

# 煤堆测温技术研究进展

朱红青,王海燕,王斐然,杨成轶

(中国矿业大学(北京)资源与安全工程学院,北京 100083)

**摘要:**针对地面煤堆随着储存量和储存时间的增加自燃现象日趋严重的问题,采用测温技术防治煤堆自燃已成为必要手段,首先论述了现行直接和间接煤堆测温方法及其原理,然后对常用的简易煤堆测温装置及复合式煤堆测温装置进行了介绍,并对其结构原理、优缺点及应用范围进行了分析比较。结果表明:无线测温和光纤测温技术是目前煤堆测温研究的热点,测温装置的精确化、复合化和自动化是其发展趋势,开发基于新机理的煤堆测温仪器是新的发展方向。

**关键词:**煤堆自燃;测温原理;无线测温;复合式测温装置

中图分类号:TD75

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2014)01-0050-05

## Research Progress on Coal Stockpile Temperature Measuring Technology

ZHU Hong-qing, WANG Hai-yan, WANG Fei-ran, YANG Cheng-yi

(School of Resources and Safety Engineering, China University of Mining and Technology(Beijing), Beijing 100083, China)

**Abstract:** Due to spontaneous combustion of coal stockpile on surface ground had been a serious problem with the stock quantity and stock time increased, a temperature measuring technology applied to prevent and control the spontaneous combustion of coal stockpile became a necessary means. The paper firstly stated the available direct and indirect coal stockpile temperature measuring methods and principle. Then the paper introduced the common simple temperature measuring device and the composite type temperature measuring equipment of coal stockpile, and analyzed the structural principle, advantages and disadvantages, as well as the application scope. The results showed that a wireless temperature measuring and optical fiber temperature measuring technology would be the research focuses of present temperature measuring for coal stockpile, the precision, complex and automation of the temperature measuring system would be the development tendency, the development of coal stockpile temperature measuring instrument based on new mechanism would be a new development orientation.

**Key words:** spontaneous combustion of coal stockpile; principle of temperature measuring; wireless temperature measuring; composite type temperature measuring equipment

## 0 引言

由于煤炭市场供需不平衡,煤矿、电厂等产销、耗煤单位的煤炭积压形成大量煤堆。煤在露天堆放过程中会与空气中的氧气发生反应,放出热量,在煤堆的某些特殊位置,煤氧复合作用放出的热量大于其向外部环境放出的热量,煤的温度就会逐渐升高,最终演化为自燃<sup>[1]</sup>。煤自燃的发生不仅会造成经济损失及资源浪费,还会对周边环境产生污染。煤堆自燃过程的初始阶段升温缓慢,但其温度达到一

定程度后便会快速上升<sup>[2]</sup>,因此必须对煤堆温度实行实时监控,以便在煤自燃发生的初始阶段发现问题,进而采取措施加以解决。目前,煤堆测温方法主要有热电偶和热电阻法<sup>[3-4]</sup>、红外探测法<sup>[5-6]</sup>、指标气体探测法<sup>[7]</sup>以及分布式光纤测温法<sup>[8]</sup>等。有单位应用多种测温方法结合无线传输技术等对煤堆测温装置进行了开发<sup>[9]</sup>,并取得了一定成果,但在测温的全面性、综合性和适用性方面还有一定欠缺,还需进一步研究。因此,笔者论述了现今直接和间接煤堆测温方法及其原理,并对常用煤堆测温装置进

收稿日期:2013-08-25;责任编辑:王晓珍 DOI:10.13199/j.cnki.est.2014.01.013

基金项目:国家自然科学基金(煤炭联合)重点资助项目(U1261214);国家自然科学基金资助项目(51074168)

作者简介:朱红青(1969—),男,湖南双峰人,教授,博士生导师。E-mail:zhq@cumt.edu.cn

引用格式:朱红青,王海燕,王斐然,等.煤堆测温技术研究进展[J].煤炭科学技术,2014,42(1):50-54.

ZHU Hong-qing, WANG Hai-yan, WANG Fei-ran, et al. Research Progress on Coal Stockpile Temperature Measuring Technology[J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(1): 50-54.

行了介绍,对各装置的特点及应用范围进行了分析,最后通过对比分析总结出了目前煤堆测温研究的热点以及未来的发展趋势。

## 1 煤堆测温方法及原理

煤堆自燃的发展过程具有以下2个最显著的特点<sup>[1]</sup>:①放出热量,温度升高。煤自燃是煤氧复合反应放出热量引发的,因此热量的产生和温度的升高是煤自燃过程的基本特征。②产生气体。煤堆自燃过程中会释放出一系列气体产物,不同指标气体开始释出的温度、浓度和变化趋势也不同。因此,煤堆测温分为直接和间接2种方法。

### 1.1 直接测温法

1) 热电偶法测温。热电偶法是利用热电效应进行测温,即将2种不同成分的导体两端接合成回路。在满足精度要求的前提下,一定温度范围内热电势与温度可视为呈线性关系,从而能计算出具体温度<sup>[10-11]</sup>。热电偶可分为标准热电偶和非标准热电偶两大类,常用的热电偶即标准热电偶。根据测温范围和精度的不同选用不同型号的热电偶<sup>[4,12]</sup>。

2) 热电阻法测温。与热电偶法测温原理不同,热电阻法是基于电阻的热效应进行温度测量。因此,只要测量出感温热电阻的阻值变化,就可以测量出温度。目前常用的热电阻主要有金属热电阻和半导体热敏电阻2类<sup>[4]</sup>。相比而言,热敏电阻的温度系数更大,常温下的电阻值更高,但互换性较差,非线性严重,测温范围仅为 $-50\sim 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,一般用于家电和汽车的温度检测和控制。金属热电阻一般适用于 $-200\sim 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度测量,其特点是测量准确、稳定性好、性能可靠,在工程测量方面应用较多<sup>[13]</sup>。

3) 光纤测温法。通过埋入式光纤温度传感器实时测量煤堆内部温度是一种新型煤堆测温方法<sup>[14-15]</sup>,其工作原理是单模光纤沿轴向经过周期性的紫外线干涉条纹照射后,形成布拉格光栅。当宽带光波在光栅中传播时,以布拉格波长为中心的波段反射回入射端,其他的波段则会正常传播。由于不同温度所对应的光纤折射率、周期不同,因此可以利用其内部敏感元件,检测不同光信号中心波长的移动量来判断温度<sup>[8]</sup>,具体如图1所示。

### 1.2 间接测温法

1) 指标气体探测法。在煤的自燃过程中,初期生成的不稳定氧化物先后分解成水、 $\text{CO}_2$ 和 $\text{CO}$ ,放

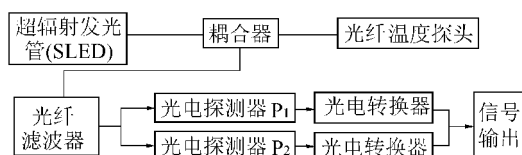


图1 光纤测温工作原理

出热量使煤温升高,超过临界温度,煤温急剧增加,氧化加剧,煤开始出现干馏,生成碳氢化合物、 $\text{H}_2$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{CO}_2$ 等,一般不同气体开始产生的临界温度不同,随着温度变化气体的浓度也会有相应变化,所以根据产生气体的浓度梯度即可大致确定高温区域的温度范围<sup>[7,16]</sup>。

2) 红外线探测法。自然界一切温度高于绝对零度的物体,由于分子的热运动,都在不停地向周围空间辐射包括红外波段在内的电磁波,其辐射能量密度与物体本身的温度关系符合辐射定律<sup>[6]</sup>。利用探测器测定目标本身和背景之间的红外线差,可以得到不同的红外图像,称为热像图,热像仪探测目标物体的热像图,并通过光电转换、信号处理等手段,将目标物体的热像图转化成温度分布图像。

## 2 煤堆测温装置

### 2.1 简易煤堆测温装置

1) 热电偶测温枪。热电偶测温枪的基本结构<sup>[3,17]</sup>如图2所示。其中枪头由感温热电偶原件及高强度不锈钢煤堆测温专用探头组成,头部是针形结构,并且有很强的刚性,插入煤堆内部不弯曲、不折断,能顺利测量煤堆温度。测温探头的常规长度为1.0、1.5、2.0、3.0 m。测温探头的测量端在顶部,煤堆测温枪测得的温度即测温探头插入最深处的温度。由于煤堆自燃临界温度较高,所以感温元件一般采用B型铂热电偶<sup>[12,18]</sup>。



图2 热电偶测温枪的基本构造

热电偶测温枪测温范围广,测温的上限可达 $1\ 800\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,且在温度较高的情况下变化灵敏,接触瞬间即可反映出被测点温度,方便携带,但对材料要求较高。对于 $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下的中、低温度,热电偶输出的热电势很小,准确性较差,并且它属于单点测温方式,测温工程量大、时间长,不能准确定位自燃点。

2) 热电阻测温枪。热电阻测温枪的基本构造与热电偶相同,不过由于煤炭自燃温度、着火温度一般较高,所以一般采用测温范围在 $-200\sim 800\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的铂热电阻。热电阻测温枪对较低温度的灵敏度高,稳定性强,互换性及准确性都比较好,不需要补偿导线,相比热电偶,其成本较低廉。但是一般需要电源激励,不能瞬时测量温度的变化,且这种测温枪同样属于单点测温,效果不理想<sup>[19-20]</sup>。

3) 手持式红外热像仪。手持式红外热像仪利用红外热成像技术来测量煤堆温度<sup>[6]</sup>,其工作原理如图 3 所示。

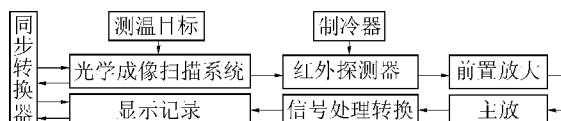


图 3 红外测温工作原理

手持式红外热像仪携带方便,可快速测出煤堆全表面温度,从而分析出煤堆高温点;但是它只能探测出与仪器垂直的物体表面温度,而且要求中间无遮挡物,不能探测煤堆内部温度分布情况。

## 2.2 典型复合式煤堆测温装置

1) 束管监测装置。束管监测是一种通过分析气体组分和浓度实现对煤堆测温的实用技术。该装置首先通过监测到的危险区域指标分析气体变化趋势,进而计算得出高温区域的温度范围<sup>[21]</sup>。束管监测装置主要由束管监测工作站、气体检测器、束管管路以及气体除杂装置等构成<sup>[22-23]</sup>,如图 4 所示。

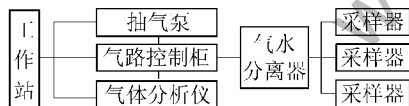


图 4 束管监测装置结构示意图

通过合理布置,束管监测装置能够对煤堆重点区域的气体成分进行采集、分析和判断,为提前干预煤堆自燃提供科学准确的数据支持。由于存在气体流动和扩散现象,束管装置采集数据的范围应尽可能覆盖到一个合理区域,使采集到的数据更加完整、可靠。该装置适用于各类煤堆自燃的预警和预报,采用多点布管的方式对指标气体浓度进行 24 h 实时监测。但束管监测室的气体分析仪到采样点的距离较长,存在滞后性,在整个过程中容易出现堵塞、漏气及气体稀释。气相色谱仪的自动化分析存在一定缺陷,稳定和可靠性有待提高,对所采集的气体条件要求高,且气体只能在煤已经自热或自燃时,才能

检测到,气体产物量较少,并随着风流流动,因此,该预报技术无法确切给出高温区域位置<sup>[24]</sup>。

2) 手提式气体和测温器。该仪器由采集器和分析仪器组成。采集器包括穿透器、玻璃采样容器、抽空和动力供应装置、测温元件等。分析仪器由色谱仪、红外气体分析仪等组成<sup>[25]</sup>。该测温装置综合了直接测温与间接测温 2 种方式,通过直接测温和指标气体分析间接判断测点温度范围,起到了相互校验的作用,能够较准确判断煤堆某一点的温度及其自然发火情况。但由于手持设备较重,并且同样属于单点测温,无法实现对整个煤堆的多点测温。

3) 光纤测温装置。光纤测温装置是采用埋入式光纤温度传感器和单片机,来实现地面煤堆温度实时数据的采集和处理,并通过软件平台进行温度变化显示、数据保存和报警。图 5 为分布式光纤测温装置构成<sup>[14]</sup>。使用时,将光纤埋入煤堆中,从而获得温度;然后,装置通过单片机对温度进行实时处理,再通过通信接口传给控制室的电脑;在控制室中的电脑上温度显示。此外,当温度超过一定值时装置自动报警,它还可以利用多个埋入式光纤温度传感器分别采集多点温度。

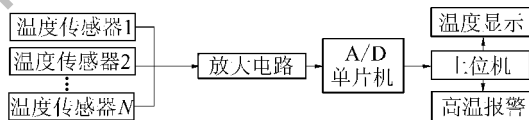


图 5 光纤测温装置构成

光纤测温对环境要求低,灵敏度高、尺寸小、质量小、成本低、测温时间短、现场不供电,测量结果不受信号强度影响,稳定可靠。该装置能够更方便精确地完成实时监测、温度显示、高温报警、适用于大型煤场多个煤堆测温,不需要太多人力,具有自动化特点,能够得出煤堆内部温度分布,测温全面。但是光纤测温存在扫描周期较长等缺点。

4) 无线测温装置。该测温装置一般由热电偶测温装置、无线信号发送接收装置、电脑、报警装置构成<sup>[26-27]</sup>。将多个热电偶温度传感器插入煤堆,把测量温度信号通过射频信号发射到无线接收机,无线接收机通过串口、网口等将数据上传至本地电脑或通过 GPRS 将数据传给网络,当温度达到临界值时可自动报警<sup>[28]</sup>。

无线测温装置采用无线传输,摆脱了传输线的限制,能够全面、自动检测煤堆温度,实现了对煤堆温度的实时监控;但是该装置测温方式单一,且由于



煤的导热系数较低,如果不是在布置探点的位置出现高温,很难在早期发现自燃情况,多探点的布置对装置影响较大,探测范围还会受到无线发射信号强弱的影响。虽然目前该方案已经商业化,但该装置还是普遍存在信号传输的稳定性不够、信号易受干扰等问题,在探测温度的准确性、测温结果显示的直观性及便于后续分析方面仍有待改进。

### 3 不同测温装置比较及其发展趋势

#### 3.1 不同煤堆测温装置比较分析

通过比较各种煤堆测温装置,可以发现测温装置逐渐趋于精确化、复合化和自动化,见表 1。总体来看,现今煤堆测温装置从较传统的单点测温、红外表面测温及气体间接测温等逐步发展为复合式测温装置;综合考虑这些装置和系统的优缺点发现:无线测温 and 光纤测温技术凭借其环境要求低、精确化、自

动化等显著特点将成为目前煤堆测温的研究热点。多种手段相结合判断煤堆温度有助于提高准确性,全天候、全自动的煤堆温度实时监测和高温报警有助于及时发现自燃征兆,从而防止自燃的发生。

#### 3.2 测温装置发展趋势

1) 硬件性能的提升。加强测温元件的研发,测温元件是测温仪器的核心部分,现有元件并不能完美实现煤堆测温,具有测温范围不够等缺点。例如热电偶原件现在大多采用铂铑—铂热电偶,但铂属于我国不出产的稀有金属,成本较高。而新型光纤测温元件的测温范围较小、周期长,不能很好地满足测温需求。现有气体分析仪大多体积庞大、不便移动,从采集样气、送入实验室进行检测、判断温度大致范围需要较长时间,对煤堆自燃阶段判断具有滞后性。此类仪器应该向微型化、快速化发展,加强便携式、高效率气体分析仪的研究很有必要。

表 1 不同煤堆测温装置比较

项目	优点	缺点	方法类型	适用性
热电偶测温枪	测温范围广,温度高时变化灵敏,携带方便	对材料要求高,无法准确定位自燃点	直接测温、单一原理	小型煤堆温度巡检
热电阻测温枪	对中低温度灵敏度高,稳定性强,成本低	无法瞬时测温,无法准确定位自燃点	直接测温、单一原理	小型煤堆温度巡检
手持式红外热像仪	携带方便,测温快速,从图像中判定高温点	只测表面温度,难判断深处温度	间接测温、单一原理	区域性温度初步监测
束管监测装置	监测范围相对较大,比较全面	有滞后性,难判断高温位置	间接测温、单一原理	大型煤堆
手提式气体和测温器	综合测温,测温全面	单点测温,携带不方便	直接和间接测温、复合原理	大型煤堆重点位置监测
光纤测温装置	环境要求低,灵敏度高,成本低,实时监测	测温范围小、周期长,受传输线限制	直接测温、单一原理	大型、多个煤堆测温
无线煤堆测温装置	不受传输线的限制,自动监测	探测范围有时不稳定	直接测温、复合原理	大型煤场实时监控

2) 系统软件平台的革新。一方面,实现复合式测温装置的自动化操控,需要建立完善的、与硬件相匹配的管理软件,减少人力劳动、提高测温范围和精度;另一方面,现今并没有一种测温装置可以得到煤堆不同区域温度的直观图像。因此,应加强软件的研制并与硬件相匹配,通过多点温度的数值监测,应用成像技术显示出煤堆整体形状及其温度分布,并给出以此趋势发展的衍化过程及结果。

3) 多传感器多种方式的信息融合。将不同测温手段进一步结合,如手提式气体和测温器,是将气体、热电偶结合的测温装置,但它仍然属于单点测温,不能对煤堆整体温度进行全面分析。采用多传感器多种测温方式相结合的方法,由于红外测温属于煤堆表面测温,而其他方式皆属于煤堆内部点或区域测温,将红外测温与其他测温方式结合,可对煤

堆由内至外的整体温度进行全面检测。

4) 新测温方法的开发与应用。开发基于新机理的煤堆测温手段,煤堆自燃过程中具有很多特征。随着煤温的升高,不仅会产生气体,还会使煤的电导率增加,煤堆磁性发生变化,煤分子内部结构发生改变等。现有的煤堆测温方式主要有直接测定法与间接测定法 2 大类,对于基于电导率、磁性变化等方式间接判断温度的测温方法应用较少。

### 4 结 论

1) 对于我国的煤堆测温来说,一般采用实时监测和巡检监测 2 种方法,实时监测方法利用有线的束管、光纤测温 and 无线测温装置进行测温,这种方法适用于大型煤堆,巡检监测方法直接利用单点测温设备派专人定时定点进行监测,适用于小型煤堆。

2) 光纤测温 and 基于无线信号传输的无线测温是目前煤堆测温的研究热点。煤堆测温逐步由简易测温装置向复合式测温装置发展,测温装置的精确化、复合化和自动化是其发展方向。

3) 现今的测温方法原理集中在通过金属、光纤元件感温直接测温 and 通过测定煤堆升温释放出的气体判断温度 2 种方法,而对于煤堆升温时其他性质的变化如电导率、磁性、煤结构等是否对煤堆升温有影响还有待研究。因此,今后应开发基于这些新机理的煤堆测温手段。

#### 参考文献:

- [1] 王省身,张国枢.矿井火灾防治[M].徐州:中国矿业大学出版社,1990:10-22.
- [2] 仲晓星,王德明,尹晓丹.基于程序升温的煤自燃临界温度测试方法[J].煤炭学报,2010,35(8):128-131.
- [3] 刘洋,吴双,赵永刚.热电偶温度传感器的研究与发展现状[J].中国仪器仪表,2003(11):1-3.
- [4] 李树刚,魏引尚.安全监测监控技术[M].徐州:中国矿业大学出版社,2008:72-89.
- [5] 吕程.红外测温仪设计分析[J].计算机光盘软件与应用,2012(5):207-210.
- [6] 王忆锋,史衍丽,李夏玲.论红外探测系统作用距离的比较分析[J].红外技术,2012,34(9):515-520.
- [7] 肖畅,王振平,马砺,等.煤自燃指标气体与特征温度的对应关系研究[J].煤炭科学技术,2008,36(6):47-51.
- [8] 傅海威,傅君眉,乔学光.新颖的高灵敏度光纤 Bragg 光栅压强传感器[J].光电子激光,2004,15(8):892-895.
- [9] 蔡可健.煤堆温度多点无线监测系统[J].工矿自动化,2006,32(6):80-83.
- [10] 樊建修.常用热电偶的电势-温度公式及分段线性拟合[J].化工自动化及仪表,1989,16(1):60-64,5.
- [11] 顾洲,鹿世化.基于 DSP 的数字化热电偶温度计设计[J].自动化技术与应用,2004(11):74-75.
- [12] 李菲,简献忠,何玲玲.基于铂电阻和热电偶的测温系统[J].计算机系统应用,2012,21(3):256-259,247.
- [13] 王魁汉.温度测量实用技术[M].北京:机械工业出版社,2006:78-82.
- [14] 陈文科,王志,高艳雯.新型地面煤堆温度监测系统的研制[J].微计算机信息,2007,23(5):111-113.
- [15] CHEN Hua, FU Li-hua. Application of Controlling Temperature Using Fuzzy Control Theory[J]. Journal of Liaoning University, 1995, 22(1):34-38.
- [16] 谭波,王海燕,李政.基于指标气体的煤自燃危险性决策[C]//中国矿业大学(北京)中央高校基本科研业务费项目研究成果学术交流会论文集.北京:煤炭工业出版社,2011:85-94.
- [17] 齐跃,李珩.热电偶温度计远程校准系统设计[J].计量与测试技术,2012,39(2):14-15.
- [18] Zell M, Lyng J G, Morgan D J, et al. Development of Rapid Response Thermocouple Probes for Use in a Batch Ohmic Heating System[J]. Journal of Food Engineering, 2009, 93:344-347.
- [19] SUN Kai. Controlling Temperature System of Resistance Stove[J]. Sensor Technology, 2003, 22(2):50-52.
- [20] 潘圣铭,茆冠华.温度计量[M].北京:中国计量出版社,1991:45-53.
- [21] 袭建才.计算机束管监测系统在矿井煤层自然发火预测预报中的应用[J].工矿自动化,2003,29(6):43-45.
- [22] 葛学玮.ZS30 型煤矿束管监测系统的应用[J].煤矿安全,2012,43(8):100-101.
- [23] 钟国民,王改名,靳文林,等.一种温度控制系统[J].自动化学报,1993,19(2):223-226.
- [24] 房文杰,李长录.煤矿束管监测系统的应用与存在的问题[J].煤矿安全,2012,43(5):58-59.
- [25] 卞文.煤堆用手提式气体和温度监测器的研制[J].煤质技术,1994,9(3):38-40.
- [26] 马恒,尚大俊,周腾.煤堆温度远程监控系统的设计与实现[J].辽宁工程技术大学学报:自然科学版,2009,28(6):888-890.
- [27] 刘笃仁.传感器原理及应用技术[M].西安:西安电子科技大学出版社,2003:25-33.
- [28] Yoav Heichal, Sanjeev Chandra, Evgueni Bordatchev. A Fast-response Thin Film Thermocouple to Measure Rapid Surface Temperature Changes[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2005, 30:153-159.

#### (上接第 39 页)

- [6] 张华兴,郭维嘉.三下采煤新技术[M].徐州:中国矿业大学出版社,2008.
- [7] 惠功领.我国煤矿充填开采技术现状与发展[J].煤炭工程,2010(2):21-23.
- [8] 李纪玉,辛金生,崔松军.下向进路胶结充填采矿技术在焦家金矿的应用[J].中国矿山工程,2005,34(2):28-30.
- [9] 马占国.巷式充填采煤理论与技术[M].徐州:中国矿业大学出版社,2011.
- [10] 国家安全生产监督管理局,国家煤矿安全监督管理局.煤矿防治水规定[K].北京:煤炭工业出版社,2009.
- [11] 国家煤炭工业局.建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规程[M].北京:煤炭工业出版社,2000.
- [12] 黄玉诚,孙恒虎,时召兵,等.似膏体建筑物下采煤可行性探讨[J].煤炭科学技术,2003,31(10):51-53.
- [13] 孙恒虎,黄玉诚,杨宝贵.当代胶结充填技术[M].北京:冶金工业出版社,2002.
- [14] 范立民.生态脆弱区保水采煤研究新进展[J].辽宁工程技术大学学报:自然科学版,2011,30(5):667-671.
- [15] 简焯祥,李云飞,杨永均.煤矿保水开采技术现状及其发展[J].煤田地质与勘探,2012,40(1):47-50.