

● 陈立文 著

模糊预测

安全管理

与

煤炭工业出版社



模糊预测与安全管理

陈立文 著

河北省教育厅学术著作出版基金资助项目

煤炭院校优秀青年科学基金资助项目

煤炭工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

模糊预测与安全管理/陈立文著. —北京: 煤炭工业出版社, 2001

ISBN 7-5020-1998-7

I. 模... II. 陈... III. ①煤矿—井下火灾—预测
②煤矿—井下火灾—安全—管理 IV. TD75

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 16805 号

模糊预测与安全管理

陈立文 著

责任编辑: 宋黎明

*

煤炭工业出版社 出版发行

(北京市朝阳区芍药居 35 号 100029)

北京市房山宏伟印刷厂 印刷

*

开本 $787 \times 1092 \text{mm} \frac{1}{32}$ 印张 $4 \frac{7}{8}$

字数 113 千字 印数 1—400

2001 年 9 月第 1 版 2001 年 9 月第 1 次印刷

社内编号 4769 定价 18.00 元

版权所有 违者必究

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题, 本社负责调换

内 容 提 要

本书较全面系统地从理论和方法两个方面论述了井下煤炭自燃的概念、分类、机理、发展过程、影响因素、发火期、火灾预防和预测预报方法以及系统的设计与实现。

适于管理、经济、安全、采矿等领域的技术人员、科研工作者、研究生以及高等院校相关专业的师生学习和参考。

前 言

煤矿井下火灾（主要指内因火灾）的防治，一直是煤矿安全生产的重要课题，而煤炭自燃发火与预测是防治工作中的关键环节。同井下其它自然灾害预测问题一样，自燃发火的预测是一个非常复杂而困难的工作。主要原因是井下开采环境的恶劣与复杂性，无论是客观环境，还是信息的获得都存在着大量不可避免的不确定性。因此，煤炭自燃发火客观上既是一个模糊系统，又是一个介于白色系统和黑色系统之间的灰色系统，这种客观原因使得许多精确的数学预测手段都失去了作用。

煤炭自燃预测预报研究的目的，是揭示煤炭自燃的发生规律，科学地预报就是在一定的周围环境和条件下，对煤炭自燃的客观发生规律及其变动机理加以认识，进而揭示其未来的发展趋势和对煤炭自燃发火危险程度给出正确的判定，以此选择相应对策，控制煤炭自燃的发展，减少其造成的经济损失，实现安全生产。

本书较全面系统地从理论和方法两个方面论述了煤炭自燃的概念、分类、机理、发展过程、影响因素、发火期、火灾预防和预测预报方法以及系统的设计与实现，这为进一步开展这方面的研究工作奠定了基础。本书的特点是理论和实践并重，突出内容新颖性，强调方法实用性，注重系统可操作性。本书分四章：

第一章，绪论，论述了问题的提出及研究的意义。

第二章，煤炭自燃，从理论方面论述了煤炭自燃的概念、分类、机理、发展过程、影响因素、发火期、火灾预防等内容。

第三章，煤炭自燃预测预报方法，从方法方面重点介绍了多

种较为实用的煤炭自燃预测预报方法。

第四章，煤炭自燃专家系统 CSBES，从系统方面介绍了煤炭自燃专家系统 CSBES 的结构及系统的设计与实现等内容。

本书是在陈立文同志研究生论文“煤炭自燃专家系统 CSBES”与煤炭院校优秀青年科学基金资助项目“煤炭自燃发火危险程度预报研究”科研报告的基础上，根据博士生导师孙宝铮教授、陈宝智教授、王英敏教授等近 10 位专家教授的意见修改和补充后完成的，在此对他们表示衷心地感谢！限于本人的学识水平，许多工作还显得比较粗糙，许多问题还有待于进一步深入研究。应该说这一工作才刚刚开始，无论是理论研究，还是应用实践都存在着较大的空白，但是，初步的研究成果已经展示了这一领域诱人的前景。

必须提到的是，我要向那些在这一研究工作中给予我极大支持和帮助的老师、朋友表示诚挚的谢意。

此书的出版得到“河北省教育厅学术著作出版基金”和“煤炭院校优秀青年科学基金”的资助。

作 者

2001 年 2 月于天津

目 录

第 1 章 绪 论	1
第 2 章 煤炭自燃	5
2.1 煤炭自燃概念	5
2.2 煤炭自燃分类	7
2.3 煤炭自燃机理	8
2.4 煤炭自燃发展过程及危害	13
2.5 煤炭自燃影响内外因素	20
2.6 煤炭自燃发火期	27
2.7 煤炭自燃火灾及预防	28
第 3 章 煤炭自燃预测预报方法	33
3.1 煤炭自燃早期预测预报的气体成分分析	33
3.2 煤炭自燃早期预测预报的灰色理论分析	42
3.3 煤炭自燃早期预测预报的模糊聚类分析	48
3.4 煤炭自燃早期预测预报的微机模拟分析	58
3.5 煤炭自燃早期预测预报的模糊推理分析	64
3.6 煤炭自燃发火危险程度的系统聚类分析	75
3.7 煤炭自燃发火危险程度的逐步聚类分析	83
3.8 煤炭自燃发火危险程度的模糊识别分析	99
3.9 煤炭自燃发火危险程度的模糊综合分析	103

3.10	煤炭自燃发火危险程度的模式识别分析	109
3.11	煤炭自燃发火危险程度的变权控制分析	114
3.12	煤炭自燃发火危险程度的灰色关联分析	118
第 4 章	煤炭自燃专家系统 CSBES	123
4.1	概 述	123
4.2	煤炭自燃专家系统 CSBES 的结构	128
4.3	煤炭自燃专家系统 CSBES 的设计与实现	130
	主要参考文献	148

第 1 章 绪 论

在采矿工程中，包括地质勘探、矿井设计建设、采掘生产、安全维护以及运输、选矿等众多环节都要涉及到大量的信息处理问题，涉及到为处理信息所必须的数学分析与计算。采矿工程科学与技术研究不断深入，人们已明显地感觉到传统的数学工具在处理更加复杂的系统时非常软弱无力，甚至无法对所研究的对象建立起一个较理想的数学模型。这在一定程度上也制约着采矿工程中某些学科研究的深化。

在采矿工程中存在不少这样的学科，它的研究深化对数学工具有着强烈的依赖性，它需要利用数学工具来揭示其自身的运动规律。然而，人们却又很难找到一种很有效的数学方法来处理其系统信息，以达到令人满意的结果。在这些学科中，最具代表性的一类就是采矿自然灾害的预测与防治技术的研究。

煤炭自燃预测预报研究的目的是揭示煤炭自燃的发生规律，科学的预报就是在一定的周围环境和条件下，对煤炭自燃的客观规律及其变动机理加以认识，进而揭示其未来的发展趋势和对煤炭自燃发火危险程度给出正确的判定。以此选择相应对策，控制煤炭自燃的发展，减少其造成的损失，实现安全生产。

目前，我国煤矿正在大力发展计算机的应用，并向实用化和效益化方向发展，增强计算机实用性的重点之一，是努力保证煤矿安全生产。煤炭井下火灾（包括煤炭自燃放火），是煤矿井下的重大火灾之一。煤矿井下火灾又可分为内因火灾和外因火灾。内因火灾约占井下火灾的 70%，在自燃放火严重的煤矿区高达

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。井下火灾在发生发展过程中溢出大量有毒、有害气体，随风流扩散蔓延，其烟雾常常造成井下人员中毒死亡，给煤矿安全与生产造成极大的损失与危害。据国内外资料统计，在矿井火灾事故中，有95%以上的遇难人员是因烟雾中毒死亡的。

矿井火灾还可以造成煤尘与瓦斯爆炸的连锁反应，致使灾害的破坏程度加大，这是酿成煤矿重大事故的原因之一。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%。在全国煤矿看来，自燃火灾数量大、分布范围广、产生火灾情况复杂。所以，防止矿井火灾是保证煤矿安全生产的重要任务之一。其中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。因此研究煤炭自燃发火规律，综合评价及预报煤炭自燃发火的危险程度，对开采煤层采取相应的预防煤炭自燃发火措施，具有重要的指导意义；对保证煤矿安全生产，保护煤炭资源有重要意义；对于矿井火灾科学管理水平的提高及其科学技术的发展也具有重要的意义。

决定煤炭自燃发火危险程度的因素：一是煤炭的自燃倾向性；二是地质和采矿技术。煤炭自燃倾向性是煤炭的一种自然属性，是煤炭发生自燃的基本条件。然而在现实生产中，煤炭自燃发火的危险程度并不完全取决于煤炭的自燃倾向性，而在一定程度上受煤层的地质赋存条件、开拓、开采、通风条件和防范措施的影响。煤炭自燃发火复杂多变的性质，决定了煤炭自燃发火危险程度的预测要远比其它预测问题复杂得多。传统预测技术主要可分为两种：一种是利用数学物理方法与数值分析技术，但由于对模型过于理想化，解算结果往往与实际误差很大；另一种是概率统

计与随机过程方法，由于煤炭自燃发火某些样本（数据）观测困难，因而预测方法难以应用。

煤矿井下火灾（主要指内因火灾）防治的研究，一直是煤矿安全生产的重要课题，而煤炭自燃发火与预测是防治工作的关键环节。同井下其它自然灾害预测问题一样，自燃发火的预测是一个非常复杂和困难的工作，涉及到大量的信息处理问题，涉及到为处理信息所必需的数学分析与计算。其主要原因是井下开采环境恶劣与复杂性所致，无论是客观环境，还是信息的获得都存在着大量不可避免的不确定性。因此可以说，煤炭自燃发火客观上既是一个模糊系统，又是一个介于白色系统和黑色系统之间的灰色系统，这种客观原因使得许多精确的数学预测都失去了作用。随着灾害防治技术研究的不断深入，人们已经明显的感觉到，传统的数学工具在处理复杂系统时非常软弱无力，甚至无法对所研究的对象建立起一个较理想的数学模型。这在一定程度上也制约着安全科学中某些学科研究的深化。煤矿安全防治技术研究的深化，对数学工具有着强烈的依赖性，它需要用数学工具来揭示其自身的运动规律。

尽管目前人们对采矿自然灾害预测与防治技术的研究，已给予了充分的重视，并且取得了相当多的研究成果，但是这些成果与最终揭示某种灾害的内在机理以及能在具有普遍意义的场合下预测和防止这种灾害的目标还都相差得很远。我们对采矿灾害的预测与防治研究远远没有完结。一种自然灾害的发生是我们面对着的客体（对象）系统运动过程的一种外部表现形式，是系统运动规律所决定的因果反映。因此自然灾害预测与防治的关键，在于能否真正把握主客体运动的因果关系。然而，对客体运动因果关系的把握还在于对客体运动的内在规律给予科学、准确地定量描述。发生灾害的客体内在运动规律的数学刻划是十分困难的，

这也正是我们解决这些灾害预测与防治技术的最大障碍。下面，我们以煤炭自燃发火危险程度预报为研究对象，分析其数学描述的困难所在，并对如何克服其障碍方法进行探讨。本书利用模糊数学模式识别、人工智能的方法，研究并提出了适于煤炭自燃发火危险程度预报模型和综合评判的方法。

模糊数学模式识别、人工智能等方法及现代决策技术的发展和广泛应用，为煤炭自燃发火危险程度预报和综合评判提供了新的途径。由于计算机提供的信息及时、快速、准确、全面，必然会提高企业领导对煤矿安全的指挥与管理水平，促进煤矿安全高效生产。随着计算机技术的发展，人们最终走向利用人工智能技术处理矿井各种自然灾害的防治道路。因而，尽快地开发和建立煤炭自燃发火危险程度预报系统已成为一项紧迫的任务。该系统可以及时、准确、全面地向煤矿各级主管部门提供各种有关控制煤炭自燃发火的信息，作为各职能部门进行科学管理的决策依据，推动煤矿安全管理手段的现代化，提高煤矿安全管理水平。该系统实施后，必将有明显的经济效益与社会效益，它是不能简单地用数字表示的，这无疑有着广阔的应用前景和现实意义。

第2章 煤炭自燃

2.1 煤炭自燃概念

煤炭自燃是矿井火灾控制管理中的一个重要概念，其防治是矿井安全生产管理的一个重要任务。但是，迄今我国煤矿尚未有明确的统一定义。因此多年来，各局均根据自己所做的规定进行火灾管理。例如六枝矿务局规定：

- ①煤炭氧化见到烟雾为自燃；
- ②煤壁(堆)温度超过 70°C 为自燃；
- ③一氧化碳浓度大于 0.001% ，且连续 24h 为自燃；
- ④煤炭氧化见到火焰为自燃。

枣庄矿务局规定：

- ①煤壁或空顶上温度在 55°C 以上，一氧化碳浓度超过 0.005% 以上为自燃；
- ②若煤壁或空顶上温度为 $35\sim 54^{\circ}\text{C}$ ，一氧化碳浓度在 0.005% 以下为高温点。

以上这些规定，从煤炭氧化过程在各个阶段所呈现的程度上看，上述的这些规定不仅存在化学反应程度质的差别，而且也存在化学反应量的差异。这种对自燃概念定义的混乱和不严密，不仅不利于火灾的判定与管理，而且也严重地妨碍了技术上的交流和火灾防治技术的科学研究，同时还会由于对火灾判断上的失误带来经济上的巨大损失。因此，对煤炭自燃概念提出统一而科学

的定义，对于提高矿井火灾的科学管理水平和有效地防治技术都具有重要的意义。

把煤炭自燃视为整个氧化过程，显然符合煤矿生产实际。但是，对于安全管理工作的实施，未免过于笼统，以至于在实际生产过程中，这一概念失去了指导意义。我们知道，煤炭的氧化自热到燃烧是一个十分缓慢的过程，在氧化反应的不同阶段，对矿井生产所造成的危害程度也是不同的。另外，在持续充分供氧等主要条件不改变的情况下，氧化反应过程是有序的。如何有效地判断出煤炭的氧化程度，并施以相应的对策来改变其反应过程的序行为，这构成了煤炭自燃发火防治研究的主要内容。因此，对煤炭自燃过程更细的研究是十分必要的。

综上所述，我们有必要按照煤的氧化过程中各阶段对煤的自燃全过程进行有序的分类（划分），而煤炭自燃概念是氧化过程有序类的总和。所应注意的是，在对煤炭氧化过程进行类别划分时，必须尊重煤矿多年来一直沿用的“煤炭自燃发火”的传统习惯定义，又对于矿井火灾防治与管理具有指导意义。

何谓煤炭自燃，虽然在我国还没有确切的统一定义，但是从化学中可知，自燃是物质在空气中发生氧化作用而自动发生燃烧的现象。而燃烧则是物质剧烈氧化而发光、发热的一种化学现象。由此可知，煤炭自燃则是煤炭在空气中剧烈氧化而发光、发热的一种化学现象。

物质在空气中氧化，有的氧化较快，有的氧化较慢，煤炭氧化是极为缓慢的。因此，煤炭从氧化自热到煤炭燃烧出现火焰是缓慢的氧化过程。这个过程是在不断连续供氧充足的条件下，随时间推移，热量积累与氧化程度加剧循环渐进的过程。伴随这一氧化反应过程，在不同反应时期、不同反应阶段，将分别从煤中相对应地裂解出一氧化碳、二氧化碳、烷、烯、炔烃及酮、酚、

醚、醛等高分子有机气体。若煤中含有黄铁矿、黄铜矿等硫化物质时，还将产生二氧化硫等气体。同时使人嗅到有干燥味、石油味、煤油味、松节油味及焦油气味等。由于氧化反应放出大量热量，因此，伴随这一反应过程还将使煤与周围介质的温度对应于氧化时态和阶段升高某一数值，使热辐射相应增强到某一程度，并使其周围介质发生相应影响程度的化学变化和物理变化。如周围介质含有水，会使其表面出现“水珠”、周围出现“水雾”等。若周围介质含有某些气体，也会程度不同地裂解出来。煤炭氧化达到燃烧程度，将会出现大量的煤烟，出现火焰时将会产生更强烈的辐射等。这些化学变化和物理变化对于生产矿井，均程度不同地存在威胁。即使煤炭氧化初期阶段，也可能造成矿井局部封闭，停止采掘工作。因此，人们在处理煤炭自燃时，就不仅仅视其为发光、发热那一剧烈氧化阶段了，而是已经将其概念外延。从矿井发生煤炭自燃的实际情况看，井下绝大多数煤炭氧化都没有出现明显的火焰，仅产生大量的有害气体。发生在采空区和煤柱内及风量较大的巷道内的煤炭自燃，也难觉察到火焰。对这些情况，为了保证安全生产，均视为煤炭自燃。所以，煤矿所讲的“煤炭自燃”是指煤的氧化自热到煤燃烧出现火焰的整个氧化过程，是一个广义的概念。这样定义“煤炭自燃”的概念既便于自然灾害的控制管理，又尊重多年来煤矿一直视煤炭自燃是一个模糊概念的传统习惯。

2.2 煤炭自燃分类

由于“煤炭自燃”在煤矿中是一个广义的概念，泛指煤的氧化自热到煤燃烧出现火焰整个氧化过程，而该过程各个阶段的氧化程度是不一样的，因此，“煤炭自燃”不能确切表示各个氧化阶

段。为使煤炭自燃概念在各个氧化阶段有确定意义，将煤炭自燃划分为若干类。

根据煤炭科学研究院抚顺分院对我国各种煤的加热分解，按煤的氧化过程，采用模糊聚类分析法，将煤炭自燃分为 5 类：

I 类自燃为剧烈氧化，并出现发光、发热现象；

II 类自燃为强烈氧化；

III 类自燃为快速氧化；

IV 类自燃为缓慢氧化；

V 类自燃为自热初期。

2.3 煤炭自燃机理

2.3.1 煤炭自燃机理假说

煤炭自燃是煤矿井下生产中重大自然灾害之一，因此，人们很早就进行了广泛地研究。从 1862 年德国的戈朗布曼（Grumbmann）发表的文章到现在已有 100 多年，在此期间，发表了许多研究成果，先后提出许多学说或假说。但是，由于煤炭的构成及其自燃过程极为复杂，受许多因素影响，迄今还没有能完善解释煤炭自燃的学说，该问题已成了世界各国没有解决的一大难题。尽管如此，由于各国科学工作者和专家们的努力，有些学说或假说能够形成系统被人承认，或在一定时期内被人承认。根据这些假说研究的情况来看，概括起来主要有下列 6 种：

- ①自燃细菌导因说；
- ②自燃黄铁矿导因说；
- ③自燃酚基导因说；
- ④煤—氧复合导因说；
- ⑤自燃活性煤质粘土岩导因说；

⑥自燃过氧化物催化导因说。

现将几种主要学说做一介绍。

1. 煤炭自燃细菌导因说

细菌导因说认为煤炭自燃是细菌的作用。究竟细菌在煤炭自燃过程中是直接作用，还是间接作用，各抒己见。波特尔经研究认为，酵母菌的发酵作用在煤的自燃过程中起决定性作用，而哈尔丹等人认为，菌的作用不在于它本身，在于它接触煤后将产生一些易于氧化的化合物，它们与氧接触放出大量的热使煤升温而自燃。这就从原则上否认了菌的本身作用。

杜波斯和齐茨凯维兹研究泥煤的氧化过程后认为，微生物生长的过程是一个放热的过程。30℃以下时主要是蘑菇菌和具有亲氧特性的菌类在起作用；30℃至 60~70℃则是亲氧菌类在起作用；超过此温度亲氧菌类即死亡，温热菌类繁殖。温度超过 72~75℃时，所有生物过程都死亡。

细菌导因说在实践中也遇到了很多矛盾，它很难为人们所信服。温米尔每格蕾哈姆的研究都说明了这一点：放在真空中温度 100℃以下的煤炭，经过 20h，所有细菌都会死掉，它们的自燃倾向性与加热前完全相同。因此，这一学说没有被人们广泛承认。

2. 煤炭自燃黄铁矿导因说

这种学说把煤的自燃主要归因于黄铁矿的作用。它是 17 世纪初叶为甫洛特等人所研究提出，且首次用于解释煤炭为什么会自燃的学说。此学说认为，煤炭自燃是氧和水与煤中的黄铁矿按以下的化学反应式作用生热的结果：



这种放热反应促使煤炭发热，在适宜条件下而导致燃烧。

在此基础上，很多学者曾探讨过不同因素的作用，如马甫斯顿的研究认为，煤炭自燃是由于散布在煤中的黄铁矿氧化成亲氧