红外光谱法在塑料电缆热老化绝缘失效机理

研究中的应用

章 颖

（石嘴山市消防支队 宁夏 石嘴山 753000）

**摘 要：**选用市场上常见的RVV、YJV和ZR-YJV电缆作为研究对象，通过热老化试验箱和大电流发生器制备不同老化程度的电缆样品，利用傅立叶变换红外光谱仪对不同老化程度的电缆绝缘和护套材料进行分析。研究发现，当PVC电缆料在3392 cm-1（O－H伸缩振动）和1635 cm-1（C＝C伸缩振动）处，XLPE电缆料在1732 cm-1（C＝O伸缩振动）、1170 cm-1和1066 cm-1（C－O伸缩振动）处出现特征吸收谱带，表明它们已达到了危险老化程度，很可能发生漏电、短路故障引发火灾，验证了红外光谱法协助认定电气线路火灾原因的可行性。

**关键词：**红外光谱；塑料电缆；热老化；绝缘失效

0　引言

电缆热老化、绝缘失效易引发火灾，通过研究热老化对电缆料内部结构及成分变化的影响，找出电缆绝缘失效随老化程度变化的规律。在今后的电气线路火灾原因认定时，可根据线路老化发生在全线而非局部这一客观事实，提取火场故障线缆未过火部分的绝缘、护套材料进行红外分析，利用本文结论判断该线缆的热老化程度，确定其绝缘失效并引发火灾的可能性，为火灾物证技术鉴定人员提供一种可靠的辅助证明手段。

1　样品制备

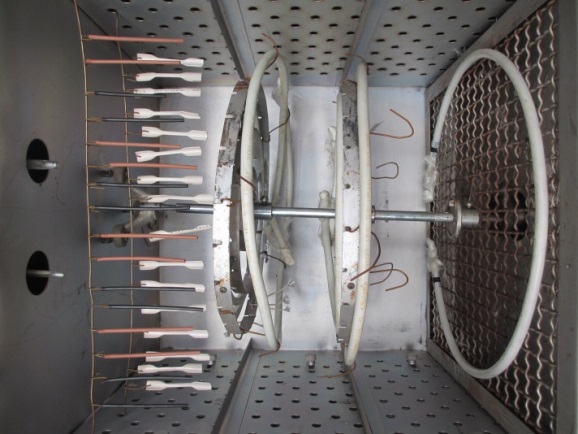
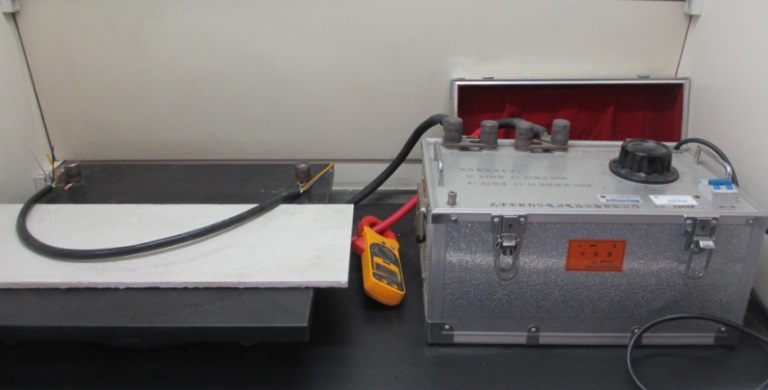
选用市场上常见的RVV、YJV和ZR-YJV电缆为原料，具体规格如表1所示。

**表1　选用电缆的规格**

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 型号 | 导体芯数 | 标称截面积 | 额定电压 | 绝缘类型及厚度 | 护套类型及厚度 |
| RVV | 3芯 | 2.5 mm2 | 300/500 V | PVC/D型聚氯乙烯混合物  厚0.8 mm | PVC/ST5型聚氯乙烯混合物  厚1.1 mm |
| YJV | 5芯 | 2.5 mm2 | 0.6/1 kV | 交联聚乙烯（XLPE）  厚0.7 mm | PVC/ST1型聚氯乙烯混合物  厚1.8 mm |
| ZR-YJV | 5芯 | 2.5 mm2 | 0.6/1 kV | 交联聚乙烯（XLPE）  厚0.7 mm | PVC/ST2型聚氯乙烯混合物  厚1.8 mm |

将全新的RVV、YJV和ZR-YJV电缆护套沿线芯轴向切开，除去内部所有元件，用冲模将护套冲切成哑铃试件；取出绝缘线芯，去除所有外护层，在不损伤绝缘的条件下抽出导体，将绝缘制成7.5 cm长的管状试件。根据GB/T 2951.12-2008[1]中空气烘箱老化法的相关要求，将哑铃护套与管状绝缘试件垂直悬挂于401A型热老化试验箱中部，保持各试样之间、试样与箱壁之间的间距不少于2 cm，试样放置情况如图1所示。根据GB/T 5023.1-2008[2]和GB/T 12706.1-2008[3]，分别将RVV绝缘和护套、YJV和ZR-YJV护套、YJV和ZR-YJV绝缘的老化温度定为80℃、100℃、135℃，以7天为周期定时从老化箱中将试样取出并做好标记，制得不同标准热老化程度的电缆料样品。

将全新的RVV、YJV和ZR-YJV电缆截成1 m长的样段，用壁纸刀将护套两端沿电缆轴向切开12 cm并剥去；剪去露出的包覆材料和填充材料，用剥线钳将其中相邻两根线芯两端的绝缘剥去6 cm。将电缆段两端裸露的两根铜芯拧在一起，分别压接到KSL-1000型大电流发生器输出端的两个接线柱上。再用交流电钳形电表的钳口中央卡住输出线，确保钳口紧密闭合，老化装置如图2所示。根据IEC 60364-5-523[4]，分别对RVV、YJV和ZR-YJV电缆试样以54 A、60 A和60 A的电流进行过载老化，以每天10 h作为老化周期，制得不同过载老化程度的电缆料样品。

**图1 标准热老化试样放置图 图2 过载老化试验装置图**

利用Avatar 370DTGS型FTIR光谱仪对未老化及不同老化程度的电缆样品进行红外分析。借助EZ OMNIC软件读出实验结果并对光谱进行处理与分析。

2　实验结果与讨论

2.1　不同标准热老化程度电缆料的红外光谱分析

图3为不同标准热老化程度电缆料的红外光谱对比图。

（a）RVV绝缘 （b）RVV护套

（c）YJV、ZR-YJV绝缘 （d）YJV护套



（e）ZR-YJV护套

**图3 不同标准热老化程度电缆料红外光谱图**

从图3（a）、（b）、（d）、（e）可以看出，在同一老化程度下，RVV绝缘以及RVV、YJV、ZR-YJV护套的红外特征峰类似，除吸收强度存在差异外，其形状、位置基本相同。随着老化时间增加，红外谱图中没有出现新的吸收峰，大部分特征峰呈现不同程度的减弱趋势。老化91天（42天）后的增塑剂吸收峰1725 cm-1（C＝O伸缩振动）、1275 cm-1（C－O－C不对称伸缩振动）、1124 cm-1（C－O－C对称伸缩振动）、742 cm-1（苯环邻位取代4个相邻氢原子面外弯曲振动），PVC树脂吸收峰1425 cm-1（聚氯乙烯单体中CH2面内弯曲振动）、1252 cm-1（聚氯乙烯单体中C－H面外弯曲振动），稳定剂吸收峰1074 cm-1（SO42-、HPO32-晶格振动）以及填充剂吸收峰875 cm-1（CO32-晶格振动）、712 cm-1（C－O面外弯曲振动）与未老化的相比峰强明显减弱甚至消失，就其数量、强度而言，RVV护套比相应RVV绝缘谱图中的多、大。这表明RVV绝缘以及RVV、YJV、ZR-YJV护套的标准热老化是其内部增塑剂、稳定剂、填充剂和PVC树脂随时间持续分解、降解和挥发的过程，老化程度越大、柔韧性越低、电缆料逐渐变脆，而RVV电缆护套材料的耐热性优于绝缘。对比图3（d）、（e）可知，随着老化时间增加，ZR-YJV护套首先发生800 cm-1 Mo＝O伸缩振动峰的减弱与消失，其后变化规律同YJV护套。正是由于阻燃剂MoO3的存在，提高了护套材料的耐热性，减缓了ZR-YJV电缆的热老化进程。

从图3（c）可以看出，随着老化时间增加，1646 cm-1孤立C＝C伸缩振动峰消失，红外谱图中出现了新的吸收峰1732 cm-1（C＝O伸缩振动），其吸收强度逐渐增强，可能是聚乙烯分子的烯端基氧化成了醛、酸、酯等羰基化合物；1066 cm-1 C－O伸缩振动峰与1170 cm-1 C－O伸缩振动峰相继出现、相互叠加，其吸收强度逐渐增强，可能是大分子链断裂生成的自由基发生了氧化。有文献指出，羰基指数的大小可用于表征实际运行的XLPE电缆的热老化程度[5]，图3（c）正可以验证这一结论。

2.2 不同过载老化程度电缆料的红外光谱分析

图4为不同过载老化程度电缆料的红外光谱对比图。

（a）RVV绝缘 （b）RVV护套

（c）YJV、ZR-YJV绝缘 （d）YJV护套



（e）ZR-YJV护套

**图4 不同过载老化程度电缆料红外光谱图**

从图4（a）、（b）可以看出，随着老化时间增加，最强峰1425 cm-1（聚氯乙烯单体中CH2面内弯曲振动）明显减弱或逐渐分成1462 cm-1（CH2变形振动）、1425 cm-1、1380 cm-1（CH3变形振动）三个轻微的吸收峰，表明RVV电缆料中PVC树脂的含量随老化程度的加深而减少；随着老化时间增加，谱图中出现了两个新的吸收峰，即3392 cm-1（O－H伸缩振动）和1635 cm-1（C＝C伸缩振动），其吸收强度呈现先增强后减弱的变化趋势。增强可能是多种含卤小分子（由PVC树脂受热降解产生）进一步高温水解成醇[6]、PVC树脂脱HCl成多烯链烃的缘故，减弱可能是材料继续受热水分子挥发、多烯链烃进一步裂解发生环化与芳香化的结果。对比图4（a）、（b）可知，RVV护套中PVC树脂水解成醇、脱HCl成烯的过程比其绝缘约慢10 h，这是因为护套包覆在电缆的最外层，与载流线芯之间还隔着绝缘层与填充层，通电时护套散热较好、受热温度较低，所以老化程度较轻。

从图4（c）可以看出，随着老化时间增加，1471 cm-1、1464 cm-1 CH2面内弯曲振动峰，730 cm-1、719 cm-1 4个以上CH2摇摆振动峰吸收强度逐渐减弱，可能是聚乙烯分子中的C－C单键断裂成了小分子的缘故；当老化5 h后，1646 cm-1孤立C＝C伸缩振动峰消失，红外谱图中出现了新的1732 cm-1 C＝O伸缩振动峰、1378 cm-1 CH3变形振动峰以及1170 cm-1、1137 cm-1、1066 cm-1 C－O伸缩振动峰，其吸收强度随老化时间的增加而增强，这可能是聚乙烯分子内烯端基氧化成醛、酸、酯等羰基化合物振动的结果。

从图4（d）、（e）可以看出，随着老化时间增加，YJV、ZR-YV护套的红外谱图中没有出现新的吸收峰，大部分特征峰呈现不同程度的减弱趋势。当过载老化5 h时，ZR-YJV护套在800 cm-1（Mo＝O伸缩振动）处的峰强明显降低，直到老化10 h后完全消失，表明ZR-YJV护套受热后阻燃剂MoO3最先发生反应并且10 h就已分解殆尽；自此，1725 cm-1（C＝O伸缩振动）、1425 cm-1（CH2面内弯曲振动）和875 cm-1（CO32-晶格振动）处的吸收峰才有明显的减弱，表明ZR-YJV护套中PVC树脂、增塑剂以及填充剂逐渐开始分解；直到老化30 h后，2960 cm-1、2920 cm-1和2850 cm-1（脂族C－H伸缩振动）、1425 cm-1、1074 cm-1（SO42-、HPO32-晶格振动）以及875 cm-1处仍存在微小吸收，表明此时ZR-YJV护套中部分PVC树脂、稳定剂与填充剂还未完全分解。对比图4（d）、（e）可知，ZR-YJV护套残留的吸收峰数量多于YJV护套，表明ZR-YJV比YJV电缆耐热性稍强。

3　实例应用

为了验证红外光谱法在电气线路火灾原因认定中的辅助证明作用，笔者找来安徽某电气线路火灾中的故障线缆，取其未过火部分的绝缘材料进行了红外光谱分析。因火场故障线缆为25 mm2的单芯聚氯乙烯铝导线，属于PVC/D型电缆料，故将其红外谱图与RVV电缆绝缘进行对比，如图5所示。



**图5 不同PVC电缆绝缘的红外光谱对比图**

对比谱图a与b发现，一方面，该故障线缆绝缘比未老化的RVV电缆绝缘在3392 cm-1和1635 cm-1处新增了两个吸收峰，即出现了O－H与C＝C的伸缩振动，由于二者具有强极性与共轭结构，当电缆通电时可充当载流子增加材料的导电性；另一方面，该故障线缆在1725 cm-1、1425 cm-1与875 cm-1处的吸收峰强度比未老化的RVV电缆绝缘弱，即C＝O伸缩振动、聚氯乙烯单体中CH2面内弯曲振动以及CO32-晶格振动较弱，表明材料部分增塑剂、填充剂以及PVC本体已经发生了热分解，柔韧性降低，容易变脆开裂。将火场故障线缆的红外谱图与不同老化程度RVV电缆料的进行对比，发现其老化程度与过载老化10 h的RVV电缆绝缘最为接近，如图b与c所示。综合以上两点可知，该导线很可能是因为线路老化达到了危险泄漏电流，发生漏电或短路故障继而引发了火灾，此结果与武警学院火灾物证鉴定中心认定的一次短路结果一致。

以上例子，侧面验证了红外光谱法辅助证明电气线路火灾原因的可行性。运用此方法进行火灾原因分析时需注意：与未老化标准谱图对比，若PVC电缆料的谱图中新增3392 cm-1（O－H伸缩振动）和1635 cm-1（C＝C伸缩振动）的特征吸收峰，XLPE电缆料的谱图中新增1732 cm-1（C＝O的伸缩振动）、1170 cm-1和1066 cm-1（C－O伸缩振动）的特征吸收峰，则可以肯定电缆已经达到了一定的危险老化程度，发生漏电、短路故障的可能性很大；若没有这些特征峰的新增，也不能排除电缆发生一次短路的可能，还可能存在一些机械外力、动物啃咬等偶然因素造成的电缆故障。

4　结论

通过对三种常用塑料电缆未老化与不同老化程度的绝缘与护套材料进行红外光谱分析，探讨电缆热老化后的绝缘失效机理，得出以下结论：

（1）RVV电缆绝缘、护套以及YJV电缆护套均属于PVC电缆料，它们具有类似的红外特征和热老化失效规律，其热老化程度与其内部PVC树脂及各种添加剂的热分解程度相对应。随着热老化程度的加深，电缆料内C＝C双键与O－H氢键的数量增多，由于其具有共轭性与强极性，可在外加电场的作用下充当载流子，增加了电缆料的导电率，使电缆发生绝缘失效与击穿的时间缩短，电气线路发生故障的机率增大。

（2）ZR-YJV电缆护套属于阻燃PVC电缆料，它与PVC电缆料的热老化机理相似，只是在各种添加剂与PVC树脂分解之前，由阻燃剂首先分解吸热以延缓电缆料的热老化进程。

（3）YJV、ZR-YJV电缆绝缘均属于XLPE电缆料，它们的热老化是PE分子内未完全聚合的乙烯基氧化成醛、酸、酯等羰基化合物以及链断裂生成的自由基发生氧化的过程，由于形成的C＝O羰基与C－O单键具有共轭性与极性，成为通电电缆绝缘层中传导电流的载流子，使电缆绝缘电阻下降，增加漏电的可能。

（4）当PVC电缆料在3392 cm-1（O－H伸缩振动）和1635 cm-1（C＝C伸缩振动）处，XLPE电缆料在1732 cm-1（C＝O伸缩振动）、1170 cm-1和1066 cm-1（C－O伸缩振动）处出现特征吸收谱带，表明它们已达到了危险老化程度，发生漏电、短路故障继而引发火灾的可能性很大。

（5）运用上述结论对某电缆火灾故障线缆的绝缘材料进行了红外光谱分析，结果与授权鉴定中心的鉴定结论一致，验证了红外光谱法辅助证明电气线路火灾原因的可行性。

**参考文献**

[1] GB/T 2951.12-2008, 电缆和光缆绝缘和护套材料通用试验方法 第12部分：通用试验方法——热老化试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.

[2] GB/T 5023.1-2008, 额定电压450/750V及以下聚氯乙烯绝缘电缆 第1部分：一般要求[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.

[3] GB/T 12706.1-2008, 额定电压1 kV（Um=1.2 kV）到35 kV（Um=40.5 kV）挤包绝缘电力电缆及附件 第1部分：额定电压1 kV（Um=1.2 kV）和3 kV（Um=3.6 kV）电缆[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.

[4] IEC 60364-5-523, 建筑物电气装置 第五部分：电气设备的选择和安装 第52章：布线系统 第523节：载流量[S]. 北京: 中国标准出版社, 1998.

[5] 徐俊, 王晓东, 欧阳本红, 等. 热老化对交联聚乙烯电缆绝缘理化结构的影响[J]. 绝缘材料, 2013, 46(2):34.

[6] 林华影, 林瑶, 张伟, 等. 气相色谱-质谱法分析聚氯乙烯加热分解产物[J]. 中国卫生检验杂志, 2008, 18(4): 587-589.

Application of FTIR in study of insulation failure mechanism of thermal aging plastic cables

ZHANG Ying

(Shizuishan Fire Detachment, Ningxia Shizuishan 753000, China)

**Abstract:** RVV, YJV and ZR-YJV cable common in market was selected as the study object. Different aging degree of cable samples are made by thermal aging test chamber and strong current generator. The FTIR was studied with different aging degree of insulation and sheathing cable material. The study result showed that if characteristic absorption band of 3392 cm-1 (O－H stretching vibration) and 1635 cm-1 (C＝C stretching vibration) appeared in PVC cable material, 1732 cm-1 (C＝O stretching vibration), 1170 cm-1 and 1066 cm-1 (C－O stretching vibration) appeared in XLPE cable material, they have reached the dangerous aging degree. The are likely to have the leakage or short circuit, resulting in a fire. Infrared spectroscopy has been verified to be helpful in the identification of the cause of electric circuit fires.

**Key words:** infrared spectroscopy; plastic cable; thermal aging; insulation failure

**作者简介：**章颖（1990－），女，甘肃张掖人，宁夏石嘴山市消防支队防火监督处助理工程师，硕士，主要从事火灾事故调查和建设工程消防设计审核工作。