

安全工程专业学位论文

浮选旋流分选机理研究

Study on the Cyclonic Separation Mechanism of Flotation

作 者：\* \*

导 师：\*\*\*教授

中国矿业大学

年 月

**学位论文使用授权声明**

本人完全了解中国矿业大学有关保留、使用学位论文的规定，同意本人所撰写的学位论文的使用授权按照学校的管理规定处理：

作为申请学位的条件之一，学位论文著作权拥有者须授权所在学校拥有学位论文的部分使用权，即：①学校档案馆和图书馆有权保留学位论文的纸质版和电子版，可以使用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编学位论文；②为教学和科研目的，学校档案馆和图书馆可以将公开的学位论文作为资料在档案馆、图书馆等场所或在校园网上供校内师生阅读、浏览。另外，根据有关法规，同意中国国家图书馆保存研究生学位论文。

（保密的学位论文在解密后适用本授权书）。

作者签名： 导师签名：

年 月 日 年 月 日

|  |
| --- |
| 中图分类号 学校代码 10290  UDC 密 级 公开  中国矿业大学  \*\*专业学位论文  基于矿井直流电法的  油型气涌出危险性判识方法与应用  Study on the Cyclonic Separation Mechanism of Flotation  作 者 孔睿 导 师 魏明尧  申请学位 工程硕士专业学位 培养单位 安全工程学院  学科专业 安全工程 研究方向 \*\*\*\*\*  答辩委员会主席 评 阅 人  二○二四年六月 |

**致谢**

感谢ХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХ

感谢ХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХ

**摘 要**

旋流－静态微泡浮选是一种具有我国自主知识产权的新型柱式分选方法与设备。特有的旋流场结构以及在煤炭分选方面的成功应用，为浮选柱技术在我国矿物分选方面的拓展奠定了良好的基础。

ХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХХ

**关键词：**浮选；旋流；分选机理；浮选动力学；矿物分选

**Abstract**

标题：Arial 小二号加粗居中，单倍行距，段前6磅，段后6磅；首字母大写

内容：Times New Roman 小四号，行距固定值20磅；“Keywords”加粗

Young college students are the hope of our country and nation. The historical experience shows that the value education problem for the younger generation cannot be neglected at any time and in any environment. Only through the strengthening of core socialist value belief of the youth, especially young college students, the great mission of achievement of great rejuvenation of the Chinese nation will have reliable backup forces.

Cyclonic static micro-bubble flotation is a new column separation method and device with China self-owned intellectual property. The successful application of this equipment in coal preparation along with its special cyclonic field structure has laid a solid base for the further application of column flotation in mineral processing.

**Keywords:** flotation; cyclonic separation; separation mechanism; flotation kinetics; mineral separation

目 录

[**1 绪论 1**](#_Toc156570222)

[1.1 研究背景和意义 1](#_Toc156570223)

[1.2 研究现状 3](#_Toc156570224)

[1.3 存在的问题及不足 5](#_Toc156570225)

[1.4 主要研究内容和技术路线 5](#_Toc156570226)

[**2 3**](#_Toc156570227)

[**3 采动效应下油型气涌出数值模拟 3**](#_Toc156570228)

[3.1 采动效应下油型气涌出原理 3](#_Toc156570229)

[4 油型气涌出危险性评价体系构建 10](#_Toc156570230)

[5 基于直流电法油型气涌出危险性评价现场应用 11](#_Toc156570231)

[5.1 直流电法探测原理 11](#_Toc156570232)

[5.2 现场概况 11](#_Toc156570233)

[5.3 巷道直流电法观测系统设计 11](#_Toc156570234)

[5.4 现场直流电法响应结果分析 11](#_Toc156570235)

[5.5 油型气涌出危险性评价现场应用及验证分析 11](#_Toc156570236)

[5.6 本章小结 11](#_Toc156570237)

[6 全文总结、创新点及展望 12](#_Toc156570238)

[**参考文献** 15](#_Toc156570239)

[**附录1** 17](#_Toc156570240)

目 录

[**摘要 I**](#_Toc8375_WPSOffice_Level1)

**目录 V**

**图清单 VII**

**表清单 VII**

**变量注释表 VII**

[**1 绪论** **1**](#_Toc8375_WPSOffice_Level1)

1.1 概述………………………………………………………………………………1

**2 浮选柱实验研究…………………………………………………………………7**

2.1 浮选柱研究现状…………………………………………………………………7

……………

**3 浮选柱的旋流场结构……………………………………………………………21**

3.1 浮选柱分选机理………………………………………………………………21

3.2 浮选柱选流场…………………………………………………………………25

……………

**6 浮选动力学…………………………………………………………………… 71**

6.1 柱体背压的影响………………………………………………………………71

6.2 循环矿浆压力的影响…………………………………………………………72

6.3 循环矿浆量的影响……………………………………………………………76

……………

**7 结论……………………………………………………………………………107**

**参考文献…………………………………………………………………………111**

**作者简历…………………………………………………………………………117**

**论文原创性声明…………………………………………………………………121**

**学位论文数据集………………………………………………………………… 123**

**图清单**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 图序号 | 图名称 | 页码 |
| 图1-1 | pH值对黄铜矿上浮率的影响关系曲线 | 5 |
| Figure 1-1 | Influence of pH for chalcopyrite float ratio | 5 |
| 图1-2 | 不同捕收剂的用量对黄铜矿上浮率的影响关系曲线 | 7 |
| Figure 1-2 | Influence of different collector amount for chalcopyrite float ratio | 7 |
| 图1-3 | 实验室试验拟合代码输入界面 | 9 |
| Figure 1-3 | Input interface of laboratory test fitting code |  |
|  |  |  |
|  |  |  |
|  |  |  |
|  |  |  |

**表清单**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 表序号 | 表名称 | 页码 |
| 表1-1 | 快浮装置工业运行状况表 | 16 |
| Table 1-1 | Industrial operation of fast flotation equipment | 16 |
| 表1-2 | 快浮装置主要技术参数 | 17 |
| Table 1-2 | Main technical parameter of fast flotation equipment | 17 |
| 表1-3 | 筛板充填与填料充填的比较 | 17 |
| Table 1-3 | Comparison between sieve plate packing and filler packing | 17 |
|  |  |  |
|  |  |  |
|  |  |  |
|  |  |  |
|  |  |  |
|  |  |  |
|  |  |  |

**变量注释表**

|  |  |
| --- | --- |
| V1 | 反应器入口速度（m/s） |
|  |  |
|  |  |
|  |  |
|  |  |
|  |  |
|  |  |
|  |  |
|  |  |
|  |  |
|  |  |
|  |  |
|  |  |
|  |  |
|  |  |
|  |  |
|  |  |
|  |  |
|  |  |
|  |  |
|  |  |
|  |  |
|  |  |

1 绪论

1 Introduction

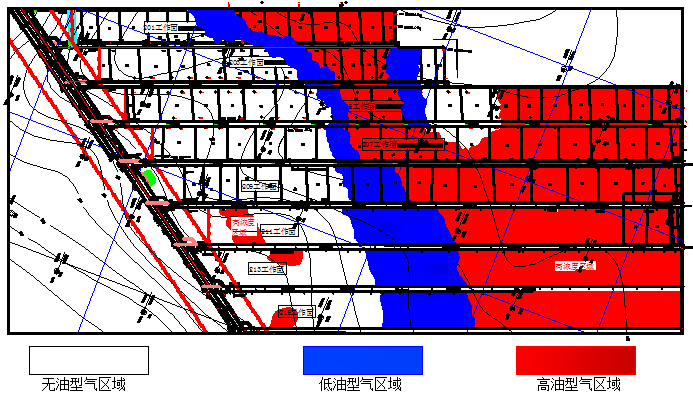
1.1 研究背景和意义

（The Research Background and Significance）

煤炭是一种地球上分布最广泛、储量最庞大的能源资源，同时作为我国的战略资源和主要能源，分别占我国一次能源生产总量的76%和能源消费总量的56.7%，而原油和天然气对外依存度分别达到了73%和43%[1]。在新能源飞速发展的当下，中国工程院预测直到2050年煤炭在我国的能源地位依然能达到50%，这意味着我国再很长一段时间内煤炭的能源主体地位不会发生改变[2]。所以如何以最大限度地减少伤亡的方式开采煤炭，对于确保可靠的能源供应、维护社会秩序和促进国家经济持续增长极其重要。

尽管近年来随着国家对煤矿安全生产工作的高度重视，对相关企业的严厉整顿，以及煤矿安全生产科技的高速发展，使得煤矿事故整体大幅减少。但是随着近地地层中资源的日渐枯竭以及可供开采的绿色煤炭资源量极其有限，导致煤炭开采工作不得不指向深部煤炭资源和非绿色煤炭赋存区。煤炭开采深度和产量的不断增加导致高瓦斯突出矿井的数量也随之水涨船高，且伴随着深部开采环境中高地应力、高渗透地压、高地温以及强烈开采扰动等复杂地质条件，一旦发生矿井事故，应急救援工作难以开展。近二十年全国煤矿事故统计分析表明，在众多矿井事故中瓦斯事故的危险级别最高[3]。而一直以来，瓦斯灾害的研究方向主要聚焦于危险性更大的煤与瓦斯突出瓦斯灾害[4补充煤与瓦斯突出研究]，大量预测与预警技术的研究也是围绕煤与瓦斯突出事故的预测与预警来进行展开，往往只将瓦斯异常涌出作为煤与瓦斯突出灾害的前兆响应[5补充煤与瓦斯在预警方面的研究]，缺少对瓦斯异常涌出预测预警的更深层次研究。而面对新的采场环境挑战，瓦斯异常涌出所造成的瓦斯超限的严重性与防治难度都将直线上升，所以与煤与瓦斯突出相比，瓦斯异常涌出作为煤炭安全开采过程中不可忽视的重点问题，其发生前的特征响应与危险性精准判识同样是亟待解决的重大科学问题[6]。

瓦斯异常涌出过程中，矿井瓦斯的主要来源有开采煤层、临近层煤层以及巷道围岩。一般来说随着时间和空间的推移，围岩瓦斯通常以一致的方式从周围的岩石中缓慢释放，通常量很少，然而，如果周围的岩石存在大量发育裂隙，为气体提供容纳空间，那么气体就会大量积聚。而当采矿活动突然改变应力并导致裂隙联通时，储存的瓦斯可能会突然释放，导致岩石中瓦斯的大量异常涌出，造成采掘面瓦斯浓度超限。围岩瓦斯异常涌出现象在煤油气共生矿井中表现的尤为明显[7]，以黄陵矿区为例，黄陵矿区作为国家“八五”计划重点建设项目和二十项兴陕工程之一，属于典型的煤油气共生矿区。黄陵二号煤矿开采条件复杂，煤油气共生灾害严重，多次发生围岩瓦斯异常涌出现象，其中以底板瓦斯异常涌出为主，通过对涌出的气体进行研究发现，底板异常涌出气体与煤层气不同，其成因类型和气体成分属油型气。2012年至今先后发生四起严重的底板油型涌出事故，其中201胶带巷涌出点底板裂隙内瓦斯浓度最高达到95%，累计涌出瓦斯8500m3；201辅运巷掘进七联巷乡里100m处出现底板油型气涌出，涌出范围逐步扩展至迎头，涌出时间长，衰减速度慢，共计涌出油型气21万m3；205胶带巷油型气涌出实测强度为0.185～1.960m3/min，单孔油型气涌出总量为7600m3；215辅运巷掘进工作面底板探查钻孔时出现油型气异常涌出，24小时涌出量约为1万m3。根据已采工作面底板油型气赋存情况，绘制215工作面底板瓦斯（油型气）赋存图如图1-1所示。特别是随着我国矿井的持续开采，全国瓦斯矿井数量不断增加，以油型气为主的瓦斯异常涌出灾害将在我国其他类似地区带来巨大挑战。

图1-1 201～215工作面瓦斯（油型气）赋存图

目前传统采矿行业为及时发现和预防瓦斯涌出事故，一般通过建立煤矿安全监控预警平台，安装瓦斯浓度、瓦斯压力、气体组分等传感器对煤矿内部关键位置进行监测，或者采用利用瓦斯抽采钻孔对工作面瓦斯涌出量进行预测，实现煤矿安全相关数据实时采集与上传，出现瓦斯浓度超限情况及时报警并由地面工作站管理人员实施组织、指挥工作[]。但对瓦斯涌出时浓度、压力等相关参数的数据监测与传输相比于瓦斯事故实际发生时间具有滞后性，且煤矿瓦斯涌出灾害往往在极短时间内完成，其一旦发生所造成的一系列连锁反应后果不堪设想，而检测系统所发挥的报警功能为时已晚，传统煤矿安全监控预警只能基于瓦斯涌出相关参数进行事后报警，难以对已有监测数据未来变化趋势进行预测与评估，无法做到灾害提前预警预报。随着我国煤炭行业装备技术的不断发展以及人工智能领域的飞速崛起，诸多专家学者运用神经网络、深度学习等计算机领域方法在瓦斯灾害预警问题上取得一定进展[]，但在油型气瓦斯涌出过程中，其影响因素往往存在动态变化，而在目前瓦斯涌出预测预警工作中，一般选取邻近面瓦斯涌出量、煤层埋深、岩层岩性等静态参数做为特征指标，将瓦斯涌出量大小作为单一评判结果[]，已难以满足煤油气共生矿井生产过程中对瓦斯涌出风险预测预警准确性、时效性和动态性现实需求。

……

……

1.2 研究现状

（The Research Background and Significance）

1.2.1 油型气成因研究现状

油型气作为一种特殊类型的天然气，特指分散的腐泥型有机质以及以腐泥型为主的混合有机质，在过成熟阶段成油的热演化过程中，由有机质和液态烃裂解所形成，油型气主要成分为甲烷、乙烷、丙烷、丁烷、戊烷、己烷、氢气、一氧化碳等多种混合气体，其中甲烷为主要构成成分，约为90％。煤层瓦斯与围岩油气共生现象目前主要存在于黄陵矿区、鄂尔多斯矿区、焦坪矿区、甘肃窑街矿区、子长矿区、彬长矿区等煤、油气共生矿井数量较多的地区，油型气瓦斯灾害具有发生时间突然、发生过程隐蔽、涌出量大等特点，特别是以底板涌出形式发生时，后果尤为严重。

黄陵矿区油型气的来源主要有以下方面：一、产气烃源岩。相关学者通过烃源岩评价和油源对比分析可知，鄂尔多斯盆地延长组属于大型内陆湖盆沉积，具有丰富的油源储存，并在漫长的沉积过程中形成了混合型至腐泥型烃源岩，具有较高的产烃能力，黄陵矿区正处于该烃源岩的沉积中心位置重叠范围处。所以分析认为黄陵矿区的底板异常涌出油型气来源于三叠系延长组烃源岩。二、烃源岩热演化史。盆地构造热演化史时影响烃源岩成熟度、煤油气生成、运移和聚集的关键因素之一，地层整体不均匀抬升，湖盆大面积泥炭沼泽化，在地层发生的埋藏热与岩浆侵入等构造热事件，使地层温度急剧升高，为三叠纪延长组烃源岩成熟度的升高提供有利条件，并在早白垩纪中期达到生烃产气的高峰，发育出了以腐泥型为主的烃源岩。三、油型气运移通道。鄂尔多斯盆地内至少存在三组不同方向的基底断裂，这些断裂所引发的活动及活动过程中产生的小断层与微裂缝，区域上构成了油气运移的纵向通道。黄陵矿区位于七号断裂东侧，基底断裂所形成的断层与裂缝是2号煤层下部三叠系油气向上运移的通道，在一定条件下可形成岩性圈闭或构造圈闭富集气体。

1.2.2 油型气防治技术研究现状

针对煤、油共生条件下油型气给煤炭生产和安全所带来的威胁，我国从20世纪七十年代开始了煤、油共生安全问题的研究课题，由省煤炭工业局科研室、西安煤矿设计研究院、煤炭科学研究院抚顺研究所等单位牵头，在焦坪矿区开展了煤、油共生条件下煤炭安全开采的科学研究试验工作。通过大规模钻井进行煤田地质勘探工作，提出油型气岩性控制为主、构造为辅的双重控制机制，并通过油型气显示情况将油型气显示描述分为“大量、较多、含油、少量、微量”五个等级[15]。通过对烷烃类混合气体爆炸试验和爆炸下限理论计算，结果表明在煤油共生矿井中产生的所有烷烃类气体都可以按照光学瓦斯检定器读数1%管理，且都具有5倍以上的安全系数，提出按照“煤矿安全生产试行规程”规定实施煤、油共生矿井可燃气体安全管理指标具有一定可行性[16]。以有无油浸入作为控制变量进行煤的自燃倾向测定试验和阻化、氧化试验，尽管实验结果表明石油能够对煤的自燃起到一定阻化作用并降低自燃倾向等级，但含油煤堆氧化自然发火一旦发生，其严重性比一般煤自燃后果更加严重[17]。由于渗漏、涌出的油气不仅严重污染采煤工作环境导致职业健康问题还增加了外因火灾的发生的可能性，并将油气浓度主要影响因素分为开采深度、工作面风量、工作面空气温度、回采工作面通风系统[18]。最后针对煤、油共生矿井中存在的油气爆炸、井下自然发火、油气中毒等主要威胁，制定了在煤油共生条件下详细的主要采煤安全技术措施[19]，展开对煤油气共生现象下的瓦斯防治技术体系的初步探索。

2003年第三次全国瓦斯地质学术研讨会上，王生全等[20]总结了高瓦斯矿区油气瓦斯的赋存特点，分析矿井及其工作面的瓦斯涌出来源，针对煤层顶板的含油气砂岩层，提出具有针对性的油型气（瓦斯）解决方案，一是实行采前工作面预抽法、边抽边采法、采空区高位大直径钻孔抽放法等井下一体化抽采方案；二是针对主采煤层埋藏较浅的情况，采取地面钻孔前期预抽及后期卸压、采空区抽放等地面一体化抽采方案。

2005年，铜川矿务局为进一步完善油气共生矿井防治技术体系，针对焦坪矿区煤层厚度大、煤油气共生、易自燃等突出特征开展高瓦斯油气共生易自燃厚煤层放顶煤开采瓦斯治理技术研究[21]，从矿井瓦斯地质图编制、瓦斯涌出量预测、参数井测试与抽采试验、本煤层中深钻孔和大直径长钻孔施工、本煤层强化预抽、采空区瓦斯抽放、特厚煤层长距离煤巷掘进"钻墙"抽采、煤层自然发火识别及防控技术等八个方面入手进行系统全面的试验研究。得出油气矿井瓦斯赋存规律与地质构造、煤层埋深等因素有关，且瓦斯的涌出现象与煤层的埋藏深度呈现正相关。深入研究煤层瓦斯和围岩油气分布规律，实现对采掘工作面瓦斯涌出量进行预测。以“深孔松动爆破强化预抽、‘钻墙’布孔边掘边抽、穿层钻孔采空区抽放”为技术特征的瓦斯综合治理技术和以“采空区端头封堵、灌浆、压注复合胶体和三相泡沫”为特征的煤层自然发火识别及防控技术体系,

之后，封华、张兰君等[22,23]根据研究区域地层赋存条件使用混合可燃气体爆炸极限计算公式，搭建配气和爆炸实验装置系统，通过对瓦斯混合气体爆炸极限进行理论计算，得出瓦斯爆炸极限影响因素除惰性气体含量占比外还有温度、压力等。初步揭示油气对瓦斯爆炸的影响规律，认为油气伴生是导致瓦斯混合气体爆炸上、下限发生改变的关键所在，确定油气成分对瓦斯防治至关重要。

在确定油型气瓦斯成分的基础上，不断有专家学者提出灾害防治技术方法，如孟贤正等[24]关注岩石与油气突出过程中的力学机理，将岩石与油气突出作为地应力、油气压力和岩性力学参数等因素的综合作用结果，提出以钻孔岩芯、油气压力与流量作为瓦斯灾害危险性的评判指标。张俭让、张荃、王冬等[25-29]则聚焦于巷道内油型气涌出后CH4的分布与扩散规律，通过数值模拟手段建立油型气涌出后CH4扩散模型，揭示不同涌出点、不同风筒位置和不同风量下工作面风流场及油型气主要成分CH4的分布规律，为提出针对型的巷道通风参数提供依据。唐恩贤、王军辉、张伟等[30-33]通过制定探查抽采方案布置探抽钻孔对掘进工作面前方底板油型气实施探测和超前抽放，并在实际应用过程中得到良好成效。殷民胜等[34]将混源天然气定量计算方法对煤油气共存矿井瓦斯进行定量分析，通过分析采空区瓦斯涌出来源，建立煤层气与油型气的混源气计算模型，确定不同位置混源气构成比例。为合理的钻孔及抽采布置提供可靠依据。陈冬冬[35]针对煤油气共生矿井中存在的围岩瓦斯异常涌出问题，提出将储集层分布、地质构造及岩性作为围岩气预测指标的围岩气区域预测技术，通过预测结果表征围岩气危害程度对评价区域进行等级划分。司俊鸿等[36]根据气体爆炸三要素理论，提出瓦斯-油型气混合气体爆炸预警技术，通过传感器、色谱分析手段对瓦斯-油型气实施监测并由专家系统进行判断预警。徐刚等[37]采用灰熵关联分析法对瓦斯含量主控因素进行排序，以最大关联影响因素对工作面单元进行划分，制定针对性钻孔方案解决工作面瓦斯超限问题。

1.2.3 直流电法应用研究现状

20世纪50年代，前苏联学者首先将直流电法探查手段应用于矿井进行煤矿的勘探。之后为满足地下水体、断层、陷落柱、瓦斯等关键地质要素的探测需要，相关专家学者开始了对直流电法的深入研究与探索。70、80年代为表征地电体特征来确定地质异常体及地质构造电各向异性特征，开展直流电阻率张量测量研究，Bibby等[38-42]为减少单源-双极-偶极方法探测结果中出现的“错误异常”问题，将视电阻率张量导出的各种旋转不变量视为平均视电阻率值，并根据视电阻率张量在横、纵向上表现出的不同依赖特征，展开以各向异性为不连续性指标的探索。90年代后国外针对工作面地质构造问题展开进一步研究，A.Gyulai、J.Csokás等[43-47]认为煤层是嵌入电阻率低得多的岩层介质中的高电阻率层，位于断层带的顶层和低电阻率的底层相连，电阻率的差异使得直流电法容易观测构造扰动情况，并提出一种新的地电成像方法，为地质解释工作提供宝贵经验。俄罗斯学者[48-51]针对低阻煤层中小构造进行了矿井矢量电阻率的研究，其成果推进了地电场中异常区域探测技术的进步，并在非接触式电法探测、地电场中的各向异性特征等相关理论方面进行完善；日本学者[52]针对金属矿山地面探测过程中层析成像不准确的问题，提出通过井下-地面联合探测成像技术对构造发育带进行研究；匈牙利学者[53-55]发展了地电煤层探测和层析成像方法，将顶板测深、底板测深以及煤层测深三种方法结合形成联合反演，实现包括煤层在内多层地质模型电阻率深度分布的最佳分辨率。

我国仅在解放前曾使用电法手段在金属矿领域进行过初步尝试，而在瓦斯油型气的煤矿方面研究几乎为零。直到60、70年代，随着设备技术发展逐步涌现的大地电流法、电测深法及大地电磁法等技术，为剖面测量、油气勘探以及构造单元划分工作提供关键技术支撑，这才真正揭开了电法勘探在矿井领域应用的序幕[56-60]。80、90年代全国煤矿底板突水事故频发，面对矿井中层出不穷的水害问题，各地矿务局、煤炭工业部下属科研机构及高校开展井下电法探测试验，并在矿井水害防治领域取得了一系列重要成果。

岳建华等学者[61-65]对巷道影响及全空间效应下的矿井直流电法勘探理论进行了详细且系统的研究，建立了巷道影响下的全空间电流场理论并对相应条件下的层状围岩介质进行正演计算；曾方禄等[66]在直流电法的基础上开发了矿井音频电透视技术，并在工作面底板含导水构造探测方面效果显著。刘树才[67,68]通过数值模拟手段建立煤矿底板含导水构造的地电模型，发现不同的导水构造规模及赋水情况具有显著的视电阻率变化特征，但视电阻率变化影响因素较多且彼此关系复杂，还应结合其他因素进行综合分析；鲁晶津[69-71]采用直流电法3D反演技术，对导水通道发育过程变化的直流电阻率进行监测，结果表明直流电法能够对采煤工作面底板出水进行预警，但垂向监测对异常构造的判断仍需结合其他监测手段进行综合分析；高卫富等[72-75]将三点电源直流电法及四级装置应用到巷道迎头超前探测中，结果表明其电法横向响应特征要优于传统单点电源供电方法。饶荣富等[76-78]针对回采工作面方向和巷道前进方向，采用不同方法的矿井直流电法进行巷道影响、全空间效应下的正、反演数值模拟，其结果表明具有针对性的直流电法能明显区分高低阻特征差异，对工作面透明化有一定指导作用。目前从技术角度来看，随着直流电法基础理论的不断加深以及探测装备的不断升级，相关方法技术也日趋成熟。但仍以防治水害、探测含水构造异常体作为主要的问题导向。

1.3 存在的问题及不足

（Problems and Deficiencies）

1.4 主要研究内容和技术路线

（Main Research Contents and Thought）

1.4.1 主要研究内容

（1）根据黄陵二号煤矿掘进巷道底板实际地质条件，运用COMSOL多物理场仿真软件建立油型气运移及涌出的物理模型，研究不同构造情况下油型气运移及涌出的关键特征和演变规律

（2）研究现场底板岩体受压过程中视电阻率变化情况，分析不同围压条件下视电阻率演变特征，揭示岩体地质参数的电法响应机理。

（3）以底板岩体受压过程中的电性参数响应为基础，利用直流电法对掘进工作面巷道底板构造异常情况进行探测，提出以底板岩层电性参数为主，其他油型气涌出影响因素为辅的油型气涌出危险性定量评价指标与方法，并通过现场钻探结果比对验证。

1.4.2 研究技术路线

本文技术路线如图3-1所示.



图3-1 研究技术路线图

Figure 1-2 Research technical route

表1-1 表名

Table 1-1 Title

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 标题，mm | 占比，％ | 标题，％ | 占比，％ | 标题，％ |
| ＞0.5 | 3.80 | 7.38 | 3.80 | 7.38 |
| 0.5～0.25 | 4.55 | 4.56 | 8.35 | 5.84 |
| 0.25～0.125 | 3.32 | 5.47 | 11.67 | 5.74 |
| 0.125～0.074 | 4.74 | 3.63 | 16.41 | 5.13 |
| 0.074～0.045 | 10.72 | 3.11 | 27.13 | 4.33 |
| ＜0.045 | 72.87 | 4.64 | 100.00 | 4.56 |
| 合计 | 100.00 | 4.56 | － | － |

描述旋流－静态微泡浮选柱的旋流场结构[[1]](#footnote-1)，分析旋流场特征及其影响；借助流体力学软件对柱体的内部流场进行模拟并分析其流场速度分布规律，研究循环矿浆量及给矿量等因素对流场的影响；[[2]](#footnote-2)通过对旋流场内的颗粒受力分析，建立基于旋流的颗粒动力学方程；系统揭示旋流分选作用，并进行相关动力学分析…

……

……

……

……

……

……

……

……

……

……

……

……

……

2 底板岩体电性响应规律研究

3 采动效应下油型气涌出数值模拟

3 Numerical Simulation of Oil-Type Gas Emission under Mining Effect

3.1 采动效应下油型气涌出原理

采动影响下顶底板裂隙发育，产生导通裂隙带，如在其范围内含有油型气砂岩层，则存在诱发油型气涌出的危险，导致掘进和回采过程的瓦斯含量超标，如图3-9所示。

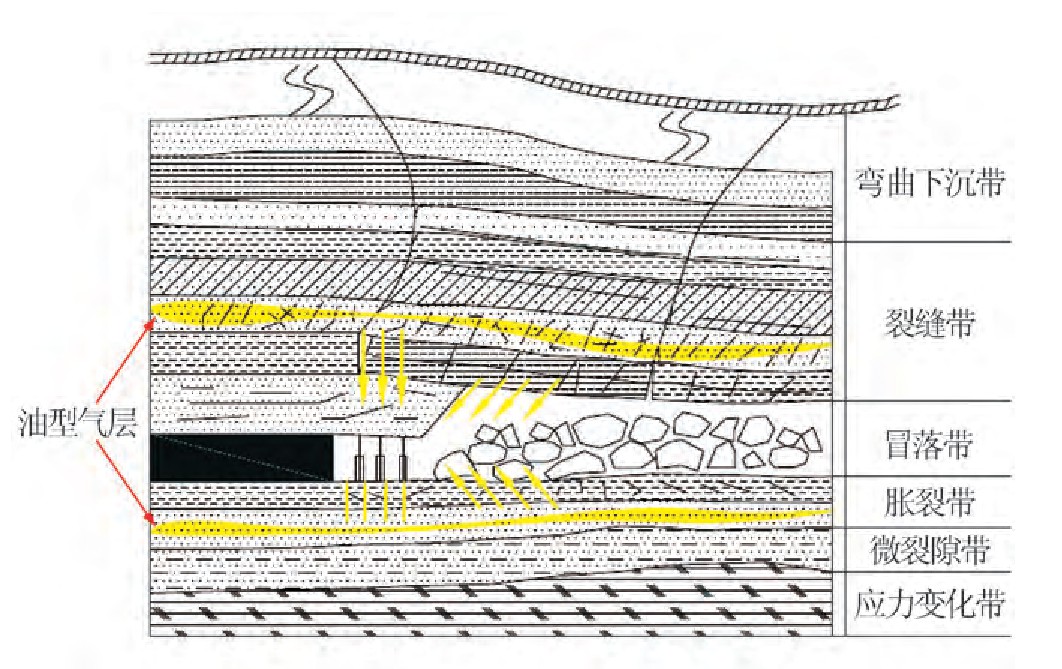


图3-9 底板油型气涌出示意图

为了研究底板油型气涌出规律，必须弄清采动影响下的底板破坏情况，因此首先建立煤岩体的损伤本构模型。煤层开采后，底板岩层由于受到采动影响发生体积膨胀，原始应力发生改变，煤岩体因受单向卸载产生损伤。通过考虑损伤微元引起的煤岩体内部非均匀性，认为损伤的本质是煤岩体在载荷的作用下形成的不具有承载能力的空洞，在受到破坏后仍有一定的残余强度。众多学者均采用指数函数的表达形式表示岩土材料的损伤规律。微裂隙的发展导致的体积膨胀会引起煤岩体损伤软化，根据煤岩体微元强度服从Weibull分布，损伤演化方程可表达为：

D=1 （3-2）

式中：εV是体积应变量；εIV是弹性体积应变阀值，即当体积应变超过阀值时才开始产生损伤；F是煤体强度参数，反映了煤体宏观统计平均强度大小；m是常数，取2。

顶底板煤岩体产生裂隙后引起渗透率变化，从而影响了油型气运移过程。根据孔隙介质理论的假设，孔隙介质由包含孔隙的骨架基质组成，孔隙空间充满了可自由流动的孔隙流体，即孔隙处于饱和状态。煤岩体的孔隙率与其所处的应力状态有关，这种关系可以表示为：

=exp() （3-3）

式中：为0应力状况时的孔隙率；为孔隙率的应力敏感系数；为高压缩应力状态下的孔隙率的极限值；为平均有效应力，可按照如下式计算：

=/3 （3-4）

式中：为Biot系数；、与分别为3个主应力。此外，研究发现渗透率和孔隙率之间可以满足如下幂函数关系式[18]：

k= （3-5）

式中：为在0应力状态下的渗透率（m2）;k为受应力作用后的渗透率m2）。

当煤岩体损伤后，其孔隙率和渗透性的演化规律比较复杂，考虑损伤程度的渗透率模型如下[18]：

k=exp() （3-6）

式中：为煤岩体损伤对渗透率的影响系数。

为了研究底板岩性的物理条件下，油型气的涌出机制，采用COMSOL Multiphysics模拟软件，对建立的巷道底板岩层油型气涌出演化过程进行模拟分析。根据现场实际探查情况，建立的数值模型如图3-10所示，参数如表3-3。模型尺寸为20m\*16m，其中煤层厚度3m，顶板5m，泥岩层底板5m，含气砂岩层厚3m。模拟巷道掘进后的围岩损伤分布如图3-11所示，可以看到采动影响导致围压发生损伤变形，煤层两帮损伤程度最大，损伤范围达两倍采高。底板也发生损伤破坏发生鼓起，损伤区域呈“V”型分布，底板损伤区域约一倍采高。

表3-3 数值模拟参数取值表

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 名称 | 数值 | 单位 |
| 气体常数 | 8.31441 | J/(mol/k) |
| 气体摩尔质量 | 0.016 | Kg/mol |
| K氏温度 | 352 | k |
| 大气压力 | 0.16 | Pa |
| 瓦斯动态粘度 | 1.84-5 | Pa·s |
| 朗格缪尔体积常数 | 0.00505 | m3/kg |
| 朗格缪尔压力常数 | 6 | Pa |
| 固体密度 | 1500 | kg/m3 |
| 底板孔隙率 | 0.02 |  |
| 底板渗透系数 | 1-19 | m2 |
| 弹性模量 | 9 | Pa |
| 体积模量 | 9 | Pa |
| 骨架体积模量 | 10 | Pa |
| 剪切模量 | 10 | Pa |

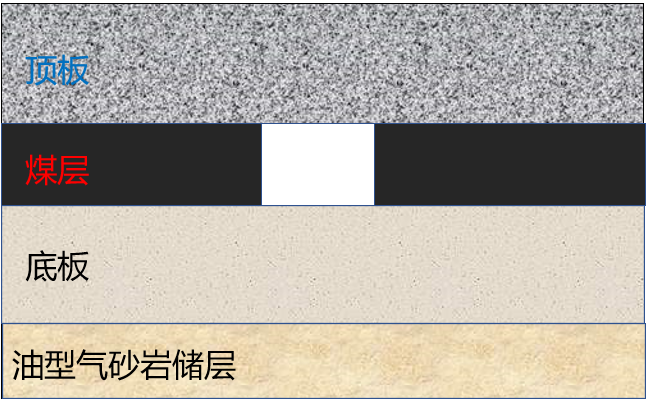


图 3-10 油型气涌出模拟分析几何模型

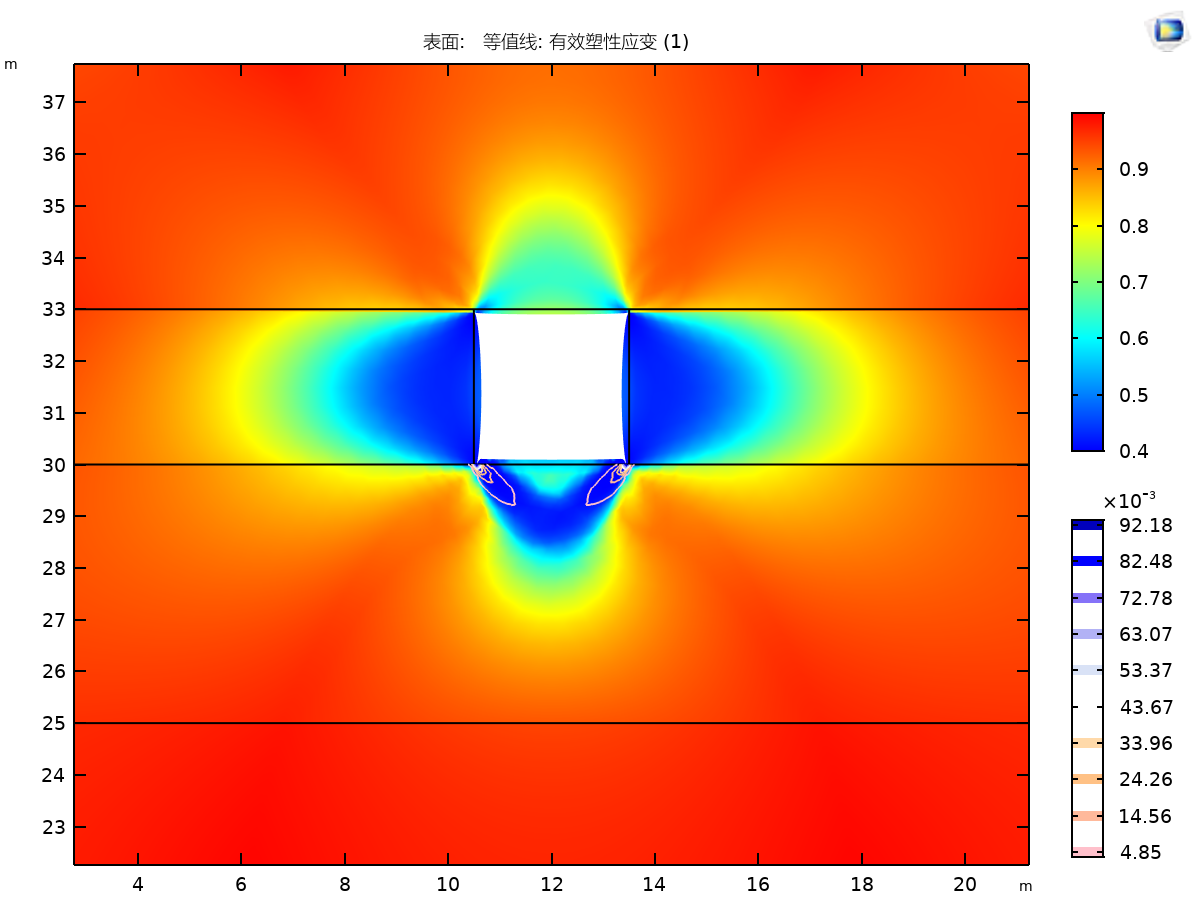


图 3-11 巷道底板损伤破坏规律

图3-12为模拟的底板砂岩储层油型气运移规律，黑色指油型气压力为零，白色指油型气压力初始压力值。可以看出在压力梯度作用下，砂岩层油型气会涌向底板泥岩层，但泥岩渗透性较低，会对油型气产生阻拦作用。但巷道底板发生损伤破坏，产生新生裂隙导致渗透率增加，因此可以看出巷道下方油型气涌出范围较大，距离巷道距离较近，但巷道内的油型气涌出量仍很小。因此认为如果底板岩层不存在地质构造情况下，底板泥岩渗透性较低，具有封闭作用，底板油型气涌出量较小。

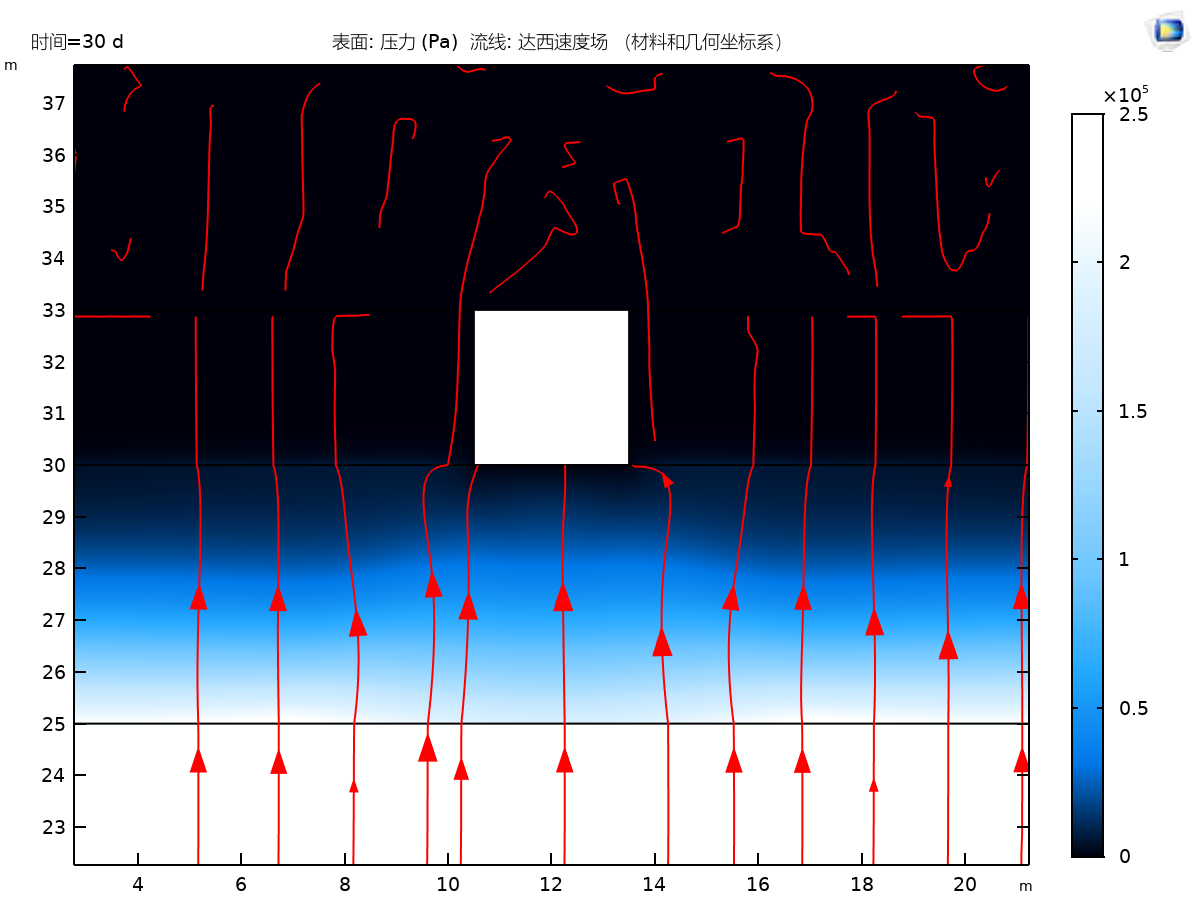


图 3-12 无断层底板油型气分布规律

图3-13为底板存在断层情况下的油型气涌出规律。由于断层等地质构造存在破碎和节理结构，具有较高渗透性能，因此断层能够贯通了底板砂岩层，导致砂岩层油型气的涌出。断层附近区域的油型气含量较高，导致巷道底板损伤区与断层连通，大量油型气通过连通裂隙涌出到巷道内。因此底板泥岩层存在断层时会导致砂岩层油型气涌出，破坏了泥岩层的封闭作用。

图3-14为贯通性断层条件时的油型气涌出规律。当断层穿越煤层时，由于煤层破碎带范围大，裂隙发育多，由图可以看出巷道左帮的油型气大范围涌出，导致巷道内油型气含量大量增加。因此当底板岩层比较稳定，无断层等构造时，底板泥岩能够封闭油型气，油型气涌出风险较小。当仅底板泥岩层存在断层时，油型气仅通过断层涌向巷道底板。当存在贯通性断层时煤层和底板都存在连通裂隙，导致油型气涌出量最大，风险最高。

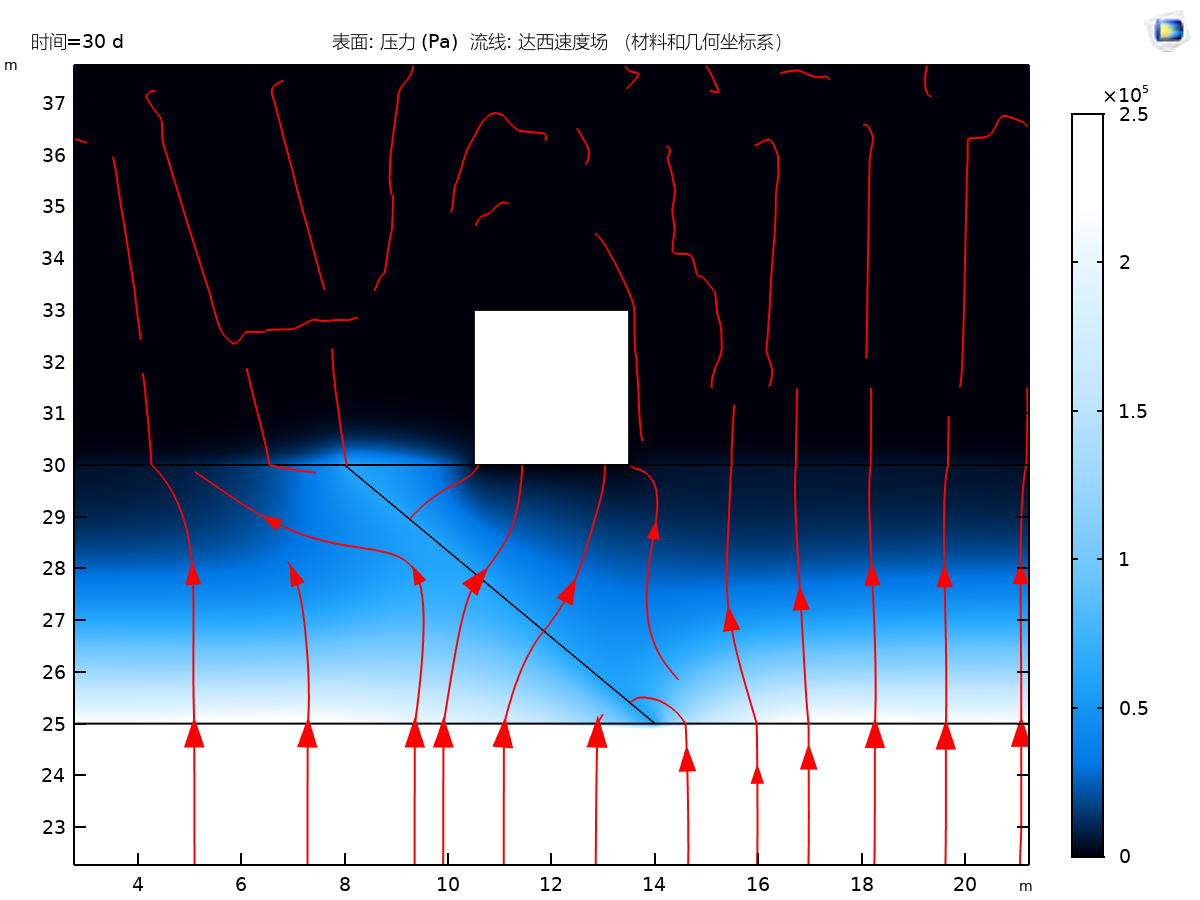


图 3-13 底板断层构造条件油型气涌出规律

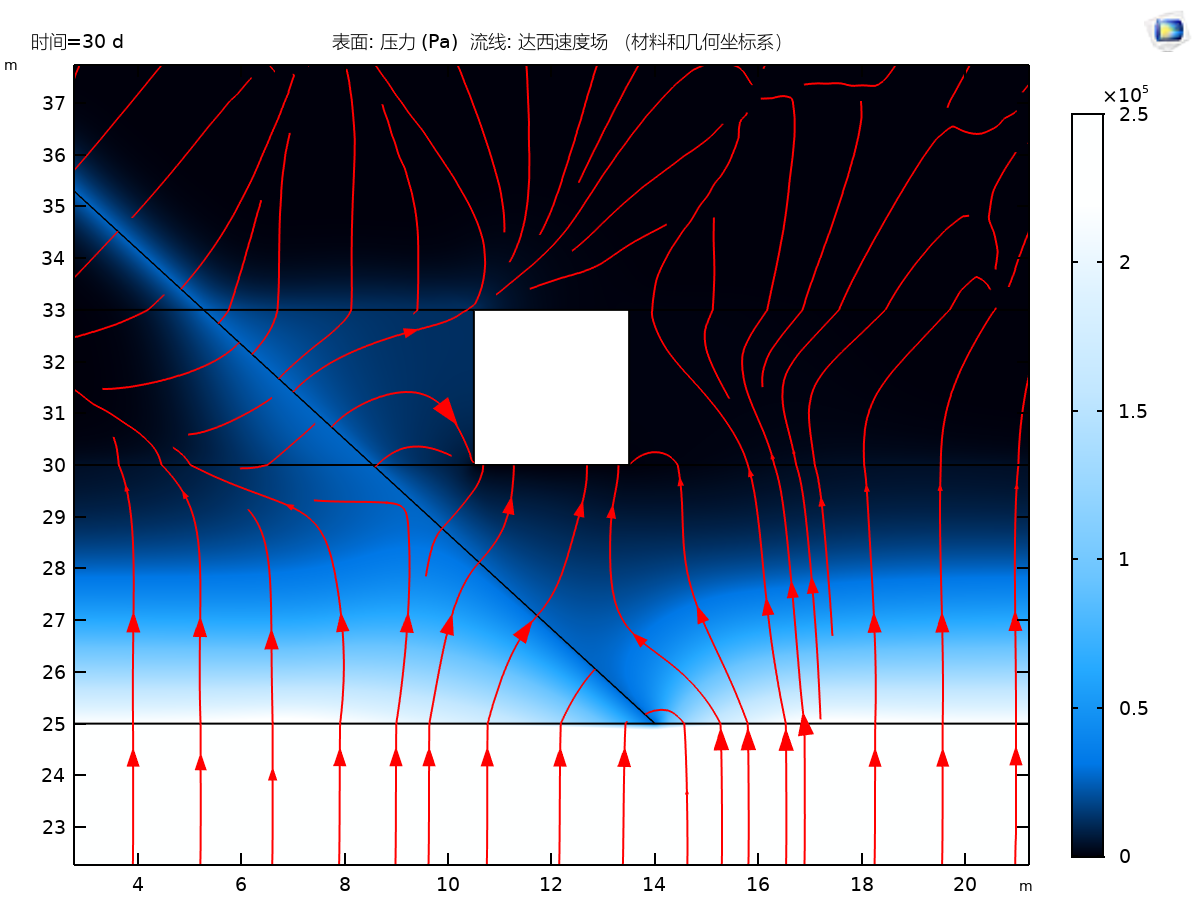


图 3-14贯通性断层构造条件油型气涌出规律

通过对底板油型气涌出量积分计算，得到不同条件下的油型气涌出量数据。可以看出随着距离油型气储层的底板岩层厚度增加，油型气涌出量逐渐减小，同时底板的渗透性也是抑制油型气涌出的重要因素，说明底板的地质条件和结构是影响油型气涌出危险性的关键。底板存在构造情况时，形成了油型气渗流通道，油型气沿着围岩损伤区涌入巷道，导致油型气大量而且快速涌出，此时存在的危险性较大。

表3-4 不同工况模拟结果

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 底板厚度(m) | 底板渗透率(m2) | 断层 | 涌出量（m3/ m2/min） | 涌出量分析 |
| 1 | 3 | 1-19 | 无 | 0.92 | 短时间内油型气会涌出，涌出量相对较大 |
| 2 | 5 | 1-19 | 无 | 0.53 | 一定时间后油型气会涌出，涌出量相比底板厚度3m时减小 |
| 3 | 7 | 1-19 | 无 | 0.19 | 底板厚度增加，一段时间后油型气涌出量很小或基本为零 |
| 4 | 5 | 1-18 | 无 | 1.68 | 底板渗透率增大，短时间内会造成油型气大量涌出 |
| 5 | 5 | 1-19 | 是 | 3.18 | 因断层存在，短时间内油型气会沿裂隙通道大量涌出 |

4 油型气涌出危险性评价体系构建

4 Construction of Oil-Type Gas Emission Hazard Evaluation System

4.1

5 基于直流电法油型气涌出危险性评价现场应用

5 Field Application of Oil-Type Gas Emission Hazard Assessment by DC Method

5.1 直流电法探测原理

5.2 现场概况

5.2.1矿井概况

5.2.2 工作面概况

5.3 巷道直流电法观测系统设计

5.3.1 现场工程布置

5.3.2 现场数据采集与处理方法

5.4 现场直流电法响应结果分析

5.4.1 215巷道电法响应结果分析

5.4.2 413巷道电法响应结果分析

5.4.3 北2巷道电法响应结果分析

5.5 油型气涌出危险性评价现场应用及验证分析

5.5.1 215巷道油型气涌出危险性评价

5.5.2 413 巷道油型气涌出危险性评价

5.5.3 北2巷道油型气涌出危险性评价

5.5.4 验证分析

5.6 本章小结

6 全文总结、创新点及展望

6 Summaries，Innovations and Prospects

本文从自然因素、外部环境和内部结构等方面，详细分析了影响我国煤炭供给和需求的因素，探索煤炭供需与其影响因素的规律，构建了我国煤炭供需预测预警指标体系，对我国煤炭供需进行预测预警。

我国的煤炭供给受许多因素度影响，而且随着时间的推移，出现新的特点。

……

……

……

……

……

……

……

……

……

……

……

……

……

……

……

……

……

……

……

……

……

……

……

……

……

……

……

目前，我国的铁路运输压力又所缓解，但铁路运输还是制约着我国的煤炭供给。我国煤炭资源区域分异现象与经济区域分异性相悖，由此造成了“西煤东调”和“北煤南运”的运输格局，这种能源中心与经济中心的差异性，形成了大量的煤炭运输需求以及非常集中的煤炭流量，但因资金的缺口及体制的原因，铁路运输现在将来一段时期都制约着我国的煤炭供给。

**参考文献**

标题：黑体小二号加粗居中，单倍行距，段前6磅，段后0磅；大纲1级

[1] 北京市政协民族和宗教委员会，北京联合大学民族与宗教研究所．历代王朝与民族宗教[M]．北京：民族出版社，2012：112．

[2] 曹凌．中国佛教疑伪经综录[M]．上海：上海古籍出版社，2011：19．

[3] 储大同．恶性肿瘤个体化治疗靶向药物的临床表现[J/OL]．中华肿瘤杂志，2010，32(10)：721-724 [2014-06- 25]．http://vip.calis.edu.cn/asp/Detailasp．

[4] 丁文详．数字革命与竞争国际化[N]．中国青年报，2000-11-20(15)．

[5] 冯友兰．冯友兰自选集[M]．2版．北京：北京大学出版社，2008：第1版自序．

[6] 关立哲，韩纪富，张晨珏．科技期刊编辑审读中要注重比较思维的科学运用[J]．编辑学报，2014，26(2)：144-146．

[7] 哈里森，沃尔徳伦．经济数学与金融数学[M]．谢远涛，译．北京：中国人民大学出版社，2012：235-236．

[8] 钱学森．创建系统学[M]．太原：山西科学技术出版社，2001：序2-3．

[9] 萧饪．电子资源出版业信息化迈入快车道[EB/OL]．(2001-12 -19) [2002 -04 -15]． http:// www.ereader.com/news/20011219/200112190019.html.

[10] 杨保军．新闻道德论[D/OL]．北京：中国人民大学出版社，2010[2012-11 -01]．http://apabi.lib.pku.edu.cn/usp/pku/pub.mvc?pid=book.Detail&metaid=m.20101104-BPO -889T023&cult=CN．

[11] 袁训来，陈哲，肖书海，等．蓝田生物群：一个认识多细胞生物起源和早期演化的新窗口[J]．科学通报，2012，55(34)：3219．

中文均采用宋体，英文和阿拉伯数字均采用Times New Roman，五号，两端对齐，悬挂缩进1.5字符，段前段后0磅，行距固定值20磅

大纲级别为正文文本，参考文献标注采用顺序编码制，文献编号用阿拉伯数字置于方括号“[ ]”中，编号后空1个半角字符。

博士生参考文献不少于80篇(其中外文参考文献不得少于20篇)。

硕士生参考文献不少于50篇(其中外文参考文献不得少于10篇)。

[12] 杨康．基于瘤胃发酵参数支撑低DCAD防治羊低血钙的研究[D]．贵阳：贵州大学，2019．

[13] 中国图书馆学会．图书馆学通讯[J]. 1957(1)-1990(4)．北京：北京图书馆，1957-1990．

[14] 中国职工教育研究会．职工教育研究论文集[G]．北京：人民教育出版社，1985．

[15] 张田勤．罪犯DNA库与生命论理学计划[N]．大众科技报，2000-11-12(7)．

[16] 中国第一历史档案馆，辽宁省档案馆．中国明朝档案总汇[A]．桂林：广西师范大学出版社，2001．

[17] 赵学功．当代美国外交[M/OL]．北京：社会科学文献出版社，2001[2014-06 -11]．http://www.cadal.zju.edu.cn/book/trySinglePage/33023884/l．

[18] 中国社会科学院台湾史研究中心．台湾光复六十五周年暨抗战史实学术研讨会论文集[C]．北京：九州出版社，2012．

[19] CALKIN D, AGER A, THOMPSON M. A comparative risk assessment framework for wildland fire management : the 2010 cohesive strategy science report: RMRS-GTR-262[R]. [S.L. : s.n. ], 2011: 8-9.

[20] U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration. Guidelines for han­dling excavated acid-producing material: PB 91T94001[R]. Springfield: U.S. Department of Commerce National Information Service, 1990.

[21] World Health Organization. Factors regulating the immune response: report of WHO Sci­entific Group[R]. Geneva: WHO, 1970.

**附录1**

供需预警程序

Imports System.Math

Imports System.Drawing

Public Class Form1

Private Sub Form1\_Load(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles MyBase.Load

With Grid1

.Cols = 9

.Rows = 40

**作者简历**

中文：黑体小二号加粗居中，单倍行距，段前6磅，段后0磅

一、基本情况

姓名：\*\* 性别：男 民族：汉 出生年月：1976-07-23 籍贯：江苏省东台市

1995-09—1999-07 中国矿业大学化工学院学士；

1999-09—2002-06 中国矿业大学化工学院攻读硕士学位

……

二、学术论文

1. \*\*. 煤泥脱硫技术现状[J].煤泥脱硫技术，2004（1）：53-55.

2. \*\*. 黄铁矿显微赋存特征对浮选脱硫的影响[J].煤技术，2005 (5）：6-7.

……

三、获奖情况

1. \*\*. 旋流-静态微泡柱分离方法研究与旋流-静态微泡浮选床研制. 中国机械工业科技进步奖二等奖；

……

四、研究项目

1. 废弃煤泥的洁净加工与利用.国家重点技术创新项目, 编号：国经贸技术（1999）598号,参加人员；

……

**学位论文原创性声明**

本人郑重声明：所呈交的学位论文《 》，是本人在导师指导下，在中国矿业大学攻读学位期间进行的研究工作所取得的成果。据我所知，除文中已经标明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

中文：黑体小二号加粗居中，单倍行距，段前6磅，段后0磅

学位论文作者签名：

年 月 日

此页可下载

签名需手写

**学位论文数据集**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **关键词\*** | **密级\*** | | | | **中图分类号\*** | | | **UDC**  中文：黑体小二号加粗居中，单倍行距，段前6磅，段后6磅 | | | | **论文资助** |
|  |  | | | |  | | |  | | | |  |
| **学位授予单位名称\*** | | **学位授予单位代码\*** | | | | | **学位类别\*** | | | **学位级别\*** | | |
| 中国矿业大学 | | 10290 | | | | |  | | |  | | |
| **论文题名\*** | | | | | | **并列题名** | | | | | **论文语种\*** | |
|  | | | | | | 英文题目 | | | | | 中文 | |
| **作者姓名\*** | |  | | | | | **学号\*** | | |  | | |
| **培养单位名称\*** | | **培养单位代码\*** | | | | | **培养单位地址** | | | **邮编** | | |
| 中国矿业大学 | | 10290 | | | | | 江苏省徐州市 | | | 221116 | | |
| **学科专业\*** | | **研究方向\*** | | | | | **学制\*** | | | **学位授予年\*** | | |
|  | |  | | | | |  | | |  | | |
| **论文提交日期\*** | | | | |  | | | | | | | |
| **导师姓名\*** | |  | | | | | **职称\*** | | |  | | |
| **评阅人** | | | | **答辩委员会主席\*** | | | | **答辩委员会成员** | | | | |
|  | | | |  | | | |  | | | | |
| **电子版论文提交格式 文本（ ） 图像（ ） 视频（ ） 音频（ ） 多媒体（ ）**  **其他（ ）**  **推荐格式：application/msword; application/pdf** | | | | | | | | | | | | |
| **电子版论文出版（发布）者** | | | **电子版论文出版（发布）地** | | | | | | **权限声明** | | | |
|  | | |  | | | | | |  | | | |
| **论文总页数\*** | | | |  | | | | | | | | |
| **注：共33项，其中带\*为必填数据，共22项。** | | | | | | | | | | | | |

1. 当论文中的字、词或短语等，需要进一步加以说明，而又没有具有的文献来源时，用注释。 [↑](#footnote-ref-1)
2. 当论文中的字、词或短语等，需要进一步加以说明，而又没有具有的文献来源时，用注释。 [↑](#footnote-ref-2)