

# Development of an Intelligent Single-phase AC Fire-resistant Cable for Electrified Railway

Lingqing Han Xiaodong Gu Xiaojing Zhou Ming Wan

China Railway Design Group Co., Ltd., Tianjin, 300000, China

## Abstract

This paper introduces a single-phase AC 27.5kV fire-resistant cable for electrified railway power supply system, which adopts fan-shaped copper conductor with high compression ratio, ceramic fire-resistant silicone rubber layer and low smoke halogen-free material sheath. It has the advantages of good fire resistance, high impact resistance, spray resistance and simple production technology. The fire-resistant cable has built-in optical fiber unit, which can be combined with special measurement and control equipment to accurately feed back the fire location, environmental protection and intelligence, which can effectively improve the fire resistance and intelligence level of the cable.

## Keywords

electrified railway; single-phase AC; fire-resistant cable; ceramic fire-resistant silicone rubber; optical fiber unit

## 一种电气化铁路智能单相交流耐火电缆研制

韩凌青 古晓东 周晓靖 万明

中国铁路设计集团有限公司, 中国·天津 300000

## 摘要

论文介绍了一种电气化铁路供电系统用单相交流27.5kV耐火电缆, 采用高压缩比的扇形铜导体、陶瓷化耐火硅橡胶层、低烟无卤材料护套, 具备耐火性能好、抗冲击性能高、耐喷淋、生产工艺简单等优点。耐火电缆内部内置了光纤单元, 可以结合专用测控装备, 准确反馈火灾地点, 环保智能, 可有效提高电缆的耐火性能及智能化水平。

## 关键词

电气化铁路; 单相交流; 耐火电缆; 陶瓷化耐火硅橡胶; 光纤单元

## 1 引言

随着中国经济建设步伐的加快, 铁路发展迅速, 防火等级提高及安全意识的增强, 对电缆在火灾条件下的安全性也提出了更高的要求, 但目前没有 27.5kV 耐火电缆的国家标准和行业标准。根据国家铁路标准 TB10020—2017《铁路隧道防灾救援疏散工程设计规范》和 TB10063—2016《铁路工程设计防火规范》的相关要求, 为满足铁路隧道、地下牵引变电所、地下(隧道)车站等场合, 适应防火及防灾疏散救援的需要, 以保障铁路运营安全。如长大隧道发生火灾时必须保证有一定的时间正常供电, 使人员能安全撤离<sup>[1]</sup>。

【课题项目】中国铁路设计集团有限公司科技开发课题

《牵引供电系统耐火电缆方案研究》。

【作者简介】韩凌青(1979—), 男, 中国天津人, 高级工程师, 从事电气化铁路设计研究。

## 2 现状

耐火电缆指在规定火焰燃烧条件下, 一定时间内仍能保持功能的电缆。耐火电缆一般有矿物绝缘耐火电缆和云母带绕包耐火电缆两种。矿物绝缘耐火电缆是指在金属护套内, 由矿物粉绝缘的导体组成的电缆。矿物绝缘耐火电缆的绝缘填充物一般采用氧化物矿物。优点表现为耐火性能比较可靠; 耐火绝缘材料全部由无机矿物质组成, 不会燃烧、传播火焰或释放有机毒气; 并具有抗机械损伤能力强、载流量大和寿命长等优点。缺点主要是生产成本低, 且工艺复杂, 安装施工困难; 由于氧化物易受潮, 对环境要求较高。对于电气化铁路实际应用环境来说, 矿物绝缘电缆因外护套结构采用金属护套, 电缆弯曲半径大, 现场敷设难度非常大, 且安装使用维护不便<sup>[2]</sup>。

另外, 目前的耐火电缆仅仅具备耐火功能, 不具备测温及智能感知的功能, 在智能感知、万物互联的今天, 电气化行业迫切需要由一种新型耐火电缆, 不仅具备良好的耐火

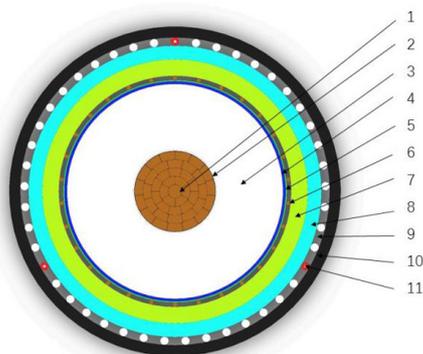
性能,还具备实现火灾自动报警和火灾点定位的附加功能。

### 3 电缆设计

#### 3.1 结构

##### 3.1.1 导体

电气化铁路智能单向交流电力电缆由内至外的结构为铜导体、铜导体(内)屏蔽层、交联聚乙烯或乙丙橡胶绝缘层、绝缘(外)屏蔽层、半导电带绕包层、铜丝疏绕(金属屏蔽)层、铜带捆扎层、隔热层、耐火层、铝丝铠装层、无卤低烟阻燃外护套,电缆结构见图1。



- 1——铜导体；2——铜导体(内)屏蔽层；
- 3——绝缘层；4——绝缘(外)屏蔽层；
- 5——半导电带绕包层；6——铜丝疏绕(金属屏蔽)层；
- 7——隔热层；8——耐火层；9——铝丝铠装层；
- 10——无卤低烟阻燃外护套；11——光纤单元。

图1 耐火电缆结构图

GB/T28427—2012《电气化铁路27.5kV单相交流交联聚乙烯绝缘电缆及附件》规定电气化铁路电缆采用铜导体,且铜导体满足GB/T3956—2008《电缆的导体》中,且导体为绞合紧压的导体。考虑导体载流量、温升、工艺等各因素,新型耐火电缆导体选用由多股高导率的复合铜单丝绞合而成,单丝采用扇形截面,压紧系数超过90%,在同样的外径条件下,导体面积较圆截面单丝大5%,载流量更大;且绞线单丝之间间隙很小,能防止火灾时的高温从外辐射进导体内部<sup>[1]</sup>。

##### 3.1.2 复合防火层

复合防火层由无卤低烟阻燃外护套、耐火层、铝丝铠装层、隔热层组成。

①外护套采用无卤低烟阻燃护套料,具备较高的氧指数,标称厚度为3mm。外护套材料温度等级为90℃,应与电缆运行温度相适应。为了防白蚁、防鼠,外护套在配方中加入了相应的化学添加剂,这些添加剂对人类及环境无害。

②铝丝铠装层由铝丝材料构成,起到阻止火焰向内蔓

延及抗冲击保护作用;铠装用圆铝丝标称直径为2.50mm,铝丝应“左”向均匀紧密地绕包在隔离层上,铝丝之间间隔总和不超过2.5mm。

③耐火层采用专门研制的陶瓷化硅橡胶材料,标称厚为小于2mm,该材料是以硅橡胶为基料及载体加入无机纳米硅粉状耐火添加剂、陶瓷化添加剂以及各种辅助添加剂等,经过捏合、混炼,制成可供模压或挤出成型的胶料。其中在高温时会形成一个不熔不燃的氧化铝硬壳,结构致密,表面有细小蜂窝孔,可阻止火焰、氧气向电缆内部蔓延,同时会放出大量水分,水分蒸发吸收大量热量对电缆起到降温作用,从而在一定时间内从电缆表面到内部形成温度梯度;低烟无卤硅橡胶内外护套的挤包黏度大,流动性差,生产时须用低压缩比的专用螺杆,为了达到外观圆整的效果,低烟无卤硅橡胶隔热层生产时可使用挤压式模具一次挤压成型。使胶料填充到线芯间隙中保证线芯与隔热层紧密结合。实际生产时应控制螺杆转速及挤出温度,防止因挤出过快导致局部过热影响隔热层及护套的防火性能<sup>[4]</sup>。

④隔热层采用具有良好绝热性能陶瓷纤维绳,阻止高温传递到绝缘层。采用30根玻璃纤维绳作为隔热层。

##### 3.1.3 绝缘层

绝缘应为交联聚乙烯绝缘混合料或乙丙橡胶绝缘混合料。绝缘标称厚度为11.0mm,最薄处厚度不小于9.8mm,偏心度不大于10%。

##### 3.1.4 光纤单元

为适应铁路安全监控系统需要,增加了电缆火灾报警监测传感功能,采取耐火电力电缆内置光纤单元作为感温传感器。通过分布式光纤测温系统(DTS),用于实时测量空间温度场分布的传感器系统。

多模光纤的衰减系数要求见表1。

表1 多模光纤的衰减系数

| 测试波长<br>nm | 测试波长最大衰减系数 dB/km      |                       |                      |                     |
|------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|---------------------|
|            | Ala.1<br>(50.0/125μm) | Ala.2<br>(50.0/125μm) | Ala.3<br>(0.0/125μm) | Alb<br>(62.5/125μm) |
| 850        | 3.5                   |                       | 2.5                  | 3.5                 |
| 1300       | 1.5                   |                       | 0.8                  | 1.5                 |

#### 3.2 耐火性能要求

耐火试验供火温度750(+50/0)℃,供火时间为90min。要求试验过程中和结束后:对于交联聚乙烯绝缘电缆,试样在整个试验持续时间内,以“牵引供电系统最高非持续电压(U<sub>max2</sub>)”施加29kV工频交流电压,不发生击穿(任何假击穿现象应予排除,例如试验终端表面闪络放电等假击穿现象,在排除处理后,继续试验至规定时间)。

燃烧试验结束后,对试样的绝缘完整性进行检查。在保持试样原始状态的情况下,给试样施加2.5U<sub>0</sub>(69kV)的交流试验电压,持续15min不击穿,任何假击穿现象应予

排除,例如试验终端表面闪烁放电等。

#### 4 电缆阻燃耐火测试

根据以上材料选用及结构设计,生产出的产品送国家电线电缆质量监督检验中心,进行检测,其耐火及环保性能均能满足 BS8491:2008 及 GB/T18380.33—2008 要求。

根据 BS8491:2008 对电缆进行了线路完整性试验。试验时,试样施加电压为电缆额定电压,受火温度为 750℃,受火时间 90 min,受火 10min 开始冲击电缆,每隔 10min 冲击一次;试验结束前 5min 开喷水,每隔 60s 喷水一次,每次喷水持续时间 5s。结果表明,在 750℃ 的火焰中和额定电压下,耐受燃烧时间大于 90 min 而电缆不被击穿。烧蚀后陶瓷化铠体介电强度 40kV/mm,体积电阻率  $3.3 \times 10^{18} \Omega \cdot \text{cm}$ ;高温陶瓷化后强度高,抗震动性好,喷淋后不掉落。

根据 GB/T18380.33—2008《电缆和光缆在火焰条件下的燃烧试验第 33 部分:垂直安装的成束电线电缆火焰垂直蔓延试验 A 类》方法进行阻燃性能试验,性能满足 GB/T19666—2019《阻燃和耐火电线电缆通则》A 级阻燃要求。

根据 GB/T17650.2—1998《取自电缆或光缆的材料燃烧时释出气体的试验方法第 2 部分:用测量 pH 值和电导率来测定气体的酸度》进行 pH 值和电导率测试,测得燃烧分解物溶解后的 pH 值为 4.6,电导率低于  $0.5 \mu\text{S}/\text{mm}$ ;根据 GB/T17650.1—1998《取自电缆或光缆的材料燃烧时释出气体的试验方法第 1 部分:卤酸气体总量的测定》进行卤元素检测,

溴和氯含量(以 HCl 表示)为 0.04,氟含量 0.03,符合标准要求。

根据 GB/T17651.2—1998《电缆或光缆在特定条件下燃烧的烟密度测定第 2 部分:试验步骤和要求》进行烟密度测试,燃烧时透光率达到 95%,满足国家标准透光率不低于 60% 的要求。

#### 5 结语

该防火电缆采用高压缩比的扇形硬铜线,耐火层采用陶瓷硅橡胶层,护套采用低烟无卤材料,能顺利通过耐火测试,具备耐火性能好、抗冲击性能高、耐喷淋,且生产工艺简单。耐火电缆内部内置了光纤单元,可以结合专用测控装备,准确反馈火灾地点,提高 27.5kV 牵引供电电缆的耐火性能。并提高了环保、智能水平。

#### 参考文献

- [1] BS 8491:2008 Method for assessment of fire integrity of largediameter power cables for use as components for smokeand heat control other active fire safety systems[S]. The United Kingdom of Great Britain and Northern Ireland,2008.
- [2] 国家电线电缆质量监督检验中心.GB/T 18380.33—2008 电缆和光缆在火焰条件下的燃烧试验.第33部分:垂直安装的成束电线电缆火焰垂直蔓延试验A类.[S].北京:中国标准出版社,2008.
- [3] 中国国家标准委员会.GB/T 28427—2012 电气化铁路27.5kV 单相交流交联聚乙烯绝缘电缆及附件[S].北京:中国标准出版社,2012.
- [4] 倪艳荣.环保型城市轨道交通柔性耐火电缆的研制[J].装备制造技术,2021(3):9-12.