

中国矿业大学(北京)研究生精品教材

总 序

能源是人类赖以生存和发展的重要物质基础，矿业是国民经济发展的重要支柱性产业，当前全球矿产资源需求持续增长，开采地质条件愈发复杂，矿业领域正经历从“传统粗放”向“智能绿色”的深刻变革。在当今发展和安全并重的新时代，矿业学科与安全学科的深度融合，是实现国家能源安全、经济稳定与生态和谐的必然选择。同时“双碳”目标的提出、全球能源体系格局的演变，对高层次、复合型人才的需求日益迫切。在此背景下，传统的单一学科教育培养模式已难以应对多维度需求挑战，唯有打破学科壁垒、推动学科交叉融合，才能培养出兼具国际视野、创新素养与实践能力的高层次复合型人才，为能源与安全领域的发展提供智力支撑。

中国矿业大学(北京)以“服务国家战略、引领学科前沿、赋能产业升级”为宗旨，以“矿业与安全”为核心，聚焦国家重大战略需求与国际学术前沿，精心策划，将陆续编写出版《高等采煤学》《煤矿机器人》《煤矿瓦斯防治理论与技术》《城市地下工程智能建造》*Inorganic Geochemistry of Coal*《安全管理学》《高等选煤学》《现代煤化工》《经济管理定量分析方法》《岩石断裂力学教程》《软岩工程力学理论与技术》《基于单元的有限体积法》《采动岩体力学特性及渗流理论》《岩层控制与动力灾害防治》《灾害智能识别》《煤田水文地质学》《矿区生态环境遥感案例式教程》《环境保护中等离子体技术与应用案例》《无损检测与预知维护》等针对研究生教育的精品教材。我们始终秉持：

1. 扎根矿业实际，响应国家需求。能源是工业的粮食和国民经济的命脉，而煤炭是支撑经济发展的基础能源，具有重要的战略地位。本系列教材紧密围绕我国矿业发展的重大战略命题，融入大量实践案例，深入思考深部矿产资源高效开采、矿山智能化转型、“双碳”目标下的矿业低碳路径等前沿内容。同时将矿山工程学科的应用进一步延伸，与地下工程等领域结合，引入对技术变革和时代发展的前瞻思考，强化理论联系实际，促进人才培养与国家需求深度融合。

2. 强化交叉融合，推动学科创新。基于现代矿业与安全问题的复杂性，多领域交叉已成为矿业与安全学科未来发展的必然趋势。教材直面未来矿山工程科技难题，融合人工智能、大数据等科技发展，深度剖析矿山开采相关基础原理，解析智能开采、风险防控、生态环保等前沿技术，为资源安全高效开发利用注入新动能。

3. 赋能产业升级，培养复合人才。教材编写团队汇集高校、企业、科研院所等多方

智慧，涉及学科专业较广，强化“理论—实践—应用”闭环，聚焦真实产业难题，将产业痛点转化为教学案例，融入数智化工具与管理模式，推动学生从“技术专才”向“复合型管理者”转型，回应产业对“精技术、懂安全、善管理”人才的迫切需求。

4. 立足全球视野，应对时代变革。能源与矿业关乎国计民生、国家安全与全球发展。教材综合国内外发展现状，从基础理论引申至现实情境，强调以技术创新提升资源自主可控，引导学生剖析国际能源资源格局、矿山科技需求与创新、ESG（环境、社会与治理）评价体系等议题，思考如何在能源资源开发中平衡经济效益、安全底线与生态保护，培养学生的全球视野，成为兼具家国情怀与人类命运共同体意识的优秀人才。

教材是回应时代命题的智慧结晶，更是面向未来的教育探索。我们期待，这套教材以矿业与安全的深度融合为锚点，既筑牢研究生扎根行业的理论根基，又赋予其破局创新的实践才略，为我国能源与安全领域的高质量发展提供坚实的人才保障。

未来已来，唯变不变。面对能源革命的澎湃浪潮与安全挑战的复杂情景，我们坚信，只有以教育为桥、以创新为帆，才能培养出更多堪当大任的能源与安全领域英才。愿学子们，既能深耕专业、锻造本领，亦能心怀天下、勇毅前行，共同书写人类能源文明的新篇章。

中国矿业大学(北京)

2026年1月

前 言

富煤贫油少气是我国的资源禀赋情况,煤炭资源是我国能源供给的压舱石和稳定器。2022 年,我国规模以上工业原煤产量 45.6 亿 t,比 2021 年增长 10.5%。《中国可持续能源发展战略专题研究》指出,至 2050 年煤炭在我国能源消耗中仍占五成以上。煤炭的安全高效开采对我国工业乃至整个社会的发展均具有显著意义。

长期以来,瓦斯造成的矿井灾害事故严重威胁着煤矿相关工作人员的生命财产安全,被称为煤矿的第一杀手。为了遏制瓦斯事故,我国在矿井瓦斯防治基础理论及技术方面投入了大量人力和物力。2005~2020 年,国家累计支持了 6200 余项煤矿瓦斯抽采系统改造工程、4300 项通风系统改造工程,支持建设了 81 个瓦斯治理示范矿井,总结梳理出 40 项先进适用技术,在瓦斯灾害预警、煤矿安全监测监控、煤与瓦斯共采、煤矿瓦斯利用等理论与技术研发方面均取得了重要成果与进步。尽管煤矿瓦斯防治特别是在减少事故方面取得显著成效,但随着矿井开采深度加深,采掘作业规模和工作面推进速度不断加大,加上煤炭资源复杂多变的地质储存环境,使得矿井瓦斯灾害事故风险加大,瓦斯防治难度越来越大。因此,有必要对近年来瓦斯相关的基础理论、技术创新、应用效果进行系统的总结和论述,以便对未来的矿井瓦斯防治工作提供指导,供科研工作者尤其是初步接触瓦斯相关领域的研究生学习参考。

中国矿业大学(北京)安全科学与工程教师团队,是教育部第三批“全国高校黄大年式教师团队”。团队成员长期从事矿井瓦斯防治相关理论基础与应用技术的研究与教学工作,取得了多项创新性研究成果。团队研究深化了煤层瓦斯吸附-解吸-扩散-渗流基础理论,揭示了煤与瓦斯突出关键结构体孕灾机理及突出灾变演化规律,创新发展了本煤层瓦斯高效预抽及采动卸压瓦斯高效抽采关键技术,深入研究了含瓦斯煤岩组合体卸荷损伤界面效应及渐进破坏机制。我们以编写适合研究生阅读的教材为主要目标,在充分借鉴国内外前沿成果的基础上,合理凝练整合团队成果,编写了《煤矿瓦斯防治理论与技术》教材。本书结合瓦斯“安全、能源及环境”的三重属性,从微观向宏观层层递进,从理论基础逐渐过渡到工程技术,深入浅出地介绍煤矿瓦斯相关理论知识及研究热点。

本书共 4 部分共计 9 章。其中,第 1 章~第 5 章为煤矿瓦斯防治基础部分,包括煤矿瓦斯的基础知识、煤中瓦斯的赋存特征、煤基质瓦斯的扩散、煤裂隙瓦斯的渗流和含瓦斯煤的力学性能,主要从微观角度介绍煤矿瓦斯的赋存及运移特征;第 6 章和第 7 章为煤矿瓦斯的灾害特征,包括煤与瓦斯突出和瓦斯爆炸,突出介绍了现阶段深部煤岩动力灾害及灾变演化规律;第 8 章为煤矿瓦斯抽采部分,突出介绍了现阶段全地域立体的抽采模式;第 9 章为煤矿瓦斯利用部分,介绍了当前瓦斯利用的新趋势和新手段。

本书由中国矿业大学(北京)王凯教授担任主编,研究团队参与了撰著工作。其中舒龙勇研究员参与了第1章的撰写工作,杜锋副教授参与了第2章的撰写工作,赵伟副教授参与了第3章的撰写工作,臧杰副教授参与了第4章和第9章的撰写工作,郭海军副教授参与了第5章的撰写工作,周爱桃教授参与了第6章的撰写工作,周彪副教授参与了第7章的撰写工作,徐超教授参与了第8章的撰写工作。此外,博士生杨通、林双双、刘羿甫、郝丹萍,硕士生冯忠凯、李靖、于英杰、杨万雨也参与了撰写工作。

科学技术部、教育部、国家自然科学基金委员会和北京市自然科学基金委员会对我们的科学研究工作给予了资助和鼓励。在此谨向他们表示衷心感谢。

书中不足之处,恳请广大读者批评指正。

王 凯
2026年1月

目 录

总序

前言

第 1 章 煤矿瓦斯的基础知识	1
1.1 煤矿瓦斯的概念及防治的重要意义	1
1.1.1 煤矿瓦斯的概念	1
1.1.2 煤矿瓦斯防治的重要意义	2
1.2 我国煤矿瓦斯防治工作方针、理念与工作体系	3
1.2.1 我国煤矿瓦斯防治工作方针	3
1.2.2 我国煤矿瓦斯防治理念	3
1.2.3 我国煤矿瓦斯防治的工作体系	5
参考文献	7
第 2 章 煤中瓦斯的赋存特征	8
2.1 煤层瓦斯生成与赋存	8
2.1.1 煤层瓦斯生成的阶段	8
2.1.2 瓦斯在煤中的赋存状态	11
2.2 煤中瓦斯吸附性能	11
2.2.1 煤中孔隙的基本特征	11
2.2.2 煤中孔隙的分析测定方法	14
2.2.3 煤的吸附等温线	15
2.2.4 煤层瓦斯吸附解吸迟滞规律	16
2.2.5 煤的极限吸附瓦斯量的影响因素与量化	16
2.3 煤层瓦斯压力	18
2.3.1 煤层瓦斯压力的概念	18
2.3.2 煤层瓦斯压力的分布规律	19
2.3.3 煤层瓦斯压力测定方法	19
2.3.4 煤层瓦斯压力预测方法——安全线法	24
2.4 煤层瓦斯含量	25
2.4.1 煤层瓦斯含量的概念	25
2.4.2 煤层瓦斯含量的分布规律	27
2.4.3 煤层瓦斯含量测定方法	28
参考文献	32
第 3 章 煤基质瓦斯的扩散	34
3.1 扩散的基本定义	34
3.1.1 浓度定义	34
3.1.2 化学势定义	36
3.1.3 浓度定义和化学势定义的联系	36

3.2 扩散系数的分类	37
3.2.1 空间尺度分类	37
3.2.2 内在驱动力分类	39
3.2.3 边界效应分类	42
3.3 扩散模型	43
3.3.1 恒定扩散系数	43
3.3.2 时变扩散系数	49
3.3.3 分形扩散系数	52
3.4 扩散系数的测定	56
3.4.1 吸附降压法	59
3.4.2 解吸体积法	59
3.4.3 吸附质量法	59
3.5 扩散系数的影响因素	60
3.5.1 瓦斯压力和含量	60
3.5.2 温度	60
3.5.3 水分	61
3.5.4 其他因素	62
3.6 粒煤瓦斯解吸动力学过程	62
3.6.1 粒煤瓦斯解吸动力学过程与扩散动力学过程的关系	62
3.6.2 粒煤瓦斯解吸动力学模型	63
参考文献	67
第4章 煤裂隙瓦斯的渗流	71
4.1 渗透率基本概念	71
4.1.1 渗透率	71
4.1.2 透气性系数	72
4.2 煤的渗透特性测试方法	72
4.2.1 瞬态法	72
4.2.2 稳态法	73
4.2.3 现场测试方法(透气性系数)	75
4.3 有效应力与吸附变形对渗透率的影响	77
4.3.1 煤的吸附变形	77
4.3.2 有效应力对渗透率的影响	79
4.3.3 吸附变形对渗透率的影响	79
4.3.4 有效应力与吸附膨胀变形的竞争作用	80
4.4 煤层瓦斯渗透的各向异性	84
参考文献	86
第5章 含瓦斯煤的力学性能	89
5.1 应力与应变的基本概念	89
5.1.1 应力状态	89
5.1.2 应变状态	95
5.1.3 有效应力	99

5.1.4 强度准则	100
5.2 含瓦斯煤的力学特征的测试方法	103
5.2.1 实验仪器	103
5.2.2 实验方案和煤体试样	104
5.3 煤的力学实验	106
5.3.1 单轴加载试验	106
5.3.2 三轴加载实验	108
5.3.3 煤体应力应变关系及宏观破坏特征	109
5.4 瓦斯对煤体强度劣化的作用	120
5.4.1 煤的强度参数和变形参数	120
5.4.2 瓦斯对煤体强度特性的影响	123
5.4.3 瓦斯对煤体变形特性的影响	126
5.5 含瓦斯煤的破坏机理及强度理论	129
5.5.1 Martin 裂隙应变模型	130
5.5.2 煤体损伤扩容渐进破坏机制	131
5.5.3 煤体损伤扩容屈服准则	133
参考文献	134
第 6 章 煤与瓦斯突出	137
6.1 煤与瓦斯突出机理及动力过程	137
6.1.1 煤与瓦斯突出的定义、分类及特征	137
6.1.2 突出发展阶段及特点	139
6.1.3 煤与瓦斯突出机理假说	140
6.2 煤与瓦斯突出的孕育	142
6.2.1 构造煤的形成	142
6.2.2 低渗带的形成	143
6.2.3 突出能量的孕育	145
6.3 煤与瓦斯突出的持续发展	146
6.3.1 突出气固两相流的形成	146
6.3.2 突出固气两相流的流态特征	147
6.3.3 突出固气两相流的冲击波传播特征	148
6.3.4 突出固气两相流煤粉的分选性	148
6.4 煤与瓦斯突出预警及防治	150
6.4.1 煤与瓦斯突出预警	150
6.4.2 煤与瓦斯突出防治	156
6.5 突出后灾变通风的控制	165
6.5.1 突出灾害对通风系统的影响	166
6.5.2 突出后灾变通风控制	167
6.6 深部煤岩瓦斯复合动力灾害	168
6.6.1 煤岩瓦斯复合动力灾害的特点	168
6.6.2 煤岩瓦斯复合动力灾害的防治方法	171
参考文献	173

第7章 瓦斯爆炸	175
7.1 瓦斯爆炸机理	175
7.1.1 瓦斯爆炸的基本概念	175
7.1.2 链式反应与链载体	176
7.1.3 链式反应过程构成	176
7.1.4 较低温度下甲烷氧化链式反应的基元反应方程组	178
7.1.5 较高温度下甲烷氧化链式反应的基元反应方程组	179
7.1.6 反应速率常数 K_f 与反应速率 W	180
7.1.7 增倍因子	181
7.2 瓦斯与煤自燃复合热动力灾害	181
7.2.1 复合热动力灾害的主要特征	181
7.2.2 复合热动力灾害多场演化特性	183
7.2.3 复合热动力灾害监测预警	184
参考文献	185
第8章 煤矿瓦斯抽采	187
8.1 国内外瓦斯抽采概况	187
8.1.1 生产矿井	187
8.1.2 废弃矿井	188
8.2 瓦斯场的空间分布特征	190
8.2.1 垂向分布	190
8.2.2 横向分布	192
8.3 瓦斯场的时间演化特征	197
8.3.1 煤矿瓦斯跨尺度运移规律	197
8.3.2 渗透主控期的瓦斯涌出特征	198
8.3.3 扩散主控期的瓦斯涌出特征	201
8.4 瓦斯的基本抽采方法	202
8.4.1 抽采方法的分类	202
8.4.2 矿井采前抽采瓦斯方法	203
8.4.3 矿井采中瓦斯抽采方法	217
8.4.4 矿井采后抽采瓦斯方法	223
8.4.5 瓦斯扩容增渗抽采方法	224
8.4.6 瓦斯智能抽采技术	236
参考文献	240
第9章 煤矿瓦斯利用	244
9.1 我国煤矿瓦斯利用的发展概况	244
9.2 煤矿瓦斯利用途径	245
9.2.1 瓦斯作为能源利用	245
9.2.2 瓦斯作为化工原料利用	247
9.3 煤矿瓦斯全浓度利用技术	248
9.3.1 高浓度瓦斯利用技术	248
9.3.2 低浓度瓦斯利用技术	248

9.3.3 超低浓度瓦斯利用技术	248
9.3.4 近零浓度瓦斯利用技术	249
参考文献	251

第 1 章 煤矿瓦斯的基础知识

1.1 煤矿瓦斯的概念及防治的重要意义

1.1.1 煤矿瓦斯的定义

煤矿瓦斯是严重威胁煤矿安全生产的主要自然因素之一。广义的煤矿瓦斯是指井下有害气体的总称，它主要包括以下几类：第一类是在煤层与围岩内赋存并能涌入到矿井的气体；第二类是矿井生产过程中生成的气体，如爆破时产生的炮烟等；第三类是井下空气与煤、岩、矿物、支架和其他材料之间的化学或生物化学反应生成的气体；第四类是放射性物质蜕变过程生成的或地下水放出的放射性惰性气体氡(Rn)及惰性气体氦(He)等。

通常所指的煤矿瓦斯是在煤层与围岩内赋存并能涌入到矿井的、以甲烷为主的有害气体的总称。

国内外对煤层瓦斯组分的大量测定表明，煤层瓦斯有约 20 种组分：甲烷及其同系烃类气体(乙烷、丙烷、丁烷、戊烷、己烷等)、二氧化碳、氮、二氧化硫、硫化氢、一氧化碳和稀有气体(氦、氖、氩、氪、氙)等。其中甲烷及其同系烃类气体和二氧化碳是成煤过程的主要产物。当煤层赋存深度大于瓦斯风化带深度时，煤层瓦斯的主要组分是甲烷(>80%)。

图 1-1 和表 1-1 为中煤科工集团沈阳研究院有限公司得出的煤层中烃类气体组分的典型气相色谱图及其质谱定性鉴定结果。

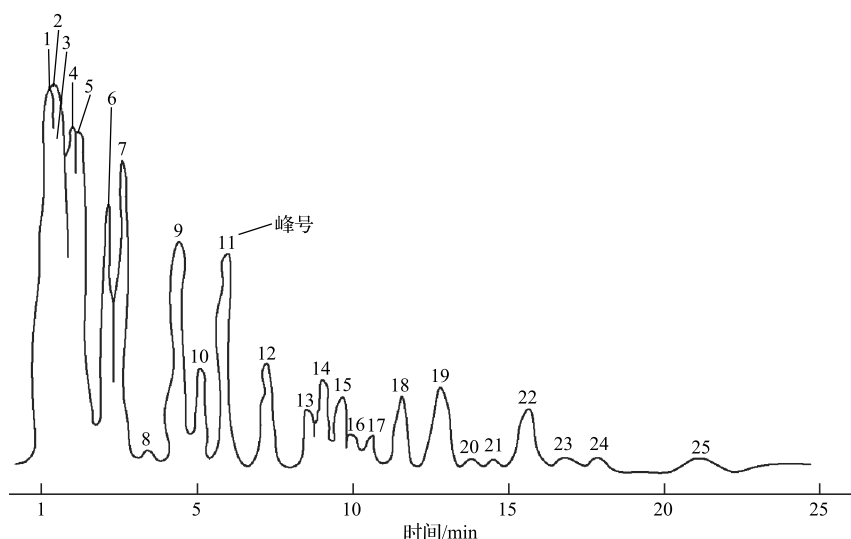


图 1-1 煤层中烃类气体组分典型气相色谱图

表 1-1 煤层中烃类气体组分质谱定性鉴定结果

峰号	组分名称	峰号	组分名称	峰号	组分名称
1	甲烷	10	三甲基戊烷	19	甲基环己烷
2	乙烷	11	正己烷	20	1 反 2 顺-4 三甲基环戊烷
3	丙烷	12	甲基环戊烷	21	1 反 2 顺-3 三甲基环戊烷
4	异丁烷	13	苯	22	甲苯
5	正丁烷	14	环己烷	23	3,2-二甲基己烷
6	异戊烷	15	2-甲基己烷	24	1 顺-3 二甲基己烷
7	正戊烷	16	3-甲基己烷	25	正辛烷
8	2,己-二甲基丁烷	17	2-甲基环戊烷		
9	二甲基戊烷	18	正庚烷		

1.1.2 煤矿瓦斯防治的重要意义

1. 安全需求

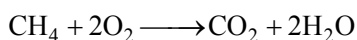
甲烷是一种无色、无味、无臭的气体。在标准状态(温度 0℃, 大气压力 101325Pa)下, 甲烷密度为 0.7168kg/m³, 相对密度为 0.544。甲烷微溶于水, 扩散性很强, 扩散速度是空气的 1.34 倍, 并会很快地在空气中扩散。甲烷本身无毒, 但不能供人呼吸。当空气中的瓦斯含量增高而使氧气含量降低到 9%以下时, 人会由于缺氧而昏迷甚至窒息死亡。甲烷不助燃, 但与空气混合达到一定浓度后, 遇到高温火源时可爆炸或燃烧。因此, 煤矿瓦斯防治要减少瓦斯涌出、预防瓦斯超限、降低瓦斯积聚, 为矿井通风创造有利条件, 同时, 降低煤层中存储的瓦斯含量、提高煤体强度, 防治突出。

2. 环境需求

在评价温室气体对气候变化的影响时, 一般使用辐射强迫。在长生命期温室气体中, 甲烷是仅次于二氧化碳的第二大辐射强迫的温室气体, 在全球人为因素温室气体排放中, 甲烷所占比例为 14.3%(按 CO₂ 当量计算)。在过去的 20 年里, 由于甲烷排放到大气中的速度降低, 甲烷在大气里的含量没有显著增加。根据联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)在 2007 年发布的第四次气候变化报告(AR4), 甲烷在大气中的含量为 1775ppb(1775×10⁻⁹), 其强迫辐射达到 0.48W/m²[1-2]。

自 2001 年 IPCC 发布第三次气候变化报告(AR3)后, 甲烷促使平流层水蒸气含量增加引起甲烷的强迫辐射显著增大, 因此, 在 IPCC 的 AR4 中, 将 100a 时间跨度的甲烷的全球变暖潜势从 23 提高到了 25, 这意味着单位质量的甲烷的辐射强迫是二氧化碳的 25 倍, 即单位质量的甲烷产生的温室效应是二氧化碳的 25 倍[3]。

根据甲烷的氧化反应, 可以计算出燃烧 1m³ 甲烷相当于减少 CO₂ 的当量:



$$A = (\text{GWP}_{\text{CH}_4} - \text{CEF}_{\text{CH}_4}) \rho_{\text{CH}_4}$$

式中： ρ_{CH_4} 为甲烷的密度，取 0.716kg/m^3 ； GWP_{CH_4} 为甲烷的全球变暖潜势，根据 IPCC 的 AR4，其值为 25； CEF_{CH_4} 为单位质量甲烷燃烧后释放的 CO_2 质量，按照分子式 44/16 计算，值为 2.75； A 为单位体积甲烷对应减少 CO_2 的排放量。

根据以上公式和数据计算，燃烧 1m^3 甲烷相当于减少 15.93kg 的二氧化碳排放。

3. 经济需求

煤矿瓦斯是一种清洁能源， 1m^3 纯甲烷的发热量为 35.9MJ ，相当于 1.2kg 标准煤的发热量。据最新一轮全国煤层气(煤矿瓦斯)资源评价成果^[4]，全国埋深 2000m 以浅的煤层气地质资源量为 30.05Tm^3 ，可采资源量为 12.50Tm^3 。煤层气资源区域分布较为集中，鄂尔多斯、沁水等 10 个大型含气盆地煤层气资源占全国总量的 85% 以上。

根据我国城市燃气供气标准， 1Nm^3 燃气的发热量不低于 14.6MJ 。因此，煤矿瓦斯用于城市燃气，其甲烷浓度应不低于 41%。

1.2 我国煤矿瓦斯防治工作方针、理念与工作体系

1.2.1 我国煤矿瓦斯防治工作方针

2002 年 8 月 30 日，国家安全生产监督管理局、国家煤矿安全监察局在辽宁省铁法矿业集团召开了全国煤矿瓦斯防治现场会，时任国家安全生产监督管理局、国家煤矿安全监察局局长王显政同志作了“以防治瓦斯灾害为重点，开创煤矿安全生产工作新局面”重要讲话，提出了“先抽后采，监测监控，以风定产”十二字工作方针，致力于建立防范瓦斯事故的长效机制。

(1) 先抽后采：利用一切可利用的条件和一切能够采用的技术手段，将煤层瓦斯预抽到有关规定的指标以下后，再进行煤炭开采。

(2) 监测监控：煤矿安全监控系统是煤矿安全管理的眼、耳、鼻、舌、手。采用瓦斯检测、监测、控制等仪器和装备，确保安全监控系统运行可靠，及时掌握瓦斯涌出异常情况，并加以断电控制，预防发生瓦斯超限和积聚等隐患，从而控制瓦斯事故。

(3) 以风定产：矿井通风是有效遏制瓦斯事故的重要途径，必须通风可靠、风量充足。按照《煤矿通风能力核定办法(试行)》每年进行一次矿井通风能力核定工作，根据核定的矿井通风能力科学合理地组织生产。通风或抽采能力不能满足要求的，必须降低产量、核减生产能力。

1.2.2 我国煤矿瓦斯防治理念

我国煤矿瓦斯防治理念的发展先后经历了“局部防突措施为主、先抽后采、抽采达标和区域防突措施先行”四个阶段。

1. 局部防突措施为主

20 世纪 50~80 年代,我国煤矿瓦斯治理的重点是,摸清突出规律,引进消化和吸收国外突出防治技术和经验,研究适合我国特点的突出预测方法和突出防治工程方法。在此基础上,20 世纪 80~90 年代末,进入局部防突措施为主的阶段,主要任务是贯彻落实“四位一体”综合防突措施,以 1988 年《防治煤与瓦斯突出细则》版和 1995 年的修订版为代表^[5-6],研究重点是突出危险性预测方法与预测指标,同时兼顾突出防治工程方法的深化研究。

2. 先抽后采

“先抽后采”是瓦斯防治工作的基础,是从源头上治理瓦斯灾害的治本之策和关键之举,体现了瓦斯治理预防为主、关口前移的要求,是长期治理煤矿瓦斯实践经验的总结。王显政同志的讲话没有对“先抽后采”概念的内涵和外延做出解释,但从列举的先进典型实例数据分析,“先抽后采”是煤矿当时瓦斯抽采方法的总称。

这期间也是区域治理与局部治理并重阶段,一些瓦斯治理基础较好的矿业集团,如淮南矿业集团,在长期瓦斯治理经验总结的基础上,提出了“可保尽保,应抽尽抽”的瓦斯治理战略,并得到全国瓦斯突出危险严重矿区的积极响应。2005 年 3 月国家发展和改革委员会、国家安全生产监督管理总局、国家煤矿安全监察局在总结淮南、阳泉、平顶山、松藻等煤矿瓦斯治理经验的基础上,编写了《煤矿瓦斯治理经验五十条》^[7],在瓦斯治理的基本思想中明确提出区域治理与局部治理并重,实施“可保尽保,应抽尽抽”的瓦斯治理战略。并在第三十三条中明确提出:“强制开采保护层,做到可保尽保,并抽采瓦斯,降低瓦斯压力”。第三十五条中提出:“顶、底板穿层钻孔掩护强突出煤层掘进。”

3. 抽采达标

2008 年 7 月 8 日,国务院安全生产委员会在辽宁省沈阳市召开全国煤矿瓦斯治理现场会,时任国家安全生产监督管理总局局长王君同志作了“通风可靠、抽采达标、监控有效、管理到位,把煤矿瓦斯治理攻坚战扎实有效地推向深入”的重要讲话。根据我国煤矿安全生产实际情况,在认真总结煤矿瓦斯治理科研成果和经验教训的基础上,国家安全生产监督管理总局提出了,构建“通风可靠、抽采达标、监控有效、管理到位”的煤矿瓦斯治理工作体系。为贯彻落实全国煤矿瓦斯治理现场会精神,巩固煤矿瓦斯治理攻坚战成果,进一步提高煤矿瓦斯治理水平,有效防范和遏制重特大瓦斯事故,实现煤矿安全生产形势的明显好转,国务院安全生产委员会办公室以安委办〔2008〕17 号文下发了《国务院安委会办公室关于进一步加强煤矿瓦斯治理工作的指导意见》。明确提出“强化多措并举、应抽尽抽、可保尽保、抽采平衡的技术措施,确保抽采达标”。要求煤矿经抽采瓦斯后,采掘工作面瓦斯抽采率、煤的可解吸瓦斯含量和回风流瓦斯含量要达到《煤矿瓦斯抽采基本指标》(AQ 1026—2006)的要求;所有突出矿井必须

实施区域预抽，突出煤层突出危险区域的采掘工作面经预抽后，瓦斯含量和瓦斯压力要达到《煤矿瓦斯抽采基本指标》(AQ 1026—2006)的要求，否则严禁组织采掘作业。

4. 区域防突措施先行

2019年7月16日，国家煤矿安全监察局公布了《防治煤与瓦斯突出细则》(以下简称《防突细则》)，并于2019年10月1日起施行。《防突细则》是在充分吸取事故教训，总结煤与瓦斯突出防治工作经验，推动新技术、新装备、新工艺应用的基础上，对《防治煤与瓦斯突出规定》实施10年来进行的全面、系统的修订，进一步完善了两个“四位一体”综合防突措施，强化对两个“四位一体”综合防突措施实施的过程管理和突出预兆管控，推进煤层“零突出”目标管理。同时，《防突细则》作为《煤矿安全规程》的执行说明和细化补充，对煤矿企业(煤矿)、监管监察部门、中介机构等有关单位在执行防突工作中的职责进行了完善和细化，使防突工作的执行更有针对性和可操作性。

《防突细则》明确提出了“区域防突措施先行、局部防突措施补充”的原则。按照“一矿一策、一面一策”的要求，实现“先抽后建、先抽后掘、先抽后采、预抽达标”。突出煤层必须采取两个“四位一体”综合防突措施，做到多措并举、可保必保、应抽尽抽、效果达标，否则严禁采掘活动。

1.2.3 我国煤矿瓦斯防治的工作体系

2008年7月8日，国务院副总理张德江同志在辽宁省沈阳市召开的全国煤矿瓦斯治理现场会上强调：做好当前和今后一个时期煤矿瓦斯治理工作，要深入贯彻科学发展观，坚持“以人为本”和“安全发展”，坚持“安全第一、预防为主、综合治理”的安全生产工作方针和“先抽后采、监测监控、以风定产”的瓦斯治理工作方针，着力建立“通风可靠、抽采达标、监控有效、管理到位”的瓦斯治理工作体系。

“通风可靠、抽采达标、监控有效、管理到位”，是煤矿瓦斯治理实践经验的概括总结，是对瓦斯治理规律的深化认识，是治理防范瓦斯灾害的基本要求，在瓦斯治理工作中应当自觉遵循、认真贯彻落实。

1. 通风是基础

矿井通风系统可靠稳定，采掘工作面有足够的新鲜风流，瓦斯不聚积、不超限，就不会发生瓦斯事故。因此必须把矿井和采掘工作面通风，作为重要的基础性工作来抓。

“通风可靠”的基本要求是：系统合理、设施完好、风量充足、风流稳定。“系统合理”，就是要求矿井和工作面必须具备独立完善的通风系统，采区实行分区通风，高瓦斯矿井、突出矿井、自然发火严重矿井的采区等，要设专用回风巷，特别是严禁无风作业、微风作业和串联通风作业。“设施完好”，就是风机、风门、风桥、风筒、密闭等井上下通风设施保持完好无损，通风巷道保证有足够的断面并保证不失修。“风量充足”，就是矿井总风量、采掘工作面和各种供风场所的配风量，必须满足安全生产的要求；风速、有害气体浓度等，必须符合《煤矿安全规程》要求；严禁超通风能力组织生产。“风流

稳定”，就是要按规定及时测风、调风，保证采掘工作面及其他供风地点风量、风速持续均衡，局扇通风要符合《煤矿安全规程》的要求，采用双风机、双电源，能自动切换，保持连续均衡供风。

2. 抽采是手段

瓦斯治理必须坚持标本兼治、重在治本。通过抽采，降低煤层中的瓦斯含量，从根本上治理防范瓦斯灾害。因此要加大瓦斯抽采力度，提高抽采率和利用率。

“抽采达标”的基本要求是：多措并举、应抽尽抽、抽采平衡、效果达标。“多措并举”，即地面抽采与地下抽采相结合。因地制宜、因矿制宜，把矿井(采区)投产前的采前抽采、生产过程中的采中抽采和老空区(废弃矿井)等采后抽采措施有机地结合起来，全面加强瓦斯抽采。“应抽尽抽”，即凡是应当抽采的煤层，都必须进行抽采，把煤层中的瓦斯最大限度地抽采出来，降低煤层的瓦斯含量。“抽采平衡”，就是要求矿井瓦斯抽采能力与采掘布局相协调、相平衡，使采掘生产活动始终在抽采达标的区域内进行。“效果达标”，就是通过抽采，使吨煤瓦斯含量、煤层的瓦斯压力、矿井和工作面的瓦斯抽采率、采煤工作面回采前的瓦斯含量，达到《煤矿瓦斯抽采基本指标》(以下简称《抽采指标》)规定的标准。

3. 监测监控是保障

监测监控就是利用先进的技术手段，及时掌握井下各作业地点的瓦斯含量，在瓦斯超限等异常情况发生时，及时采取措施、化解风险，杜绝事故。

“监控有效”的基本要求是：装备齐全、数据准确、断电可靠、处置迅速。“装备齐全”，就是监测监控系统的中心站、分站、传感器等设备要齐全，安装设置要符合规范要求，系统运作不间断、不漏报。“数据准确”，就是瓦斯传感器必须按期调校，其报警值、断电值、复电值要准确，监控中心能实时反映监控场所瓦斯的真实状态。“断电可靠”，就是当瓦斯超限时，能够及时切断工作场所的电源，迫使停止采掘等生产活动。“处置迅速”，就是要制定瓦斯事故应急预案，当瓦斯超限和各类异常现象出现时，能够迅速做出反应，采取正确的应对措施，使事故得到有效控制。

4. 管理是关键

管理是企业永恒的主题，管理不到位，再完善的系统、再先进的装备也难以发挥应有作用。

“管理到位”的基本要求是：责任明确、制度完善、执行有力、监督严格。“责任明确”，就是要把瓦斯治理和安全生产的责任细化，分解落实到煤矿各个层级、各个环节和各个岗位，上至董事长、总经理和总工程师，下至作业现场的每个职工，都要明确自己的具体职责。“制度完善”，就是要建立健全瓦斯防治规章制度，把对各个环节、各个岗位的工作要求，全部纳入规范化、制度化轨道，做到有章可循，并根据井下条件的变化和随时出现的新情况、新问题，不断修改、充实、完善规章制度，不断改进和加强瓦斯

治理的各项措施，使管理工作常抓常新，科学有效。“执行有力”，就是要加大贯彻执行力度，在抓落实上狠下功夫。坚持从严要求、一丝不苟，严格执行规章制度，严厉惩处违章指挥、违章作业、违反劳动纪律的行为。落实岗位责任，实现群防群治。“监督严格”，就是要建立强有力的监督机制，加强监督检查。煤矿各级干部必须切实履行安全生产职责。各级煤炭管理部门要加强行业管理和指导，安全监管监察机构要加大监管监察力度，确保国家安全生产法律法规、上级安全生产指示指令在各类煤矿得到切实认真的贯彻落实。

参 考 文 献

- [1] 袁亮. 我国煤矿区煤层气清洁发展机制项目开发理论与实践[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2008.
- [2] 俞启香. 矿井瓦斯防治[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1992.
- [3] Cheng Y P, Wang L, Zhang X L. Environmental impact of coal mine methane emissions and responding strategies in China[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2011, 5 (1): 157-166.
- [4] 张道勇, 朱杰, 赵先良, 等. 全国煤层气资源动态评价与可利用性分析[J]. *煤炭学报*, 2018, 43 (6): 1598-1604.
- [5] 中华人民共和国煤炭工业部. 防治煤与瓦斯突出细则[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1988.
- [6] 中华人民共和国煤炭工业部. 防治煤与瓦斯突出细则[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1995.
- [7] 国家发展和改革委员会, 国家安全生产监督管理总局, 国家煤矿安全监察局. 关于印发《煤矿瓦斯治理经验五十条》的通知 (发改能源〔2005〕457号) [OL]. (2005-03-22) [2024-03-22]. http://www.nea.gov.cn/2013-10/10/c_132786262.htm.

第2章 煤中瓦斯的赋存特征

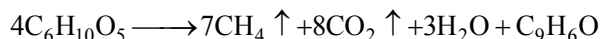
2.1 煤层瓦斯生成与赋存

2.1.1 煤层瓦斯生成的阶段

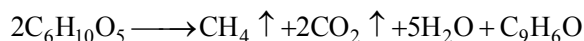
煤层瓦斯是腐殖型有机物在成煤过程中生成的。煤的原始母质——腐殖质沉积以后，一般经历两个成气时期：从植物遗体到泥炭属于生物化学成气时期；在地层的高压高温作用下从褐煤到烟煤直到无烟煤属于煤化变质作用时期。瓦斯生成量的多少主要取决于原始母质的组成和煤化变质作用所处的阶段^[1-2]。此外还伴随构造运动形成的次生物化学成气时期。

1. 生物化学成气时期瓦斯的生成

生物化学成气时期是从原始母质堆积在沼泽和三角洲环境中开始的。在温度不超过65℃条件下，原始母质经厌氧微生物分解成瓦斯。这个过程可用纤维素的化学反应式来概括^[1-2]：



或

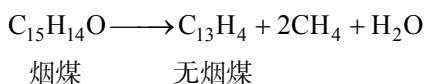
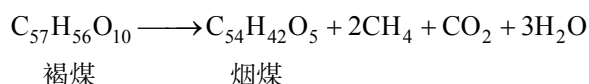
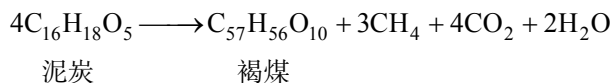


在这个阶段，成煤物质生成的泥炭层埋深浅，上覆盖层的胶结固化不好，生成的瓦斯通过渗透和扩散容易排放到大气中，因此生物化学作用生成的瓦斯一般不会保留在现有煤层内。此后，随着泥炭层的下沉，上覆盖层越来越厚，成煤物质的温度和所受压力也随之增高，生物化学作用逐渐减弱直至结束，在较高的压力与温度作用下泥炭转化成褐煤，并逐渐进入煤化变质作用。

2. 煤化变质作用时期瓦斯的生成

褐煤层进一步沉降，压力和温度加剧，便进入煤化变质作用阶段。在100℃高温及其相应的地层压力作用下，煤体就会产生强烈的热力变质成气作用。在煤化变质作用的初期，煤中有机质基本结构单元主要是带有羟基(—OH)、甲基(—CH₃)、羧基(—COOH)、醚基(—O—)等侧链和官能团的缩合稠环芳烃体系。煤中的碳素则主要集中在稠环中。一般情况下，稠环的键结合力强、稳定性好，侧链和官能团之间及其与稠环之间的结合力弱、稳定性差。因此，随着地层下降，压力及温度的增大，侧链和官能团不断发生断裂与脱落，生成CO₂、CH₄和H₂O等挥发性气体^[2]。

煤化过程中有机质分解脱出甲基侧链和含氧官能团而生成 CO_2 、 CH_4 和 H_2O ，是煤化过程中形成瓦斯的基本反应，可以用下列反应式来表达不同煤化阶段的成气反应：



从上述反应式可以看出，煤化过程中生成的瓦斯以甲烷为主要组分。在瓦斯产出的同时，芳核进一步缩合，碳元素进一步集中在碳网中。随着煤化变质作用的加深，基本结构单元缩聚芳香核的数目不断增加，到无烟煤时，主要由缩聚芳核组成。从褐煤到无烟煤，煤的变质程度越高，生成的瓦斯量越多。但各个煤化阶段生成的气体组分不但不同，而且数量上也有很大变化。

3. 次生物化学成气时期

次生物化学成气是指随着构造运动出现部分地段抬起，在这些抬起地段如环境温度低于 65°C 且与地表水发生水力联系时，就可能再次创造生物化学成气的环境(图 2-1)。次生物化学成气可以解释为何在一些构造带容易积聚大量瓦斯。

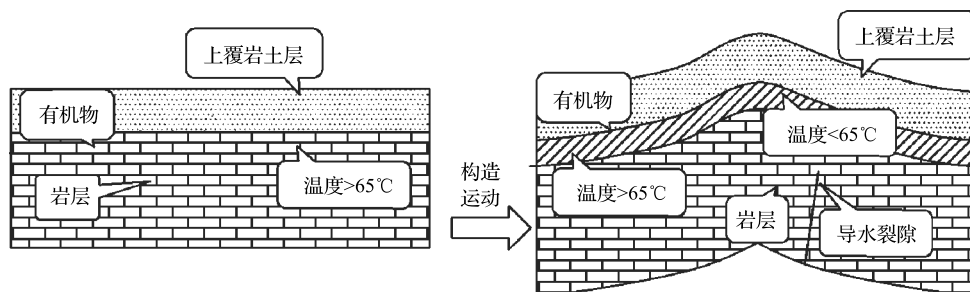


图 2-1 次生物化学成气示意图

一般认为，在埋深小于 1000m 条件下，地温低于 50°C 时，泥炭变成褐煤。这一阶段，仍以生物化学作用为主，可以产生甲烷、乙烷和丙烷等。随着埋藏深度加大，地温进一步升高到 $50\sim 60^\circ\text{C}$ 时，细菌的生物化学作用不再明显，由温度产生的热分解起决定作用，这时煤化变质作用处于长焰煤到瘦煤的阶段，以甲烷为主的烃类物质大量产生。热模拟煤化过程的实验表明，两次甲烷生气高峰都出现在该阶段，甲烷产生量在焦煤时期达到最高值。在焦煤和部分肥煤阶段是重烃产率最高的时期，也是液态烃的主要产出阶段。这个阶段产气的特点是甲烷和重烃兼生并成。当埋深达到 6000~7000m 时，地温超过

160~200℃，贫煤转变为无烟煤。在该阶段，由于有机质芳香化程度和苯环缩聚大为增加，大部分富氢侧键脱落，以及先期生成的重烃在高温下裂解等，均可导致甲烷生成。在该阶段生成的气体组分中，甲烷占绝对优势。

苏联学者 B.A.乌斯别斯基根据地球化学和煤化作用过程反应物与生成物平衡原理，计算出了各煤化阶段的煤生成的甲烷量，其结果如图 2-2 所示。因为泥炭向褐煤过渡时生成的甲烷(68m³/t)很容易流失掉，所以估算煤层生成甲烷量一般都以褐煤作为计算起点。自然界的实际煤化过程远比带有许多假设进行的理论计算复杂，所以这些数据是近似值，仅供参考。

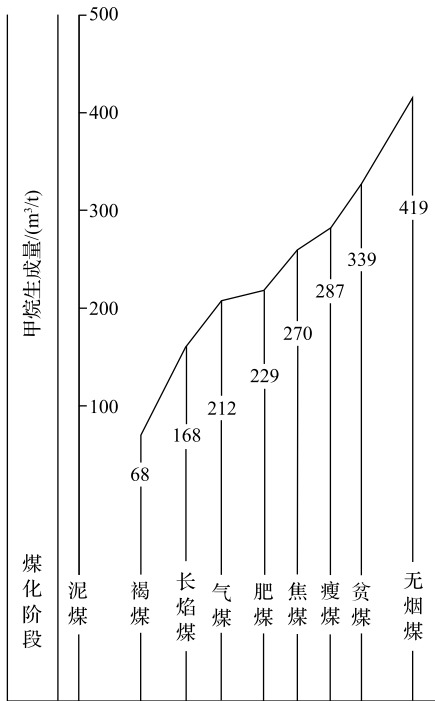


图 2-2 各煤化阶段甲烷生成量曲线

我国一些单位对部分煤进行热模拟实验，得到的不同煤种的产气量见表 2-1。

表 2-1 部分煤热模拟实验产气量(甲烷)(m³/t)

实验单位	产气量	未变质煤	低变质煤		中变质煤			高变质煤	
		褐煤	长焰煤	气煤	肥煤	焦煤	瘦煤	贫煤	无烟煤
煤炭科学研究总院(1987年)	阶段产气量		3~25	10~54	27~102	55~170	108~246	134~333	268~393
	累计产气量	38~68*	41~93	48~122	65~170	93~238	146~314	172~401	306~461
中国石油勘探开发研究院(1985年)	阶段产气量		4~31	7~58	26~108	48~176	86~230	114~321	168~390
	累计产气量	38~68*	42~99	45~126	64~176	86~244	124~298	152~389	206~458