

构造复杂矿区地应力分布规律反演分析

孔令猛, 赵南南, 曹东方, 李 强

山东济矿鲁能煤电股份有限公司阳城分公司, 山东 济宁

收稿日期: 2025年8月23日; 录用日期: 2025年9月13日; 发布日期: 2025年9月25日

摘 要

为研究构造复杂区域地应力分布规律, 采用应力解除法对矿区有限点进行地应力测量, 基于各个测点地应力实测结果, 利用数值模拟软件对矿区地应力分布规律进行反演分析。研究表明: 阳城矿区地应力与其地质构造特征有着紧密的联系, 地应力和矿压显现对煤矿开采具有较大影响; 相对构造应力而言, 垂直应力对井下巷道的破坏作用不明显, 水平方向的构造应力是巷道失稳变形主要力源。

关键词

地应力, 应力解除法, 应力分布, 反演分析, 现场实测

Inversion Analysis of Crustal Stress Distribution Law in Gully Geomorphic Mining Area

Lingmeng Kong, Nannan Zhao, Dongfang Cao, Qiang Li

Yangcheng Branch Company, Shandong Jikuang Luneng Coal Power Co., Ltd., Jining Shandong

Received: Aug. 23rd, 2025; accepted: Sep. 13th, 2025; published: Sep. 25th, 2025

Abstract

To study the distribution pattern of geostress in complex structural areas, the stress relief method was employed to measure geostress at a limited number of points in the mining area. Based on the measured results of geostress at each measuring point, numerical simulation software was used to perform an inversion analysis on the distribution pattern of geostress in the mining area. The research indicates that the geostress in the Yangcheng mining area is closely related to its geological structural characteristics, and both geostress and ground pressure manifestation have a significant impact on coal mining. Compared to structural stress, vertical stress has an insignificant destructive

effect on underground tunnels, while horizontal structural stress is the main force source causing tunnel instability and deformation.

Keywords

Crustal Stress, Stress Relief Method, Stress Distribution, Back Analysis, Field Measurement

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 前言

对矿山开采而言,地应力是引起采矿工程及巷道围岩变形、破坏及动力灾害现象的根本作用力,在诸多影响采矿工程及巷道围岩稳定性的因素中,地应力是最主要和最根本的因素之一,准确的地应力资料是进行采矿工程设计科学决策的必要前提。

地应力测量从 20 世纪 30 年代发展至今,形成应力恢复法、应力解除法、水压致裂法、声发射法等许多测量方法。目前,普遍应用的方法是应力解除法和水压致裂法。康丽芳等[1]对比测试多种评价方法,明确了煤层气的地应力计算模型,同时分析了地应力特征对煤层气产能的影响;崔松等[2]基于深部岩体和浅部岩体地应力场的差异性,对比水力压裂法和表面应力解除法的优势,结合数值模拟方法,对偏转前后地应力场演化分别进行了分析;赵勳等[3]在考虑层状岩体结构特征的基础上,结合地应力实测数据,对岩体地应力场的分布特征进行了反演分析,分析了各向异性对地应力场的影响;宋永亮等[4]结合现场情况,改进地应力的测量装置,对铁矿地应力进行了测量并获得了矿区地应力场的分布规律;侯俊花等[5]针对复杂地应力场条件下的岩层结构特征,通过改进钻孔工艺,进行了复杂地应力场下井筒的钻进;纪新波等[6]通过注浆加固机理,分析了巷道在复杂地应力和采空区因素叠加条件下的变形机制;韩志勇等[7]采用 PFC 数值模拟程序,建立煤体水力压裂流固耦合模型,研究了各向地应力差和不同注水流量条件下,水力压裂过程裂隙扩展发育规律;张军明等[8]采用应力解除法对建庄煤矿地应力分布规律进行了系统研究,并对其影响因素进行了分析,探讨了地应力分布特征。

此时,对矿区进行有限点数的地应力测量,对整个矿区来说,由于测试点数有限,难以全面反映全矿区的地应力分布规律,但进行全矿区地应力测量耗资巨大,为此论文基于有限个地应力测点的实测结果,对矿区地应力分布规律进行反演分析,并分析矿区的地应力分布特征。

2. 地应力测量

2.1. 测量仪器

采用的测量方法是应力解除法,应用的 DY3B-4 型空心包体应变计是在预制的空心环氧树脂外圆柱表面上粘贴 3 组应变花传感器,其主要技术参数与尺寸如下:内径: $30.5 \text{ mm} \pm 0.1$;应变片位置直径: $32.5 \text{ mm} \pm 0.1$;外径: $34.5 \text{ mm} \pm 0.1$;有效长度 $> 200 \text{ mm}$;总长度 415 mm ;弹模: $2600 \sim 3200 \text{ MPa}$;泊松比: $0.4 \sim 0.42$ 。

2.2. 测量方法

在矿井六采区及八采区大巷内布置测试钻孔,测试过程共布置 8 个测点,进行原岩应力解除测量。各钻孔钻进过程取芯较完整,QRD 可达 90%,测试过程共布置 8 个测点(如图 1 所示)。

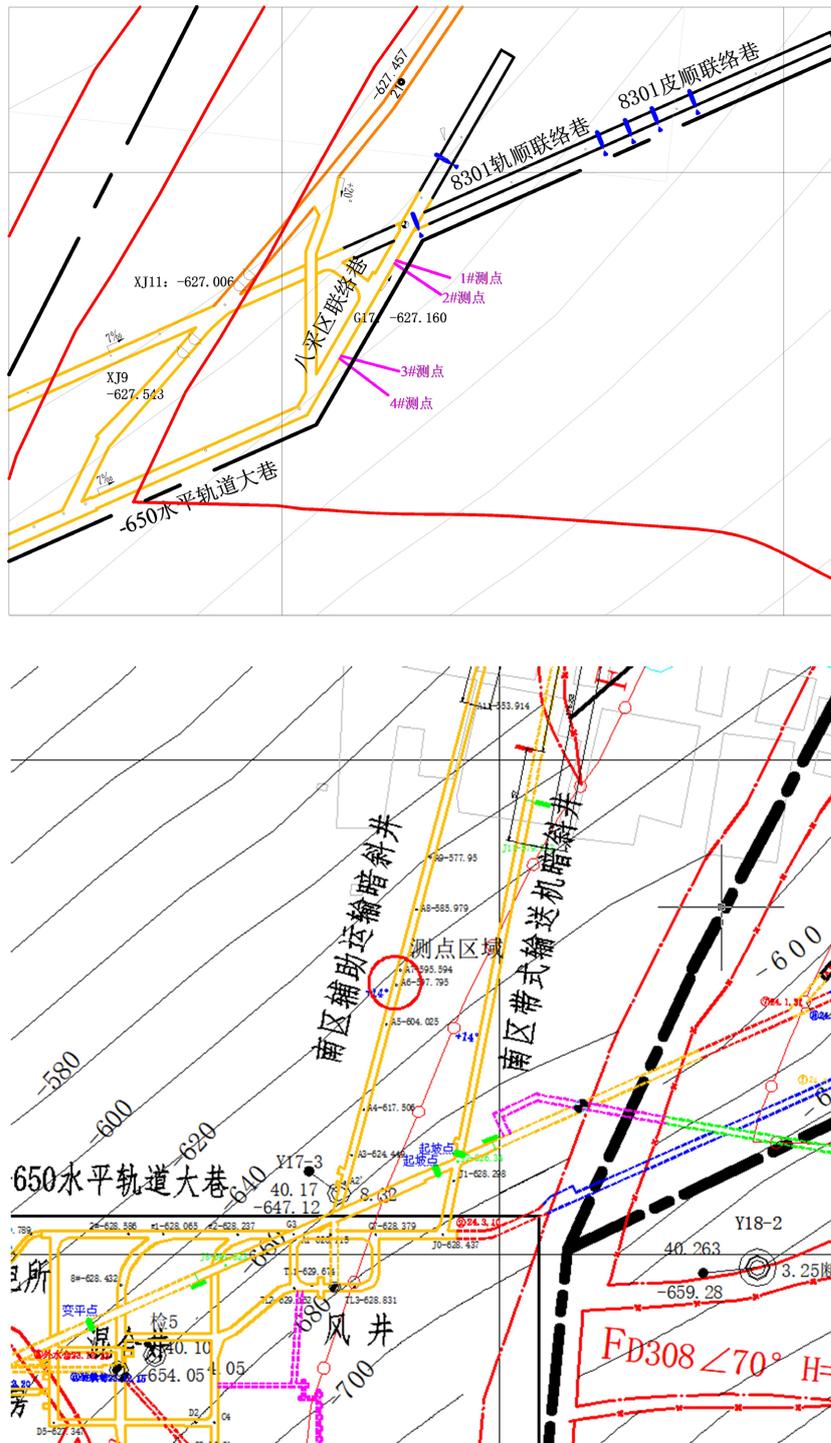


Figure 1. Layout of boreholes for on-site stress testing
图 1. 现场地应力测试钻孔布置

2.3. 实测结果

根据实测资料、测点岩石力学性质参数及钻孔的几何参数等，分析计算出测点地应力分量及主应力大小和方向，得到该区域原岩地应力结果如表 1。

Table 1. Main stress measurement results in mining area**表 1.** 矿区主应力测量结果

	最大主应力 σ_1		中间主应力 σ_2		最小主应力 σ_3	
	数值/MPa	方位角/ $^\circ$	数值/MPa	方位角/ $^\circ$	数值/MPa	方位角/ $^\circ$
1	17.21	196.32	15.23	62.31	14.17	131.62
2	16.92	150.62	15.36	63.37	13.96	135.24
3	13.15	138.56	11.96	69.34	10.87	125.23
4	13.45	159.27	12.16	51.38	10.96	125.97
5	18.57	152.45	16.72	167.01	15.13	56.61
6	18.27	150.42	16.18	166.13	14.86	43.63
7	18.89	156.55	16.72	169.98	15.25	47.35
8	18.42	160.39	16.29	169.41	15.18	49.12

在量值上, 阳城分公司采区最大水平主应力 σ_H 与中间主应力 σ_h 的比值为 1.11~1.13, 最大水平主应力 σ_H 约为垂直主应力 σ_V 的 1.21~1.23 倍, 应力场特征基本呈现为 $\sigma_H > \sigma_h > \sigma_V$, 八采区地应力场最大主应力以水平应力为主, 垂直主应力为最小主应力。实测垂直主应力与单位面积上覆岩层的重量略有差值, 差异的存在与该区地层的倾向、构造运动、覆岩运动特征、煤层赋存情况以及巷道掘进影响有关, 总体上, 理论与实际吻合较好。

根据于学馥等对煤矿地应力研究成果: 最大主应力在 0~10 MPa 之间为低应力区; 10~18 MPa 之间为中等应力区; 18~30 MPa 之间为高应力区; 大于 30 MPa 为超高应力区。阳城分公司采区最大主应力为水平主应力在 13.15~18.89 MPa 之间, 因此阳城分公司属于中等及高应力区。

侧压系数是描述地应力场的物理量之一, 指的是水平主应力的平均值和垂直主应力的比值, 经过计算各个测点的侧压系数, 采区各个测点的侧压系数为 1.14~1.17, 侧压系数也表明采区地应力场以水平应力占主导。

2.4. 实测结果分析

区域内测量结果均显示构造应力较大; 垂直应力 σ_v 受构造断层及上覆岩层影响差异性明显; 最大主应力分布较为一致, 总体表现为与水平方向夹角较小, 大致呈南北走向, 即沿南北方向的水平挤压应力分量 P_y 较大, 其作用方向与大巷斜交, 因此水平地应力作用方向对大巷具有一定影响, 工作面巷道的施工中应重点加强侧帮支护。

3. 地应力场反演计算

利用 Surfer 软件、ANSYS 软件及 FLAC3d 软件进行计算分析, 模型尺寸为 8000 m × 5000 m。反演分析中选取自重应力作用、x 轴方向水平均匀挤压作用、y 轴方向水平均匀挤压作用、水平面内均匀剪切作用、竖直面内均匀剪切作用等五个因素作为模拟自重应力和地质构造作用对地应力产生的影响。根据模型各地层力学参数, 建立数值计算模型, 模型共划分成 823,281 个单元和 132,764 个节点。

地应力场计算结果与分析

对模型分别施加影响地应力的各单因素下的边界条件, 计算平衡后分别提取地应力实测点所在单元的 6 个应力分量, 由此得到测点地应力反演值。从对比结果来看, 反演结果与实测值耦合度较高, 因此反演结果具有参考价值, 根据上述参数计算煤层地应力分布情况, 如图 2 所示。

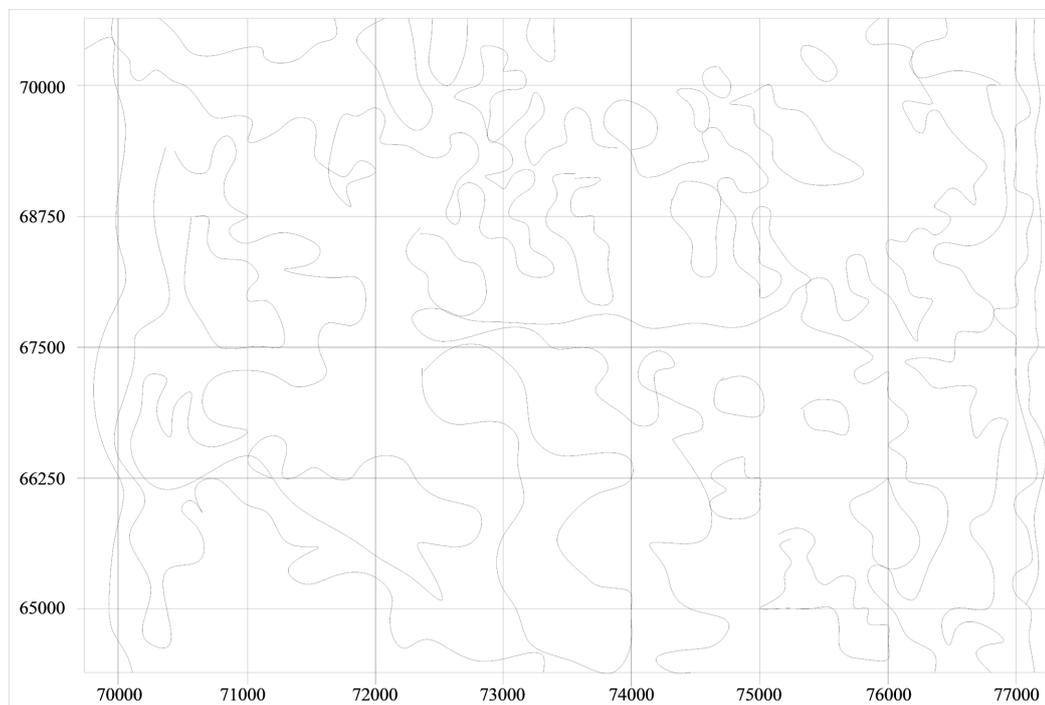


Figure 2. Horizontal stress contour of coal seam

图 2. 煤层水平应力等值线

根据应力等值线分布情况可以看出, σ_x 值平均为 16.86 MPa, 东部等值线数值高于西部地区; σ_y 值相对 σ_x 、 σ_z 值较大, 平均为 15.07 MPa, 整个矿区表现为南北方向的水平构造应力较大; σ_z 值平均 13.79 MPa, 中部区域较大, 但相对构造应力而言, 垂直应力对井下巷道的破坏作用不明显, 水平方向的构造应力将是巷道变形失稳的主要内应力。

4. 矿区地应力场分布规律

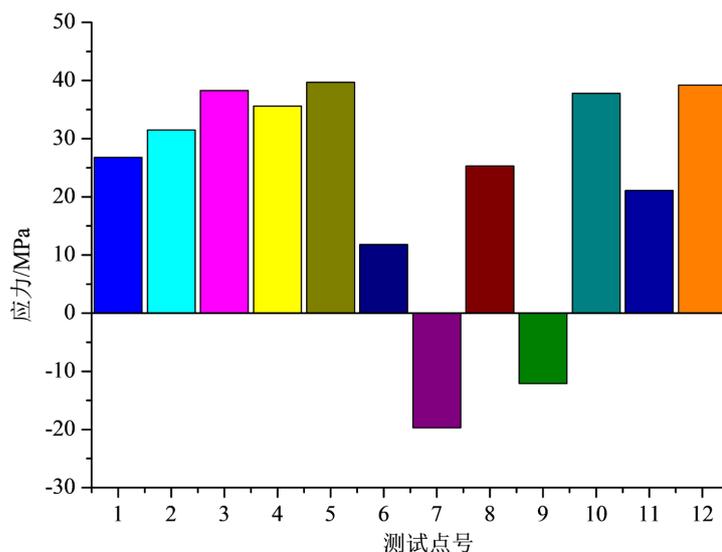


Figure 3. Distribution of maximum principal stress dip angle

图 3. 最大主应力倾角分布

矿区所有测点中最大主应力与水平面夹角均不大于 60° ，如图 3 所示，主应力最大值与水平面夹角平均值为 22.64° ，说明水平方向是区域最大主应力的方向，水平构造应力为该区域地应力场，与地球浅部的地壳运动通常以水平运动表现相符。

原岩应力场中的各应力分量有随深度增加呈现增大趋势，应力场不均匀性表现也较明显，即在高程在不同测点相差很小时，各应力分量的方向、大小及倾角却表现出较大差异，不均匀分布的地应力场反映出矿区在岩性、构造、岩体赋存的复杂及特殊性。矿区主应力与埋深之间的关系表现为，随埋深的增加，中间主应力、最大主应力和最小主应力均呈现增大趋势，但最小主应力、中间主应力相差不大。

5. 结论

1) 矿地应力与地质构造特征有着紧密的联系，由矿区当前实际地质构造走向分布，初步判定区域水平构造地应力显著。

2) 地应力测量结果和分析表明，区域内构造应力较大，最大主应力分布较为一致，大致呈南北走向。

3) 根据煤层应力等值线反演分布结果可以看出，整个矿区表现为水平构造应力较大，特别是东部地区相对突出。

参考文献

- [1] 康丽芳, 王振国, 王宇川, 等. 鄂尔多斯东缘神府区块深煤层地应力研究[J]. 石化技术, 2025, 32(7): 271-273.
- [2] 崔松, 王晓南, 丁勇, 等. 深部开采下应力偏转对地应力场演化规律影响[J]. 中国矿业, 2025, 34(S1): 402-407.
- [3] 赵勐, 钮新强, 颜天佑, 等. 考虑层状构造特征影响的岩体地应力场精细反演分析研究[J]. 岩土工程学报, 2025, 47(6): 1239-1248.
- [4] 宋永亮, 付吉顺, 王培涛, 等. 基于应力解除法的石碌铁矿地应力测量及分布规律研究[J]. 中国矿业, 2025, 34(8): 199-205.
- [5] 侯俊花. 复杂地应力条件下井筒掘进施工技术研究与应用[J]. 煤矿现代化, 2025, 34(4): 165-168.
- [6] 纪新波, 于静波, 李明远. 复杂地应力、采动影响下动态注浆固化技术的研究与应用[J]. 山东煤炭科技, 2025, 43(4): 6-9.
- [7] 韩志勇, 郑春山. 不同地应力和注水流量影响下水力压裂裂隙扩展规律研究[J]. 煤炭技术, 2025, 44(4): 154-158.
- [8] 张军明, 张文, 马壮, 等. 基于实测数据的建庄煤矿地应力分布规律与影响因素研究[J]. 煤炭技术, 2025, 44(4): 27-32.