

[电线电缆]

具有耐火特性电线电缆的结构分析和应用

文/郭连志 张英男 汤自强 刘艳艳 于校伟 张俊璐
青岛市产品质量检验研究院

消防等领域应用的耐火电线电缆结构决定其在火焰条件下的耐火特性，通过梳理典型的电缆耐火结构和当前国内外通用的线路完整性试验方法，分析耐火结构与试验方法表征的耐火特征点之间的对应关系，为消防等领域用电线电缆的选用提供方法，并展望行业的前景。通过分析得出，单一耐火结构的电缆建议选用到结构稳固的基槽内，而复杂耐火结构的电缆抵抗多重因素的能力更强，适用于人员密集和可燃物密集和用电负荷高的地点，这些电缆结构的耐火特性均可通过线路完整性试验方法来评价。

随着我国城镇化的发展，建筑消防设施的设计和建设越来越受到重视。具有耐火特性的电线电缆是消防设施系统的关键组成部分。在火灾突发情况下，它能有效保持线路完整和供电稳定，这对保证整个消防系统运行至关重要。近年来，耐火电线电缆结构设计不断突破，且制造工艺不断改进^[1]，在火焰条件下或复合因素影响条件下保持线路完整性的能力有差异。如何更好地选择满足各种消防设施要求的电缆，如何更好地表征电缆的耐火特性，成为了亟待解决的问题。

与电线电缆耐火结构相关的要素分析

1. 云母带

导体线芯绕包云母带作为目前耐火电缆的主要结构，具备很强的耐火材料特性。耐火安全电缆用云母带是由无碱玻璃纤维布/塑料薄膜补强和云母纸经合适树脂粘合而成的复合电气绝缘材料^[2]，其标称厚度为0.05~0.18 mm，以带状、成张或成卷柔软状态供货。根据产品所用片云母纸或粉云母纸组分不同，可将云母带分为白云母带、金云母带和氟云母带（合成云母带）三类。研究表明^[2]，常温

下的性能合成云母带最佳，白云母带次之，金云母带较差；而高温下的性能合成云母带最佳，可经受1 000℃及以上的高温，金云母带次之，仅能经受800℃及以下高温，白云母带较差，在高温600℃时性能衰减程度较大。因此，在电缆实际生产过程中，设计人员必须依据应用工况选择合适类型的云母带，以及覆盖导体或绞合线芯所用云母带的层数。在这个过程中，工程师需要通过选用合理的线路完整性试验方法，来验证或积累电线电缆耐火层结构的设计合理性，也可以评价已安装电线电缆的耐火特性是否符合工况要求。

2. 氧化镁

矿物绝缘电缆（例如型号BTTZ^[3]）的绝缘层或耐火层是由紧压成型的氧化镁粉末矿物密实体组成，外层包裹铜护套，可经受1 000℃及以上高温热源。该电缆结构历史悠久，应用广泛，但也存在制造工艺复杂、制造长度受限导致接头多、现场施工难度大和安装成本高等缺点^[4]。

3. 金属防火层

金属本身具有强度高、熔点高和导热系数高等特性，可以有效隔离高温热源，保持电缆外形结构

的完整性。从工程制造领域来看，金属产品制造产能高，工业应用广泛，工艺技术手段也较为成熟，可大规模应用到电线电缆行业。目前，应用到耐火电线电缆结构的金属主要有铝、铜和不锈钢等，多采用纵包-焊接-轧纹或拉拔管工艺生产^[4]。

4. 其他

具有耐火特性的电缆结构还包括耐高温填充层、陶瓷化硅橡胶隔离层^[5]和柔性防火泥隔离层等。这些结构不同程度地起到阻止火焰蔓延、隔离高温热源和保持电缆线路完整性的作用。

国内外标准分析方法

1. 国家标准

随着工业化进程的推进，在火焰条件下电缆

或光缆的线路完整性试验方法相关的国家标准GB/T 19216《在火焰条件下电缆或光缆的线路完整性试验》系列已日趋完善，并与国际电工委员会标准IEC 60331系列等同采用，详见表1。这些方法均适用于额定电压0.6 kV/1 kV及以下电缆或光缆，如果供需双方同意，并配备合适的熔断器后，方法标准能适用于额定电压1.8 kV/3（3.3）kV及以下的电缆。从GB/T 19666—2019《阻燃和耐火电线电缆或光缆通则》分析得出，线路完整性试验类型分为单独供火（代号N）、供火加机械冲击（代号NJ）、供火加机械冲击和喷水（代号NS）三种。对于不同应用工况下的耐火电线电缆，选择哪种试验方法类型能有效表征其耐火性能是关键所在。

表1 国内外线路完整性试验方法汇总

序号	标准代号	试验类型	适用范围
1	GB/T 19216.11/IEC 60331-11 GB/T 19216.21/IEC 60331-21 GB/T 19216.23/IEC 60331-23 GB/T 19216.25/IEC 60331-25	单独供火	额定电压0.6 kV/1 kV及以下电缆或光缆
2	GB/T 19216.1/IEC 60331-1 GB/T 19216.2/IEC 60331-2 GB/T 19216.3/IEC 60331-3	供火加机械冲击振动	额定电压0.6 kV/1 kV及以下电缆或光缆
3	GB/T 19666	代号N：单独供火 代号NJ：供火加机械冲击 代号NS：供火加机械冲击和喷水	额定电压0.6 kV/1 kV及以下电缆或光缆
4	BS 6387	Protocol C：单独供火 Protocol W：供火加喷淋 Protocol Z：供火加机械冲击	额定电压0.6 kV/1 kV及以下电缆，且电缆外径20 mm及以下（仅有绝缘的单芯电缆除外）
5	BS 8491	供火加机械冲击和喷水（机械冲击直接施加到电缆样品上）	额定电压0.6 kV/1 kV及以下电缆，且电缆外径大于20 mm
6	EN 50200	供火加机械冲击和喷水	额定电压0.6 kV/1 kV及以下电缆，且电缆外径20 mm及以下

2. 国际标准

欧洲是最早开始研究火焰条件下保持电缆线路完整性试验方法的地区之一，其试验方法不断的改进和演化，且火焰温度、供火时间、机械冲击和喷水等试验条件也越来越苛刻，较大程度上模拟了火灾初期、火灾蔓延和火灾扑救时的电缆线路的完整性。当然这些方法可以定性评价不同结构电缆的耐火特性的优劣，或为选择消防专用电缆提供依据。目前，英国耐火电缆标准BS 6387系列、BS 8491系列和EN 50200系列应用最为广泛（见表1）。这些标准中阐述的适用范围、试验装置（包括供火装置、热源和样品安装支架等）和试验步骤等存在较大差异，因此对于不同结构电缆评价结果也会出现

差异。

耐火特性的特征点分析

研究表明^[6]，一座50层的建筑内（可容纳几千人，甚至上万人）通过楼梯将人员全部疏散完毕用了2 h 11 min，当然在火灾等紧急避险情况下，人员疏散时间会更长，危险性更高。大量数据表明，建筑火灾由初起变成轰燃时，空间温度达500 ℃以上，局部温度高达1 100 ℃^[7]。再加上消防喷水灭火、部分损毁建筑结构坍塌脱落等不确定因素的叠加，分析得出有以下几个特征项。

1. 火焰温度热值和理想热源演化过程

GB/T 9978—1999《建筑构件耐火试验方法》

规定了各种结构构件在标准受火条件下确定其耐火性能的试验方法,并给出标准受火升温公式^[8]和曲线,如图1所示。由图1可知,理论上以纤维类物质为主的火灾发生30 min后,热烟填充空间内的平均温度可达800 ℃左右。由此可推演出电缆耐火结构需经受不低于800 ℃的考验,实践经验也证明了云母带(特别是合成云母带)、氧化镁和玻璃纤维合成填充层等电缆结构可有效形成防火屏障,同时具备优良的高温绝缘特性。无论是国际标准还是英国标准,单独供火的线路完整性试验火焰温度均达到750 ℃及以上,部分方法标准要求热源温度需达到 $(950 \pm 40)^\circ\text{C}$,具备表征电缆耐火结构及原材料耐火性能的能力。

$$T - T_0 = 345 \log(8t + 1) \quad (1)$$

式中, t 为标准受火持续时间,min; T 为标准受火持续到 t 时刻空间内的平均温度,℃; T_0 为标准受火前空间内环境的温度,一般取20 ℃。

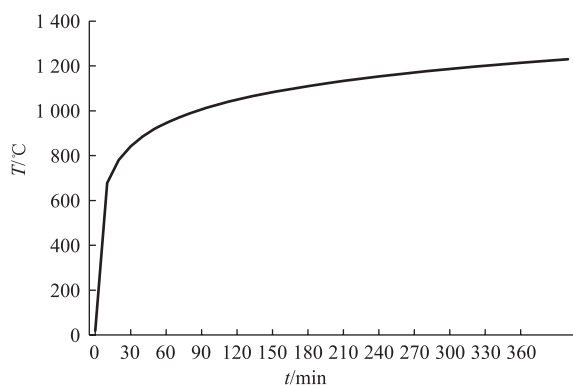


图1 标准受火升温曲线

2. 供火持续时间

从火灾逃生的角度分析,消防设施(包括电缆)保持较长时间的完整性是大有益处的。GB 51348—2019《民用建筑电气设计标准》中第13.7.16条规定了消防用电设备在火灾发生期间保持供电时间的最低要求^[9]。因此,供火持续时间是评价电缆耐火结构优劣的重要特征。国家标准GB/T 19216系列、国际电工委员会标准IEC 60331系列、英国标准BS 8491以及EN 50200一般对供火时间未做强制规定,可根据实际工况选择合理的试验时间。国标GB/T 19666(代号N、NJ、NS)和英国标准BS 6387(Protocol C、Protocol W、Protocol Z)则对供火时间做了明确规定,这给民用建筑电

缆的选用提供了依据。一般情况下,云母带绕包重叠层数越多、氧化镁紧压密实体厚度越大,以及金属防火层和耐高温填充层交替排列所形成的复杂耐火结构在经受火焰时,保持线路完整性的持续时间也会更长。当然用料自然不是越多越好,结构自然更不是越复杂越强,这就需要选择合适的方法和适度的供火持续时间,评定结构是否符合建筑设计和施工需求,同时也利于控制经济成本,优化资源配置。

3. 冲击振动

建筑火灾的中后期或多或少会出现损毁结构的坍塌脱落的情况,特别是钢筋龙骨或钢架结构在高温作用下失稳形变引发的振动冲击波会对建筑结构上附着的电缆造成机械冲击。从材料特性分析,往往能够耐受高温的材料一般为无机非金属材料和部分金属材料,其中无机非金属材料自身成型能力差,承受冲击振动时极易脆裂脱落。因此,将铜、铝、钢等金属材料充当耐火电缆的保护层和防火层,有效克服了以上缺点。表1所列标准中阐述了供火加机械冲击耦合因素下的线路完整性试验步骤,较大程度上表征了火灾现场电缆的耐火特性。除了BS 8491标准中的机械冲击直接作用到试样本身之外(试验条件更为严苛),其余标准规定机械冲击间接作用于试样(机械冲击作用于试验架,试验架上安装试验样品)。

4. 喷水

水作为最主要的消防灭火介质,在整个消防系统中发挥了重要作用。目前,建筑消防水灭火系统主要分为空间自动水喷淋系统、消防车特种车辆喷水系统和定点消防设施给水系统等^[10]。这些系统均能有效抑制火灾的蔓延,但也给部分带电工作的设施设备带来了不可逆的损毁,包括电线电缆。特别是在大面积过火的火灾现场,水与燃烧产物(烟尘、碳化物、氮化物和硫化物等)混合成具有良好导电性的电解质,附着到电缆表面或电缆耐火结构表面,极易造成线芯导体之间的短路,从而造成整个线路无法正常工作。GB/T 19666、BS 6387方案W、BS 8491和EN 50200标准中均对供火加喷水耦合因素作用下的线路完整性进行了评定。一般情况下,具备金属保护层和防火层的复杂耐火结构电缆较大概率可通过供火加喷水试验。

5. 试样安装状态

综合分析表1所列标准内容可得出,试样安装状态主要有一字型、Z型、U型和穿管型等。单一耐火结构(例如仅有绕包云母带或氧化镁)电缆耐火特性测试一般选用一字型和穿管型,而复杂耐火结构电缆则根据电缆使用工况选择试验方法和相应的试样安装型式。

结束语

综上所述,电缆结构不同,耐火特性就会有差异,可通过选择合理的试验方法评定其优劣。

单一耐火结构的电缆建议选用到结构稳固的基槽内,尽量不要弯折,尽量不要出现电缆接头。假如要求电缆线路完整性持续时间更长,可将耐火结构适度加厚。为保证现场施工的电缆质量,可取样送检,一般选用单独供火的线路完整性试验方法。

商场商超、大型工厂和会堂馆廊等人员密集、可燃物密集及用电负荷高的地点应选用复杂耐火结构的电缆,具有布线灵活、防火、防机械冲击和防水等优势。这些特征均可以通过供火加机械冲击加喷水的线路完整性试验方法来定性评价。特别是BS 8491标准中要求的机械冲击应施加到电缆本身,试验条件较为严苛,对电缆耐火结构的完整性要求更高。

随着科技的发展,消防用的电缆会不断更新迭代,新的耐火材料、新的耐火结构和新的评价试验方法也会不断涌现。比如,消防火灾中经常出现的

化学品燃爆、化学品泄露腐蚀和特定高温试验环境暴露等都会对设施设备产生破坏,甚至损毁,这些都是需要直面的挑战。EA

(收稿日期:2024-04-29)

参考文献

- [1] 高璇.高韧性云母带用粘合剂的制备与性能研究[D].哈尔滨:哈尔滨理工大学,2014.
- [2] 吴海峰.关于电缆中如何有效应用耐火云母带的分析探讨[J].工程技术与产业经济.科协论坛(下半月),2010(10):24-25.
- [3] 额定电压750 V及以下矿物绝缘电缆及终端 第1部分:GB/T 13033.1电缆[S].
- [4] 廉辉,线宏伟,于海波.几种常见防火电缆的结构分析[J].工业技术,2018(11):53-54.
- [5] 陈善求,赵雯筠,颜龙,等.陶瓷化硅橡胶耐火电缆燃烧性能与陶瓷层演化特征研究[J].电线电缆,2022(03):21-25+34.
- [6] 娄树立.浅谈高层建筑的火灾特点及预防对策[J].四川建筑科学研究,2009(4):122-126.
- [7] 唐黎标.如何科学认识建筑火灾[J].安全生产与监督,2010(6):38-39.
- [8] 建筑构件耐火试验方法 第3部分:试验方法和试验数据应用注释:GB/T 9978.3[S].
- [9] 民用建筑电气设计标准:GB 51348[S].
- [10] 王智晓.浅谈民用建筑消防给排水设计[J].建筑设计,2012(11):36-37.

