

煤自燃 倾向性氧化动力学 测试系统及自动控制

Mei Ziran Qingxiangxing Yanghua Donglixue Ceshi Xitong Ji Zidong Kongzhi

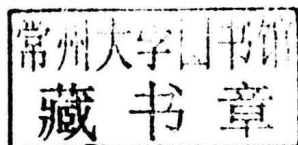
李海港 张 倩 著



中国矿业大学出版社

煤自燃倾向性氧化动力学 测试系统及自动控制

李海港 张 倩 著



中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书主要对煤自燃倾向性的氧化动力学测试系统的关键技术展开研究。首先对不同物理尺寸的煤样反应罐内气体流场的分布特性进行了深入的理论分析,并运用 Fluent 软件研究了煤样反应罐内的耗氧特性。其次,在煤自燃倾向性的氧化动力学测试系统的研制过程中,高分辨率温度测量是整个测试系统的关键点和难点,要想自动精确控制测试炉的温度,必须解决温度测量的高精度的问题,本书的研究内容巧妙地处理了这一问题。最后,本书所研制的测试系统,不仅可以测量交叉点温度和 70℃ 煤样反应罐出口处的耗氧量这两个关键指标,还可以对煤与氧气反应气体产物进行快速分析测试。

本书可供矿业工程、安全工程等相关专业的高等院校、科研院所、企业的师生、研究人员和技术管理干部参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

煤自燃倾向性氧化动力学测试系统及自动控制/李

海港,张倩著. —徐州:中国矿业大学出版社,2014.7

ISBN 978 - 7 - 5646 - 2403 - 3

I. ①煤… II. ①李… ②张… III. ①煤炭自燃—研究 IV. ①TD75

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第155325号

书 名 煤自燃倾向性氧化动力学测试系统及自动控制
著 者 李海港 张 倩
责任编辑 付继娟 张 岩
出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司
(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)
营销热线 (0516)83885307 83884995
出版服务 (0516)83885767 83884920
网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com
印 刷 江苏徐州新华印刷厂
开 本 850×1168 1/32 印张 4 字数 104 千字
版次印次 2014 年 7 月第 1 版 2014 年 7 月第 1 次印刷
定 价 16.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

煤自燃是我国煤炭行业生产中的主要灾害之一。为防治煤自燃,首要工作是对其内在的氧化能力的强弱进行科学的测试,即进行煤自燃倾向性鉴定。煤自燃倾向性是煤炭生产企业进行矿井防火等级划分的重要并且是唯一的依据。《煤矿安全规程》关于井下火灾防治的第 228 条规定:煤的自燃倾向性分为容易自燃、自燃、不易自燃三类。新建矿井的所有煤层的自燃倾向性由地质勘探部门提供煤样和资料,送至国家授权单位作出鉴定,鉴定结果报省级煤矿安全监察机构及省(自治区、直辖市)负责煤炭行业管理的部门备案。生产矿井延深新水平时,必须对所有煤层的自燃倾向性进行鉴定。

《煤自燃倾向性的氧化动力学测定方法》于 2009 年 1 月 1 日作为国家安全生产推荐性行业标准开始实施,至今已为一百多个煤层进行了鉴定,同时开展了该方法与色谱动态吸氧法的对比研究。结果表明,新的测试方法不仅克服了色谱动态吸氧法固有的弊端,也为煤矿安全提供了可靠的数据。反映煤自燃发展的全过程及其内在氧化动力学特性。煤在低温缓慢氧化阶段特性,可通过测试煤样在 70℃ 时的气样出口的氧气消耗量来判定煤样在低温阶段的氧化能力。煤的自燃特性越强,耗氧就越多。该耗氧量不再是煤的表面吸附氧气量,而是煤对氧气的化学吸附和化学反应的耗氧量,因此能代表煤在低温阶段的化学动力学特性。煤在较高温度条件下的氧化特性,可通过测试交叉点温度来判定煤样

在较高温度条件下的氧化能力。煤的自燃特性越强,交叉点温度越低。煤的交叉点温度反映了煤在较高温度条件下的氧化动力学特性。氧化动力学判定指数随着煤的绝热氧化时间的增加而变大,判定指数值越大,绝热氧化时间越长,煤越难自燃。而煤物理吸附氧量则不能反映这种关系,它随煤自燃难度的增长吸氧量有增有减。因此,与 30℃ 物理吸氧量相比,氧化动力学判定指数更能准确地反映煤自燃倾向性的难易程度。

本书结合国家自然科学基金项目“煤自燃倾向性的氧化动力学测定方法与装置”和国家安全生产行业标准《煤自燃倾向性的氧化动力学测定方法》,以煤自燃倾向性的氧化动力学测试的关键技术为主要内容,重点阐述了煤样在反应罐中流场的分布特性、煤样反应罐的几何尺寸与煤样反应罐内氧气浓度的耗散规律,煤样反应罐在测试炉中的相对位置对测试炉炉膛中温度场的影响。在研制煤自燃倾向性的氧化动力学测试系统的过程中,对其中影响仪器精度的各自动化控制系统进行建模并优化相应的控制算法以较好满足该装置的自动化性能需求。通过对煤自燃倾向性的氧化动力学测试关键技术的研究,作者构建了一种与国家行业标准相对应的标准科学仪器测试系统,该测试系统可以对煤的自燃倾向性进行科学、快速、准确的鉴定。通过对煤自燃倾向性的氧化动力学测试关键技术的研究,以及在此研究基础上形成的氧化动力学测试系统,不仅能够对煤的自燃倾向性进行鉴定测试,还将对其他关联的应用提供强有力的技术支持,比如煤样的绝热氧化试验和煤层标志性气体分析测试试验。因此,该测试系统不仅对于矿井防灭火具有很好的指导意义,还对保障矿井安全生产、防治煤自燃灾害等方面具有重要意义。

本书的撰写参考了国内外有关研究成果,他们的丰硕成果和

贡献是本书学术思想的重要源泉,在此对涉及的专家和研究人员表示衷心的感谢。作者得到中国矿业大学安全工程学院王德明教授及所领导的煤自燃研究团队的有益指导,在此一并表示感谢。

煤自燃倾向性测试的相关理论及应用均有大量的问题尚待进一步深入研究。由于作者学识水平和可获得资料的限制,书中尚有不妥之处,敬请同行专家和读者批评指正。

著 者

2014 年 6 月

目 录

1 绪论	1
1.1 研究问题及意义	1
1.2 国内外研究现状及其评价	2
1.3 研究目的与内容	6
1.3.1 研究目的	6
1.3.2 研究内容	6
1.4 技术路线与试验手段	7
1.4.1 技术路线	7
1.4.2 试验手段	8
2 煤自燃特性测定装置中煤样反应罐的优化设计	9
2.1 煤样反应罐内的流场分布特性	9
2.1.1 煤样反应罐的物理模型	9
2.1.2 煤样反应罐模拟工况	9
2.1.3 不同直径煤样反应罐内气体流速的 分布特性	11
2.1.4 不同直径煤样反应罐内气体耗散的 分布特性	11
2.2 煤耗氧特性的数值分析	15
2.3 煤样反应罐摆放位置对炉膛热流场分布的影响	17
2.3.1 物理模型	17
2.3.2 传热与流动控制理论方程	18

2.3.3	模拟计算工况、计算结果及分析	19
2.4	不同煤样反应罐直径对 CPT 的影响	21
2.4.1	温控测试炉	21
2.4.2	实验过程	22
2.4.3	实验结果及分析	23
2.5	本章小结	27
3	煤自燃倾向性测试中的温度测量问题	28
3.1	高精度温度测量方案的选择与优化	29
3.1.1	主要器件的选型	29
3.1.2	嵌入式 CPU 及外设的选择	31
3.2	高精度测温电路的理论计算及关键参数的确定	37
3.3	高精度测温电路整体设计	39
3.3.1	关键电路的设计优化	39
3.3.2	AD 7714 的软件操作	42
3.4	高精度测温电路的精度测试与实验研究分析	43
3.5	温度传感器的非线性校正与补偿方法的研究	47
3.5.1	温度传感器非线性产生的因素分析	47
3.5.2	温度传感器非线性补偿方法研究	49
3.6	本章小结	56
4	煤自燃倾向性氧化动力学测试中的控制问题	57
4.1	温度控制系统的建模研究	57
4.1.1	控制对象的建模	57
4.1.2	温度控制系统的整体建模	63
4.2	温度控制系统中的 PID 控制算法	64
4.2.1	PID 控制的基本概念	64

4.2.2	PID 控制器参数优化过程中需要注意的问题	68
4.2.3	PID 控制器的仿真研究与分析	69
4.3	温度控制系统中的模糊控制算法	77
4.3.1	模糊控制的概论及特点	77
4.3.2	模糊控制设计优化	79
4.3.3	温度控制系统中的模糊控制器优化设计与仿真研究	83
4.4	两种控制算法的对比研究	94
4.5	本章小结	96
5	煤自燃倾向性氧化动力学测试系统整机测试及实验研究	97
5.1	煤自燃倾向性氧化动力学测试系统的组成	97
5.2	煤自燃倾向性氧化动力学测试系统整机性能测试	101
5.2.1	系统主要测试指标的稳定性和可重复性实验	101
5.2.2	氧化动力学测试结果与煤样绝热氧化的对比实验	103
5.2.3	氧化动力学测试结果的现场校验	106
5.3	测试系统对煤层标志气体的测试分析	107
5.4	本章小结	111
	参考文献	112

1 绪论

1.1 研究问题及意义

我国的煤自燃灾害十分严重。据统计,“十一五”期间,全国 657 处重点煤矿中,有煤层自然发火倾向的矿井约占 54.9%,经验发火期在 3 个月以内的矿井占 50%以上,每年由自燃形成的火灾近 400 次,煤自燃氧化形成的火灾隐患近 4 000 次,仅我国北方煤田累计已烧毁煤炭达 42 亿 t 以上,每年直接经济损失高达数十亿元,并由此造成的间接损失,诸如土地资源、大气污染、自然生态环境和人文活动等受到的影响更是难以估计。煤炭自燃还经常诱发瓦斯、煤尘爆炸事故,近年来我国发生的多起瓦斯爆炸灾害中,有相当一部分是由于煤自燃形成火源点而引发瓦斯爆炸的。因此,煤炭自燃灾害的防治研究一直受到人们的重视。许多研究单位和相关的生产企业投入了大量的精力和资金用于开展煤炭自燃火灾预防与治理。

对于煤炭自燃的防治,开展的首要工作是对其内在氧化能力的强弱进行科学的测试,即煤自燃倾向性鉴定。煤自燃倾向性是煤炭生产企业进行矿井防灭火等级划分的重要并且是唯一的依据。《煤矿安全规程》关于井下火灾防治的第 228 条规定:煤的自燃倾向性分为容易自燃、自燃、不易自燃三类。新建矿井的所有煤层的自燃倾向性由地质勘探部门提供煤样和资料,送至国家授权单位作出鉴定,鉴定结果报省级煤矿安全监察机构及省(自治区、

直辖市)负责煤炭行业管理的部门备案。生产矿井延深新水平时,必须对所有煤层的自燃倾向性进行鉴定。开采容易自燃和自燃煤层的矿井,必须采取综合预防煤层自然发火的措施。

本课题结合国家自然科学专项基金项目“煤自燃倾向性的氧化动力学测定方法与装置”和国家安全生产行业标准《煤自燃倾向性的氧化动力学测定方法》,就煤自燃倾向性的氧化动力学测试的关键技术开展研究工作。本书重点研究了煤样在反应罐中流场的分布特性、煤样反应罐的几何尺寸与煤样反应罐内氧气浓度的耗散规律,煤样反应罐在测试炉中的相对位置对测试炉炉膛中温度场的影响。在研制煤自燃倾向性的氧化动力学测试系统的过程中,对其中影响仪器精度的各自动化控制系统进行建模并优化相应的控制算法以较好满足该装置的自动化性能需求。通过对煤自燃倾向性的氧化动力学测试关键技术的研究,作者构建了一种与国家行业标准相对应的标准科学仪器测试系统,该测试系统可以对煤的自燃倾向性进行科学、快速、准确的鉴定。通过对煤自燃倾向性的氧化动力学测试关键技术的研究,以及在此研究基础上形成的氧化动力学测试系统,不仅能够对煤的自燃倾向性进行鉴定测试,还将为其他关联的应用提供强有力的技术支持,比如煤样的绝热氧化试验和煤层标志性气体分析测试试验。因此,该测试系统不仅对于矿井防灭火具有很好的指导意义,还对保障矿井安全生产、防治煤自燃灾害等方面具有重要意义。

1.2 国内外研究现状及其评价

我国煤自燃倾向性的测试研究起步于 20 世纪 50 年代,开始的时候借鉴了苏联的研究经验和成果,主要采用了马切雅什法双氧水法(即双氧水法)、着火点降低值测定法。马切雅什法根据煤样经双氧水(过氧化氢 H_2O_2)处理时的升温速度和产生的热量作

为煤自燃倾向性的分类指标,该方法的主要缺陷是在测试过程中放出的热不仅依赖于煤样的氧化特性,而且依赖 H_2O_2 分解而产生的热量,对含硫量较高的煤样其测试指标偏高。着火点降低值测定法是将粒度在 0.15 mm 以下的三种煤样配置成原煤样、还原煤样和氧化煤样,通过测试三种煤样的着火温度并计算还原煤样与氧化煤样的着火温度差值作为煤炭自燃倾向性的鉴定主指标,这种方法与煤的着火温度及煤的化学性质有一定的关系,既考虑了 ΔT 值,又考虑了煤的化学成分,特别是煤的挥发分。但此法存在一些缺点:使用的联苯胺等化学试剂对人体有危害;仪器装置和测量系统落后、自动化水平非常低。在 20 世纪 90 年代,我国开始推广采用色谱动态吸氧法。该方法是把分析化学中的色谱分析相关技术引入煤自燃测试领域。它的技术思想是把色谱仪中分离气体的色谱柱换成装有 1 克煤样的试管,测定煤样在 30 °C 和一个标准大气压下对氧气的物理吸附量,并以此作为划分煤自燃倾向性的依据。这种方法具有操作简单、测试周期短等优点。但是在伴有煤氧化学吸附和反应时,氧吸附量难以计算,且煤的吸附性能还受到其他因素的影响,例如:煤岩组分、煤样水分含量、煤的孔隙结构等。

上述煤自燃倾向性测试方法仅反映了煤氧的反应速度和反应量,而没有客观反映出煤随温度变化的动态过程,因此无法真实反映煤在实际开采条件下的自燃倾向性。各国在模拟煤的自燃氧化过程方面都做了大量的工作和很多有益的尝试。20 世纪 80 年代末,西安矿业学院建立了大型煤自然发火实验研究平台,最大装煤量可达 1.5 t。这种实验平台采用水层保温方式,确保在氧化过程中煤产生的热量尽可能不散失的情况下模拟煤的真实自燃过程。据相关文献介绍,使用这种实验平台装煤 1 吨,从 24 °C 升温到 120 °C,实验耗时约 36 天。澳大利亚矿业安全研究与测试中心采用 15 吨的煤量进行煤自燃试验,煤样从 40 °C 升温到 200 °C,实验

耗时约 172 天。根据这些大型试验平台的实验结果分析,这种方法可以比较真实地预测实际开采条件下煤炭自燃的危险程度。但是这种方法的缺点也是非常明显的。实验模拟工作量大、用煤量大、周期长、成本高,难以进行重复性实验。针对这些缺点与不足,各国的煤自燃研究学者又在小型煤自燃测试装置方面展开了一系列研究。小型实验炉法主要原理是绝热氧化法。绝热氧化法就是将煤样放入绝热反应罐中,通过采用一定的技术手段让环境温度跟踪绝热反应罐中的煤样温度。通过双方温度的平衡来抑制双方的热交换,从而达到相对绝热条件,以便测试煤样在绝热条件下的煤氧反应的过程参数。这种测试装备通过测试煤样从常温开始的自热升温过程,能比较客观地表征煤的自燃氧化行为。

在国内,抚顺煤炭科学研究院引进日本相关的小型煤样测试设备 SIT,该设备采用 1 g 煤样,煤样粒度筛选为 100 目,在通入 1 mL/min 流量干空气的条件下,通过电加热补偿周围环境的温度,使煤样氧化过程的热量不向外散失,形成相对绝热氧化条件。该测试设备能够较好地反映煤的自燃倾向性,但是也有不足之处。主要不足之处是煤样量为 1 g,煤量太少,热量极容易散失,并且容易造成测量误差,同时这也给相关设备的精确控制提出了更高的要求。

近年来,国外对煤的氧化自燃过程及其机理的研究主要是从热物理角度对煤的自燃倾向性进行研究,同时对煤在氧化自燃过程中的内部与外部影响因素以及伴生的物理化学现象进行了一定程度的研究。在煤炭自燃倾向性的测定方面,澳大利亚、新西兰、英国等国家的相关学者主要采用测定绝热温升速率和交叉点温度的方法研究煤自燃倾向性及其自燃机理,并形成相应的测试系统;波兰则建立了基于煤的活化能和升温速率的煤自燃倾向性测定方法和评价指标。世界主要采煤国家采用的煤自燃倾向性测试方法大都是在模拟煤炭自然发火的基础上,测试煤的氧化升温过程中的某些特征参数作为鉴定的标准,比如:煤的自热升温速率

($R70$)、热释放速率(HR)、交叉点温度(CPT)、最低自热温度(SHT)以及活化能(E)等。这些测试方法主要是采用小型氧化实验炉法。所谓小型氧化实验炉法就是将一定量煤样置于测试炉膛的煤样反应罐中,通过煤自然或按一定速率线性升温的方式,根据计算机系统自动采集并记录煤与氧气反应的温度变化过程来反映煤样的自燃氧化能力强弱。

通过上述分析可知,按照试验用煤量的大小,煤自燃倾向性测试炉可分为大型测试炉和小型测试炉两种。大型测试炉用煤量从几百千克到十几吨,用煤量大,煤的氧化产热量多且易聚集,从而能够使煤在较低的温度下达到自燃临界温度,但它耗时、耗财、耗力,而且干扰因素较多。大型测试炉耗时长且较难实现重复性测试,难以成为常规测试手段和方法,从而只能作为小型测试炉法测试结果的佐证。小型测试炉法具有测试快捷、重复性好、耗煤量少等优点,是煤炭自燃倾向性测定的一种广为接受的方法,但小型低温氧化测试需要测试炉膛工况的精确控制技术。目前,澳大利亚、新西兰、美国、英国的有关学者在小型低温氧化测试炉的研究方面取得了一定进展,但是国内在小型煤低温氧化实验测试炉的研制方面还缺少成功经验,难以较好地模拟煤的自然升温过程。就目前来看,国内在小型煤样测试装备方面,还有很多工作要做。本书的一些研究工作也是从这方面展开的。

在综合分析现有国内外煤自燃倾向性测试方法及技术的基础上,作者所在科研团队提出一种基于氧化动力学的煤自燃倾向性的测试方法,该方法将煤自燃过程分为低温和高温两个阶段,在测试程序升温条件将煤样达到 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度时的反应罐出气口的氧气浓度与煤样达到交叉点温度时的温度值进行计算,从而得出煤自燃倾向性的综合判定指数,煤的自燃倾向性的等级划分便在此基础上进行。该测试方法综合体现了煤自燃过程的动态反应过程,其操作简单、测试科学、重复性好。

1.3 研究目的与内容

1.3.1 研究目的

作者在导师的指导下,基于煤自燃倾向性的氧化动力学理论和相关的国家安全行业标准,通过理论分析与试验研究相结合的方法,就煤自燃倾向性的氧化动力学测试关键技术展开研究。通过对其关键技术的研究,形成一套标准化的、具有自主知识产权的专用科学仪器,即煤自燃倾向性的氧化动力学测试系统。

1.3.2 研究内容

以煤自燃倾向性的氧化动力学理论和相关的国家安全行业标准为基础,研究并开发出具有自主知识产权的专用科学仪器,即煤自燃倾向性的氧化动力学测试系统。该系统可实现对煤自然升温或程序线性升温,并对煤反应过程中的温度与反应产物中气体成分及浓度快速分析测试,进而构建一种既能综合反映煤自燃全过程又操作简单方便的煤自燃倾向性的氧化动力学测定装置,建立从煤样的制备、相关测试试验以及试验数据处理的氧化动力学的煤自燃倾向性测试标准化仪器系统。具体内容如下:

利用 CFD 软件模拟不同煤样罐尺寸下其内部气体流场分布的特性,并在实验室试验的基础上优化确定煤样罐的最佳尺寸;研究煤样罐在测试炉内摆放位置对炉膛工作区域瞬态温度场分布的特性。

通过实验研究煤样反应罐在测试炉膛内摆放位置对交叉点温度测试结果的影响,确定煤样反应罐的最佳摆放方式。

测试系统的关键部分,是高精度($<0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$)、大量程($0\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 400\text{ }^{\circ}\text{C}$),温度控制系统的采集电路测试研究,并对高精度测温电

路进行优化设计。首先对温度测量过程中的非线性误差进行分析,然后对温度传感器进行非线性补偿,从而达到比较高的测试精度。

对测试炉这个被控对象进行数学建模,以得到比较精确的数学模型,再对整个温控系统进行建模。在此基础上,作者选择合适的控制器算法,并优化控制器相关参数,以达到测试系统对自动控制部分的温度控制等指标需求。

采用制备的煤自燃倾向性的氧化动力学测试装置对不同种类的煤样进行测试实验,并且针对每一种煤样,进行多次重复测试实验,从而验证该测试系统的交叉点温度和耗氧浓度这两个重要指标。另外,通过和煤的绝热氧化实验进行对比研究,期望得到氧化动力学测试得到的判定指数与绝热氧化时间之间的数据关系,找出它们的相关性,最后再和煤矿现场的经验发火期进行统计对比研究。

1.4 技术路线与试验手段

1.4.1 技术路线

以煤自燃氧化动力学理论为基础,参照相关的行业标准《煤自燃倾向性的氧化动力学测定方法》,作者经过科学的理论运算与综合分析,先使用 CFD 软件模拟不同煤样罐尺寸的流场分布特性,通过对比优化分析,确定最优的煤样罐尺寸,并研究煤样罐在测试炉中不同的摆放位置对其内部瞬间流场的影响;再从实验角度分析不同尺寸的煤样罐对交叉点温度(CPT)和耗氧特性分析的影响;最终确定煤样罐的一些机械参数和位置参数,以此作为仪器样机设计的重要参考依据。整个测试系统中,仪器的各控制系统是影响测试系统整机性能指标优良的关键因素。在整个测试系统

中,共有八路温度控制子系统。通过对温度测量方案的比较,选择合适的技术方案来达到分辨率 $<0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的高精度需求,在 MATLAB 软件中对测试炉等被控对象进行建模,对控制算法进行仿真,并根据仿真的效果对相应的控制算法进行改进优化,使得达到最优的控制效果。在前面的基础上,构建测试系统的硬件平台和控制软件,并逐一进行调试,确保各控制效果最优。在测试系统的各方面工作完成后,对该测试系统进行整体测试,验证系统本身的稳定性和可重复性。

1.4.2 试验手段

(1) 运用密度法测试煤样反应罐内多孔煤岩充填介质的孔隙率。

(2) 利用 CFD 软件分析了不同尺寸的煤样反应罐中的气体流速分布特性和耗散分布特性,在此基础上对比优选出合适尺寸的煤样反应罐,并优化煤样反应罐在测试炉膛内摆放的相对位置对炉膛工作区域瞬态温度场的分布特性。

(3) 通过温度测量方案的对比研究,使用 QJ48 型高精密电阻箱测试并校正作者研制的超高精度的温度采集系统。

(4) 对测试系统中的被控对象进行数学建模,然后再对整个控制系统进行建模分析,并在 MATLAB 软件中进行测试炉的温度控制系统的建模,并针对待用的几种控制算法进行改进优化研究。

(5) 在(3)、(4)步的基础上,构建测试系统的底层硬件平台、底层的控制程序和上位机测试软件,并对各种控制指标进行测试,确保达到煤自燃倾向性测试所需的技术要求。

(6) 采用自行研发的煤自燃倾向性的氧化动力学测试装置对不同种煤样进行煤的自燃倾向性鉴定,通过与现场情况的对比,验证其性能的稳定性和可靠性以及可重复性。