

COAL—GAS MEDIA MECHANICS

煤—瓦斯介质力学

黄运飞 孙广忠 成彬芳 著

煤炭工业出版社

C040814

TD713.1

中国科学院地质研究所
工程地质力学开放研究实验室

煤—瓦斯介质力学

黄运飞 孙广忠 成彬芳 著

煤炭工业出版社

(京)新登字 042 号

内容简介

煤—瓦斯介质力学是本书提出的一门新的分支学科，用于分析煤与瓦斯突出。

本书共分 9 章。主要论述了煤—瓦斯介质力学的提出、基本原理及基本方法。主要包括：瓦斯在煤层中的赋存、煤—瓦斯介质的结构特征、煤—瓦斯介质的赋存环境、煤—瓦斯介质的力学特征、瓦斯和水在煤层内的渗流、地下采掘的力学效应分析、瓦斯粉煤两相流动、煤—瓦斯介质综合测孔理论及技术等。

本书可供煤矿安全、矿井建设、岩土工程专业有关的生产、科研人员及大专院校师生参考。

煤—瓦斯介质力学

黄运飞 孙广忠 成彬芳 著

责任编辑 冯静 陈昌

*

煤炭工业出版社 出版发行

(北京安定门外和平里北街 21 号)

首都师范大学印刷厂印刷

*

开本：787×1092 1/16 印张：12

字数：292 千字 印数：1—500

1993 年 10 月第 1 版 1993 年 10 月第 1 次印刷

ISBN-7-5020-0955-8/TD·880

书号 3721 定价：15.00 元

前 言

煤与瓦斯突出是煤矿安全生产中的一大难题。尽管各突出有关国家投入了大量的研究力量，取得了许多可喜的进展，但突出仍经常发生，且随着采深增加，突出现象有增无减。

我国煤与瓦斯突出非常严重，至今仍不时发生大型或特大型突出事故。七五期间，国家将“煤与瓦斯突出的综合治理”列为煤矿安全的重点攻关项目之一。根据攻关项目的总体要求，著者承担了“煤与瓦斯突出机理及直接参数快速钻孔法研究”课题，并在中国科学院工程地质力学开放研究实验室申请了“充气煤样的力学特征”课题，开展相应的研究工作。

在研究过程中，我们感到突出机理在总体上还是比较清楚的，在定性上的认识是比较一致的，绝大多数都接受综合假说的观点，即：突出是在地应力、瓦斯、煤、围岩共同作用下，受采掘扰动所激发的。但目前还缺乏定量或半定量的评价方法，未形成适用于突出分析的基础理论。因此，著者进行了一些有关突出的实验研究及现场观测，进而对与突出过程有关的几个力学现象进行了分析。为了便于实用，我们基于突出机理的研究成果，提出用现场综合测孔技术测定与煤层突出有关的几个特征参数。本书便是在这研究成果的基础上写成的。

全书共分9章。第一章概略地论述了煤—瓦斯介质力学的提出、基本原理及方法；第二章阐述了煤—瓦斯介质的形成、瓦斯在煤层中的赋存；在第三章中，全面论述了煤—瓦斯介质的结构特征及其分类；第四章着重讨论了地应力、瓦斯压力这两个环境因素及其对煤—瓦斯介质的影响；在第五章中，对煤—瓦斯介质的变形、强度、破碎、渗透性等力学特征进行了详细的论述，这也是煤—瓦斯介质力学的核心内容之一；第六章主要讨论与突出问题有关的瓦斯和水在煤层内的渗流机制及分析方法；而第七章则较为全面地研究了地下采掘的力学效应及其分析方法，其中包括有限单元法、边界单元法及离散单元法；第八章讨论了突出发生后所形成的瓦斯粉煤两相流动的有限差分法分析，并对突出过程的计算机模拟进行了讨论；最后，在第九章叙述了我们提出的瓦斯突出煤层的综合测孔理论及技术。

煤与瓦斯突出现象已发生了近170年，煤—瓦斯介质力学的提出，除了著者在七五期间所进行的研究外，还与国内外广大研究者已有的研究成果是分不开的。在研究过程中，著者得到了 Dr. L. Paterson (CSIRO) 及 Prof. Dr. A. J. Hargraves (Wallgong University) 的帮助，国内鲜学福、于不凡、王佑安、周世宁、吴兆申等瓦斯问题专家给予了著者很多启发。“煤与瓦斯突出综合治理”项目组的其它课题负责人姚宝魁、许兵、周瑞光、王杰、王靖涛、应育甫、刘承祚、袁崇孚、田时秀、张才根、吴俊等在研究工作中给予了著者许多帮助，书中的有些资料取自他们的研究成果。孙立刚协助完成了综

合测孔仪的研制工作，于劲波完成了部分现场测试工作。还应特别提及的是南桐矿务局瓦斯研究所、东林煤矿、鱼田堡煤矿在现场试验及取样中给予了著者通力合作，其中尹代勋、罗信华、谢梦章、罗昭林、蔡春祥、李正祥等参加了部分现场工作。梁金火、王轩、邢纪波、王克全等对书中的有些观点进行过深入的讨论。

本书的雏形是黄运飞的博士论文“煤—瓦斯介质力学研究”，该论文经国内多位专家教授审阅，并提出了许多宝贵意见，这些意见成了改写本书的基本依据。王思敬、姚宝魁、扬志法先生对本书的出版给予了大力的支持。《军工勘察》杂志社的冯静编辑认真审阅了本书的初稿，并精心修编。在此，著者表示衷心的感谢。

著 者

1993.8 于北京

目 录

前言

第一章 概论	(1)
1.1 煤与瓦斯突出简况	(1)
1.2 煤与瓦斯突出的本质特点	(2)
1.3 煤—瓦斯介质	(3)
1.4 煤—瓦斯介质力学的基本原理	(5)
1.5 煤—瓦斯介质力学的研究方法及其内容	(6)
第二章 瓦斯在煤层中的赋存	(8)
2.1 煤—瓦斯介质的形成	(8)
2.2 瓦斯在煤层中的赋存状态	(10)
2.3 吸附瓦斯	(12)
第三章 煤—瓦斯介质的结构特征	(18)
3.1 煤的孔隙	(18)
3.2 煤—瓦斯介质中的结构面	(24)
3.3 结构级序及分类	(27)
3.4 鱼田堡煤矿 6 号煤层结构特征及其与突出的关系	(29)
第四章 煤—瓦斯介质的赋存环境	(33)
4.1 地应力场	(33)
4.2 瓦斯压力场	(43)
4.3 地下水活动	(47)
第五章 煤—瓦斯介质的力学特征	(48)
5.1 成型煤样及实验设备	(48)
5.2 煤—瓦斯介质的变形机制	(50)
5.3 煤—瓦斯介质的强度特征	(62)
5.4 煤体破碎机制及连续损伤理论分析	(67)
5.5 鱼田堡煤矿煤岩破裂全过程的实验研究	(71)
5.6 煤—瓦斯介质的渗透性	(77)

第六章 瓦斯和水在煤层内的渗流	(82)
6.1 概述	(82)
6.2 瓦斯和水在煤层内的渗流规律	(84)
6.3 渗流基本方程及典型解	(88)
6.4 煤屑瓦斯解吸特征及其分析	(98)
6.5 瓦斯和水两相渗流的有限元分析	(101)
第七章 地下采掘的力学效应分析	(109)
7.1 地下采掘模型及分析方法	(109)
7.2 有限单元法	(114)
7.3 边界单元法	(121)
7.4 离散单元法	(130)
第八章 瓦斯粉煤两相流动	(142)
8.1 概述	(142)
8.2 瓦斯粉煤两相流动的一般特征	(147)
8.3 基本方程及计算方法	(148)
8.4 计算程序及算例	(155)
8.5 突出的发动条件及过程模拟	(157)
第九章 煤—瓦斯介质综合测孔理论及技术	(163)
9.1 综合测孔理论	(163)
9.2 综合测孔仪	(174)
9.3 综合测孔实例分析	(177)
参考文献	(181)

第一章 概 论

1.1 煤与瓦斯突出简况

煤与瓦斯突出是发生在煤矿井下的一种极其复杂的动力现象。它能在很短的时间内，由煤层巷道或采场突然喷出大量的瓦斯及碎煤，在煤层中形成特殊形状的空洞，并造成强大的动力破坏作用，突出后形成的瓦斯粉煤流可以逆风流运行，突出粉煤可充满数千米长的巷道，因此，突出是威胁煤矿安全生产的严重地质灾害之一。

世界上第一次典型的煤与瓦斯突出是 1834 年在法国鲁阿雷煤田伊萨克矿井 (Wallsend) 发生的。十九世纪末，在波兰、英国、捷克、匈牙利等国相继发生了煤与瓦斯突出，本世纪初在前苏联的顿巴斯开始发生突出，我国解放后开始发生大规模煤与瓦斯突出，至今发生突出的国家有 20 个，突出较为严重的是中国、法国、前苏联、波兰、日本。据不完全统计，发生突出的总次数已达 4 万余次。

随着开采深度的增加，前苏联、波兰、联邦德国等已发生了岩石和瓦斯突出，仅苏联顿巴斯煤田在 1955~1975 年期间，已有 14 个矿井发生了 3 千多次岩石和瓦斯突出，最大突出强度为 2447 吨。民主德国伟腊地区的门寸格拉本矿于 1953 年 7 月 7 日曾发生过世界上最大的一次钾盐和二氧化碳突出，突出钾盐 10 万吨。发生煤、岩石和瓦斯突出时，喷出气体大体有沼气 (CH_4) 或二氧化碳 (CO_2)，间或也有沼气和二氧化碳的混合气体。大多数国家突出的瓦斯是沼气，法国、捷克、澳大利亚和罗马尼亚的一些矿井也有同时突出二种混合气体的，本书的研究主要涉及到煤与沼气的突出，并简称为突出。

我国的突出是比较严重的。解放前，开采深度较浅，突出现象偶有所闻，有记载的第一次突出是 1939 年 11 月 20 日发生在辽源矿务局富国二井，突出强度为 7 吨，解放后，随着煤炭工业的恢复与发展，一些矿井先后发生了突出。1958 年以前，全国突出次数不多，共计 309 次，突出强度也比较小，最大的只有 121 吨。1958 年以后，随着新矿区的开发与老矿井的延深，采掘规模不断扩大，突出矿井数和突出次数逐渐增多。1958 年 6 月 3 日，重庆地区南桐矿务局直属一井+150 米水平揭开四号煤层时，首先发生了强度 1646 吨的特大型突出，而后在湖南红卫煤矿、辽宁北票矿务局、江西乐平矿务局、贵州六枝矿务局都相继发生 3 千吨级的特大型突出。据不完全统计，到目前为止，已发生突出的矿井 200 多个，突出总数超过 12000 多次，强度在 1000 吨以上的特大型突出近 100 次，我国最大的一次突出是 1975 年 8 月 8 日在四川天府矿务局三汇一矿发生的，突出煤 12780 吨，瓦斯量 140 万立方米。而世界上最大的一次突出是 1969 年 7 月 13 日，发生在前苏联顿巴斯加林煤矿，突出煤 14000 吨，涌出瓦斯量 250000 立方米。

以上资料表明，突出不仅广泛地发生在世界主要产煤国家，而且随着采深的进一步增加，突出的严重性会进一步加大，它不仅威胁到煤矿工人的生命安全，同时还严重阻碍了煤矿生产的正常进行，造成巨大的经济损失。因此，深入而全面地研究突出问题具有巨大的经济效益和社会效益。

自从首次出现煤与瓦斯突出以来，各相关国家都设立了专门的研究机构，对其开展研究工作。研究工作主要沿着两个方向发展，一是基础理论研究，即突出机理研究；二是应用研

究,即突出预测预报及防突措施研究。突出机理是研究煤与瓦斯突出问题的核心,它是突出预测预报及防治突出的理论基础,但由于历史的局限性,过去,人们对应用研究投入的力量较多,而对突出机理研究不够深入,这使得许多防突措施缺乏理论依据,对一些防突措施无法定量评价其作用效果,在现场应用时具有盲目性,防突措施时而有效,时而无效。因此,突出研究的首要问题是突出机理研究。

关于突出机理研究,投入研究力量最大的是前苏联,它既有实验研究,又有现场观测;日本偏重于实验室研究,而西欧各国却偏重预测方法和防突措施,对理论研究投入的力量不大;在我国,抚顺煤研所、重庆煤研所等单位,从60年代起就对突出煤层的应力变形状态、瓦斯赋存状态、煤的物理力学性质等开展了研究工作,提出了一些有关机理的观点。这些观点不尽一致。现在看来,比较趋向于接受综合假说,即认为突出是在地应力、瓦斯及煤、围岩共同作用下,受采掘扰动而激发的。地应力和瓦斯是发动突出的力源,而煤体强度则是突出发生的阻力。现在的困难在于缺乏严密而有力的定量数据及相应的定量分析方法,以此来定量判断哪些因素是起决定性作用?哪些因素是起促进性作用?当外界条件变化时,这些互相制约的因素又将如何演变?本书在大量实验及现场测试的基础上,提出用煤-瓦斯介质力学(Coal-Gas Media Mechanics)来定量分析突出过程,试图在定量化方面向前迈进一步。

1.2 煤与瓦斯突出的本质特点

纵观目前人们所获得的大量研究成果,不论煤与瓦斯突出过程包括有多么复杂的理化效应在内,从总体表现及本质上来看,突出是一个力学过程,发生在突出过程中的许多现象,如采掘效应、瓦斯渗流、煤体破裂和破碎以及瓦斯粉煤两相流动等,都是力学现象,它们必然要受到基本力学规律的控制,同时,也可以应用相关的力学规律来定量研究突出过程。因此,突出可以认为是在采掘扰动激发下,受地应力和瓦斯共同作用而导致的煤岩失稳,并伴随有瓦斯迅猛喷出。这一系列变化都是受到各种力的作用而引起的,也就是说,突出在总体上可归结为一个力学问题来研究。

作为一个力学问题,关键是要搞清楚煤与瓦斯突出发生的客体——煤-瓦斯介质的变形破坏特征及运动规律,在这个问题的研究中,除了进行必要的室内及现场测试外,一个十分重要的观点是“煤-瓦斯介质是地质体”,它是经长期地质作用而形成的,其基本特征必然受地质条件的控制,这就决定了突出是一个地质工程问题,必须用地质的方法,分析地质历史作用及现今的赋存状况,结合相应的力学分析方法,才有可能对突出问题做出正确合理的评价。

尽管突出在总体上可看作一个力学过程,但发生在突出过程中的许多现象确实又是十分复杂的,这种复杂性不仅使得突出问题成为一个世界性难题,也使得我们不可能使用某一门学科的理论来分析突出问题,除了地质条件控制了煤-瓦斯介质的力学机制外,突出过程本身也需要用多种力学方法来分析,如瓦斯在煤层内的渗流需要使用渗流力学的知识,而突出后形成的瓦斯粉煤两相流又是一个流体力学问题,在突出发生前,煤体的变形破坏则属岩体力学的研究范畴。这就决定了突出问题的解决需要多门学科知识的交叉与综合。另外,突出是在人工采掘扰动下发生的,它必然会受外界采掘扰动因素的影响,不同的采掘方法与采掘规模,突出的发生是有差别的,因而突出问题的研究还必须紧密结合采矿工程的具体特点。

突出问题所具有的以上这些特点决定了在分析研究煤与瓦斯突出问题时，不能仅作为一个纯粹的力学问题来看待，必须应用系统的观点，以地质为基础，结合采矿工程的具体特点，应用相关的方法来定量研究突出问题。也就是说，把突出放在地质环境中去，考虑采掘因素，进行力学分析，只有这样才有可能对突出问题做出比较科学的回答，这也是本书所建立的煤—瓦斯介质力学的基本观点之一。

1.3 煤—瓦斯介质

煤与瓦斯突出发生的环境是煤—瓦斯—围岩介质所组成的复杂体系，在这一介质系统内，其物质组成和结构形式以及外部环境条件有着互相依存和制约的关系，并与突出过程发生联系。在研究突出时，必须以系统的观点，充分考虑这些因素之间的相互作用。为了便于刻画这一系统的特征，在本书的研究中，明确了煤—瓦斯介质这一概念，它具有双重的含义，即：煤—瓦斯介质既表示实际的含瓦斯煤岩体，也表示从突出发生环境中抽象出来的一种地质及力学单元，这种地质及力学单元有别于一般的煤体、煤层或岩体，它具有复杂的结构形式和物质组成，并把环境条件，如地应力、瓦斯压力等作为介质的组成部分，纳入到这个系统中进行研究分析。

1.3.1 煤—瓦斯介质的物质组成

煤—瓦斯介质是煤与瓦斯突出这种现象赖以存在的基本客体。煤是由植物残骸炭化形成的，是一种多孔介质，由于形成时期已经历过多次的地质作用，其外生裂隙极为发育，因而煤体是一种多孔裂隙介质，瓦斯是伴随着煤的形成而产生的，并在煤体内贮集、运移，现今煤层所含瓦斯只是其中保存下来的很少一部分。在煤与瓦斯之间存在着十分复杂的物理化学作用，如吸附等。因此，煤—瓦斯介质是一种多相多组分介质，也是一种典型的混合物，一般情况下，煤—瓦斯介质主要由固体煤和气态瓦斯两种物质组成（吸附相瓦斯考虑在固态煤中），是气固两相介质，有时含有液态水或在某种条件下瓦斯成液态赋存时，煤—瓦斯介质就是一个三相介质系统，因此，相间作用规律及组分扩散是研究煤与瓦斯突出的基础性工作之一。

由于煤层与围岩共处于一个体系之中，在突出发生过程中，围岩与煤层相互发生作用，因此，煤—瓦斯介质也包含了煤层周围的岩层及其所含的瓦斯。在突出发生以后，瓦斯粉煤迅猛涌入巷道，在煤层中形成瓦斯粉煤两相流动，这时，煤—瓦斯介质则代表瓦斯—粉煤这种混合物。因此，煤—瓦斯介质是一种广义的介质，它是从突出发生环境中抽象出来的一种地质单元体，与一般煤岩体的最大不同之处在于含有大量的瓦斯。

为了确切地刻画具有不同特征长度的混合物质，有必要在宏观、微观的概念之间，引入“细观”的概念，宏观、细观、微观所代表的特征长度的定义如下：

宏观：煤—瓦斯介质混合物连续介质运动特征长度代表的尺度水平；

细观：煤体孔隙空间特征长度（如孔隙直径）代表的尺度水平；

微观：瓦斯和煤分子运动特征长度（如分子平均自由程）代表的尺度水平。

单一连续介质只有微观、宏观两个尺度水平，而煤—瓦斯介质却存在微观、细观、宏观三个尺度水平，相应地便有两个统计平均过程，微量量的统计平均得到细观量，而宏观量又

是细观量的统计平均值。这样，基于连续介质假设之上定义的宏观概念，如质点、物体、速度、密度等均具有细观平均的含意。

另外，为了刻画煤—瓦斯介质内不同层次的内部结构的影响，可引入体积分数 (Volume Fraction) 的概念。设煤—瓦斯介质由 N 组分组组成，则第 a 组分物质在某点 $(\mathbf{X}, t)$ 的体积分数可表示为：

$$\theta_a(\mathbf{X}, t) = \rho_a(\mathbf{X}, t) / \gamma_a(\mathbf{X}, t) \quad (1.3.1)$$

式中 θ_a ——第 a 组分的体积分数；

ρ_a ——第 a 组物质的体密度 (Bulk Density)，即单位体积的煤—瓦斯介质内第 a 组物质的质量；

γ_a ——第 a 组分物质的真密度 (True Density)，即单位体积的第 a 组分物质的质量。

对于某种混合物，体积分数具有如下特点：

$$\sum_{a=1}^N \theta_a(\mathbf{X}, t) = 1 \quad (1.3.2)$$

体积分数是一个刻画物质细观内部结构的宏观变形。对于某些混合物，本构关系不依赖于体积分数，或者说，体积分数的出现对混合物系统的响应毫无影响，这种混合物通常称为“可混溶混合物” (Miscible Mixtures)，不可混溶混合物 (Immiscible Mixtures) 是这样一种混合物，其组分体积和混合物体积之间细观上可互相区分开来，这种混合物除了一般的宏观变量如形变函数、密度、温度之外，往往还必须引入体积分数 θ_a 来描述其运动。一个体积分数 θ_a 代表一“相” (Phase) 物质，一个“组分” (Component) 的存在则用密度 ρ_a 表示。物理上，相和组分的划分是根据物质之间在细观上还是在微观上可否区别而定，理论模型中则表现为是否引入某组分的体积分数，由此知，一“相”可以作为一个“组分”，而一个“组分”则不一定是一“相”。明确这些概念对以下的多相分析是十分有用的。

1.3.2 煤—瓦斯介质的结构特征

一切物质都各有自己的结构，煤—瓦斯介质的结构特征是很复杂的，这种复杂性不仅体现在受地质构造作用的激烈程度上，还与结构本身的级序有关。我们知道，一定的结构总是与一定的物质发生联系的，因此就有一个客观尺度的问题，在不同的尺度水平下来研究结构问题，所得到的结论是有差异的，就煤层来说，当将研究尺度放大到煤系地层时，则因煤层受地质构造作用程度不同而具有不同的结构形式，如块状结构、板裂结构等。依次将研究尺度缩小，逐渐由宏观领域，经细观而进入微观、超微观，则可以得到煤—瓦斯介质在不同层次下的结构形式，如煤体结构、煤结构、孔隙结构及煤的微结构等。同时不同层次的结构形式又与相应的煤—瓦斯介质的地质、物理化学及力学特征发生联系。因此，在研究煤—瓦斯介质的不同特征时应与相应级序的结构相联系，这样才能得到比较符合客观规律的结论。但在突出问题有关的结构特征研究中，尽管对煤的结构特征很重视，试图找出突出煤层所具有的结构特征。但由于在结构级序这个问题上有些模糊，使得有些研究成果难以用来解决实际问题。在本书的研究中，特别注重了结构级序及不同结构级序下煤—瓦斯介质的结构特征。

1.3.3 煤—瓦斯介质的赋存环境

煤—瓦斯介质的赋存环境是影响煤—瓦斯介质特征的一个很重要的因素，环境因素主要包括：地应力、瓦斯压力、地质构造、地下水、地温等，这些因素具有双重特征，这表现在两个方面，其一是这些因素既是煤—瓦斯介质的环境因素，同时也以煤—瓦斯介质系统为存在实体；其二是这些因素既是分析煤—瓦斯介质特征的环境条件，更是煤—瓦斯介质特征本身所包含的因素之一。如何来理解这一点呢？比如地应力，它是我们进行力学分析的一个很重要的边界条件，但地应力本身是存在于煤—瓦斯介质内的，不同时空的煤—瓦斯介质具有不同的地应力值。另外，从大量的实验资料中，已发现煤—瓦斯介质的力学特征受应力环境条件的影响，如单轴强度与三轴强度相差极大。因此，在讨论煤—瓦斯介质的力学特征时，离不开应力条件，也即应力条件是煤—瓦斯介质力学特征的一部分。

1.4 煤—瓦斯介质力学的基本原理

煤—瓦斯介质力学是研究煤与瓦斯突出有关问题的基础理论，是一门边缘学科，其目的是为了解决煤与瓦斯突出问题。由于煤—瓦斯介质及突出过程的复杂性，在分析研究突出问题时，不是一门学科所能完全解决的，它不仅要考虑地质因素，而且要考虑采矿工程特点；不仅要考虑宏观现象，更要考虑细观及微观机制；不仅要考虑今天的现状，也要追踪历史以及预测今后的发展趋势。这就要求在建立煤—瓦斯介质力学理论体系时，必须引入相关学科的知识，如混合物理论、岩体力学、工程地质学、现代数学、物理化学、采矿工程、计算机科学、煤与瓦斯突出等，这些学科横跨几个领域。因此，煤—瓦斯介质力学是一门边缘交叉学科，这正体现了现代科学的发展趋势，即学科的深入发展产生新的分枝学科，而学科之间的横向交叉则产生边缘学科。反过来说，煤与瓦斯突出这种特殊现象又为其他学科提供了新的研究和应用领域。

煤—瓦斯介质力学的提出和发展是突出问题研究向更深层次发展的必然结果。从突出的研究现状中，我们已看到，对突出机理的认识已渐趋一致，即接受突出的综合假说，但这只是一个定性的说明，缺乏必要的定量手段。在具体应用这一假说时，还不能适应实际工作的需要，因而迫切地要求突出问题有关的研究人员提出相应的定量或半定量评价方法。因此，如何实现突出问题的量化就成为当前突出问题研究界的主要任务之一。

本书提出煤—瓦斯介质力学的目的就是想根据突出过程的本质特点，发展一套定量分析方法。前已指出，对突出的认识及分析，必须以地质为基础，考虑采掘扰动的影响，进行力学分析。因此，在使用煤—瓦斯介质力学分析实际问题时，其分析过程及基本原理见图1.4.1所示。首先，应根据地质勘探及地质预报搞清楚煤—瓦斯介质的赋存环境及基本特征，结合采掘工程特点，便可提出合理的分析模型。然后，使用相应的分析方法判断突出是否发生，如果突出要发生，则需要通过对煤—瓦斯介质及赋存环境、采掘作业的改造，再进行一次分析，预报突出，完成一个循环的计算分析工作，有时，需要几个这样的循环才能完成对实际突出问题的分析。

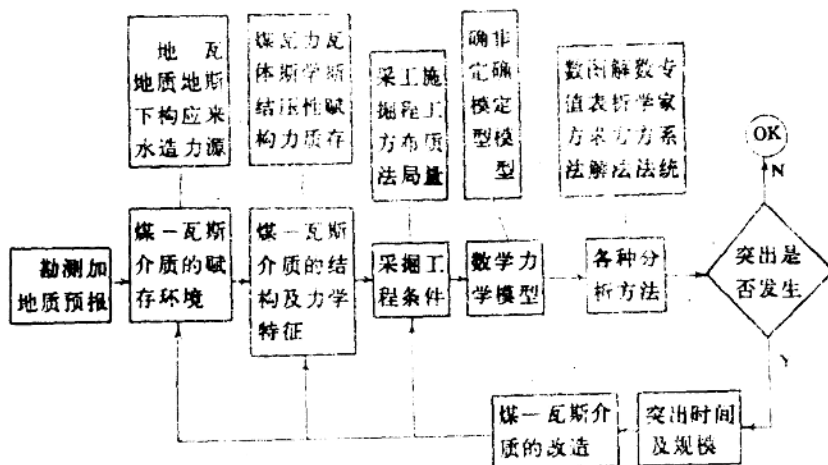


图 1.4.1 煤-瓦斯介质力学的分析原理

1.5 煤-瓦斯介质力学的研究方法及内容

由于突出问题与地质、力学、采矿紧密相关，因而地质、力学及采矿中的许多方法均可用于分析研究突出问题，但由于突出问题本身的特点，这些方法在突出中具体应用时，不能照搬这些方法，应有自己的特色，详见图 1.5.1 所示，其中需要特别强调的是综合分析方法，也就是做到地质、力学和采矿三者有机的结合，形成一个互为补充的完整分析评价系统，实现的方法应以专家系统为发展方向。关于煤-瓦斯介质力学的研究内容，通观突出全过程及有关问题，研究内容主要包括如下几个方面：

(1). 煤-瓦斯介质的赋存环境 实质上是研究煤-瓦斯介质的边界条件，如地应力、地下水、地质构造等。这些条件与地质作用历史有关。因此，需要搞清楚煤-瓦斯介质的形成历史、研究方法、经历的地质作用以及现在的赋存状态，这些因素对煤-瓦斯介质本身的特征也有较大的控制作用；

(2). 煤-瓦斯介质的结构及物理力学特征 在宏观上把握了煤-瓦斯介质的赋存环境的基础上，还需要对煤-瓦斯介质的结构及物理力学性质进行研究，主要是煤-瓦斯介质的结构特征及其所具有的力学性能、破碎特征及煤与瓦斯之间的物理化学作用，以便于为分析模型提供相应的本构方程；

(3). 瓦斯在煤层内的流动 采掘扰动了煤-瓦斯介质所处的平衡状态，以高压赋存于煤层内的瓦斯将沿煤层内的孔隙（或裂隙）运移，研究这种流动规律及分析方法，是定量评价突出不可或缺的一部分；

(4). 地下采掘效应 突出是在地下采掘扰动下发生的，因此必须从定量的角度来弄清楚采掘究竟意味着什么？它对煤-瓦斯介质本身及其赋存环境会带来一些什么影响？主要需要研究不同采掘方法的力学作用，采掘扰动后围岩及煤层的变形、破坏及运动规律；

(5). 瓦斯粉煤两相流动 当突出发生后，将伴随有大量的瓦斯粉煤涌出，研究这种运动规律可以定量分析突出的发展过程及突出规模。对这个问题的研究，以前没有引起人们的注意，人们主要把注意力放在是否会发生突出，至于突出后的情形就不管了。然而，突出得以

进一步发展, 与瓦斯粉煤流密切相关, 况且, 要预报突出规模, 不研究这种混合流特征是不行的。

(6). 现场测试 为了使煤—瓦斯介质力学能真正解决实际突出问题, 正确而方便地获取有关初始边界参数是必须的, 没有这些参数, 分析工作就难以进行。针对突出煤层所具有的特点, 本书主要叙述了我们提出的用综合测孔技术来测量与突出直接相关的几个参数。

(7). 煤—瓦斯介质及其赋存环境的改造 (也即防突措施) 研究突出的目的在于防止突出的发生。这样, 改造煤—瓦斯介质, 使煤—瓦斯介质的运动不向着突出方向发展就显得十分重要, 改造时主要从三个方面入手, 即: 改造煤—瓦斯介质赋存环境, 改造煤—瓦斯介质的特征及改造采掘方法。由于本书的主要目的在于建立煤—瓦斯介质力学, 对煤—瓦斯介质的改造, 已有很多方法可供选用, 这些方法的防突效果, 可以使用本书建立的煤—瓦斯介质力学来分析, 因此, 在本书中, 不专门论述煤—瓦斯介质的改造, 仅在有关章节中做些讨论。

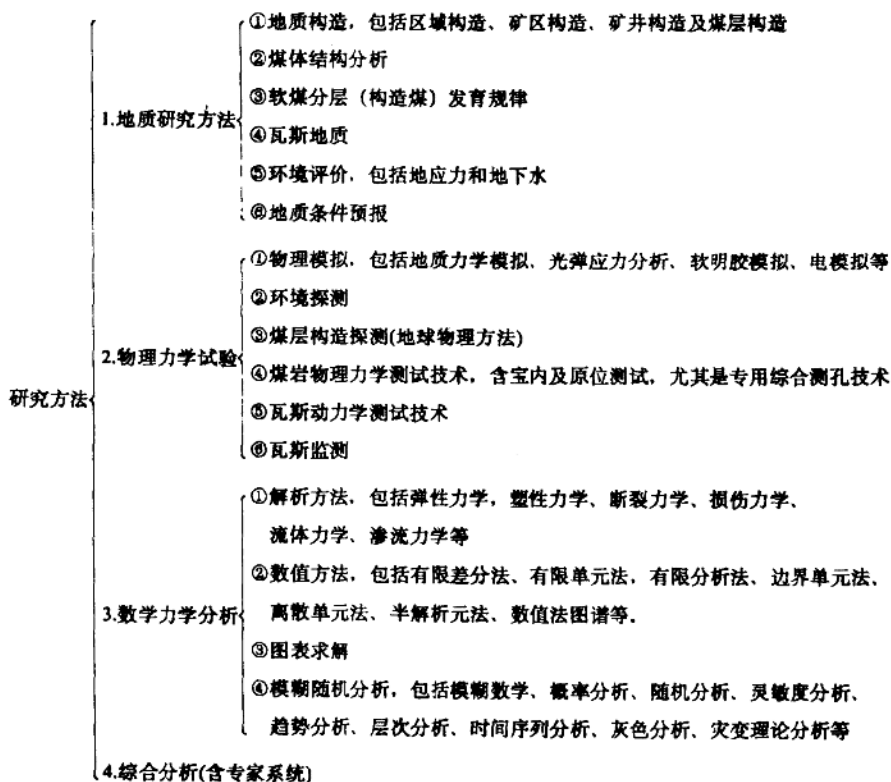


图 1.5.1 煤—瓦斯介质力学的分析方法

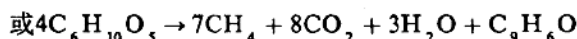
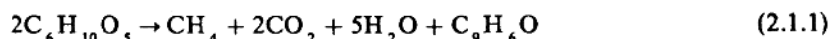
第二章 瓦斯在煤层中的赋存

2.1 煤—瓦斯介质的形成

煤是植物残骸在自然界经过复杂的生物化学、物理化学作用转化而成的。从植物死亡、堆积，到转变为煤的全部过程叫成煤作用，它可以划分为两个阶段：第一阶段是植物不断繁殖、死亡、堆积，其遗体在微生物参与作用下不断分解、化合、聚积的过程。贯穿这一过程的主导作用是生物化学作用。低等植物经过生物化学作用形成腐泥，高等植物则形成泥炭。因此，这一阶段又称为腐泥化阶段或泥炭化阶段。当已形成的泥炭或腐泥被其它沉积物覆盖后，成煤作用就转入第二阶段，即泥炭或腐泥在以温度和压力为主的作用下变化成煤的过程，并称煤化作用阶段，包括成岩作用和变质作用，在这一阶段中起主导作用的是物理化学作用。使泥炭或腐泥进一步转变为褐煤的过程称之为成岩作用，而由褐煤变成烟煤和无烟煤的过程则称之为变质作用。

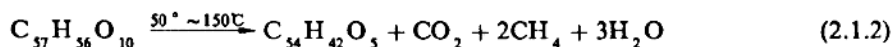
瓦斯是伴随着煤的形成而生成的，在成煤作用的全过程中自始至终都产生瓦斯。因此，瓦斯的原始含量与成煤物质、成煤环境、煤的变质程度、煤层和围岩的性质等均有关，又因后期地质构造是决定瓦斯运移和保存的重要因素，所以瓦斯的最终赋存又必然与地质构造密切相关。成煤过程及伴随的瓦斯涌出可用图 2.1.1 表示。

在成煤的第一阶段，有机质经过分解形成瓦斯，如：



在氧气充足条件下，主要生成 CO_2 、 NO 等气体，在相对缺氧条件下，则主要生成 CH_4 、 H_2 、重碳氢化合物等气体。不过，因此时多暴露在地表或埋藏很浅，故这一阶段所形成的瓦斯，绝大多数逸散在大气之中，保存者不多。

在煤变质作用阶段，煤炭物质要产生热分解，发生一系列变化，同时产生大量煤成气。蒂拉特苏列了一个由褐煤（或泥炭）转化为烟煤的化学反应式：



据前苏联和美国的资料，估计每形成一吨煤的产气量如表 2.1.1 所示。

表 2.1.1 吨煤产气量 (m^3)

褐煤	肥煤	瘦煤	无烟煤
68	230	330	>400

这说明瓦斯的产生与煤的变质程度密切相关，并且变质程度高的煤含甲烷量高。В.А.Успенский 计算了不同变质阶段（以挥发分为指标）吨煤的含气量，如表 2.1.2 所示。

量取决于一系列因素,主要是:成煤的原始材料和形式;从原材料埋藏于水下开始,到变质结束的各个阶段的成煤条件;构造运动及其延续时间;过去和现在的水文地质条件;沉积地层的含炭程度;瓦斯从深部向地表移动的条件等。

2.2 瓦斯在煤层中的赋存状态

2.2.1 瓦斯的性质

瓦斯是煤矿井下生产过程中,从煤层、煤层围岩、采空区以及生产过程中产生的各种有害气体的总称。根据国内外大量分析资料,瓦斯的成分主要是甲烷(俗称沼气, CH_4 , 一般占80%以上)、二氧化碳(CO_2)、氮气(N_2)、重烃类气体(C_2H_6 , C_3H_8 , C_4H_{10} ..., 含量很少,一般<5%)、氢气(H_2)、一氧化碳(CO)、二氧化硫(SO_2)、氩(Ar)、氪(Kr)、氙(Xe)等及其它混合气体。由此可知,瓦斯成分是为较复杂的,况煤层中的瓦斯在其成因、物理化学性质、吸附特性、分子直径等方面都存在着差别。瓦斯试样中各种气体的比例在煤层的各个局部地段是变化的,这不仅仅是由于瓦斯的原始成分不同和地质构造等因素,还由于开采时在煤层中发生复杂的物理化学过程。因此,瓦斯成分及其变化动态在一定程度上能说明煤层的瓦斯动力特性。

突出危险煤层的瓦斯成分早就引起了研究人员的注意,在这个问题上有几种观点,有些观点是互相对立和矛盾的。В.Б.Гевитан⁽³⁸⁾研究了加里宁煤矿的瓦斯成分,主要研究了不同钻孔深度的瓦斯成分及动力特征,瓦斯试样是用“湿法”采入0.5升的瓶中。研究结果表明:试样中重烃含量随着钻孔深度的增加而增加,从煤中真空抽出的瓦斯中的重烃含量也有同样的增加,乙烷和丙烷的最大含量,在涌进浅孔的瓦斯中为4.7%和0.22%,从煤中真空抽出的瓦斯中为25.6%和3.4%。对比瓦斯放散初速度 q_0 和瓦斯成分表明,它们之间没有同值关系,这证明以高的 q_0 值涌进浅孔的瓦斯,绝大部分是经由裂隙渗流而不是由于解吸,而解吸可能导致瓦斯成分的改变,例如重烃增加。同时,所得结果没有提供依据以证实结晶水化物、硝基化合物及其它不稳定化合物在高 q_0 值时于浅孔周围分解。试验结果证明,当孔深在8m以内时,瓦斯成分与孔深无关,并在1~2小时内不发生变化,到一昼夜和超过一昼夜时,甲烷含量增加,这说明解吸过程对瓦斯涌入浅孔起了作用。在掘进平巷时,直接在激发煤与瓦斯突出的震动爆破之前,以及在伴有突出的震动爆破前的一个循环和两个循环进行了一次性瓦斯取样,结果表明,在煤与瓦斯突出前,涌入浅孔的瓦斯成分间或有氮,间或无氮,在以后的平巷掘进时,氮的浓度在地质破碎带达到了0.0279%,但却没有发生突出,因此,突出与含氮量并无直接关系。对于本书研究现场南桐矿务局,课题组内的其它研究者根据煤炭部部颁标准MT-77-84进行了瓦斯气体成分测定,一次解吸气体测定结果表明南桐矿区煤层重烃含量相对较高,在鱼田堡~东林矿区的4[#]煤层中重烃可达13~15%,6[#]煤层则较低,这间接说明了4[#]煤层比6[#]煤层突出危险性大的原因。李文馥(1988)通过全国各地28个矿井的一次解吸气成分的测定结果也表明突出区煤样的重烃浓度多数情况下较非突出区为高。

Л.С.沃里波娃(1982)对喷出式瓦斯、突出煤层瓦斯及非突出煤层瓦斯的成分进行了分析,结果表明,瓦斯成分在这三种情况下是有差别的,喷出瓦斯实际上是纯甲烷(77~96%),重烃含量小于0.01%,突出危险带的瓦斯与非突出危险带相比,沼气和重烃都具有