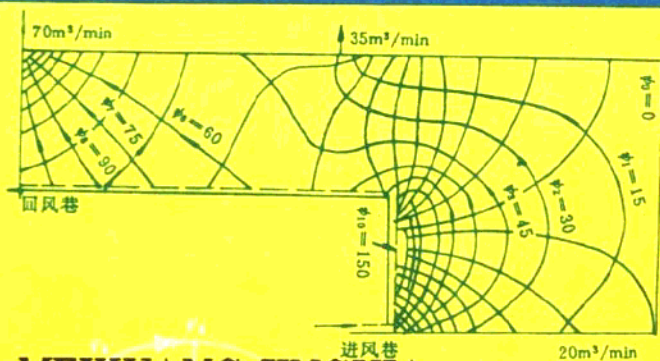


煤矿井下 内因火灾防治技术

秦书玉 赵书田 张永吉 编著

柴兆喜 韩来德 主审



MEIKUANG JINGXIA

NEIYIN HUOZAI FANGZHI JISHU

东北大学出版社

前 言

井下火灾是煤矿井下的重大自然灾害之一。井下火灾分为外因火灾和内因火灾。内因火灾约占井下火灾的 70%，自燃发火严重的矿区达 80%~90%。由于内因火灾的火源隐蔽，常发生在人们难以进入或不能进入的采空区或煤柱内，因此有的火灾持续数月甚至数十年，不仅烧毁了大量的煤炭资源，而且还冻结了大量的开拓煤量。据统计，1981 年我国由于发火而冻结的煤量达 3 000 万吨。

井下火灾在发生发展过程中逸出大量的有毒、有害气体，且随风流扩散蔓延，其烟雾常常造成井下人员中毒死亡。据国内外资料统计，在矿井火灾事故中有 95% 以上的遇难人员是在烟雾中中毒死亡的。

矿井火灾还往往与煤尘瓦斯爆炸相互作用，扩大灾害的程度和范围，这是酿成煤矿重大恶性事故的原因之一。据统计，在全国统配煤矿和重点煤矿中，有自燃发火危险的矿井约占 47%。所以，防治矿井火灾是保证煤矿安全生产的重要任务之一。其中的内因火灾既是矿井防灭火工作中的治理重点，也是研究井下火灾的重要方向。

本书根据我国煤炭工业近 15 年来取得的科研成果和生产实践经验，较全面、系统地从理论和工艺两个方面论述煤矿井下内因火灾的防治技术，重点介绍了煤炭自燃机理、煤炭自燃预测预报、易自燃煤层的开采、调（均）压和氮气防灭火技术、火灾管理和灾害的控制，以及我国近 15 年来在

BF 39/05

其理论研究方面取得的新成果、在工程技术方面取得的新技术、在生产实践中获得的新经验。为了展开学术讨论，促进煤炭科技的发展，本书还介绍了在该领域中正在继续研究和有待研究的重要理论和关键技术及各种学术观点。本书是介绍煤矿井下内因火灾防治技术及其理论的一本专著。

本书在撰写和出版过程中，得到了中华人民共和国煤炭工业部安全监察局局长殷继昌，劳动部矿山安全监察局副局长、总工程师张恩德，地方煤矿总工程师、监察局局长赵质敏，监察局副局长李德，辽源矿务局副局长王国军，阜新矿务局通风副总工程师于万双，义马矿务局副局长高志强，以及东北大学出版社的有关同志的关怀和支持。阜新矿业学院古明春教授详细审阅了全部书稿，中国矿业大学北京研究生部的黄元平教授对本书提出了许多宝贵的意见，在此一并表示衷心的感谢。

由于作者水平有限，书中一定会有许多不妥之处，我们怀着感激之情欢迎读者不吝赐教，批评指正。

作 者

1992 年 11 月

目 录

前 言

第 1 章 煤的化学组成及其性质

- 1.1 煤的形成 (1)
- 1.2 煤的化学组成 (7)
- 1.3 煤的元素组成 (17)
- 1.4 煤的物理化学性质 (19)

第 2 章 煤炭自燃

- 2.1 煤炭自燃的概念 (27)
- 2.2 煤炭自燃机理 (29)
- 2.3 煤炭自燃发展过程 (35)
- 2.4 煤炭自燃的影响因素 (48)
- 2.5 煤炭易自燃的位置 (57)
- 2.6 煤炭自燃过程中的危害 (64)
- 2.7 煤的自燃倾向性鉴定 (68)
- 2.8 煤炭自燃气体的分析方法 (82)

第 3 章 煤炭自燃的预测预报

- 3.1 待开采煤层自燃可能性的预测 (89)
- 3.2 煤炭自燃早期预测预报的气体分析法 (98)
- 3.3 煤炭自燃早期预测预报的灰色系统

理论分析法·····	(111)
3.4 煤炭自燃早期预测预报的模糊聚类分析法··	(116)
3.5 煤炭自燃早期预测预报的计算机模拟方法··	(123)
3.6 煤炭自燃位置的计算机模拟判别法·····	(130)

第4章 自燃煤层的开采

4.1 自燃煤层的开拓·····	(137)
4.2 自燃煤层的开采·····	(139)
4.3 自燃煤层开采时的通风·····	(147)

第5章 矿井漏风与检测

5.1 矿井漏风方式·····	(152)
5.2 采空区漏风·····	(155)
5.3 封闭火区的漏风·····	(161)
5.4 漏风检测·····	(167)

第6章 调压防灭火技术

6.1 调压基本原理及调压技术·····	(177)
6.2 压能的测定及压能图的绘制·····	(182)
6.3 矿井通风网路各级分支的风压分配·····	(187)
6.4 风窗调压·····	(189)
6.5 辅扇调压·····	(199)
6.6 风窗-辅扇联合调压·····	(210)
6.7 管路气室调压·····	(217)
6.8 局扇风筒调压·····	(229)
6.9 调整通风系统降压减风·····	(232)

第7章 灌浆防灭火技术

- 7.1 灌浆防灭火原理与工艺系统····· (235)
- 7.2 灌浆参数的确定····· (236)
- 7.3 泥浆的制备····· (240)
- 7.4 灌浆方法····· (252)

第8章 氮气防灭火技术

- 8.1 氮气的物理性质····· (263)
- 8.2 氮气防灭火原理····· (264)
- 8.3 氮气防灭火工艺系统····· (265)
- 8.4 氮气的制取与贮运····· (267)
- 8.5 注氮方法····· (271)
- 8.6 注氮参数····· (276)

第9章 阻化剂防灭火技术

- 9.1 阻化剂防灭火原理····· (280)
- 9.2 阻化剂的选择····· (282)
- 9.3 喷注阻化剂防火工艺····· (285)
- 9.4 预防区域喷洒压注阻化剂的方法····· (294)

第10章 火区管理

- 10.1 火区封闭····· (299)
- 10.2 火区管理····· (307)
- 10.3 火区启封····· (320)

第11章 火灾时期矿井通风的控制

- 11.1 火风压及其计算..... (324)
- 11.2 火灾对矿井通风的影响..... (328)
- 11.3 发火地点的确定及进入发火区域
的技术措施..... (340)
- 11.4 井下发火时矿井通风状态的确定..... (351)
- 11.5 矿井风流的控制..... (357)

第 1 章 煤的化学组成及其性质

为了深入地研究煤炭自燃的基本理论和防治技术，了解和掌握煤的基本知识是非常重要的。为此将在本章里做一些简单的介绍。

1.1 煤的形成

煤是由什么物质构成的，这些物质又是怎样形成煤的，在这一节里将从化学角度来认识。

1.1.1 成煤的原始物质

在 19 世纪以前，对于煤是由什么物质形成的，一直是众说纷纭。有的认为煤和地壳上的其它岩一样，有地球时就存在了；有的认为煤是由岩变化而来；也有的认为煤是从植物变化而来的。19 世纪以后，显微镜被应用，从此揭开了煤是由原始物质变成之谜。在显微镜下不仅可以看到植物成长过程中的年轮，而且在井下还可看见煤层顶板上有树皮的碎片、根、叶等化石。

煤是由植物变化而来，那么它主要是由什么植物形成的呢？根据研究结果可知，煤主要是由低等植物（即藻类）、高等植物（即被子植物等）所形成。

1.1.2 植物的组成

无论高等植物，还是低等植物，组成它们的基本单元均

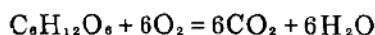
是细胞(Cell)。细胞壁主要组成是纤维素、半纤维素和木质素，原生质是细胞的内含，它由蛋白质和一些碳水化合物组成。因此，植物的组成成分主要是以下4类。

1. 碳水化合物

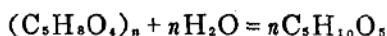
碳水化合物包括纤维素、半纤维素。纤维素是高分子化合物，它可用 $(C_6H_{10}O_5)_n$ 来表示。它是一个多醣，在喜氧细菌的作用下，水解为单醣 $C_6H_{12}O_6$ ，即



单醣再水解



纤维素参水成煤作用。半纤维素也是一个多醣，譬如聚木醣 $(C_5H_8O_4)_n$ ，它也是在微生物作用下水解成为单醣，即



2. 木质素

木质素是具有芳香结构的化合物。其结构复杂，至今还不能用一个结构式来表示。但已知它是一个具有缩合芳香环，并带有侧链，具有甲氧基— OCH_3 、酚羟基、醇羟基、氧醚基— O —、醛基— CHO —等多种官能团的物质。在碱性介质中容易氧化成类似腐植酸的多芳香羧酸。木质素也参与成煤作用。

3. 蛋白质

植物的细胞内含有较多的蛋白质。蛋白质是复杂的高分子化合物。它除了含有碳、氢、氧外，还含有氮、硫元素，有的还含有磷。它在细菌作用下可以水解成氨基酸，再进一步分解，则蛋白质可以完全分解为 NH_3 ， CO_2 ， H_2S 等气体和水。

4. 脂肪类化合物

这类化合物包括植物中的酯肪、树脂、树蜡等。

(1) 酯肪。酯肪是酯肪羧酸和甘油的脂，它在酸性或碱性介质中均会水解。水解产物是酯肪羧酸和甘油。在细菌作用下，它也能水解。酯肪在低等植物中含量较高。高等植物的孢子、种子中也含有酯肪。

(2) 树脂。树脂是有机高分子物质，通常是黄色或褐色的无定形物质，很稳定，不易为细菌所分解。煤层中的琥珀就是树脂的化石。

(3) 树蜡。树蜡包含着高级酯肪酸和一元醇的脂，以及含碳较多的长链烷烃。植物的角质层、木栓质和孢子花粉等外壳中都有树蜡。树蜡和树脂一样比较稳定。因而在植物变成泥炭、褐煤过程中，它们未被破坏，用有机溶剂可把它们从泥炭、褐煤中抽提出来，抽出物叫做沥青A。

1.1.3 成煤过程

用高等植物形成的煤叫做腐植煤(Humite)。高等植物中的树皮、树脂、孢子壳等比较稳定的组分变成的煤叫做残植煤(Liptobilite)。低等植物转变成的煤叫做腐泥煤(Sapropel)。植物死亡后，其残体经过复杂的生物化学、物理化学的作用变成煤，整个过程叫做植物的成煤作用。成煤作用之所以能进行，必须有两个条件：一是大量的植物残体的堆积；二是合适的环境。

如果植物残体堆积在空气畅通的地方，则由于喜氧细菌的作用，植物会完全氧化，分解为 CO_2 ， H_2O 等而不能成煤。但是，如果植物残体堆积在有水覆盖的地方，空气不能自由出入，植物不能完全氧化，就会逐渐转变成黑褐色的腐植酸类物质，最终才能变成煤。

植物成煤在有大量的堆积以及堆积在合适的环境，需经过以下两个阶段。

1. 泥炭化阶段(Peat Stage)

这个阶段是高等植物转变成泥炭、低等植物转变成腐泥的阶段。该阶段所进行的过程叫做泥炭作用。

高等植物死亡后，其残体堆积在低洼的沼泽、湖泊中，开始是在有水和空气不足之处，植物堆积的表面层由喜氧菌的作用，进行生物化学变化和氧化分解。但由于植物分解产物使水质发生变化而使细菌无法生存，以及由于在沼泽中，喜氧细菌也只能在离水面较近的地方存在，随着深度增加，喜氧细菌愈来愈少以致绝迹。所以，植物残体的氧化分解不会完全。在沼泽较深的地方有厌氧细菌的存在，在它的作用下，植物残体和其自身所含的氧也会进行分解而形成 CO_2 ， H_2O 等。但这个分解程度进行得很小。与此同时，植物残体的分解产物之间还相互作用，结果形成了新的产物——腐植酸。植物残体经过上述的一系列变化过程，最后转变成黑褐色的、完全不同于原来结构形态的物质，这就是泥炭。这时，泥炭的组成和植物的组成相比已发生了很大的变化，如表 1.1 所示。

表 1.1 植物和泥炭的组成

项 目 品 种	元 素 组 成			物 相 分 析(%)				
	C(%)	H(%)	O+S(%)	纤维素	木质素	蛋白质	沥青 A	腐植酸
树 木	50.15	6.20	42.10	50~60	30	1~7	1~3	0
泥 炭	65.46	6.53	26.75	0.89	0.39	0	10	52.88

在元素组成上，泥炭中的碳含量增多，氧和硫含量减少。所以，植物在泥炭化作用中，不只是组成上的量的变化，而且也在经历着质的变化。如果成煤的原始物质是低等

植物，例如海藻类，则它们死亡后沉积在水底，在微生物的作用下进行分解化合等作用，最后变成棉絮似的胶体状黑色物质，这种物质称之为腐泥胶。腐泥胶再转变为腐泥，腐泥中含有大量的腐植酸。因此，无论高等植物还是低等植物，在泥炭化阶段中都进行着生物化学作用，既分解，又化合，最后形成都含有大量腐植酸的泥炭或腐泥。

腐植酸是泥炭中一个主要组分，是成煤过程中的一个重要中间产物，它是芳香环的缩合物，含有多种官能团如羧基—COOH，酚羟基、醇羟基、醚基甲氧基—OCH₃，羰基—C=O，氨基—NH₂，……等，由腐植酸变化而形成多种煤。

2. 煤化阶段(The Stage of Coalification)

煤化阶段是泥炭转变成煤的阶段。在这个阶段中包含着两个连续的过程。

第一过程：在地热和压力下，泥炭转变成褐煤(Lignite Brown Coal)。因为煤是一种有机岩，所以这个过程常常称之为成岩作用(Diagenesis)。

第二过程：是褐煤转变为烟煤(Bituminous Coal)和无烟煤(Anthracite)，使煤的质发生变化的过程，所以这个过程叫变质作用(Meta—Morphism)。

泥炭形成后，如果地壳下沉得很快，而植物再堆积以形成泥炭的速度不如地壳下沉得快，则泥炭的堆积就会中断，从而在已形成的泥炭上面为泥沙所覆盖，泥沙不断堆积，使覆盖层逐渐加厚，泥炭所承受的静压力也逐渐增大，于是泥炭发生了压实、失水以致愈来愈坚实而成为褐煤。褐煤的比重比泥炭大，在组成上也发生了显著变化。碳含量相对增加，腐植酸含量减少，氧的含量也减少。表 1.2 是褐煤和泥炭在组

成上的某些比较。

表 1.2 褐煤与泥炭组成比较

项 目 种 类	C/%	O/%	腐植酸 /%	水 分 /%	挥发分 /%	容 重 /t/m ³
泥炭(黑龙江)	56	34	43	>40	70	1.0
褐煤(内蒙古)	71	23	22	10~30	44	1.1

当地壳继续下沉,褐煤的覆盖层也随之加厚,地热、静压力使褐煤进一步经受物理化学作用而压实、失水以致其内部结构、性质均发生进一步的变化。这就是褐煤的变质作用,变成了烟煤。烟煤的碳含量较褐煤为高,但氧含量比褐煤小。腐植酸则在烟煤中已不复存在。烟煤还在继续进行变质作用,烟煤本身还因变质程度深浅不一,而有低变质烟煤(长焰煤和气煤),中等变质程度烟煤(肥煤和焦煤)及高变质烟煤(瘦煤和贫煤)之分,它们之间的碳含量也随着变质程度加深而增大。

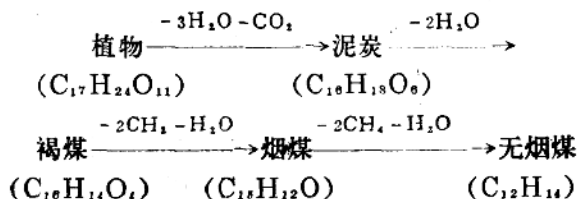
烟煤(贫煤)再继续变质,进一步失水,同时脱CH₄而变成无烟煤,无烟煤的碳含量更高,容重也大。表1.3是各种煤的组成比较。无烟煤在地压和地热作用下逐渐变质为超无烟煤(半石墨类)。

表 1.3 烟煤和无烟煤的组成

项 目 煤 种	产 地	C [*] /%	O [*] /%	水份W [*] /%	挥发份V [*] /%	容 重 /t/m ³
长焰煤	吉林	80.46	12.73	13	44	1.2
气 煤	四川	81.6	11.01	3	30~35	
肥 煤	山西	85.35	5.73	2~2.4	33	
焦 煤	河南	87.77	4~5	W [*] 0.2~0.9	22~24	
瘦 煤	山东	90.34	2.16	1.5	17	
贫 煤	广东	91.01	—	W [*] 0.9~1.2	9~15	~1.4
无烟煤	湖南	93.53	2.01	5	8	~1.8

以上是腐植煤的变质过程。至于腐泥煤，情况也类似。当腐泥形成以后，泥沙覆盖，静压力增大。同时进行成岩和变质作用。其腐植酸含量也随作用进行而显著减少，最后形成腐泥煤时，腐植酸消失。这种腐泥煤相当于腐植煤的烟煤阶段，再继续变质成为相应无烟煤的腐泥煤。

如果将各种不同变质程度的煤和植物、泥炭等的元素组成进行分析，然后以它们的实验式来表示，那么这个成煤的质变过程可大致表示为：



1.2 煤的化学组成

煤是极复杂的有机岩，从化学组成上看，煤大致可归为由无机部分和有机部分所组成。煤中的无机部分主要是煤所吸附的水份和植物本身固有的无机物以及在成煤过程中外来的一些无机矿物质。当煤受热时，吸附的水分在一定的温度下都会逸出。当煤在空气中燃烧时，绝大部分的无机矿物质都转化成灰分；少部分的无机矿物质，例如碳酸盐、含硫化合物等等。在煤的燃烧过程中，除了生成灰分外，还分别生成 CO_2 和硫的氧化物逸出。煤中的有机部分则泛指在隔绝空气的条件下进行热分解后的挥发分(除去水份和 CO_2)以及固定碳。因此煤的无机和有机部分可近似等于煤中水份、挥发分产率、灰分产率和固定碳 4 个量的总和。

1.2.1 煤的水分

1. 煤中的水分类型

煤中的水分，从其在煤中的存在状态来说，可分为两类：一类是游离水，一类是结晶水。

(1) 游离水。游离水是煤的内部小毛细管和煤的外表面的大毛细管所吸附的水。当温度大于 100°C ，煤中的游离水会逸出。外表面大毛细管吸附的水叫做外在水，用 W_{wz} 表示，这部分水较容易蒸发，但是只能蒸发到它的表面水蒸气压和它所在的空气中的相对湿度平衡时为止。外在水分是随空气温度的变化而变化。

内在水分 W_{nz} 是指煤在内部小毛细管吸附的水分。这部分水的蒸发气压较同温度的纯水蒸气压略小，因而内在水份的失去较外在水分较难，只有加热高于纯水沸点，内在水分才能全部逸出。煤的表面积愈大，小毛细管愈多，内在水分吸附的量也愈高。当煤的内部小毛细管吸附水分达到饱和状态，这时的内在水分叫做最高内在水分。

以空气干燥的煤样来作水分的测定，测定的结果叫做分析基水含量，以 W^f 来表示。在地质勘探中用的是 W^f 。

从采区采出的煤样叫原始煤样，如果原始煤样和即将用到工业用途的煤样一样，也就是不再加工直接用在工业上的煤，则这种煤样叫做应用煤样，测定应用煤样的水份叫做应用基水分，用 W^r 表示。

(2) 结晶水。煤中的结晶水是煤中无机矿物质所含的结晶水，如 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 。这种水在 110°C 下是不会逸出的，只有当温度高于 200°C ，结晶水才逸出。

当温度在 300°C 以上，煤中的氢和氧以原子比 2:1 的比

例形成了水逸出，这种水叫做热解水。

2. 影响煤中水份含量的因素

煤中水分多少取决于其本身的结构以及煤所处环境之相对湿度。对于煤的内在水分来说，是由煤的内部毛细管（其孔径小于 10mm ）对水产生的吸附。煤的内部毛细管愈多，它的表面积愈大，则吸附水的量愈大。这是决定煤中吸附游离水量多少的最主要的因素。其次，煤的结构单元中有羧基、羟基等极性官能团，而水本身又是一极性分子，因而它们之间还能产生极性吸附。此外，还有些学者认为煤中的极性基团和水形成氢键，还有的认为煤和水形成络合物，所以除了上述两种吸附外还有化学吸附。

对于不同变质程度的煤来说，其内在水分含量多少的变化规律大致是：在中等变质程度以前的煤，其内在水分含量随变质加深而减小；在中等变质程度以后的煤，内在水分含量随变质程度加深而稍有增高。罗颖多、邱蔚曾对我国 61 种煤进行内在水分的测定，证实了这个规律的变化，如图 1.1 所示。该图是煤的变质程度（以 V' 表示，变质程度愈深， V' 愈小）与最高内在水分的关系。

褐煤的含水量高，是由于褐煤的内表面积较大，以及褐煤的结构中含有相当量的腐植酸，具有较多的极性官能团，所以它吸附游离水的能力较大，可根据这个道理来推测泥炭的含水量比褐煤更大。

焦肥煤因为随变质程度加深，其结构发生变化。由于腐植酸的芳香环缩聚而成腐植质，其结构单元上的极性基团明显减少，加之其内表面由于芳香环的缩聚程度增大而变小，所以吸附游离水的能力就小。到变质程度更高的煤，其结构单元变化更大，按理说，应该随芳香环缩聚程度更大，内表

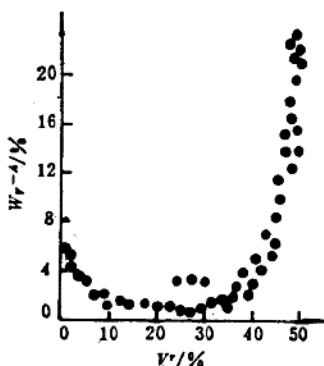


图 1.1 煤的最高内在水份与挥发分的关系

面应该更小，由于基性基因更少，应该吸附水的能力较中等变质程度煤的吸附能力小，但其结果却是吸附水的量略大，这是因为中等变质程度煤的内部还是无定形的排列。到无烟煤阶段其内部的排列已接近晶体结构，因而内部间隙略有增大的缘故。

从外因来说，煤的开采方法、贮存煤的空气相对湿度等都影响煤的含水量。例如井下涌水大的煤层，其含水量较高。水力采煤的煤样和旱采的煤样，其含水量也不同。雨季的煤堆含水量高于旱季的煤堆含水量。

1.2.2 煤的灰分

煤的灰分(Ash)不是煤本身所固有的，而是当煤完全燃烧后，其有机物的残渣以及煤中无机矿物质在煤燃烧温度下，进一步一系列分解和化合的反应的产物。因为煤中有机物完全燃烧，其残渣极微，所以煤的灰分可以认为都来自无