

# Research on the Automatic Fire Detection and Fire Suppression Technique Scheme in the Coal Mine

Yan Gao, Hao Tian, Hao Dou, Mao Feng, Shaofeng Wang, Miaomiao Wei, Panfeng Xu

China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing  
Email: [gaoyan@cumtb.edu.cn](mailto:gaoyan@cumtb.edu.cn), [tianhao921015@163.com](mailto:tianhao921015@163.com)

Received: Jul. 10<sup>th</sup>, 2014; revised: Jul. 24<sup>th</sup>, 2014; accepted: Jul. 29<sup>th</sup>, 2014

Copyright © 2014 by authors and Hans Publishers Inc.  
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).  
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

---

## Abstract

This paper introduced the distributed optical fiber temperature sensor based on Raman scattering for design of automatic fire detection in the underground coal mine. Feasibility and superiority of the distributed optical fiber applied in coal mine was analyzed. Combined with water spray technology, the distributed optical fiber constituted the automatic fire detection and fire extinguishing system in the underground coal mine. In the event of non-electrical fire, it can be used to put out the fire, and be usually used for underground sprinkling service, which maximizes the use of resources.

## Keywords

Coal Mine Fire, Distributed Optical Fiber, Temperature Sensor, Water Spray

---

# 煤矿井下火灾的自动探测与灭火技术方案的研究

高彦, 田昊, 窦昊, 冯懋, 王少峰, 魏苗苗, 徐攀峰

中国矿业大学(北京), 北京  
Email: [gaoyan@cumtb.edu.cn](mailto:gaoyan@cumtb.edu.cn), [tianhao921015@163.com](mailto:tianhao921015@163.com)

收稿日期：2014年7月10日；修回日期：2014年7月24日；录用日期：2014年7月29日

## 摘要

介绍了以基于拉曼散射的分布式光纤温度传感器对煤矿井下火灾进行自动探测的设计，分析了分布式光纤应用于煤矿井下的可行性和优越性，并结合水喷雾技术，共同构成煤矿井下火灾的自动探测及灭火系统。在发生非电气类火灾时，可以用其进行灭火，在平时可以用其对井下进行洒水除尘处理，实现资源的最大化利用。

## 关键词

煤矿火灾，分布式光纤，温度传感，水喷雾

## 1. 引言

近年来，对煤矿火灾发生，发展和防止机理及规律等已经有了更加详细的研究；在井下火灾的预报预测方面，新型的井下采取分站式束管系统，通过监测井下的一氧化碳、乙烯、氧气、温度等综合条件，解算出从发火指标变化到发火危险值的时间。在灭火技术方面，逐步形成了适应普通采煤法和高效高产采煤法的综合防灭火技术。近几年来，在煤矿井下火灾的自动探测的研究上，出现了利用火灾图像的多个参数，并采用先进的人工神经网络技术，进行综合分析判断的方法和利用光纤 Bragg 光栅技术对波长的变化进行监测进而判断火灾是否发生的方法。但是由于我国火灾基础理论研究起步晚，防灭火关键设备和技术有待完善和配套，煤矿的火灾防治仍然是煤矿安全生产中的重要部分。通过利用分布式光纤温度传感器对煤矿井下火灾进行探测，可以更快更准确的判断煤矿井下的状况，及时有效的做出反应。光纤不但具有良好的传光特性，而且其本身就可用来进行信息传递，无需任何中间媒体就能把测量值与光纤内的光特性变化联系起来。光纤作为温度传感器的光纤分布式温度监测系统具备了抗电磁干扰、耐腐蚀、防雷击、耐高温、信号衰减小、集信息传感与传输于一体等特点，具备真正的远距离、分布式测量和监控。在矿井下，通过光纤传输光信号是本质安全的。利用水喷雾技术进行煤矿井下火灾的灭火，不但可以节约资源，还能有效灭火，水喷雾系统通过把水雾化提高了灭火的效率，这种灭火方式用水量少，冷却灭火效果好，水渍损失小等优点，在煤矿的生产过程中，水喷雾灭火系统还可以为巷道洒水除尘，在没有火灾发生时，可以将该系统作为除尘的工具，通过喷出的水雾来降低巷道空气中粉尘的含量，改善井下的作业环境。

## 2. 煤矿井下火灾的自动探测

拉曼散射的分布式光纤温度传感器的工作机理是基于光纤内部光散射的温度特性，利用光时域反射测试技术(OTDR)[1]，将较高功率窄带光脉冲送入光纤，将返回的散射光强随时间的变化探测下来。分布式光纤温度传感器利用光纤为温度信息的传感和传输介质，敷设在温度场中，可以测量光纤沿线的温度分布情况。全分布式光纤传感器是利用一根光纤作为延伸的传感元件，光纤上任意一点既是敏感单元又是其它敏感单元的信息传输通道，可获得被测量沿光纤分布的空间和时间变化的信息，突破了传统的单点测量的模式。

### 2.1. 采用光时域反射(OTDR)对空间分布场的测量[2]

设光纤总长为  $L$ ，在距离光源  $l$  处有一段长为  $dl$  的光纤。能量  $E_0$  在  $\Delta t$  的时间内由光源注入光纤，

在光纤中以速度  $v$  ( $v = c/n$ ,  $c$  为光速,  $n$  为光纤纤芯折射率) 传输, 当传输到  $l \sim l + dl$  段时, 一部分能量  $a \cdot dl$  ( $a$  为损耗系数) 在传输的过程中损耗掉了; 一部分能量  $p \cdot \phi$  ( $p$  为后向散射因子,  $\phi$  为后向散射系数) 以速度  $v$  回到光电探测器处(图 1)。

在  $l \sim l + dl$  段的能量损失为:  $dE_2(l) = -E_0 \cdot \exp(-al)$

积分得:  $E_2(l) = -E_0 \cdot \exp(-al)$

所以  $l \sim l + dl$  段接受的能量为:  $dE_2(2l) = p \cdot \phi \cdot E_0 \cdot \exp(-2al) \cdot dl$

又知道  $t = 2l/v$

故

$$dE(vt)/dt = p \cdot \phi \cdot E_0 \cdot \exp(-avt) \cdot v/2 \cdot dt$$

因此在  $t \sim t + \Delta t$  时间内的平均功率为:  $P(t) = v/2 \cdot p \cdot \phi \cdot E_0 \cdot \exp(-avt)$ , 通过对光功率的测定可以确定时间, 时间不同对应不同的位置, 所以不同位置的光功率可以被检测, 进而可以实现对沿光纤分布的空间分布场的测量。

### 2.2. 斯托克斯拉曼散射光功率

激光进入光纤时, 在其背向会产生拉曼散射。拉曼散射的频谱, 是由位于瑞利散射两旁的、对应的斯托克斯和反斯托克斯谱线组成。反斯托克斯散射光在室温下的温度灵敏度达 0.8%, 而斯托克斯散射光则对温度不敏感。因此, 可以根据斯托克斯曲线来解调反斯托克斯曲线, 获得沿光纤分布的温度值。

在光纤  $z$  处的斯托克斯散射光子数为:

$$N_s = K_s S v_s^4 N_e \exp[-(\alpha_0 + \alpha_s) z] R_s(T)$$

在光纤  $z$  处的反斯托克斯散射光子数为:

$$N_a = K_a S v_a^4 N_e \exp[-(\alpha_0 + \alpha_a) z] R_a(T)$$

其中  $K_s$ 、 $K_a$  分别为与光纤斯托克斯和反斯托克斯散射截面有关的系数。

$S$  为光纤的背向散射因子,  $v_s$ 、 $v_a$  分别为斯托克斯和反斯托克斯散射光子频率;  $R_s(T)$ 、 $R_a(T)$  分别为与光纤分子低能级和高能级上的布局数有关的系数, 它们与光纤局域处的温度有关。

$$R_s(T) = \left[ 1 - \exp\left(\frac{-h \cdot \Delta v}{kT}\right) \right]^{-1}$$

$$R_a(T) = \left[ \exp\left(\frac{-h \cdot \Delta v}{kT}\right) - 1 \right]^{-1}$$

在实际测量时, 可用光纤的斯托克斯散射曲线解调光纤的反斯托克斯散射曲线:

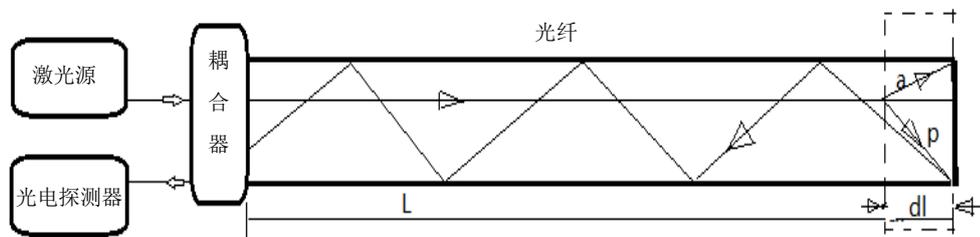


Figure 1. Optical backscattering theory

图 1. 光纤后向散射原理

$$\frac{N_a(T)}{N_s(T)} = \frac{K_a}{K_s} \left[ \frac{v_a}{v_s} \right]^4 \exp\left(\frac{-h\Delta\nu}{kT}\right) \exp[-(\alpha_a - \alpha_s)z]$$

可用  $T = T_0$  的起始温度来确定被测光纤上各点的温度:

$$\frac{N_a(T_0)}{N_s(T_0)} = \frac{K_a}{K_s} \left[ \frac{v_a}{v_s} \right]^4 \exp\left(\frac{-h\Delta\nu}{kT_0}\right) \exp[-(\alpha_a - \alpha_s)z]$$

相除可得:

$$\frac{N_a(T)N_s(T_0)}{N_a(T_0)N_s(T)} = \frac{\exp\left(\frac{-h\Delta\nu}{kT}\right)}{\exp\left(\frac{-h\Delta\nu}{kT_0}\right)}$$

可以得到光纤  $z$  局域处的温度为  $T$  :

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_0} - \frac{k}{h\Delta\nu} \left[ \ln \frac{N_a(T)N_s(T_0)}{N_a(T_0)N_s(T)} \right]$$

$\Delta\nu$  为拉曼声子频率;  $h$  为普朗克常量;  $k$  为玻耳兹曼常量。

上式为典型的用斯托克斯散射 OTDR 曲线解调反斯托克斯散射 OTDR 的被测温度  $T$  的表达式。

在典型的分布式温度测量系统中, 可用波长较短的反斯托克斯谱带获得温度信息, 因为反斯托克斯散射比斯托克斯散射信号具有较高的温度灵敏度。在实际应用中, 利用光脉冲在光纤中传输时产生的与温度相关的背向散射(斯托克斯光和反斯托克斯光)提取温度信息。它将对温度不敏感的斯托克斯光作为参考通道, 采用双通道双波长光强度相比较的方法, 可以消除环境干扰、光纤受力与弯曲、接头的损耗和光源漂移的影响。在测得后向散射光的光强后, 由它们的比值可以推知相应的温度信息, 再通过光时域反射技术(OTDR), 确定温度信息对应的位置, 从而得到沿整条光纤的温度分布。

### 2.3. 光纤测量系统的设计(图 2)

在单片机的控制下发出恒定频率和强度的脉冲光源, 光经耦合器在光纤中传输, 散射回的光经光纤滤波器之后滤出斯托克斯和反斯托克斯光, 斯托克斯光和反斯托克斯光经过光电雪崩二极管转

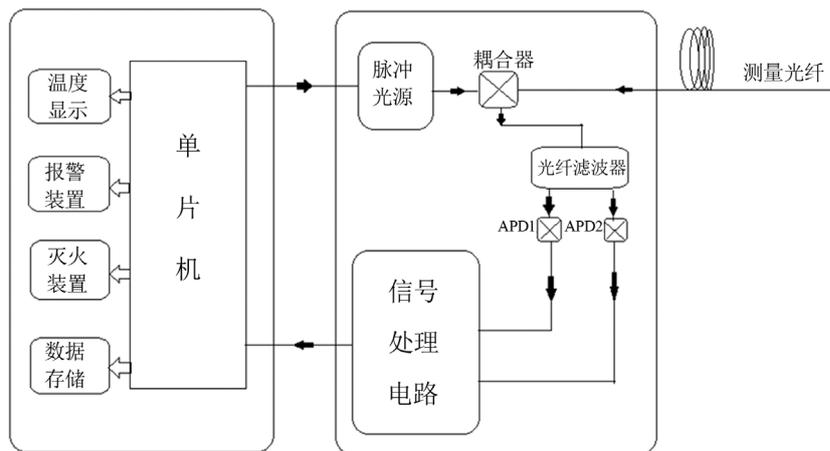


Figure 2. Design of optical fiber measurement system  
图 2. 光纤测量系统的设计

化为电信号再通过信号处理回路后由单片机进行 A/D 采样，单片机根据采到的信号控制外围其他硬件电路。

### 2.3.1. 硬件组成[3]

- 1) 脉冲光源：由带尾纤的高功率脉冲激光光源和驱动电源组成。
- 2) 耦合器：由 1\*3 双向光纤耦合器、波分复用仪和光纤滤波器组成。
- 3) 接收、放大组件：由带尾纤、带前放的雪崩光电二极管(APD)和高增益、高带宽、低噪声的放大器组成。
- 4) 信号处理系统：由双通道高速瞬态(50MHz)信号采集处理卡和处理软件组成。
- 5) 单片机：采用 MSP430 低功耗的单片机进行采样控制。

### 2.3.2. 软件部分

主要包括：数据采集与处理子程序、温度计算子程序、位置计算子程序、液晶显示子程序、温度报警子程序、水喷雾淋水阀控制子程序、数据传输子程序等(图 3)。

## 3. 煤矿井下火灾的灭火装置

### 3.1. 水喷雾灭火技术原理

从水雾喷头喷出的雾状水滴，粒径细小，表面积很大，遇火后迅速汽化，带走大量的热量，使燃烧表面温度迅速降到燃点以下，使燃烧体达到冷却目的[4]；当雾状水喷射到燃烧区遇热汽化后，形成比原体积大 1700 倍的水蒸汽，包围和覆盖在火焰周围，因燃烧体周围的氧浓度降低，使燃烧因缺氧而熄灭；对于不溶于水的可燃液体，雾状水冲击到液体表面并与其混合，形成不燃性的乳状液体层，从而使燃烧中断；对于水溶性液体火灾，由于雾状水能与水溶性液体很好溶合，使可燃性浓度降低，降低燃烧速度而熄灭。

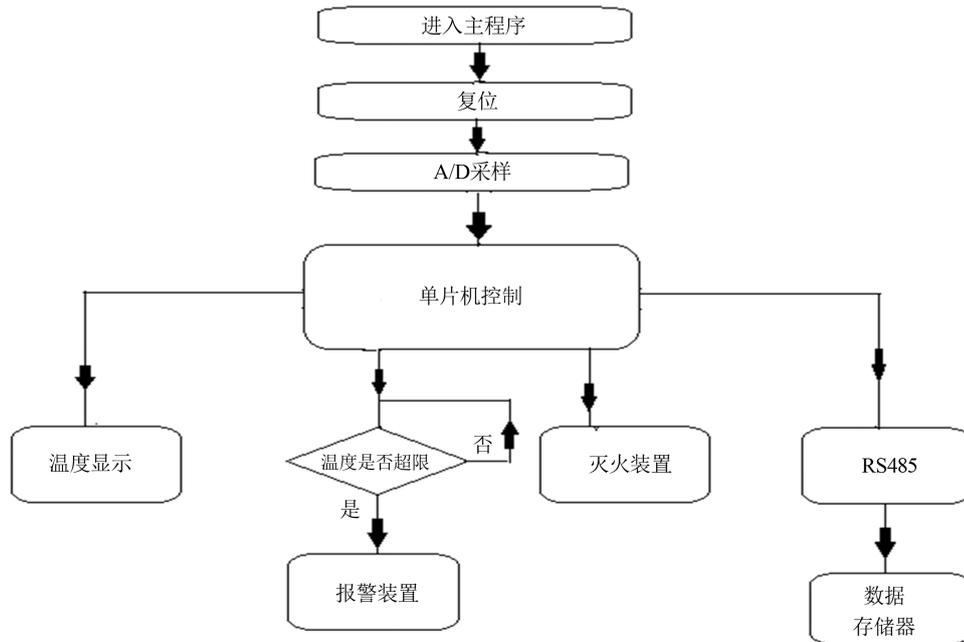


Figure 3. The main component part of software  
图 3. 软件部分的主要组成

### 3.2. 煤矿井下水喷雾系统控制设计(图 4)

控制系统主要包括三部分：自动控制、手动控制和应急控制三种启动方式。自动控制是水喷雾灭火系统的火灾探测、报警部分与供水设备、雨淋阀组等部件自动连锁操作的控制方式。手动方式为远距离操作供水设备、雨淋阀组等系统组件的控制方式。应急方式为现场操纵供水设备、雨淋阀组等组件的控制方式。

### 3.3. 井下喷头的布局以及适应煤矿井下复杂环境的喷头的选择

通过计算喷头的水雾雾化角、有效射程、喷头工作压力和流量等合理布局喷头的分布，根据井下环境需要选择合适的喷头，主要的喷头有：

- 1) 离心雾化型水雾喷头，用于扑救电气火灾。
- 2) 防腐性型水雾喷头，用于腐蚀环境中。
- 3) 有防尘罩的水雾喷头，适用于在有粉尘的场所中设置。

## 4. 实验测量与仿真验证

通过对斯托克斯和反斯托克斯光通道的经过光电雪崩二极管转化后的采样电压进行测量，对比数据模拟建立它们与温度和距离信息的关系曲线。在仿真软件中搭建电路模型对采样后的电压进行信号处理，转化为高分辨率的电压信息传送给单片机。

### 4.1. 斯托克斯与反斯托克斯光通道的采样电压测量

取长的 100 m 的单模单芯光纤一根、一只精读为 0.01℃(温度范围：-50℃~+100℃)的温度计，在水箱中加入一定温度的水，以 1 m 为间隔，将光纤浸入水中，在光纤一段连接 1\*3 的光纤波分复用仪，在光纤波分复用仪①号口射入脉冲光，光纤波分复用仪②号口和光纤波分复用仪③号口分别连接光纤滤波器 I (反斯托克斯光)和光纤滤波器 II (斯托克斯光)，光纤滤波器之后分别接 APD1 和 APD2，然后分别连接到示波器。

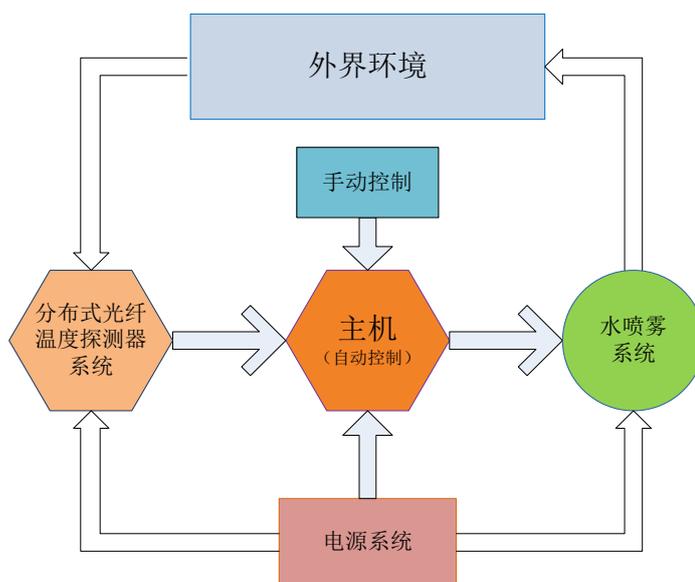


Figure 4. The whole system  
图 4. 整体系统组成

## 4.2. 实验测得部分不同温度下斯托克斯光和反斯托克斯光的采样电压

见表 1。

## 4.3. 下斯托克斯光和反斯托克斯光的采样电压比值与温度和距离的关系曲线图

从测量的数据和折线图(图 6)可以看出斯托克斯光与反斯托克斯光的比值与温度成正相关,随着温度的降低,比值降低。

## 4.4. 仿真软件中搭建电路模型对采样后的电压进行信号处理

搭建信号处理电路对经过雪崩二极管转化后的采样电压值信号,由于斯托克斯和反斯托克斯光是光在光纤中散射会的信号,信号强度弱,经过 APD 转化以后只在 30 mV~60 m 的范围内温度和距离的变化而变化,而单片机采样电压为 0 V~3.5 V,所以必须对其进行放大处理。同时由于在散射回来的光信号中含有无用的干扰量,需要通过对电信号的处理滤除干扰信号(图 7)。

## 5. 结束语

通过分布式光纤温度传感器对煤矿井下火灾进行探测,可以更快捷准确的判断煤矿井下的状况,及时有效的做出反应。而且用光纤传输光信号是本质安全的,光纤沿温度场铺设,可以利用光纤几何上的

**Table 1. The sampling voltage of Stokes light and Stokes light under different temperature**

**表 1. 实验测得部分不同温度下斯托克斯光和反斯托克斯光的采样电压**

	距离(m)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
80℃	通道 1(mV)	41.5	44.1	46.7	41.5	39.2	38.5	37.6	36.9	35.3	34.9
	通道 2(mV)	30.1	30.2	31.5	31.2	29.6	31.4	31.1	30.4	29.6	29.4
	比值	1.379	1.46	1.483	1.33	1.324	1.226	1.209	1.214	1.193	1.187
	距离(m)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
70℃	通道 1(mV)	45.6	47.6	48.8	43.2	41.6	40.8	40.4	40.1	39.1	38.2
	通道 2(mV)	34.5	34.1	33.8	33.1	33.1	33.9	33.7	33.6	33.4	33.6
	比值	1.322	1.396	1.444	1.305	1.257	1.204	1.199	1.193	1.171	1.137
	距离(m)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
60℃	通道 1(mV)	42.4	44.3	45.7	42.9	41.1	40.2	39.6	39.2	38.7	37.6
	通道 2(mV)	34.5	34.1	33.8	34.1	33.9	33.7	34.1	33.8	33.4	33.5
	比值	1.229	1.299	1.352	1.258	1.212	1.193	1.161	1.16	1.159	1.122
	距离(m)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
50℃	通道 1(mV)	41.6	44.4	45.1	42.5	40.7	40.5	38.8	37.8	37.2	37.1
	通道 2(mV)	34.8	34.9	33.9	34.5	34.1	34.7	33.7	33.1	33.1	33.2
	比值	1.195	1.272	1.33	1.232	1.194	1.167	1.151	1.142	1.124	1.117
	距离(m)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
40℃	通道 1(mV)	38.4	39.6	42.5	40.9	39.5	39.1	38.8	38.2	37.5	36.3
	通道 2(mV)	33.6	32.6	33.1	33.3	33.6	33.9	34.3	33.8	33.6	33.1
	比值	1.143	1.215	1.284	1.228	1.176	1.153	1.131	1.13	1.116	1.097

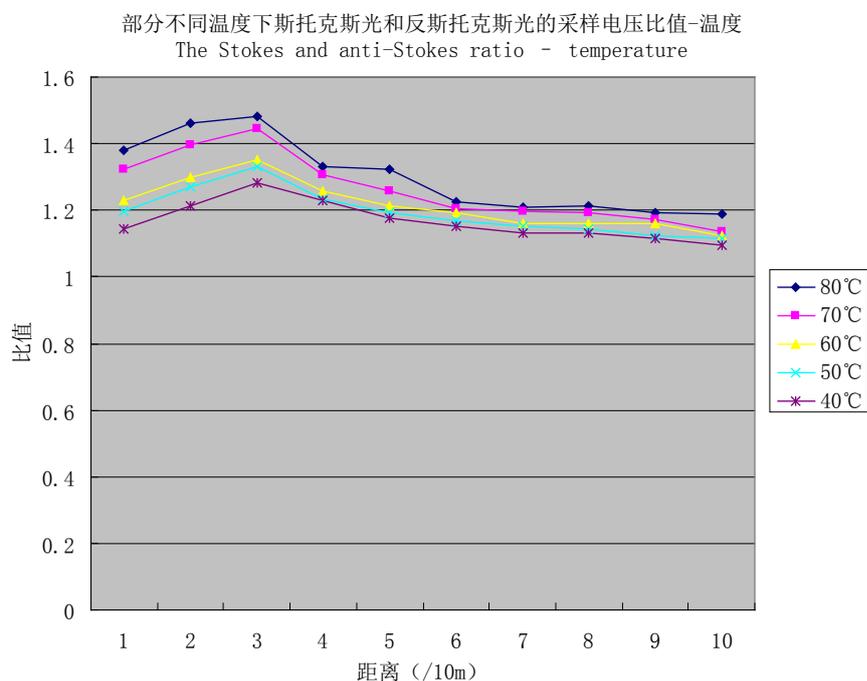


Figure 6. The Stokes and anti-Stokes ratio—temperature

图 6. 斯托克斯光与反斯托克斯光之比——温度



Figure 7. The change of Stokes light and Stokes light voltage signal with the input signal

图 7. 斯托克斯光与反斯托克斯光电电压信号随输入信号的变化

一维特性进行测量。由于光纤不但具有良好的传光特性，而且其本身就可用来进行信息传递，无需任何中间媒体就能把测量值与光纤内的光特性变化联系起来。光纤作为温度传感器的光纤分布式温度监测系统具备了抗电磁干扰、耐腐蚀、防雷击、耐高温、信号衰减小、集信息传感与传输于一体等特点，具备真正的远距离、分布式测量和监控。可以适用于煤矿井下苛刻的环境。

利用水喷雾技术进行煤矿井下火灾的灭火，不但可以节约资源，还能有效灭火，水喷雾系统通过把

水雾化提高了灭火的效率，而且这种灭火方式用水量少，冷却灭火效果好，水渍损失小等优点，在煤矿的生产过程中，水喷雾灭火系统不仅可以作为灭火系统而且还可以作为巷道除尘系统，由于在采煤作业的过程中巷道中有大量粉尘，对在井下作业的工人的身体健康有很大的影响，许多工人由于长时间处于这种环境中而患上尘肺病，所以如果在巷道中安装了水喷雾系统，在没有火灾发生时，可以将该系统作为除尘的工具，通过喷出的水雾来降低巷道空气中粉尘的含量，从而可以改善井下的作业环境。

### 参考文献 (References)

- [1] 汪建科, 何俊发, 王红霞, 等 (2005) 分布式光纤温度传感器的研究现状与发展趋势. *光机电信息*, **7**, 19-24.
- [2] 蔡德所, 衡林, 鲍华, 等 (2013) 分布式光纤温度传感器系统(DTS)和光纤陀螺技术在大坝工程中的应用研究. 广西师范大学出版社, 桂林, 9-10.
- [3] 王剑锋, 张在宣, 徐海峰, 刘红林, 余向东 (2006) 分布式光纤温度传感器新测温原理的研究. *中国计量学院学报*, **1**, 25-28.
- [4] 王弘宇, 方正, 杨开 (2003) 水喷雾自动灭火技术及其进展. *武汉大学工学报*, **2**, 1-4.