

DIANCHANG RANMEI SUNHAO CEPING JISHU

电厂燃煤损耗 测评技术

林木松 马晓茜 陈天生 等 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

DIANCHANG RANMEI SUNHAO CEPING JISHU

电厂燃煤损耗 测评技术

林木松 马晓茜 陈天生 余绍胜 编著
林建峰 吴新远 孔文勇 叶流芳



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书针对大型电站的燃煤损失工程问题,以煤的扬尘、雨水冲刷和低温氧化动力学理论为基础,应用现代测试与分析技术,全面开展煤的扬尘、雨水冲刷和低温氧化的研究,揭示煤堆的扬尘、雨水冲刷和低温氧化的动态过程和演变规律。在此基础上,构建了煤堆扬尘、雨水冲刷和低温氧化的数学模型。基于该书的理论开展了大型煤堆扬尘、雨水冲刷和低温氧化的工程试验,研制了新型抑尘防冲刷有机覆盖剂,研究了电厂燃煤损耗综合测评方法及应用,实现了理论与工程应用的有机结合,为大型电站燃煤损耗的高效防治提供了新的技术。

本书可作为安全工程、煤场运行管理等相关专业的高等院校、科研院所的师生、研究人员及企业的技术管理人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

电厂燃煤损耗测评技术/林木松等编著. —北京:中国电力出版社, 2016. 10

ISBN 978-7-5123-9587-9

I. ①电… II. ①林… III. ①燃煤发电厂-能量消耗-研究
IV. ①TM621

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 171943 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2016 年 10 月第一版 2016 年 10 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 9.25 印张 231 千字

定价 35.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

前言

随着中国经济的发展,对能源的要求将快速增长,特别是与煤炭直接相关的电力行业的发展仍将持续较高的增长,导致煤炭需求量进一步增加。现有大型电站的燃煤库存天数一般为15~25天,大量的煤在堆放过程中发生扬尘、雨水冲刷和低温氧化,不仅浪费大量的燃煤,同时也会污染煤场周围的环境、地下水系和土壤,严重的甚至发生自燃,危及电厂安全运行。因此,研究大型电站燃煤损耗以及研发防治燃煤损耗新技术,从而解决燃煤损耗、环境污染问题,实现节能、环保的目标,对我国煤炭资源充分利用具有巨大的经济利益和社会效益,意义深远,可有效推进了电力行业节能、环保技术的发展。

燃煤在储存、卸载和转运过程中存在巨大的损耗和环境污染。以燃煤储存损耗为例,由于我国大部分电厂使用露天煤场,储煤存在严重的风损雨损问题,每年仅广东省内电力燃煤此项损失就高达40多亿元。此外,被风带入大气的煤尘不仅是大气灰霾的重要来源,还会通过降雨产生煤污水污染周边水土。

燃煤在储存过程中由于自然风的扬尘和雨水的冲刷引起燃煤质量的减少,以及低温氧化过程引起燃煤热值的损失,从而导致了燃煤的巨大损耗和环境污染。燃煤储存时的损耗主要是由风雨的冲刷和空气氧化造成,直接损耗达到储煤总量的3%左右,降雨还使存煤的热值大幅下降,存煤水分提高1%,煤耗提高约1%。除此之外还造成严重的环境危害:风吹产生的煤尘是大气灰霾的来源;降雨产生煤污水污染周边水土,特别是煤中有害元素通过雨水排放对人体器官有严重危害性;煤炭氧化产生的CO、SO₂排放到大气容易产生空气污染。

此外,由于燃煤在燃烧前的热值损耗,使得燃料偏离了锅炉燃烧的设计工况,从而导致了燃烧不完全和煤耗增大。若能对入炉前的燃煤进行热值损耗的测算,然后及时改变锅炉燃烧参数,即能达到节能降耗的效果。因此,有必要深入研究探索防治扬尘和雨水冲刷的技术、研制专用的喷洒装置,在实际应用的基础上提出燃煤风损、雨损损耗的评价方法,从而解决燃煤损耗、环境污染问题,实现节能、环保的目标,具有巨大的经济利益和社会效益,意义深远,有效推进了电力行业节能、环保技术的发展。

而且,燃煤电厂在煤场储存过程中,煤与空气接触后,煤中的有机成分和一些矿物质与空气中的氧气发生反应,使煤中的可燃组分减少,煤经氧化后易于破碎,表面积增加,使氧化加快。低温氧化虽然氧化程度不深,但却使煤的性质发生较大的变化,如使煤的发热量显著减少、黏结性下降甚至消失、机械强度降低等,对煤的工艺应用有较大的不利影响。为了减少煤因低温氧化造成的损失,通过研究烟煤在低温氧化过程中的变化特点,从而构建低温氧化机理模型,确定低温氧化与煤炭热值损耗的影响规律,进而指导煤仓堆煤过程,减缓堆煤过程中的热值损耗具有重要的意义。

该书在总结前人研究的基础上，基于该书的理论开展了大型煤堆扬尘、雨水冲刷和低温氧化的工程试验，研制了新型抑尘防冲刷有机覆盖剂，研究了电厂燃煤损耗综合测评方法及应用，实现了理论与工程应用的有机结合，为大型电站燃煤损耗的高效防治提供了新的技术，在工程实际中解决了大型煤堆损耗及综合测评的问题，这正是本书最为宝贵之处。

全书知识结构合理，内容新颖，工程应用价值较大。本书依托南方电网有限责任公司研究项目“发电企业燃料管理节能减排新技术研究及应用”（编号：K-GD2014-0575）对新型大型电站燃煤损耗综合测评技术以及煤堆表面隔水覆盖剂研究和应用的基础上进行撰写的，对指导我国大型电站燃煤损耗防治工作具有重要的现实意义和工程价值。

作者在开展项目研究和撰写本书过程中得到了许多人的帮助，在此首先要特别感谢华南理工大学电力学院廖艳芬、李双双、方诗雯、郭振戈、胡善超、曹亚文、张灿、武万强、姚忠良、王国旭、范云龙参与部分研究工作及对本书的支持和努力！

由于作者水平所限，书中的某些内容与观点还有待进一步研究和完善，不足之处在所难免，敬请各位读者批评指正！

编著者

2016年5月

目 录

前言

1	燃煤电站损耗测评基本概念	1
1.1	电厂燃煤损耗基本形式	2
1.2	燃煤损耗测评技术概述	4
1.3	电厂燃煤损耗影响因素	15
2	煤堆静态扬尘	19
2.1	煤堆静态扬尘机理	19
2.2	露天煤场粉尘特性测试与扬尘特性试验研究	24
2.3	静态扬尘测算	26
2.4	煤堆静态扬尘试验	29
2.5	减少静态扬尘的措施	40
3	煤流动态扬尘	50
3.1	动态扬尘机理	50
3.2	减少煤流扬尘的措施	57
3.3	防治动态扬尘试验	60
4	煤堆雨水冲刷	79
4.1	煤堆雨水冲刷机理	79
4.2	煤堆雨水冲刷计算	86
4.3	煤堆雨水冲刷试验	88
4.4	减少雨水冲刷的措施	92
5	煤堆低温氧化热值损耗	95
5.1	煤低温氧化机理	95
5.2	煤炭低温氧化实验	97
5.3	煤低温氧化的控制方法	104

6 电厂燃煤损耗综合测评 111

6.1 电厂燃煤年度损耗计算 111

6.2 燃煤损耗测算方法应用 114

参考文献 133



燃煤电站损耗测评基本概念

煤炭是世界上储量最多和分布最广的常规能源资源,根据国际能源署 2010 年的报告,世界煤炭证实可采储量为 997 195Mt,2009 年煤炭占世界一次能源消费构成的 29.36%,位居石油之后,预计在 2030 年前,世界煤炭需求量年均增长率为 212%,其中 95%以上需求增长将来自电力用煤。电力用煤占煤炭消费总量的 75%左右,燃煤发电占世界发电总量的比重将从目前的 40%增长到 44%。在 2035 年前,石油、天然气和煤炭等化石能源仍将是世界的主要能源。在我国,煤炭是主要的能源资源,20 世纪 50 年代,在我国的能源构成中,煤炭占 90%以上,迄今仍占约 70%。国民经济的发展离不开煤炭工业的发展。新中国成立 60 余年来,我国煤炭产量由 1949 年的 0.32 亿 t,增加到 2011 年的 35.2 亿 t,增加了百倍以上,成为世界第一采煤大国,在开采技术、机械化程度、管理水平和职工文化技术素质等方面均有很程度的提高。

中国是世界上少数以煤炭为主要能源的国家,近年来我国国民经济持续发展较快,化工、冶金、电力等行业的发展导致对煤炭需求的逐年递增。煤炭在我国化工能源领域中利用较多,煤炭能源化工产业将在中国能源的利用中扮演重要角色。随着中国经济进入重化工阶段,经济发展对能源的要求将快速增长,特别是与煤炭直接相关的电力、钢铁和化工等行业的发展仍将保持较快的增长,从而导致煤炭需求量进一步增加。

煤炭是不可再生矿产资源,是我国重要的能源化工原料。但煤炭在利用中存在许多问题。

1. 煤炭低温氧化

煤炭在堆放过程中会受到空气的缓慢氧化作用,发生放热反应,热量累积到一定程度会发生自燃,造成煤炭资源的巨大浪费,有时甚至引发火灾事故,由此引发的爆炸又会造成严重的人员伤亡,给安全生产带来极大危害。

2. 煤炭扬尘损耗

我国每年的煤炭开采量达 20 亿 t 左右,开采出的煤炭主要被露天堆放在大中型煤矿、燃煤电厂和沿海的煤码头,以供应我国对能源和化工原料的需要。这些露天堆放的煤炭本身很容易因风化而导致大量煤炭的粉化,在每年干燥季节遇上刮风天气,表面干燥细散的煤粉很容易随风飞扬,造成很大的浪费,同时也严重污染了煤场周边的大气及生态环境,形成一种大面积的开放性煤尘污染源。另外,扬尘还可能引发安全事故,有些火力发电厂的露天储煤场由于煤尘飞扬使供热管道、电缆等处因沉积粉尘自燃而造成火灾。此外,煤炭在运输过程中,也容易对公路、铁路沿线的环境造成污染。

3. 煤炭雨水冲刷损耗

电站煤炭在露天堆放的过程中遇上降雨天气,由于强降雨的冲刷作用,煤粉被冲刷出煤

场,对储煤造成损失。再者,含煤雨水从煤场流出,浸入地下水系统,不仅对当地地下水造成污染,也会对土地成分造成影响。

我国的发电用煤以大型火力发电厂为主,用煤量很大,年用量约占全国商品煤销量的26%。燃煤电厂在煤场储存过程中,煤与空气接触后,煤中的有机成分和一些矿物质与空气中的氧气发生反应,使煤中的可燃组分减少,煤经氧化后易于破碎,表面积增加,使氧化加快。低温氧化虽然氧化程度不深,但能使煤的性质发生较大的变化,如使煤的发热量显著减少、黏结性下降甚至消失、机械强度降低等,对煤的工艺应用有较大的不利影响。据统计,贫煤在煤场储存6个月后,发热量损失约2%,约相当于0.50MJ/kg;烟煤在煤场储存6个月后,发热量损失约5%,约相当于1.00MJ/kg;褐煤在煤场储存1个月后,发热量会有较明显的降低。为了减少煤因低温氧化造成的损失,通过研究烟煤在低温氧化过程中的变化特点,从而构建低温氧化机理模型,确定低温氧化与煤炭热值损耗的影响规律,进而指导煤仓堆煤过程,减缓堆煤过程中的热值损耗具有重要的意义。

除了在堆放过程中低温氧化所造成的损耗外,燃煤在储存、卸载和转运过程中也存在巨大的损耗和环境污染。以燃煤储存损耗为例,由于我国大部分电厂使用露天煤场,储煤存在严重的风损雨损问题,每年仅广东省内电力燃煤此项损失就高达40多亿元。此外,被风带入大气的煤尘不仅是大气灰霾的重要来源,还会通过降雨产生煤污水污染周边水土。

燃煤在储存过程中由于自然风的扬尘和雨水的冲刷引起燃煤质量的下降,以及低温氧化过程引起燃煤热值的损失,从而导致燃煤的巨大损耗和环境污染。燃煤储存时的损耗主要是由风雨的冲刷和空气氧化造成的,直接损耗达到储煤总量的3%左右,降雨还使存煤的热值大幅下降,存煤水分提高1%,煤耗提高约1%。除此之外,还造成严重的环境危害:①风吹产生的煤尘是大气灰霾的主要来源;②降雨产生煤污水污染周边水土,特别是煤中有害元素通过雨水排放对人体器官有严重危害性;③煤炭氧化产生的 SO_2 排放到大气中容易产生酸雨等危害。目前,燃煤的巨大的损耗和环境污染还没有得到有效的治理,急需节能减排新技术。

1.1 电厂燃煤损耗基本形式

1.1.1 动态扬尘损耗

动态扬尘是指物料在装卸过程中的扬尘,主要与风速、装卸落差等因素有关。研究表明,降低风速或减少卸煤落差可以有效减少动态扬尘,且风速对动态扬尘量的影响较卸煤落差对动态扬尘量的影响更为敏感。

火力发电厂中储煤场是主要的扬尘源,解决扬尘问题从源头控制是关键。煤堆表面细小的煤颗粒在风力的作用下脱离煤堆表面,产生扬尘污染,对煤堆表面扬尘影响较大的因素主要有风速风力、煤粉粒径、煤堆表面湿度、空气湿度等。煤场内的扬尘一般可以分为两大类:一类是煤堆表面的静态扬尘;另一类是煤在堆料、取料等过程中的动态扬尘。

储煤场动态扬尘包括储煤场煤堆表面扬尘和煤料在堆取、装卸过程的扬尘,主要来自卸煤(包括公路卸煤、水路卸煤、铁路卸煤)、煤场堆放、堆取作业等环节。在煤场堆放时,煤堆表面在风吹作用下产生动态扬尘;卸煤时,原煤在重力作用下下落和风吹时造成动态扬尘;堆取料机进行堆取作业时,在堆取料机机械动力扰动作用下容易产生动态扬尘。与此同时,取料、

落料过程中含水煤层遭到破坏扰动,容易产生动态扬尘。

动态扬尘是大气颗粒物的重要来源,包括大风将外地的尘土从高空输送到本地产生的扬尘和由裸露地面、地面煤场、渣土堆放及人为排放的颗粒污染物沉降等方面产生的尘土在风力和机动车跑动等外力作用下形成的扬尘。道路路基工程施工阶段属开放式作业,由取煤、装卸、运输等作用产生的大量可扩散到大气中的颗粒污染物即为动态扬尘,具有大气颗粒污染物的一般特征。

一般来说,动态扬尘化学成分非常复杂,且因地域不同而有显著差别,一般由各种无机盐类、有机物及微生物组成,如地面尘土、大气化学反应的产物等。无机盐类包括硫酸盐、硝酸盐、磷酸盐、硅酸盐等阴离子和各种重金属(如 Cr、Cu、Ni、Pb、Zn、Mn 等)离子;有机物包括各种饱和和不饱和烃的碳氢化合物,特别是一些不饱和烃如多环芳烃、杂环化合物等;微生物则寄生于飘浮在空气中的颗粒物中,流动并在动植物之间传播,它们之间甚至含有大量有毒病菌。现代的科学研究和调查已证明,由如此复杂的物质组成的颗粒物被人们吸入体内会引起各种疾病。科学家们一致认为,生活在扬尘颗粒物浓度较高的地区极易导致肺炎、气管炎、肺结核,甚至诱发肺癌。颗粒污染物中细颗粒 $PM_{2.5}$ 的化学成分尤其值得关注, $PM_{2.5}$ 中含有许多由化学反应产生的二次污染物,如汽车尾气(NO_x , CO, HC)引发的光化学反应的产物吸附在颗粒表面, SO_2 等在颗粒物上通过液相反应产生的盐类,对人类危害严重的二次污染物有硫酸盐、硝酸盐、有机物中的苯并芘等。本研究中,虽然各地区煤质有明显差异,但道路运输扬尘的主要成分大致相同,其中大部分都是因施工机械作用、施工车辆运输或自然风力产生的煤料、粉尘微小颗粒,还有一小部分是施工车辆尾气排放的气体颗粒污染物,因此动态扬尘主要由矿物颗粒组成。利用带能谱的扫描电镜(SEM-EDX)对所采样品中的矿物颗粒成分进行分析发现,矿物颗粒中的主要成分含 Ca、Mg、Al、Si、K、Fe、Na、S 等元素,主要类型是白云石和方解石,为碳酸盐矿物,化学性质较稳定,并且具有一定的吸水性,这一点较有利于抑制其扬尘。

1.1.2 静态扬尘损耗

静态扬尘是指物料堆存过程中的扬尘,主要与风速、物料含水率、物料物理特性等因素有关。研究表明,降低风速或增加含水率可以有效减少扬尘。

根据微观粒子运动理论,在风力作用下,当平均风速约等于某一临界值时,个别突出的尘粒受湍流流速和压力脉动的影响开始振动或前后摆动,但并不离开原来位置;当风速增大达到或超过临界值后,振动也随之加强,拖曳力和上升力相应增大并足以克服重力的作用,旋转力矩促使一些不稳定的尘粒首先沿着煤堆床面滚动或滑动。粒子群中的小粒子具有较好的湍流跟随性,在大气中呈悬浮状态,并在来流的带动下随着气流一起运动。由于尘粒几何形状和所处空间位置的多样性以及受力状况的多变性,在滚动过程中,一部分尘粒由于粒径较粗,粒子惯性力较大,在获得初始动能后,并没有跟随气流一起漂移,而是沿着自身轨迹运动,在空中滑移跳跃一段时间,当碰到凸扬尘粒或被其他运动尘粒碰撞时,会获得一部分冲量,获得冲量的尘粒会迅速改变自己的运动方式,由水平运动转变为垂直运动,随风扩散一定距离后沉降下来。

堆放在露天煤场的散装煤粉尘在自然风力作用下不断地向大气释放尘粒,在大气中运动的尘粒由于粒径分布不同及受到大气流场脉动性、均匀性的影响,呈现出不同的运动状态:粒径

小的,随着气流的脉动悬浮在空中,成为飘尘;粒径较大的,则在风力作用下飞扬,在空中跃移一定距离后回到地面,其运动轨迹呈抛物线状,同时与地面碰撞,发生激溅,并沿地面滑移。风洞实验和野外观测表明,风作用下的粉尘依粒径不同其运动方式有悬浮、跃移和蠕移三种。

1.1.3 雨水冲刷损耗

电厂煤场一般占地面积较大,其中堆有大量原煤。降雨时,煤场表面逐渐形成径流。由于水流的冲刷作用,细小的煤粉颗粒随水流排出煤场,对储煤造成损失。再者,含煤雨水从煤场流出,浸入地下水系统,不仅对当地地下水造成污染,也会对土地成分造成影响。

不同煤种的润湿性能不同,被润湿的难易程度也不同,润湿性的强弱与煤中碳的含量有较显著的关系。对于煤化程度较低的煤种,其润湿角越小,越容易被润湿。煤化程度较高的优质煤呈现较强的疏水性,而煤化程度较低的煤种则易被水润湿。广东省地处中国南部沿海,气候湿润多雨且常有强热带/亚热带风暴袭击,对露天煤场堆放的燃煤具有较大影响。煤堆雨水冲刷机理不同于黏性岩土冲刷,后者由于道路建设已进行了大量的研究。燃煤煤粒之间空隙大、无黏、疏水强等特性导致其在雨水冲刷时表现出截然不同的特性。

1.1.4 低温氧化损耗

煤炭的低温氧化过程可以解释为在煤场堆放时,煤堆表面与空气接触,表面的活性分子、矿物质成分与空气中的氧气发生吸附及化学反应,并使煤中的结构发生变化,表面积增加,与氧气的接触面增大,氧化进一步加强。

煤炭自身具有巨大的比表面积和众多的活性点,对氧气具有很强的吸附能力。煤与氧气之间的相互作用可分为物理吸附和化学吸附。物理吸附是一个动态可逆的过程,煤体表面上吸附的氧分子在满足一定自身能量条件下又会离开煤体表面。煤对氧气的化学吸附可以看作是物理吸附和化学吸附之间的过渡状态,并被认为是只能发生在煤体内表面某些特定活性点上。在煤化学吸氧阶段,氧气与煤表面结构分子实质上发生了表面化学反应,两者之间以相似于化学键的表面键力相结合。

煤低温氧化的过程是氧分子首先在煤表面完成物理、化学吸附并放出反应热,使煤体温度缓慢上升,而温度的升高促使氧分子与煤分子中的活性官能团发生深度氧化分解反应,从而使煤中的大分子生成小分子并释放一定的特征气体和大量的反应热。这使得煤炭的热值损耗,造成能源浪费,而且这些热量在煤体内部积聚,发展到一定程度,还会引起煤炭自燃,危害人员生命财产安全,带来严重的经济损失。

1.2 燃煤损耗测评技术概述

广东省地处中国南部沿海,全省国内生产总值(GDP)和外贸进出口额连续多年居全国首位。随着经济的快速发展,广东省煤炭消费量总体呈现逐年上升的趋势,但在能源消费中所占比重逐年降低。广东省及整个华南地区属于经济和能源消费大省或地区,但又是一个能源小省,是我国外调煤炭重点消费省份与地区之一,广东省煤炭来源主要分布在华北、西北部地区。由于原煤储量分布不均,广东省的煤炭一直靠“西煤东调”、“北煤南运”来调配,煤炭调

运多元化势头增强,国内资源和进口煤炭齐头并进,国内北方港口下水的神木系列、山西优混系列、伊泰煤及澳大利亚、印度尼西亚等国进口煤深受广东电厂的青睐。2012年,广东省海上进煤约为1.8亿t,其中进口煤炭达到6642万t,占全国煤炭进口的23%,占广东省海上进煤的36.9%,预计到2020年达到2.5亿t,其中进口煤将达到8000万t。可见,对于贫煤的广东省来说,煤炭产业的安全、可持续发展显得尤为重要。然而,广东省乃至全世界煤炭工业的发展面临诸多挑战。全球能源需求的不断增长及环境保护意识的不断增强,促使煤炭工业向着资源节约、安全、高效、环境友好和可持续方向发展,对煤炭资源勘探、煤炭开采技术、安全生产和清洁利用等方面提出了更高要求。其中,煤炭在堆放过程中的低温氧化,以及露天煤场由于自然风的扬尘和雨水的冲刷引起燃煤质量的减少,对于贫煤的广东省来说更是雪上加霜,建立电站燃煤损耗测评系统,对储煤运煤过程煤炭损耗进行有效准确的预测计算,对电站煤厂管理及减少损耗措施的实施都具有重大意义。

目前,较少研究人员对燃煤在堆放、卸载和转运过程造成的风损、雨损和低温氧化损耗进行系统整体的研究,但是燃煤在燃烧前的热值损耗,使燃料偏离了锅炉燃烧的设计工况,从而导致燃烧不完全和煤耗增大。若能对入炉前的燃煤进行热值损耗的测算,并及时改变锅炉燃烧参数,则能达到节能降耗的效果。因此,有必要深入研究探索防治扬尘和雨水冲刷的技术、研制专用的喷洒装置,在实际应用的基础上提出燃煤风损、雨损损耗的评价方法,从而解决燃煤损耗、环境污染问题,实现节能、环保的目标,这将具有巨大的经济利益和社会效益,并将有效推进电力行业节能、环保技术的发展。

1.2.1 燃煤电站煤场煤炭扬尘损耗研究概述

1. 煤炭扬尘损耗模型研究

在颗粒物的行为过程及环境效应评价方面,日本、英国、法国、美国、德国等开展了大量的工作,如沙粒的跃移、蠕移及尘粒的悬浮运动等。露天煤场属于开放性尘源,具有源强不确定性,因此开放源扬尘规律对于解决城市空气颗粒物开放源问题具有十分重要的意义。煤炭在堆放过程中,扬尘量的大小取决于煤堆的形式、煤堆的含水率及风速。煤尘扬尘和扩散除与其物理性质(如粒径、密度、含水率)有关外,还与气象条件的关系甚密。风速影响扬尘量的大小及迁移距离,风向决定污染方位,降雨却是一个自然的抑尘过程,大气稳定度则决定煤尘污染扩散范围和程度。随着计算机技术的高速发展和高效计算方法的开发,20世纪90年代中期,从单颗粒的受力分析入手,跟踪颗粒轨迹的离散颗粒模型(discrete element model)首先在气固流化床、颗粒技术等领域发展起来,并且应用越来越广。

对环境粉尘的控制和治理,应该从研究粉尘在空间大气中的扩散规律入手,由于煤场受到风力、湿度及各种气象条件的影响较大,因此粉尘的运动规律较复杂。另外,粉尘与粉尘之间的相互碰撞也决定了粉尘运动的复杂性。国内外对大空间上粉尘的运动规律的研究已经有了初步的成果,再借助数学方法和现代计算机技术能较好地描述粉尘在理想状态和在受不同因素影响下点源粉尘的运动轨迹。中尺度模拟将大气边界层分为三层:表面层、过渡层和逆温层,并分别建立三个层内的大气运动方程和粉尘浓度变化方程。表面层内的粉尘浓度由四个因素决定:尘源、传输、沉积和侵蚀。由这四个因素的方程导出表面层内的粉尘浓度方程,然后联立求解则可模拟粉尘浓度的变化规律。大尺度模拟仅限于研究尘粒在大气循环中的传输状况,以揭示尘粒传输与气候变化的关系。大尺度模拟主要采用大气通用环流模型(atmospheric gener-

alation circle model, AGCM) 模型包括尘源地模型、尘粒的扩散模型、尘粒的传输模型及尘粒的沉积模型。虽然国内外对于诸如露天煤场这类开放源类扬尘量的估算、扬尘特性及扩散模式已有相关报道,但目前所做的研究工作还远远不能满足治理城市空气颗粒物开放源的需要。

2. 煤炭扬尘损耗研究成果

根据布伦特的估算,当风速超过 1m/s 时,空气的流动必然为湍流。据此,堆煤场由于刮风所引起的扬尘可看作湍流对尘粒的搬动。Bagnold 认为,流体起动时,作用在流体中粒子上的拖曳力和重力应平衡,并由此导出尘粒开始移动的临界速度与粒径的关系式。对于尘粒的起动风速, Bagnold 提出了流体起动值和冲击起动值两个概念。流体起动值是指来流中完全无其他尘粒,堆面尘粒的起动完全出于风对尘粒的直接作用这一情况下的临界风速;若来流中含有尘粒,这些尘粒撞击堆面也可能引起堆面尘粒的蠕移或起跳,在这种情况下,堆面尘粒的起动主要是由气流中原有尘粒的冲击作用所致,这时的临界风速称为冲击起动值。日本三菱公司通过风洞模拟试验得出,扬尘量除与风速有关外,还与煤的平均粒径有关系。美国的 Dawes 认为,风侵蚀速率(单位时间的扬尘量)与 u_3 成正比,并在很大程度上取决于粉末的性质,并用黏滞力(即粉末柱体断裂所需施加的每平方厘米截面上的力)来代表粉末特性,最后用因次分析法得出一个计算风侵蚀时的扬尘量公式。Vladimir Boscak 在风洞中进行煤尘扩散试验研究,并得出扬尘量与颗粒的佛鲁德数、时间及煤粉尘的黏滞系数有关系。

露天煤场扬尘量计算受到多种因素的影响,问题比较复杂,国内前人通过理论研究和风洞模拟实验,确定了影响该过程的一些因子,如平均风速、湿度、粒子的直径等,并总结了一些半经验的规律。例如,刘海玉和冯杰进行了煤场二次扬尘计算方法及其应用的研究,他们认为物料在堆放过程中的扬尘量主要与堆放形状、堆场排列、物料堆与风向夹角及风速密切相关,并进行了煤炭装卸时扬尘量的估算和煤堆扬尘量的估算。结果表明,堆场扬尘是散装物料的主要粉尘污染源,堆场扬尘量随风速的变化远远大于作业扬尘量随风速的变化,煤炭在堆放过程中,扬尘量的大小取决于煤堆的形式、煤堆的含水率及风速。程经权等就煤场扬尘问题,以风速和煤堆表面积为主要影响因素得出经验公式。煤堆表面的含水量不同,扬尘量也不同,秦皇岛煤堆扬尘研究推荐的以煤的外水分含量和风速为主要影响因素的扬尘量公式为 $Q = 2.1G(V - V_0)^3 e^{-1.025W}$, 式中: Q 为煤粉尘排放率, $\text{kg}/(\text{t} \cdot \text{a})$; G 为经验系数,是煤含水量的函数; V 为煤场平均风速, m/s ; V_0 为煤尘启动风速,取 2m/s ; W 为煤尘表面含水率。由此公式计算可知,煤场的扬尘量根据风速和煤堆表面含水量的不同而变化,根据多年的研究经验,当煤堆表面含水量达到 5% 和 7% 时,尘源附近的含尘浓度较低,抑尘效果很明显。因此,为防止煤堆扬尘对大气造成严重污染,可采取喷雾洒水措施,使煤堆表面保持一定湿度。煤尘产生量的经典估算方法通常采用修正后的《秦皇岛煤炭装卸、堆放扬尘及其扩散规律的研究》推荐的扬尘公式。从以上研究结果可以看出,影响露天煤场煤尘扬尘的因素较多,其中,风速、煤的含水量为最主要的影响因素,对扬尘量的大小有着很重要的影响。广大学者达成共识的是扬尘量的大小同风速的高次方成正比,其他因素如煤堆表面积、煤堆密度、煤场储煤量、粉煤粒径等也对扬尘量的大小有影响。

1.2.2 煤炭低温氧化研究概述

1. 煤炭低温氧化研究

目前,对于煤低温氧化的研究包括机理研究、实验研究和计算机模拟预测研究。利用衰减

全反射傅里叶变换红外光谱技术 (ATR-FTIR) 探讨煤低温氧化机理, 不需要分离单一组分, 可以在不制样或简单样品处理后直接对样品进行定性或定量分析。在煤低温氧化的实验研究方面, 研究者依据煤低温氧化的实质 (缓慢的受热分解、放热和升温的过程) 设计出一系列实验, 其中较多实验集中关注煤在氧化过程中的氧化程度与煤受热分解出的气体及煤温升之间的关系。再结合煤低温氧化的模拟实验, 在大量实验数据的基础上, 分析煤在氧化过程中受热分解并释放的气体成分及含量, 得出其随温度升高的变化规律, 再结合不同煤种的自燃评判标准, 优选出指标气体, 并建立各种指标气体含量与煤温的定量关系图, 从而利用实验和模拟相结合的手段, 深层次地研究煤低温氧化过程。现在对于煤低温氧化的认识程度和研究水平并不能完全解决因其复杂性而带来的研究难题, 然而能源日益稀缺的现状要求相关研究机构必须对煤低温氧化的全过程进行更加深入的研究。在此种推动力下, 国内外许多研究机构一直致力于探讨研究和开发预防煤的低温氧化技术, 为煤炭的安全保存技术提供研究依据和理论基础, 为节约能源及能源的高效利用做出贡献。

2. 煤炭低温氧化研究成果

近年来, 国内外学者从不同角度、采用不同方法对煤低温氧化的机理进行研究, 力图对煤炭低温氧化的整个发展过程进行全面了解, 为把煤炭低温氧化研究运用于生产实际而付出巨大努力。

(1) 煤低温氧化的微观结构变化。煤与空气相互作用的过程使其结构发生变化, 国内外学者对于煤结构的变化, 包括官能团、自由基、微晶结构等均已作了许多卓有成效的研究。

1) 活性基团。Cannon 和 Sutherland 是最早利用红外光谱研究煤的学者。Painte 和 Ibarra 对不同变质程度煤中各红外特征谱峰进行了详细的归属, 奠定了煤分子中官能团的具体归属及定量分析基础。Petersen 对煤的红外光谱 (FTIR) 结构参数与煤成烃的关系进行了大量的研究。Chen C 对煤中氢基进行分析认为, 煤中氢基可以分为五种类型, 并得到它们的热稳定顺序。Cerny 对煤中脂肪和芳香 C—H 进行了红外光谱分析。朱学栋等使用 38 个 Gaussian 分布的峰完整地分解了煤的红外吸收光谱, 并发现酚羟基、羧基等含氧官能团的含量与对应吸收峰的吸收强度呈线性关系, 同时还发现含氧官能团氧含量随煤化程度的增加而减少。冯杰采用模型化合物确定标准浓度的方法结合煤样的红外光谱分析, 定量研究了影响煤反应性的官能团, 并认为煤中的羟基、芳氢和脂氢的比例、含氧官能团及亚甲基的多寡是影响煤反应性的几个主要结构参数。刘国根系统研究了褐煤与风化烟煤的红外光谱, 表明随着煤变质程度的加深, 芳环的缩合程度增高, 分子中脂肪族 C—H 伸缩振动峰逐渐变弱甚至消失。风化后的烟煤可以形成再生腐植酸, 可作为判断煤是否风化的依据。朱红研究了煤自燃的各个阶段中, 其吸附光谱的强弱和频率, 发现各种煤处在不同的频率上, 并且具有不同的吸收光谱。

Fanor Mondragon 研究了不同变质程度的煤在空气中的氧化过程, 发现低阶煤氧化后倾向于形成酯基, 高阶煤氧化后则主要形成羧基。Maria Mastalerz 等通过红外光谱研究得知羧基、羟基等含氧官能团是煤低温氧化过程中的活性基团, 其含量均随煤化程度的增加而减少。Jun-ichiro Hayas 等认为褐煤在碱性环境中氧化时, 酚类将最终分解为多种酸和 CO_2 。石明必在对煤低温氧化的红外光谱研究中发现, 易自燃煤分子结构中首先被氧化的是以芳香环为主体的结构单元的侧链, 易被氧化的是结构单元的桥键或桥键的侧链, 同时伴随各结构单元之间桥键的断裂氧化, 主要氧化基团为甲基 ($-\text{CH}_3$)、亚甲基 ($-\text{CH}_2$)、羟基 ($-\text{OH}$) 和醚键 ($\text{C}-\text{O}-\text{C}$) 等, 氧化速率由快到慢为醚氧键、甲基或者亚甲基、芳香环。可见, 煤有机结构中的

非芳香结构（主要是侧链和桥键）性质比较活跃，易于氧化而放出热量，当蓄热环境较好时，煤的温度会不断升高。褚廷湘认为煤分子中羟基和与芳香族相连的亚甲基是较为活跃的基团，在低温下即首先与氧发生反应生成羧基，其中芳香羧基增加比例高于脂肪羧基，在温度较高时，羧基分解成羰基并进一步氧化转变成更为稳定的醚键。当温度高于 100°C 进行氧化时，大量脂肪侧链开始脱落，部分桥键断裂并参与反应，从而使煤分子中芳香基团的比例增高；在低温下，煤分子中的芳香结构相对较为稳定，没有受到破坏。葛岭梅根据煤分子结构的研究成果推断出，煤中常温常压下发生煤氧复合的活性结构是侧链中的甲氧基、醛基、 α 位碳原子带羟基的烷基；桥键中的次甲基醚键； α 位碳原子带羟基和带支链亚甲基的次烷基键及两个芳环相连的次甲基键。袁林研究了煤中部分活性结构在不同氧化温度下的氧化途径，发现煤分子中芳香结构单元间的交联桥键和与其连接的官能团侧链参与了氧化反应，在氧化的初始阶段主要是氧分子与某些烷基侧链（如处在芳烃 α 位上的亚甲基键）或一些含氧桥键（如 $-\text{OR}$ ）首先反应，生成羧基、酮、共轭羰基及醚键等含氧官能团，随着温度的升高，这些含氧官能团断裂，生成 CO 、 CO_2 和 H_2O 等气体。

煤分子的结构十分复杂。常温下，只有煤分子中的某些活性点能与氧发生化学吸附和化学反应，这些活性点称为活性基团或活性结构。也就是说，煤分子中的活性基团是煤发生自燃反应的初始原因。这些活性基团主要是含氧官能团和非芳香结构，包括甲基（ $-\text{CH}_3$ ）、亚甲基（ $-\text{CH}_2$ ）、羟基（ $-\text{OH}$ ）、羧基（ $-\text{COOH}$ ）和醚键（ $\text{C}-\text{O}-\text{C}$ ）等。

2) 微晶结构。1929 年 Mahadevan 最先利用 X 射线衍射仪（XRD）对煤的结构特征进行研究。Warren 在研究煤的晶格特征中提出了估算煤基本结构单元的 Warren 方程，后经 Franklin 进一步完善为 Warren-Franklin 方法。Franklin 还根据石墨化和非石墨化煤的结晶生长提出了第一个煤结构的物理模型。Yen 首次根据 XRD 图谱上的（002）带和 γ 带分辨后的峰面积计算出芳香度及其他结构参数。

目前煤的 XRD 研究主要针对煤大分子结构和煤显微组分的晶体特点展开。李美芬、曾凡桂等分析得出一系列不同变质程度煤样的 Raman 光谱参数与 XRD 结构参数之间的关系。姜波、秦勇等通过对比系列构造煤和正常煤的 XRD 特征，指明构造应力作用是促使煤单元面网间距减小和堆砌度及延展度增大的重要影响因素。张代钧、徐龙君、陈国昌等对煤的微晶结构特征与煤变质程度关系的研究表明，构造煤镜质组最大反射率与基本结构单元的演化具有良好的相关关系，是煤田构造研究中进行应力应变分析的重要标志物之一。戴广龙等对 4 种不同变质程度的煤低温氧化过程中的晶体结构变化进行研究，得出煤的微晶结构特征与其低温氧化之间有着内在的本质联系。罗隽飞研究了中低变质程度的不同煤中镜质组和惰质组的大分子结构特征及变化规律，指出惰质组芳构化程度随变质程度升高的规律不如镜质组显著。张代钧、张蓬洲和曾凡桂等也研究了不同煤级镜煤、丝炭等煤岩组分的 XRD 结构特征，并计算了相应的结构参数。

3) 显微成分。舒新前、葛岭梅等研究发现丝炭着火点最低，认为丝炭在低温下可吸收大量的氧，同时放出热量，容易自燃，镜煤则相反。张玉贵在考察了平庄褐煤和阜新长焰煤自燃过程后，认为镜煤的燃点低，自燃倾向性高。Markuszewski 则研究认为无论煤级如何，镜质组总是最易自燃的显微组分。张军采用微分和积分相结合的方法，分析了煤各显微组分在低加热速度下的热解机理，得出热解时不同显微组分的活化能不同，惰质组一般具有最低的活化能。Straszheim 认为无论煤级如何，镜质组总是最易自燃的显微组分。Jakab 用裂解质谱技术

研究了煤中显微组分的低温氧化过程,指出源于角质、藻类的富含脂肪族氢的煤结构很少发生化学变化,而镜质组和孢粉体可被适度氧化。曹作华的研究表明,暗煤吸附性较小且较稳定,亮煤的氧化速度比暗煤快得多,而镜煤和丝炭的吸附性最强且易被氧化。

4) 自由基。煤的低温氧化过程,就是空气氧分子与煤表面的活性基团发生物理吸附和化学吸附,在分子间力作用下,氧分子中的一个键削弱甚至断开,形成 —O—O— , —O—O— 与甲基、次甲基等反应,又形成烃类自由基,而烃类自由基再与氧分子反应,生成过氧化物自由基,煤中富氢部分与过氧化物自由基反应,生成氢化过氧化物,后者遇热又可分解成两个自由基,如此连续反应,自由基不断产生与结合,反应不断进行直至煤炭自燃。由此可见,煤的低温氧化过程就是自由基的产生过程。

基团中的自由基是在煤的氧化过程中挥发物质脱离碳时形成的。高分子固体物质被破坏时,发生分子断裂,也可产生自由基,如开采过程中的机械力或地质构造过程中的应力作用均可产生自由基。因此,煤的低温氧化主要是自由基与空气中的氧发生反应。自由基产生的途径主要包括:①成煤过程中形成;②在氧化过程中伴随着分解和合成,会产生一些挥发性物质,挥发性物质脱离时会形成自由基;③煤是大分子物质,当其受到外力作用碎裂时会发生分子键断裂,形成自由基;④煤在氧化和热解过程中,结构单元之间的桥键断裂生成自由基,主要有 —CH_3 、 —CH 、 $\text{—CH}_2\text{—}$ 、 $\text{—CH}_2\text{—O—}$ 等。

张代均对变质程度不同的煤进行了电子顺磁共振(ESR)实验研究,探讨了煤中自由基的起源、性质和数量的变化。秦勇、姜波研究了我国高阶煤和变形煤的 ESR 波谱,指出煤的光性组构是煤田构造地质中的标志物之一,探讨了高煤级煤演化的化学机理。戴广龙直接测定了褐煤、气煤、气肥煤和无烟煤从常温到 200°C 的 ESR 波谱,得出煤氧化的难易程度取决于煤氧化后自由基浓度的相对增加率而不是原煤中自由基的浓度。冯士安等应用 ESR 技术研究了构造煤的自由基变化特征。张蓬洲用不同变质程度煤的 ESR 波谱参数与煤中碳、氧等元素进行关联,发现这些参数与煤的变质程度和氧的含量有密切的关系。刘国根对褐煤与风化烟煤进行了 ESR 波谱分析,指出褐煤和风化烟煤中存在大量稳定的自由基,从褐煤到烟煤,随着煤化作用的加强,ESR 波谱吸收峰变窄,风化使烟煤的自旋浓度明显下降。张群分析了镜煤、丝炭和暗煤的 ESR 特性,探讨了丝炭的成因。这些研究都证明煤中存在大量自由基。

Jones 和 Townend (1949) 使用硫氰酸亚铁溶液,用滴定的方法发现,过氧化物(—O—O—)是煤初始氧化阶段所成的过渡态中间产物,并已被较多学者认同。通过电子顺磁共振波谱仪,人们可观测煤表面自由基的变化情况,并且自由基被认为是形成过氧化物必要的前驱体。

李建伟用电子顺磁共振波谱仪研究了神府、汝箕沟两种煤在低温氧化过程中自由基浓度的变化规律,发现在低温氧化时由于煤含有较多的氢,未配对电子和氢核自旋相互作用而缩短弛豫时间,吸收峰较宽;随着氧化温度的提高,吸收峰变窄。李增华研究认为,煤在外力(地应力、采煤机的剪切)作用下煤体破碎,产生大量裂隙,必然造成煤分子的断裂,分子链断裂的本质是链中共价键的断裂,从而生成大量自由基。自由基可存在于煤颗粒表面,也可存在于煤内部新生裂纹表面,为煤自氧化创造了条件,引发煤的自燃。同时以张集矿肥煤和白茆沟矿无烟煤为研究对象,测定了煤体在破碎和低温氧化过程中的朗德因子、浓度、线宽和线高。罗道成研究了煤在破碎、低温氧化和紫外光照射过程中自由基浓度变化的 ESR 波谱,发现不同反应条件均能诱发煤中自由基的形成,影响煤中自由基的浓度;煤破碎得越细,氧化温度越高,

氧化时间越长,煤中自由基浓度越大。

(2) 煤低温氧化的分段特性。研究表明,煤在低温氧化的过程中,随着反应的深入、温度的升高,其反应特性呈现出不同的特点。

对于煤低温氧化的分段特性, Carpenter 和 Giddings 通过研究新南威尔士煤的氧化过程认为,煤的氧化过程经历三个明确的阶段:第一阶段是反应最快速的阶段,外界条件和煤样的孔隙表面情况决定了耗氧速率;第二阶段的速度慢于第一阶段,其耗氧速率主要由煤样孔隙表面特性决定;当到达第三阶段时,氧气很难与煤接触,因此反应也最为缓慢。Itay 指出煤的低温氧化从外层开始,遵从核反应收缩模型,反应速率由空气从氧化层的扩散控制。Continillo 研究了化学吸附氧及化学反应速率,指出在不同的温度区域,该速率遵从不同的变化规律。郑兰芳、邓军研究了不同温度阶段内煤自燃的特征温度、耗氧速率的变化情况,指出在烟煤和无烟煤的升温过程中氧气的消耗随着温度升高而逐步升高,且均在 $60\sim 80^{\circ}\text{C}$ 阶段出现较明显的增加,并在 $105\sim 125^{\circ}\text{C}$ 阶段开始出现急剧突变,在 $120\sim 150^{\circ}\text{C}$ 阶段的平均变化率分别为 $50\sim 100^{\circ}\text{C}$ 阶段对应平均变化率的 $2\sim 13$ 倍。

Banerjee 和 Chakravorty 通过差热分析 (DTA) 研究发现,煤的初始阶段为吸热过程,主要是煤中水分蒸发;接着煤氧化开始发生放热反应;在第三阶段时,煤反应加快放出大量的热。许涛对煤自燃过程分段特性及机理进行了实验研究,得出不同变质程度的煤在自热升温过程中的温升都呈现明显的分段性,包括缓慢升温阶段和快速升温阶段。徐精彩等对煤分子表面活性基团及其反应过程热效应进行了研究,提出了煤氧复合多级反应模型及每级反应的热效应,得出不同煤的表面反应热不同,并与媒体温度有关。戚绪尧通过对煤氧化过程中官能团变化的 FTIR 光谱进行研究,提出煤氧化过程的三序列反应,除了包括已被普遍认可的直接氧化反应、煤氧复合分解反应,在煤的低温氧化自燃过程还存在着活性基团的自反应。

TeVrucht 采用傅里叶变换红外光谱仪检测脂类 C—H 吸收峰强度的变化,求取煤氧反应的活化能和速率常数。Martin 用二次离子质谱 (SIMS) 研究了 23°C 、 70°C 和 90°C 时煤表面 O_2 浓度的变化,计算结果说明 70°C 前后活化能差别很大,在氧化反应的第一周内,温度小于 70°C ; 具有以吸附扩散过程为主的低活化能特征。高思源等利用煤自然发火实验测定了不同自燃倾向性堆积煤煤低温氧化活化能。测试结果表明,煤的自燃倾向性越强,氧化反应的活化能越低,且煤样的活化能随温度的升高而升高。在低于 70°C 时,温度上升得比较平缓;在高于 70°C 时,由于氧化反应类型发生了变化,活化能迅速升高。通过测试 70°C 以下温度段的氧化反应活化能,可以较准确地判断煤自燃的倾向性。

一般认为,煤自燃过程存在蓄热期、自热期、燃烧期 3 个阶段。其中蓄热期与自热期的界限一般认为是 70°C ,在 70°C 前后活化能变化很大。已有研究表明,煤在常温至 70°C 阶段,主要发生表面氧化反应,只能生成过氧化物基团和少量的酸性基团。当温度达到 70°C 时,反应加速,开始进入腐植酸反应阶段。由于腐植酸反应的活化能高于煤表面氧化反应的活化能,因此当温度高于 70°C 时,氧化反应的表现活化能会出现明显的上升。对于自燃倾向性较弱的煤,由于其氧化活性高的结构较少,其氧化反应活化能较高。反之,对于自燃倾向性较强的煤,由于其活性结构较多,其氧化反应活化能较低。

李增华利用加速量热法研究煤炭的自燃特性,并建立了煤氧化反应的活化能计算方法,得到试验煤样在缓慢氧化阶段和激烈氧化阶段的活化能数据。他认为化学反应动力学在研究煤的自燃倾向性分类方面具有科学性和适用性,应用于煤的自燃机理研究方面只能作为定性推测。