

巴彦柴达木煤矿地应力测量及井田应力场特征分析

王亮¹, 李亚斌¹, 李应强¹, 李文帅¹, 张学峰¹, 兰天伟^{2,3}, 杨美明³

1. 中石化长城能源化工(内蒙古)有限公司, 内蒙古 鄂尔多斯 017010

2. 辽宁工程技术大学 鄂尔多斯研究院, 内蒙古 鄂尔多斯 017010

3. 辽宁工程技术大学 矿业学院, 辽宁 阜新 123000

DOI: 10.61369/SSSD.2026060012

摘 要 : 地应力是赋存在煤岩体内部的原生应力,是导致围岩变形、支护设计以及突水、冲击地压等灾害发生的重要影响因素。为明确巴彦柴达木煤矿井田应力分布特征,本文采用水压致裂法对2-2煤层顶底板进行了地应力测量。测试结果表明,水平最大主应力 σ_H 为25.03MPa,垂直应力 σ_v 为16.32MPa,水平最小主应力 σ_h 为19.11MPa,应力值满足 $\sigma_H > \sigma_v > \sigma_h$,这表明该井田2-2号煤层的地应力场类型为 σ_{Hv} 型,以最大水平主应力为控制的构造应力场类型。基于地质动力区划理论,通过构建地质构造模型,并应用“岩体应力状态分析系统”对井田岩体应力进行反演分析。井田被划分为高应力区、应力梯度区、正常应力区和低应力区,其中高应力区是冲击地压等动力灾害的高发区,而低应力区则适宜布置主要开拓巷道。研究成果为矿井开拓布局优化、采掘顺序规划以及矿压的分区防治提供了可靠的地质力学依据,对保障矿井安全高效建设具有重要的现实意义。

关 键 词 : 地应力; 构造应力; 应力分区; 构造应力场

In-situ Geostress Measurement and Stress Field Characteristics Analysis of Bayan Qaidam Coal Mine Field

Wang Liang¹, Li Yabin¹, Li Yingqiang¹, Li Wenshuai¹, Zhang Xuefeng¹, Lan Tianwei^{2,3}, Yang Meiming³

1. Sinopec Great Wall Energy and Chemical (Inner Mongolia) Co., Ltd., Erdos, Inner Mongolia 017010

2. Erdos Research Institute, Liaoning Technical University, Erdos, Inner Mongolia 017010

3. School of Mining, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000

Abstract : In-situ stress is the primary stress existing in coal and rock masses, and it is an important influencing factor leading to surrounding rock deformation, support design, and the occurrence of disasters such as water inrush and rock burst. To clarify the stress distribution characteristics of the coal mine field in Bayan Qaidam Coal Mine, the hydraulic fracturing method was adopted to measure the in-situ stress of the roof and floor of the 2-2 coal seam in this study. The test results show that the maximum horizontal principal stress (σ_H) is 25.03 MPa, the vertical stress (σ_v) is 16.32 MPa, and the minimum horizontal principal stress (σ_h) is 19.11 MPa, with the stress magnitude satisfying $\sigma_H > \sigma_v > \sigma_h$. This indicates that the in-situ stress field type of the 2-2 coal seam in the mine field is σ_{Hv} -type, a tectonic stress field dominated by the maximum horizontal principal stress. Based on the theory of geological dynamic zoning, a geological structure model was established, and the "Rock Mass Stress State Analysis System" was applied to conduct inversion analysis of the rock mass stress in the mine field. The mine field was divided into high-stress areas, stress gradient areas, normal-stress areas, and low-stress areas. Among them, high-stress areas are high-incidence areas for dynamic disasters such as rock burst, while low-stress areas are suitable for arranging main development roadways. The research results provide a reliable geomechanical basis for the optimization of mine development layout, the planning of mining sequence, and the zonal prevention and control of mine pressure, which have important practical significance for ensuring the safe and efficient construction of the mine.

Keywords : in-situ stress; tectonic stress; stress zoning; tectonic stress field

项目信息:

鄂尔多斯市科技“突围”工程“揭榜挂帅”重大项目(JB20251447);

鄂尔多斯市标志性创新团队项目(TD20240005);

鄂尔多斯市重点研发计划项目(YF20250274)。

作者简介: 王亮(1987—),男,陕西定边人,大学本科:工程师,主要从事煤层气开发方面的研究工作,E-mail:wang1912.nxn@sinopec.com。

引言

地应力是赋存在煤岩体内部的原生应力^[1-2]，由地壳板块之间的挤压、拉张等动力作用共同形成，是导致围岩变形、支护设计以及突水、冲击地压等灾害的发生重要影响因素。因此，通过地应力测量准确掌握井田内地应力的分布规律，是具有十分重要的意义。

国内煤矿地应力测量技术已形成多种体系，主要包括力学法、地球物理法和地质构造信息法等。近年来，小孔径水压致裂法因其快速、适用于深部巷道而得到广泛应用，在新汶矿区实现了1000 m以上深度的地应力快速测量，最大水平主应力可达42.1 MPa，验证了该方法在深部煤矿中的有效性。此外，水压致裂法^[3-5]在潞安、晋城等矿区的大面积实测也表明，水平主应力往往占优势，构造应力对应力场分布起主导作用。空心包体应力解除法^[6-9]和应力解除法^[10-12]等技术则在不同岩层条件下提供了可靠的三维应力张量求解手段，已在多座煤矿（如开滦赵各庄、梁宝寺等）实现了原位测量并用于支护优化。

针对巴彦柴达木煤矿受地质构造影响，可能导致应力场呈现水平主应力主导且方向受构造控制的特征。基于此，本文拟在巴彦柴达木煤矿井田开展水压致裂地应力测量，明确井田应力分布和分区特征，为矿井开拓布置优化、及开采方式优化方案防控提供科学依据，对区域新建矿井开采具有重要参考意义。

一、巴彦柴达木井田地质构造概况

鄂尔多斯盆地伊盟隆起东南缘，大地构造位置属中朝大陆板块鄂尔多斯断块内的伊陕单斜区，具体为东胜—靖边单斜构造的中部^[13-16]。井田内构造形态总体为一向南西倾斜的单斜构造，地层倾角约1°，构造复杂程度属简单类型。区内未发现对煤层有较大破坏作用的断层和明显的褶皱构造，仅发育有波状起伏的宽缓褶曲和少量小落差正断层。巴彦柴达木煤矿前期开采阶段构造纲要图，如图1所示。

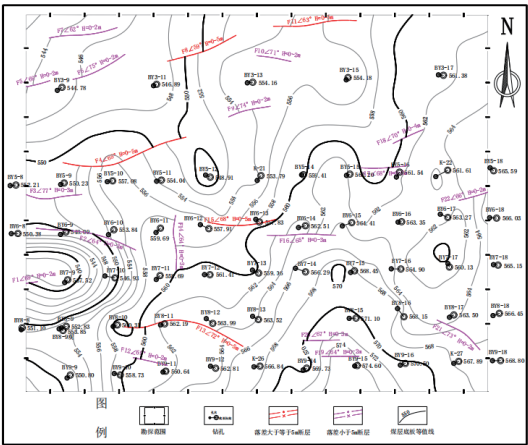


图1 构造纲要图

二、地应力测量与结果分析

（一）地应力测量

巴彦柴达木井田因属于前期准备阶段，无法开展井下实测，按照国家地应力测量规范（DB/T14-2018）要求，测试采用了水压致裂法，对采集仪器和测试系统进行了校正和试压，确保数据质量。测试目标是确定钻孔中最大、最小水平主应力的大小与方向^[17]，并获取岩层破裂压力、重张压力和岩石原位抗拉强度等参数。水压致裂法操作简便、可连续多点测试，适用于深孔地应力的直接测量。YGHF-2020型水压致裂法^[18]地应力测试系统

由高压泵站、便携式数据采集系统、控制系统、推拉开关、电子定向仪、封隔器、印模器及高压油管等组成。能适用Φ76mm、Φ91mm及Φ110mm等各种口径的钻孔，进行0~2000m深度地应力测量要求。所有压力传感器均经现场标定，确保数据准确可靠。

（二）测试结果分析

表1为巴彦柴达木煤矿2-2煤顶板697.10m和2-2煤底板721.15m处水压致裂地应力测量结果。可以看出，水平最大主应力σ_H为25.03MPa，垂直应力σ_v为16.32MPa，水平最小主应力σ_h为19.11MPa，应力值满足σ_H>σ_v>σ_h，这表明巴彦柴达木煤矿2-2号煤层的地应力场类型为σ_Hv型，以最大水平主应力σ_H为控制的构造应力场类型。

表1 水压致裂地应力测量

序 号	测段深 度 (m)	压裂参数 (MPa)						主应力值 (MPa)			破裂方向 (°)
		P _b 地面	P _r 地面	P _s 地面	P _w	P ₀	T	σ _H	σ _v	σ _h	
1	697.10	14.55	11.83	8.07	6.97	2.97	2.72	23.35	15.04	18.47	N69.2° E
2	721.15	15.87	13.51	9.11	7.21	3.21	2.36	25.03	16.32	19.11	N66.1° E

三、井田应力场特征分析

（一）构建顶板岩性数据库

通过整合矿井前期开采阶段范围内的地质钻孔的岩性记录煤层岩层信息，构建了2-2煤层顶板岩性分类与编码数据库，并将其成果转换为网格化数据模型。在此基础上，对顶板岩性的空间展布特征进行了系统分析。研究结果显示，2-2煤层顶板以砂质泥岩为主，局部可见中粒砂岩及粉砂岩等岩性类型的发育。

（二）建立岩体应力计算模型

基于区域板块构造格局与矿井前期开采阶段资料，开展多尺度构造解析，系统识别研究区内断层、褶皱等主要构造要素，并据此构建矿区构造模型。对构造边界及岩性界面进行批处理提取，形成结构化的空间可视化数据集。随后将该构造模型导入型，利用岩体应力状态分析系统^[19]，建立矿区三维地应力计算模型。针对不同岩性顶板及具有差异性断距的断层单元，通过弹性模量、泊松比等参数转换确定其等效力学特征，以保证模型力学

属性的准确表征。模型范围覆盖了已进行三维地震勘探的区域，所建立的应力计算模型尺寸为长5km、宽4km，面积20km²。

（三）构造应力划分

基于水压致裂试验获得的地应力参数，对巴彦柴达木煤矿2-2煤层开展了应力场反演，进而获取矿井前期开采阶段范围内最大主应力、最小主应力及剪应力的空间分布格局。反演计算结果显示，该煤层最大水平主应力整体处于21.5 ~ 29.5MPa区间。依据应力场反演生成的应力等值线成果，对井田进行应力分区：应力集中系数 $k > 1.2$ （27.5 ~ 29.5MPa）范围界定为高应力区； $1 < k \leq 1.2$ （25.5 ~ 27.5MPa）划分为梯度应力区； $k < 0.8$ （21.5 ~ 23.5MPa）区域定义为低应力区； $0.8 < k \leq 1$ （23.5 ~ 25.5MPa）区段则为正常应力区。上述分区为后续巷道布置与冲击地压风险评价提供了基础依据。巴彦柴达木煤矿2-2煤层构造应力区划分，如图2所示。

图2 巴彦柴达木煤矿2-2煤层构造应力区划分

(1) 低应力区域：井田前期开采阶段内共2个区域，位于该井田前期开采阶段的中、东北部，2-2号煤层水平最大主应力值为21.5 ~ 23.5MPa，占井田前期开采阶段面积约为12.6%。

(2) 应力正常区域：位于该井田前期开采阶段的西北、东、西南部。2-2煤层水平最大主应力值为23.5 ~ 25.5MPa，占井田前期开采阶段面积约为62.4%。

(3) 应力梯度区域：应力梯度区域形成的主要原因是，位于构造过渡带，应力变化剧烈，受地层起伏控制。井田前期开采阶段内共3个区域，位于该井田前期开采阶段的西南、北、东南部。2-2煤层水平最大主应力值为25.5 ~ 27.5MPa，占井田前期开采阶段面积约为17.5%。

(4) 高应力区域：高应力区域形成的主要原因是，断裂密集区及背斜轴部，局部应力集中。井田前期开采阶段内共2个区域，位

于该井田前期开采阶段的西南、西部。2-2煤层水平最大主应力值为27.5 ~ 29.5MPa，占井田前期开采阶段面积约为7.5%

（四）不同构造应力区的工程影响分析

不同构造应力区内，岩体的力学行为与能量状态存在显著差异，对采掘工程的影响也各不相同。

(1) 高应力区：岩石承受着较大的切应力作用，部分岩体接近极限平衡状态。当受到采掘扰动时，岩体内弹性能易发生瞬时释放，导致巷道顶板垮落和底鼓等强烈矿压显现，是冲击地压等动力灾害的高发区。

(2) 应力梯度区：应力和变形模量变化剧烈，岩石内部微裂隙发育，体积发生膨胀。该区域地质构造相对复杂，是应力传递和能量迁移的关键通道，开采难度增加，易诱发次生应力集中。

(3) 低应力区：岩体内粘聚力趋于削弱，强度明显降低，但能量不易积聚。该区域岩体受构造应力影响小，是井下最为安全的工程空间，适宜布置主要开拓巷道和作为采掘接替的缓冲区

四、结论

(1) 巴彦柴达木煤矿2-2号煤层属于以最大水平主应力为控制的构造应力场类型。2-2煤层最大水平主应力为29.5MPa，方向为N69.2° E。

(2) 巴彦柴达木煤矿2-2煤层的最大水平主应力值为21.5 ~ 29.5MPa，分为低应力区、应力正常区、应力梯度区及高应力区4个应力区，4个应力区分别占井田面积的12.6%、62.4%、17.5%和7.5%。

(3) 构造应力区划结果为矿井开拓布局优化、采掘顺序规划以及矿压的分区、分级防治提供了直接、可靠的地质力学依据，对保障矿井安全高效建设具有重要的现实意义。

参考文献

- [1] 康红普. 我国煤矿巷道围岩控制技术70年及展望[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(01): 1-30.
- [2] 杨科, 郭鹏慧, 袁亮, 等. 深部开采煤矿典型动力灾害孕灾主控因素与机制研究进展[J]. 煤炭学报, 2025, 50(07): 3466-3487.
- [3] 何杰, 吴拥政, 程蓬, 等. 阳泉矿区主采煤层地应力分布规律实测研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2023, 40(06): 1191-1200.
- [4] 杨跃辉, 孙东生, 秦向辉, 等. 基于测试系统柔度分析的水压致裂法确定最大水平主应力误差分析与讨论[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(S1): 3385-3396.
- [5] 高桂云, 王成虎, 刘冀昆, 等. 倾斜钻孔三维地应力张量反演方法及其应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(S2): 3700-3709.
- [6] 王炯, 姜健, 张正俊, 等. 星村矿深部采区地应力分布特征及与地质构造关系研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2019, 36(06): 1240-1246.
- [7] 张重远, 吴满路, 廖椿庭. 金川三矿地应力测量及应力状态特征研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(11): 3254-3260.
- [8] 王炯, 冯正浩, 孟志刚, 等. 红阳矿区地应力测量及其数值分析研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2017, 34(01): 134-140.
- [9] 荣海, 韩永亮, 张宏伟, 等. 红庆梁煤矿地应力场特征及巷道稳定性分析[J]. 煤田地质与勘探, 2020, 48(05): 144-151.
- [10] 郭德勇, 揣筱升, 张铁岗, 等. 首山一矿深部地应力分布规律及影响因素[J]. 煤炭学报, 2024, 49(05): 2360-2375.
- [11] 张剑, 康红普, 刘爱卿, 等. 山西西山矿区井下地应力场分布规律[J]. 煤炭学报, 2020, 45(12): 4006-4016. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2020.1605.
- [12] 康红普, 伊丙鼎, 高富强, 等. 中国煤矿井下地应力数据库及地应力分布规律[J]. 煤炭学报, 2019, 44(01): 23-33.
- [13] 李美芬, 马丹, 李磊, 等. 鄂尔多斯盆地东胜煤田侏罗系煤中元素地球化学特征及其古环境意义[J]. 地质学报, 2024, 98(08): 2409-2423.
- [14] 杜佳, 朱光辉, 李勇, 等. 鄂尔多斯盆地致密砂岩气藏勘探开发挑战与技术对策——以临兴——神府气田为例[J]. 天然气工业, 2022, 42(01): 114-124.
- [15] 任战利, 于强, 崔军平, 等. 鄂尔多斯盆地热演化史及其对油气的控制作用[J]. 地学前缘, 2017, 24(03): 137-148.
- [16] 王玥, 郭彦如, 张延玲, 等. 鄂尔多斯盆地东北部山西组层序格架下的砂体成因类型、构型及分布[J]. 岩性油气藏, 2018, 30(03): 80-91.
- [17] 董海清, 兰天伟, 袁永年, 等. 利民煤矿井田地应力场反演及分区特征[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(S2): 105-110.
- [18] 付俊, 蔡君, 周罕, 等. 拉拉铜矿深部地应力场特征及岩爆预测分析[J]. 有色金属(矿山部分), 2024, 76(02): 53-59.
- [19] 张宏伟, 韩军, 宋卫华, 等. 地质动力区划[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2009: 151-189.