

舰船用耐火光缆的研制

史孝华¹,黎林²,李晓红³,葛乐乐³

(1.陆装驻泰安地区军代室,山东 泰安 270000;

2.陆装驻合肥地区军事代表室,合肥 230041;3.中国电子科技集团公司 第八研究所,合肥 230051)

摘要:为满足舰船装备对高可靠性的发展要求,研制了一种舰船用的耐火光缆,首先设计了耐火光缆的结构,选用了高性能材料以及优化了生产工艺,然后提出了耐火光缆的测试标准与方法,确定了 950 °C 耐火试验和耐水火喷淋试验的具体流程,最后对光缆的燃烧性能进行了仿真验证。试验结果表明:该耐火光缆在经受 950 °C 火焰持续燃烧 90 min 后,冷却 15 min,再次承受 950 °C 火焰燃烧 15 min 和水喷淋 15 min 试验,其光透射性能变化依然保持在低于 0.7 dB 的极低水平。与市面上现有产品相比,这款光缆不仅耐火温度显著提升了 300 °C,还实现了耐火附加衰减降低了 9 dB。

关键词:舰船;光缆;阻燃;耐火;耐水火喷淋

中图分类号:TN92 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2024)06-0098-06

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2024.06.018

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Development of fire-resistant optical cable for ships

SHI Xiaohua¹, LI Lin², LI Xiaohong³, GE Lele³

(1. Military Representative Office in Tai'an, Tai'an Shandong 270000, Shandong, China;

2. Military Representative Office of Landfit in Hefei, Hefei 230041, China; 3. The 8th Research Institute of CETC, Hefei 230051, China)

Abstract: To meet the high-reliability development requirements for shipboard equipment, a fire-resistant optical cable for use on ships has been developed. Firstly, the structure of the fire-resistant optical cable was designed, high-performance materials were selected, and the manufacturing process was optimized. Then, test standards and methods for the fire-resistant optical cable were proposed, specifying the detailed procedures for the 950 °C fire resistance test and the water spray fire resistance test. Finally, the combustion performance of the optical cable was validated through simulation. The test results show that after being exposed to a 950 °C flame for 90 minutes continuously, cooling for 15 minutes, and then subjected to another 950 °C flame for 15 minutes followed by a 15-minute water spray test, the optical transmission performance change of the cable remained at an extremely low level of less than 0.7 dB. Compared with existing products on the market, this optical cable not only increased the fire-resistant temperature by 300 °C but also achieved a reduction in additional fire-induced attenuation of 9 dB.

Key words: ships, optical cable, flame retardant, fire-resistant, water spray fire resistance

0 引言

舰船用光缆主要分为低烟无卤阻燃普通光缆和耐火光缆。其中,耐火光缆除了要满足低烟无卤阻燃的要求外,还必须具备一定的耐火焰烧蚀能力。这种

光缆通常应用于舰船的重要光通信系统中,比如燃料存储区、防火门与水密门控制系统、公共广播系统、应急预警系统、照明系统以及消防系统。这样即使在火灾发生时,光缆线路也能保证在一定时间内保持有效的通信。

目前,我国的标准规定舰船用耐火光缆需要满足 750 °C 的耐火等级。相比之下,国外的舰船用耐火光缆已经达到了 950 °C 的耐火等级和 650 °C 的耐水火喷淋等级。随着现代舰船装备的发展,舰船上大量使用有机化工材料,并经常使用或存放石油化工产品。在这种情况下,一旦发生火灾且未能得到及时控制,火焰

收稿日期:2024-05-17。

基金项目:国家某重点项目资助。

作者简介:史孝华(1979—),男,山东平阴人,硕士,高级工程师。主要研究方向为船舶装备质量监督和检验验收。参与的某拖船改进研究项目荣获科技进步三等奖,参与起草了船舶行业标准。



温度会迅速上升至 950 ℃。现有的耐火光缆在这样的火灾条件下可能会出现光纤断裂,导致通信中断,进而延误救援时间,无法满足舰船对光缆高可靠性的需求,从而可能导致更大的生命财产损失。为了进一步提高舰船的防火能力和战斗效能,本文设计并研制一种舰船用耐火光缆。

1 光缆性能要求

目前,典型 750 ℃等级的舰船用耐火光缆结构主要包括光单元、内护层、耐火层、铠装层、纤维增强层以及外护层。依据光单元的不同结构形式,又分为紧包光纤结构、有机束管结构及螺旋铠管结构,如图 1 所示。

从光单元的结构形式来分析,紧包光纤结构的耐火光缆具有较好的弯曲性,但其抗压性能相对较差;有机束管结构的耐火光缆则同时具备良好的弯曲性能和抗侧压性能;而螺旋铠管结构的耐火光缆不仅弯曲性能好,而且抗压性能最佳。由于紧包光纤结构和有机束管结构的光单元完全由有机聚合物材料构成,而螺旋铠管结构的光单元则因存在缝隙而可能允许外部有机物渗入。当这些有机物(无论是光单元上的还是通过螺旋铠管缝隙渗入的)受热熔化并附着在光纤表面后,若火焰熄灭,附着在光纤表面的有机聚合物材料将会发生收缩。这种收缩产生的应力会直接作用于光纤之上,导致光纤产生微弯,从而增加光纤的损耗。因此,这类结构的耐火光缆具备以下特性:在 750 ℃环境下能持续燃烧 90 min,且在 15 min 的冷却过程中,每根光纤的光透射性能变化不超过 10 dB;同样,在 650 ℃条件下持续燃烧 15 min 后,再经历 15 min 的水喷淋测试,每根光纤的光透射性能变化不超过 10 dB。而当光缆暴露于 950 ℃火焰烧蚀时,外部的有机阻燃护层会完全燃烧殆尽,其内部的耐火层主要由云母带(金云母或合成云母带)组成,在高温作用下会形成鱼鳞状结构,同时光纤的涂层则完全碳化。在遭受明火

冲击和水喷淋的情况下,光缆骨架会坍塌,应力直接作用于内部光纤,最终导致光纤断裂和信号中断。3 种光单元结构耐火光缆性能对比情况如表 1 所示。

表 1 3 种光单元结构耐火光缆性能对比情况

光单元 结构类型	750 ℃ 耐火性能	950 ℃ 耐火性能	弯曲 性能	抗压 性能
紧包光纤结构	光透射性能 变化≤10 dB	失效	较好	较差
有机束管结构	光透射性能 变化≤10 dB	失效	较好	较好
螺旋铠管结构	光透射性能 变化≤10 dB	失效	好	好

因此,950 ℃耐火光缆不能沿用 750 ℃耐火光缆的结构设计。本文采用更高等级的耐火、隔火、隔热和阻燃材料,对光纤进行全面的温度保护和骨架保护。这样设计的目的是确保在燃烧过程中,光纤不会直接接触到火焰冲击,同时保持光缆骨架结构的完整性,并将传递到光纤的温度降至最低。所研制的光缆具体性能要求如下:

- 1)满足 GJB1428C-2021《光缆通用规范》中对舰载光缆机械和环境性能要求。
- 2)950 ℃耐火:光缆需要满足在 950 ℃火焰下持续燃烧 90 min,冷却 15 min 的试验期间和试验后,每根光纤光透射性能变化不大于 1 dB。
- 3)950 ℃耐水火喷淋:光缆需要满足在 950 ℃火焰下持续燃烧 15 min,水喷淋 15 min 的试验期间和试验后,每根光纤光透射性能变化不大于 1 dB。
- 4)阻燃(成束 A 类)、低烟(透光率≥60%)、无卤(卤素含量≤0.2%)、低毒(毒性指数≤5)。

2 光缆结构设计

2.1 光单元设计及材料选择

950 ℃耐火光缆的光单元结构需要具备耐高温、隔火、高机械强度和良好的弯曲性能等要求。因此,本

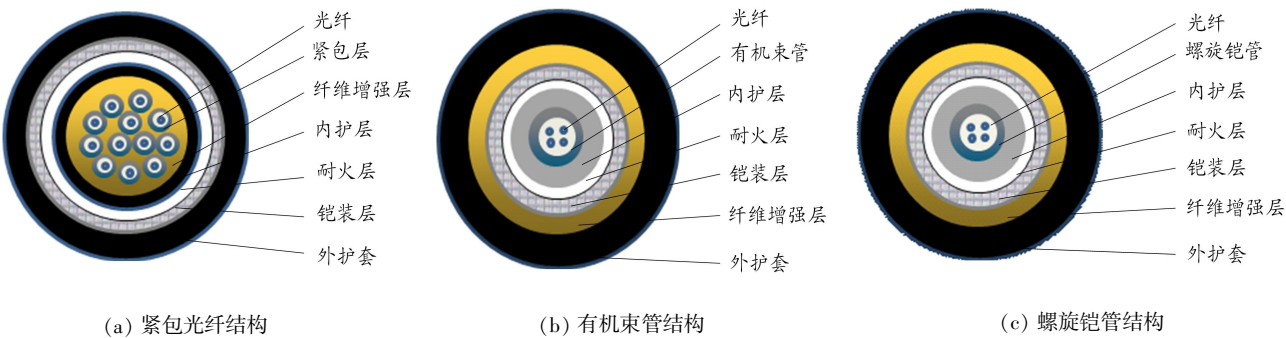


图 1 典型 750 ℃等级舰船用耐火光缆结构示意图

史孝华,黎林,李晓红,等:舰船用耐火光缆的研制

文将光单元设计为薄壁不锈钢微细管结构。这种结构能够为光纤提供隔火保护,抵抗热胀冷缩的影响,并能在 950 ℃ 的火焰燃烧及水喷淋条件下持续保护光纤。此外,还需要合理设计光纤的余长,这部分的设计与普通光缆相同,这里就不再赘述。

2.2 耐火骨架层设计及材料选择

750 ℃ 等级耐火光缆的耐火层材料主要采用金云母或合成云母,这些材料的优点是来源广泛且成本较低,已经在 750 ℃ 等级的耐火光缆中得到广泛应用。但是,当云母带在 950 ℃ 的火焰下持续燃烧并受到冷却水喷淋后,云母带会发生碳化和脱落现象,这会导致光缆结构受损,光纤损耗增加甚至断裂。因此,为了满足 950 ℃ 的耐火和耐水火喷淋的要求,本文采用更高等级的耐火材料——陶瓷化聚烯烃材料。这种新型材料在常温下使用时可以保持高分子的柔软性、弹性和易于成型等特性;而在 350~1 600 ℃ 的火焰或高温环境中能够快速陶瓷化。陶瓷化后的烧结体较硬,并且具有一定的弯曲强度和压缩强度。它实际上是一种陶瓷材料,具有耐火和隔热的作用,可以有效地降低火焰传递到光单元的温度^[1]。

在燃烧陶瓷化的过程中,陶瓷化聚烯烃可能会经历体积的显著膨胀,甚至出现开裂现象。为保持光缆结构稳定,本文在陶瓷化材料外铠装一层细径不锈钢丝,共同组成耐火骨架层。陶瓷化材料铠装骨架层前后燃烧对比图如图 2 所示。

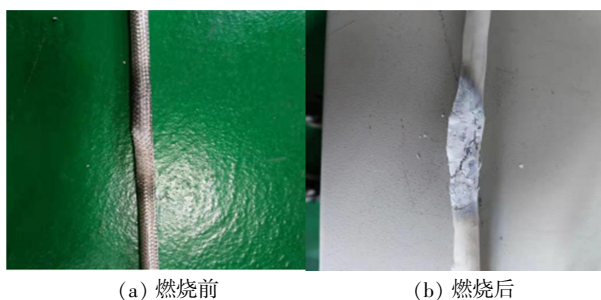


图 2 陶瓷化材料铠装骨架层前后燃烧对比图

2.3 增强层设计及材料选择

舰船用光缆为了满足舰船环境的敷设要求,对于光缆的外径、重量、弯曲性能和抗拉性能具有一定要求。由于不适宜使用钢丝作为增强材料,传统船用耐火光缆通常采用芳纶纤维进行增强。但芳纶纤维遇火会燃烧,从而对光缆失去机械保护作用。为进一步提高光缆的耐火、隔热、阻燃性能及机械性能,本文研制的 950 ℃ 耐火光缆选用耐火 1 200 ℃ 的无机增强纤维,这种纤维质轻柔软,具有良好的隔热性能,可有效

延缓燃烧时热量向缆芯内部的传递,从而降低燃烧过程中对光纤的影响。同时,它还能光缆提供至少 3 000 N 以上的抗拉强度。

2.4 外护层设计及材料选择

由于舰船用耐火光缆需要具备低烟、无卤、低毒、阻燃等性能要求,通常采用低烟无卤阻燃聚烯烃作为外护层材料。但普通低烟无卤聚烯烃外护层在 950 ℃ 火焰冲击下,燃烧碳化物滴落,仅起到纵向阻燃作用。本项目选用的外护套材料是一种耐火、滴零型低烟无卤阻燃聚烯烃材料。这种护层材料采用了耐火、滴零的设计技术,燃烧后的碳化物会完整地包裹在光缆的外部,不仅能起到纵向阻燃的作用,还能提供良好的隔火、隔热效果。不同聚烯烃耐火光缆燃烧对比图如图 3 所示。



(a) 普通聚烯烃



(b) 耐 950 ℃ 聚烯烃

图 3 不同聚烯烃耐火光缆燃烧对比

经燃烧试验验证,所选用的外护层能够经受 950 ℃ 火焰烧蚀 90 min 后仍保持结壳完整,不会滴落,并同时满足低烟、无卤、无毒的要求。

2.5 光缆总体结构

舰船用 950 ℃ 耐火光缆的整体构造从内到外依次为:中心部分为薄壁不锈钢微细管光单元,内含 1~24 芯光纤;在光单元外挤制陶瓷化聚烯烃,铠装细径不锈钢丝制作耐火骨架层;采用铠装细径不锈钢丝制作耐火骨架层;绞制耐火纤维增强层;最后挤塑耐火、滴零型低烟无卤阻燃聚烯烃作为外护层。其结构如图 4 所示。

2.6 仿真计算

为了模拟所设计光缆的耐火性能及其内部的温度场分布情况,本文使用 ABAQUS 软件来建立光缆的

三维模型。为了提高计算效率,我们只取用了1/4的几何模型来进行计算。鉴于光纤与不锈钢管间的接触状态具有不确定性,且该接触对整体温度分布格局的干扰微乎其微,本文在构建几何模型时选择性地忽略了光纤的存在。

赋予相关材料特性参数后,在外表面施加950℃热负荷,选取模型中心处一点作为参考点,经计算,云母带与内护套陶瓷化后,1/4结构模型温度场分布和整体结构温度场分布如图5、图6所示。

光缆中心光单元处的温度变化过程如图7所示。

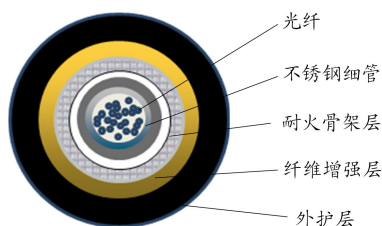


图4 舰船用950℃耐火光缆结构示意图

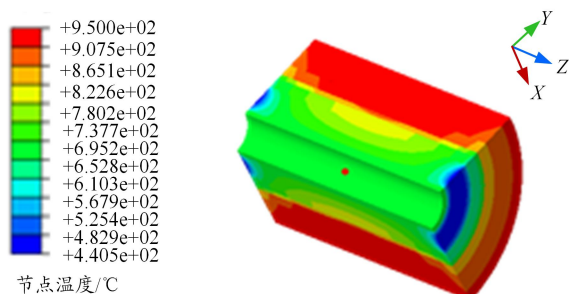


图5 1/4结构温度场分布

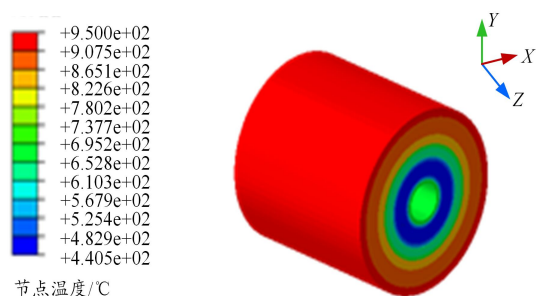


图6 整体结构温度场分布

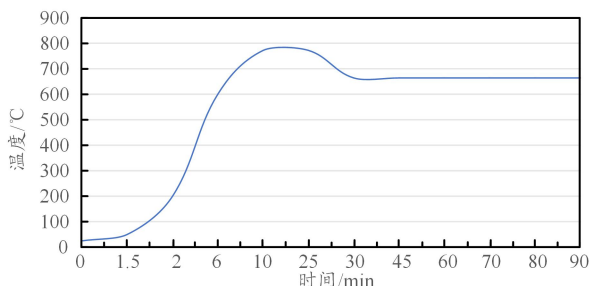


图7 24芯耐火光缆中心点温度变化

可以看出,光缆中心点位置最高温度约为772℃,随着部分耐火材料陶瓷化,导热系数进一步降低,约15 min后,光缆中心处温度达到平衡,约为664℃,低于不锈钢850℃的变形温度。

2.7 工艺设计

根据2.5节总体结构设计,本文研制的光缆制作工艺为:光纤着色→不锈钢管焊接→耐火骨架层制作→纤维增强层制作→外护套挤塑。其中,耐火骨架层制作工序是决定该光缆耐火性能优劣的重要工序,必须对耐火骨架层制作过程中的挤塑同心度、外径、铠装节距、铠装密度等工艺参数进行严格控制,以确保光缆的耐火性能。

3 性能试验验证

3.1 机械环境性能试验

本文参照GJB1428C-2021《光缆通用规范》对所研制的舰船用耐火光缆进行了严格的机械及环境性能试验验证,具体试验方法及结果如表2所示。

3.2 燃烧性能试验

3.2.1 耐火性能

为了评估线缆耐火特性的优劣,目前国内外制定了一系列光电线缆的耐火特性试验标准,主要包括GB/T 19666-2019《阻燃和耐火电线电缆或光缆通则》、YD/T3297-2017《通信用耐火光缆》等。其中,不同标准的耐火试验方法基本等同,主要是火焰温度上有所差别。具体试验方法^[2-8]如表3所示。

以上试验方法可以直接用于进行950℃耐火、750℃耐火以及650℃耐水火喷淋性能检测。由于950℃耐水火喷淋试验的火焰温度远高于国内外相关标准的要求,因此该试验方法可以参照BS 6387-2013中的耐火喷淋测试进行,但需要通过调节喷灯的位置和气体流量来达到950℃耐水火喷淋所需的火焰温度。

为验证设计光缆的耐火性能,本文参照了BS 6387-2013规定的试验方法,对所提出的光缆结构的耐火光缆进行了950℃耐火试验和耐水火喷淋试验。试验现场如图8所示,试验方法及测试结果如表4所示。可以看出,光缆在950℃耐火、耐水火喷淋试验期间和试验后光透射性能变化均小于1 dB,性能达到预期设计要求。

3.2.2 其它燃烧性能试验

光缆的燃烧性能试验主要参照GJB1428C-2021《光缆通用规范》和GB/T 19666-2019《阻燃和耐火电

史孝华,黎林,李晓红,等: 舰船用耐火光缆的研制

表 2 机械环境性能试验方法及结果

试验项目	试验方法	技术要求	测试结果
拉伸负荷	负载:3000 N; 负载时间:1 min	试验期间及试验后光透射性能变化 ≤ 0.2 dB;护套目视无开裂	合格,光透射性能变化最大为 0.03 dB
抗压	负荷:5000 N/100 mm; 负载时间:3 min	试验期间及试验后光透射性能变化 ≤ 0.2 dB;护套目视无开裂	合格,光透射性能变化最大为 0.02 dB
冲击	冲击次数:30 次;落锤重量:3 kg; 落锤高度:150 mm	试验后光透射性能变化 ≤ 0.2 dB; 护套目视无开裂	合格,光透射性能变化最大为 0.05 dB
直角弯曲	弯曲半径:50 mm;负载:500 N; 负载时间:1 min	试验后光透射性能变化 ≤ 0.2 dB; 护套目视无开裂	合格,光透射性能变化最大为 0.01 dB
振动	频率范围:10~55 Hz;方向:水平和垂直方向;试验时间:每方向 3 h	试验期间应无持续时间大于 50 μ m 的光不连续性;试验后光透射性能变化 ≤ 0.2 dB	合格,光透射性能变化最大为 0.03 dB
横向水压	水压:7 MPa;负载时间:2 h	试验后光透射性能变化 ≤ 0.2 dB; 护套目视无开裂	合格,光透射性能变化最大为 0.01 dB
温度循环	温度范围:-30~65 $^{\circ}$ C;循环次数:5 次; 高低温保持时间:5 h	试验期间及试验后光透射性能变化 ≤ 0.3 dB/km;护套目视无损坏	合格,光透射性能变化最大为 0.05 dB/km

表 3 耐火试验方法

标准编号	试验方法	受火时间/min	供火温度典型值/ $^{\circ}$ C	适用范围
BS6387-2013	C 试验:仅受火试验;Z 试验:火焰下附加振动试验;W 试验:火焰下附加水喷淋试验	C 试验:180;Z 试验:15;W 试验:30	C 试验:(950 $\pm$ 40); Z 试验:(950 $\pm$ 40); W 试验:(650 $\pm$ 40)	用于 20 mm 及以下外径耐火电缆
IEC60331.2-2018	火焰下附加振动试验	30/60/90/120	830	用于 20 mm 以上外径耐火电缆
BS8491-2008	火焰下附加机械冲击和水冲击	30/60/120	830	
IEC60331.1-2018	火焰下附加振动试验	30/60/90/120	830	
IEC60331.21-2018	仅单独供火试验	90	750	
GB19216.25-2003	仅单独供火试验	90	750	无外径要求的耐火试验
YD/T3297-2017	单独耐火; “一”耐火加喷	90 30	单独耐火:750; “一”耐火加喷淋:650	

表 4 耐火性能试验方法及结果

试验项目	试验方法	技术要求	测试结果
耐火	样品长度:10 m 火焰温度:950 $^{\circ}$ C 供火时间:90 min 冷却时间:15 min 测试波长:1 550 nm	试验期间及试验后光透射性能变化 ≤ 1 dB	合格,光透射性能变化最大为 0.70 dB
耐水火喷淋	样品长度:10 m 火焰温度:950 $^{\circ}$ C 供火时间:15 min 供火加水喷淋时间:15 min 测试波长:1 550 nm	试验期间及试验后光透射性能变化 ≤ 1 dB	合格,光透射性能变化最大为 0.22 dB



(a) 耐火试验



(b) 耐水火喷淋试验

图8 耐火、耐水火喷淋试验

电线电缆或光缆通则》的规定进行,分别对光缆的卤素含量、酸性气体生成、毒性指数、烟密度、成束燃烧等燃烧性能进行了测试,结果如表5所示。可以看出,设计光缆的卤素含量、酸性气体生成、毒性指数、烟密度、成束燃烧等各项燃烧性能符合标准要求,满足阻燃、低烟、无卤、低毒的要求。

表5 燃烧性能检测结果

检测项目	执行标准	标准要求	检验结果
卤素含量	GJB1428C-2021	0.2%	0.10%
酸性气体生成	GJB1428C-2021	2%	0.02%
毒性指数	GJB1428C-2021	≤ 5	4.37
烟密度 (透光率)	GB/T 19666-2019	$\geq 60\%$	89.7%
成束燃烧 (A类)	GB/T 19666-2019	碳化部分所达到的高度 ≤ 2.5 m	1.17 m

4 结束语

本文通过分析 750 ℃舰船用耐火光缆在结构和选

材方面的不足,提出了 950 ℃舰船用耐火光缆的改进设计思路,并研制了一种舰船用耐火光缆。该光缆能够承受 950 ℃的高温,并且耐受水火喷淋,同时具备高阻燃性、高耐火温度、低烟排放、无卤素和低毒性等优点;其耐火性能超越了当前国际光缆行业耐火等级最高的 BS6387 标准^[9],能够满足舰船内部布线及大容量、低损耗数据传输的需求。经过机械性能、环境适应性以及耐火、耐水火喷淋等关键燃烧性能试验验证,所研发的光缆完全达到了预期的设计要求。这种新型光缆显著提升了舰船用光缆的耐火等级,极大地增强了舰船在极端条件下的光通信可靠性,具有很高的实用价值。此外,该设计和制造经验还可为其它类型的耐火光缆提供参考。

参考文献:

- [1] 柯瑞林,邹雄,王金合,等. 陶瓷化高分子复合材料研究进展[J]. 绝缘材料,2018,51(12):1-5.
- [2] British Standards Institution. Test method for resistance to fire of cables required to maintain circuit integrity under fire conditions: BS 6387-2013 [S]. London: British Standards, 2013: 4.
- [3] International Electrotechnical Commission. Tests for electric cables under fire-conditions-circuit integrity-part1: test method for fire with shock at a temperature of at least 830℃ for cables of rated voltage up to and including 0.6/1.0kV and with an overall diameter exceeding 20mm. IEC 60331-1-2018[S]. Geneva: Group Safety Publication, 2018: 7.
- [4] International Electrotechnical Commission. Tests for electric cables under fire-conditions-circuit integrity-part2: Test method for fire with shock at a temperature of at least 830℃ for cables of rated voltage up to and including 0.6/1.0kV and with an overall diameter not exceeding 20mm. IEC 60331-2: 2018[S]. Geneva: Group Safety Publication, 2018: 7.
- [5] International Electrotechnical Commission. Tests for electric cables under fire-conditions-circuit integrity-part21: procedures and requirements-cable of rated voltage up to and including 0.6/1.0kV. IEC 60331-21-2018 [S]. Geneva: Group Safety Publication, 2018: 8-9.
- [6] British Standards Institution. Method for assessment of fire integrity of large diameter power cables for use as components for smoke and heat control systems and certain other active fire safety systems: BS 8491-2008 [S]. London: British Standards, 2008: 1-2.
- [7] 中国国家标准化管理委员会. 在火焰条件下电缆或者光缆的线路完整性试验; GB/T 19216.25-2003[S]. 北京: 中国标准出版社, 2003: 2.
- [8] 中国通信标准化协会. 通信耐火光缆; YD/T 3297-2017[S]. 北京: 人民邮电出版, 2017: 26.
- [9] 王建中,王国钦,孙小兵,等. 船用耐火电缆的选用[J]. 造船技术, 2017(2): 38-41.