

# 无卤低烟阻燃三元乙丙橡胶电缆绝缘材料的阻燃体系研究

吴洪,段国权,陈卫,代占勇

(特变电工股份有限公司新疆线缆厂,新疆昌吉 831100)

**摘要:**应用二次响应曲面试验设计法研究无卤低烟阻燃三元乙丙橡胶(LSOH-EPDM)电缆绝缘材料的阻燃体系和阻燃性能,建立不同性能指标的回归方程。结果表明:采用响应曲面试验设计法得出的LSOH-EPDM绝缘材料不同性能指标的回归方程预测值与试验值吻合性较好;随着镁铝水滑石、氢氧化铝和氢氧化镁用量的增大,胶料的阻燃性能提高,物理性能呈下降趋势;3种阻燃剂的对比对阻燃性能影响显著,采用镁铝水滑石、氢氧化铝和氢氧化镁用量分别为67,53和59份的阻燃体系的LSOH-EPDM胶料具有良好的阻燃性能、耐高温性能和耐油性;采用LSOH-EPDM绝缘材料生产的单芯阻燃A类电缆阻燃性能提高,整体材料成本降低。

**关键词:**无卤低烟阻燃电缆;三元乙丙橡胶;绝缘材料;阻燃体系;阻燃性能;二次响应曲面试验设计;回归方程

**中图分类号:**TQ333.4;TQ330.38<sup>+</sup>2

**文献标志码:**A

**文章编号:**2095-5448(2019)07-0383-06

**DOI:**10.12137/j.issn.2095-5448.2019.07.0383

“十三五”时期,我国交通运输发展正处于支撑全面建成小康社会的攻坚期、优化网络布局的关键期、提质增效升级的转型期,将进入现代化建设新阶段,更加注重提高交通安全和应急保障能力,提升绿色、低碳、集约发展水平,加快完善现代综合交通运输体系,更好地发挥交通运输的支撑作用。

为保证轨道交通的安全环保及电缆安装接线方便,供电设计选用了很多无卤低烟阻燃A类橡胶绝缘单芯直流电缆。为满足电缆设计要求,本工作应用二次响应曲面试验设计法研究无卤低烟阻燃三元乙丙橡胶(LSOH-EPDM)电缆绝缘材料的阻燃体系配方。

## 1 实验

### 1.1 主要原材料

三元乙丙橡胶(EPDM),牌号4960,美国陶氏化学公司产品;牌号4045,中国石油吉林石化公司产品。镁铝水滑石FM3000,韩国信元化学株式

会社产品。氢氧化铝LEO-104,德国马丁公司产品。氢氧化镁MH,美国雅宝公司产品。硼酸锌Firebreak ZB,美国力拓公司产品。

### 1.2 试验配方

基本试验配方:EPDM4960 60,EPDM4045 40,氢氧化镁 40~70,镁铝水滑石 50~70,氢氧化铝,35~60,其他 45。

选择镁铝水滑石、氢氧化铝和氢氧化镁为变量因子,采用响应曲面试验设计法,同时考虑3因子间的2阶影响作用,进行20组配方(见表1)设计试验。每个变量因子的水平分别编为 $-\gamma$ ,  $-1, 0, 1, \gamma$ , 其中 $\gamma=2^{m/4}$ , 变量因子个数 $m=3$ , 即 $\gamma=2^{3/4}\approx 1.68$ , 其意义为在半径为 $\gamma$ 的球面上试验点数量 $m_\gamma=6$ 。

### 1.3 主要设备和仪器

JG-7211型密炼机,扬州市金刚(试验)机械厂产品;QLB-25D/Q型平板硫化机,无锡新锐橡塑机械有限公司产品;JN-HQLH-1581型换气式老化箱,东莞市杰恩检测设备有限公司产品;JF-3型氧指数测定仪,南京江宁分析仪器有限公司产品;ZC36型高绝缘电阻测量仪,上海安标电子有限公司产品;ADT-5/50型工频介电强度试验仪,上海蓝波高电压技术设备有限公司产品;JSM-7001F

**作者简介:**吴洪(1986—),男,四川广安人,特变电工股份有限公司新疆线缆厂工程师,学士,主要从事橡胶材料配方研发与技术管理工作。

**E-mail:**120537862@qq.com

表1 响应曲面试验配方设计

| 配方编号 | 镁铝水滑石(因子 $x_1$ ) |      | 氢氧化铝(因子 $x_2$ ) |      | 氢氧化镁(因子 $x_3$ ) |      |
|------|------------------|------|-----------------|------|-----------------|------|
|      | 水平               | 用量/份 | 水平              | 用量/份 | 水平              | 用量/份 |
| 1    | -1               | 46   | -1              | 40   | -1              | 54   |
| 2    | 1                | 64   | -1              | 40   | -1              | 54   |
| 3    | -1               | 46   | 1               | 55   | -1              | 54   |
| 4    | 1                | 64   | 1               | 55   | -1              | 54   |
| 5    | -1               | 46   | -1              | 40   | 1               | 66   |
| 6    | 1                | 64   | -1              | 40   | 1               | 66   |
| 7    | -1               | 46   | 1               | 55   | 1               | 66   |
| 8    | 1                | 64   | 1               | 55   | 1               | 66   |
| 9    | -1.68            | 40   | 0               | 48   | 0               | 60   |
| 10   | 1.68             | 70   | 0               | 48   | 0               | 60   |
| 11   | 0                | 55   | -1.68           | 35   | 0               | 60   |
| 12   | 0                | 55   | 1.68            | 60   | 0               | 60   |
| 13   | 0                | 55   | 0               | 35   | -1.68           | 50   |
| 14   | 0                | 55   | 0               | 60   | 1.68            | 70   |
| 15   | 0                | 55   | 0               | 60   | 0               | 60   |
| 16   | 0                | 55   | 0               | 60   | 0               | 60   |
| 17   | 0                | 55   | 0               | 60   | 0               | 60   |
| 18   | 0                | 55   | 0               | 60   | 0               | 60   |
| 19   | 0                | 55   | 0               | 60   | 0               | 60   |
| 20   | 0                | 55   | 0               | 60   | 0               | 60   |

型扫描电子显微镜,日本JEOL公司产品。

#### 1.4 试样制备

将EPDM和除氢氧化镁、镁铝水滑石和氢氧化铝之外的其他助剂在密炼机中混炼,密炼室温度范围为85~120℃,转子转速为35~45 r·min<sup>-1</sup>,混炼时间为5~8 min,制得母炼胶。

按照表1,将氢氧化镁、镁铝水滑石和氢氧化铝与母炼胶在密炼机中共混3~5 min,采用扫描电子显微镜随机抽测混炼胶中填料的分散效果,直至填料分散均匀(效果如图1所示),胶料在平板硫化机上进行硫化。

#### 1.5 性能测试

胶料各项性能均按相应国家或企业标准进行测试。

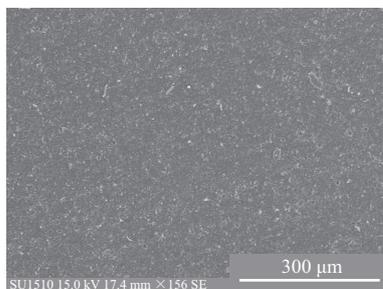


图1 混炼胶中填料分散均匀效果

## 2 结果与讨论

### 2.1 阻燃体系设计

在LSOH-EPDM绝缘材料配方中选用氢氧化镁、氢氧化铝和镁铝水滑石作为阻燃剂。氢氧化铝在230~300℃分解释放出35%结晶水,吸热量为1.97 kJ·g<sup>-1</sup>[1];氢氧化镁在360~490℃分解释放出32%结晶水,吸热量为0.77 kJ·g<sup>-1</sup>[2-4];镁铝水滑石在220℃以上时,53%转化为水蒸气和二氧化碳,在230~450℃分解释放出结晶水,在450~600℃分解释放出二氧化碳,温度高于600℃时成碳[5]。镁铝水滑石的分解过程及成碳壳壳形貌如图2和3所示。

镁铝水滑石、氢氧化铝和氢氧化镁受热分解释放的水蒸气可稀释可燃气体浓度,无毒、无腐蚀性,有抑烟作用,此外,镁铝水滑石分解产生的二氧化碳还有抑燃作用。无机材料与EPDM之间的亲和性较弱,不易混合均匀,因此需对无机材料进行表面改性处理,提高其在EPDM中的分散性和亲和性,以达到阻燃的效果[5-6]。

在阻燃体系设计中,氢氧化镁、氢氧化铝和镁铝水滑石的配比是关键。对20组试验配方胶料进行性能测试,结果如表2所示。

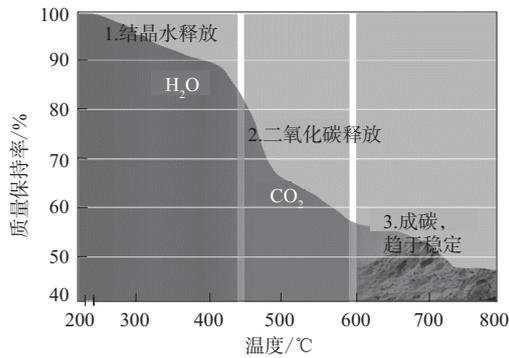


图2 镁铝水滑石分解过程

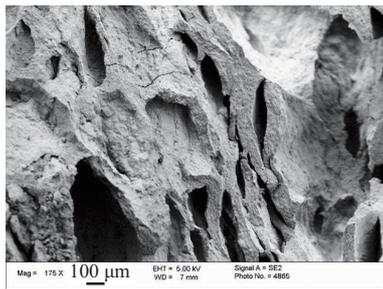


图3 镁铝水滑石成碳结壳形貌

## 2.2 回归方程的建立和检验

研究3变量因子不同水平对胶料各项性能的

量化关系,选择2阶多项式回归模型,即:

$$\hat{y} = b_0 + \sum_{j=1}^{t_2} b_j \cdot x_j + \sum_{i < j} b_{ij} \cdot x_i \cdot x_j + \sum_{j=1}^{t_2} b_{jj} \cdot x_j^2$$

式中,  $b_0, b_j, b_{ij}$  和  $b_{jj}$  为回归系数,  $x_i$  和  $x_j$  为变量因子,  $\hat{y}$  为性能指标,  $i$  和  $j$  为  $1, 2, \dots, t_2$ 。

使用Mathcad软件计算并建立不同性能指标对应的回归方程式,并对回归方程的显著性进行F检验,对方程式的回归系数进行t检验,选择符合要求的回归模型,不同性能指标对应的回归方程式如表3所示。

考虑混炼胶的加工性能,验证回归方程的准确性,令镁铝水滑石用量为67份、氢氧化铝用量为53份和氢氧化镁用量为59份,代入回归方程得到胶料性能的预测值,并与试验值进行比较,结果如表4所示。由表4可知,试验值与回归方程预测值吻合性较好,说明所建立的回归方程模型是有效的。

## 2.3 变量因子影响分析

通过响应曲面法建立的回归方程模型预测可知,LSOH-EPDM胶料的阻燃性能随着镁铝水滑石、氢氧化铝和氢氧化镁的用量增大而提高,物理

表2 胶料各项性能测试结果

| 配方编号 | $T_s$ | $E_B$ | $\rho_v \times 10^{-15}$ | $\Delta T_{S1}^{1)}$ | $\Delta E_{B1}^{1)}$ | $\Delta T_{S2}^{2)}$ | $\Delta E_{B2}^{2)}$ | ML(1+4) 100 °C | $t_{10}$ | $t_{90}$ | $B_S$ | $D_{S1}$ | $D_{S2}$ | LOI |
|------|-------|-------|--------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------|----------|----------|-------|----------|----------|-----|
| 1    | 9.2   | 360   | 2.9                      | 8                    | 11                   | 31.45                | 37                   | 46             | 101      | 497      | 31    | 137      | 342      | 28  |
| 2    | 7.8   | 330   | 2.8                      | 11                   | 15                   | 35.70                | 42                   | 47             | 97       | 475      | 29    | 121      | 321      | 29  |
| 3    | 6.8   | 400   | 2.9                      | 13                   | 17                   | 32.30                | 38                   | 49             | 91       | 443      | 30    | 112      | 312      | 30  |
| 4    | 6.4   | 380   | 2.6                      | 12                   | 18                   | 33.15                | 39                   | 51             | 83       | 427      | 27    | 109      | 309      | 33  |
| 5    | 8.3   | 370   | 2.8                      | 13                   | 22                   | 34.00                | 40                   | 48             | 96       | 462      | 29    | 121      | 321      | 29  |
| 6    | 6.7   | 300   | 2.6                      | 15                   | 23                   | 35.70                | 42                   | 49             | 94       | 405      | 27    | 117      | 317      | 31  |
| 7    | 7.1   | 340   | 2.7                      | 16                   | 27                   | 34.85                | 41                   | 50             | 86       | 383      | 28    | 109      | 309      | 33  |
| 8    | 5.9   | 220   | 2.4                      | 22                   | 35                   | 40.80                | 48                   | 56             | 68       | 365      | 25    | 87       | 267      | 38  |
| 9    | 9.5   | 360   | 2.9                      | 9                    | 13                   | 31.45                | 37                   | 46             | 105      | 385      | 30    | 127      | 327      | 30  |
| 10   | 6.1   | 260   | 2.6                      | 12                   | 22                   | 35.70                | 42                   | 53             | 89       | 425      | 27    | 105      | 305      | 34  |
| 11   | 7.3   | 320   | 2.6                      | 10                   | 18                   | 34.00                | 40                   | 48             | 92       | 435      | 27    | 118      | 318      | 32  |
| 12   | 7.3   | 320   | 2.6                      | 10                   | 18                   | 34.00                | 40                   | 48             | 93       | 435      | 27    | 116      | 316      | 32  |
| 13   | 9.8   | 480   | 3.1                      | 6                    | 9                    | 30.60                | 36                   | 42             | 115      | 475      | 32    | 156      | 366      | 26  |
| 14   | 6.6   | 300   | 2.5                      | 19                   | 32                   | 36.55                | 43                   | 51             | 79       | 368      | 26    | 102      | 292      | 35  |
| 15   | 7.3   | 320   | 2.6                      | 10                   | 18                   | 34.00                | 40                   | 48             | 92       | 435      | 27    | 118      | 318      | 32  |
| 16   | 7.3   | 320   | 2.6                      | 10                   | 18                   | 34.00                | 40                   | 48             | 92       | 436      | 27    | 117      | 317      | 33  |
| 17   | 7.3   | 320   | 2.6                      | 10                   | 18                   | 34.00                | 40                   | 48             | 93       | 435      | 27    | 117      | 317      | 32  |
| 18   | 7.3   | 320   | 2.6                      | 10                   | 18                   | 34.00                | 40                   | 48             | 92       | 436      | 27    | 117      | 317      | 32  |
| 19   | 7.3   | 320   | 2.6                      | 10                   | 18                   | 34.00                | 40                   | 48             | 93       | 437      | 27    | 116      | 316      | 32  |
| 20   | 7.3   | 320   | 2.6                      | 10                   | 18                   | 34.00                | 40                   | 48             | 92       | 434      | 27    | 118      | 317      | 33  |

注:  $T_s$ —拉伸强度,MPa;  $E_B$ —拉断伸长率,%;  $\rho_v$ —体积电阻率,  $\Omega \cdot \text{cm}$ ;  $\Delta T_{S1}$ —热空气老化后拉伸强度变化率,%;  $\Delta E_{B1}$ —热空气老化后拉断伸长率变化率,%;  $\Delta T_{S2}$ —油浸泡后拉伸强度变化率,%;  $\Delta E_{B2}$ —油浸泡后拉断伸长率变化率,%;  $t_{10}$ —焦烧时间,s;  $t_{90}$ —正硫化时间,s;  $B_S$ —介电强度,  $\text{kV} \cdot \text{mm}^{-1}$ ;  $D_{S1}$ —有焰模式的烟密度;  $D_{S2}$ —无焰模式的烟密度; LOI—氧指数, %。1)  $158 \text{ } ^\circ\text{C} \times 168 \text{ h}$ 。2) IRM 902油,  $121 \text{ } ^\circ\text{C} \times 18 \text{ h}$ 。

表3 不同性能指标对应的回归方程式

| 项 目                   | 回归方程式   | 显著性检验值 ( $F_2$ ) |
|-----------------------|---|------------------|
| $T_s$                 | $y=7.4+0.76x_1+0.43x_3+0.56x_1x_3-0.11x_3^2$                | 21               |
| $E_B$                 | $y=320.1-29.9x_1-39.7x_3-17.5x_1x_3-4.3x_1^2$               | 341              |
| $\rho_v$              | $y=2.6-0.103x_1-0.037x_2-0.125x_3-0.051x_1^2$               | 19               |
| $\Delta T_{S1}^{(1)}$ | $y=9.9+1.1x_1+1.17x_2+3.2x_3+0.75x_1x_3+0.74x_1^2$          | 37               |
| $\Delta E_{B1}^{(1)}$ | $y=17.93+2.1x_1+1.9x_2+6.2x_3+1.37x_3^2$                    | 49               |
| $\Delta T_{S2}^{(2)}$ | $y=33.97+1.46x_1+1.67x_2+0.97x_2x_3+0.22x_2^2$              | 39               |
| $\Delta E_{B2}^{(2)}$ | $y=39.96+1.71x_1+1.96x_2+1.13x_2x_3+0.26x_2^2$              | 18               |
| $t_{10}$              | $y=47.95+1.59x_1+1.17x_2+1.84x_3+0.22x_1^2$                 | 42               |
| $t_{90}$              | $y=92.53-4.31x_1-4.27x_2-6.48x_3-2.5x_1x_3+0.34x_1^2$       | 211              |
| $B_S$                 | $y=27-1.1x_1-1.33x_2+0.53x_1^2+0.71x_3^2$                   | 37               |
| $D_{S1}$              | $y=117.4-6x_1-15.95x_2-1.8x_1^2-1.5x_2^2$                   | 97               |
| $D_{S2}$              | $y=317-7.8x_1-7.9x_2-14.2x_3-2.5x_1x_2-2.8x_1x_3-2.3x_2x_3$ | 132              |
| LOI                   | $y=32.3+1.3x_1+3.1x_2-0.66x_3^2$                            | 63               |

注:1) 158 °C × 168 h; 2) IRM 902油, 121 °C × 18 h。

表4 胶料性能的试验值和预测值对比

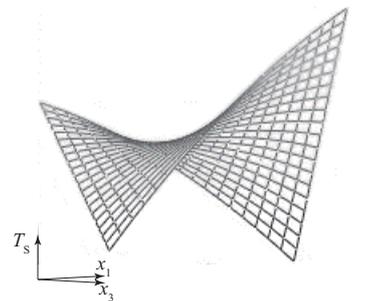
| 项 目  | 试验值 | 预测值 |
|--|-----|-----|
| $T_s$ /MPa   | 6.8 | 6.7 |
| $E_B$ /%   | 350 | 360 |
| $\rho_v \times 10^{-15}$ /( $\Omega \cdot \text{cm}$ ) | 2.7 | 3.2 |
| $\Delta T_{S2}^{(1)}$ /%                               | -39 | -41 |
| $\Delta E_{B2}^{(1)}$ /%                               | -42 | -43 |
| $t_{10}$ /s  | 87  | 83  |
| $t_{90}$ /s  | 434 | 429 |
| $B_S$ /( $\text{kV} \cdot \text{mm}^{-1}$ )            | 28  | 27  |
| $D_{S1}$   | 139 | 129 |
| $D_{S2}$   | 317 | 323 |
| LOI/%  | 32  | 33  |

注:1) IRM 902油, 121 °C × 18 h。

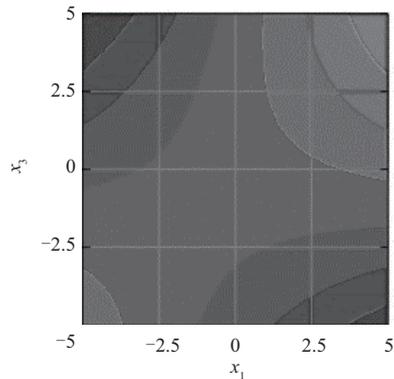
性能呈下降趋势。

(1) 在一定范围内, 随着镁铝水滑石、氢氧化铝和氢氧化镁用量增大, 胶料的拉伸强度呈增大趋势(如图4所示); 拉断伸长率呈减小趋势, 其中镁铝水滑石和氢氧化镁的显著性较氢氧化铝更明显, 如图5所示。这是因为镁铝水滑石的微观形貌呈片层结构, 有利于胶料滑动, 对拉断伸长率影响较大。

(2) LSOH-EPDM胶料的烟密度随着镁铝水滑石、氢氧化铝和氢氧化镁用量增大而减小, 改变镁铝水滑石、氢氧化镁和氢氧化铝的配比也可减小烟密度。镁铝水滑石、氢氧化铝和氢氧化镁的不同配比对LSOH-EPDM绝缘材料烟密度有显著影响。有焰模式时, 氢氧化镁对烟密度的影响明显小于镁铝水滑石和氢氧化铝, 且镁铝水滑石和氢氧化铝之间存在交互影响, 如图6所示。这是因为镁铝水滑石的热分解温度较氢氧化铝高, 且镁铝



(a) 三维图



(b) 等高线

图4 拉伸强度回归方程预测结果

水滑石可分解释放二氧化碳, 从而使烟密度减小; 镁铝水滑石和氢氧化铝的热分解起始温度接近, 且分解均为吸热过程, 彼此间存在交互“争抢”热能的现象。

(3) LSOH-EPDM胶料的氧指数随着镁铝水滑石、氢氧化铝和氢氧化镁用量增大而增大, 改变镁铝水滑石、氢氧化镁和氢氧化铝的配比也可影响氧指数。镁铝水滑石、氢氧化铝和氢氧化镁的不同配

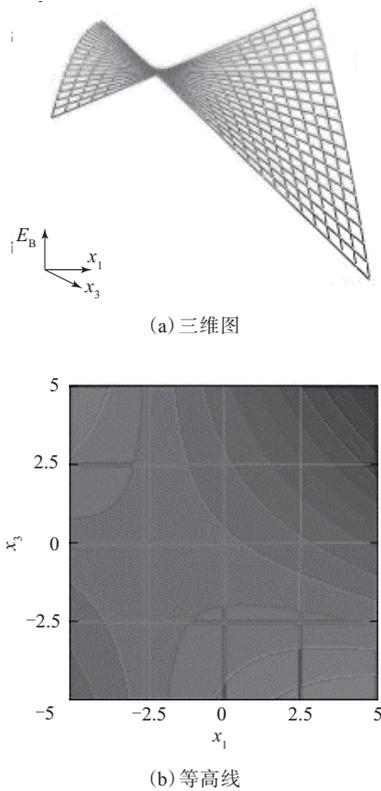


图5 拉断伸长率回归方程预测结果

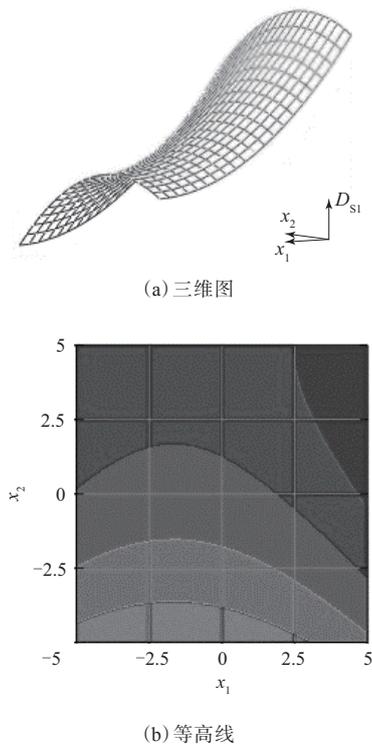


图6 有焰模式烟密度回归方程预测结果

比对LSOH-EPDM绝缘材料的氧指数有显著影响,在一定范围内,随着镁铝水滑石、氢氧化铝和氢氧化镁用量增大,胶料的氧指数呈增大趋势,但氢氧化铝存在高阶交互影响,过量的氢氧化铝不利于氧指数的进一步提高。这是因为氢氧化铝的分解温度低于燃烧所需温度,吸收热量的能力偏低,虽然分解产生的水蒸气有抑制燃烧作用,但影响有限。

### 3 LSOH-EPDM绝缘材料的应用

#### 3.1 应用实例

将LSOH-EPDM绝缘材料(镁铝水滑石、氢氧化铝和氢氧化镁用量分别为67,53和59份)应用于轨道交通用WDZA-FSY/FS-EYR-DC 1 500 V 1×400 mm<sup>2</sup>电缆,其综合性能优异且已量产。从电缆成品上取样进行检测,测试LSOH-EPDM绝缘材料的性能,如表5所示。由表5可知,LSOH-EPDM

表5 LSOH-EPDM绝缘材料与普通乙丙橡胶绝缘材料的性能对比

| 项 目                                       | LSOH-EPDM          | 普通乙丙橡胶             | 试验方法               |
|---|--------------------|--------------------|--------------------|
| $T_s/\text{MPa}$                          | 6.5                | 4.9                | GB/T 2951.11—2008  |
| $E_B/\%$                                  | 290                | 260                | GB/T 2951.11—2008  |
| 100 °C × 168 h老化后                         |                    |                    | GB/T 2951.12—2008  |
| $\Delta T_{S1}/\%$                        | 4                  | 8                  |                    |
| $\Delta E_{B1}/\%$                        | 0                  | -12                |                    |
| 135 °C × 168 h老化后                         |                    |                    | GB/T 2951.12—2008  |
| $\Delta T_{S1}/\%$                        | 9                  | 18                 |                    |
| $\Delta E_{B1}/\%$                        | -7                 | -22                |                    |
| 158 °C × 168 h老化后                         |                    |                    | UL 2556—2013       |
| $\Delta T_{S1}/\%$                        | 13                 | 39                 |                    |
| $\Delta E_{B1}/\%$                        | -9                 | -69                |                    |
| $\rho_v/(\Omega \cdot \text{cm})$         |                    |                    | GB/T 1410—2006     |
| 浸水前                                       | $6 \times 10^{15}$ | $5 \times 10^{14}$ |                    |
| 浸水12 h后                                   | $5 \times 10^{15}$ | $3 \times 10^{14}$ |                    |
| 浸水24 h后                                   | $5 \times 10^{15}$ | $1 \times 10^{14}$ |                    |
| 吸水试验                                      |                    |                    | GB/T 2951.13—2008  |
| 质量增长率/ $\%$                               | 0.2                | 0.9                |                    |
| $B_s/(\text{kV} \cdot \text{mm}^{-1})$    | 29                 | 23                 |                    |
| LOI/ $\%$                                 | 32                 | 22                 |                    |
| IRM 902油浸泡后                               |                    |                    | UL 2556—2013       |
| $\Delta T_{S2}/\%$                        | -41                | -39                |                    |
| $\Delta E_{B2}/\%$                        | -44                | -45                |                    |
| 密度/ $(\text{Mg} \cdot \text{m}^{-3})$     | 1.38               | 1.45               | GB/T 2951.13—2008  |
| $D_{S1}$                                  | 69                 |                    | GB/T 17651—2008    |
| 碳化高度/ $\text{m}$                          | 0.28               |                    | GB/T 18380.33—2008 |
| pH值                                       | 6.8                |                    | GB/T 17651—2008    |
| 电导率/ $(\mu\text{S} \cdot \text{mm}^{-1})$ | 2.9                |                    | GB/T 17651—2008    |
| 释放酸性气体                                    |                    |                    |                    |
| 质量分数                                      | 0.000 8            |                    | GB/T 17651—2008    |

绝缘材料的耐热老化性能较好,满足UL 2556—2013中158 °C×168 h的短期老化试验要求,适用于电缆正常使用时导体最高温度在125 °C及以下的产品; $D_{SI}$ 为69,满足IEC标准和国家标准要求;碳化高度为0.28 m,远小于标准要求的2.5 m,达到低烟阻燃电缆绝缘材料要求;pH值为6.8,远大于标准要求的4.3;电导率为 $2.9 \mu\text{S} \cdot \text{mm}^{-1}$ ,远小于标准要求的 $10 \mu\text{S} \cdot \text{mm}^{-1}$ ;释放酸性气体质量分数为0.0008,远小于标准要求的0.005。

### 3.2 成本分析

LSOH-EPDM绝缘材料的成本较普通乙丙橡胶绝缘材料增大约30%,但可以降低约15%的电缆绝缘材料使用成本,提高轨道交通电缆整体的无卤低烟阻燃性能。

## 4 结论

(1)采用响应曲面试验设计法得出的LSOH-EPDM绝缘材料不同性能指标的回归方程预测值与试验值吻合性较好。

(2)随着镁铝水滑石、氢氧化铝和氢氧化镁用

量的增大,胶料的阻燃性能提高,物理性能呈下降趋势。3种阻燃剂的配比不同对阻燃性能影响显著,采用镁铝水滑石、氢氧化铝和氢氧化镁用量分别为67,53和59份的阻燃体系的LSOH-EPDM胶料具有良好的阻燃性能、耐高温性能和耐油性能。

(3)采用LSOH-EPDM绝缘材料生产的单芯阻燃A类电缆阻燃性能提高,整体材料成本降低。

### 参考文献:

- [1] 洪旭东,谢春灼. ATH在乙丙橡胶中的阻燃性研究[J]. 合成材料老化与应用,1997,12(4):1-4.
- [2] 夏明慧. 无卤阻燃耐电痕化绝缘自粘带的研制[J]. 橡胶工业,2018,65(10):1142-1145.
- [3] 刘斌,吴南屏,谢大荣.  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 在三元乙丙橡胶阻燃电缆料中的应用[J]. 电线电缆,1996,6(1):18-22.
- [4] 顾志宏. 无卤阻燃剂氢氧化镁在EPDM中的应用研究[J]. 世界橡胶工业,2008,11(35):1-4.
- [5] 徐浩挺,刘大晨,郭翠翠,等. 镁铝水滑石填充无卤阻燃三元乙丙橡胶[J]. 橡塑技术与装备,2010,37(3):26-29.
- [6] 胡仕凯,贺春江,王玮,等. 抑烟剂对氢氧化镁/氯丁橡胶共混胶阻燃性能的影响[J]. 橡胶科技,2017,15(6):25-28.

收稿日期:2018-12-16

## Study on Halogen-free Low Smoke Flame Retardant System of EPDM Cable Insulation Material

WU Hong, DUAN Guoquan, CHEN Wei, DAI Zhanyong

(TBEA Xinjiang Cable Company, Changji 831100, China)

**Abstract:** The flame retardant system and flame retardant property of halogen-free low smoke and flame retardant EPDM (LSOH-EPDM) cable insulating material were investigated by quadratic response surface methodology, and the regression equations with different response were established. The results showed that, the predicted values of regression equation for different properties of LSOH-EPDM insulating material obtained by quadratic response surface methodology were in good agreement with the experimental results. With the increase of the contents of Mg-Al hydrotalcite, aluminum hydroxide and magnesium hydroxide, the flame retardant property of the compound was improved and the physical properties deteriorated in general. The proportion of those three flame retardants had significant effect on the flame retardant property of the compound, and the LSOH-EPDM compound with 67 phr Mg-Al hydrotalcite, 53 phr aluminum hydroxide and 59 phr magnesium hydroxide had good flame retardant property, high temperature resistance and oil resistance. The flame retardant property of the single core flame retardant class A cable produced from LSOH-EPDM insulating material was improved, and the overall material cost was reduced.

**Key words:** halogen-free low smoke and flame retardant cable; EPDM; insulating material; flame retardant system; flame retardant property; quadratic response surface methodology; regression equation