



硕士学位论文

基于直流电法的采动围岩应力分布
探测研究

Study on Stress Distribution of Mining
Surrounding Rock Based on Direct Current
Method

国家自然科学基金 (51574231)

江苏高校优势学科建设工程资助项目

“十三五”国家重点研发计划 (2016YFC0801401)

中国矿业大学第七批优秀创新团队建设 (2014ZY001)

作者: 许昭勇

导师: 王恩元教授

中国矿业大学

二〇一七年五月

中图分类号 TD76

学校代码 10290

UDC 622

密 级 公开

中国矿业大学
硕士学位论文

基于直流电法的采动围岩应力分布探测研究
Study on Stress Distribution of Mining Surrounding
Rock Based on Direct Current Method

作 者 许昭勇

导 师 王恩元 教授

申请学位 工学硕士学位

培养单位 安全工程学院

学科专业 安全科学与工程

研究方向 安全监测监控

答辩委员会主席 蒋曙光

评 阅 人 张兴华、翟成

二〇一七年五月

致 谢

岁月如歌，光阴似箭，三年的研究生生活即将结束。落笔时刻，回首三年的求学历程，对那些引导我、帮助我、激励我的人，我心中充满了感激。

首先，感谢我的导师王恩元教授。在我攻读硕士研究生期间，深深受益于王老师的关心、爱护和谆谆教导。作为老师，指点迷津，让人如沐春风；作为长辈，关怀备至，让人感念至深。他严肃的科学态度，严谨的治学精神，精益求精的工作作风与积极乐观的生活态度，深深地感染与激励着我，能师从王老师，我为自己感到庆幸。在此谨向王老师表示我最诚挚的敬意和感谢！

同时，我要感谢所有教导过我、关心过我的老师。特别是中国矿业大学的刘贞堂教授、李忠辉教授、宋大钊副教授、刘晓斐副教授、沈荣喜副教授和赵恩来老师，他们为人师表的风范令我敬仰，严谨治学的态度令我敬佩，为我的学业倾注了大量心血。还要感谢安全学院的其他各位老师对我的一贯帮助！

感谢邱黎明、冯俊军、高勤琼、陈亮、李学龙、孔祥国、李保林、房保飞、耿龙剑等各位博硕师兄在学术和论文写作中给予的帮助，感谢福安科技有限公司赵明楠，李衍磊在软件方面的帮助！

感谢刘泉霖、贾海珊、田园、杨帅等各位可爱的师弟在实验室试验方面提供的帮助！

感谢孟令恒、刘耀、杨泉林、杨成峰等舍友，我们朝夕相处，共同进步，感谢他们给予我的所有关心和帮助。同窗之谊，我将终生难忘！

感谢糯东煤矿总工程师何志龙、通风副总孙谦、通防部副部长孔鹏以及通防部武国鹏、栗鹏飞和司磊磊等技术人员在现场测试时提供的帮助！

感谢李国爱、陈栋、林松、湛堂启、吕岗岗、张伟强、吴俊勇和马云波等同门在生活和学习中的帮助。三年的朝夕相处，你们的热心帮助和关心，你们的幽默和风趣，使我度过了一段愉快的时光，在此一并致以由衷的谢意！

感谢所引用参考文献的作者，他们卓有成效的工作，让我受益匪浅！

感谢各位专家、教授在百忙之中审阅本文，并热切地希望得到您的指教！

特别感谢我的父亲母亲，父母的养育之恩无以为报，他们是我十多年求学路上的坚强后盾，在我面临人生选择的迷茫之际，为我排忧解难，他们对我无私的爱与照顾是我不断前进的动力，特别感谢我的女朋友白德荣在生活上给予的关心和理解，感谢她与我一同面对困难，一同分享成功的快乐，她始终是我坚持奋斗的力量！

摘 要

随着煤矿开采深度的增加,受复杂地质条件和开采条件的影响,采动围岩应力分布及变化越来越复杂,对巷道支护及煤岩动力灾害影响极大,有效探测采动围岩应力分布及变化显得尤为重要。针对缺乏有效的采动应力分布探测手段,本文提出利用直流电法技术进行采动围岩应力分布探测的思路,分析基于直流电法的采动围岩应力分布及变化探测原理,实验测试分析煤样在不同应力和裂隙等条件下煤层视电阻率的响应规律,现场测试分析采动围岩应力分布的电法响应规律,并进行验证。

(1) 分析了直流电法探测采动围岩应力分布的原理。直流电法探测以煤岩体的导电性差异(即煤岩体电阻率)为基础,煤体导电特性与孔裂隙分布的演化是决定煤岩体受载过程中电阻率变化特征的主要因素,干燥煤岩体主要以电子导电为主,不同应力水平作用下的煤体,其内部孔裂隙分布不同,从而表现出不同的视电阻率响应规律,即:卸压区内,宏观孔裂隙大量分布,视电阻率值最大,应力集中区内,原始孔裂隙大量闭合,视电阻率最低,原始应力区内孔裂隙不受采动影响,视电阻率大小介于卸压区和应力集中区之间。

(2) 实验测试和分析了不同应力水平和孔裂隙条件下煤岩体视电阻率的响应规律,发现:加载初期,视电阻率随应力增加而降低;加载中期,视电阻率随应力增加而小幅增大,加载后期至破坏,随应力增大视电阻率呈倍数增大。

(3) 利用直流电法探测手段对糯东煤矿 11702 工作面回风顺槽动压区进行了探测,发现工作面前方超前卸压带在距回采面 0m~15m 范围内,巷道松动圈范围约为距煤壁 0m~4m,应力集中带一般为 4m~9m。结合电磁辐射技术及钻屑量指标技术对探测结果进行了测试对比验证,表明直流电法技术可以用来探测采动围岩应力的分布状况。与传统测试方法相比,直流电法探测具有高效、快捷的优势,其区域性探测结果更加的全面、直观。

本论文有图 50 幅,表 1 个,参考文献 104 篇。

关键词: 采动应力分布; 直流电法; 视电阻率; 探测

Abstract

With the increase of the depth of coal mining, the stress distribution and change of the surrounding rock are more complicated due to the complicated geological conditions and mining conditions, which have great influence on the roadway support and the rock and rock dynamic disaster, and effectively detect the surrounding rock Stress distribution and change is particularly important. This paper presents the idea of using the direct current method to study the stress distribution of the surrounding rock, and analyzes the stress distribution and the change detection principle of the mining surrounding rock based on the direct current method. The experimental analysis analyzes the coal samples in different Stress and fracture conditions, and the stress response law of the stress distribution of the surrounding rock is analyzed and verified.

(1) The principle of direct current method for detecting the stress distribution of surrounding rock is analyzed. The direct current method is based on the conductivity difference of coal and rock mass (the resistivity of coal rock mass). The evolution of coal body conductivity and pore fissure distribution is the main factor to determine the change of resistivity in the process of loading and unloading. The coal body is mainly composed of electron conduction and different stress levels, and its internal pore fractures are different, which shows different resistivity response laws. In the unloading area, the macroscopic pore fissures are distributed in large quantities, The apparent resistivity is the largest, the stress concentration is closed, the original pore fissures are closed in large quantities, the apparent resistivity is the lowest, and the pore fissures in the original stress zone are not affected by the mining. The apparent resistivity is between the pressure relief zone and the stress concentration area.

(2) The experimental results show that the apparent resistivity of coal and rock under different stress levels and pore fissures is analyzed. It is found that the apparent resistivity decreases with the increase of stress at the beginning of loading. In the middle stage of loading, the apparent resistivity increases slightly with the increase of stress , After loading to damage, with the increase in stress as the resistivity increased multiple.

(3) The method of direct current method is used to detect the dynamic pressure zone of the 11702 working face in the NuoDong coal mine. It is found that the pressure relief zone in the front face of the working face is in the range of 0m ~ 15m,

roadway loose circle range is about 0m ~ 4m away from the coal wall, stress concentration zone is generally 4m ~ 9m. The results show that the direct current method can be used to detect the distribution of stress in the surrounding rock of the mining area, and the results show that the direct current method can be used to detect the stress distribution of the surrounding rock. Compared with the traditional test method, the direct current method has the advantages of high efficiency and fastness, and its regional detection result is more comprehensive and intuitive.

The paper has 50pieces of figures, 1 piece of table, 104 pieces of references.

Keywords: Stress distribution; DC method; Apparent resistivity; Detection

目 录

摘 要.....	I
目 录.....	IV
图清单.....	VIII
表清单.....	XII
变量注释表	XIII
1 绪论.....	1
1.1 研究背景和意义.....	1
1.2 研究现状.....	2
1.3 存在的问题及不足.....	6
1.4 主要研究内容及思路.....	6
2 直流电法探测采动围岩应力分布的原理分析	8
2.1 采动应力分布原理.....	8
2.2 直流电法探测原理.....	10
2.3 基于直流电法探测采动围岩应力分布的原理分析.....	12
2.4 本章小结.....	14
3 网络并行电法技术及装备	16
3.1 网络并行电法技术.....	16
3.2 网络并行电法仪及其操作.....	18
3.3 网络并行电法数据处理.....	20
3.4 本章小结.....	23
4 小尺寸煤体直流电法响应规律研究	25
4.1 实验系统建立.....	25
4.2 不同应力加载条件下直流电法响应规律.....	27
4.3 宏观裂隙条件下直流电法响应规律.....	33
4.4 本章小结.....	36
5 采动围岩应力分布直流电法现场探测	38
5.1 糯东煤矿矿井概况.....	38
5.2 工作面回采应力分布探测结果及验证分析.....	40
5.3 巷道围岩应力分布探测结果及验证分析.....	48

5.4 本章小结.....	58
6 全文总结、创新点及展望	60
6.1 全文总结.....	60
6.2 创新点.....	61
6.3 展望.....	61
参考文献	63
作者简介	69
学位论文原创性声明	70
学位论文数据集	71

Contents

Abstract.....	II
Contents	VI
List of Figures.....	VIII
List of Tables.....	XII
List of Variables.....	XIII
1 Introduction	1
1.1 The Research Background and Significance	1
1.2 The Research Status	2
1.3 Problems and Deficiencies.....	6
1.4 Main Research Contents and Thought	6
2 Theoretical Analysis of Stress Distribution in Mining Surrounding Rock by DC Method	8
2.1 Theory of Mining Stress Distribution	8
2.2 Instrument of DC Electrical Detection	10
2.3 Theoretical Analysis of Stress Distribution in Mining Surrounding Rock Based on Direct Current Method	12
2.4 Summary	14
3 Network Parallel Technology and Equipment	16
3.1 Network Parallel Electrical Method.....	16
3.2 Network Parallel Instrument and Its Operation	18
3.3 Network Parallel Method Data Processing	20
3.4 Summary	23
4 Study on the Response Law of Small-Size Coal to Direct Current Method.....	25
4.1 The Experimental System	25
4.2 Response Law of Direct Current under Different Stress Loading Conditions	27
4.3 Response Law of DC Method Under Macroscopic Fissure Condition.....	33
4.4 Summary	36
5 Monitoring of Stress Distribution in Mining Surrounding Rock by DC Method	38
5.1 Profile of NuoDong Coal Mine.....	38

5.2 Monitoring Results and Reliability Analysis of Stress Distribution in Working Face	40
5.3 Monitoring Results and Reliability Analysis of Roadway Excavation Stress Distribution	48
5.4 Summary	58
6 Summaries, Innovations and Prospects	60
6.1 Summaries.....	60
6.2 Innovations.....	61
6.3 Prospects	61
References	63
Author's Resume.....	69
Declaration of Thesis Originality.....	70
Thesis Data Collection	71

图清单

图序号	图名称	页码
图 1-1	研究方法和技术路线	7
Figure 1-1	Research methods and technical route	7
图 2-1	圆形巷道围岩松动圈及应力分布	8
Figure 2-1	Rock loose circle schematic	8
图 2-2	工作面前方应力分布	9
Figure 2-2	Stress distribution in front of working face	9
图 2-3	电法探测供电原理示意图	10
Figure 2-3	DC detection principle schematic diagram	10
图 2-4	直流电法勘探体积示意图	12
Figure 2-4	Volume diagram of DC method	12
图 2-5	采动裂隙场分区图	14
Figure 2-5	Mining fissure field area map	14
图 3-1	单电极电位采集时间序列	16
Figure 3-1	Time series of single electrode potential acquisition	16
图 3-2	AM 法工作原理图	17
Figure 3-2	Schematic diagram of working principle of AM method	17
图 3-3	AM 法电压分布探测图	17
Figure 3-3	AM method to detect the voltage distribution	17
图 3-4	ABM 法工作原理图	18
Figure 3-4	Schematic diagram of working principle of ABM method	18
图 3-5	ABM 法电压分布探测图	18
Figure 3-5	ABM method to detect the voltage distribution	18
图 3-6	网络并行电法仪组成部件	19
Figure 3-6	Composition of DC system	19
图 3-7	网络并行电法连接方式	20
Figure 3-7	Instrument connection physical map	20
图 3-8	数据采集操作流程	21
Figure 3-8	The flow chart of data collection	21
图 3-9	WBD 数据采集与处理系统软件界面	22
Figure 3-9	Interface of data acquisition and processing system software	22
图 3-10	WBD 软件数据处理流程	23

Figure 3-10	The flow chart of data acquisition and processing system software	23
图 4-1	加载系统图	25
Figure 4-1	Diagram of loading system	25
图 4-2	铁钉电极	26
Figure 4-2	Nail electrode	26
图 4-3	煤体直流电法测试实验系统图	26
Figure4-3	Load coal parallel electrical method testing experimental system	26
图 4-4	煤体直流电法测试实验系统实物图	27
Figure4-4	The physical map of coal parallel electrical method testing experimental system	27
图 4-5	原煤试样电极布置图	27
Figure 4-5	Electrode arrangement of coal sample	27
图 4-6	煤体应力加载曲线	28
Figure4-6	Coal loading stress curve	28
图 4-7	分级加载过程视电阻率云图	31
Figure 4-7	Apparent resistivity image of step loading process	31
图 4-8	各分级荷载之间视电阻率差值云图	33
Figure4-8	Apparent resistivity value image between different steps	33
图 4-9	不同煤样压裂前后视电阻率差值云图	36
Figure 4-9	Apparent resistivity image of different coal mass before and after fracturing	36
图 5-1	糯东煤矿交通位置图	38
Figure 5-1	Nuodong coal mine traffic map	38
图 5-2	11702 工作面巷道布置图	40
Figure 5-2	Schematic diagram of 11702 working face	40
图 5-3	11702 工作面巷道布置示意图	41
Figure 5-3	Schematic diagram of 11702 working face	41
图 5-4	11702 工作面电法布置示意图	41
Figure 5-4	Schematic diagram of network parallel electrical method in 11702 working face	41
图 5-5	数据采集流程图	42
Figure 5-5	Flow chart of data acquisition	42
图 5-6	回采应力网络并行电法探测结果云图	43
Figure 5-6	Diagram of network parallel electrical method detection results	43

图 5-7	回采应力网络并行电法探测结果差值云图	45
Figure 5-7	Diagram of network parallel electrical method different detection results	45
图 5-8	YDD16 电磁辐射仪	46
Figure 5-8	YDD16 electromagnetic radiometer	46
图 5-9	YDD16 矿用本安型电磁辐射仪测试方法示意图	46
Figure 5-9	Monitor pattern of YDD16 electromagnetic radiation instrument for mining	46
图 5-10	11702 工作面测点布置图	47
Figure 5-10	11702 Work surface measuring point layout	47
图 5-11	回风顺槽电磁辐射区域分布图	47
Figure 5-11	Distribution diagram of electromagnetic radiation area in air way	47
图 5-12	11702 工作面电法布置示意图	49
Figure 5-12	Schematic diagram of network parallel electrical method in 11702 working face	49
图 5-13	数据采集流程图	50
Figure 5-13	Flow chart of data acquisition	50
图 5-14	80m 处直流电法探测云图	52
Figure 5-14	Diagram of network parallel electrical method detection results in 80m	52
图 5-15	90m 处直流电法探测云图	54
Figure 5-15	Diagram of network parallel electrical method detection results in 90m	54
图 5-16	100m 处直流电法探测云图	55
Figure 5-16	Diagram of network parallel electrical method detection results in 100m	55
图 5-17	钻屑量统计结果	56
Figure 5-17	statistical results of index of drilling yields	56
图 5-18	煤岩内部电磁辐射测试方法	57
Figure 5-18	The schematic diagram of drilling EMR	57
图 5-19	电磁辐射钻孔测点布置图	57
Figure5-19	Schematic diagram of electromagnetic radiation monitor point arrangement	57
图 5-20	回风巷钻孔内电磁辐射强度变化图	58

Figure 5-20	Distribution diagram of electromagnetic radiation area in air way	58
-------------	---	----

表清单

表序号	表名称	页码
表 2-1	煤体电阻率影响因素分析	13
Table 2-1	Conventional factors of coal resistivity	13

变量注释表

p_0	原岩应力
p_i	支护阻力
r	巷道半径
j	内摩擦角
C	围岩黏聚力
r	视电阻率, $\Omega\cdot\text{m}$
I	电流, A
ΔU_{MN}	电位差, V

1 绪论

1 Introduction

1.1 研究背景和意义 (The Research Background and Significance)

长久以来煤炭都是我国重要的基础能源,在一次性能源生产和消费中的比例长期占据70%以上。虽然现在提倡使用核能、风能等一系列的可再生能源,但考虑到煤炭的成本优势和在能源结构中的地位以及洁净煤技术取得的重大突破,煤炭依然是我国最安全、最经济和最可靠的能源之一。因此,煤炭产业对现代化建设的发展仍然有重要的作用。但长期以来我国又是世界上冲击地压和煤与瓦斯突出等煤岩动力灾害最严重的国家之一^[1,2],冲击地压、煤与瓦斯突出及顶板大面积垮落等煤岩动力灾害严重制约着煤矿安全高效生产。目前我国近50%国有重点煤矿受到冲击地压的威胁;近150座煤矿受到冲击地压的严重影响。自1933年我国抚顺胜利煤矿发生冲击地压以来,北京、阜新、枣庄、开滦、徐州、新汶等地煤矿相继发生过冲击地压灾害^[3],我国记载第一次煤与瓦斯突出事故为1950年辽宁矿务局发生的^[4],突出煤岩12780t,瓦斯140万 m³;2005年辽宁阜新孙家湾煤矿“2.14”冲击地压引发瓦斯爆炸事故,死亡214人,30人受伤,直接经济损失4968.9万元^[5]。

目前我国绝大部分国有重点煤矿已经进入深部开采,开采深度以每年8m~12m的速度增加,东部矿井的增加速度达到每年10m~25m。伴随着开采深度的不断增加和开采强度的不断加大,井下应力环境发生了很大的变化,矿压显现加剧、巷道围岩大变形、巷道支护困难和冲击地压等煤岩动力灾害也日趋严重,对深部煤炭资源的安全高效开采造成了巨大的威胁,因此,深部资源开采过程中所产生的岩石力学问题已经成为国内外研究的焦点^[5-17]。岩体的应力状态研究是工程岩体力学的一个重要问题,岩体中的应力是巷道设计与维护、工作面布距设计等地下工程设计与施工的基础资料,也是引起采矿等岩土工程开挖工程变形和破坏的根本作用力^[18]。“采动”发生后,围岩的原始应力平衡状态遭到破坏,引起应力的重新分布,当重新分布的应力超过煤岩体的极限强度时,采掘工作面周围的煤岩体就会发生破坏,进而诱发冲击地压、煤与瓦斯突出等煤岩动力灾害^[19-24]。采动应力对冲击地压的影响是显著的,采动应力场及其分布特征在煤岩层冲击危险性评价中具有重要作用^[25,26]。目前,国内外对冲击地压的发生机理进行了大量的研究,虽然尚未取得一致性的认识,但对冲击地压的主要影响因素认识大体一致,即高度的应力集中和释放时产生的巨大能量是冲击地压发生的必要条件。在突出煤层中,煤层结构及力学性质是影响突出发生的主要因素,而煤岩体

中的地应力和瓦斯压力则是煤与瓦斯突出的原动力。因此,采动围岩应力的分布探测研究对防治冲击地压、煤与瓦斯突出、煤壁片帮等煤岩动力灾害及工作面区域危险性评价、顶板控制、巷道支护等矿井安全生产有着极其重要的意义。

1.2 研究现状 (The Research Status)

1.2.1 采动应力分布研究现状

采掘过程中,煤层原岩应力受采动影响而出现转移,在巷道掘进时,工作面前方煤体受三个方向的应力,达到应力平衡状态,当掘进或回采时,原有应力平衡被打破,使得原始应力重新分布,并达到新的平衡状态。重新分布的应力称之为采动应力,应力重新分布后达到新的平衡状态。在这种平衡过程中受地质条件、采掘活动类型等因素影响,原始应力扰动规模和程度有很大的区别,即采动应力分布有很大的差异性,一方面会产生应力的集中,应力集中区域内采动应力远远大于原始应力;另一方面会产生应力释放,即应力释放区域(卸压区),采动应力比原始应力又小很多。通常来讲,首先在煤壁附近形成较高的集中应力,当集中应力值达到煤体的屈服极限后,这部分煤体首先发生屈服变形,使集中应力向煤体深部转移^[27-28],达到新的应力平衡后,工作面就形成了卸压带、应力集中带和原始应力带,简称巷道应力“三带”^[29-31]。

众多学者对采掘引起的围岩应力分布进行了相关研究,主要集中于动压区及煤柱内支承压力的分布。安文勇^[32]通过现场观测提出支承压力分布的显现具有随上覆岩层的周期性运动而呈周期性变化的特点;朱守颂等^[33]通过对刘桥矿首采工作面超前支承压力的研究发现工作面顶板应力场沿工作面推进方向明显分为三个区;宋振骥等^[34]从支承压力的形成机理入手,推导出支承压力分布结构力学模型;邵广印^[35]通过现场试验和数值模拟研究分析了工作面支承压力的分布规律,得出工作面前方支承压力存在峰值;李伟利^[36]以弹性连续梁为力学模型,研究了采场前方支承压力分布规律及其主要影响因素,并得出支承压力表达式。国外对采动空间围岩应力分布规律的研究更注重实测,根据现场实测及监测确定围岩应力分布及演化规律^[37],目前研究成果对掌握采动空间围岩应力分布规律有很好的基础作用,但从中也可以看出由于地质条件及回采工艺的不同,煤体物理性质、顶板完整程度及上覆岩层等存在差异,由此产生的应力分布也不同,因此采动围岩应力分布规律还有待进一步研究。

1.2.2 采动应力分布测试技术研究现状

采掘等工程发生后,煤岩体内部应力大小、方向都将发生变化。当应力超过围岩所能承受的最大应力后,围岩自稳将会失效,煤岩发生塑性变形,随着应力

的继续增加和集中,煤岩体会发生突然失稳现象,引发冲击地压、煤与瓦斯突出、煤壁偏帮、顶板塌陷等煤岩动力灾害。因此采动空间围岩应力分布的测试研究成为冲击地压、煤与瓦斯突出等煤岩动力灾害事故的研究重点,也成为巷道支护、工作面区域危险性评价、顶板控制提供应力资料的直接方法。

采动空间围岩受到扰动等工程影响,煤岩体塑性变形比较严重,围岩裂隙较为发育,在此范围内准确测试采动应力相对困难,且适用于此类环境的应力测量方法和传感器相对较少,澳大利亚等国家对采动应力的测试技术比较成熟,而我国对矿区的采动应力测试技术研究起步较晚。传统的采动应力测量方法仅能掌握在采掘过程中某一局部地点的应力大小及分布情况,而无法有效的反应该区域范围内的应力分布及变化。准确掌握区域内采动围岩应力的分布状况对工作面区域危险性划分、冲击地压、煤与瓦斯突出等煤岩动力灾害的预测预防具有重要意义。因此,采动围岩应力分布的区域性测试对揭示冲击地压、煤与瓦斯突出等煤岩动力灾害的发生机理更为重要。

目前国内外测试采动应力及分布主要采用钻孔应力监测技术、电测辐射测试技术、数值模拟分析技术及震动 CT 探测技术等。

(1) 钻孔应力监测技术

国内现场监测采动应力广泛使用钻孔应力监测技术,钻孔应力监测技术主要包括钻孔应力解除法和钻孔应力计测试方法。应力解除法是在采动空间岩体上解除钻孔岩体应力,使其发生膨胀变形,通过测量解除应力后岩体的三维应变,结合岩体的弹性模量,根据胡克定律计算出岩体中应力大小和方向。钻孔应力测试技术是我国目前工程现场测量煤层采动应力的主要技术,常用传感器大都以格鲁兹压力盒为基础,在外观和信号转换上进行改进,发展成的钻孔应力计,包括液压式和振弦式应力计两种,在安装方式上采用钻孔探入式固定安装。按照测量原理,液压式应力计和振弦式应力计两者均属于刚性包体应力计。

(2) 电磁辐射测试技术

除钻孔应力监测技术外,现场测试应力时还会用到电磁辐射测试技术。岩石电磁辐射的研究是从地震前电磁异常变化开始的。前苏联和我国是较早对此进行相关研究的国家^[38-43]。国外关于岩石电磁辐射的研究始于20世纪50年代,Э.И.Пархоменко 用实验方法对花岗岩、脉石英试样进行压电现象研究^[44];托木斯克工学院的研究人员和乌兹别克科学院地震研究所,在塔什干地区的恰尔瓦克水平坑道中进行了地球脉动电磁场变化的观测,证明了地壳发射电磁脉冲,而且在震前发射强度急剧上升^[45]。我国最早对电磁辐射进行相关研究的是钱书清等,其在野外观测到岩石破裂过程中有大量电磁波^[46,47]发射现象,此后通过徐为民^[48,49]、李均之等^[50,51]和孙正江等^[52]在实验室研究得出岩石受力破裂时会伴随电磁

辐射的发生。以上研究大多限于坚硬岩石,关于煤及软岩的研究则相对较晚。Frid V 等结合现场研究了井下电磁辐射特性的影响因素^[53-55]。何学秋^[56,57]等在我国首次通过实验研究证明,煤在变形破裂过程中有电磁辐射产生。王恩元、何学秋^[58-62]等通过对煤岩体破裂过程中电磁辐射的特征进行研究,提出了电磁辐射预测预报冲击地压、煤与瓦斯突出等煤岩动力灾害的原理和技术方法,并进行了大量的应用。王恩元、刘晓斐等^[63,64]等提出利用电磁辐射技术测试回采工作面应力分布的原理并进行了现场的应用。何学秋、王恩元等^[65]经理论及实验研究提出通过测定钻孔钻进过程中电磁辐射强度特征来确定煤岩卸压带范围,取得了良好的效果。

(3) 数值模拟分析技术

在采动围岩应力分布的数值模拟中,通常采用 ANSYS、FLAC-3D 等数值模拟软件,通过根据现场建立的计算模型来模拟出现场采动应力的分布情况。刘长友、黄炳香等^[66]通过 FLCA-3D 有限元软件对超长孤岛工作面的支承压力分布进行了数值模拟,得出了回采期间工作面超前支承压力分布规律;司荣军等^[67]模拟了煤层开采过程中采场支承压力的动态变化,并通过模拟结果得出工作面推进距离、长度等因素对支承压力集中系数和支承压力峰值点距工作面距离的影响程度;赵同彬等^[68]通过 ANSYS 模拟软件对采场支承压力分布动态演化规律和塑性区分布范文进行了数值模拟;王振等^[69]以实际发生动力灾害的采掘工作面为模拟原型,分析了采场和巷道应力分布特征。

(4) 震动波 CT 探测技术

震动波 CT 探测技术研究起源于1895年 Wilhelm^[70]对 X 射线的发现,后经 J.Radon^[71]从理论上进行了层析成像概念的概括。科学家于1979年将该技术应用于地球物理领域,即震动波层析成像技术正式形成^[72]。通过多年的发展,窦林名等^[73]结合微震实时监测系统,采用矿震震动波层析成像技术对煤矿工作面开采过程中的冲击危险性进行了实施评估;Lurka^[74]对卸压解危措施及效果进行了震动波 CT 探测应用;Friedel 等^[75]和王文书等^[76]采用主动震动波层析成像(CT)研究了波速分布与应力分布之间的关系,发现波速分布区与应力集中区及未来强矿震分布区对应一致性较好;Luxbacher^[77]和 Hosseini 等^[78]利用震动波 CT 技术以开采诱发的自然矿震作为激发源对工作面回采过程中波速进行了反演,发现高应力支承压力区与高波速区吻合较好。但通过现有研究发现震动波 CT 探测技术对采动应力分布探测的分辨率不足。

1.2.3 直流电法理论及应用研究现状

电法勘探是以岩石电磁学性质和电化学性质的差异作为基础,通过观测研究天然电磁场或人工建立的电磁场的空间和时间分布规律以解决地质问题的一种

地球物理勘探方法^[79]。电法勘探是地球物理勘探的一个重要分支,而网络并行电法又是直流电法技术中最先进的一种^[80]。

早在五六十年代,苏联学者即将直流电法应用于煤矿井下勘探,经过多年探索,积累了关于矿井直流电法勘探工作的丰富经验,采用直流电法勘探成功解决了与煤矿安全、生产有关的多种地质问题,包括煤层小构造探测,矿井水文地质条件调查,煤层界面起伏和煤层尖灭、冲刷带探测,顶板稳定性评价,以及矿压探测,岩煤突出预报,巷道变形探测等。80 年代初苏联制定了高阻煤层和低阻煤层的矿井直流电法勘探工作规范,并具体规定了矿井对称四极和三极电测深法、矿井电剖面法和巷道间直流电透视法,以及点源梯度法的施工方法与技术^[81-85]。1990 年以来,匈牙利重工业技术大学 J.Csokás^[86-89]等重点研究了用于探测高阻煤层内小构造的直流探测技术,在探测煤层含水构造、圈定煤层变薄区等方面积累了成功经验。俄罗斯莫斯科大学地球物理研究室为探测低阻无烟煤煤层中的小构造,开展了井下矢量电阻率法的研究工作,为判定地电异常体的空间位置探索了一条有效途径,并在非接触式电法测量技术、总场测深技术(TES)和电各同异性特征研究等方面做了大量工作^[90-92]。日本曾应用巷道与地面间的电阻率成像技术研究断裂构造和金属矿床的赋存状态^[93]。

我国煤炭部地勘司最早在京西矿区万佛堂平硐进行电法试验,之后北京、淮北等矿务局相继开展井下试验工作。80 年代后期,矿井突水问题日趋严重,煤科总院西安分院、唐山分院、淮北矿务局、峰峰矿务局、河北煤研所、邯郸矿务局和中国矿业大学等才逐步恢复了矿井电法的研究工作。其间,煤科总院重庆分院左德坤翻译发表了许多反映国外矿井电法新进展的参考文献;邯郸矿务局申请获得了矿井电测深技术方面的国家专利;中国矿业大学在淮北、徐州两矿区,煤科总院西安分院在焦作、肥城等矿区,河北煤研所、唐山煤科分院在河北省多个生产矿区进行了大量井下技术试验工作^[94,95]。1990~1995 年间,以矿井突水探测为重点,国内各单位在我国东部矿区进行了大量井下技术试验工作,积累开展矿井电法工作的实践经验。此外,铁道部勘察院钟世航教授等在淮北矿务局进行了井下微分测深法探测残留煤厚的试验工作^[96]。河北煤研所、邯郸矿务局等单位还进行了矿井电法掘进头超前探测试验,地矿部岩溶地质研究所在我国南方煤矿进行了矿井水综合物探探测工作^[97,98]。煤科总院西安分院与中国地质大学(北京)合作研究了井下水平钻孔电法测煤厚技术。岳建华^[99]系统阐述了矿井电法在煤层底板突水探测中的应用与发展状况。刘树才等发现^[100,101],由于瓦斯灾害与煤层构造或破坏带等地质缺陷密切相关,而直流电法勘探能够较好的探测煤层构造或破坏带,该方法能够为煤与瓦斯突出预测提供依据。应力与破坏具有较好的对应关系,因此,直流电法技术也能对应力分布探测提供依据,但目前尚无相关报道。

1.3 存在的问题及不足 (Problems and Deficiencies)

尽管采动围岩应力分布的测试对设计巷道支护,揭示冲击地压、煤与瓦斯突出等煤岩动力灾害的发生机理,提高动力灾害预测和防治效果等具有非常重要的现实意义和应用价值,且前人在采动围岩应力分布测试方面也进行了大量的研究并取得了一系列有价值的成果。但在围岩三带分布及采动应力分布探测方面,存在的问题主要有:

(1) 巷旁煤体三带及应力分布非常复杂,且因采掘过程及动态变形与时间效应等因素的影响,是动态变化的,对冲击地压、煤与瓦斯突出、巷道变形及巷道支护设计影响较大。如何比较准确地探测清楚巷旁三带及应力分布,是急需解决的问题。

(2) 目前工程现场采动应力及分布的测试分析常用钻孔应力监测技术、电磁辐射测试技术、数值模拟分析、钻屑测试及震动 CT 探测等技术。钻孔应力监测技术受传感器接触程度影响较大,钻孔工程量大,且为“点测量”形式,无法做到区域全面、无死角的应力分布监测;电磁辐射测试技术单方面实现区域性监测较为困难,且测试过程中同样存在钻孔工程量大的缺点;震动波 CT 探测技术对采动应力分布探测的分辨率不足。因此如何能高效、快捷和全空间探测三带和采动应力分布是急需解决的问题。

(3) 直流电法技术在诸如矿井水田探测、薄煤层探测以及底板动态探测等矿山地质构造探测方面应用较广,即直流电法主要用于探测构造及含水区等电阻率显著差异的异常体,对于煤岩体三带及应力分布等缓变区域的高分辨率探测方面未见相关报道。

1.4 主要研究内容及思路 (Main Research Contents and Thought)

1.4.1 主要研究内容

(1) 通过分析采动围岩应力分布规律,并结合煤岩体在不同应力水平条件下裂隙分布特点,分析利用直流电法技术探测应力分布的原理。

(2) 利用直流电法技术,在实验室模拟研究小尺度煤岩在不同应力水平和孔裂隙条件下视电阻率变化规律,分析揭示电法响应与煤岩裂隙分布的耦合机制,为现场应用提供理论依据。

(3) 利用网络并行电法仪进行现场探测,分析采动围岩应力场的分布,确定工作面前方超前采动影响范围(动压区)和巷道围岩卸压带等,解决目前应力探测无法区域探测的问题。在此基础上,结合现场地质条件提出基于直流电法的采动围岩应力分布的探测技术。

1.4.2 研究思路与方法

针对本论文的研究内容,采用理论分析—实验模拟—现场应用及验证相结合的方法进行分析研究。技术线路图如图 1-1 所示:

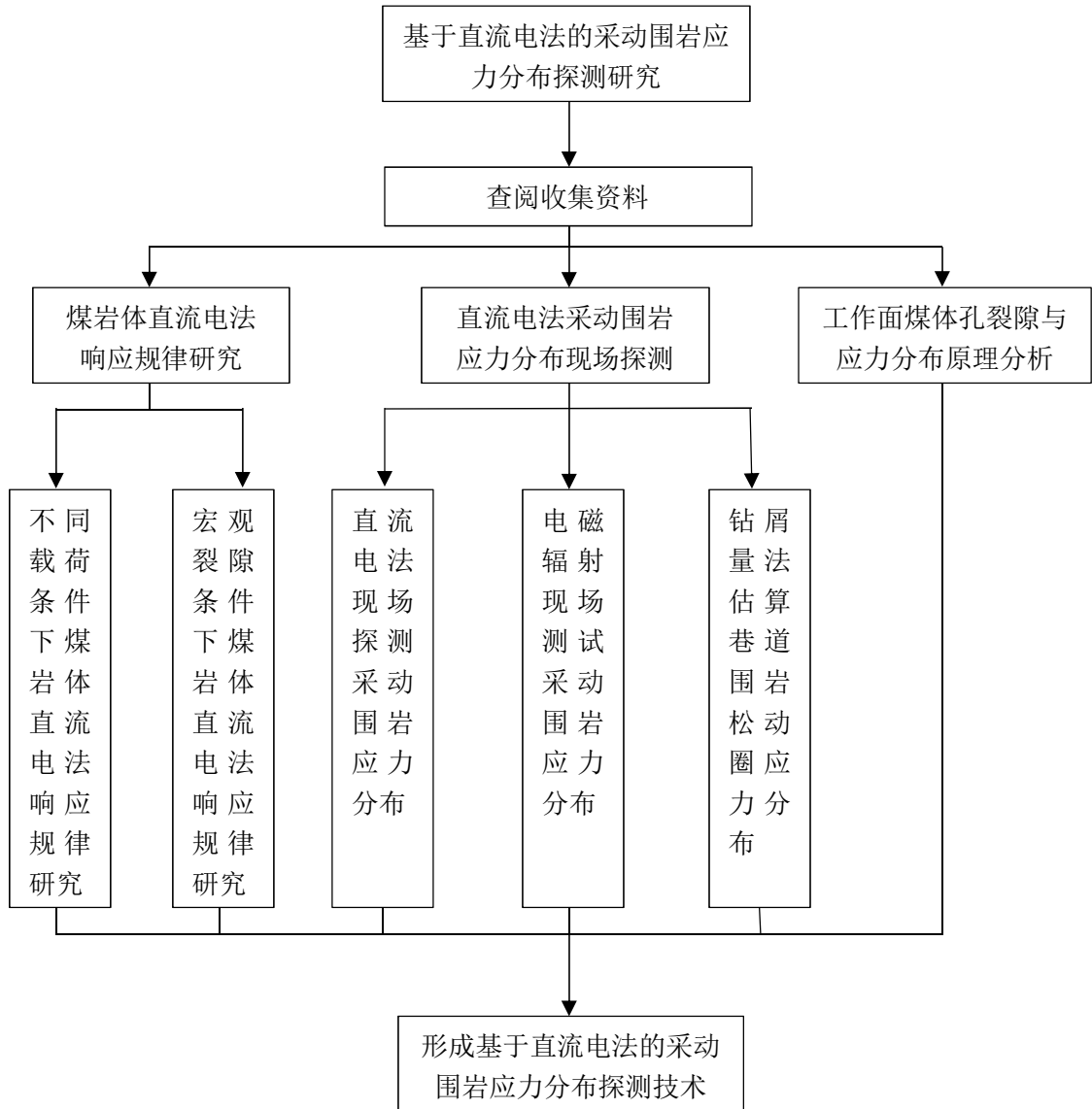


图 1-1 研究方法和技术路线

Figure1-1 Research methods and technical route

2 直流电法探测采动围岩应力分布的原理分析

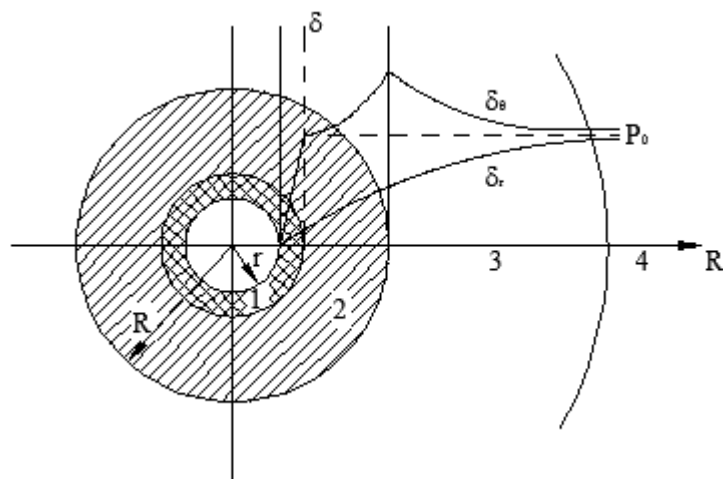
2 Theoretical Analysis of Stress Distribution in Mining Surrounding Rock by DC Method

2.1 采动应力分布原理 (Theory of Mining Stress Distribution)

在煤矿生产过程中大体存在着两种形式的采动应力,即由巷道掘进引起的围岩应力和工作面回采引起的支撑应力。

(1) 巷道围岩采动应力及分布

未采动的煤岩体处于弹性变形状态,原岩应力相互平衡。并巷的开挖破坏了原始煤岩的应力平衡状态,再加上支护的滞后性和不密贴性,围岩应力重新分布并在巷道围岩内出现应力集中。若围岩应力小于岩体强度时,围岩仍处于弹性状态,这是围岩应力的计算可以利用弹性力学的方法转化为平面应变进行处理^[102];当围岩应力大于岩体强度时,巷道围岩便会产生裂隙,从巷道周边向围岩深处扩展到一定区域,出现塑性变形,形成一定松动破坏范围,称之为围岩松动圈^[1]如图 2-1 所示,松动圈内的围岩强度明显削弱,低于原始应力,围岩产生破裂和位移;塑性区以外的应力高于原始应力,它与弹性区内应力增高部分均为承载区,成为应力集中区,再向围岩深部即为处于稳定状态的原始应力区^[102]。



1 松动圈; 2 塑性区; 3 弹性区 (应力升高); 4 弹性区 (原岩)
 δ_r : 径向应力变化曲线 δ_θ : 垂直应力变化曲线 P_0 : 原始应力值

图 2-1 圆形巷道围岩松动圈及应力分布

Figure2-1 Rock loose circle schematic

围岩松动圈有一个从产生、发展到稳定的过程,稳定后的松动圈厚度是围岩强度、围岩应力、断面跨度等因素共同作用的结果,其大小可以定量的反映出岩体强度和受力状况^[1],工程中主要测量的是塑性圈的大小。根据极限平衡理论,

当围岩应力达到极限强度后，围岩强度并没有完全丧失，而是随着变形的增加而逐渐的降低，直至降到残余强度为止^[102]，因此在假设的各项等压条件下，圆形巷道塑性区半径 R 为：

$$R = r_0 \left[\frac{(p + C \cot \varphi)(1 - \sin \varphi)}{p_i + C \cot \varphi} \right] \quad (2-1)$$

式中 p 是原岩应力；

p_i 是支护阻力；

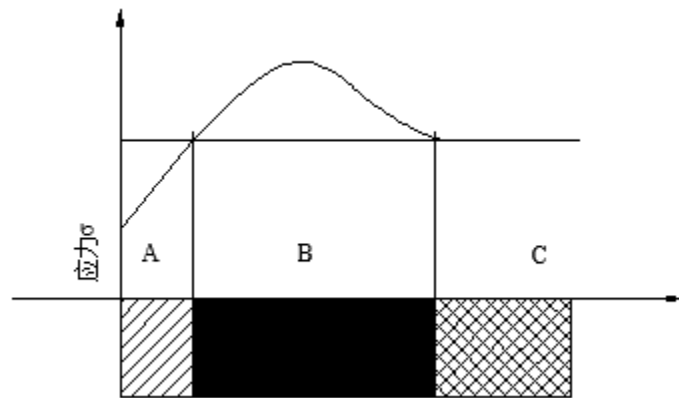
r_0 是圆形巷道半径；

φ 是围岩的内摩擦角；

C 是围岩的黏聚力；

(2) 工作面前方采动应力及分布

由于复杂的地下地质环境，回采工作面作业过程中采动应力的变化非常复杂，影响其围岩稳定性的因素也很多，但一般而言，回采工作面前方依次存在三个区域，及 A 卸压带、B 应力集中区和 C 原始应力区，如图 2-2 所示。回采工作空间形成后，煤体前方始终存在着这三个区域，并随着工作面的推进而前移。卸压区内的煤体仍属于塑性区，这种现象与围岩松动圈相类似，此范围内的煤体发生屈服变形，并在其内部形成大量的孔、裂隙，煤体已大体破碎，不能承受较大应力作用，因此该区域应力水平较低。



A 卸压带；B 应力集中区；C 原始应力区

图 2-2 工作面前方应力分布

Figure2-2 Stress distribution in front of working face

根据煤层卸压带与塑性极限应力区理论可知，工作面煤层卸压带与煤层厚度、开采深度和煤层倾角等因素有关，工作面煤层卸压带随着煤层厚度的增加、开采深度的增大和煤层倾角的减小而增大。即使在三者条件一定的情况下，由于煤层强度和地质构造条件的不同，煤层卸压带也在一定范围内变化。工作面前方这三个区域的范围及距工作面煤壁的距离随周期性回采工作的进行而发生变化。在采掘空间形成的瞬间，工作面煤体卸压带范围较小，应力集中区的应力集中程度较高，随着时间的推移，逐渐向内部转移，即回采工作面前方的应力分布区域会随

时间和空间的推移而变化。对于地质条件均匀，工作面回采速度变化不大的工作面而言，这三个区域的分布范围变化不大。受采动影响，回采工作面卸压带内应力和瓦斯压力均较小，是突出等煤岩动力灾害发生的屏障，因此卸压带越长，工作面突出危险性越低。而应力集中区越靠近煤壁，工作面突出危险性越大，同理，卸压带越宽，越不容易发生突出等煤岩动力灾害^[64]。

2.2 直流电法探测原理（Instrument of DC Electrical Detection）

直流电阻率法（简称直流电法）是主动源电法勘探的分支方法，其以探测物体的电差异性为基础，通过对人工建立的地下稳定电流场的分布规律进行探测和研究，来达到研究地质构造、探测裂隙带及地下水文特征的目的。

在物理学中假设存在一块由均匀材料制成的具有一定横截面积的导体，其电阻 R 与长度 L 成正比，与横截面积 S 成反比，即：

$$R = \rho \frac{L}{S} \quad (2-2)$$

式中， ρ 为比例系数，称之为物体的视电阻率（电阻率）。直流电法探测以煤岩体的导电性差异（即煤岩体视电阻率）为基础。

假设地下半空间介质是各向同性且均匀的煤岩体，通过地表埋设的正点电流源 $A(I)$ 和负点电流源 $B(-I)$ 向目标区域输入电流强度为 I 的供电电流，供电示意图如图 2-3 所示。

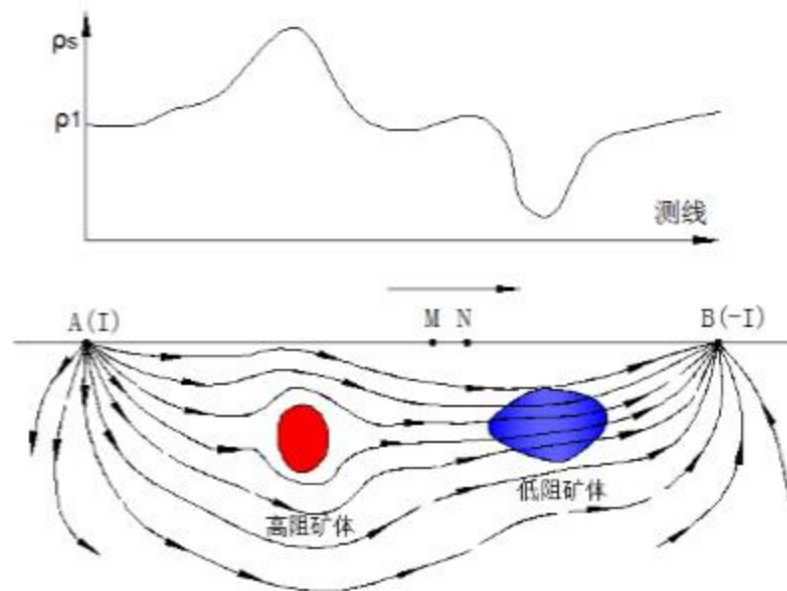


图 2-3 电法探测供电原理示意图

Figure 2-3 DC detection principle schematic diagram

据图可知，地面任意接收电极 M 和 N ，都存在相应的电位 U_M 和 U_N ，即：

$$U_M = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) \quad (2-3)$$

$$U_N = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right) \quad (2-4)$$

根据 2-3 和 2-4 可知, M 与 N 之间的电位差为:

$$\Delta U_{MN} = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN} \right) \quad (2-5)$$

式 2-5 变形可得:

$$\rho = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN} \right)} \frac{\Delta U_{MN}}{I} \quad (2-6)$$

实际测量时, 供电电源 A、B 通过电极将电流输送到地下, M、N 通过电极与电位差显示器相连, 为方便统一将 A、B 命名为供电电极, 将 M、N 命名为测量电极。AN、AM、BN、BM 分别表示供电电极与测量电极之间的距离。则设定装置系数为表示各个电极位置的几何关系参数, 即可用公式 2-6 表示:

$$K = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN} \right)} \quad (2-7)$$

将 2-7 带入 2-6 简化可得:

$$\rho = K \frac{\Delta U_{MN}}{I} \quad (2-8)$$

式中, ρ 表示探测区域的视电阻率, 单位; I 为供电电流, 单位 A; ΔU_{MN} 表示电位差, 单位 V。

直流电法作为一种重要的电法探测方法, 其基本原理是将供电电极 A、B 布置在待探测区域两端 (如图 2-4 所示) 进行供电, 在探测区域的导电空间内构建起人工电场, 经理论分析和实验验证在人工电场内, 有效的供电范围近似为一个宽等于 $AB/2$, 长为 AB 的长方体, 也就是说在这个长方体区域内集中了供电电流的绝大部分。该人工电场内电流的分布状态因勘探区域内诸如煤岩体、土壤、水等介质赋存的不同而发生变化。若勘探区域介质为单一均匀体, 人工电场的形状将会表现为均匀的半球体, 该理想化的勘探区域在现实勘探过程中很难存在。一般而言, 待勘探区域内由于受区域介质构造的影响会存在导电性不同的低阻煤岩体和高阻煤岩体, 当人工电场内电流经过低阻介质时会发生吸引现象, 而当电流流经高阻介质时则会出现排斥现象, 这也就导致了理想状态下均匀半球体电场演变成不均匀电场 (如图 2-3 所示)。地球物理领域一般通过直流电法仪对区域进行探测, 并通过测量结果反演出的电阻率云图来反映探测区域电场的不均匀分布, 进而判断出探测区域不同导电介质的构造及赋存情况。

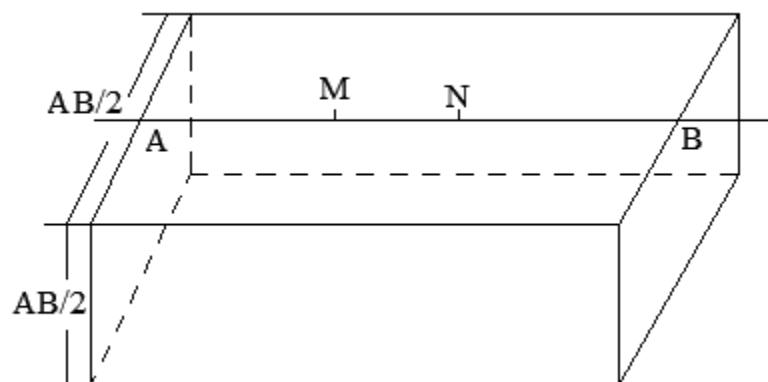


图 2-4 直流电法勘探体积示意图

Figure 2-4 Volume diagram of DC method

2.3 基于直流电法探测采动围岩应力分布的原理分析 (Theoretical Analysis of Stress Distribution in Mining Surrounding Rock Based on Direct Current Method)

电阻率是煤岩体的一种重要的物理量，国内外学者对其进行了大量的研究^[68-75,103]，考虑到煤岩体电阻率的影响因素有很多，且数值变化范围非常大，特总结了前人的研究成果形成表 2-1。

需要说明的是表中各因素对煤体电阻率的影响都只是单一因素的一般规律，煤体结构、地质环境和成分的复杂性，导致单一规律往往无法单独解释煤体电阻率的变化情况。在井下环境对煤体进行电阻率的研究往往会受多种因素的影响，在各种因素耦合作用下煤体电阻率的规律显现将会变的更复杂。固体介质在电场的作用下往往以电子导电为主，而介质中电子的来源主要是碰撞电离、场制冷发射以及介质内的热电子发射。大量的实验研究^[70-73]表明煤体作为一种固体电介质，其电子导电特性明显，所以在煤体中主要以电子导电为主。在应力应变过程中，不同煤样的电阻率变化规律存在一定的差异性，这种差异性主要与受载煤体孔裂隙分布的演化有关，因此，孔裂隙分布的演化是决定煤体电阻率变化规律的主要因素。

表 2-1 煤体电阻率影响因素分析

Table 2-1 Conventional factors of coal resistivity

影响因素 归类	影响因素	煤体电阻率变化规律
内因	变质程度	褐煤电阻率较低，烟煤和无烟煤电阻率变化范围很大。
	湿度	随湿度的增加，电阻率呈明显的下降趋势，但不同种类的煤变化的特征及幅度也不同。
	煤岩组分 与杂质	褐煤或烟煤电阻率随矿物杂质含量增高而降低，无烟煤的电阻率则随矿物杂质的含量增高而增大，但当无烟煤中含有大量黄铁矿时，会导致无烟煤的电阻率大幅度下降。
	工业分析 参数	电阻率随灰分的增加而增大，随水分和视密度的增加而减小，而孔隙率和挥发分则对电阻率的影响较小。
外因	温度	非突出煤体的不同煤种电阻率随温度变化表现出的特征是不同的，这是煤的原始物质、煤体结构、水分和变质程度等因素共同影响的结果。但是对于突出煤体而言，随温度的升高煤体电阻率呈下降趋势。
	测试频率	测试频率越高，测得电阻率就越低，反之亦然。
	电场强度	电阻率随电场强度的升高呈指数衰减。
	测试方向	沿层理面方向煤体电阻率较小，垂直层理方向煤体电阻率较大。

巷道掘进引起的围岩应力和工作面回采引起的支承应力是煤矿生产过程的两种主要的采动应力。根据现有理论可知无论哪种情况下引起的采动应力都将以采动作业点为中心大体形成卸压区、应力集中区和原始应力区。这些区域的形成过程实际上是煤岩体应力与应变相关变化的过程，而应变的产生在煤岩体中主要表现为煤岩体的起裂、扩展直至破坏。

根据脆性材料裂隙场应力应变的关系，在距采动中心一定距离外，由于前方存在卸压区和应力集中区的阻隔，导致该区域未受采动的影响，因此该区域煤体所受应力应变不变，即不会产生新的应力重新分布，也不会产生新的孔裂隙；卸压区内，所受应力超过煤体的极限承载力，煤体发生损伤演化，内部裂隙开始萌生、贯通并扩展，形成大量的可见孔和大孔，煤体已大体破碎，不能承受太大的应力作用，因此该区域所受应力低于原始应力，处于应力的跌落和应变软化阶段；在应力集中区内煤体所受峰值应力远大于原始应力，但又小于煤岩体的屈服强度，

所以不至于引起煤岩体裂缝的起裂,反而原有孔裂隙会因为周围峰值应力的存在而出现孔裂隙的闭合现象,这就导致了该区域内煤体比原始应力区更紧实。

采动围岩应力重新分布的同时伴随着围岩裂隙场分布的变化,这就导致了不同应力区内存在不同分布特点的裂隙场。换言之,煤体采动裂隙场与采动围岩应力分布密切相关。根据采动裂隙场的分区性,可将采动应力分布区内裂隙场分为9个区域^[104],各区内裂隙发育特征如图2-5所示。I为采动裂隙发育区,II为采动裂隙闭合区,III为原生裂隙区,IV、VII为采动裂隙密集区。I、IV、VII区位于超前卸压区内;II、V、VIII区位于应力集中区内;III区位于原始应力区内。

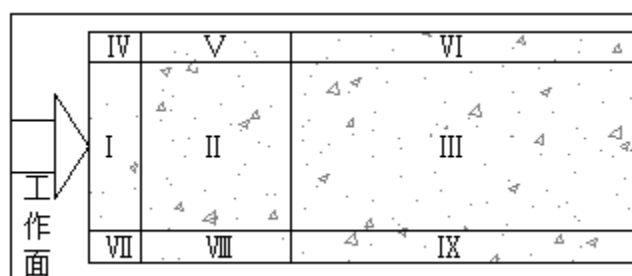


图 2-5 采动裂隙场分区图

Figure 2-5 Mining fissure field area map

根据煤体导电特性结合采动围岩裂隙场的分布特点,可以推出在卸压带内,由于大量新生裂隙的产生和急剧扩展,阻断了煤体的导电通道,导致此区域内煤体的电阻率迅速增大;应力集中区内的煤体受应力作用,分子间的电子云将会发生重叠,导致分子间的电子迁移率增加,从而使电子导电率升高,电阻率下降,原始应力区内煤体的电阻率介于卸压区和应力集中区内煤体的电阻率。因此可以利用直流电法技术探测采动围岩应力的分布。

2.4 本章小结(Summary)

本章主要分析了利用直流电法技术探测采动围岩应力的原理。

(1) 分析研究了采动应力分布原理,采动应力主要分巷道开挖引起的采动应力和工作面回采引起的采动应力两种,虽然引起这两种采动应力的来源不同,但都具有相似之处,即采动应力的分布都大体可概括为卸压区、应力集中区和原始应力区。

(2) 介绍了直流电法探测原理,即以煤岩体的导电性差异(即煤岩体电阻率)为基础,经公式推导得出电流在地下流动过程中引起的俩供电电极之间的电势差,并得出直流电法探测的有效供电范围近似为一个宽等于 $AB/2$, 长为 AB 的长方体。

(3) 分析了直流电法探测采动围岩应力分布的原理。直流电法探测以煤岩体的导电性差异(即煤岩体电阻率)为基础,煤体导电特性与孔裂隙分布的演化是决定煤岩体受载过程中电阻率变化特征的主要因素,干燥煤岩体主要以电子导

电为主，不同应力水平作用下的煤体，其内部孔裂隙分布不同，从而表现出不同的视电阻率响应规律，即：卸压区内，宏观孔裂隙大量分布，视电阻率最高，应力集中区内，原始孔裂隙大量闭合，视电阻率最低，原始应力区内孔裂隙不受采动影响，视电阻率大小介于卸压区和应力集中区之间。

3 网络并行电法技术及装备

3 Network Parallel Technology and Equipment

直流电法技术是电法勘探的一个重要分支,发展到现在应用最广泛的要数网络并行电法技术。

3.1 网络并行电法技术 (Network Parallel Electrical Method)

网络并行电法是以高密度电法为基础发展而来的一种最新的直流电法技术,它克服了传统高密度电法工作时只能采集到视电阻率值而无法反应电场时间变化特征的缺点,此外网络并行电法还能极大的提高野外探测的效率和采集到海量的数据信息,因此网络并行电法的核心技术就是数据采集和处理时的并行、海量和高效。

网络并行电法采用智能电极技术,通过网络协议与主机保持实时的联系,当电极接受到供电命令时采样功能关闭,使电极处于供电状态,否则则一直处于电压采集状态,并通过通讯线实时将数据送回主机。通过供电和采集的时序变化关系完成对自然场、一次场、二次场的电压与电流数据的采集,采集过程保持高效而无空闲电极(图 3-1)。

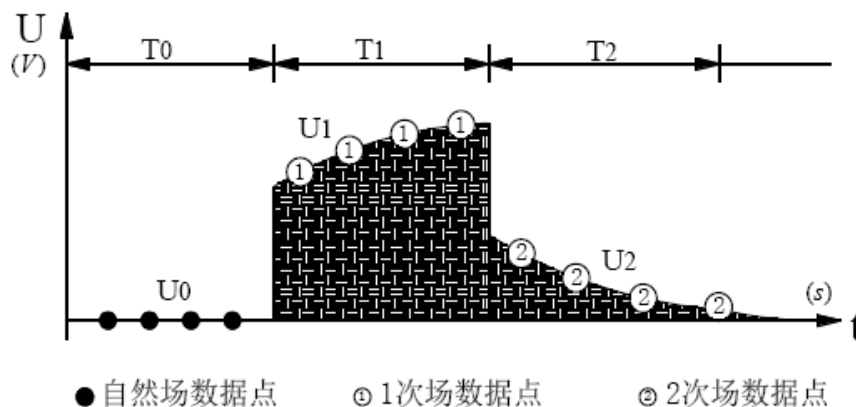


图 3-1 单电极电位采集时间序列

Figure 3-1 Time series of single electrode potential acquisition

根据电极观测装置的不同,可以把网络并行电法数据采集方式分为 AM 法和 ABM 法^[80]。

AM 法观测系统所测量的电位场为单点电源场,该装置与常规二极法类似,布置时采用 2 根无穷远极(∞),1 根作为供电电极 B,1 根作为公共电极 N,提供参照标准电位,当测线任一电极 A 供电时,其余电极(电极 M)同时在采集电位。对 AM 法采集数据,可以进行二、三极装置的高密度电法反演和高分辨地电阻率法反演^[80,103]。其工作原理见图 3-2,电压分布观测方式见图 3-3。

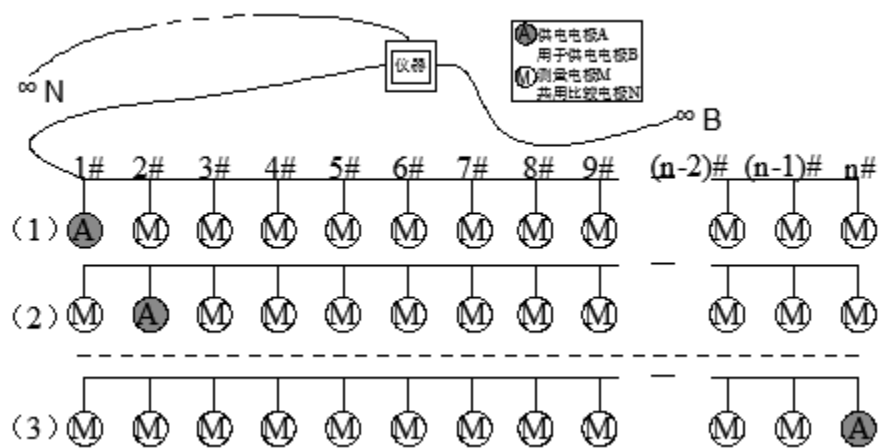


图 3-2 AM 法工作原理图

Figure 3-2 Schematic diagram of working principle of AM method

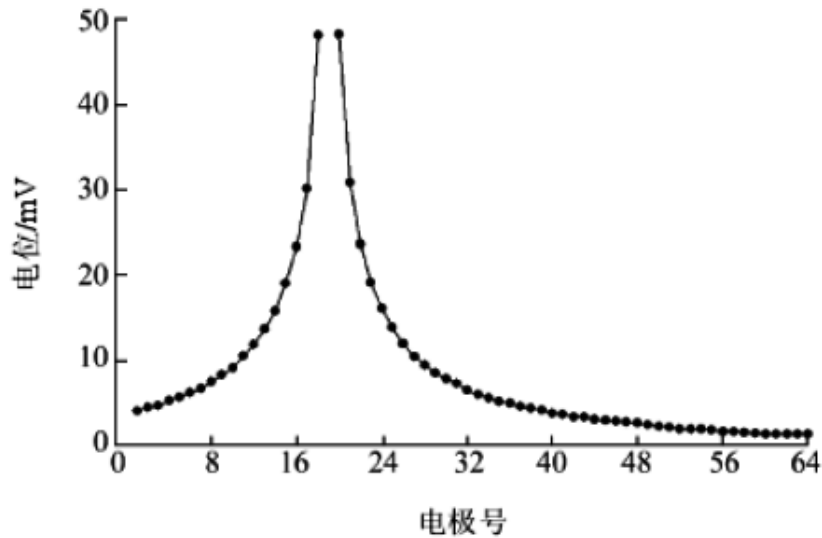


图 3-3 AM 法电压分布探测图

Figure 3-3 AM method to detect the voltage distribution

ABM 法采集数据所反映的是双异性点电源电场情况，一对电流电极 A、B 供电，1 根无穷远极作为公共 N 极，提供参照标准电位，整条测线的其他电极（电极 M）均采集电位值，不存在空闲电极。对 ABM 法采集的电位、电流值等数据可以进行对称四极、偶极装置和微分装置的高密度电法反演^[103]。其工作原理见图 3-4，电压分布观测方式见图 3-5。

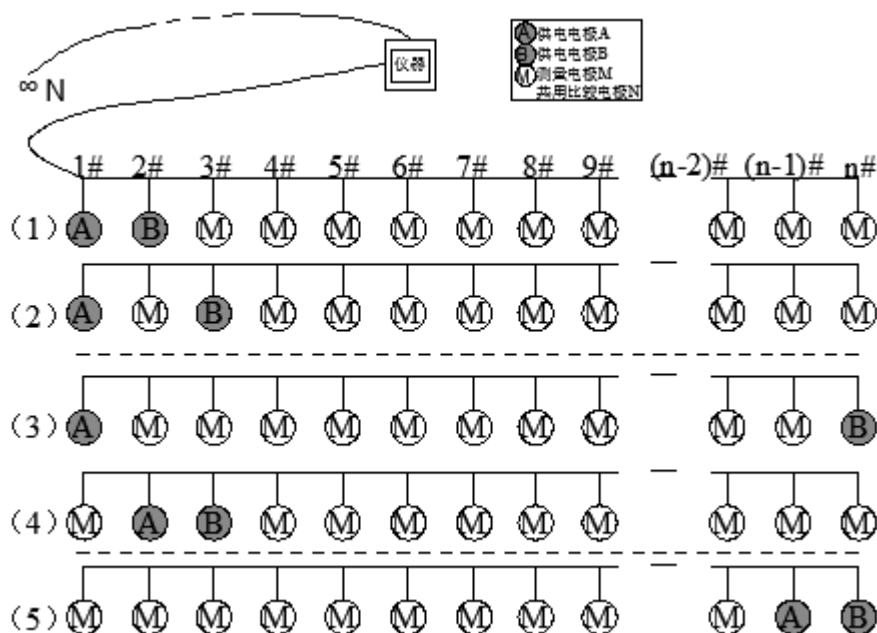


图 3-4 ABM 法工作原理图

Figure 3-4 Schematic diagram of working principle of ABM method

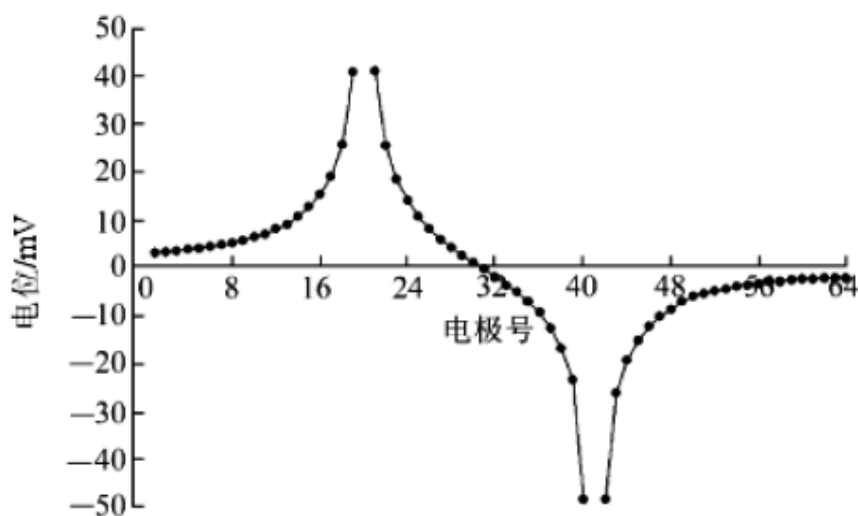


图 3-5 ABM 法电压分布探测图

Figure 3-5 ABM method to detect the voltage distribution

3.2 网络并行电法仪及其操作 (Network Parallel Instrument and Its Operation)

实验用 YBD11 网络并行电法仪采购于安徽惠洲地质安全研究院有限公司，该矿用网络并行电法仪广泛应用于煤矿安全探测、地面工程地质勘察、地质灾害探测及矿产资源勘察。YBD11 网络并行电法仪由电法仪主机、分布基站、电极连接线缆、电极及无穷远线组成（图 3-6）。电法仪主机主要用于对采集基站进行设置与控制，接收采集器回传数据，对数据进行实时处理、存储、显示，并负

责电法系统电压的发射与控制等；采集基站按功能可划分为处理控制模块、通信模块、电源模块、电源模块、信号放大模块、A/D 模块、数据存储模块等，对感应信号进行测量、数据处理等相关功能。



图 3-6 网络并行电法仪组成部件

Figure 3-6 Composition of DC system

YBD11 网络并行电法仪的主要技术指标如下：

通道数： $n \times 16$ 道，本试验采用 16 通道，现场试验采用 32 通道；

A/D 转换：24 位；

测量电压范围： $\pm 10\text{V}$ ，测量电流精度：0.5% (Full)；

最大发射电压：0V/24V/48V/72V/96V 五档切换，最大发射电流：100mA；

输入阻抗： $>20\text{M}\Omega$ ；

采样间隔：1ms、2 ms、5 ms、10 ms、20 ms；

自然电位补偿：自动补偿；

供电方波：多频率正负方波组合；

电极：双模式电极。

主机与采集基站通过专配 RS485 通信线进行连接，实现交互。发射和测量电极通过插拔夹与大线相连接。主机内置 16 道采集板，以此来实现仪器的分布式和集中式两套系统，一般采用分布式系统进行数据采集，分布式系统的连接需

要借助分布基站，其个数根据测试任务来定，每各分布基站最多可连接 16 道电极，其实物连接方式见图 3-7。



图 3-7 网络并行电法连接方式

Figure 3-7 Instrument connection physical map

3.3 网络并行电法数据处理 (Network Parallel Method Data Processing)

确保所有采集基站状态正常，测量和无穷远线电极全部布置完成，所有通讯连接正确，主机和采集基站均开机并进入工作状态是完成数据采集的准备工作，在确保准备工作完成后，数据的采集将利用 YBD11 网络并行电法仪上的 YBD11-Z 操作软件，其操作流程如图 3-8 所示，数据采集前要先经基站的排序、坐标的编辑、启动基站、系统检测和参数的设置。置参完成后进入采集界面，系统开始采集数据，数据采集过程中，供电电极的发射电流和接收电极的电位分布图将实时的显示在界面上，数据采集完成后关闭基站，关闭主机便可完成数据的采集。

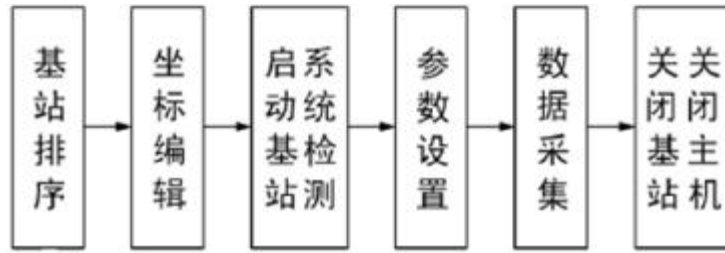
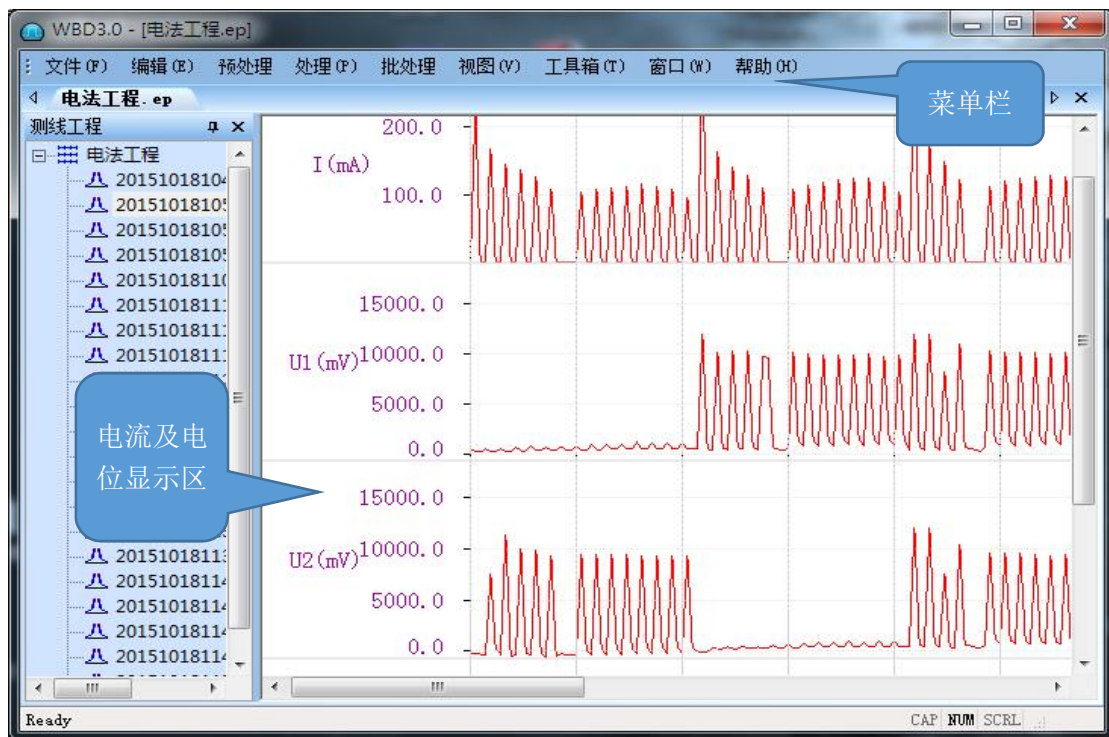


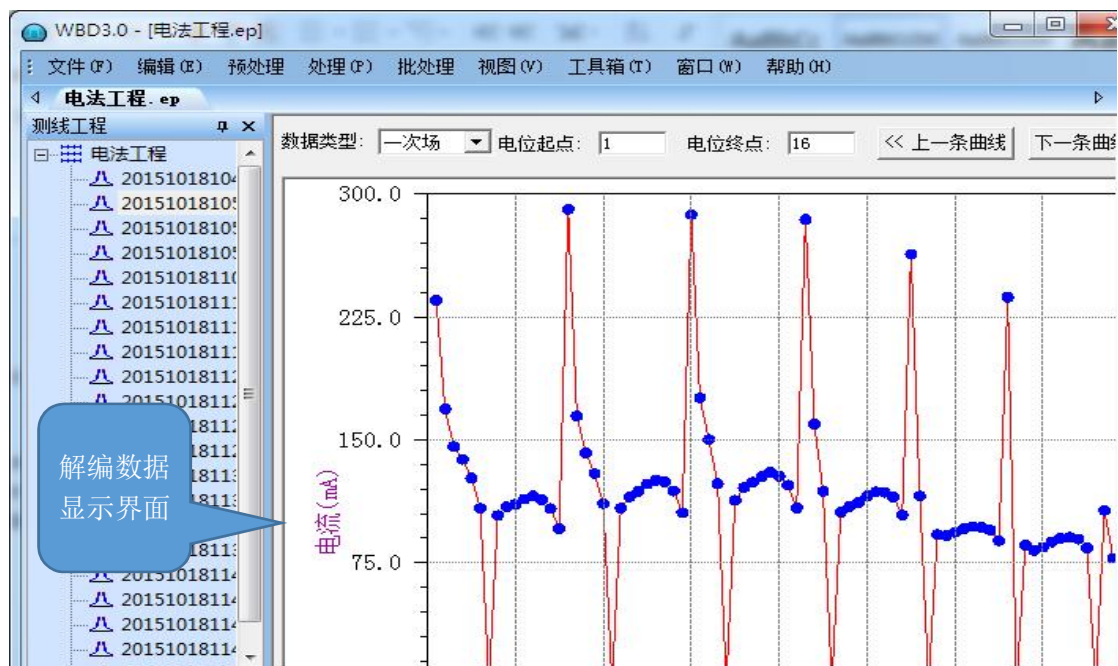
图 3-8 数据采集操作流程

Figure 3-8 The flow chart of data collection

数据采集完成后无法直接使用，需通过 YBD11 矿用网络并行电法仪配套的 WBD3.0 解析软件（图 3-9）进行编译。



(a)原始数据



(b)解编数据

图 3-9 WBD 数据采集与处理系统软件界面

Figure 3-9 Interface of data acquisition and processing system software

WBD3.0 解析软件可用于管理、处理矿井及地面网络并行电法数据，可对数据进行导入、查看、解编、坐标录入、不同装置形式的视电阻率计算等操作（流程见图 3-10），以实现对电性异常地质体进行较为准确的预测预报。

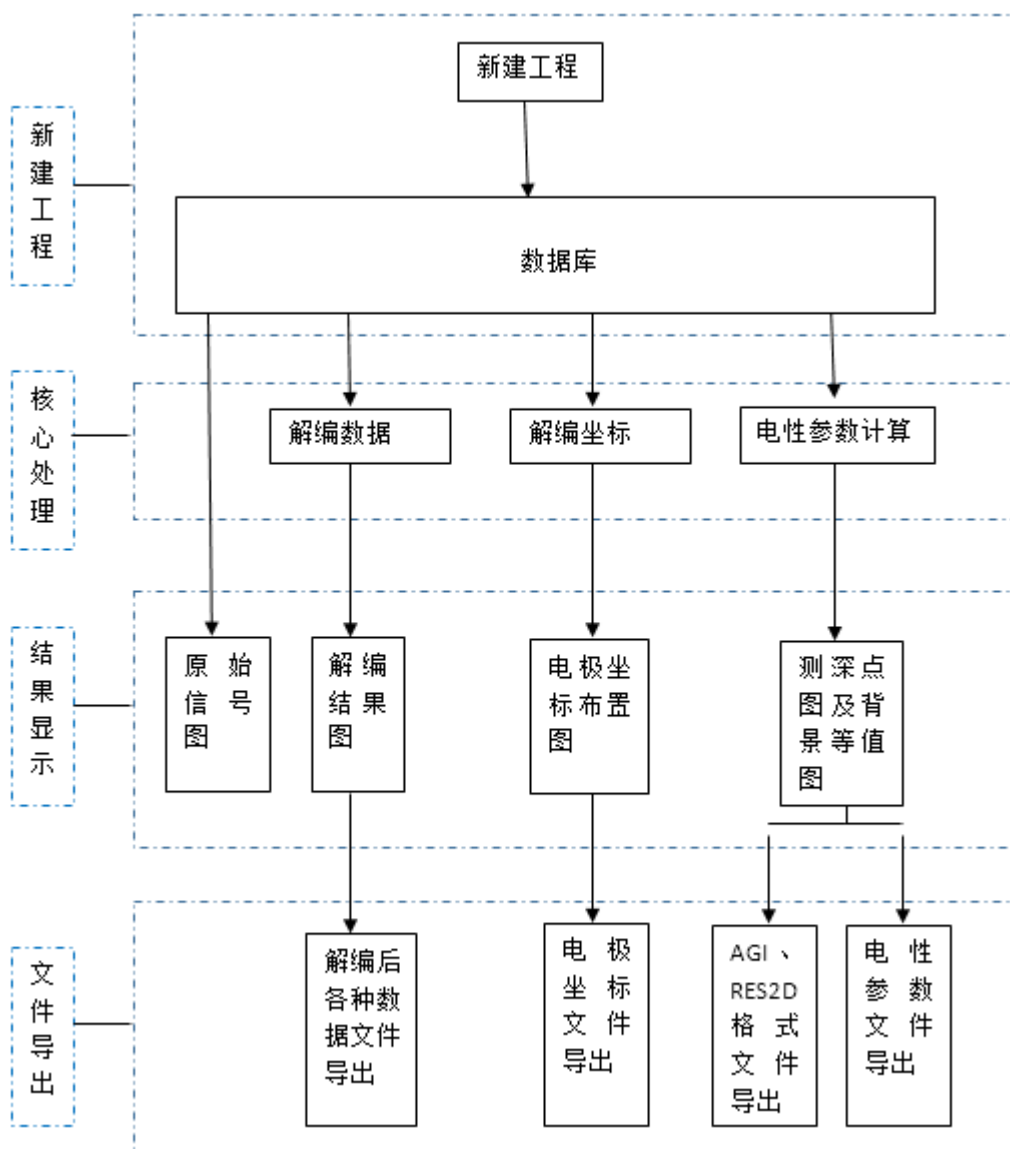


图 3-10 WBD 软件数据处理流程

Figure 3-10 The flow chart of data acquisition and processing system software

3.4 本章小结(Summary)

(1)介绍了网络并行电法的技术原理及与传统高密度法相比所具有的优点,分析了单点电源场 AM 和双异性点电源场 ABM 两种数据采集方法,并就其基本的采集原理做了解释。

(2) YBD11网络并行电法仪由电法仪主机、分布基站、电极连接线缆、电极及无穷远线组成,分别介绍了网络并行电法仪各组成部件的功能及其参数特征,在此基础上就网络并行电法仪各仪器部件的连接方式做了详细的介绍。

(3) 在确保所有采集基站状态正常,测量和无穷远线电极全部布置完成,所有通讯连接正确,主机和采集基站均开机并进入工作状态后开始进行数据的采

集，数据采集先后经历基站的排序、坐标的编辑、启动基站、系统检测和参数的设置。在数据采集完成后需用到 **WBD** 数据解析软件进行数据的编译，并根据实际使用状况介绍了数据编译的流程，为下一步仪器的使用和数据的处理做好准备。

4 小尺寸煤体直流电法响应规律研究

4 Study on the Response Law of Small-Size Coal to Direct Current Method

本章将在实验室条件下,研究小尺度煤体在不同应力和宏观裂隙条件下直流电法响应规律,为现场应用直流电法探测采动应力分布奠定基础。

4.1 实验系统建立 (The Experimental System)

实验系统是由加载系统、数据采集系统及数据分析系统构成。

加载是由 YAW 型电液伺服压力试验机平台(图 4-1)完成。该实验平台可实现恒应力控制、闭环控制和载荷保持三种加载控制,具有易编程,控制精度高等特点,数据采集频率可达 20Hz,应力加载最大为 3000kN,可满足实验加载需求。



图 4-1 加载系统图

Figure 4-1 Diagram of loading system

数据采集系统是 YBD11 网络并行电法仪,其详细介绍可见 3.2 节;数据处理系统采用 YBD11 矿用网络并行电法仪配套 WBD3.0 解析软件(图 3-9),该软件可用于管理、处理矿井及地面网络并行电法数据,可对数据进行导入、查看、解编、坐标录入、不同装置形式的视电阻率计算等操作,以实现电性异常地质体进行较为准确的预测预报。

YBD11 网络并行电法仪主要为野外工作进行设计和生产,在进行小尺寸煤

体直流电法响应规律研究时，为了便于完成小尺寸煤样的数据采集，用铁钉（长约 1.5cm，直径约 0.2cm）对双模电极（长约 25cm，直径约 1cm）进行替换，如图 4-2 所示。在铁钉尾端焊接漆包线，并连接在电法大线上，进而连接到电法仪主机。

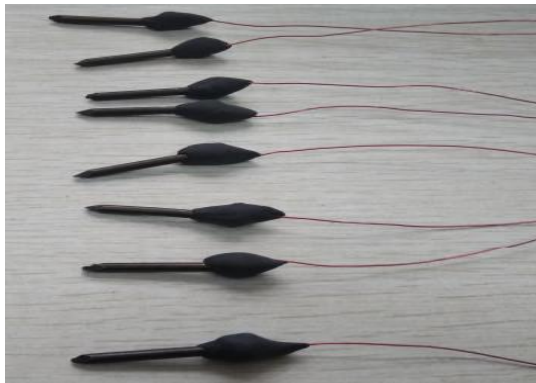
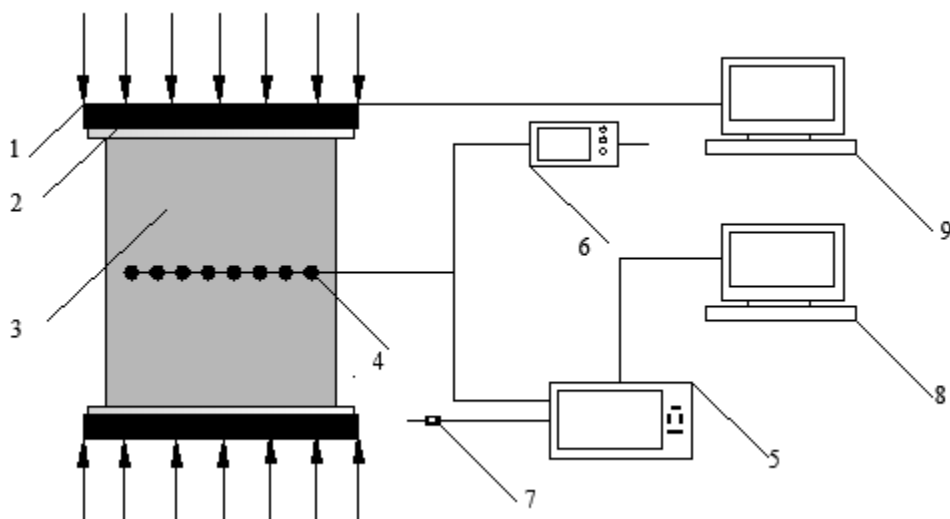


图 4-2 铁钉电极

Figure 4-2 Nail electrode

根据实验要求将加载系统、数据采集系统及数据分析系统进行连接，得到最终的实验系统，系统示意图如图 4-3 所示，实物图见图 4-4。



1-YAW 压机机，2-绝缘纸，3-煤体，4-电极，5-电法主机，6-基站，
7-ABN 连接盒，8-WBD 数据分析处理系统，9-加载控制系统

图 4-3 煤体直流电法测试实验系统图

Figure 4-3 Load coal parallel electrical method testing experimental system



图 4-4 煤体直流电法测试实验系统实物图

Figure 4-4 The physical map of coal parallel electrical method testing experimental system

4.2 不同应力加载条件下直流电法响应规律 (Response Law of Direct Current under Different Stress Loading Conditions)

网络并行电法通过测量物体的视电阻率来实现对被探测物体的探测, 因此研究不同应力水平下小尺度煤体对直流电法的响应规律, 实质上就是研究不同应力水平煤体内部视电阻率的变化情况。考虑到网络并行电法探测时需要将多组电极 (改进后的铁钉电极) 打入试样中, 所以 $\Phi 50\text{mm} \times 100\text{mm}$ 的标准试样不能满足实验要求, 因此将原煤试样加工成 $150\text{mm} \times 150\text{mm} \times 150\text{mm}$ 的正方体。用手持电钻预先在试样侧面中间位置打 8 个间距 15mm、深 15mm 的孔洞 (图 4-5), 为保证电极与试样的良好耦合, 用氯化钠溶液混合黄泥塞入孔洞中, 并将 8 个电极插入黄泥中。



图 4-5 原煤试样电极布置图

Figure 4-5 Electrode arrangement of coal sample

为实现研究不同应力水平煤体直流电法响应规律,本实验采用分级加载的方式,加载速度设定为力控 10kN/min,加载过程以每 10kN 为一分级,保持 1min,由于实验试样较多,本次选取代表性的 1#试样为例进行分析说明,1#试样从加载到破坏共分 4 级,破坏荷载为 46kN,荷载加载曲线见图 4-6。电法数据在每一次恒载时采集一次,加上背景和破坏后的数据,本次实验共采集 6 组视电阻率数据,采集的数据经过 WBD 软件编译,并通过 surfer 生成视电阻率云图。在生成云图时前 5 组视电阻率数据差别不大,选用同一色标进行标注,破坏后的视电阻率值与前几组相比出现了量级上的差距,故破坏后的试样采用新的色标进行标注。在视电阻率云图中设定蓝色背景表示低阻,红色表示高阻,中间参插绿和黄两种色标,即云图中视电阻率从低到高依次表示为蓝、绿、黄和红。

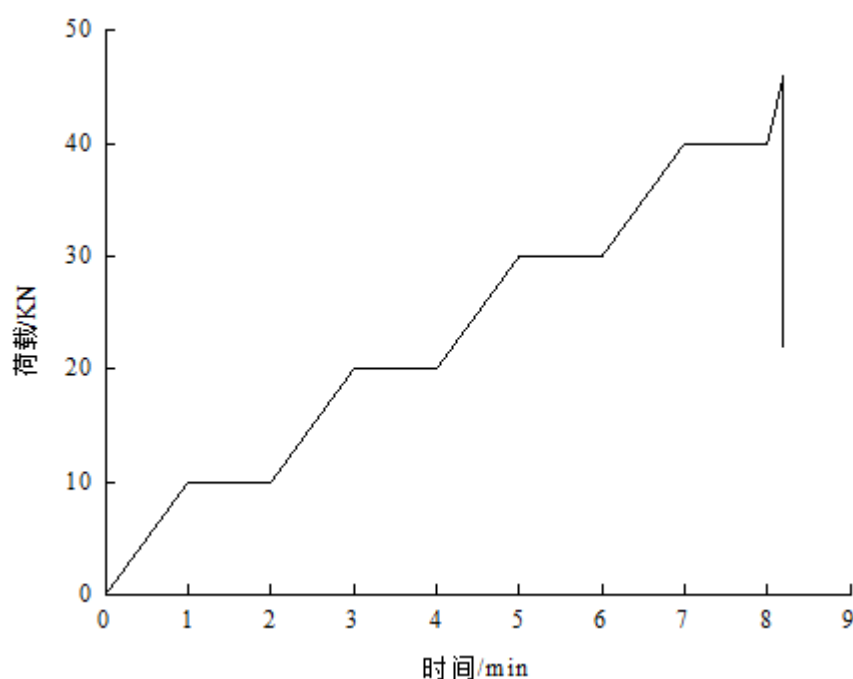
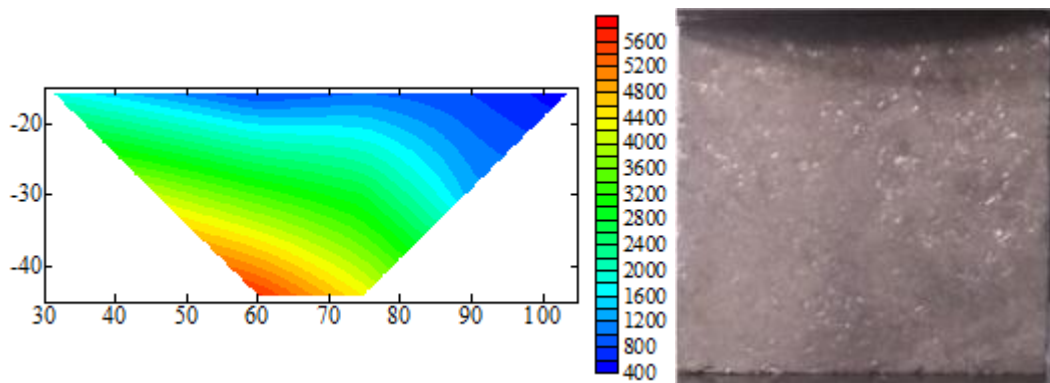


图 4-6 煤体应力加载曲线

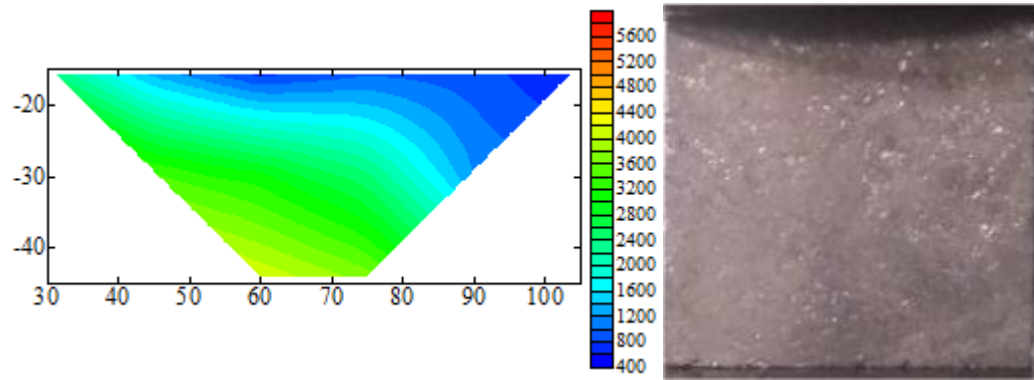
Figure 4-6 Coal loading stress curve

如图 4-7 所示,图(a)反应出原始煤样视电阻率等值线往右上方偏,云图下方视电阻率明显比上方视电阻率高;图(b)和图(c)分别表示施加荷载至 $22\%\sigma_{max}$ 和 $44\%\sigma_{max}$ 时煤样视电阻率出现下降,试样中心高阻区域消失,虽然都出现了视电阻率下降的趋势,但对比分析图(b)和图(c)发现,荷载从 $22\%\sigma_{max}$ 增大至 $44\%\sigma_{max}$ 时,煤样周围视电阻率出现了小幅增大;加载至 $65\%\sigma_{max}$ 时,如图(d)所示,煤样中心区域重新出现了高阻区域,且高阻区域范围较原始煤样大;加载至 $87\%\sigma_{max}$ 时,煤样视电阻率整体变大,原有单一高阻区域消失,演变成两个高阻区域,且沿等值线向右上方增大;如图 (f)所示,当煤样加载破坏后,视电阻率值成倍数增大,且试样右方高阻区域进一步扩大。

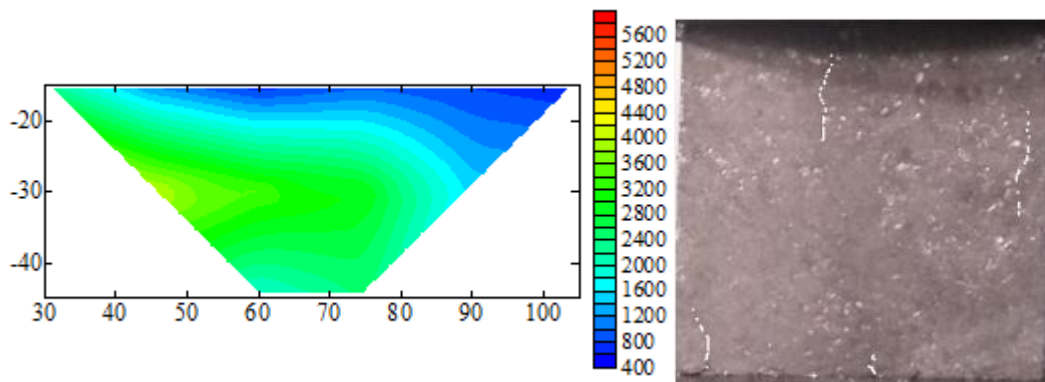
煤体作为一种天然孔裂隙发育介质，通常作为非均匀体进行研究。本实验中原始煤样视电阻率云图呈现的规律，正是煤样内部孔裂隙分布不均匀导致的；施加荷载至 $22\%\sigma_{max}$ 和 $44\%\sigma_{max}$ 时，云图整体电阻率都出现了下降现象，这是因为施加荷载前，煤体内部就含有大量的孔裂隙，试件受荷载作用后，原有的张开性孔裂隙在压力作用下出现了闭合现象，疏通了电子导电通道，导致试样视电阻率出现整体下降，但是内部孔裂隙的闭合，有时会导致裂隙壁面附近的煤体表面出现变形和微破裂，如图(c)中煤样表面出现的一条宏观裂隙，这也就导致了荷载从 $22\%\sigma_{max}$ 到 $44\%\sigma_{max}$ 时，煤样视电阻率变大；到 $65\%\sigma_{max}$ 时试样内部原本闭合的孔裂隙在荷载作用下重新发展出新的孔裂隙（如图 d），试样表面已有的裂纹进一步延伸和扩展，所以在试样中心区域又重新出现了高阻区域；到 $87\%\sigma_{max}$ 时，煤体试件承受的荷载已经超过其屈服极限，煤体试样内部不断产生微破裂，并发生粒间滑移，从而产生非弹性变形，试样表面的裂纹进一步发育，裂纹贯通，并在内部形成断层，云图上表现为视电阻率值比 $65\%\sigma_{max}$ 时更大，试样内部已经逐渐发展成两个局部高阻区域；继续施加荷载到 σ_{max} (46kN) 时试样破裂，失去承载能力，此时试样裂隙张开，大的裂隙相互汇合、贯通，发展出宏观裂隙带，并通过裂隙逐渐向试样端部扩展，试样边缘煤体破碎脱落，宏观裂隙带附近的视电阻率高达 $13500\Omega\cdot m$ ，从图 4-7 (e) 可以看出破坏后的视电阻率分布是极不均匀的，这与裂隙的发育状况有关，裂隙发育越完全的地方视电阻率越高，虽然煤体试样破裂导致整体视电阻率均大幅增大，但是也有局部区域出现低阻现象，这主要是由于煤体破裂后仍存在局部残余块段用来传导电流。



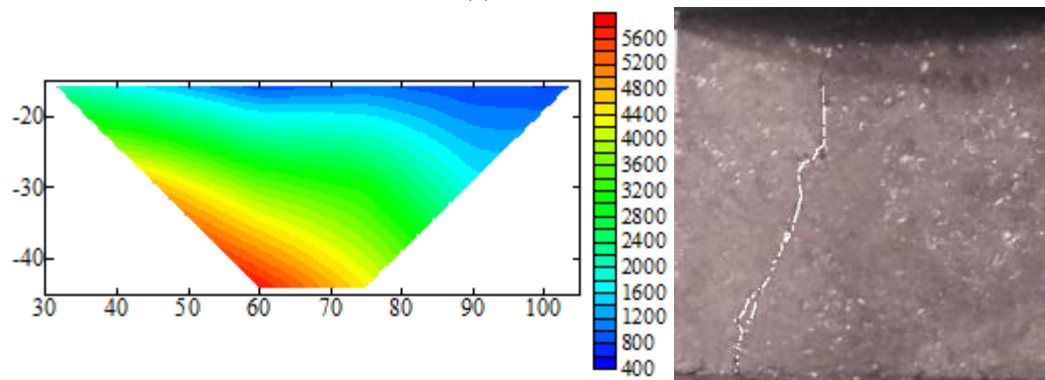
(a)未加载



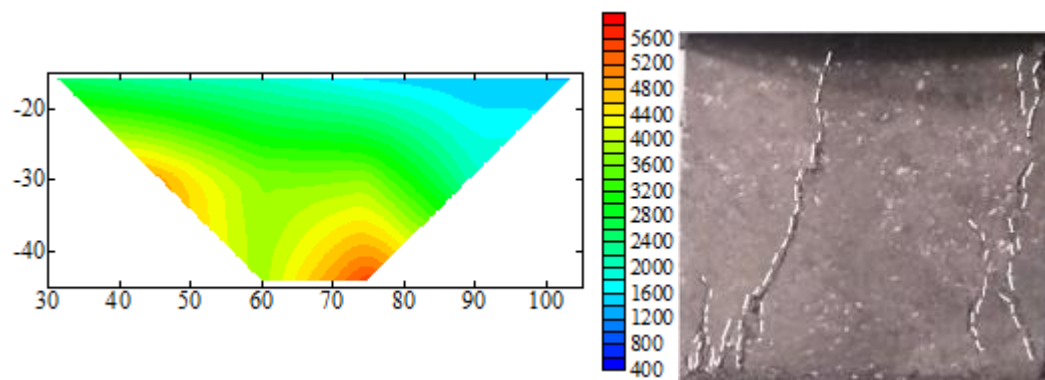
(b) 22% σ_{max}



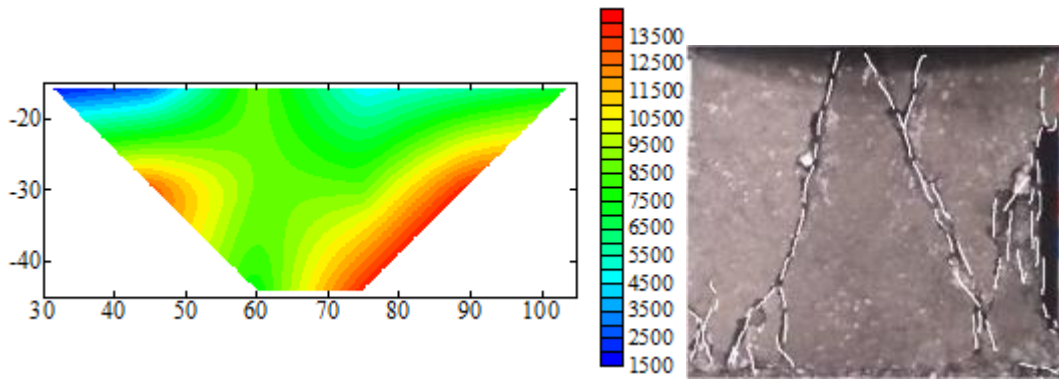
(c) 44% σ_{max}



(d) 65% σ_{max}



(e) 87% σ_{max}



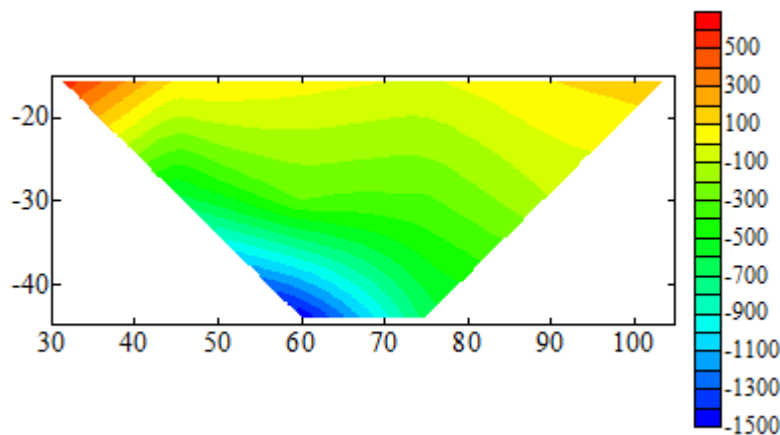
(f) 破坏后

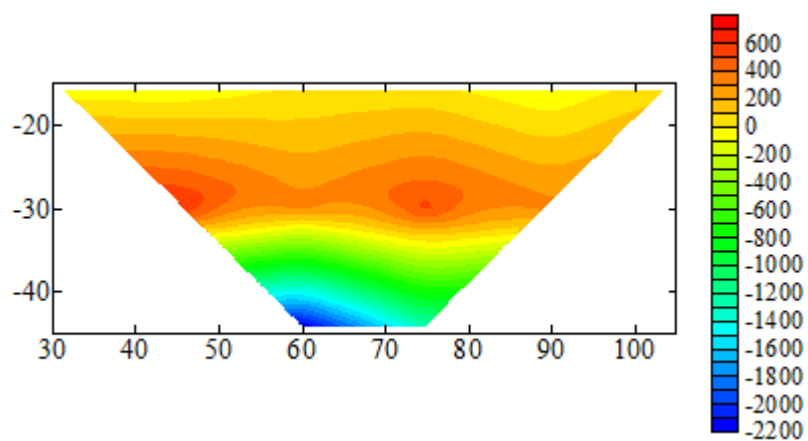
图 4-7 分级加载过程视电阻率及裂纹分布图

Figure 4-7 Apparent resistivity image of step loading process

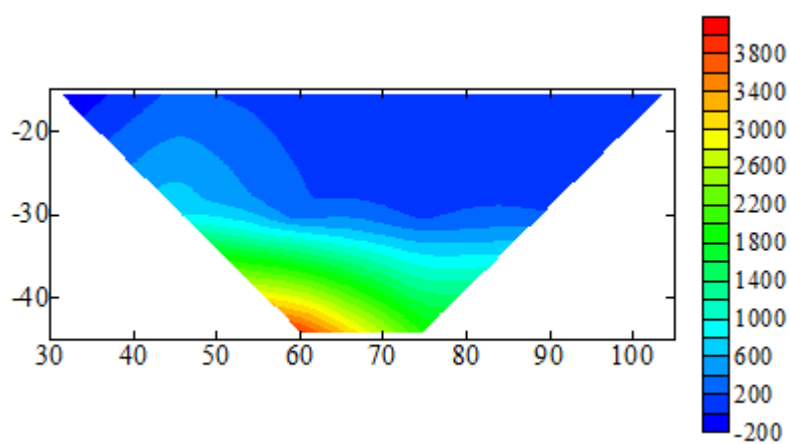
为了便于直观比较不同应力水平煤体视电阻率的增减情况,将相邻阶段视电阻率做差得到相邻应力水平之间视电阻率差值云图,如图 4-8 所示。在绘制差值云图时,考虑到每一阶段差值分布范围太广,故差值云图未对色标做统一处理,但云图中视电阻率差值的表示仍然遵循视从低到高依次表示为蓝、绿、黄和红的原则。

从图 4-8 (a) 和 (b) 可以看出,在加载初期,试样中心区域的视电阻率出现减小趋势,而试样周围区域的视电阻率却出现了增大趋势,这说明试样内部最先因承受压力而出现孔裂隙的闭合;在施加到 $65\%\sigma_{\max}$ 或之前时,试样内部微孔裂隙的闭合现象已经不起主导作用,整体视电阻率都出现了增大的趋势如 4-8(c) 所示;到 $87\%\sigma_{\max}$ 时,视电阻率增大趋势进一步明显,且幅度较前一阶段明显变大,试样内部的不均匀性也导致了视电阻率增大的不平衡性,局部区域增大幅度达到 $1500\Omega\cdot\text{m}$,而一些却只有 $200\Omega\cdot\text{m}$ 左右;试样破坏后,原有裂纹继续发展,贯通形成宏观孔裂隙带,视电阻率出现了数量级的增大,最大处较 $87\%\sigma_{\max}$ 增大了 $11500\Omega\cdot\text{m}$ 左右。

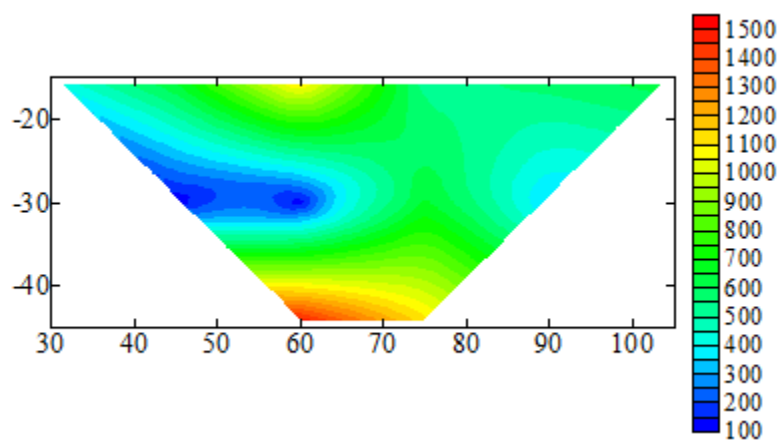
(a) $22\%\sigma_{\max}$ -未加载



(b) $44\% \sigma_{\max} - 22\% \sigma_{\max}$



(c) $65\% \sigma_{\max} - 44\% \sigma_{\max}$



(d) $87\% \sigma_{\max} - 65\% \sigma_{\max}$

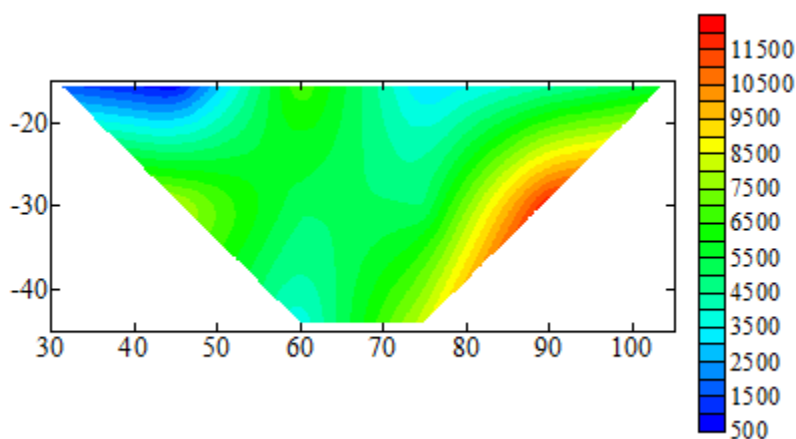
(e) 破坏-87% σ_{max}

图 4-8 各分级荷载之间视电阻率差值云图

Figure 4-8 Apparent resistivity value image between different steps

研究不同应力条件煤体视电阻率的响应规律可以发现,煤体从未施加荷载到加载破坏的过程中,煤体内部孔裂隙先后经历了压缩闭合,新的微裂隙出现,微破裂的产生和形成宏观裂隙带的过程。

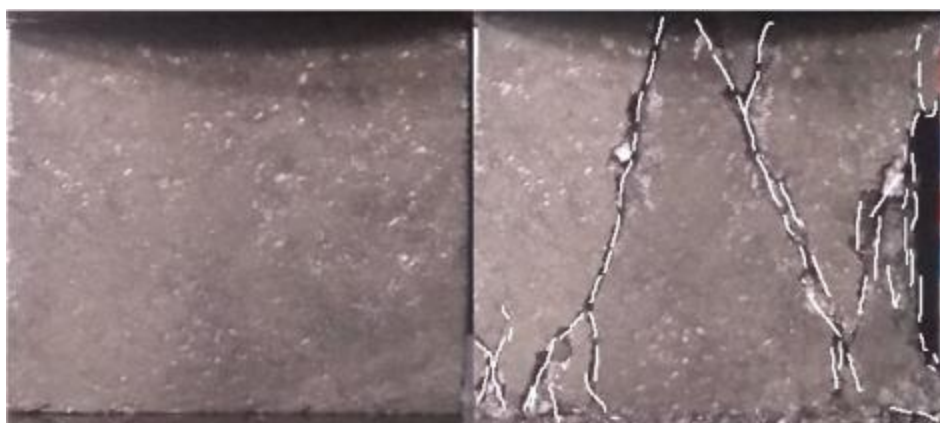
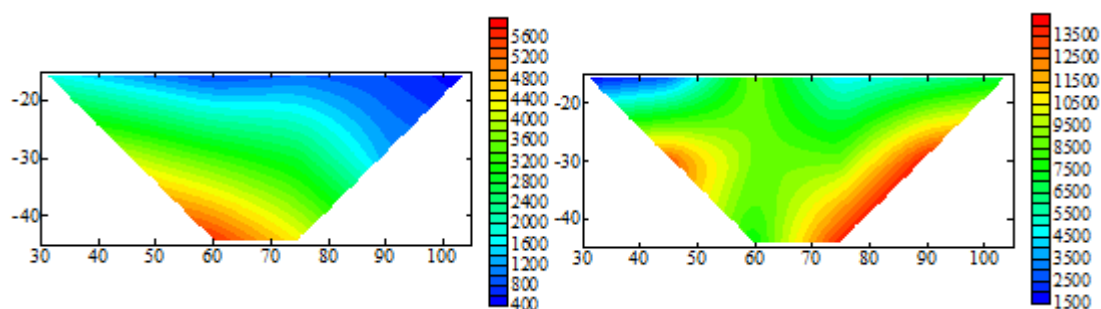
4.3 宏观裂隙条件下直流电法响应规律 (Response Law of DC Method Under Macroscopic Fissure Condition)

矿井回采工作面及巷道煤体表面和内部往往存在着一些宏观孔裂隙带,根据视电阻率与孔裂隙的关系可知,已存在的宏观孔裂隙带将引起视电阻率的局部增大,为了研究宏观裂隙带对视电阻率的影响,本节将从所做实验中选取三组典型实验进行分析。实验用试块和上节实验所用相同,加载方式也相同,不同的是在处理这三组实验数据时,视电阻率差值的计算变成破坏后的视电阻率减去背景视电阻率,得到的数据经 surfer 处理生成视电阻率差值云图,如图 4-9 (c)、(f) 和 (i)。

1#试样背景视电阻率云图如图 4-9 (a) 所示,试样中心出现高阻区域,低阻区域分布在试样端部,视电阻率沿向右上方倾斜的方向呈现出逐渐降低的趋势,这反应出原始煤样内部中间部位存在天然孔裂隙,施加荷载时内部区域易因大量孔裂隙的闭合而从高阻区域演变成低阻区域。从图 4-9 (b) 可以看出,破坏后的煤体在内部存在不同的高阻区域,且在试样端部出现了局部的电阻率低值区,高阻区域的出现往往是由试样破坏形成的宏观裂隙带造成的,而低阻的出现表明该部位的煤体承受的荷载尚不足以达到其极限承载力,甚至达不到屈服强度,因此该部位煤体内部的微孔裂隙受压闭合出现视电阻率降低的现象。对于 5#煤体,未施加荷载时,其背景视电阻率分布和 1#试样类似,但是破坏后的视电阻率分布却与 1#出现了较大的不同,这主要是因为煤体作为一种不均匀介质,内部各

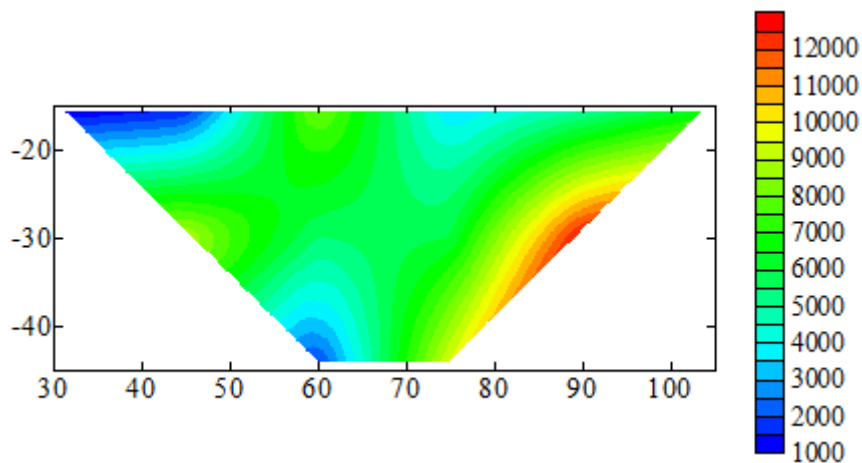
向异性,当承受荷载作用破坏时各个试样的破坏表现形式也各异,5#试样破坏时在距左边45mm和75mm位置出现了贯穿的宏观裂隙带,导致了该区域视电阻率的极距增大。从背景视电阻率云图可以看出6#试样中央偏左(约60mm)有一明显高阻区域,且从云图形态上可以推测出该区域应该有天然孔洞,当施加荷载至破坏,视电阻率云图在60mm处出现一条贯穿孔洞的高阻带,观察破坏后的试样发现在该孔洞周围形成了破裂带。

观察图4-9(c)、(f)和(i)可以发现,破坏后的试样视电阻率都将出现数量级的增大,说明破坏产生的宏观孔裂隙是影响视电阻率的主要因素,而微小孔裂隙对变形的贡献和影响已微不足道。

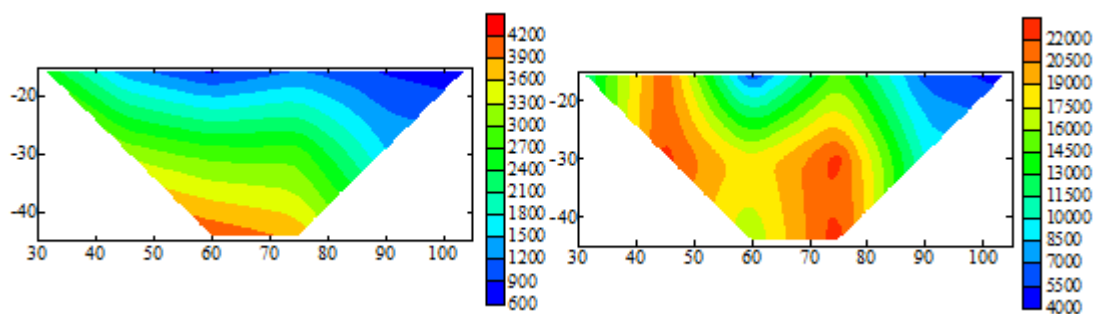


(a)1#煤样压裂前

(b)1#煤样压裂后

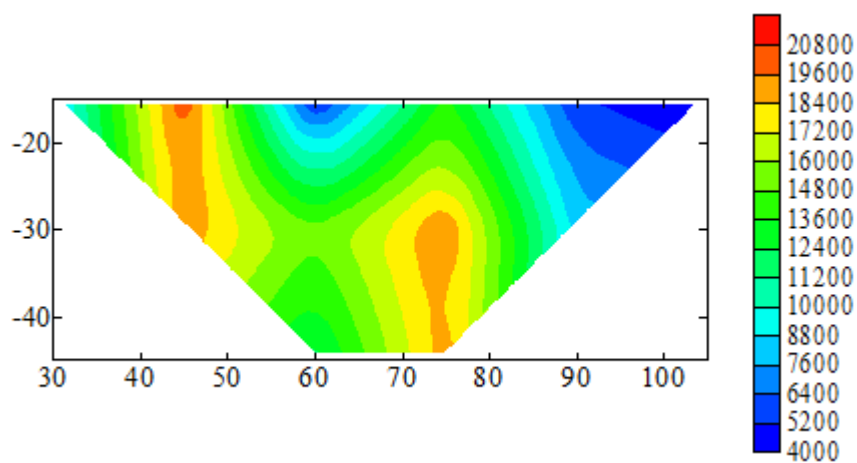


(c)1#煤样压裂后-压裂前

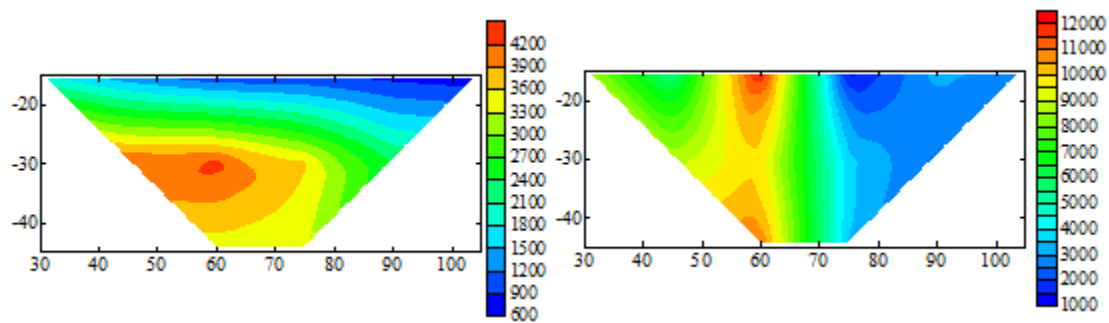


(d) 5#煤样压裂前

(e) 5#煤样压裂后



(f) 5#煤样压裂后-压裂前



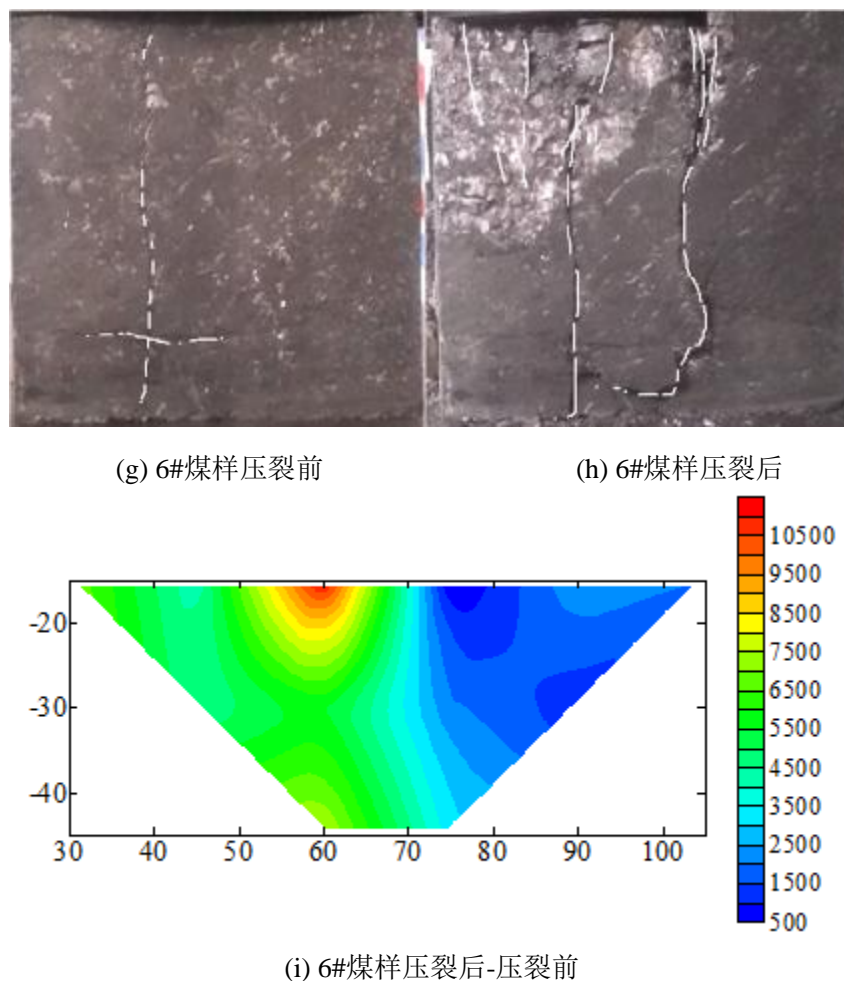


图 4-9 不同煤样压裂前后视电阻率差值云图

Figure 4-9 Apparent resistivity image of different coal mass before and after fracturing

4.4 本章小结(Summary)

(1)建立了小尺度煤体直流电法响应实验系统,该实验系统是由加载系统、数据采集系统及数据分析系统构成。加载系统采用电液伺服压力机,能够实现对试样的分级加载和保持;数据采集系统采用 YBD11 网络并行电法仪,并根据实验用试样的尺寸特点,用铁钉改进了电极;数据分析系统采用与电法仪配套的 WBD 软件。

(2)通过研究不同应力和宏观裂隙对煤体试样视电阻率的影响研究,发现不同应力水平煤体的视电阻率响应规律不同。未施加荷载时,煤体天然微孔裂隙的存在及煤体本身的不均匀性导致煤体内部视电阻率出现不均匀分布;加载初期,煤体试样中含有的大量孔裂隙在应力作用下出现闭合,煤体视电阻率变小;随着荷载的进一步增大,原本闭合的孔裂隙再次张开,并形成大量新的微破裂,这一阶段的煤体视电阻率由减小转变为增大;到煤体破坏时,试样出现宏观孔裂隙带,

视电阻率的增大也达到数量级,表明大的宏观裂隙对煤体视电阻率的增大起到决定作用。

5 采动围岩应力分布直流电法现场探测

5 Monitoring of Stress Distribution in Mining Surrounding Rock by DC Method

5.1 糯东煤矿矿井概况 (Profile of NuoDong Coal Mine)

(1) 位置与交通

糯东井田位于贵州省普安县南部，行政区划隶属于楼下镇、青山镇及雪浦乡管辖，

普安县境内目前尚无铁路和水路运输条件。普安至楼下公路为普安县南北干线公路，全长 80 km；G320 国道及正在建设中的 GZ65 高速公路东西向经过矿区北部，穿普安县城而过；楼下至红岩 13.1 km 的山岭重丘区四级公路，经过糯东煤矿田坝工业场地，可以方便糯东煤矿场外道路的连接。井田交通方便，见交通位置图 5-1。



图 5-1 糯东煤矿交通位置图

Figure 5-1 Nuodong coal mine traffic map

(2) 工作面概况

17 煤层位于龙潭组中段上覆飞仙关组底层，其中，第四段虽为富水性中等的灰岩含水层，但由于其下有飞仙关组 T1f3、T1f1+2 段隔水层，厚度大于 420m，故飞仙关组四段含水层在正常情况下不对 17 煤工作面构成影响。而含煤地层下

伏茅口灰岩强含水层由于中间有峨眉山玄武岩组隔水层，厚度大于 200m，故对 17 煤层的开采也不构成影响。11702 工作面的直接充水水源为顶板砂岩孔隙裂隙水。本工作面水文地质条件简单。掘进过程中，要按设计挖好水沟及临时水仓，安设排水管路及排水设备。巷道局部发育小断层，岩层普遍发育闭合裂隙，倾角一般为 $45^{\circ}\sim 90^{\circ}$ ，工程地质复杂程度属简单。预计正常涌水量 $5.5\text{m}^3/\text{h}$ ，最大涌水量 $16.5\text{m}^3/\text{h}$ 。

17 煤层灰分 10.43~36.38 %，平均 19.41 %，属中灰分煤（MA）。硫分 1.06~6.25 %，以 1.51~3.00 % 为主，平均 2.61 %，属中高硫煤（MHS）。在东南西面及中部有少量大于 3.00 % 的高硫煤，东西面有少量的中硫煤。原煤干燥无灰基挥发分产率为 6.69~13.79 %，平均为 9.15 %，属特低挥发分煤（SLV）；浮煤干燥无灰基挥发分产率为 5.62~8.28 %，平均 6.86 %。煤层发热量为 28.24 MJ/Kg，为高热值煤（HQ）。

17 煤层：煤层厚 0.65~8.99m，平均 4.16 m，位于龙潭组中段，上距 B₃ 泥质灰岩 0.50 m 左右。全井田仅 1702 号钻孔不可采。含夹矸 0~3 层，一般 1 层，夹矸厚度 0.05~0.54 m，煤层厚度呈中部厚，外围稍薄的趋势，在 J16 勘查线附近煤层变厚，形成一片面积较大的厚煤区，15 勘查线浅部及 11、12 线中部有两个独立的厚煤点。井田大部地区煤层厚度在 3.50 m 以上，东部、北部及 13 线附近厚度稍薄。17 煤层直接顶板多为泥岩、粉砂质泥岩，局部为泥质灰岩（B₃）；底板多为泥岩或粉砂质泥岩。

11702 工作面（如图 5-2）位于 11902 工作面的下方，平均垂距为 18m，北距副平硐约 220m，西临南翼轨道巷及南翼回风顺槽。地面标高 +1650m~+1806m，工作面标高为 +1378m~+1372m。对应地面位置位于本矿风井场地东南方 480m，大坪村以东 610m，柏家大地以西 700m，工作面以南为矿界。工作面对应地面无建筑物，多为农田、沟谷。

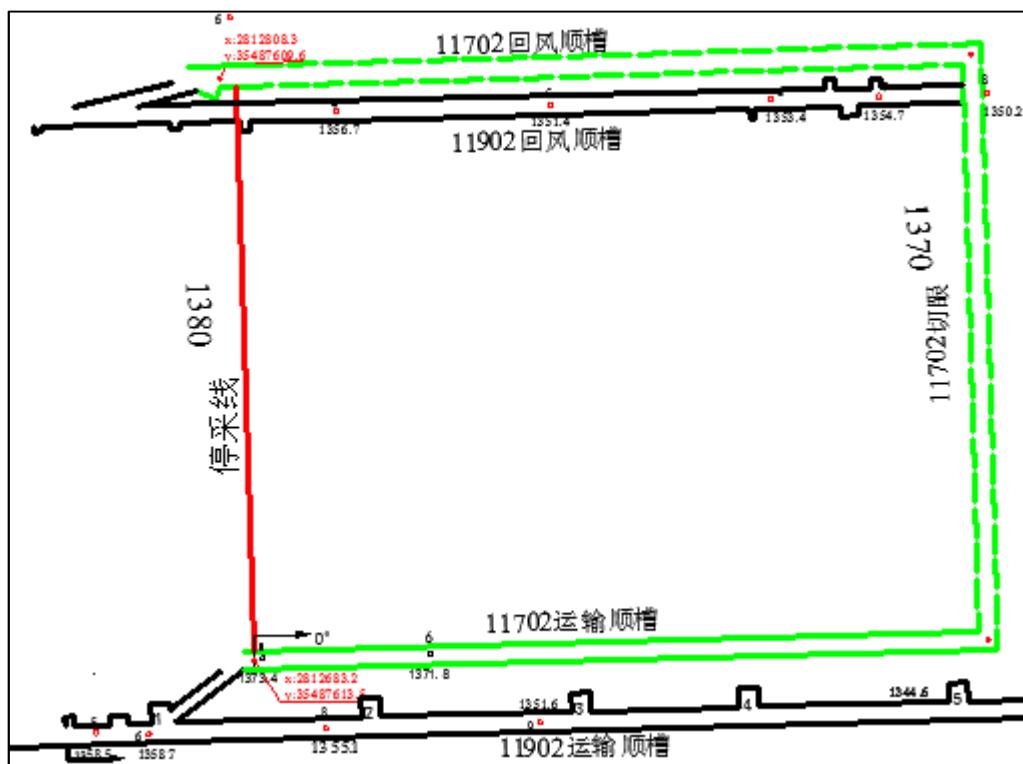


图 5-2 11702 工作面巷道布置图

Figure 5-2 Schematic diagram of 11702 working face

该工作面走向长为 155m，倾斜长为 121m，面积约为 18755m²。煤层正常涌水量为 5.5m³/h，最大涌水量为 16.5 m³/h。在突出危险区域含瓦斯 13.45 m³/t，煤尘无爆炸危险性，且煤质不易自燃。17 煤层位于龙潭组中段，上距 B2 石灰岩 29.39m 左右，B3 一般情况下为直接顶板，在 B3 石灰岩下有伪顶，一般厚 0.50m。煤层全层厚度 2.0~5.5m，平均 3.0m，含夹矸 0-3 层，结构较复杂。顶板：基本顶为粉砂岩，平均厚度为 22.46m，直接顶为 B3 灰岩，平均厚度为 0.5m。底板：老底为泥质粉砂岩，平均厚度为 15m，直接底为粉砂质泥岩，平均厚度为 2m，

工作面煤层总体为一单斜构造，地层走向为北东—南西，倾向南东；工作面构造主要以小断层及裂隙为主，构造简单，煤岩层倾角 2~4°，平均 3°。根据勘探资料及相邻巷道实际揭露分析，工作面所处地段小断层发育，但由于 17 煤层厚度较大对巷道正常采掘影响较小。

5.2 工作面回采应力分布探测结果及验证分析(Monitoring Results and Reliability Analysis of Stress Distribution in Working Face)

5.2.1 现场布置及数据采集方法

根据矿上生产需求本次应力分布探测地点选在 11702 工作面的回风顺槽内，为方便说明现场测点布置特将巷道布置图做进一步简化，形成 11702 工作面巷道布置示意图，如图 5-3 所示。

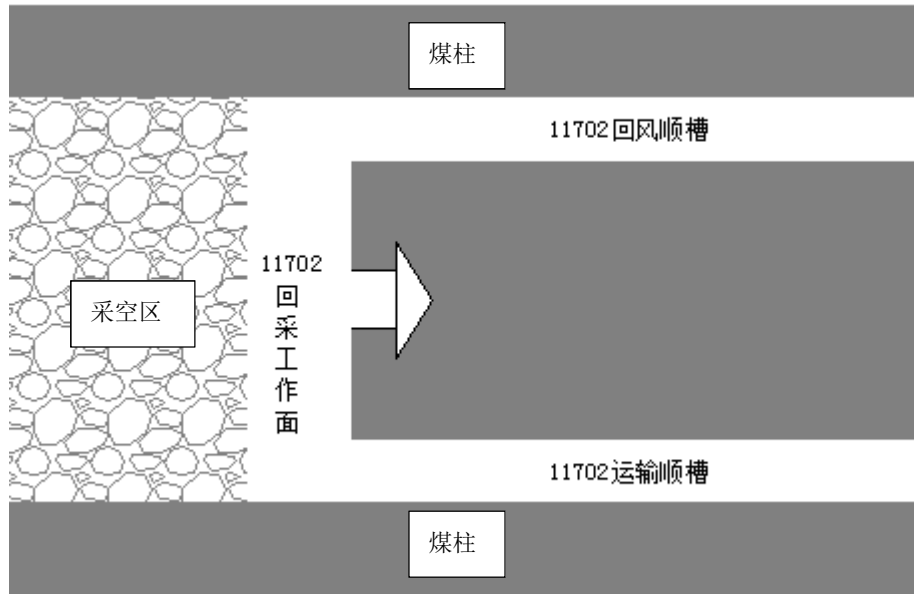


图 5-3 11702 工作面巷道布置示意图

Figure 5-3 Schematic diagram of 11702 working face

为了更好的掌握工作面回采应力分布及其时空演化规律,使电法仪能够有效的探测到采动空间围岩应力分布情况及集中程度,应使电法仪的探测范围大于采动影响的范围,故以 11702 工作面开切眼为起点,沿回风顺槽走向方向布置 32 个电法电极,极距设定为 4m,此时的探测长度理论将达到 128m,超过了采动的影响范围,数据采集时选用 ABM 法,根据 ABM 法探测特点可知倾向探测深度将达到 42.6m。为了解采动围岩应力分布时间上的演化规律,本次共进行三组探测,分别于 2016 年 3 月 2 号、2016 年 3 月 4 号和 2016 年 3 月 11 号进行,下文中为了简化描述,将这三天的测量分别称为第一天、第三天和第十天探测,具体的电法布置如图 5-4 所示。

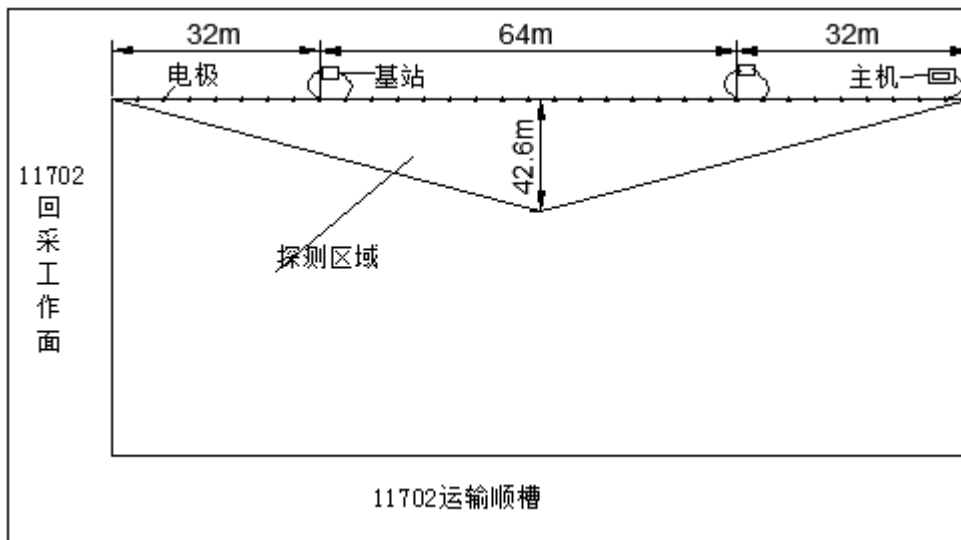


图 5-4 11702 工作面电法布置示意图

Figure 5-4 Schematic diagram of network parallel electrical method in 11702 working face

采用 ABM 法进行数据采集,数据采集时的供电时间为 0.5s/次,采样间隔 10ms,采集一次数据所使用的时间约为 4.2min。使用 YBD11 网络并行电法仪进行现场数据采集的步骤如图 5-5 所示。

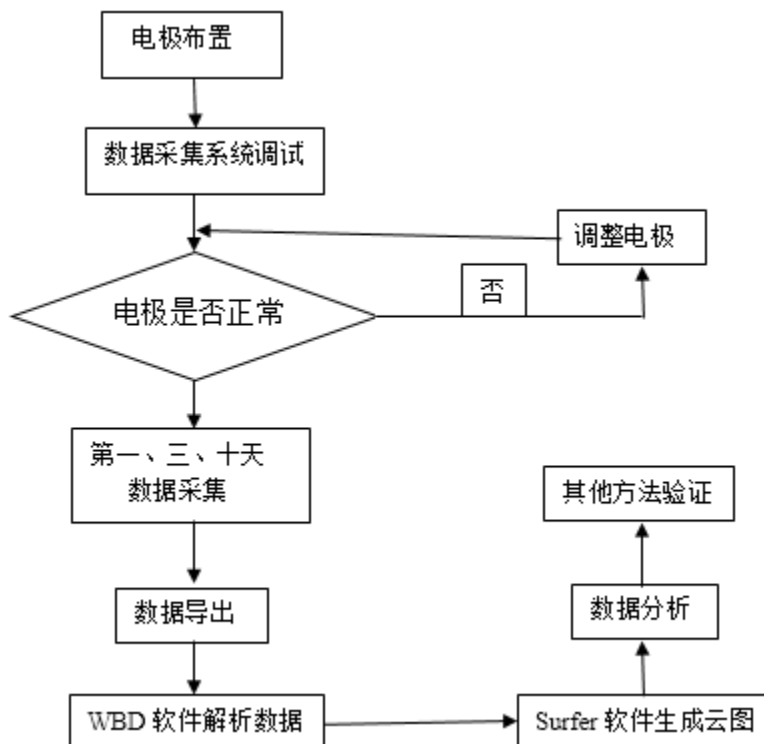
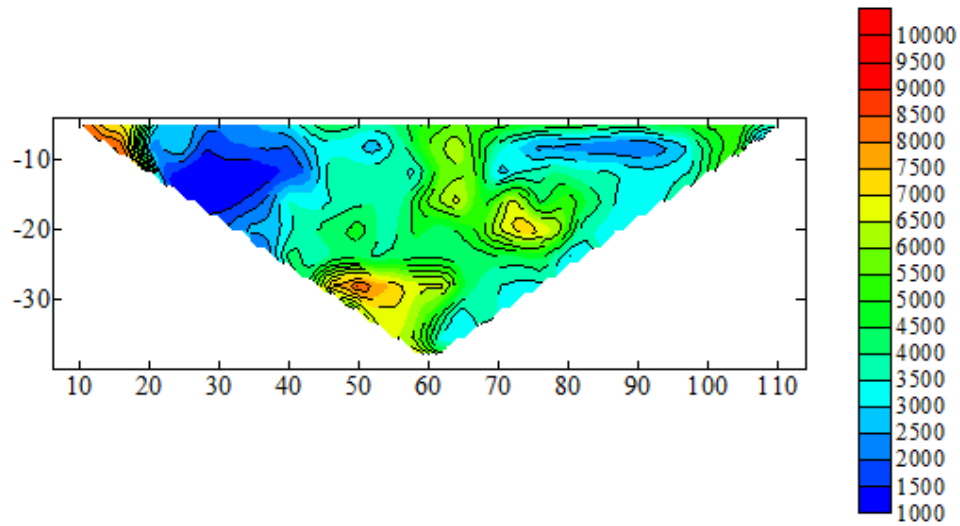


图 5-5 数据采集流程图

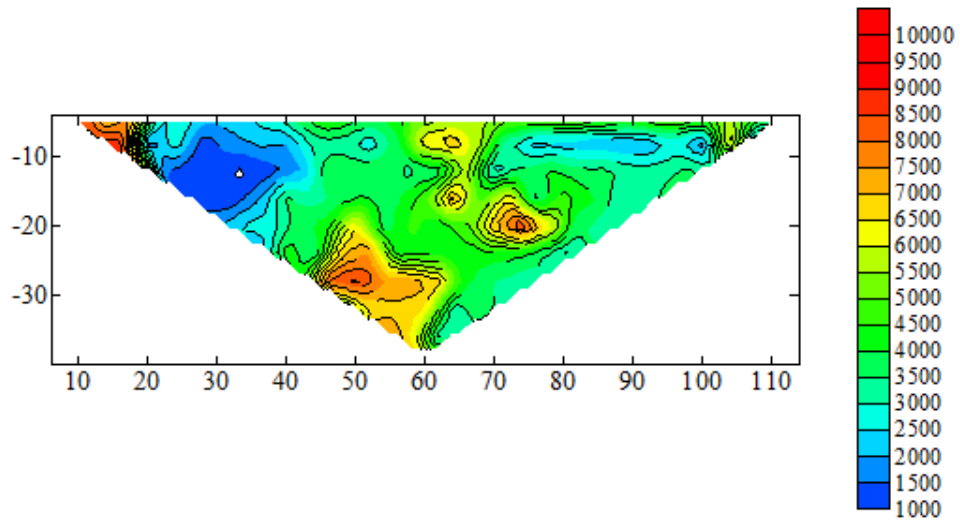
Figure 5-5 Flow chart of data acquisition

5.2.2 结果及分析

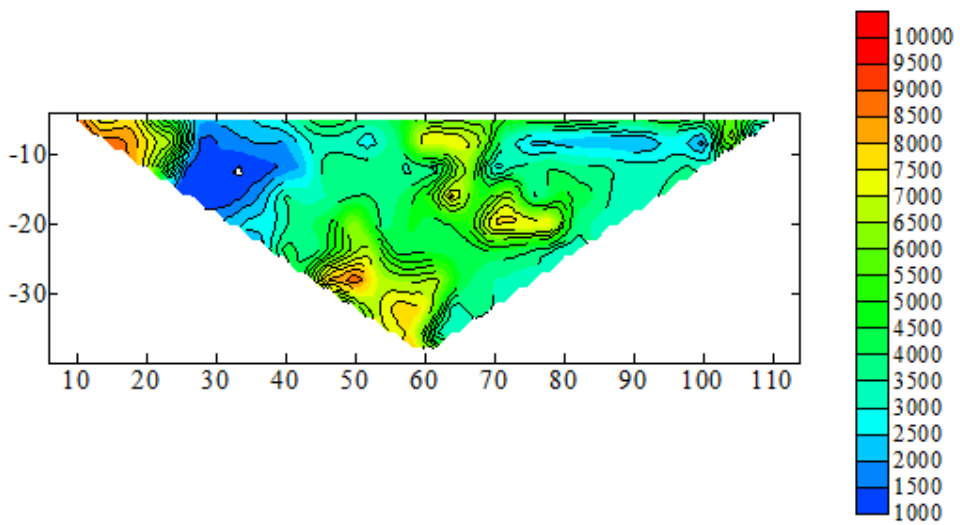
利用 WBD 视电阻率探测技术处理软件对采集的数据进行解编和处理,在使用 WBD 进行处理时,以回采面和回风顺槽交界处为坐标原点 (0,0),沿回风顺槽指向为 X 轴正向,以垂直于回风顺槽方向为 Y 轴正向。解编后形成相应的探测剖面数据文件,随后利用 surfer 软件生成探测剖面图(如图 5-6),并将前后测量时段的数据做差生成差值剖面图(如图 5-7),由于直流电法探测具有体积效应,可以认为底板 0m 深度处即为煤层内视电阻率,结合相关的地质资料对回采面采动应力的分布进行分析。



(a) 2016.03.02 第一天探测结果



(b) 2016.03.04 第三天探测结果



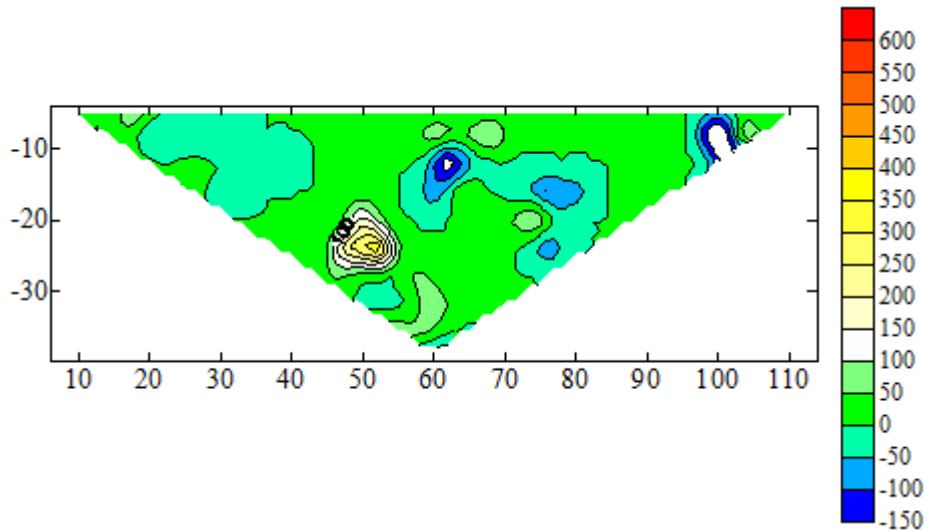
(c) 2016.03.11 第十天探测结果

图 5-6 回采应力网络并行电法探测结果云图

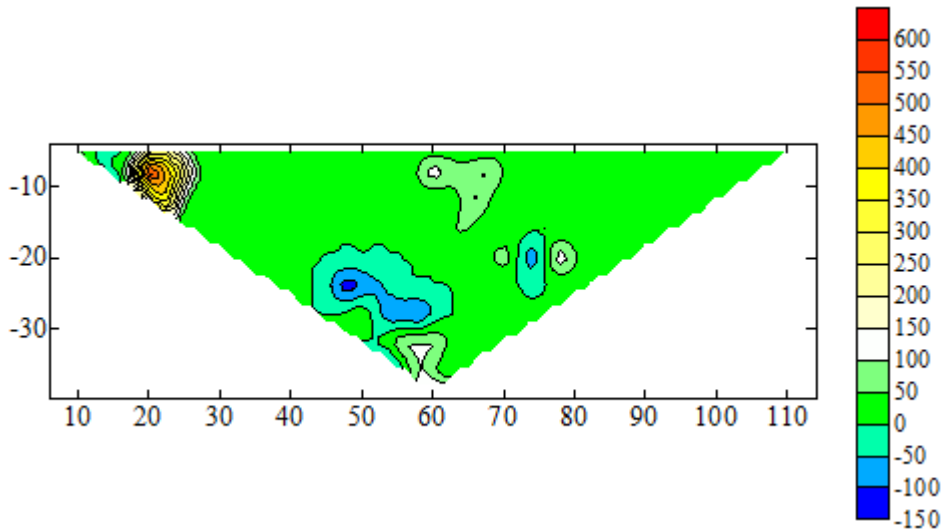
Figure 5-6 Diagram of network parallel electrical method detection results

如图 5-6 所示,工作面前方视电阻率从 $1000\Omega\cdot\text{m}$ - $10000\Omega\cdot\text{m}$ 变化不等,且呈现出不均匀分布状态,有局部明显高阻区域和局部低阻区域,这表明工作面前方因回采而存在异常区域,且视电阻率值差异较大,具体来讲,如图 5-6(a) 所示,沿 11702 回风顺槽走向方向距回采面 15m 范围内,出现一定范围的局部高阻区域,煤体的视电阻率在 $9000\Omega\cdot\text{m}$ - $10000\Omega\cdot\text{m}$ 左右,这个高阻区域的出现主要是由于回采面的采动影响导致了煤体的扩容,进而引起煤巷的应力重新分布,出现了一定范围的应力降低区域,即卸压带,卸压带内煤岩体松软破坏形成大量的孔裂隙,故可导致出现高阻响应;在距回采工作面约 15m-45m, Y 轴方向约为 20m 的范围内出现了局部低阻区域(视电阻率约为 $1000\Omega\cdot\text{m}$ - $1500\Omega\cdot\text{m}$),现场作业时附近的施工钻孔并无水涌出,因此可以判断该低阻区域的出现不是富水导致的,结合采动应力分布特点及前文分析的煤体视电阻率与采动应力分布的关系可以推断出该处为动压区,动压区内的煤岩体由于受到较大应力的作用,大量微孔裂隙闭合,分子间的电子云将会发生重叠现象,并导致分子间的电子迁移率增加,从而使电子导电率升高,电阻率下降;在距回采工作面 45m 开外的区域内,煤体的视电阻率基本维持在 $3500\Omega\cdot\text{m}$ - $6000\Omega\cdot\text{m}$ (定义为正常值)之间,该区域远离回采工作面,因此煤岩体受采动影响极小或未受影响,该区域内的煤岩体孔裂隙保持原始状态,既没有卸压带内因煤体扩容而出现局部高阻现象,也没有应力集中区内因应力集中而出现低阻现象,因此该区域煤岩体视电阻率值总体介于卸压带和动压区之间。可以得出回风顺槽动压区视电阻率约为正常值的 $1/3\sim 1/4$,卸压带视电阻率值约为正常值的 $1.5\sim 3$ 倍。纵观图 5-6(a) 除上述分析的几个典型区域内视电阻率的特点外,坐标(73,-10)到(92,-10)的范围内出现了局部低阻条带区域,后在煤矿工人的协助下进行了风钻打孔探测,从钻出的煤屑发现该区域煤体较周围潮湿,水利于电流的通过,所以表现出了低阻现象。坐标(43,-28)到(62,-34)范围内出现了局部高阻现象,并伴随周围出现不连续的低阻区域,这可能是煤体受地质构造影响而表现出这一特点。

经过第一天的探测后,又分别在第三天和第十天进行了数据的采集,因采集数据这段时间矿上在该采面未安排回采计划,所以该区域内视电阻率整体变化不大,但通过对比图 5-6(a)、(b)和(c)及结合差值图 5-7 可知在局部区域视电阻率还是出现了较为明显的增大或减小,这主要是因为有些煤岩体的破坏是在荷载作用下经过一段时间后才会发生,即对于很多固体材料,在稳定荷载作用下,会出现流变现象,当煤体持续承受荷载作用时,随着时间的推移煤体内部会发生蠕变,这种蠕变的产生导致了煤体内部孔裂隙的扩展或闭合,进而影响了该区域煤体视电阻率的大小。



(a)第三天与第一天视电阻率差值云图



(b)第十天与第三天视电阻率差值云图

图 5-7 回采应力网络并行电法探测结果差值云图

Figure 5-7 Diagram of network parallel electrical method different detection results

5.2.3 验证分析

煤体等非均质材料在受载情况下发生变形及破裂现象,在这一过程中伴随着煤体各部分的非匀速变形引起的电荷迁移和裂纹扩展过程中形成的带电粒子变速运动,从而导致了电磁辐射的产生。通过实验研究发现电磁辐射与煤岩体所受应力存在良好的耦合关系,王恩元等^[1]证实了煤岩体在受载变形破坏过程中会有不同程度的电磁辐射产生,电磁辐射强度与荷载大小有很好的一致性,即随着荷载的增大,电磁辐射强度增加,荷载越大,电磁辐射强度越大。结合回采工作面前方应力的分布特征可知,在卸压带内煤体已经发生屈服,大量内部赋存的弹性能通过煤体的破裂得到释放,已经不能承受太大应力的作用,因此该区域的应力较低,电磁辐射现象较弱;由卸压带过渡到动压区时,煤体承受的应力越来越大,

直至应力达到最大值，因此该区域内煤体产生的电磁辐射强度最大；越过应力峰值区后进入原始应力区，该区域内煤体承受的应力有所下降，因此该区域内煤体产生的电磁辐射强度较应力集中区内有所下降。根据这一研究规律，可以对电法探测应力分布结果进行验证。

本次电磁辐射信号的采集使用自主设计研发的 YDD16 便携式电磁辐射仪进行，该仪器具有非接触可定向测试的特点，宽频带探测，接收频率上限为 500kHz，有效探测距离为 7~22m。仪器主机及配套接收电磁辐射天线如图 5-8 所示。



图 5-8 YDD16 电磁辐射仪

Figure 5-8 YDD16 electromagnetic radiometer

使用 YDD16 电磁辐射仪进行测试时，首先将天线开口朝向需进行测试的煤岩体区域，然后打开仪器进行接收电磁信号，每隔测点进行 2min，测试完毕后关闭仪器，实验数据将自动记录并保存，探测方法见图 5-9。

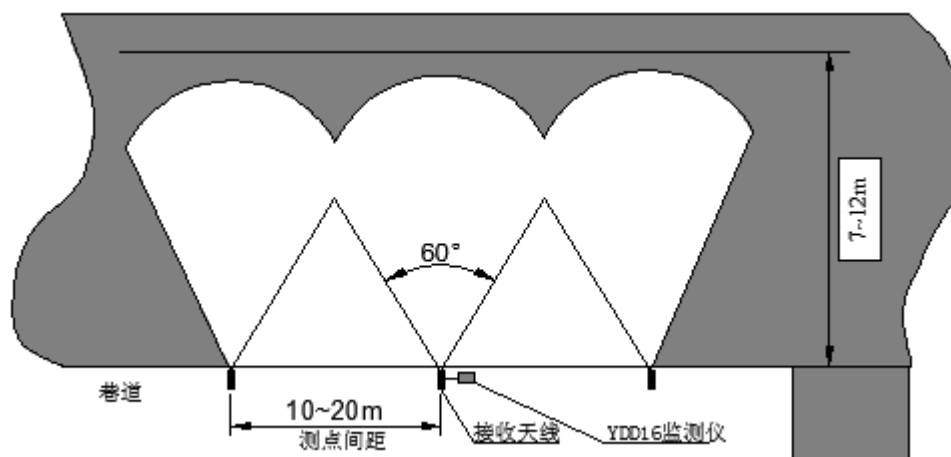


图 5-9 YDD16 矿用本安型电磁辐射仪测试方法示意图

Figure 5-9 Monitor pattern of YDD16 electromagnetic radiation instrument for mining

考虑到需要对 11702 回采工作面回风顺槽整个区域进行测试，故本次数据的采集采用移动式，即数据采集时在工作面回风顺槽煤壁每隔 10m 设置一个探测

点(如图 5-10),根据巷道长度和实际数据分析需要共设置 10 个测点,具体测试步骤为:

- 1) 分别在回采面前方回风顺槽中每隔 10 m 布置一个测点,共布置 10 个,覆盖回采面前方 100 m 的范围;
- 2) 每个测点依此测试电磁信号 2 min,分别于第一天、第三天和第十天进行,共测试 3 次;
- 3) 通过分析各测点的电磁信号强度特征研究工作面前方的应力分布。

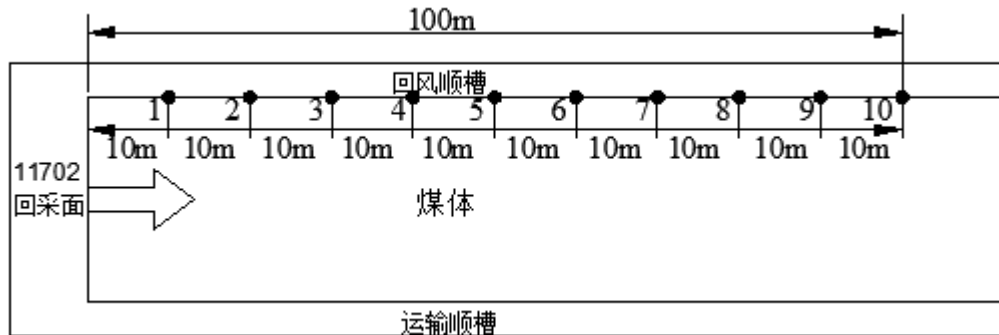


图 5-10 11702 工作面测点布置图

Figure5-10 11702 Work surface measuring point layout

利用 YDD16 自带数据处理软件分析这三次采集的数据,并进行统计,统计结果如图 5-11 所示。

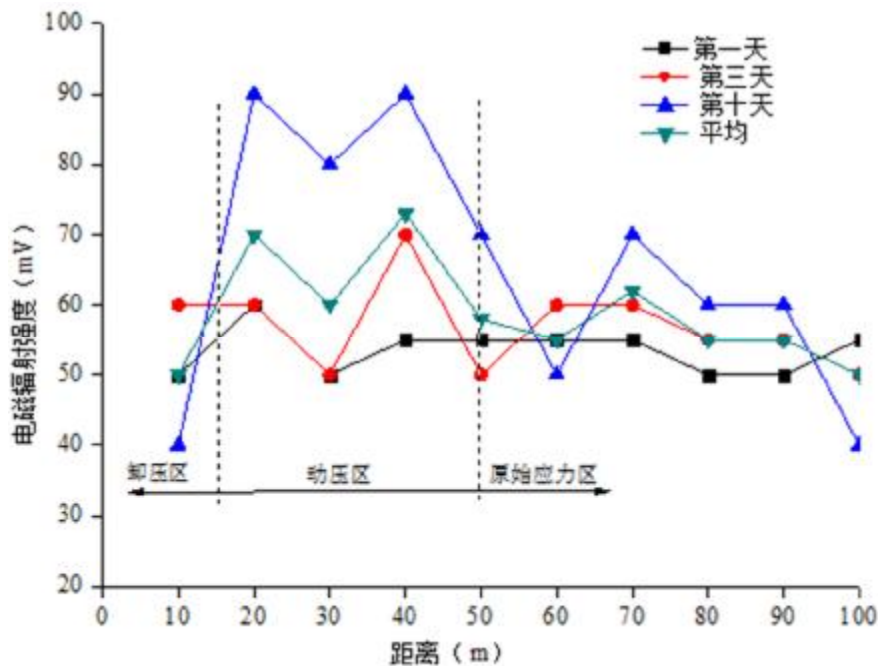


图 5-11 回风顺槽电磁辐射区域分布图

Figure5-11 Distribution diagram of electromagnetic radiation area in air way

由图 5-11 可以看出,第一天测试结果显示距回采面 10m 位置处电磁辐射强度值为 50mV,而第三和第十天测试的数据分别为 60 mV 和 40 mV 左右,电磁辐射强度值较小,根据煤体电磁辐射与应力的关系可以推断出该区域煤体所受的应力较小,观察巷道实际情况可以发现,因工作面的回采造成该部分煤体破裂程度较大,属于回风顺槽回采工作面前方卸压带范围;15 m~45m 范围内出现了电磁辐射强度的峰值,最大值出现在测试的第十天,达到 90 mV 左右,较 10m 位置处平均增幅达 40%左右,说明此处煤体承受较大应力作用,煤体内部活动剧烈,产生了大量的电磁信号;之后电磁辐射强度逐渐减小,在 45m~70m 电磁辐射强度值波动变化且变化幅度不大,强度值大于卸压带内电磁辐射值,这说明该区域内的煤体受采动影响较小,依旧承受原始应力的作用。为了消除系统误差,将这 3 天的电磁强度值求平均,并对比这 3 天的强度值变化。

从图 5-11 平均变化曲线可以看出,沿回风顺槽道方向,电磁辐射值整体呈先增大后减小,最后趋于稳定的趋势,对应的煤体所承受的应力也整体呈现出先增大后减小,最后趋于平稳波动的规律,这与回采工作面前方依次存在着卸压区、动压区和原始应力区 3 个区域相关。从 3 天平均的电磁强度可以看出,11702 回采面回风顺槽的应力集中区在 15m~45m 范围内,电磁强度可以达到 75mV 左右,前 15m,电磁强度略有波动,这可能是卸压区的应力存在不均匀造成的。而在 60~100m 范围内,电磁辐射强度值呈平稳略有下降趋势,在原始应力区内应力分布较为均匀,不会出现应力集中现象,表现在电磁强度上就是强度值相差不大。结合 3 天的数据可以看出,11702 工作面回风顺槽动压区在 15m~45m 范围,0~15m 范围为卸压区,45m 以外受采动影响较小。

对照前面章节中使用直流电法技术进行回风顺槽的应力分布探测结果,在 15m 范围内出现了明显了高阻区域,而在 15m~45m 范围内又出现低阻区域,并在 45m 以外煤体视电阻率呈现出规则高低阻交替出现的现象,与电磁辐射分析的结果吻合,表明直流电法进行回风顺槽应力分布的探测结果有效。

5.3 巷道围岩应力分布探测结果及验证分析 (Monitoring Results and Reliability Analysis of Roadway Excavation Stress Distribution)

5.3.1 现场布置及数据采集方法

简化后的 11702 工作面巷道布置图如图 5-3 所示,为了更好的掌握巷道开挖应力分布及其时空演化规律,使电法仪能够有效的探测采动空间围岩应力分布情况和集中程度,应使电法仪的探测范围大于开挖影响的范围且避开工作面回采的影响,故以 11702 工作面距开切眼 80m、90m 和 100m 处为中心,在 80m、90m 和 100m 两边各布置 16 个电极,极距设定为 1.5m,此时的探测长度理论将达到

48m，数据采集时选用 ABM 法，根据 ABM 法探测特点可知倾向探测深度将达到 16m。这样可实现探测煤体两侧距巷帮不同距离采动应力分布情况，本次数据采集在 80m、90m 和 100m 处分三组进行，分别于 2016 年 3 月 3 号、2016 年 3 月 5 号和 2016 年 3 月 12 号进行，下文中为了简化描述，将这三天的测量分别称为第一天、第三天和第十天探测，具体的电法布置图如图 5-12 所示。

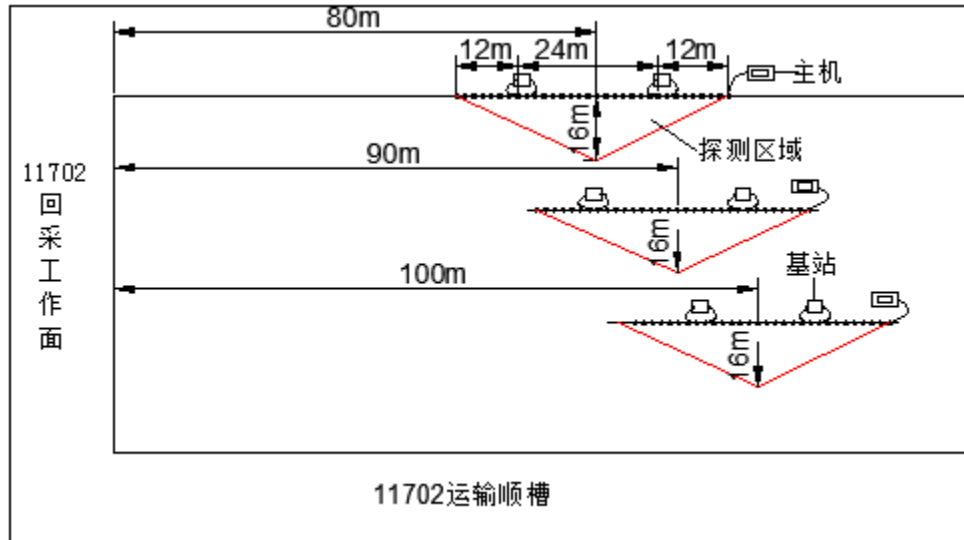


图 5-12 11702 工作面电法布置示意图

Figure 5-12 Schematic diagram of network parallel electrical method in 11702 working face

采用 ABM 法进行数据采集，数据采集时的供电时间为 0.5s/次，采样间隔 10ms，采集一次数据所使用的时间约为 4.2min。使用 YBD11 网络并行电法仪进行现场数据采集的步骤如图 5-13 所示。

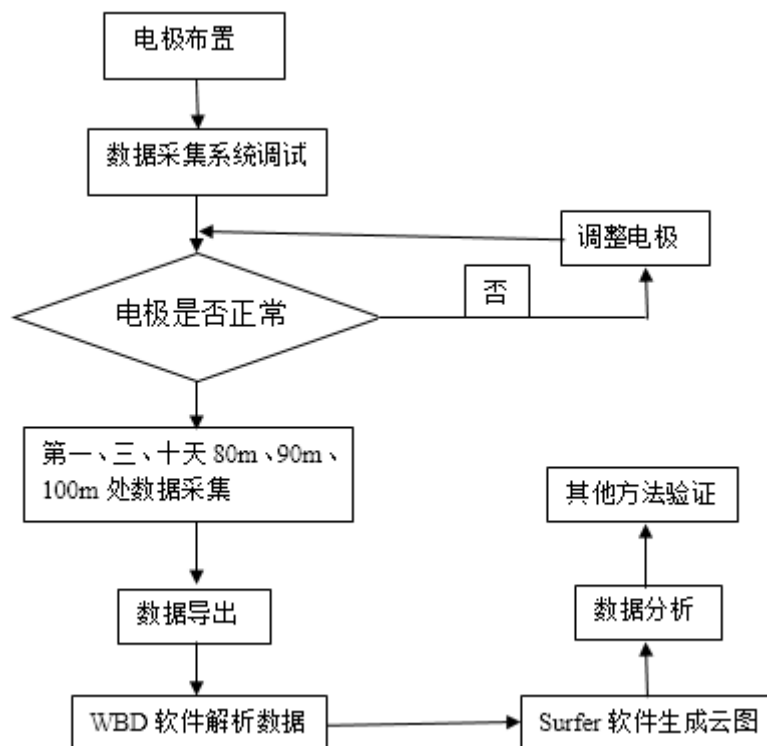


图 5-13 数据采集流程图

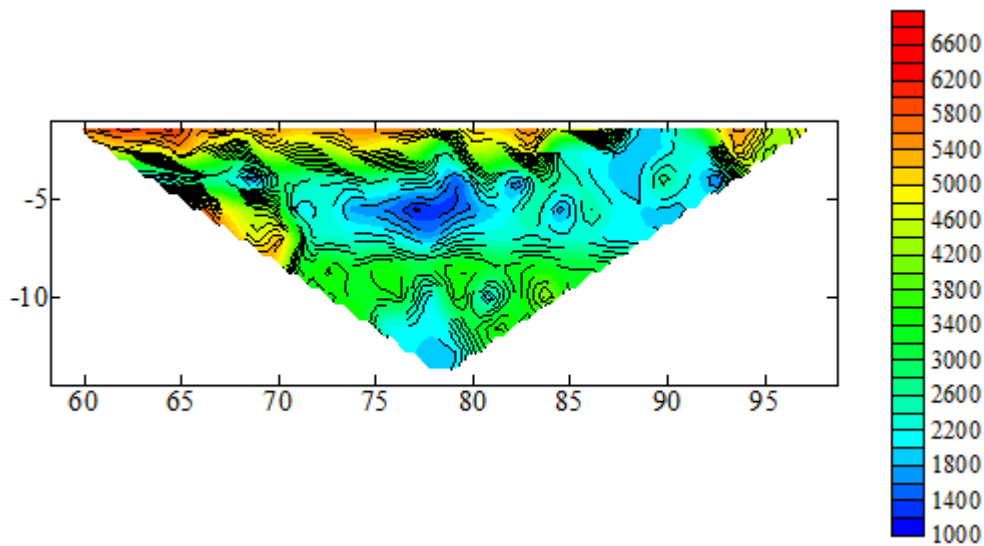
Figure 5-13 Flow chart of data acquisition

5.2.2 结果及分析

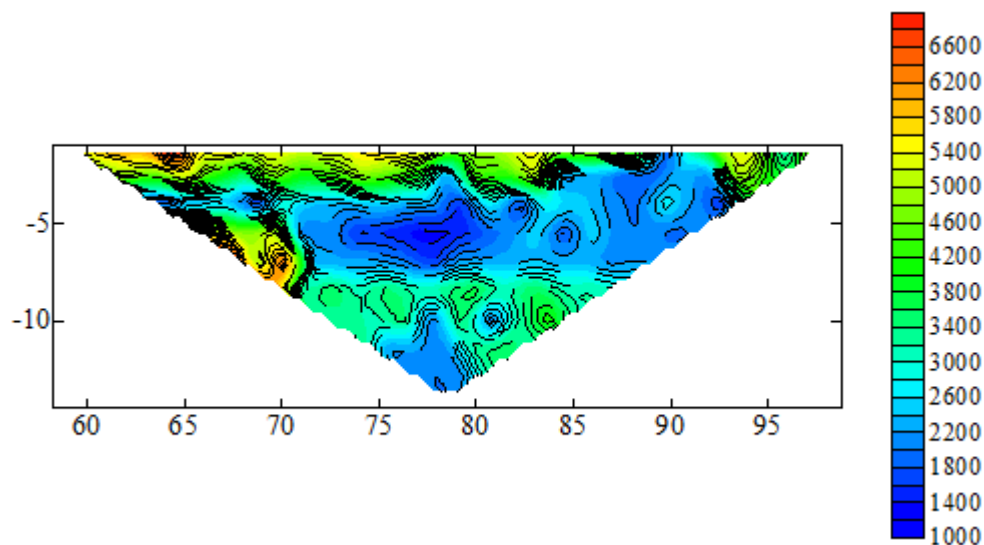
在使用 WBD 进行数据处理时，仍以回采面和回风顺槽交界处为坐标原点 (0,0)，沿回风顺槽指向为 X 轴正向，以垂直于回风顺槽方向为 Y 轴正向。解编后形成相应的探测剖面数据文件，随后利用 surfer 软件生成探测剖面图（如图 5-14、5-15 和 5-16）。由于直流电法探测具有体积效应，可以认为底板 0m 深度处即为煤层内视电阻率。

由图 5-14 (a)，以 80m 为中心向两边各探测 24m 范围内煤体的视电阻率大小及其分布，在距煤壁 4m 及以内的区域大体存在着一条高阻带，视电阻率达到 $5800\Omega\cdot\text{m}$ ~ $6600\Omega\cdot\text{m}$ ，该区域内煤体受巷道开挖影响，煤岩体已经发生屈服并产生大量的宏观孔裂隙，阻断了探测电流的通过，所以探测结果显示为高阻。但在 85m~93m 处高阻条带表现为局部的消失，煤体视电阻率略有下降，在前一天的测试中经钻孔验证该区域内煤体较其他区域潮湿，煤体中含有的水通过天然存在的微孔裂隙进行流通，构成了有利于电流通过的通道，导致该区域煤体视电阻率的降低；规模化低阻条带出现在距煤壁 4m~9m 处，煤体视电阻率大体分布在 $1400\Omega\cdot\text{m}$ 到 $2600\Omega\cdot\text{m}$ 左右，较靠近煤壁处煤体的视电阻率降低约 60%，降幅明显，卸压区煤体受巷道开挖影响，承受的应力大于其承载能力后发生破坏变形，释放了一部分峰值应力后，峰值应力向煤体深部转移，导致在距煤壁 4m~9m 范

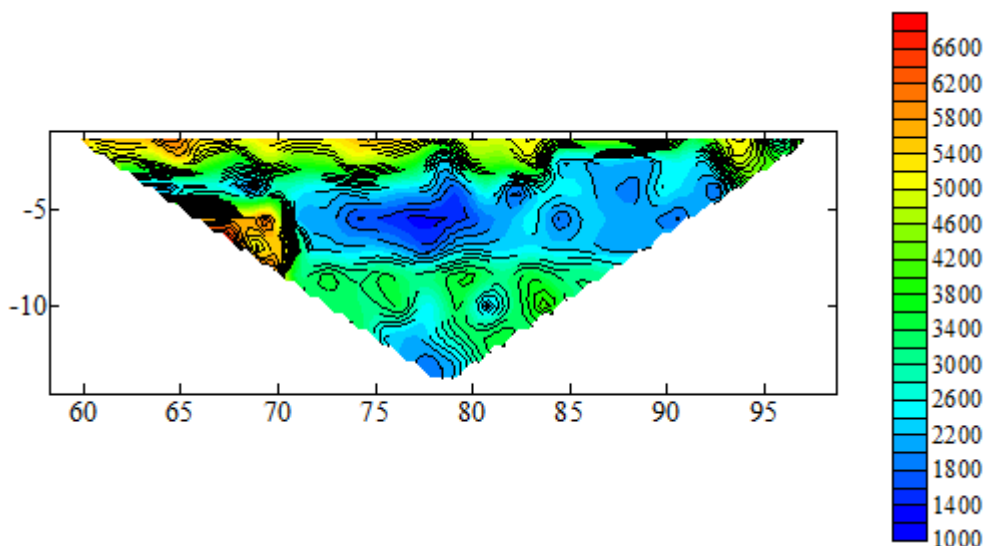
围内的煤体承受较大荷载，煤体内天然的微孔裂隙被压实闭合，贯通了电流的流通通道，反应在探测结果上就是该区域煤体视电阻率的大幅降低；再向煤体深处（距煤壁 9m 以外煤体）探测发现视电阻率值为 $3800\Omega\cdot\text{m}\sim 4200\Omega\cdot\text{m}$ （定义为正常值），有所增大，且呈现出不规则分布状态，在（78，-13）附近出现了局部的低阻区域，这些现象的出现在于煤体本身就是不均匀体，煤体视电阻率除受应力作用影响外还与煤体本身的破碎程度、含水率和电性参数有关。与图 5-14（b）和图 5-14（c）对比可以发现，尽管巷道内并未进行施工等组织作业，但是由于煤体内部一直承受着应力的作用，煤体发生定常蠕变改变了煤体内部微孔裂隙的扩展和闭合，从而影响到局部区域煤体的视电阻率变化，但整体变化幅度不大，不足以改变对规律判断，因此可以根据电法探测云图推断出该区域煤体因巷道开挖引起的围岩松动圈大小约为 4m，应力集中区在距煤壁 4m~9m 范围内。根据探测结果可以得出应力集中区视电阻率约为正常值的 $1/2\sim 1/3$ ，松动圈视电阻率值约为正常值的 1.5~1.7 倍。



(a) 2016.03.03 80m 第一天探测结果



(b) 2016.03.05 80m 第三天探测结果



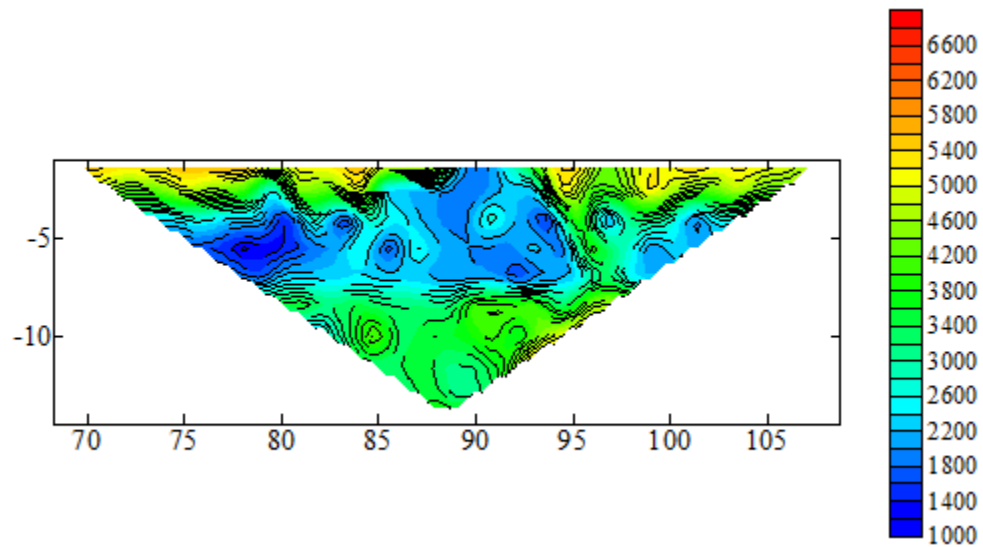
(c) 2016.03.12 80m 第十天探测结果

图 5-14 80m 处直流电法探测云图

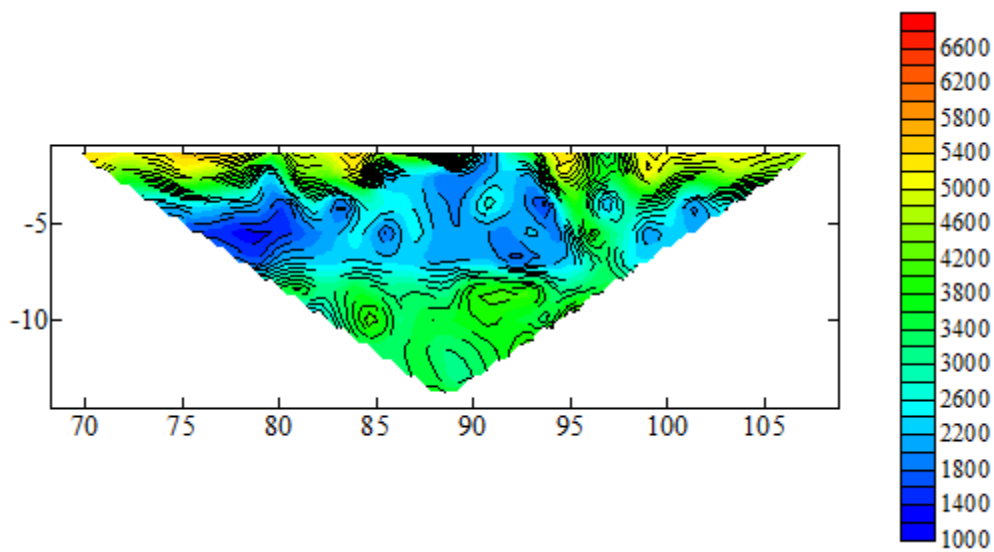
Figure 5-14 Diagram of network parallel electrical method detection results in 80m

由图 5-15，以 90m 为中心向两边各探测 24m 范围内煤体的视电阻率大小及其分布，90m 中心的探测结果包含 80m 为中心的探测结果，通过对比图 5-14 和图 5-15 可以看出探测结果的连贯性，这也是电法探测结果可靠性较高的表现。高阻带仍然出现在距煤壁 0m~4m 范围内，在距回采面 92m 左右有局部的低阻区域；低阻区域的条带较为完整，但在 97m 左右出现了一条垂直于煤壁的高阻带，这可能是工作面内隐伏断层或小断层的影响，也可能是应力重新分配过程中该区域煤体出现了较大的宏观裂纹所致，根据揭露的断层显示，并不在其影响区域内。未受巷道开挖影响的原始应力区域（纵坐标大于 9m）内通过云图表现来看，视电阻率变化幅度不大且分布较为均匀，因此该区域内煤体赋存较为稳定，通过与

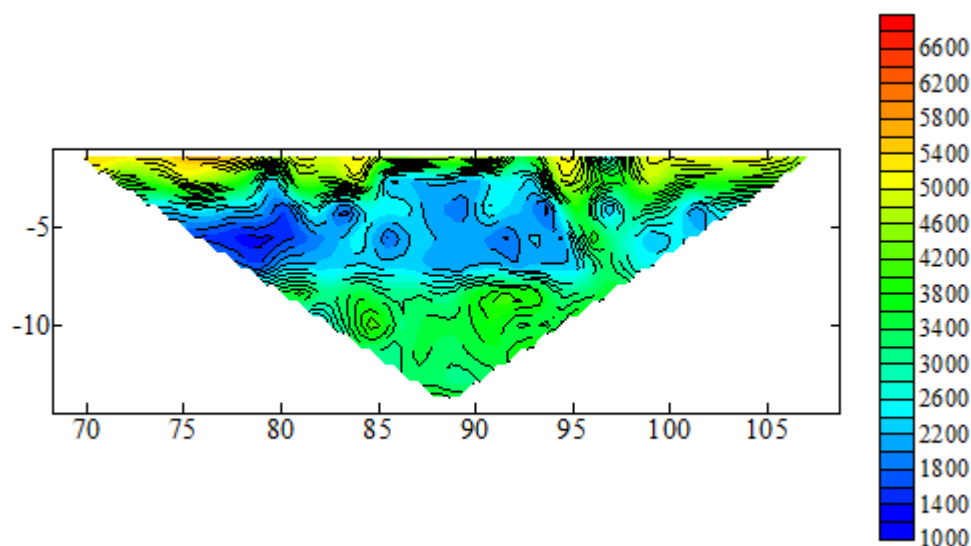
第三天和第十天的云图对比,煤体的定常蠕变现象仍然存在。根据电法探测云图推断出该区域煤体因巷道开挖引起的围岩松动圈大小约为 4m, 应力集中区在距煤壁 4m~9m 范围内。



(a) 2016.03.03 90m 第一天探测结果



(b) 2016.03.05 90m 第三天探测结果

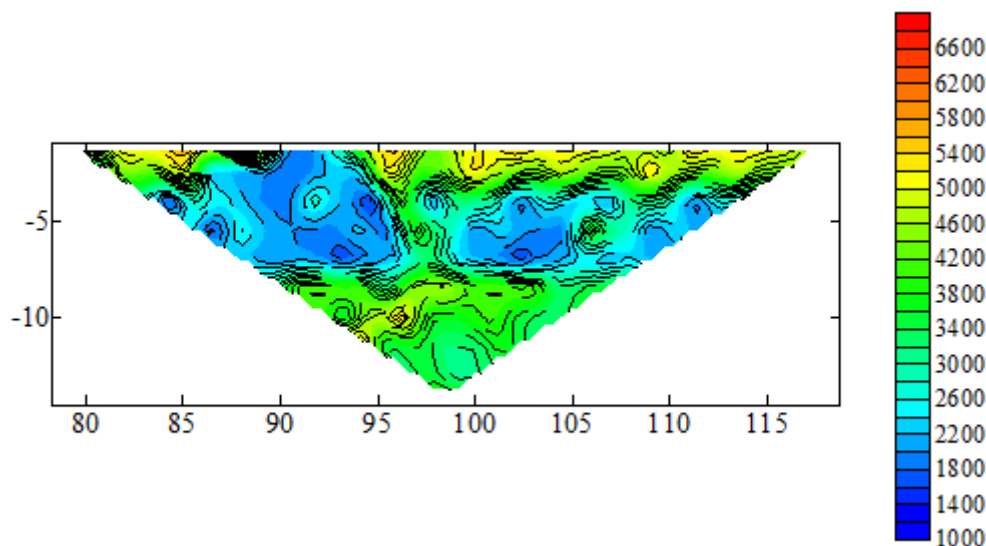


(c) 2016.03.12 90m 第十天探测结果

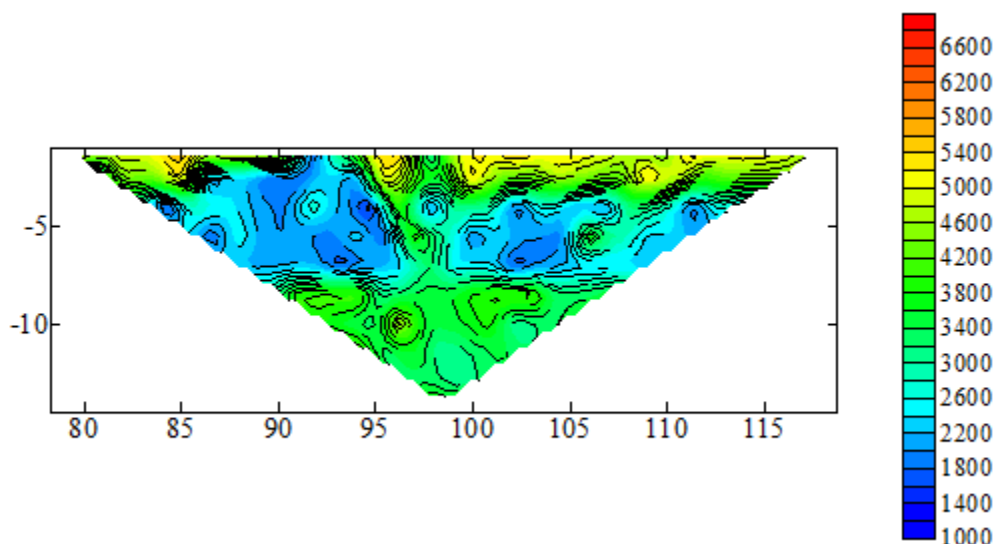
图 5-15 90m 处直流电法探测云图

Figure 5-15 Diagram of network parallel electrical method detection results in 90m

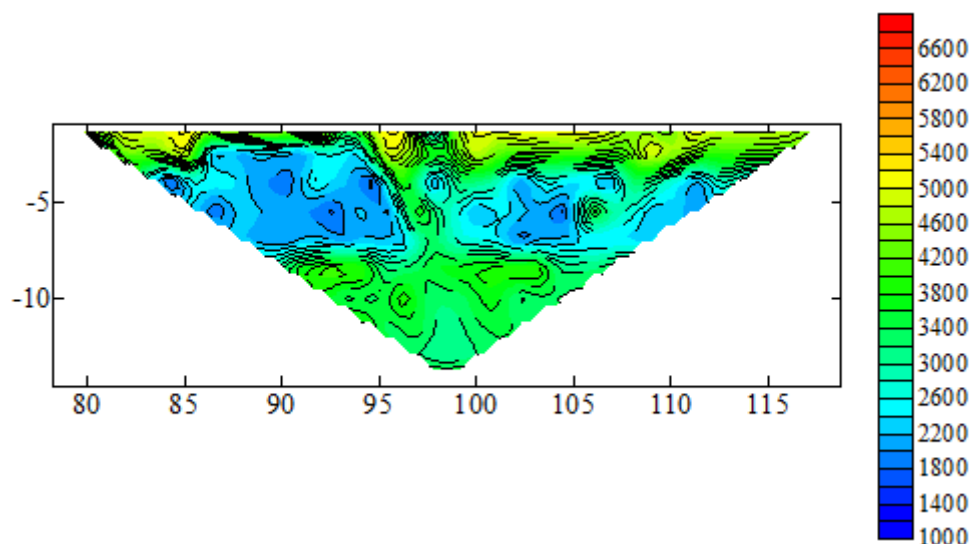
由图 5-16, 以 100m 为中心向两边各探测 24m 范围内煤体的视电阻率大小及其分布, 探测结果的连贯性仍然存在。在距煤壁 0m~4m 范围内仍然存在高阻带, 但在距回采面 92m 左右有局部的低阻区并延伸到了煤壁, 该区域内可能存在小范围的含水区; 低阻区的条带除那条垂直的高阻带外较为完整, 根据电法探测云图推断出该区域煤体因巷道开挖引起的围岩松动圈大小约为 4m, 应力集中区在距煤壁 4m~9m 范围内, 原始应力区的分布应在距煤壁 9m 及以上范围。



(a) 2016.03.03 100m 第一天探测结果



(b) 2016.03.05 100m 第三天探测结果



(c) 2016.03.12 100m 第十天探测结果

图 5-16 100m 处直流电法探测云图

Figure 5-16 Diagram of network parallel electrical method detection results in 100m

5.2.3 验证分析

为了验证电法勘探结果的准确性并进一步确定巷道开挖引起的围岩应力分布情况，本章节将分别采用钻孔电磁辐射技术和钻屑量指标进行分析。

相关研究表明，在相同煤层物理性质及瓦斯等地质条件下，钻屑量的分布可以间接的反应煤体中采动应力的分布情况，因此可以利用钻屑量来评估煤体内部应力的分布状况，钻屑量越大表明该处煤体的应力越大。利用这点，在第一天采集数据时，分别在距工作面 80m、90m 和 100m 的位置打深度为 14m 的钻孔，并进行钻屑量的采集。钻屑量统计结果绘制成图 5-17。

如图 5-17 所示, 80m 钻孔采集的 1m 处钻屑量较 90m 和 100m 钻孔大, 这主要是因为工人采集钻屑量时, 由于 80m 钻孔上方煤体较为破碎, 打钻时大量的无关破碎煤体落入收集器中造成了误差, 实际钻屑量应在 1.5Kg/m 左右, 前 6m 钻孔钻屑量大体维持在一个较为平稳的水平 (约 1.5Kg/m), 变化幅度不大, 根据应力与钻屑量的关系可以判断该范围内的煤岩体所受应力的不大, 应为卸压带范围; 虽然在 7m 左右处钻屑量出现了一次突然的下降, 但是 9m 处钻屑量达到峰值的 2.3Kg/m , 该处应为应力集中区; 随着钻孔的深入, 钻屑量处于较为平稳的状态, 且低于峰值, 该区域内煤体应处于原始应力区内。因此根据钻屑量可以推断出 80m~100m 范围内煤体因巷道开挖而引起的围岩松动圈大小约为 4m, 应力集中区约为 4m~9m。

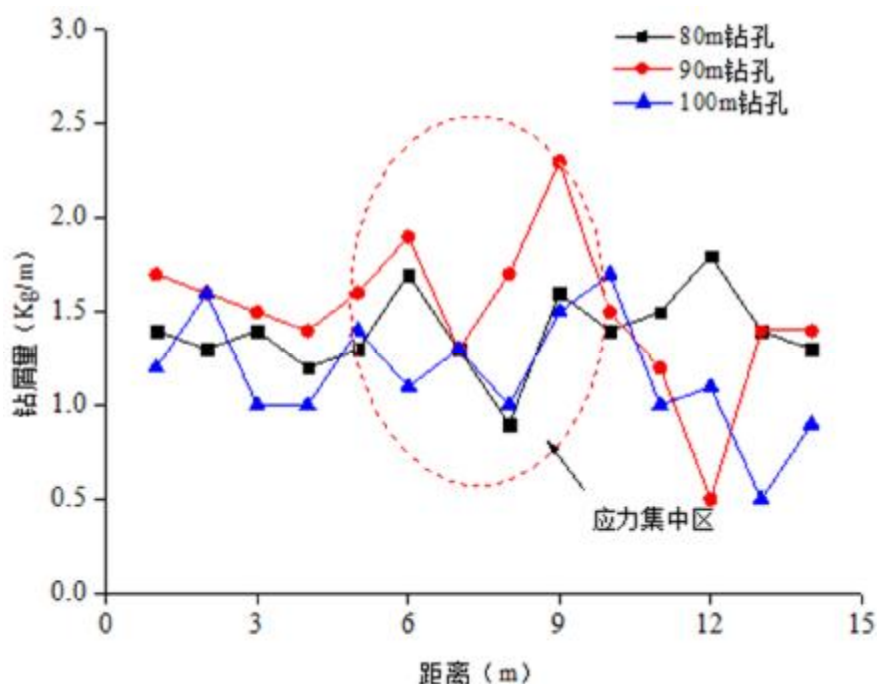


图 5-17 钻屑量统计结果

Figure 5-17 statistical results of index of drilling yields

使用 YDD16 电磁辐射仪进行探测时, 将探测天线换成钻孔天线, 钻孔内电磁辐射采集原理见图 5-18。

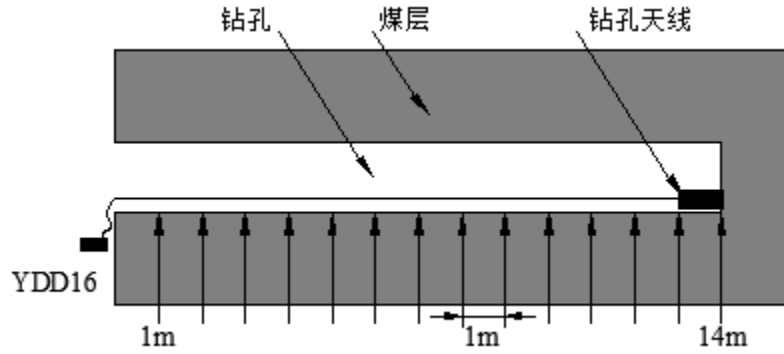


图 5-18 煤岩内部电磁辐射测试方法

Figure5-18 The schematic diagram of drilling EMR

第一天测试时利用采集钻屑量的钻孔进行数据的采集，因该段煤体赋存较为稳定，塌孔情况并不明显，所以随后的第三天和第十天仍然使用该钻孔进行数据的采集。数据采集时，将钻孔天线绑到 PVC 细管的端部，向钻孔内以 1m 为单位进行放送，每隔 1m 进行一次数据的采集，数据采集时间为 2min，依次完成 14m 钻孔的数据采集后关闭仪器，实验数据将自动记录并保存，详细的测试布置见图 5-19。



图 5-19 电磁辐射钻孔测点布置图

Figure5-19 Schematic diagram of electromagnetic radiation monitor point arrangement

经数据处理软件处理，将采集的电磁辐射强度值绘制成曲线图，如图 5-20 所示。

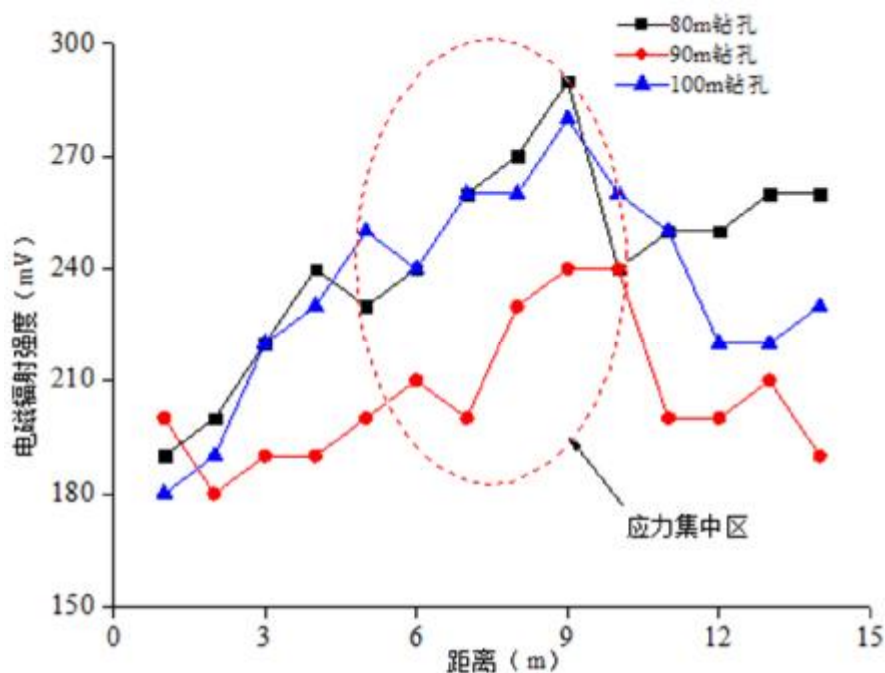


图 5-20 回风巷钻孔内电磁辐射强度变化图

Figure 5-20 Distribution diagram of electromagnetic radiation area in air way

如图 5-20 所示, 虽然距回采工作面的距离不同, 但 80m、90m 和 100m 钻孔内电磁辐射强度变化规律大体相同, 都是呈现出先增大后降低的趋势。靠近煤壁的 0m~4m 范围内, 电磁辐射强度值变化不大, 且保持较低的水平, 该区域内煤体受巷道开挖影响, 煤体出现破裂并转移了部分应力, 因此 0m~4m 应该为巷道开挖引起的围岩松动圈; 随着钻孔的深入, 电磁辐射强度从 3m 的 220mV 左右一直增加到 9m 的 280mV, 为电磁辐射强度峰值, 表明该处煤体承受较大的应力, 应为应力集中区; 从 9m 处开始, 随着孔深的增加, 电磁辐射强度开始降低, 在 11m 处趋于稳定, 这表明从 11m 开始, 煤体内部应力环境趋于平稳, 处于原始应力区内; 90m 处钻孔内电磁辐射强度变化规律和 80m 处钻孔类似, 不过电磁辐射强度值普遍偏低, 在 3m 处的强度值仅为 190mV 左右, 即使到达钻孔 9m 深处时, 电磁辐射强度值也仅为 240mV 左右, 这表明 90m 处钻孔内部的煤体所承受的应力比 80m 处的小; 100m 处钻孔内电磁辐射强度的变化趋势和强度和 90m 处类似。因此从钻孔电磁辐射强度值可以推断出巷道开挖引起的围岩松动圈大小约为 4m 左右, 距煤体 4m~9m 为应力集中区, 从 9m 开始处于原始应力区范围。

钻屑量和钻孔电磁辐射强度值推断出的松动圈大小与电法勘探的结果基本吻合, 应力集中区的分布范围也大体重合, 这表明使用直流电法技术进行巷道围岩应力分布的探测是行之有效的。

5.4 本章小结(Summary)

(1) 选取了糯东煤矿11702工作面回风顺槽作为现场试验地点,应用直流电法技术对工作面回风顺槽采动围岩应力分布情况进行了探测。探测方案分为工作面前方回采应力分布探测和巷道开挖应力分布探测两个部分,并针对测试要求设计了不同的探测方案;

(2) 针对工作面会风顺槽回采应力分布探测工作,沿回风顺槽走向方向布置了32个电法电极,覆盖长128m,深42.6m的探测范围。通过分析第一天、第三天和第十天的视电阻率值,11702工作面回风顺槽因回采引起的卸压带范围在距回采面0m~15m,动压区范围在距工作面15m~45m左右,距回采面45m以外受采动影响较小。定义受采动影响较小区域煤体视电阻率为正常值,得出动压区视电阻率约为正常值的 $1/3 \sim 1/4$,卸压带视电阻率值约为正常值的 $1.5 \sim 3$ 倍。为验证电法勘探结果的准确性,利用实验室自主研发的YDD16电磁辐射探测仪进行了相关结果的验证,通过电磁辐射强度推断出的应力分布范围与电法勘探结果基本吻合,由此可以确定电法勘探结果的准确性;

(3) 针对巷道围岩应力分布探测工作,为避免回采采动影响,分别在距工作面80m、90m和100m为中心向两端布置电法电极,探测范围达到长48m,深16m。通过对比分析三个地点的电法探测数据,巷道开挖引起的围岩松动圈大小约为4m左右,距煤壁4m~9m左右为应力集中区。定义原始应力区视电阻率值为正常值,应力集中区视电阻率约为正常值的 $1/2 \sim 1/3$,松动圈视电阻率值约为正常值的 $1.5 \sim 1.7$ 倍。为验证结果的准确性,分别利用钻孔电磁辐射法和钻屑量法进行应力分布的测量,结果显示与电法勘探结果类似,由此肯定了直流电法技术进行巷道开挖应力分布探测的准确性。

6 全文总结、创新点及展望

6 Summaries, Innovations and Prospects

6.1 全文总结 (Summaries)

随着煤矿开采深度的增加,受复杂地质条件和开采条件的影响,采动围岩应力分布及变化越来越复杂,如何有效的探测采动围岩应力分布显得尤为重要。本文通过对直流电法探测技术及采动围岩应力分布原理的分析,提出了利用直流电法技术进行采动围岩应力分布探测的思路,并通过原理分析、实验室实验和现场测试验证三个手段开展了相关研究,具体工作及结果如下:

(1) 分析了直流电法探测采动围岩应力分布的原理。直流电法探测以煤岩体的导电性差异(即煤岩体电阻率)为基础,煤体导电特性与孔裂隙结构的演化是决定煤岩体受载过程中视电阻率变化特征的主要因素,干燥煤岩体主要以电子导电为主,不同应力水平作用下的煤体,其内部孔裂隙分布不同,从而表现出不同的视电阻率响应规律。

(2) 改进了电法探测电极,进行了直流电法仪实验室模拟实验,开展了不同应力水平下直流电法的响应规律的实验室研究,在加载初期($22\%\sigma_{max}$),煤体原始孔裂隙闭合,视电阻率降低;加载中期($44\%\sigma_{max} \sim 66\%\sigma_{max}$),微观裂隙产生,煤层视电阻率有小幅的增大;随着加载的进行,当施加荷载到 $87\%\sigma_{max}$ 时,煤体微观裂隙进一步的扩张、延伸,煤体表面出现微裂纹,视电阻率持续增大,当加载到煤体破坏时,视电阻率呈倍数增大。在整个实验过程中,由于煤体各部分受力不均,对视电阻率的响应也不同,表现为视电阻率在试样破坏后整体呈增大趋势,但也有局部煤体出现视电阻率降低的现象,这主要是因为煤体破裂后仍然存在局部残余块段用来传导电流。

(3) 分析了宏观裂隙条件下视电阻率的响应规律,通过对比几组不同试样的视电阻率响应规律,发现破坏后的试样的视电阻率都将出现数量级的增大,表明破坏产生的宏观孔裂隙是影响视电阻率的主要因素。

(4) 在糯东煤矿 11702 工作面回风顺槽,沿回风顺槽走向方向布置 32 个电极,进行了直流电法探测采动围岩应力分布的现场测试,对比分析第一天、第三天和第十天的煤岩视电阻率数据,推断出工作面回风顺槽因回采引起的应力分布范围为:在距回采面 0m~15m 范围为卸压带,距工作面 15m~45m 左右为动压区,距回采面 45m 以外的区域受回采采动影响较小,定义该区域视电阻率为正常值,得出动压区视电阻率约为正常值的 $1/3 \sim 1/4$,卸压带视电阻率值约为正常值的

1.5~3 倍；利用 YDD16 电磁辐射探测仪进行了对比测试及验证，证实了直流电法探测回采采动应力分布的准确性。

(5) 在距回采面 56m~124m 范围内布置电法电极，测试并采集该区域煤体的电法数据，经分析得到了因巷道开挖引起的围岩应力分布规律为：围岩松动圈大小约为 4m 左右，距煤壁 4m~9m 左右为应力集中区，定义原始应力区视电阻率值为正常值，应力集中区视电阻率约为正常值的 $1/2 \sim 1/3$ ，松动圈视电阻率值约为正常值的 1.5~1.7 倍；并通过钻屑量指标和钻孔电磁辐射技术的测试结果验证了直流电法探测结果的准确性。

6.2 创新点 (Innovations)

论文主要创新点有：

(1) 分析了直流电法探测采动围岩应力分布的原理。

(2) 建立了小尺度煤岩直流电法响应实验系统，测试分析了煤样在不同应力水平和孔裂隙条件下视电阻率的响应规律，分析揭示了电法响应与煤岩裂隙分布的耦合机制。

(3) 基于电阻率响应与裂隙、应力分布的关系，提出了直流电法探测采动围岩应力分布的方法，并在现场进行了测试应用和验证。

6.3 展望 (Prospects)

论文通过原理分析、实验室模拟和现场测试及验证三个方面对直流电法探测采动围岩应力分布进行了分析，虽然取得了一定的研究成果，但是仍然存在诸多不足需要进一步的完善和解决：

(1) 理论分析中虽然通过采动围岩应力场与裂隙场、裂隙场与电阻率响应的分析，提出了基于煤岩电阻率探测采动围岩应力分布的思路和方法，建立起了采动围岩应力分布与煤岩电阻率的相关关系，但是这种相关关系未能定量的给出数学上的推导，因此无法直接从电法勘探结果中读出围岩应力的分布大小，只能划分出应力分布范围。

(2) 实验测试并分析了不同应力水平及孔裂隙条件下煤样直流电法响应规律，但在模拟过程中因实验模型搭建以及施加荷载方式的局限性，无法细化整个实验过程中应力与试样电阻率的响应规律，因此在以后的实验过程中还需改进。

(3) 在采掘过程中，采动围岩应力分布一直处于动态的变化过程当中，由于矿上生产的安排未能有效探测到回采过程中应力的分布变化情况，因此在以后的实验过程中应尽量选择生产工作面进行有效探测，并尝试应用到动态的应力分布探测过程中去。

(4) 由于不同矿井条件下煤岩赋存等地质条件差别较大, 无法对电法勘探结果做出准确的定量描述, 在以后的研究中还需进一步加强

参考文献

- [1] 王恩元,何学秋.煤岩电磁辐射技术及其应用「M」.北京:科学出版社,2009.
- [2] 徐永沂,等.煤矿开采学[M].徐州:中国矿业大学出版社,2009.
- [3] 窦林名,何学秋.冲击矿压防治理论与技术[M].徐州:中国矿业大学出版社,2001.
- [4] 俞启香.矿井瓦斯防治[M].徐州:中国矿业大学出版社,1992.
- [5] 国家安全生产监督管理总局(2010.1.13). http://www.chinasafety.gov.cn/newpage/Contents/Channel/20289/2010/0113/82746/content_82746.htm.
- [6] Malan D F, Spottiswoode S M. Time-dependent fracture zone behavior and seismicity surrounding deep level stopping operations [A]. In: Rockburst and Seismicity in Mines [C]. Rotterdam: A.A.Balkema, 1997,173-177.
- [7] 钱鸣高.20 年来采场围岩控制理论和实践的回顾[J].中国矿业大学学报,2000 19(1):1-4.
- [8] Sellers E J, Klerck P. Modeling of the effect of discontinuities on the extent of the fracture zone surrounding deep tunnels [J]. Tunneling and Underground Space Technology,2000,15(4): 463-469.
- [9] 何满朝.深部开采工程岩石力学的现状及其展望[A].见:中国岩石力学与工程学会编.第八次全国岩石力学与工程学术大会论文集[C].北京:科学出版社,2004:88-94.
- [10] Fairhurst C. Deformation, yield, rupture and stability of excavations at great depth [A]. In: Fairhurst C ed. Rockburst and Seismicity in Mines [C]. Rotterdam: A.A.Balkema,1990.1103-1114.
- [11] Kidybinski A, Dubinski J. Strata Control in Deep Mines [M]. Rotterdam: A.A.Balkema,1990.
- [12] 钱七虎.非线性岩石力学的新进展——深部岩体力学的若干问题[A]. 见:中国岩石力学与工程学会编.第八次全国岩石力学与工程学术大会论文集[C]. 北京:科学出版社, 2004.10-17.
- [13] 钱七虎.深部地下工程空间开发中的关键科学问题 [A].见:第 230 次香山科学会议——深部地下空间开发中的基础研究关键技术问题[C].2004.
- [14] 古德生.金属矿床深部开采中的科学问题 [A].见:香山科学会议编.科学前沿与未来(第 6 集)[C].北京:中国环境科学出版社,2002.192-201.
- [15] Sun J, Wang S J. Rock mechanics and rock engineering in China: developments and current state-of-the-art[J].International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 2000, (37): 447-465.
- [16] 谢和平.深部高应力下的资源开采现状、基础科学问题与展望[A].见:香山科学会议编.科学前沿与未来(第六集)[C].北京:中国环境科学出版社,2002:179-191.

- [17] 何满朝,谢和平,彭苏萍,等.深部开采岩体力学研究[J].岩石力学与工程学报,2005,4(16):2803-2813.
- [18] 周刚,李玉涛,吴振业.大屯矿区地应力测量与特征分析[J].煤炭学报,2005,30(3):314-318.
- [19] 钱鸣高,刘听成.矿山压力及其控制[M].北京:煤炭工业出版社,1991:202-206.
- [20] WANG Lian-guo, SONG Yang, HE Xing-hua et al. Side Abutment Pressure Distribution by Field Measurement[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2008, 18 (4):527-530.
- [21] 曹胜根,缪协兴.超长综放工作面采场矿山压力控制[J].煤炭学报,2001,26(6):621- 625.
- [22] 康红普.煤矿井下应力场类型及相互作用分析[J].煤炭学报,2008,33(12):1329- 1335.
- [23] 梦蛟,李先章,等.三软厚煤层综采工作面采动应力分布规律研究[J].煤炭科学技术,2011,39(7): 21-24.
- [24] 曹安业,窦林名,江衡,等.采动煤岩不同破裂模式下的能量辐射与应力降特征[J].采矿与安全工程学报,2011,3(9):350-355.
- [25] 潘俊锋.冲击危险性厚煤层采动应力场特征研究[D].北京煤科总院硕士论文.2006.
- [26] 蔡美峰,何满朝,刘东燕.岩石力学与工程[M].北京:科学出版社,2002.
- [27] 林柏泉,周世宁,张仁贵. 钻孔密封段密封介质渗漏的探讨[J]. 阜新矿业学院学报(自然科学版),1993,(04):10-15.
- [28] 林柏泉,周世宁,张仁贵. 煤巷卸压带及其在煤和瓦斯突出危险性预测中的应用[J]. 中国矿业大学学报,1993,(04):47-55.
- [29] 齐黎明,林柏泉,支晓伟. 上山掘进时卸压区应力及防突长度分析[J]. 中国矿业大学学报,2005,(03):299-302.
- [30] 尹光志,李晓泉,赵洪宝,等. 钻屑量与矿山压力及瓦斯压力关系现场实验研究[J]. 北京科技大学学报,2010,(01):1-7.
- [31] 侯朝炯,马念杰. 煤层巷道两帮煤体应力和极限平衡区的探讨 [J]. 煤炭学报,1989,(04):21-29.
- [32] 安文勇,陈士升. 采场支承压力分布规律研究[J]. 科技创新导报,2011,(21):113.
- [33] 朱守颂,姜光. 工作面超前支承压力分布规律研究[J]. 煤炭工程,2011,(03):97-98+101.
- [34] 宋振骐,卢国志,夏洪春. 一种计算采场支承压力分布的新算法[J]. 山东科技大学学报(自然科学版),2006,(01):1-4.
- [35] 邵广印,阚磊,马海峰,等. 综采工作面支承压力分布特征研究 [J]. 现代矿业,2011,(10):84-85.
- [36] 李伟利,张学会. 动载作用下采场前支承压力分布特征研究 [J]. 煤炭技术,2010,(12):62-64.
- [37] 徐文全. 采动空间围岩应力监测技术及应用研究[D].中国矿业大学,2012.

- [38] 钱鸣高,缪协兴.采动岩体力学一门新的应用力学研究分支学科[J].科技导报维普资讯
<http://www.cqvip.com> 29-31.
- [39] 倪兴华.地应力研究与应用[D].煤体工业出版社,北京,2006.
- [40] 何学秋,陈庆禄.电磁辐射法预测突出危险性技术及便携式装备的研究[Z].国家重点科技项目(攻关)计划了专题工作报告,徐州:中国矿业大学,2000.
- [41] 王恩元,何学秋,刘贞堂,等.煤岩动力灾害电磁辐射监测仪及其应用[J].煤炭学报,2003,28(4):366-369.
- [42] 钱建生,刘富强,陈治国,等.煤与瓦斯突出电磁辐射监测仪[J].中国矿业大学学报,2000,29(2):167—169.
- [43] 魏建平.矿井煤岩动力灾害电磁辐射预警机理及其应用研究[D].徐州:中国矿业大学,2004.
- [44] 王恩元,何学秋,刘贞堂,等.受载岩石电磁辐射特性及其应用研究[J].岩石力学与工程学报,2002,21(10): 1473-1477.
- [45] 何学秋,王恩元,聂白胜,等.煤岩流变电磁动力学.北京:科学出版社,2003.
- [46] 钱书清,张以勤,曹惠馨.花岗岩洞爆破时伴随岩石破裂的电磁辐射.地球物理学报[J] 1983,
26(增刊):887-893.
- [47] 钱书清,张以勤,曹惠馨,等.岩石破裂时产生电磁脉冲的观测与研究[J].地震学报,1986,8(3):301-308.
- [48] 徐为民,童莞生,土白成.单轴压缩下岩样破坏过程中的发光现象[J].地震,1984,(1): 8-10.
- [49] 徐为民,童莞生,吴培稚.岩石破裂过程中电磁辐射的实验研究[J].地球物理学报,1985,28(2):181—190.
- [50] 李均之,曹明,毛浦森,等.岩石压缩试验与震前电磁波辐射的研究[J].北京工业大学学报, 1982,8(4):47-53.
- [51] 李均之,夏雅琴,沈壮.岩石破裂辐射电磁波实验研究与地震预报[C].见:震前电磁波观测与实验研究文集,北京:地震出版社,1989,147-152.
- [52] 孙正江,土丽华,高宏.岩石标本破裂时的电磁辐射和光发射[J].地球物理学报,1986,29(5):491-495.
- [53] Frid V.. Rockburst hazard forecast by electromagnetic radiation excited by rock fracture[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1997, 30(4): 229-236.
- [54] Frid V.. Electromagnetic radiation method for rock and gas outburst forecast[J]. Journal of Applied Geophysics, 1997, 38(2): 97-104.
- [55] V. I. Frid, A.N. Shabarov, V.H. Proskuryakov, et al. Formation of electromagnetic radiation in coal stratum[J]. J. Mining Science, 1992, 28(2): 139-145.

- [56] 何学秋,刘明举.含瓦斯煤岩破坏电磁动力学[M].徐州:中国矿业大学出版社,1995.
- [57] Xueqiu He, Enyuan Wang, Zhentang Liu. The general charastics of electromagnetic radiation during coal fracture and its application in outburst prediction[C]. In: Proceedings of the 8th U.S. Mine Ventilation Symposium, Rolla, Missouri, June 11-17, 1999, 81-84.
- [58] 王恩元,何学秋,刘贞堂,等.煤岩变形破裂的电磁辐射规律及其应用研究[J].中国安全科学学报,2000,10(2):35-39.
- [59] 窦林名,何学秋,王恩元,等.由煤岩变形冲击破坏所产生的电磁辐射[J].清华大学学报(自然科学版),2001,41(12):86-88.
- [60] 王恩元,何学秋,聂白胜,等.电磁辐射法预测煤与瓦斯突出原理[J].中国矿业大学学报,2000,29(3):225-229.
- [61] 窦林名,曹其伟,何学秋,等.冲击矿压危险的电磁辐射监测技术[J].矿山压力与顶板管理,2002,N}4:89-91,98.
- [62] 王恩元.电磁辐射法监测煤与瓦斯突出危险性技术及其应用研究[博士后研究报告].徐州:中国矿业大学,1999.
- [63] 刘晓斐,王恩元,何学秋,等.回采工作面应力分布的电磁辐射规律[J].煤炭学报,200732(10):1019-1022.
- [64] 王恩元,贾慧霖,李忠辉,等.用电磁辐射法监测预报矿山采空区顶板稳定性[J].煤炭学报,2006,(01):16-19.
- [65] 何学秋,王恩元,张仁贵,等.利用煤岩破坏电磁辐射特性测定煤岩卸压带的研究[J].煤矿安全,1996,(02):17-19.
- [66] 刘长友,黄炳香,孟祥军,等.超长孤岛综放工作面支承压力分布规律研究[J].岩石力学与工程学报,2007,(S1):2761-2766.
- [67] 司荣军,王春秋,谭云亮.采场支承压力分布规律的数值模拟研究[J].岩土力学,2007,(02):351-354.
- [68] 赵同彬,张洪海,陈云娟,等.支承压力分布演化规律及对煤岩体破坏的影响[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2010,(03):420-423.
- [69] 王振,胡千庭,文光才,等.采动应力场分布特征及其对煤岩瓦斯动力灾害的控制作用分析[J].煤炭学报,2011,(04):623-627.
- [70] Stanton A. 1896. Wilhelm Conrad Röntgen on a new kind of rays: translation of a paper read before the Würzburg Physical and Medical Society, 1895. Nature, 53(1896): 274-276.
- [71] Radon, J., 1917. Über die bestimmung von funktionen durch ihre integralwerte lange gewisser Mannig faltig keiten. Ber. Verh. Saechs. Akad. Wiss, 69:262-267.
- [72] Dines K A, Lytle R J. 1979. Computerized geophysical tomography. Proceedings of the IEEE, 67(7): 1065-1073,1979.11390.

- [73] 窦林名,蔡武,巩思园,韩荣军,刘军. 冲击危险性动态预测的震动波 CT 技术研究[J]. 煤炭学报,2014,(02):238-244.
- [74] Lurka A. 2008. Location of high seismic activity zones and seismic hazard assessment in Zabrze Bielszowice coal mine using passive tomography. *Journal of China University of Mining and Technology*, 18(2): 177-181.
- [75] Friedel M J, Scott D F, Williams T J. 1997. Temporal imaging of mine-induced stress change using seismic tomography. *Engineering Geology*, 46(2): 131-141.
- [76] 王书文,毛德兵,杜涛涛,等. 基于地震 CT 技术的冲击地压危险性评价模型[J]. 煤炭学报,2012,(S1):1-6.
- [77] Luxbacher K D, Westman E, Swanson P, et al. 2008. Three-dimensional time-lapse velocity tomography of an underground longwall panel. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 45(4): 478-485.
- [78] Hosseini N, Oraee K, Shahriar K, et al. 2013. Studying the stress redistribution around the longwall mining panel using passive seismic velocity tomography and geostatistical estimation. *Arabian Journal of Geosciences*, 6(5): 1407-1416.
- [79] 岳建华, 刘树才. 矿井直流电法勘探[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2000.
- [80] 刘盛东, 刘士刚, 张平松. 网络并行电法仪与稳态电法勘探方向[J]. 中国科技成果, 2007, 24(7): 31-36.
- [81] Матющечкин 等. Методические указания по шахтной электроразведке малоамплитудных нарушений угольных пластов[M]. Ленинград, ВНИИ, 1986.
- [82] Чирка ДВ, Скворцов АФ. 西顿涅茨煤田一些煤矿中突水预报的地球物理方法[M]. 左德坤译. 国外煤田地质, 1986.
- [83] Дзис И Д. 利用点源场梯度剖面法预测煤层中的断层[M]. 左德坤译. 国外煤田地质, 1988.
- [84] Под редакцией. Электроразведка Методом Сопротивлений[M]. Издательство Московского Университета, 1994.
- [85] Грачев АА. 利用电法勘探预测煤矿区地球动力现象的可能性[J]. 卢冰译. О-тествен. Геол, 1995, (12): 46-50
- [86] Csokas J. Detection of tectonic disturbances associated with a coal bed by geoelectrical measurements in mine drifts[J]. *Hungarian Academie of Science*, 1974(9): 111-119.
- [87] Csokas J, Dobroka M, Gyulai A. Geoelectric determination of quality changes and tectonic disturbances in coal deposits[J]. *Geophys, Prosp*, 1986, 34: 1067-1081

- [88] Breizkt M, Dresen L, Csokas J et al. Parameter estimation and fault detection by three-component seismic and geoelectrical surveys in a coal mine[J]. Geophy, Prosp, 1987(35): 832-863
- [89] Gyulai A. Parameter-sensitivity of underground geoelectric measurements[M]. Geophysical Transactions, 1990.
- [90] Molin IN, Shevnin VA, Pervago. EV. Vector measurements in resistivity prospecting[M]. Report, presented at Annual EAGE conference, Vienna, Austria, 1994.
- [91] Molin IN. Electrical prospecting by resistivity method[M]. MSU edition, Moscow, Russian, 1994.
- [92] Molin IN, Shevnin VA, Pervago EV et al. Distortion of VES data caused by subsurface inhomogeneities[M]. Report, presented at EAEG 56th Annual Meeting, Austria, Vienna, 1994.
- [93] Sasaki Y, Koichi Matsuo. Surface-to-tunnel resistivity tomography at the Kamaishi mine[M]. BUTSURI-TANSA, 1993.
- [94] 刘天放, 李志聃. 矿井地球物理勘探[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1993.
- [95] 储绍良. 矿井物探应用[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1996.
- [96] 钟世航. 工程物探的现状与发展[C]. 中国地球物理学会学术年会, 1996.
- [97] 李学军. 煤矿井下定点源梯度法超前探测实验研究[J]. 煤田地质与勘探, 1992, 20(4): 59-62.
- [98] 岳建华, 李志聃. 煤矿井下直流层测深方法与原理[J]. 煤炭学报, 1994(4): 422-429.
- [99] 岳建华, 刘树才, 于景村. 煤矿井下微重力测量方法与应用[J]. 中国煤炭地质, 1995(4): 93-96.
- [100] 吕绍林. 地球物理方法预测瓦斯突出研究综述[J]. 焦作工学院学报, 1997, 16(2): 95-100.
- [101] 于景, 刘志新, 岳建华, 刘树才. 煤矿深部开采中的地球物理技术现状及展望[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(2): 586-591.
- [102] 张向阳. 动压影响下大巷围岩变形机理与卸压控制研究[D]. 安徽理工大学, 2007.
- [103] 陈鹏. 煤与瓦斯突出区域危险性的直流电法响应及应用研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2013.
- [104] 彭永伟. 高强度开采煤体采动裂隙场演化及其与瓦斯流动场耦合作用研究[D]. 煤炭科学研究总院, 2008.

作者简介

一、基本情况

姓名：许昭勇 性别：男 民族：汉 出生年月：1990-08-18 籍贯：山东省邹城市

2009-09—2013-07 烟台大学土木工程学院土木工程学士；

2014-09—2017-06 中国矿业大学安全工程学院安全科学与工程硕士

二、获奖情况

2016--2017 研究生二等学业奖学金

2015--2016 研究生一等学业奖学金

2014--2015 研究生一等学业奖学金

三、论文发表

1. 含水量对煤岩电阻率特征的影响[J]. 工矿自动化, 2015,(8):72-75. (第一作者)
2. 煤层水力压裂过程“三场”演化规律特征[J]. 工矿自动化, 2016,(3):39-43. (第一作者)
3. 煤体单轴压缩过程电磁辐射时-频特征[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2016,(10):1051-1056. (第四作者)
4. 含瓦斯型煤破坏临界慢化前兆特征研究[J]. 中国矿业大学学报, 2017,(1):1-7(第五作者)
5. Evaluation of coal seam hydraulic fracturing using the direct current method [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences,2015(6):230-239(第六作者)

四、研究项目

1. 高瓦斯硬煤层水力压裂网络并行电法响应及应用研究，中国博士后科学基金资助项目，编号：2014T70679，主要参与者；
2. 糯东煤矿“三软”低透煤层注抽联动高效抽采理论与技术研究，永煤集团黔西南糯东煤矿项目，主要参与者。

学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文《基于直流电法的采动围岩应力分布探测研究》，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。

学位论文作者签名：

年 月 日

学位论文数据集

关键词*	密级*	中图分类号*	UDC	论文资助
应力分布；直流电法；视电阻率；探测	公开	TD76	622	国家自然科学基金 江苏高校优势学科 建设工程资助项目 “十三五”国家重点 研发计划中国矿业 大学第七批优秀 创新团队建设
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	工学	硕士	
论文题名*		并列题名*	论文语种*	
基于直流电法的采动围岩应力分布探测研究		Study on Stress Distribution of Mining Surrounding Rock Based on Direct Current Method	中文	
作者姓名*	许昭勇	学号*	TS14120053	
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	221008	
学科专业*	研究方向*	学制*	学位授予年*	
安全科学与工程	安全监测监控	3 年	2017	
论文提交日期*		2017.05		
导师姓名*	王恩元	职称*	教授	
评阅人		答辩委员会主席*	答辩委员会成员	
张兴华、翟成		蒋曙光	翟成、李忠辉、李伟、戚绪尧、王和堂	
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*		71		
注: 共 33 项, 其中带*为必填数据, 共 22 项。				