成分分析、流变特性评估等手段,对比出现溢胶故障的密封胶、正常运行的密封胶和新胶,揭示了溢胶的根本原因在于组分分布不均及某聚合物含量过高,引发了胶料内部的非均匀团聚和宏观层面的组分分离,使得密封胶在高温下黏度和模量的下降幅度异常。为有效防止此类故障,建议在密封胶的质量控制环节中,引入红外光谱、热重分析以及流变法等测试指标,以确保其成分比例的稳定性和流变性能的适宜性。这些措施的实施将有助于提升密封胶的性

能一致性,降低因密封胶问题引发的电气安全风险。

参考文献

- [1] 汪发现,王蕾.机车高压电缆柔性终端故障分析及建议[J].电力机车与城轨车辆,2024,47(1):111-114,134.
- [2] 王景兵,王家兴,李国倡,等.动车组车顶高压电缆终端材料特性分析及电-热耦合场仿真研究[J].绝缘材料,2022,55(7):64-70.
- [3] 咎海斌,李国倡,王景兵,等.动车组车顶高压电缆终端电场仿真及界面缺陷模拟研究[J].绝缘材料,2020,53(3):99-104.
- [4] 周新力,周庆朝.CR400AF型动车组高压电缆终端放电击穿故障分析[J].铁道运营技术,2021,27(3):1-3.
- [5] 孙永辉,王馥珏,韩宇泽.高压电缆终端击穿故障的分析与处理[J].兵器装备工程学报,2019,40(8):207-211.
- [6] 尹叶红,王永超,张永波.动车组高压电缆局部放电试验的研究与应用[J].铁道车辆,2013,51(4):11-14.
- [7] 张洪雁,曹寿德,王景鹤.高性能橡胶密封材料[M].北京:化学工业出版社,2007.
- [8] 刘崇湘.非干性密封胶的性能和应力分析及其耐压测试[J].重型机械,1984(9):27-31.
- [9] 刘建国,杨志武.环保型丁基橡胶防水密封胶粘带胶料配方研究[J].橡塑资源利用,2018(4):19-24.
- [10] 王浩,夏海渤,孙禹,等.轨道车辆用丁基不干性密封腻子的研制[J].电镀与涂饰,2020,39(6):329-334.
- [11] 陈福林,岑兰,周彦豪,等.非硫化型丁基橡胶止水胶带的研究[J].合成橡胶工业,1997(5):50-52.
- [12] 王继华,牛如岩,宿伟,等.动车组用高压电缆终端故障分析及改进[J].铁道车辆,2020,58(10):36-39.
- [13] 李霞.HXD1C型电力机车高压电缆终端放电的原因分析和改进措施[J].铁道机车车辆,2015,35(1):82-84.
- [14] 刘寅秋,盛婕,戴晋,等.动车组高压半刚性电缆终端动态运行特性研究[J].铁道机车车辆,2024,44(1):125-130.
- [15] 程高远.车载电缆终端内部缺陷的温度特性与局部放电特性研究[D].成都:西南交通大学,2021.
- [16] 支青云,孙继星.动车组高压电缆终端的绝缘劣化机理研究[J].电气化铁道,2020,31(S2):58-61.
- [17] 吴佳馨.高压电缆终端电磁-热特性及其缺陷影响研究[D].重庆:重庆邮电大学,2021.
- [18] 周新力,周庆朝.CR400AF型动车组高压电缆终端放电击穿故障分析[J].铁道运营技术,2021,27(3):1-3.

作者简介

许万涛(1990—),男,硕士,高级工程师,研究方向为轨道车辆电气系统设计。

陈冬梅(1972—),女,通信作者,博士,高级实验师。

(收稿日期:2024-07-03)