

海上变电站高压细水雾灭火系统分析及应用

秦逸涵, 徐中亚

引用本文:

秦逸涵, 徐中亚. 海上变电站高压细水雾灭火系统分析及应用[J]. 南方能源建设, 2022, 9(1): 52-57.

QIN Yihan, XU Zhongya. Analysis and Application of High Pressure Water Mist Fire Extinguishing System in Offshore Substation[J]. *Southern Energy Construction*, 2022, 9(1): 52-57.

相似文章推荐 (请使用火狐或IE浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

海上风电场的火灾防护方案设计

Fire Protection Design of Offshore Wind Farm

南方能源建设. 2015, 2(z1): 93-97 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2015.S1.020>

海上变电站结构设计探讨

Discussion on Structural Design Method of Offshore Substation

南方能源建设. 2015, 2(z1): 83-87 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2015.S1.018>

基于泛在电力物联网的无人值守变电站消防策略研究

Research on Fire Control Strategy for Unattended Power Substation Based on Ubiquitous Electric Power Internet of Things

南方能源建设. 2020, 7(4): 75-80 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.04.011>

500 kV江门变电站不停电改造关键技术分析

Key Technology of Live Retrofit in 500 kV Jiangmeng Substation

南方能源建设. 2015, 2(z1): 244-248 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2015.S1.054>

合成泡沫喷雾灭火系统应用于变压器灭火的设计与计算

Design and Calculation of the Synthetic Foam Spray System for Transformers Protection

南方能源建设. 2016, 3(2): 107-112 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2016.02.021>

海上变电站高压细水雾灭火系统分析及应用

秦逸涵^{1,✉}, 徐中亚²

(1. 中海油研究总院有限责任公司, 北京 100028; 2. 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广东 广州 510663)

摘要: [目的] 文章旨在降低海上变电站平台失火导致区域油田群停产或重大损失的风险。[方法] 以某海上变电站为例, 分析了高压细水雾灭火系统适应性和适用范围; 通过国内外规范和设备参数特性的对标分析与计算, 提出了海上变电站电气设备不同灭火型式的参数选取和应用方法。[结果] 研究表明: 含油电气一次设备且房间高大时, 采用高压细水雾局部应用系统, 且喷雾强度以不低于 $1.5 \text{ L}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$ 为宜。当兼顾设备防水等级与设备散热不具有经济性时, 电气二次设备采用七氟丙烷灭火系统为宜。[结论] 研究成果可以为海上变电站灭火系统的建设提供参考。

关键词: 海上变电站; 电气设备; 高压细水雾灭火系统; 七氟丙烷灭火系统; 喷雾强度

中图分类号: TK89; TU892

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2022)01-0052-06

开放科学(资源服务)二维码:



Analysis and Application of High Pressure Water Mist Fire Extinguishing System in Offshore Substation

QIN Yihan^{1,✉}, XU Zhongya²

(1. CNOOC Research Institute Co., Ltd., Beijing 100028, China;

2. China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, Guangdong, China)

Abstract: [Introduction] This paper aims to reduce the risk of shutdown or heavy loss of regional oil fields caused by platform fire in offshore substation. [Method] Taking an offshore substation as an example, the adaptability and application scope of high pressure water mist fire extinguishing system were analyzed. Through the benchmarking analysis and calculation of domestic and foreign specifications and equipment parameter characteristics, the parameter selection and application methods of different fire extinguishing types of electrical equipment in offshore substations were proposed. [Result] The study shows that the local application system of high pressure water mist is suitable for the oil-containing electrical primary equipment and large room, and the spray intensity shall be not less than $1.5 \text{ L}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$. When taking into account the equipment waterproof grade and equipment heat dissipation is not economical, heptafluoropropane fire extinguishing system should be used for electrical secondary equipment. [Conclusion] The research results can provide reference for the construction of fire extinguishing system in offshore substation.

Key words: offshore substation; electrical equipment; high pressure water mist fire extinguishing system; heptafluoropropane fire extinguishing system; spray intensity

2095-8676 © 2022 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

0 引言

海上油气平台通常采用原油或伴生气的自备发电机组实现海上独立供电。目前, 区域油田联合开发规模越来越庞大, 电力负荷增加量可观, 机组进

口依赖度高。中国正逐步探索岸电工程, 陆上的电能即将通过复合光纤海底电缆输送至海上变电站平台, 经机组降压后供应电能给各生产平台。此举在摆脱发电机组进口依赖的同时可有效降低海上自发电带来的二氧化氮或氮氧化物的排放^[1]。

收稿日期: 2021-09-23 修回日期: 2021-12-31

基金项目: 中国能建广东院科技项目“支撑智慧建设及运维的变电站泛在电力物联网技术研究与应用”(ER05521W)

海上变电站作为岸电工程中的中央枢纽设施,是集电气一次设备和电气二次设备及相关附属设备于一体的供电平台,与城市户内变电站相比,其电气系统组成和功能布置基本相同。但海上无人的电力平台具有设备密集度高、安全疏散不如陆地便利,人工运维成本高的特点,存在火灾危险较高、外部救援能力低、人工扑救不及时、一旦失火损失范围广的问题。国内海上岸电技术逐步兴起,研究海上变电站灭火设施可行性并确定合理的技术参数和应用方法具有重要意义。

1 海上变电站高压细水雾灭火系统适应性分析

1.1 多种灭火介质适应性比较

海上变电站为全平台电气房间,电气类火灾灭火介质的选择多以气体、水雾或泡沫介质为主^[2-3]。相比泡沫灭火介质,气体和水雾介质的适用范围和普遍性更有优势。气体介质主要有七氟丙烷、IG541 和 CO₂,水雾介质主要有水喷雾和高压细水雾。针对海上变电站平台建设方案、作业条件及火灾特点,几种灭火介质特点在海上变电站适应性如表 1 所示。

由表 1 可知,二氧化碳系统因瓶组数过多且有致命的风险,不推荐采用;水喷雾因仅适合用于变压器室、高抗器室等少数房间,不推荐采用;IG541 与七氟丙烷在相同保护对象条件下,瓶组数较多,因此考虑七氟丙烷和高压细水雾作为可选灭火介质^[7]。

1.2 七氟丙烷与高压细水雾方案比选

根据前述分析,海上变电站消防系统分为两套推荐方案。方案一:平台全部采用泵组式高压细水雾灭火系统;方案二:变压器室、高压电抗器室、GIS 室以及非电气设备间均采用泵组式高压细水雾灭火系统,电气二次房间采用多套组合分配式七氟丙烷灭火系统。

以某海上变电站平台为例,平台共设 4 层甲板,每层甲板面积 931.5 m²,最下层是工作层甲板,主要为海缆进出线和辅助设备间,下层和中层甲板集中设有油浸式主变压器室、高压电抗器室、GIS 室、配电室、电池室、继电器室、接地变室等电气房间,以及直升机接待室、暖通设备间、消防设备

表 1 几种灭火介质特点在海上变电站适应性分析
Tab. 1 Adaptability analysis of several fire extinguishing media in offshore substation

介质种类	有利因素	不利因素	适用海上变电站的部位
七氟丙烷	1)适用电气类火灾;	1)内储压式输送距离≤50 m;2)最大保护高度 ^[4] ≤6.5 m;3)最大防护区体积≤1 600 m ³ 。	适用除变压器室、高抗器室、GIS 室之外的其他全部电气房间。
	2)海上运维经验成熟。		
CO ₂	1)可用于局部应用灭火系统 ^[5] ;	1)4%设计浓度时人体产生不适;2)相同保护区,瓶组数是七氟丙烷的 4~5 倍。	全部适用。
	2)海上运维经验较熟。		
IG541	1)无味、无毒、对环境影响小;	1)相同瓶容积,充装量仅为七氟丙烷的 20%左右;2)最大保护高度≤6.5 m;	适用除变压器室、高抗器室、GIS 室之外的其他全部电气房间。
	2)输送距离≤150m。	3)最大防护区体积≤1 600 m ³ 。	
水喷雾	适用含油电气火灾。	1)仅适用于变压器和高抗器设备;2)雾滴直径大、有效灭火所需水量大。	适用变压器室、高抗器室,其他房间不适用。
	高压下,粒径为百微米级,雾化效果好 ^[6] 。	1)水质至少满足生活饮用水指标;2)海上运维经验少。	全部适用。

间等辅助用房。上层甲板主要为设备吊装口和风机等。水源由栈桥连接的依托平台提供。变电站各房间基本信息如表 2 所示。

表 2 变电站房间基本信息
Tab. 2 Basic information of substation room

房间名称	房间面积 /m ²	房间高度/m	房间名称	房间面积/m ²	房间高度/m
主变压器室	170.5 (122)	10	电池室	40.5	5
高压电抗器室	63 (98)	10	暖通设备间	63	5
GIS 室	396	10	应急电源室	44	5
0.4 kV 配电室	49.5	5	继电器室	274.5	5
接地变室	76.5	5	回用水罐间	48.75	5
35 kV 配电室	121.5	5	事故油罐间	85	5

注:表中“()”内为设备外表面积。

方案一根据面积法初步计算高压细水雾设计流量为 522 L/min。方案二在方案一的基础上增加七氟丙烷系统设置,分为两组并分别在平台下层甲板

的两侧各设一个房间。两个方案的灭火系统投入情况及对比如表3所示。

表3 自动灭火系统方案对比
Tab. 3 Scheme comparison of automatic fire extinguishing system

项目	系统配置	设备间配置	初期投资	运维投资
方案一	高压细水雾泵组 5+1 一台及一座 25 m ³ 饮用水箱。	1 间 8 m × 10 m 设备间	略低	无药剂费折旧
方案二	1) 高压细水雾泵组 5+1 台及一座 25 m ³ 饮用水箱; 2) 2 套七氟丙烷瓶组, 共 24 瓶。	1) 1 间 8 m × 10 m 设备间 2) 2 间 5 m × 9 m 设备间	略高	每公斤每年产生约十几元折旧费
对比结果	1) 两套方案高压细水雾保护对象相同, 设备规模相同; 2) 方案二比方案一多两套七氟丙烷系统。	方案二比方案一多 2 间设备间	相差 18% ~ 25%	每年药剂费折旧约为 2 ~ 5 万

根据以上分析, 方案一具有一定优势。

1.3 电气二次设备用电安全分析

电气二次设备间均设有电气二次屏柜。海上变电站目前所采用的二次屏柜为 IP42 等级。基于目前国内外的实验数据中, 开关柜、配电柜、控制面板等多以 300 s 时间内带电运行的可行性验证结果^[8-9]。但国内外规范中要求海上该类电气设备的持续喷雾时间为 30 min, 若由于一些极端因素持续喷雾时间达到 20 min 以上, 根据研究结果, 屏柜及设备耐水渍能力尚不明确或系统可靠性将降低。变电站平台设计油田群范围广, 这将可能带来海上大面积失电停产的损失风险, 可恢复供电的时间也暂无法论证。若提高屏柜 IP 等级, 又将对设备散热造成较大影响。考虑这种情况, 从运维安全角度出发建议采用电气二次房间采用七氟丙烷系统。

2 海上变电站高压细水雾灭火系统应用

2.1 系统型式的确定

海上变电站平台仅有维护人员定期停留, 外部救援能力低, 短时间靠自动灭火系统控制火情更为现实, 系统型式采用开式系统每个房间应能够独立保护、独立控制更为合理。国家标准《细水雾灭火系统技术规范》(GB 50898—2013)^[10] 对开式系统防护区数量不超过 3 个。若考虑防护区数量限制,

将分区阀控制多个房间, 扩大了本无火情的影响范围, 不具经济性。若在每层甲板设置防护区阀门, 该阀门又控制本层甲板多个分区阀, 增加了系统控制上的复杂性或可带来时间上的延误^[11]。

国际标准并未有对应的这个要求。对于船舶的细水雾设计以及海上风电系统的海上升压站的设计中, 均为泵组后接至每个防护区的控制阀门, 由控制阀门独立控制所负责的区域。参考国际标准和风电工程应用案例^[12], 海上变电站平台采用每个房间为独立防护区, 每个不超过 3 000 m³ 的防护区由分区阀独立控制。

2.2 计算方法的确定与应用

2.2.1 喷雾强度的确定

海上平台消防系统通常采用国家标准、NFPA 标准、API 标准等作为设计依据。上述标准中仅国标作了较为明确规定。但国标使用的局限在于, 一方面对于不同系统型式下的不同应用场所、不同安装高度对应的喷雾强度的选择上存在一定局限, 只能采用类比原则确定各房间最低喷雾强度。另一方面没有对局部应用系统设计参数进行指导。

对于高压细水雾系统计算, 满足平均喷雾强度是基本要求之一。局部应用系统直接套用国家标准 GB 50898—2013 中表 3.4.4 的 1.2 L/(min·m²) 将缺乏依据。为此笔者进一步查找地方标准^[13-14], 取值在 1.3 ~ 1.5 L/(min·m²), 但地方标准不具有执行效力。国际上, 海上平台采用高压细水雾的油浸设备场所且房间高度达到 10 m 的房间可仅采用全淹没方式实现对设备保护的效果, 由此选用具有中国船级社认证的国外产品对变压器室进行试算: 喷头安装高度 10 m, 最大布置间距 4 m, 喷头工作压力 50 ~ 100 bar, 计算所得喷雾强度为 1.3 ~ 1.9 L/(min·m²)。综合以上分析, 海上变电站局部应用喷雾强度按不低于 1.5 L/(min·m²) 考虑。

2.2.2 计算方法的确定

变电站平台, 变压器室、高抗器室和 GIS 是最大的三处防护区。其中变压器、高抗器这两种含油设备体型不规整, 优先考虑采用开式局部应用喷头保护; GIS 设备体型虽较大, 因其表面材质为六氟化硫绝缘材质并配置耐火 A 级绝缘电缆, GIS 室采用开式全淹没喷头保护。

按国标给出的平均喷雾强度的面积算法, 初

步计算可知 GIS 室所需流量大于主变室。而喷头的实际出流量往往会比面积法计算值偏大, 原因是满足喷雾强度的要求时, 需对实际喷头出流系数进行校正, 因此采用特性系数法计算设计流量更接近实际出流水平。

2.2.3 系统设计流量的应用案例

项目概况如 1.2 节所述。系统设计流量由变压器和 GIS 的计算来决定。

1) 油浸变压器室

变压器室采取对设备局部应用保护, 分层布置, 设备部位包括变压器本体及油坑、油枕、散热器及连接的油管。根据设备外形尺寸确定喷头数量, 计算单个喷头流量后确定满足喷雾强度所需的 K 值。如变压器本体及油坑包络面积 122.2 m^2 , 共布置 36 个喷头, 喷雾强度 $1.5 \text{ L}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$, 计算单个喷头流量为 $5.1 \text{ L}/\text{min}$ (即 $K=0.51$), 根据产品类型选用 $K=0.7$ 型喷头。同样方法散热器选用 $K=0.5$ 型喷头。但考虑散热器处于房间外, 易受对气流干扰, 增加挡风设施又对设备散热产生较大干扰, 综合考虑散热器实际按 $K=1.0$ 选取。当遇恶劣天气时, 由工作人员加强监视, 及早采用水/泡沫两用消防软管站及移动式灭火器加以人工辅助灭火。特性系数法计算变压器及其散热器所需设计流量 $651.2 \text{ L}/\text{min}$ 。

2) GIS 室

GIS 是由断路器、隔离开关、接地开关、互感器、避雷器、母线等组成的电气一次开关设备。这些设备及部件封闭在金属接地外壳中, 内部充有六氟化硫绝缘气体。由于组件较多、体型庞大, 因此需要放置在一个较大空间内。如前所述, GIS 室房间面积 396 m^2 , 高度 10 m , 体积大于 $3\ 000 \text{ m}^3$ 。

(1) 国内做法

根据国标要求, 将超过 $3\ 000 \text{ m}^3$ 的防护区分为多个防护分区。此处若分为 2 个分区, 当火情出现两个分区交界处时, 将启动全部分区喷射保护, 对于 GIS 具有较强绝缘性的特点, 保护范围没有针对性, 且不具有经济性。因此考虑该房间分 3 个分区, 通过红外光束探测器识别火情所在的本区或本区及相邻分区。

采用国内系列喷头, 满足 10 m 最大安装高度并经过产品认证的喷头选型余地不大, 多为最大安

装高度 7.5 m 喷头。需安装在顶板下至少 2.5 m , 按 $3 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ 间距布置, 共 48 个喷头, 每个分区阀控制 16 个喷头, 最大启动 32 个喷头灭火。GIS 房间布置如图 1 所示。单个喷头计算流量为 $9.90 \text{ L}/\text{min}$, 满足喷雾强度的要求需选用 $K=1.5$ 以上的喷头, 因此该房间计算流量为 $480 \text{ L}/\text{min}$ 。但此方案将可能对吊装、运输、维修存在一定障碍。

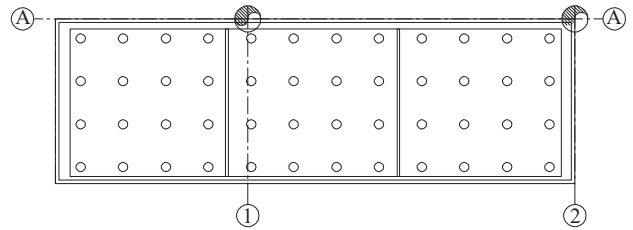


图 1 GIS 房间喷头布置 ($3 \text{ m} \times 3 \text{ m}$)

Fig. 1 Sprinkler arrangement in GIS room ($3 \text{ m} \times 3 \text{ m}$)

(2) 国外做法

根据国外标准 NFPA750, 按防护区全部喷放, 喷头最大安装高度 10 m , 通过认证的喷头最大布置间距可按 $4 \text{ m} \times 4 \text{ m}$ 设置, 共 27 个喷头, 每个分区阀控制 9 个喷头。最大启动 18 个喷头灭火。GIS 房间布置图如图 2 所示。单个喷头设计流量不低于 $17.6 \text{ L}/\text{min}$, 可选用 $K=1.87$ 喷头, 该房间计算流量为 $504.9 \text{ L}/\text{min}$ 。

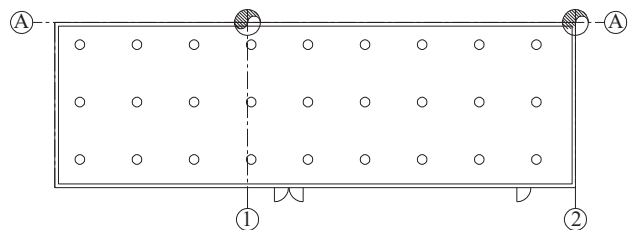


图 2 GIS 房间喷头布置 ($4 \text{ m} \times 4 \text{ m}$)

Fig. 2 Sprinkler arrangement in GIS room ($4 \text{ m} \times 4 \text{ m}$)

3) 系统设计流量

通常根据计算流量考虑一定设计冗余, 海上平台高压细水雾灭火系统设计流量采用 1.1 倍的计算流量确定^[15]。

2.3 分区阀位置的设置原则

分区阀通常采取集中或分散两种布置。海上变电站分区阀若集中设置在泵房内, 阀后管道经平台公共区域至各防护区的管道长度较长, 将可能导致延长响应时间。需进一步分析响应过程。

对于开式系统设计响应时间不应大于 30 s , 这

个时间是从火灾自动报警系统发出指令开始。从自动启动全过程即火灾探测器检测到火灾至最不利喷头出水大概分为5个主要关键节点,如图3所示。

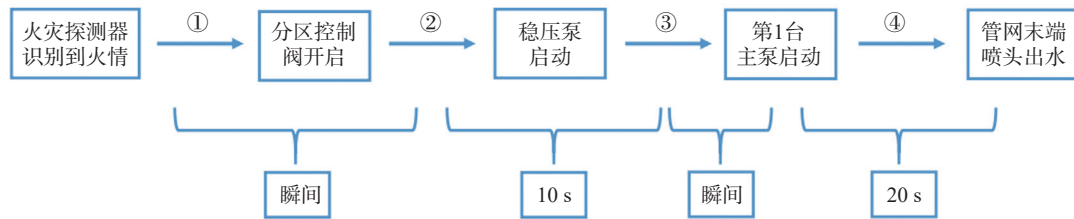


图3 自动启动全过程的5个关键节点

Fig. 3 Five key nodes in the whole process of auto start

过程①:该过程包含火灾报警控制器识别探测器地址并发出指令开启对应分区控制阀,此过程可在瞬间完成。

过程②:分区阀打开后反馈信号,系统压力下降,稳压泵启动,通过系统逻辑设定,维持时间不超过10 s。

过程③:10 s后转换为第1台主泵启动,此过程也可瞬间完成。

过程④:主泵启动后,从分区阀到最不利喷头的冲水时间不超过20 s。

根据上述分析,分区阀后的冲水时间在20 s内完成。高压细水雾流速一般控制在8 m/s以内,局部不超过10 m/s。根据末端房间管网布置,房间内充水时间需2 s。若分区阀在泵房,从阀后到末端房间附近的管段需在18 s内完成充水。经计算,18 s所对应的长度约75 m,阀前管道采用电伴热保温。

3 结论

1) 海上变电站电气一次设备推荐采用高压细水雾系统。电气二次设备采用气体灭火系统具有可靠性。当采用高压细水雾灭火系统时,应进一步研究一次火灾持续时间内系统对配电柜等设备水渍侵害程度以及设备恢复供电的时长。

2) 海上变电站高压细水雾灭火系统的局部应用喷雾强度建议采用不低于 $1.5 \text{ L}/(\text{min}\cdot\text{m}^2)$ 。计算流量时,应结合国内外产品特性差异和喷头布置型式,区分不同的计算结果,采取合理的布置方式和适宜的喷头类型。

3) 分区阀位置应结合电气房间布局和分区阀后管线长度所需充水时间来确定。当末端房间内管

当防护区需多台泵提供流量时,从1台启动后,每隔3~5 s顺序启动主泵。

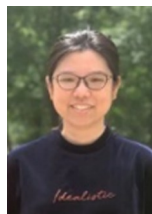
道路由不超过20 m时,分区阀到末端房间距离建议控制在80 m以内,当末端房间内路由更长,分区阀输送距离应更短。

参考文献:

- [1] 万光芬,胡意茹,李强,等.海上油气田群岸电技术工程应用探讨[J].电工技术,2020(21):99-101+103. DOI:10.19768/j.cnki.dgjs.2020.21.027.
WAN G F, HU Y R, LI Q, et al. Discussion on engineering application of shore power technology in offshore oil and gas fields [J]. Electric engineering, 2020(21): 99-101+103. DOI: 10.19768/j.cnki.dgjs.2020.21.027.
- [2] 国家能源局.风电场工程110~220 kV海上升压变电站设计规范:NB/T 31115—2017[S].北京:中国电力出版社,2017.
National Energy Administration. Code for 110~220 kV offshore substation design of wind power projects: NB/T 31115—2017 [S]. Beijing: China Electric Power Press, 2017.
- [3] American Petroleum Institute. API RP 14G recommended practice for fire prevention and control on fixed open type offshore production platforms 2019 edition [S]. Washington: API, 2019.
- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部.气体灭火系统设计规范:GB 50370—2005[S].北京:中国计划出版社,2005.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of gas fire extinguishing systems: GB 50370—2005 [S]. Beijing: China Planning Press, 2005.
- [5] 中华人民共和国住房和城乡建设部.二氧化碳灭火系统设计规范:GB 50193—93(2010年版)[S].北京:中国计划出版社,1993.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design for carbon dioxide fire extinguishing systems: GB 50193—93(2010 Edition) [S]. Beijing: China Planning Press, 2010.
- [6] 伍毅,陆林,凤四海,等.高压细水雾喷头流量系数与雾场特性的关系[J].科学技术与工程,2018,18(1):348-352. DOI:

10. 3969/j. issn. 1671-1815. 2018. 01. 060.
- WU Y, LU L, FENG S H, et al. Relationship between flow coefficient of nozzle and water mist characteristics under high pressure [J]. *Science Technology and Engineering*, 2018, 18(1): 348-352. DOI: 10. 3969/j. issn. 1671-1815. 2018. 01. 060.
- [7] 周科伟, 丁天祥. 高压细水雾在半潜式修井及生活平台上的应用 [J]. *江苏船舶*, 2019, 36(2): 22-25. DOI: 10. 19646/j. cnki. 32-1230. 2019. 02. 007.
- ZHOU K W, DING T X. Application of high-pressure water mist in semi-submersible well repair and living platform [J]. *Ji-angsu Ship*, 2019, 36(2): 22-25. DOI: 10. 19646/j. cnki. 32-1230. 2019. 02. 007.
- [8] 孙震宁, 谢天光, 郝爱玲. 细水雾喷放条件下的用电安全性研究现状 [J]. *消防科学与技术*, 2018, 37(12): 1687-1689+1699. DOI: 10. 3969/j. issn. 1009-0029. 2018. 12. 025.
- SUN Z N, XIE T G, HAO A L. Current status of research on electricity safety under water mist discharge [J]. *Fire Science and Technology*, 2018, 37(12): 1687-1689+1699. DOI: 10. 3969/j. issn. 1009-0029. 2018. 12. 025.
- [9] 柳明, 马力, 王子阳, 等. 高压细水雾灭火系统在通信设备用房适用性研究 [J]. *现代城市轨道交通*, 2021(增刊): 105-108.
- LIU M, MA L, WANG Z Y, et al. Research on applicability of high-pressure water mist fire extinguishing system in communication equipment rooms [J]. *Modern Urban Transit*, 2021 (Supp. 1): 105-108.
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 细水雾灭火系统技术规范: GB 50898—2013 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2013.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical code for water mist fire extinguishing system: GB 50898—2013 [S]. Beijing: China Planning Press, 2013.
- [11] 汤慧, 郭汝艳. 高压细水雾灭火系统在医院建筑中的应用 [J]. *给水排水*, 2020, 56(11): 91-97. DOI: 10. 13789/j. cnki. ww1964. 2020. 11. 018.
- TANG H, GUO R Y. Application of high pressure water mist system in hospital design [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2020, 56(11): 91-97. DOI: 10. 13789/j. cnki. ww1964. 2020. 11. 018.
- [12] 黄毅. 风电工程海上升压站消防系统优化分析 [J]. *水电与新能源*, 2018, 32(9): 71-74. DOI: 10. 13622/j. cnki. cn42-1800/tv. 1671-3354. 2018. 09. 018.
- HUANG Y. Optimization analysis of the fire protection system for offshore substation of wind farms [J]. *Hydropower And Nwe Energy*, 2018, 32(9): 71-74. DOI: 10. 13622/j. cnki. cn42-1800/tv. 1671-3354. 2018. 09. 018.
- [13] 河南省住房和城乡建设厅. 高压细水雾灭火系统设计、施工及验收规范: DB J41/T074—2013 [S]. 河南: 郑州大学出版社, 2013.
- Henan Province Department of Housing and Urban-Rural construction. Code for design, installation and acceptance of water mist fire protection system: DB J41/T074—2013 [S]. Henan: Zhengzhou University Press, 2013.
- [14] 重庆市公安局消防局. 重庆市细水雾灭火系统技术规范: DB J50—208—2014 [S]. 重庆: 重庆市城乡建设委员会, 2014.
- Fire Department of Ministry of Chongqing Public Security Bureau. Technical standard of water mist fire protection system of Chongqing: DB J50—208—2014 [S]. Chongqing: Chongqing Urban-Rural Construction Commission, 2014.
- [15] National Fire Protection Association. NFPA750 standard on water mist fire protection systems 2019 edition [S]. Quincy: HIS Inc., 2019.

作者简介:



秦逸涵

秦逸涵 (通信作者)

1986-, 女, 北京市人, 工程师, 硕士, 主要从事海洋工程给排水及消防系统研究 (e-mail) qinyihan08@163.com。

(责任编辑 叶筠英)