**中 国 矿 业 大 学**

2021**级硕士专业学位研究生**

**选**

**题**

**报**

**告**

**选题 名称：基于矿井直流电法的矿井油型气涌出危险性判识方法与应用**

**学 院： 安全工程学院**

**学科 专业： 资源与环境（安全工程）**

**研究生姓名： 孔睿**

**导师 姓名： 魏明尧**

**中国矿业大学学位管理办公室制**

2023年3月16日

**目 录**

[1. 研究背景和意义 1](#_Toc155693215)

[2. 国内外研究现状 3](#_Toc155693216)

[2.1油型气成因研究现状 3](#_Toc155693217)

[2.2油型气防治技术研究现状 3](#_Toc155693218)

[2.3直流电法应用研究现状 5](#_Toc155693219)

[3. 研究内容和技术路线 6](#_Toc155693220)

[3.1 研究内容 6](#_Toc155693221)

[3.2 研究技术路线 7](#_Toc155693222)

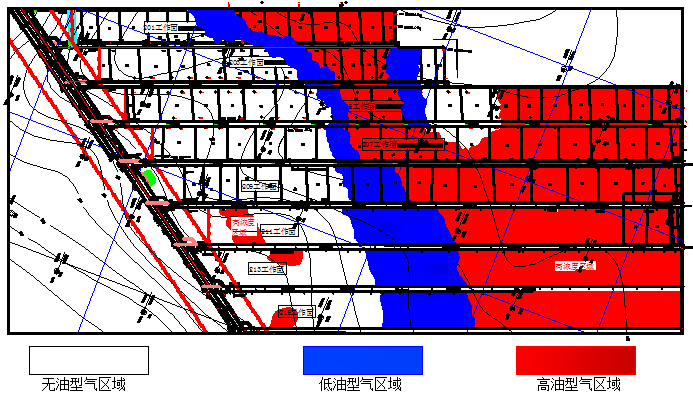
[4. 研究计划安排 7](#_Toc155693223)

# 研究背景和意义

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。

# 国内外研究现状

## 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。

## 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。

## 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。但从问题导向来看，仍以防治水害、探测含水构造异常体为主。

# 研究内容和技术路线

## 3.1 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，揭示岩体地址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。

## 3.2 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

# 已做实验及下一步研究计划

## 4.1 基于直流电法的现场底板电性数据采集

（1）现场工程布置

本次探测地点为黄陵二号煤矿二盘区215巷道、四盘区413巷道和北二巷道，其中215巷道共计布置四次测点，413巷道共计布置3个测点，北二巷道共计布置5个测点，且探测过程随着巷道掘进而不断调整测点位置，具体探测方案如表4-1所示。

表4-1探测位置分布

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 序号 | 位置 | 电极数量/个 |
| 1 | 北二辅运巷200 m | 48 |
| 2 | 北二辅运巷400 m | 48 |
| 3 | 北二辅运巷460 m | 48 |
| 4 | 北二辅运巷490 m | 48 |
| 5 | 北二辅运巷520 m | 48 |
| 6 | 413胶带机巷反掘面200 m | 48 |
| 7 | 413胶带机巷反掘面250 m | 48 |
| 8 | 413胶带机巷迎头 | 48 |
| 9 | 215辅运巷3000 m | 48 |
| 10 | 215胶带巷1800 m | 48 |
| 11 | 215胶带巷3300 m | 48 |
| 12 | 215胶带巷3500 m | 48 |

通过向巷道工作面后方布置测线对前方未知地质情况进行探测，具体各个巷道测线布置方案如图4-1至4-3所示：



图4-1 215巷道直流电法测线布置图



图4-2 413巷道直流电法测线布置图



图4-3 北二巷道直流电法测线布置图

（2）直流电法观测系统布置

测线布置时以迎头位置为相对基准点，采用全空间布置方法，沿巷道迎头掌子面侧帮往后布置。为了提高电极供电和接收效果，在施工时清除了表层浮煤，每间隔1.5 m就采用锤击方法将30 cm长铁电极打入底板内约20 cm，整个电法勘探系统需要布置48+2组电极孔，其中48个探测电极、1个公共比较电极和1个无穷远电极。电极布置施工完毕后，安装电极压头，并且用掺入NaCl 溶液浇淋，使其与底板充分耦合。以表4-2所示数据采集参数进行设置，通过多级供电方式，高效、快速的采集数据，根据点电源场的全空间球形对称理论，理论上对此区域形成迎头前方50m的探测范围，如图4-4。

表4-2 现场数据采集参数

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 测线  名称 | 采集  序号 | 采集  方式 | 供电  电压 | 恒流  时间 | 采样  间隔 | 供电  方式 | 电极  总数 |
| 1#-12# | 1 | AM | 48 v | 0.5 s | 50 ms | 单正 | 48 |
| 2 | AM | 48 v | 0.5 s | 50 ms | 正负正 | 48 |
| 3 | AM | 48 v | 0.2 s | 20 ms | 正负正 | 48 |
| 4 | AM | 48 v | 1 s | 20 ms | 正负正 | 48 |



图4-4 测线布置及探测范围示意图

## 4.2 底板岩体地质参数的电法响应特征研究

在213回风巷3号煤钻场2#至3#煤之间共取5块岩块，但1号块体破碎，未能加工成样品，其余2,3,4,5号共加工4个样品如图4-5所示。样品位置如下。

2号岩样：213回风巷3号煤钻场2#至3#煤之间，距2#煤层底板0.2m，距北一一号辅运大巷（中线）约3279.7m，距213回风巷（中线）约4.6m。

3号岩样：213回风巷3号煤钻场2#至3#煤之间，距3#煤层顶板4.6m，距北一一号辅运大巷（中线）约3302m，距213回风巷（中线）约10.9m。

4号岩样：213回风巷3号煤钻场2#至3#煤之间，距3#煤层顶板4.1m，距北一一号辅运大巷（中线）约3302.6m，距213回风巷（中线）约11.2m。

5号岩样：213回风巷3号煤钻场2#至3#煤之间，距3#煤层顶板4.2m，距北一一号辅运大巷（中线）约3286.5m，距213回风巷（中线）约6.6m。



图4-5 2-5号岩样实物图

将现场底板岩块加工成圆柱型岩样后，进行围压—电阻率实验。由图3-7可以看出样品随着围压增加，电阻率逐渐下降，结果表明在弹性阶段，围压增加导致岩石内部裂隙闭合，孔隙和裂隙内空气等被排除，内部岩石颗粒骨架接触更密实，所以导电性更强，电阻率有一定的下降。



（a）2号岩样 （b）3号岩样



（c）4号岩样 （d）5号岩样

图4-6 不同岩样电阻率随围压变化曲线

## 4.3 下一步研究计划

# 时间费用安排

## 5.1 时间安排

论文具体进度如表 4‑1所示。

表 4‑1 论文进度安排

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 序号 | 时间（月） | 内容 |
| 1 | 2023.05~2023.06 | 油型气运移数值模拟实验 |
| 2 | 2023.06~2023.7 | 建立油型气涌出危险性评价模型 |
| 3 | 2023.08~2023.10 | 危险性评价可视化界面的开发与改进 |
| 3 | 2023.11~2023.12 | 整理工程应用数据  拟定现场油型气防治方案 |
| 4 | 2024.01~2024.03 | 论文的撰写、修改与完善 |
| 5 | 2024.04~2024.05 | 完成论文，制作PPT，准备答辩 |

## 5.2 费用安排

本研究经费预算如表 5‑2所示。

表 5‑2 论文费用安排

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 序号 | 费用项目 | 费用估算（元） |
| 1 | 实验材料及检测费用 | 27000 |
| 2 | 论文打印装订费用 | 500 |
| 3 | 答辩费用 | 2000 |
| 4 | 合计 | 29500 |

**校对报告**

当前使用的样式是 [中国矿业大学学位论文]

当前文档包含的题录共10条

有0条题录存在必填字段内容缺失的问题

所有题录的数据正常

**参考文献**

[1] 谢和平，吴立新，郑德志. 2025年中国能源消费及煤炭需求预测[J]. 煤炭学报. 2019, 44(07): 1949-1960.

[2] 袁亮. 我国煤炭资源高效回收及节能战略研究[J]. 中国矿业大学学报(社会科学版). 2018, 20(01): 3-12.

[3] 范超军,王一琦,杨雷等.2012—2021年我国煤矿安全事故统计与规律分析[J].矿业研究与开发,2023,43(04):182-188.

[6] 谢和平.“深部岩体力学与开采理论”研究构想与预期成果展望[J].工程科学与技术,2017,49(02):1-16.DOI:10.15961/j.jsuese.201700025.

[7] 陈冬冬.煤油气共生矿井围岩气多因素耦合区域预测技术——以鄂尔多斯盆地黄陵矿区为例[J].煤田地质与勘探,2018,46(02):49-53.

[6] Vasconcelos R G W, Walkley B, Day S, et al. 18-month hydration of a low-pH cement for geological disposal of radioactive waste: The Cebama reference cement[J]. Applied Geochemistry, 2020,116:104536.

[7] Vuorinen U, Lehikoinen J, Imoto H, et al. Injection Grout for Deep Repositories Subproject 1: Low-pH Cementitious Grout for Larger Fractures, Leach Testing of Grout Mixes and Evaluation of the Long-Term Safety, 2005[C].

[8] García Calvo J L, Sánchez Moreno M, Alonso Alonso M C, et al. Study of the Microstructure Evolution of Low-pH Cements Based on Ordinary Portland Cement (OPC) by Mid- and Near-Infrared Spectroscopy, and Their Influence on Corrosion of Steel Reinforcement: Materials[Z]. 2013: 6, 2508-2521.

[9] Zhu Y, Ma B, Li X, et al. Ultra high early strength self-compacting mortar based on sulfoaluminate cement and silica fume[J]. Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed., 2013,28(5):973-979.

[10] Tang H, Li X, Zhang F, et al. Properties and hydration mechanism on high-strength anchorage grouting material for highway slope[J]. Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed., 2013,28(6):1181-1185.