

# 高压细水雾在综合管廊电缆舱的灭火试验研究

席林<sup>1</sup>, 张宏民<sup>2</sup>, 龙忠业<sup>2</sup>

(1. 中国中铁二院工程集团有限责任公司, 四川 成都 610031; 2. 上海以宽机电工程技术有限公司, 上海 200120)

**摘要:** 高压细水雾适用于扑救综合管廊电缆舱火灾。高压细水雾灭火试验中, 细水雾喷头工作压力  $P=10$  MPa, 流量系数  $K=0.95$ , 额定流量  $q=9.5$  L/min, 全淹没、局部应用方式的喷雾强度分别为  $1.108$ 、 $1.066$  L/(min·m<sup>2</sup>); 流量系数  $K=0.45$ , 额定流量  $q=4.5$  L/min, 全淹没、局部应用方式的喷雾强度分别为  $0.525$ 、 $0.505$  L/(min·m<sup>2</sup>), 均灭火成功。根据试验参数分析, 综合管廊电缆舱中, 全淹没方式喷雾强度可以在  $0.53 \sim 1.1$  L/(min·m<sup>2</sup>) 选取, 局部应用方式喷雾强度可在  $0.51 \sim 1.1$  L/(min·m<sup>2</sup>) 选取, 为降低工程投资, 喷雾强度可取低值。综合管廊内喷头竖向安装高度  $H>3.0$  m 时, 喷雾强度仍可按  $H \leq 3.0$  m 的参数选取。

**关键词:** 综合管廊; 电缆舱; 高压细水雾; 灭火试验

**中图分类号:** TU990.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)01-0063-05

## Fire Extinguishing Test of High Pressure Water Mist in Power Cable Cabin of Utility Tunnel

XI Lin<sup>1</sup>, ZHANG Hong-min<sup>2</sup>, LONG Zhong-ye<sup>2</sup>

(1. China Railway Eryuan Engineering Group Co. Ltd., Chengdu 610031, China; 2. Shanghai ICAN Mechanical & Electrical Engineering and Technology Co. Ltd., Shanghai 200120, China)

**Abstract:** High pressure water mist is appropriate for the power cable cabin in the utility tunnel. The working pressure of water mist nozzle was set to 10 MPa in a fire extinguishing test, the flow coefficient  $K$  was 0.95 and the rated flow  $q$  was 9.5 L/min. The water mist intensity was 1.108 L/(min·m<sup>2</sup>) in total flooding application and 1.066 L/(min·m<sup>2</sup>) in local application. Using  $K=0.45$  and  $q=4.5$  L/min, the water mist intensity was 0.525 L/(min·m<sup>2</sup>) and 0.505 L/(min·m<sup>2</sup>), respectively. The fire was successfully extinguished in all tests. According to the test parameter analysis, the water mist intensity should be between 0.53 L/(min·m<sup>2</sup>) and 1.1 L/(min·m<sup>2</sup>) in the total flooding application and between 0.51 L/(min·m<sup>2</sup>) and 1.1 L/(min·m<sup>2</sup>) in the local application, for power cable cabin of utility tunnel. The lower limit could be adopted to reduce the construction cost. The water mist intensity parameters remained the same when the installation height of the water nozzle in utility tunnel exceeded 3.0 m.

**Key words:** utility tunnel; power cable cabin; high pressure water mist; fire extinguishing test

高压细水雾灭火系统由高压细水雾泵组、细水雾喷头、区域控制阀、火灾报警系统、水箱及管道系统等组成<sup>[1-2]</sup>, 其工作压力不小于 10 MPa。根据喷头型式, 高压细水雾分为开式系统、闭式系统。高压

细水雾灭火系统运行控制方式分为自动控制、手动控制和机械应急操作 3 种方式。发生火灾时, 火灾报警系统工作, 人工或自动启动高压细水雾泵组, 喷头喷放的细水雾在火场空间扩散, 通过表面冷却、室

息、辐射热阻隔和浸润等作用达到灭火目的。

高压细水雾灭火系统具有节能环保、电气绝缘、消除烟雾等优点,适用于扑救电气火灾。

根据《城市综合管廊工程技术规范》(GB 50838—2015)规定,干线综合管廊的电力电缆舱室、支线管廊中容纳6根及以上电力电缆的舱室应设置自动灭火系统。因此,综合管廊内的自动灭火系统主要为扑灭电力电缆舱室的火灾,高压细水雾灭火系统则适用于综合管廊电缆舱的灭火。

笔者通过模拟综合管廊电缆舱火灾,测试高压细水雾灭火系统在综合管廊电缆舱内不同应用方式、不同喷雾强度条件下的灭火性能;对试验数据进行分析、研究,取得高压细水雾灭火系统在综合管廊电缆舱应用的有关参数,为类似工程提供参考。

## 1 试验装置及设备

### 1.1 综合管廊电缆舱

试验综合管廊电缆舱按照某工程综合管廊水电信舱制作,采用钢结构及耐火水泥板搭建组成,取消配水管及通信管束,仅布置电力电缆部分,长 $\times$ 宽 $\times$ 高为20.0 m $\times$ 3.0 m $\times$ 3.4 m,舱室两端设置防火门。电缆舱内两侧各设置8层电缆桥架,桥架宽度为600 mm,层间距为300 mm,最底层桥架距离地面400 mm,顶层桥架距舱室顶部900 mm,每层桥架上放置多根电缆及其交联聚乙烯绝缘材料。

综合管廊电缆舱布置见图1。细水雾喷头照片见图2。

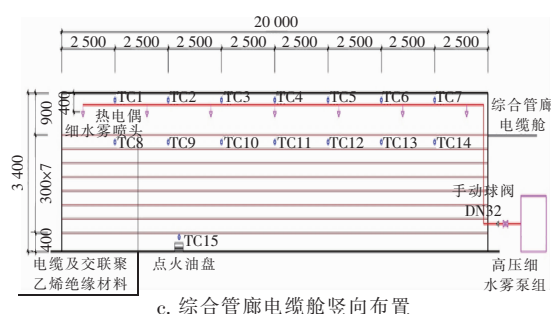
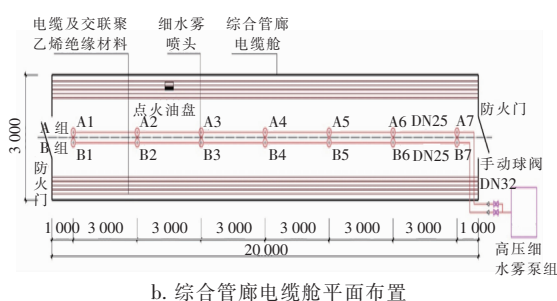
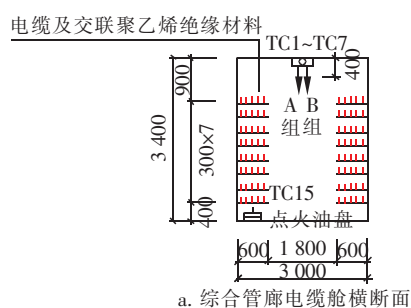


图1 综合管廊电缆舱布置示意

Fig. 1 Layout of power cable cabin in utility tunnel

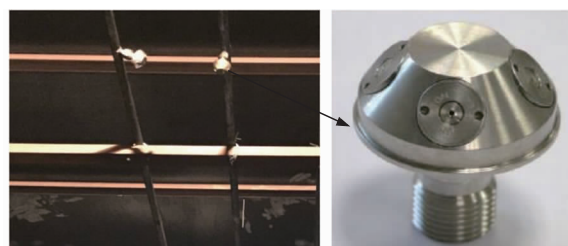


图2 细水雾喷头照片

Fig. 2 Photo of water mist nozzle

### 1.2 高压细水雾灭火系统

试验采用的高压细水雾灭火系统包括高压细水雾泵组、开式细水雾喷头、手动球阀及管道系统(不锈钢316L)等。试验采用人工控制,未使用区域控制阀、火灾报警系统。

高压细水雾泵组为工程中使用的同型号设备,为一体式撬装成套装置,包括高压泵(4台, $Q=112$  L/min, $H=10\sim13$  MPa, $N=30$  kW)、稳压泵(2台, $Q=11.7$  L/min, $H=1.2$  MPa, $N=0.55$  kW)、水箱(1个, $V=0.8$  m<sup>3</sup>)、控制柜及压力表、安全泄压阀等其他附属设备。

试验将测试2种开式细水雾喷头的灭火性能。为便于试验依序进行,将2种细水雾喷头分A组(DN10,额定工作压力 $P=16$  MPa,流量系数 $K=0.95$ ,额定流量 $q=9.5$  L/min)、B组(DN10,额定工作压力 $P=16$  MPa,流量系数 $K=0.45$ ,额定流量 $q=4.5$  L/min)布置在舱室顶部中间位置,每组7个,沿长度方向布置,间距为3.0 m,距管廊顶部距离为400 mm。消防水管为DN32、DN25,消防水管上设DN32手动球阀(额定工作压力为16 MPa,不锈钢316L)。

### 1.3 其他试验设备、材料

#### 1.3.1 热电偶

测量温度采用15支直径为2 mm的镍铬-镍

硅 K 型热电偶,编号为 TC1 ~ TC15。在电缆舱顶部中间及上部第 2 层电缆桥架中间各布置 1 组,每组 7 支,间距为 2.5 m。在点火油盘正上方布置 1 支。

### 1.3.2 数据采集系统

数据采集系统采用模块化仪器设备,由设备机箱和热电偶测量模块组成。测量控制程序采用先进的虚拟仪器技术,具有 16 路温度信号采集功能,采样周期为 1 s,系统能长时间稳定工作,性能可靠。

### 1.3.3 电缆及交联聚乙烯绝缘材料

试验燃烧材料为成品不燃电缆及交联聚乙烯绝缘材料,电缆直径为 50 ~ 70 mm,交联聚乙烯绝缘材料为管状,直径为 40 ~ 60 mm。

### 1.3.4 点火油盘

点火油盘放置在最底层电缆正下方,处于 A2、A3 细水雾喷头之间,并根据试验需要调整位置。试验点火用 0# 柴油。

## 2 高压细水雾灭火试验

在综合管廊电缆舱内测试 2 种开式细水雾喷头分别在全淹没、局部应用方式下的灭火性能,流量系数  $K$  分别为 0.95 (A 组)、0.45 (B 组)。

### 2.1 A 组细水雾喷头灭火试验

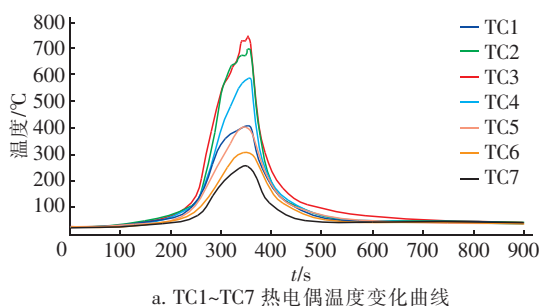
A 组细水雾喷头参数:流量系数  $K = 0.95$ ,工作压力  $P = 10$  MPa,额定流量  $q = 9.5$  L/min,雾滴直径  $Dv_{0.99} < 200$   $\mu\text{m}$ 、 $Dv_{0.50} < 50 \sim 65$   $\mu\text{m}$ 。

#### 2.1.1 A 组细水雾喷头全淹没方式灭火试验

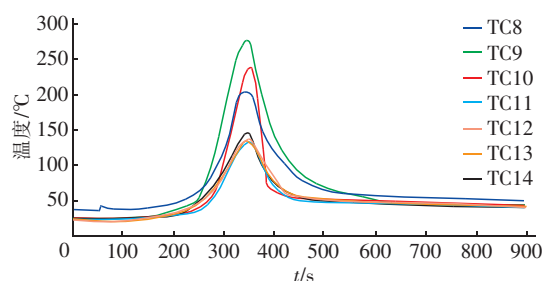
A 组喷头共 7 个 (A1 ~ A7),安装在舱室顶部中间,安装角度为垂直向下。

试验环境温度为 30  $^{\circ}\text{C}$ ,在电缆预燃阶段,综合管廊电缆舱两端的防火门及观察口均为开启状态。

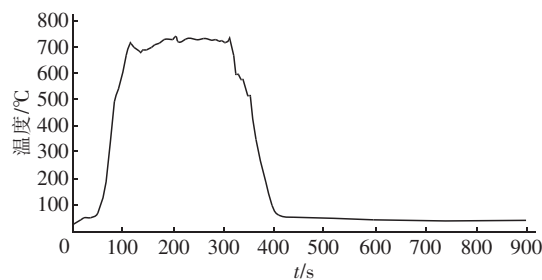
将柴油倒入点火油盘并点燃,开始计时,58 s 时电缆开始冒烟,84 s 时电缆开始燃烧,344 s 时关闭防火门及观察口,349 s 时启动高压细水雾泵组中 1 台高压泵,7 个细水雾喷头开始喷雾,泵组出口压力为 10.2 MPa。热电偶温度变化曲线见图 3。



a. TC1~TC7 热电偶温度变化曲线



b. TC8~TC14 热电偶温度变化曲线



c. TC15 热电偶温度变化曲线

图 3 A 组细水雾喷头全淹没方式灭火试验中热电偶温度变化曲线

Fig. 3 Change of thermocouple temperature in fire extinguishing test by total flooding application water mist system of group A

高压细水雾泵组启动后,TC1 ~ TC15 温度迅速降到 100  $^{\circ}\text{C}$  以下。15 min 后,关闭高压细水雾泵组,打开电缆舱,燃烧电缆全部熄灭,无复燃现象,灭火成功。

#### 2.1.2 A 组细水雾喷头局部应用方式灭火试验

A 组喷头共 4 个 (A1 ~ A4),安装在舱室顶部中间,安装倾斜角度为 30 $^{\circ}$ 。

试验环境温度为 32  $^{\circ}\text{C}$ ,电缆预燃阶段,综合管廊电缆舱两端的防火门及观察口均为开启状态。

将柴油倒入点火油盘并点燃,开始计时,38 s 时电缆开始冒烟,84 s 时电缆开始燃烧,313 s 时关闭电缆舱的防火门及观察口,318 s 时启动高压细水雾泵组中 1 台高压泵,4 个细水雾喷头开始喷雾,泵组出口压力为 10.1 MPa。根据热电偶温度变化可知,在高压细水雾泵组启动后,温度降低,TC1 ~ TC15 温度迅速下降到 100  $^{\circ}\text{C}$  以下。15 min 后,关闭高压细水雾泵组,打开电缆舱,燃烧电缆全部熄灭,无复燃现象,灭火成功。

#### 2.1.3 小结

在综合管廊电缆舱中,采用全淹没或局部应用方式高压细水雾灭火系统,启动 1 台高压泵,工作压力  $P = 10.1 \sim 10.2$  MPa,喷头流量系数  $K = 0.95$ ,额



定流量  $q=9.5\text{ L/min}$ , 运行  $15\text{ min}$  后, 均灭火成功; 电缆舱顶部从最高温度 ( $600\sim750\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) 降至  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  以下约用时  $150\text{ s}$ , 电缆舱底部从最高温度 ( $600\sim700\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) 降至  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  以下约用时  $100\text{ s}$ , 冷却速度快。计算得到 A 组试验中全淹没和局部应用方式灭火试验喷雾强度分别为  $1.108$ 、 $1.066\text{ L}/(\text{min}\cdot\text{m}^2)$ 。

全淹没方式的保护面积即为电缆舱平面面积。局部应用方式的保护面积为保护对象的外表面面积: 保护范围长度即为 A1~A4 细水雾喷头的保护长度,  $L=11.5\text{ m}$ ; 保护范围宽度即为 8 层电缆桥架的外表面尺寸“电缆桥架宽度+电缆桥架总高度”,  $B=(0.6+2.5)\text{ m}=3.1\text{ m}$ 。

## 2.2 B 组细水雾喷头灭火试验

B 组细水雾喷头参数: 流量系数  $K=0.45$ , 工作压力  $P=10\text{ MPa}$ , 额定流量  $q=4.5\text{ L/min}$ , 雾滴直径  $Dv_{0.99}<200\text{ }\mu\text{m}$ 、 $Dv_{0.50}<50\sim65\text{ }\mu\text{m}$ 。

### 2.2.1 B 组细水雾喷头全淹没灭火试验

B 组喷头共 7 个 (B1~B7), 安装在舱室顶部中间, 安装角度为垂直向下。

试验环境温度为  $32\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 电缆预燃阶段, 综合管廊电缆舱两端的防火门及观察口均为开启状态。

将柴油倒入油盘并点燃, 开始计时,  $86\text{ s}$  时电缆开始冒烟,  $98\text{ s}$  时电缆开始燃烧,  $350\text{ s}$  时关闭电缆舱的防火门及观察口,  $355\text{ s}$  时启动高压细水雾泵组中 1 台高压泵, 7 个细水雾喷头开始喷雾, 泵组出口压力为  $10.1\text{ MPa}$ 。根据热电偶温度变化可知, 在高压细水雾灭火系统启动后, 温度降低,  $\text{TC1}\sim\text{TC15}$  迅速下降到  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  以下。细水雾喷头喷放  $15\text{ min}$  后, 关闭高压细水雾泵组, 打开电缆舱, 燃烧电缆全部熄灭, 无复燃现象, 灭火成功。

### 2.2.2 B 组喷头局部应用灭火试验

B 组喷头共 4 个 (B1~B4), 安装在舱室顶部中间, 安装倾斜角度为  $45^{\circ}$ 。试验环境温度为  $32\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 电缆预燃阶段, 综合管廊电缆舱两端的安全门及观察口均为开启状态。

将柴油倒入油盘并点燃, 开始计时,  $54\text{ s}$  时电缆开始冒烟,  $68\text{ s}$  时电缆开始燃烧,  $313\text{ s}$  时关闭电缆舱的防火门及观察口,  $318\text{ s}$  时启动高压细水雾泵组中的 1 台高压泵, 4 个细水雾喷头开始喷雾, 泵组出口压力为  $10.1\text{ MPa}$ 。根据热电偶温度变化可知, 在高压细水雾灭火系统启动后, 温度降低,  $\text{TC1}\sim\text{TC15}$  温度下降到  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  以下。  $15\text{ min}$  后, 关闭高压细水

雾泵组, 打开电缆舱, 燃烧电缆全部熄灭, 无复燃现象, 灭火成功。

### 2.2.3 小结

在综合管廊电缆舱中, 采用全淹没或局部应用方式高压细水雾灭火系统, 启动 1 台高压泵, 工作压力  $P=10.1\text{ MPa}$ , 喷头流量系数  $K=0.45$ , 额定流量  $q=4.5\text{ L/min}$ , 运行  $15\text{ min}$  后, 均灭火成功; 电缆舱顶部从最高温度 ( $600\sim900\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) 降至  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  的时间约为  $250\text{ s}$ , 电缆舱底部从最高温度 ( $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) 降至  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  以下的时间约为  $150\text{ s}$ , 冷却速度较快。

计算得到 B 组试验中全淹没和局部应用方式灭火喷雾强度分别为  $0.525$ 、 $0.505\text{ L}/(\text{min}\cdot\text{m}^2)$ 。

## 3 灭火试验参数分析

### 3.1 《细水雾灭火系统技术规范》的相关规定

《细水雾灭火系统技术规范》(GB 50898—2013) 第 3.4.4 条规定: 采用全淹没应用方式的开式系统, 其喷雾强度、喷头布置间距、安装高度和工作压力, 宜经实体火灾模拟试验确定, 也可根据喷头的安装高度按表 3.4.4 确定系统的最小喷雾强度和喷头的布置间距。

综合管廊电缆舱无相应的全淹没方式细水雾灭火系统设计参数, 工程设计中主要参照上述规范中“电缆隧道、电缆夹层”的参数确定, 即: 喷头工作压力  $\geq 10\text{ MPa}$ ; 喷头安装高度  $3.0\text{ m}<H\leq 5.0\text{ m}$  时, 最小喷雾强度为  $2.0\text{ L}/(\text{min}\cdot\text{m}^2)$ ; 喷头安装高度  $H\leq 3.0\text{ m}$  时, 最小喷雾强度为  $1.0\text{ L}/(\text{min}\cdot\text{m}^2)$ ; 喷头最大布置间距为  $3.0\text{ m}$ 。

《细水雾灭火系统技术规范》(GB 50898—2013) 第 3.4.6 条规定: 采用局部应用方式的开式系统, 当保护具有可燃液体火灾危险的场所时, 系统的设计参数应根据产品认证检验时, 国家授权的认证检验机构根据现行国家标准《细水雾灭火系统及部件通用技术条件》(GB/T 26785) 认证检验时获得的试验数据确定, 且不应超出试验限定的条件。对于电缆隧道、电缆夹层或电缆舱, 采用局部应用方式的开式系统, 该规范未给定设计参数, 需根据火灾实体试验参数确定。

### 3.2 灭火试验参数分析

灭火试验各项参数汇总见表 1。可知, 流量系数  $K=0.95$  的喷头, 全淹没方式的试验喷雾强度与《细水雾灭火系统技术规范》(GB 50898—2013) 提供的喷雾强度  $1.0\text{ L}/(\text{min}\cdot\text{m}^2)$  接近, 局部应用方

式的试验喷雾强度与全淹没方式基本相同;流量系数  $K=0.45$  的喷头,全淹没方式的试验喷雾强度约

为规范提供的喷雾强度的 0.5 倍,局部应用方式的试验喷雾强度与全淹没方式也基本相同。

表 1 灭火试验参数

Tab. 1 Parameters of fire extinguishing tests

项 目	喷头安装 间距/m	喷头安装 高度/m	喷头流量 系数 $K$	工作压力/MPa	喷雾强度/ ( $L \cdot \min^{-1} \cdot m^{-2}$ )	备注
A 组	全淹没	3.0	0.95	10	1.108	雾滴直径: $Dv_{0.99} < 200 \mu m$ $Dv_{0.50} < 50 \sim 65 \mu m$
	局部应用	3.0	0.95	10	1.066	
B 组	全淹没	3.0	0.45	10	0.525	
	局部应用	3.0	0.45	10	0.505	

根据试验可知,在类似综合管廊电缆舱中,采用上述性能的高压细水雾灭火系统,喷头工作压力为 10 MPa,全淹没方式的喷雾强度可以在  $0.53 \sim 1.1 L/(\min \cdot m^2)$  范围内选取,为降低工程投资,喷雾强度可取低值;局部应用方式灭火系统的喷雾强度可在  $0.51 \sim 1.1 L/(\min \cdot m^2)$  范围内选取,为降低工程投资,喷雾强度可取低值。

### 3.3 喷头布置高度与喷雾强度探讨

喷头通常设置在保护区顶部,其设置高度与保护区域高度相关,保护区域高度与充满细水雾的时间有关,即与灭火速率、灭火时间有关。《细水雾灭火系统技术规范》(GB 50898—2013)提供的参数,喷头安装高度  $3.0 m < H \leq 5.0 m$  时最小喷雾强度是安装高度  $H \leq 3.0 m$  时最小喷雾强度的 2 倍。

综合管廊的净高通常为  $3.0 \sim 4.0 m$ ,根据高压细水雾的灭火机理及现场试验情况可知,喷头竖向布置高度  $H > 3.0 m$  时,保护区域细水雾充满时间与保护区高度成比例增加,灭火时间会适当延长,在有效灭火时间内,仍能完全灭火,喷雾强度仍可以按  $H \leq 3.0 m$  的参数选取。

## 4 结论

① 高压细水雾灭火系统适用于扑救综合管廊电缆舱火灾。

② 试验综合管廊电缆舱采用高压细水雾灭火系统,细水雾喷头工作压力  $P=10$  MPa,流量系数  $K=0.95$ ,额定流量  $q=9.5 L/\min$ ,其全淹没、局部应用方式灭火试验喷雾强度分别为  $1.108$ 、 $1.066 L/(\min \cdot m^2)$ ;流量系数  $K=0.45$ ,额定流量  $q=4.5 L/\min$ ,其全淹没、局部应用方式灭火试验喷雾强度分别为  $0.525$ 、 $0.505 L/(\min \cdot m^2)$ ,均灭火成功。电缆舱从最高温度降至  $100^\circ C$  以下用时  $150 \sim 250 s$ 。

③ 综合管廊电缆舱采用高压细水雾灭火系统,全淹没方式喷雾强度可在  $0.53 \sim 1.1 L/(\min \cdot$

$m^2)$  范围内选取,局部应用方式喷雾强度可在  $0.51 \sim 1.1 L/(\min \cdot m^2)$  范围内选取,为降低工程投资,喷雾强度可取低值。

④ 综合管廊内喷头竖向布置高度  $H > 3.0 m$  时,喷雾强度仍可按  $H \leq 3.0 m$  的参数选取。

## 参考文献:

- [1] 张慧. 高压细水雾系统灭火效果的实验研究[D]. 淮南:安徽理工大学,2016.  
Zhang Hui. Experimental Research on the Effect of High Pressure Water Mist Fire Extinguishing System [D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology, 2016 (in Chinese).
- [2] 周善怀. 高压单相流细水雾自动灭火系统的研制及火场温度监测[D]. 杭州:浙江大学,2004.  
Zhou Shanhuai. Research & Manufacture on Automatic Single-fluid High-pressure Water Mist Fire Suppression System and Monitoring on Temperature of Fire Scene [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004 (in Chinese).



作者简介:席林(1973—),男,四川广安人,硕士,高级工程师,注册公用设备工程师,长期从事市政给水排水、综合管廊工程设计与研究工作。

E-mail: 342882689@qq.com

收稿日期:2018-05-12