

# 仿生气味传感器阵列判识煤矿火灾的实验研究

杨宏民<sup>1</sup>, 罗海珠<sup>2</sup>

(1. 河南理工大学 安全科学与工程学院, 河南 焦作 454001; 2. 煤炭科学研究总院 抚顺分院, 辽宁 沈阳 110016)

**摘 要:** 简要介绍了气味识别技术的国内外发展现状以及气味传感器种类和发展, 研究了传感器阵列对不同气味物质的敏感特性以及对不同气味源物质及其混合比的识别机理, 考察了矿井监测地点本底值随生产状况变化规律及其对气味传感器的影响. 研究表明, 基于人工神经网络系统, 多气味传感器阵列可以识别矿井火灾类型、燃烧物的种类及其混合比.

**关键词:** 仿生; 气味传感器阵列; 气味识别; 火灾预测

**中图分类号:** TD752      **文献标识码:** A

## Experimental research on identification of mine fire by using bionic smell sensors array

YANG Hong-min<sup>1</sup>, LUO Hai-zhu<sup>2</sup>

(1. Institute of Safety Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454001, China; 2. Fushun Branch, China Coal Research Institute, Shenyang 110016, China)

**Abstract:** Introduced the present situation of smell identification technology and gave a brief account of kinds of smell sensors and its development. At the same time, studied sensitivity of the smell sensors array to different odors, identification mechanism of different odor source substance and its mixture ratio. Furthermore, the change laws of background value with work conditions of underground and its influence on smell sensors were studied. The results indicat that the smell sensors array can identify the kinds of mine fire, subjects of burning and its mix ratio based on the ANN.

**Key words:** bionic; smell sensors array; odor identification; prediction mine fire

### 1 国内外研究现状

火灾是威胁煤矿安全生产的重大灾害之一. 煤矿火灾主要分为内因火灾和外因火灾, 以内因火灾为主, 其预测预报普遍使用气体分析法和测温法. 气体分析法是依据煤氧化自燃不同温度段所释放的能表征自然发火状态和趋势的标志气体的浓度、比值、发生速率等特征参数, 来判断和预测预报煤自然发火态势的. 我国从20世纪60年代开始使用气体分析法, 逐步形成了以CO, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>及链烷比、烯烷比等为主的指标体系, 但在长期的实践和应用中也发现一些问题. 首先, 气体分析法预测的起始温度较高, 一般在60~90℃以上, 这一温度已接近或进入加速氧化阶段, 此时如果防灭火措施不力很容易使灾害加重和扩大. 其次, 气体分析法受气体采样方法、手段及风流的影响大, 难以根据标志气体浓度、速率等指标的

微小变化对自然发火的态势作出准确的预测。再次,发生火灾的井下火源物质均能产生CO等气体组分,因此气体分析法不能区分内、外因火灾及燃烧物类型。另外,在我国C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>和C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>气体传感器、便携仪等产品仍未过关,仅能用气相色谱仪分析,因此难以并入矿井监测系统自动检测,这在一定程度上制约了矿井火灾的在线监测、早期预报和智能判识技术。

20世纪90年代,日本九州大学的科学家将一种特制的酯质膜贴在高分子芯片上,开发出灵敏度是人舌10倍的味觉传感器,已在化学、食品和医药检测等方面有广泛的应用。后来又根据相同的原理,依据仿生原理制成了一种结构与人类嗅觉鼻黏膜极为相似的人工合成双层薄膜。从1996年开始,日本、中国进行国际技术合作,引入了人工神经网络分析方法,利用一组7个传感器阵列,检测和识别不同气味及其源物质,逐步开辟了气味法预测预报矿井火灾的新领域。日本的大贺·光太郎等对澳大利亚、南非、印度等不同成煤区的煤样进行了氧化升温过程气味产生特性实验,并进行了橡胶、木头和油的气味实验,取得了突破性成果<sup>[1]</sup>。笔者对全国各煤种煤样进行了气味检测实验,并在气味传感器对煤矿气体单组分敏感性及其规律分析、气味传感器敏感性与煤质、煤温的关系等方面取得了创新性研究成果,为气味传感器在煤矿火灾预测预报中的应用奠定了基础<sup>[2]</sup>。另外,美国、澳大利亚Simtars也使用气味传感器监测井下火灾。

气味识别技术应用最广泛的是食品行业<sup>[3]</sup>,集中在酒类、茶叶、肉类和鱼等食品气味的识别,另外还有空气质量的检测与评定、香水香型的判别等等。如英国的AromaScan公司生产的LabStation电子鼻仪,具有32个传感器的阵列及PCA与Sammon Mapping数据处理和图像识别软件,可以对香烟的质量鉴别进行识别<sup>[4]</sup>。但对于煤炭行业来说,该项技术用于煤矿火灾判识目前仍处于初期研究阶段,距技术实用化仍有很长的距离,特别是在确立井下检测点本底值,排除生产状态变化对气味传感器的影响方面,还需要进行大量、系统的研究工作。

## 2 气味传感器种类及其发展

气味传感器种类较多,其测试原理也不尽相同。从测试原理上分,可以分为导电性传感器、压电类传感器、场效应传感器、光纤传感器等<sup>[5]</sup>。

导电性传感器响应形式体现为与挥发性化合物(VOC)作用引起电阻值的变化,分为金属氧化物传感器和聚合物传感器两大类,其缺点是工作温度高,容易漂移。压电类传感器的响应形式体现为频率的变化,分为石英晶体微量天平(QCM)传感器、声表面波(SAW)传感器和仿生人工双分子膜传感器3种,原理都是晶振上涂敷的活性物质或仿生膜吸附气味物质使其增重,引起振动频率的变化。其缺点是制造技术难度大,价格昂贵。金属氧化硅场效应管传感器(MOSFET)的工作原理是:VOC与催化金属材料相接触所生成的反应产物(如氢)会扩散通过MOSFET的控制极来改变器件的导电特性。优点是可依托IC制造工艺批量生产,质量稳定,缺点是对芯片的密闭封装难度大,同时也存在基准值漂移问题。光纤传感器对气体化合物的响应形式是光谱色彩发生变化,在玻璃纤维的内表面敷有很薄的化学活性材料涂层,与VOC接触时改变了荧光发射光谱。光纤传感器有很强的抗噪能力和极高的灵敏度,其灵敏度达到10<sup>-9</sup>级,这是其它类型气味传感器所远不及的。目前光纤传感器的主要缺点是设备控制系统较复杂,成本较高;荧光染料受白光化作用影响,使用寿命有限。

世界上最早问世的气味传感器是1948年美国科学家怀特和赫凯设计并研制了一种能够捕捉空气中芳香气味的“人造鼻子”,后经过完善并用作“船舶测位器”,能够“捕捉”内燃机排放出的气味,测定出一定距离上的船只方位。随着半导体材料的发展与应用,科学家们先后研制出了半导体嗅敏元件(时称“电子鼻”),它把人的嗅觉能力提高了千百倍。

严格地讲,上述气味传感器并非真正意义上的“气味”传感器,大多数是特殊的“气体”传感器,因为他们对于所谓“气味”的测试只是针对某些有特殊气味的气体,如煤气、燃油尾气等。20世纪90年代问世的以人的嗅觉细胞和嗅觉识别原理研制的人工双分子仿生膜气味传感器才是真正意义上的气味传感

器,它能够确定吸附气味的总量,其结构如图 1 所示.

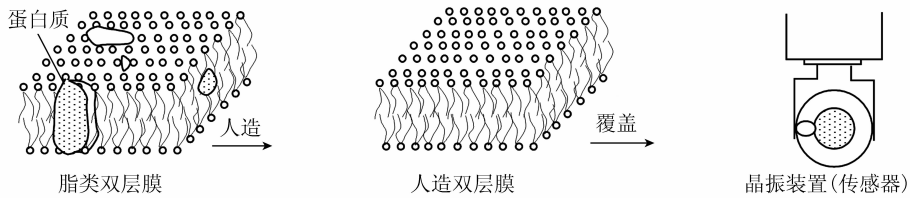


图 1 人造双分子膜压电晶振气味传感器结构原理

Fig. 1 Schematic diagram of synthetic bilayer membrane and a piezoelectric crystal device

### 3 人类、多传感器阵列对气味识别过程的对比

人类对气味的识别是一个极其复杂的过程. 首先气味进入鼻腔,与嗅觉黏膜接触,使上千个不同的气味接受器产生刺激,并经过嗅觉神经传输到大脑,大脑对这些复杂信息进行记忆、学习、校正、对比等,产生对该气味的认识并获得经验,随着经验的不断增多,就具备了识别和判断气味物质的本领. 气味传感器对气味物质的识别与人类识别气味过程有着相似的过程和原理. 它是利用人工神经网络分析能通过对已知样本的学习,掌握输入和输出之间复杂的非线性关系,并能对这种关系进行存储记忆的特点,基于 7 个传感器阵列,对气味物质实现刺激、传输、学习、返回、再学习,最终得出气味物质的正确结论,如图 2 所示.

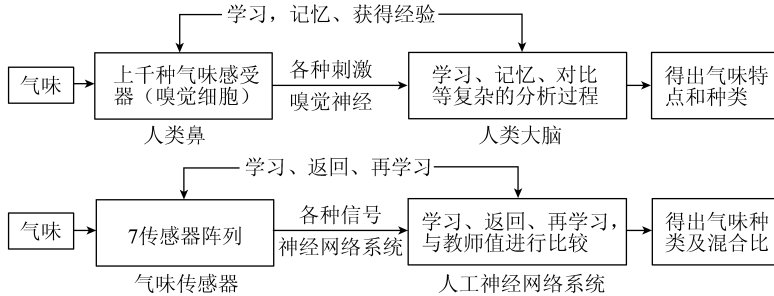


图 2 人类和传感器对气味识别过程对比

Fig. 2 Process contrast of smell identify between sensor and human

### 4 气味传感器阵列对不同气味敏感特性

气味传感器阵列之所以能对不同的气味进行识别,是因为每种气味在阵列中各传感器上的敏感性不同,阵列所表现出来的组合信号特征也就不同. 文中的实验采用了 7 个传感器阵列,其中 5 个为仿生气味传感器,型号分别为 151AJ, 183AK, 353AN, 453AA 和 112AJ, 1 个温度传感器和 1 个湿度传感器. 如果将气味在阵列中各传感器的敏感值绘制于雷达图上,那么雷达图的形状就反映了气味特征.

研究表明,同一物质在不同温度的雷达图相似,这说明同一物质在不同温度段释放气味的特征具有相似性,如图 3 (a) 所示;不同物质的雷达图差异很大,说明不同物质的气味组成差异较大,这正是气味法能够判识火灾类型的基础,如图 3 (b) 所示. 另外,在煤炭、坑木、橡胶和机油升温过程中产生的  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_6$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4$  气体,除  $\text{C}_2\text{H}_4$  有微弱气味外,其余都是人们通常所说的“无臭无味”气体,研究表明,气味传感器对这些“无味”气体也产生了敏感性,并且其雷达图表现出与煤极其相似的特征,如图 3 (c) 所示,这说明煤的气味正是从煤中产生的上述气体气味的综合表现. 由图 3 (d) 可以看出,不同煤种在相同温度下气味在传感器阵列上敏感性雷达图形状基本相同,但大小差异较大,并且其敏感性随煤变质程度的增加而降低,这与煤的自然氧化特性随煤的变质程度增强而减弱的规律是一致的.

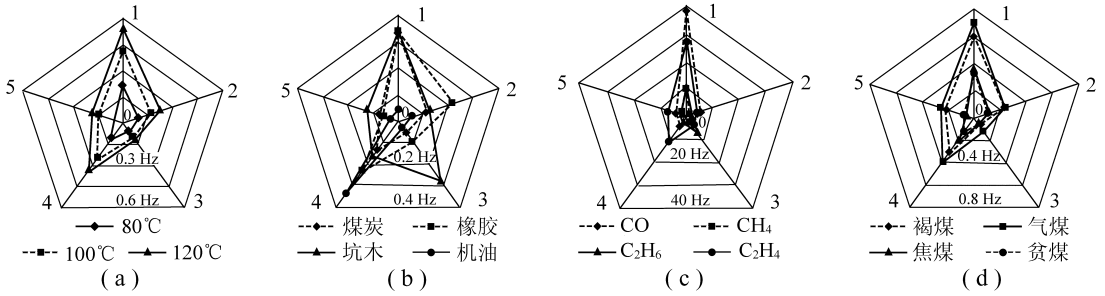


图 3 气味传感器阵列对不同气味的敏感特性

Fig. 3 Sensitivity characteristic of array of smell sensors to different smells

(a) 不同温度; (b) 不同物质 (120 °C); (c) 不同气体 ( $5 \times 10^{-4}$ ); (d) 不同煤种 (110 °C)

数轴 1 ~ 5 分别对应于气味传感器 151AJ, 183AK, 353AN, 453AA 和 112AJ

### 5 传感器阵列对气味源物质及其混合比的识别机理

传感器阵列对气味物质的识别是基于人工神经网络系统而进行的。首先构造如图 4 所示的人工神经网络模型，分别以煤炭、坑木、橡胶和机油气味的特征样本作为教师值置入输出层，以煤在升温过程中某一温度下各传感器的输出值分别作为输入层数据，经过神经网络系统分析，计算隐含层各参量的权重，最终得到输出值与教师值进行比较，符合要求时即得到输出结果，不符合要求时，返回重新学习、计算和分析，最终得出正确的结论。

在对单一物质识别过程中，一般某结果的输出值大于 0.4 就可以判定该物质。对于煤炭单一物质说，当温度接近 50 °C 时，系统对其识别为煤炭气味的输出值大于 0.5，70 °C 后，识别为煤炭的输出值大于 0.9，如图 5 (a) 所示。

因此该方法能够明确地区分煤炭与坑木、橡胶等火灾气味。对于煤炭 20 g、机油 5 g 的混合物来说，温度大于 110 °C 后，对混合物比例识别结果正确的输出值超过 15，而在之前的低温阶段，对混合物比例的识

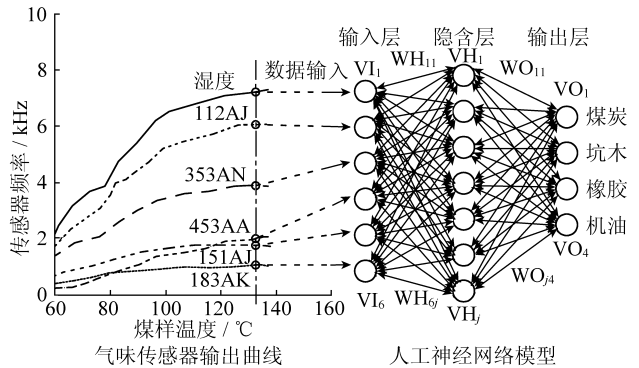


图 4 气味检测结果与人工神经网络识别原理

Fig. 4 Schematic diagram of smell identify by using ANN based on the smell test results

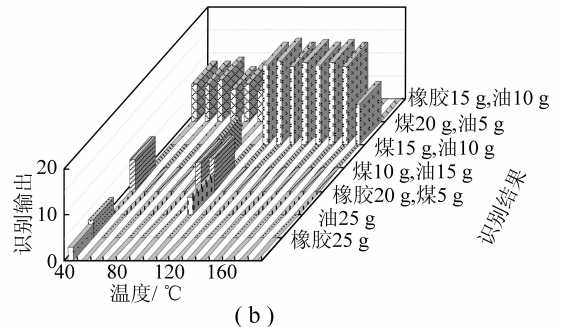
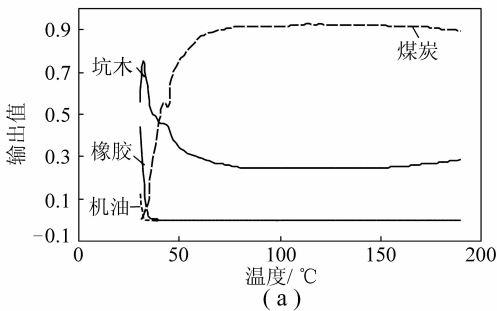


图 5 基于人工神经网络分析系统和多传感器阵列的气味识别结果

Fig. 5 Results of smell identify by array of smell sensors based on ANN

(a) 煤炭试样; (b) 煤 20 g、油 5 g 混合试样

别均不正确,如图5(b)所示.说明只有火灾进行到较高温度的阶段,混合物配比特征才能明确地表现出来.

研究表明,基于人工神经网络分析系统,多气味传感器阵列可以较准确地识别产生气味的源物质种类及其混合物比例,将这一特性应用于煤矿井下,可以识别煤矿火灾的类型(外因或内因火灾)及产生火灾的物质种类,以便快速判断火源地点及发火原因,制定和采取科学有效的防治措施.

## 6 矿井监测地点本底值随生产状况的改变及其对气味传感器的影响

中日进行国际技术合作期间,研制了基于仿生气味阵列的井下探头,并于矿井检测系统联网,在抚顺老虎台矿进行了井下气味监测试验.研究发现,利用仿生气味传感器阵列监测煤矿井下火灾,受矿井检测场所正常生产条件下的本底值变化的影响较大.这一本底值不仅包括正常生产条件下的气体、气味本底值,而且包括由于生产状况改变(如采煤机开停、放煤、落煤,胶带输送机的开停、放炮等)引起检测现场本底值的变化情况.图6是胶带输送机开停对监测场气味本底值的影响关系的考察结果.

气味传感器在煤矿井下实际应用时,要连续监测巷道内的气味变化,通过长期监测,找出监测环境的背景气味变化规律,这样在预测预报井下火灾时,就能排除因生产状况改变引起的气味本底值的变化,作出正确的判断.

## 7 结 语

气味识别技术的优点是能较早地检测煤自然发火初期气味的微弱变化.由于它能借助于人工神经网络分析,能够识别出气味产生的物质种类及其混合比例,区分外因和内因火灾,这对煤矿外因火灾的早期预报有着极其重要的意义,同时也为火灾事故原因分析提供了宝贵的科学依据.

但是,利用气味识别技术预测预报煤矿井下火灾,目前国内外仍处于初期探索研究阶段,其在煤矿的实际应用和普及还有待于进一步研究.

## 参考文献:

- [1] 大贺·光太郎,光增·稔. 气味传感器在矿井火灾早期预测中应用的基础研究[J]. 资源与素材, 1997, 113(9): 683~687.
- [2] 杨宏民,罗海珠,牛广珂,等. 煤自然发火气味检测法预测指标的研究[R]. 抚顺:煤炭科学研究总院抚顺分院, 1999.
- [3] 高大启,吴守一. 人工嗅觉研究进展及其在食品香气评定中的应用展望[J]. 农业机械学报, 1998, 29(4): 167~172.
- [4] 黄骏雄,蒋弘江,阎哲. 应用电子鼻检测香烟质量的研究[J]. 化学通报, 2000, 63(1): 51~44.
- [5] 李兵. 电子鼻传感器[J]. 电子世界, 2000, 245(2): 43~44.

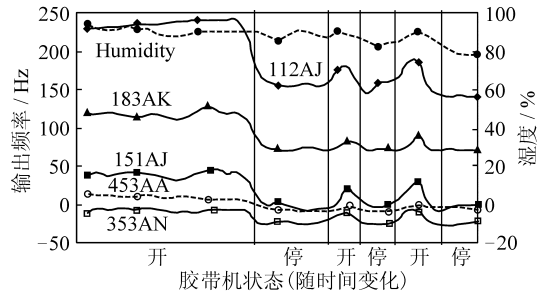


图6 胶带机开停对气味传感器输出值的影响

Fig. 6 The effect of run or stop of belt conveyor on smell sensors