

文章编号 1004-924X(2013)09-2225-06

# 基于线型感温火灾探测器的电缆隧道火灾实验

丁宏军<sup>1</sup>, 范典<sup>1\*</sup>, 姚浩伟<sup>2</sup>

- (1. 武汉理工大学 光纤传感技术国家工程实验室, 湖北 武汉 430070;
2. 中山大学 广东省消防科学技术重点实验室, 广东 广州 510006)

**摘要:**研究了线型感温火灾探测器应用于电缆隧道场所电缆火灾早期探测的工程适用性。以电缆隧道为应用环境, 基于现有的线型感温火灾元件: 感温电缆、光纤拉曼感温探测器和光纤光栅感温探测器, 建立了实验平台, 设定了不同火灾的实验场景, 记录了火灾模拟试验中的温度变化和探测器响应时间。实验显示, 对于初起无明显火的小规模火灾, 其热辐射量小, 除了与其直接接触的感温火灾探测器能做出报警响应外, 其余非接触式的探测器均无法响应。对大规模火灾, 光纤拉曼感温探测器和光纤光栅感温探测器的报警反应时间均在 30 s 左右, 热电偶记录的火灾发生上方 60 s 以内的温度都在 35 °C 以下, 而±3 m 内的温升都超过 5 °C/min。根据 3 种探测器的技术特点, 分析了典型线型感温火灾探测器应用于电缆隧道场所火灾早期探测的工程适用性, 为规范编写《火灾报警设计规范》的相关条款提供了技术支持。

**关键词:** 光纤感温; 火灾实验; 火灾探测器; 电缆隧道; 响应时间; 温度变化

**中图分类号:** X932; TP212.11 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132109.2225

## Cable tunnel fire experiments based on linear temperature sensing fire detectors

DING Hong-jun<sup>1</sup>, FAN Dian<sup>1\*</sup>, YAO Hao-wei<sup>2</sup>

- (1. National Engineering Laboratory for Fiber Optic Sensing Technology, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;
  2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Fire Science and Technology, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510006, China)
- \* Corresponding author, E-mail: fandian@whut.edu.cn

**Abstract:** The engineering suitability of typical linear heat detectors for early fire detection in cable tunnels was explored. In cable tunnel environments, an experimental platform was established based on existing linear temperature fire detectors, including temperature sensing cables, fiber Raman detectors and fiber grating detectors, then two different fire experimental scenes were set up, and the temperature variation and fire detector response time were recorded in the processing of fire simulation. The experiments show that only directly contacting heat detectors can give an alarm response and other non-contact detectors are unable to respond the small-scale fire because a small amount of thermal radiation has no flame for the beginning of the fire. Furthermore, for massive fire, the alarm response time of both fiber Raman sensing heat fire detector and fiber grating sensing fire detector is about

收稿日期: 2013-03-11; 修订日期: 2013-04-11.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 51275373); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(No. 2012-IV-19)

30 s, the temperature over the fire recorded by a thermocouple is less than  $35\text{ }^{\circ}\text{C}$  in 60 s, while the temperature rising is more than  $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$  within the range of  $\pm 3\text{ m}$ . According to the technical characteristics of the three detectors, the engineering suitability of the typical linear heat detectors in cable tunnels early fire detection is analyzed, which can provide technical support for establishing the design specifications of fire alarm.

**Key words:** optical fiber heat sensing; fire experiment; fire detector; cable tunnel; response time; temperature variation

## 1 引言

近几年,火灾探测技术不断进步,新技术层出不穷,特别是以光纤传感技术<sup>[1]</sup>为基础的光纤拉曼火灾探测技术<sup>[2]</sup>和光纤光栅感温火灾探测技术<sup>[3]</sup>。它们以其突出的技术优势,已在很多领域取代了传统的感温电缆,成为主流的火灾探测技术。但是,现有的防火规范<sup>[4-7]</sup>没有随之更新,新技术的工程适用性缺少依据。对于大规模火灾,光纤火灾探测器可借鉴公路隧道防火规范安装在隧道顶部,但是对于电缆架上出现的电缆过热火灾等小规模火灾却没有相应的参考。有些厂家提出将缆式火灾探测器沿电缆表面正弦敷设,但该方法是否有效,这样敷设探测器是否能对火灾做出及时准确的报警则需要探讨和实验验证。由于火灾的产生会影响其周边环境温度场的分布变化;通常情况下,分布式温度传感点的空间分布情况会影响其报警的响应时间,但是过于密集的传感点分布会提高系统成本,故需要找到空间分布和响应时间的最优平衡。另外,对于用空间积分的方法探测拉曼散射信号的光纤拉曼感温火灾探测器,分辨率过高还会增大计算量,延后报警响应时间。所以从原理和机理上分析各种新型的火灾探测技术,并有针对性地制定使用规范十分必要。我国的火灾探测器检验规范多参考欧洲和美国的标 准<sup>[8]</sup>;但是电缆隧道火灾的情况复杂,如电缆过热火灾或其它原因引起的小规模火灾,因此没有现成适用的火灾模拟规范。

线型感温火灾探测器在电缆火灾早期探测上的工程适用性研究,是在消防产业技术飞速进步、新机理的火灾探测类产品不断更新,而电缆隧道火灾报警系统工程设计依据不足的现状下开展的。目前,国内尚未开展过此项研究,在消防行业属于难点问题。本文以电缆隧道为应用环境建立

了实验平台,设定了初起小规模火灾和大规模火灾的实验场景,记录了火灾模拟试验中的温度变化和探测器响应时间,并根据温度场的变化特点和感温电缆、光纤喇曼和光纤光栅 3 种探测器的技术特点,分析了典型线型感温火灾探测器用于早期探测电缆隧道场所火灾的工程适用性,为编写防火规范提供技术支持。

## 2 实验系统平台

实验系统平台如图 1 所示,设置在实体电缆隧道中,两侧有电缆桥架,实验将使用火盘和加热硅碳棒分别模拟大规模火灾和初起小规模火灾。线型感温火灾探测器在电缆隧道顶部正中按直线悬挂方式布置,然后分别接入对应的火灾探测报警控制器。实验选用了 3 种火灾探测器:差/定温感温电缆、分布式光纤拉曼感温探测器和光纤光栅感温探测器。实验平台还设置了环境数据采集模块,用于记录实验中的风速、温/湿度、大气压力和 CO 气体浓度。所有数据要集中到数据采集控制系统平台。

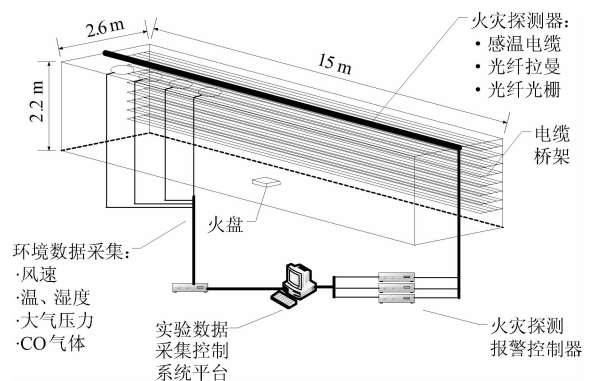


图 1 实验系统平台示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental platform

### 2.1 火灾场景模拟

通过对冶金、电力等工矿企业电缆火灾案例

的统计分析<sup>[4-5]</sup>,电缆火灾按规模可分为:由啮齿类动物咬损电缆,施工或检修中因焊接、气割等动火操作时火花落入地下空洞引燃地下电缆的初起小规模火灾;钢渣滴落到电缆上引燃电缆、钢包水泄漏等生产事故导致高温钢水流入电缆沟、电缆隧道引燃电缆、热钢料头落地、地面油污起火、油浸电气设备故障喷油流入电缆隧道等引起的大规模火灾。电缆小规模火灾模拟装置,即加热用硅碳棒温度的设定,主要依据实际测量导致电缆外表皮融化、燃烧的温度。小规模火灾模拟装置由加热用硅碳棒,大功率 DC24V 开关电源及温控表和 S 铂铑热电偶构成,设定恒定的温度为 800 °C。由于我国现行的产品标准<sup>[6-7]</sup>对线型感温火灾探测器的火灾灵敏度试验尚无相关的规定,而欧洲标准 EN54-22:2007 (E)中规定了线型感温火灾探测器的火灾灵敏度试验采用 TF6S 酒精火(90%的乙醇和 10%的甲醇配置的甲基化酒精)进行,因此,大规模火灾模拟试验参照欧洲标准 EN 54-22:2007 (E)的相关规定,采用 330 mm × 330 mm × 50 mm 规模的酒精火。

## 2.2 感温线型火灾探测器

感温电缆<sup>[9]</sup>分为数字型和模拟型。数字型是一种“开关”型电缆。当温度升高到一定值,电缆内部发生变化,在导体间会产生短路或“热碰撞”,这种“变化”被电气装置检测出来后,作为报警信号;模拟型是一种多根导体芯线绞合的电缆,其中两根导线外皮是负温度系数的高聚化合物,另两根外皮是 PVC 材料。当温度变化时,高聚化合物内会产生不断变化的电阻,通过检测电路来检测电缆阻抗这种随温度变化的特性,作为报警信号。

光纤拉曼温度传感器<sup>[10]</sup>系统是近年来发展起来,用于实时测量空间温度场的系统。该系统中光纤即是传输媒体又是传感媒体,利用光纤背向拉曼散射的温度效应,反斯托克斯光强与斯托克斯光强之比和温度之间的定量关系可表示为:

$$T = \frac{h\Delta f}{k} \left[ \ln\left(\frac{I_s}{I_{As}}\right) + 4 \ln\left(\frac{f_0 + \Delta f}{f_0 - \Delta f}\right)^{-1} \right], \quad (1)$$

式中: $h$ 为普朗克系数; $k$ 为波尔兹曼常数; $I_s$ 为斯托克斯光强度; $I_{As}$ 为反斯托克斯光强度; $f_0$ 为入射光频率; $\Delta f$ 为喇曼光频率增量。斯托克斯光频率为 $f_0 - \Delta f$ ,反斯托克斯光频率为 $f_0 + \Delta f$ 。光纤所处的空间温度场调制了光纤是背向喇曼散射的强度(反斯托克斯背向喇曼散射光的强度),

经波分复用器和光电探测器采集带有温度信息的背向喇曼散射光信号,经信号处理可以解调出实时的温度信息。在时域中,利用光时域反射技术(Optical Time Domain Reflection, OTDR),根据光在光纤中的传输速率和背向拉曼散射光的回波时间,对温度点进行定位。

光纤布拉格光栅传感器<sup>[11]</sup>是国内外刚兴起的新一代传感器。以准分子紫外激光在光纤纤芯中写入具有一定中心波长的光纤布拉格光栅,布拉格波长决定了折射率调制的空间周期 $\Lambda$ 和调制的幅度大小,它们满足模式耦合理论的一级近似相位匹配条件,即:

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda, \quad (2)$$

其中: $\lambda_B$ 为光栅的布拉格波长, $n_{\text{eff}}$ 为光栅的有效折射率(折射率调制幅度的平均效应), $\Lambda$ 为光栅条纹周期(折射率调制的空间周期)。光栅的温度发生变化时,由于热胀冷缩效应,光栅的条纹周期会发生变化;由于热光效应,光栅的有效折射率也会发生变化。所以有:

$$\Delta\lambda_B = 2\left(n_{\text{eff}}\frac{\partial\Lambda}{\partial T} + \Lambda\frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial T}\right)\Delta T. \quad (3)$$

通过一种光纤光栅解调装置对波长移动进行监测,即可知道温度的变化情况。

## 2.3 实验隧道

试验电缆隧道的内部尺寸为:2.6 m × 2.2 m × 15 m(W × H × L)。隧道内设置双侧双排电缆桥架各 8 层,每层桥架长 15 m,宽 0.6 m,层间距为 0.2 m,如图 2 所示。隧道内为自然通风,试验中产生的烟雾通过安装在电缆桥架终端的风机系统收集和排放。参照某工程电缆隧道的实际情况,电缆桥架上铺设了动力电缆和信号电缆。



图2 火灾模拟试验电缆隧道内部图片

Fig. 2 Photo of cable tunnels in fire simulation experiment

通过对冶金企业实体电缆隧道的环境参数采集可知,实际电缆隧道的温度一般为  $20\sim 29\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,湿度一般为  $49\%\sim 85\%$ 。当排风机不启动时,实测风速一般在  $0.1\sim 0.4\text{ m/s}$ 。

### 3 实验结果与分析

探测器布置按照厂家的安装说明或工程应用惯例,将差定温线型感温电缆火灾探测器  $D_1$  (D8000A)、定温线型感温电缆火灾探测器  $D_2$  (1000A)、光纤拉曼感温火灾探测器  $D_3$  (DTS400)、光纤光栅感温火灾探测器  $D_4$  (FBGT112410) 4 种探测器分别采用正弦波(S型)接触方式及直线悬挂方式同时敷设在电缆桥架上的第三、四、五层,同时在第四层桥架布设热电偶,如图 3 所示。另外对于大规模火灾, $D_1\sim D_4$  探测器和热电偶  $C_1\sim C_{16}$  (间隔  $1\text{ m}$ ) 平行直线悬挂在隧道顶部。报警控制器的定温报警温度为  $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,差温报警温升速率为  $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 。

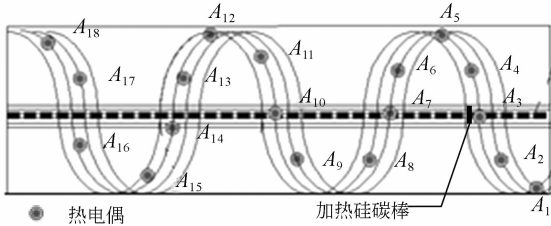


图 3 电缆架上探测器和热电偶布置方案示意图

Fig. 3 Layout of detectors and thermocouples in cable rack

#### 3.1 初起小规模火灾实验

按照初起小规模火灾模拟试验火灾场景的建立要求,将硅碳棒加热到  $800\text{ }^{\circ}\text{C}$  时将硅碳棒放置到第 4 层桥架,总共进行了 2 次模拟试验。其中一次试验中热电偶记录的温度变化情况如图 4 所示,两次试验各探测器的响应报警时间如图 5 所示。实验环境温度为  $14\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、湿度为  $39\%$ 、大气压力为  $101.325\text{ kPa}$ 、风速为  $0.14\text{ m/s}$ ,火灾模拟中 CO 浓度超过  $170\times 10^{-6}$ 。

图 4 中只有靠近硅碳棒位置的  $A_3$  号热电偶的温度变化,而其它位置的温度无明显变化。 $A_3$  热电偶的温度在一分钟内上升超过  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,达到  $120\text{ }^{\circ}\text{C}$  后逐步下降。硅碳棒虽然温度较高,但是由于其尺寸小(加热长度小于  $10\text{ cm}$ )、热量小、没

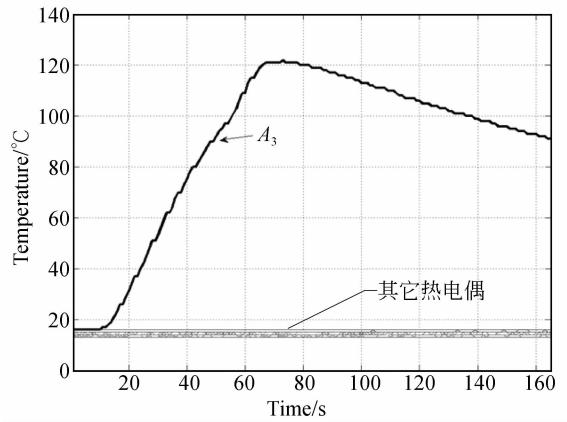


图 4 小规模火灾温度变化曲线图

Fig. 4 Temperature variation of small-scale fire

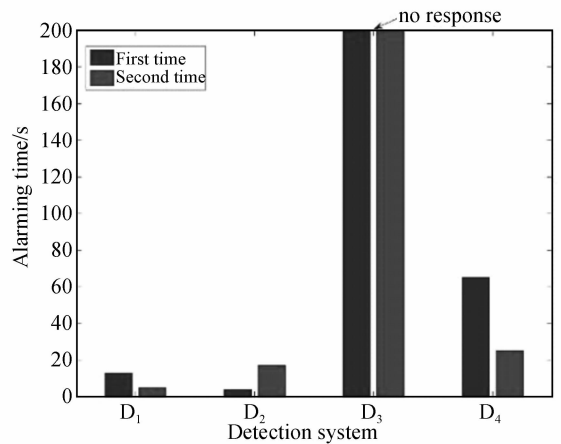


图 5 初起小规模火灾模拟实验探测器响应时间比较图

Fig. 5 Comparison of detector response time at beginning of small-scale fire simulation experiment

有热量的持续供应,其本身的温度会迅速下降,因此影响范围小(距离  $10\text{ cm}$  以外的热电偶温度无变化)。

对于初起无明火的小规模火灾,其热辐射量小,除了与其直接接触的感温火灾探测器能做出报警响应外,其余非接触式的探测器均无法响应。由于感温电缆火灾探测器的最小报警长度要求较短;小规模火灾的火源同感温电缆火灾探测器的直接接触长度虽然较短,但已经满足了最小报警长度的要求,因此,在小规模火灾的火源温度达到报警温度的情况下,探测器会迅速做出报警响应。光纤拉曼感温火灾探测器的探测单元长度要求较长(一般为不大于  $3\text{ m}$ ),即使在小规模火灾的火源直接接触到光纤拉曼感温火灾探测器,火源温

度达到火灾报警条件的情况下,探测器也因接触长度达不到探测单元的要求,而无法做出报警响应。光纤光栅感温火灾探测器在敷设过程中,其探测单元不一定能和初起小规模的火源相接触,在接触不到火源的条件下,探测器报警响应较慢;若探测单元与初起小规模的火源完全接触,并且其温度达到火灾报警条件的情况下,才能正常做出报警响应。

### 3.2 大规模火灾实验

实验按照大规模火灾模拟试验火灾场景的建立要求,将酒精火火源放置于电缆隧道地面中间,共进行了2次模拟试验。其中一次试验热电偶记录的温度变化如图6所示,两次试验各探测器的响应报警时间如图7所示。实验环境温度为15℃、湿度为43%、大气压力为101.325 kPa、风速为0.13 m/s,火灾模拟中CO浓度超过 $110 \times 10^{-6}$ 。

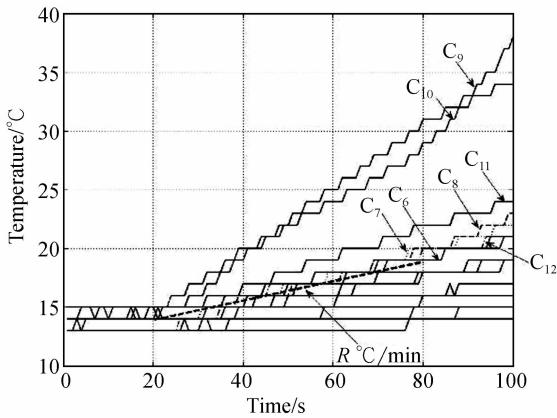


图6 大规模火灾初起温度变化曲线图

Fig. 6 Temperature variation at beginning of massive fire

火灾响应报警时间是衡量火灾报警探测器性能的重要指标,所以研究重点为火灾初期阶段的温度变化。热电偶在开始100 s的温度变化曲线如图6所示,为方便分析,系统记录了酒精火点燃前20 s的初始温度。火灾开始60 s内所有热电偶的测量值都不超过35℃,该温度为电缆隧道日常情况下可能达到的正常值,一般感温火灾探测器设定的定温报警阈值要远高于该值。假设感温火灾探测器的差温报警阈值设置在温升速度为5℃/min处,如图6中粗虚线所示,C<sub>6</sub>~C<sub>12</sub>号热电偶的温度变化曲线均在该阈值虚线的上方。假设感温火灾探测器测量的温度值和热电偶一致,则

分布在C<sub>6</sub>~C<sub>12</sub>——6 m范围内的感温火灾探测器都应该在60 s以内产生报警信号。6 m的间隔值或成为感温火灾探测器设计规范的重要参考值。

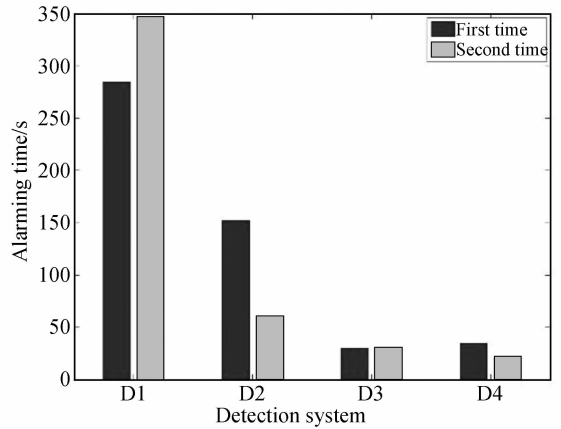


图7 大规模火灾模拟实验探测器响应时间比较图

Fig. 7 Comparison of detector response time in massive fire simulation experiment

大规模火灾的热辐射量较大,位于火源上方的非直接接触方式安装的线型感温火灾探测器仍然能对火灾情况做出报警响应;对于大规模的外部火灾,其着火点附近的环境温度变化迅速,因此,具有差温报警功能的缆式差定温线型感温火灾探测器和分布式光纤感温火灾探测器对火灾的响应迅速,而只有定温报警功能的缆式定温感温火灾探测器的报警响应时间较为滞后。

## 4 结论

动力电缆层上由于内部及外部因素引发的初起小规模火灾的位置具有一定的不确定性,无论采用何种方式安装线型感温火灾探测器均存在探测盲点。由于初起小规模火灾的热释放速率及热辐射规模均较低,只有当起火位置靠近感温电缆火灾探测器及光纤光栅感温火灾探测器的光栅探测单元时报警响应较快,而光纤拉曼感温火灾探测器受最小探测单元长度的限制,对初起小规模火灾不能做出有效的报警响应。对于大规模火灾,光纤拉曼感温火灾探测器和光纤光栅感温火灾探测器的报警反应时间均在30 s左右,而且根据热电偶的记录火灾发生上方60 s以内的温度都在35℃以下,而±3 m内的温升都超过5

°C/min。本文通过开展线型感温火灾探测器应用于电缆隧道场所电缆火灾早期探测的工程适用性研究,得出了不同种类线型感温火灾探测器的

工程适用性,包括评价、确定具体的设计参数及安装应用新技术,为《火灾报警设计规范》相关条款的制修订提供了技术支持。

### 参考文献:

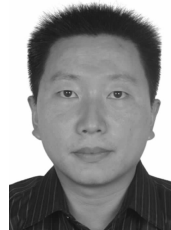
- [1] UDD E, SPILLMAN Jr W B. *Fiber Optic Sensors: an Introduction for Engineers and Scientists* [M]. John Wiley & Sons, Inc., 2011.
- [2] ISHIIA H, KAWAMURAA K, ONOA T, *et al.*. A fire detection system using optical fibres for utility tunnels [J]. *Fire Safety Journal*, 1997, 29(2-3):87-98.
- [3] 朱军, 范典. 光纤光栅隧道火灾探测器的设计研究 [J]. 武汉理工大学学报, 2007, 29(4):107-109. ZHU J, FAN D. Design of fiber bragg grating detector in tunnel fire [J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2007, 29(4):107-109. (in Chinese)
- [4] GB50414-2007 钢铁冶金企业设计防火规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2007. GB50414-2007 code of design on fire protection and prevention for iron & steel metallurgy enterprises [S]. Beijing: China Planning Press, 2007. (in Chinese)
- [5] GB50229-2006 火力发电厂与变电站设计防火规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2007. GB50229-2006 code for design of fire protection for fossil fuel power plants and substations [S]. Beijing: China Planning Press, 2007. (in Chinese)
- [6] GB/T21197-2007 线型光纤感温火灾探测器[S]. 北

- 京: 中国标准出版社, 2007. GB/T21197-2007 line type optical fiber heat detectors [S]. Beijing: Standards Press of China, 2007. (in Chinese)
- [7] GB16280-2005 线型感温火灾探测器[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005. GB16280-2005 line type heat fire detectors [S]. Beijing: Standards Press of China, 2005. (in Chinese)
- [8] EN 54-22:2007 fire detection and fire alarm system-Part 22: line type heat detectors [S]. European Committee of Standardization.
- [9] 张杨, 陈启军. 常用隧道火灾探测器原理、应用及研究动态[J]. 地下空间与工程学报, 2006, 2(2): 311-314. ZHANG Y, CHEN Q J. Principles application and future development of conventional tunnel fire detectors [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2006, 2(2):311-314. (in Chinese)
- [10] ZHANG Z, JIN SH ZH, WANG J F, *et al.*. Recent progress in distributed optical fiber Raman sensors[C]. *Proceedings of 22nd International Conference on Optical Fiber Sensors, Beijing, 2012*:84210L-1-11.
- [11] KASHYAP R. *Fiber Bragg Gratings* [M]. Elsevier Inc., 2010.

### 作者简介:



丁宏军(1965—),男,辽宁沈阳人,博士研究生,研究员,1988年于东南大学获得硕士学位,主要从事消防电子技术及其应用技术的研究和标准化工作。E-mail:dinghongjun@efire.cn



姚浩伟(1978—),男,河南舞阳人,博士,2013年于中山大学获得博士学位,主要从事消防科学与应急管理方面的研究。E-mail:yaohaowei@gmail.com



范典(1979—),女,湖北武汉人,博士,副教授,2009年~2010年赴美访问学习,2011年于武汉理工大学获得博士学位,主要从事光纤传感技术和光信号处理方面的研究。E-mail:fandian@whut.edu.cn