

煤与煤系气地质与勘查

## 首山一矿深部地应力分布规律及影响因素

郭德勇<sup>1</sup>, 揣筱升<sup>1</sup>, 张铁岗<sup>1,2</sup>, 郭明生<sup>2</sup>

(1. 中国矿业大学(北京) 应急管理与安全工程学院, 北京 100083; 2. 中国平煤神马能源化工集团有限责任公司, 河南 平顶山 467000)

**摘要:**为探讨平顶山首山一矿深部地应力分布规律及其影响因素, 基于矿井实测地应力数据, 运用构造物理学、岩石力学和数值模拟方法, 研究了测点地应力类型、大小和方向分布规律, 反演了地应力场分布特征, 分析了埋深、岩性和地质构造对地应力的影响, 确定了影响地应力分布的主控因素。研究表明: 多元回归反演分析法获得的地应力计算值与实测值吻合, 相对误差小于20%, 结果可靠。矿井煤岩体处于三维压应力状态, 煤层主应力关系为  $S_H > S_V > S_h$ , 地应力由矿井北部向南部呈现先增大后减小再增大的变化趋势, 地应力为28~44 MPa, 属于高应力水平, 地应力方向为NEE向。埋深影响地应力大小和类型, 随埋深增加主应力增大, 应力场类型向准静水压力场过渡; 岩性与地应力密切相关, 从泥岩到砂岩或灰岩, 地应力增大, 弹性模量越大地应力越大, 地层岩性的差异造成地应力大小离散分布、应力方向偏转角不超过10°; 矿井地应力与埋深、弹性模量的关系可表示为  $\sigma_H = 0.035 0H + 0.468 1E - 8.551 3$ 。地质构造是影响首山一矿地应力分布的主控因素, 褶皱形态控制地应力的水平应力分布, 向斜内弧应力值大于背斜内弧, 且褶皱弯曲程度越大, 其内弧地应力越大, 应力梯度越大; 断层带内应力降低、断层尖灭端应力集中, 地应力方向沿着断层走向偏转, 与断层走向夹角越大, 应力方向偏转角越大; 断层切割复式褶皱时, 断层与向斜构造组合区应力值大于断层与背斜构造组合区, 且断褶构造组合造成地应力方向分布紊乱。

**关键词:**地应力测量; 应力解除法; 构造物理; 首山一矿

中图分类号: TD311 文献标志码: A 文章编号: 0253-9993(2024)05-2360-16

## Distribution pattern and influencing factors of in-situ stress for deep levels in Shoushan No.1 Coal Mine

GUO Deyong<sup>1</sup>, CHUAI Xiaosheng<sup>1</sup>, ZHANG Tiegang<sup>1,2</sup>, GUO Mingsheng<sup>2</sup>

(1. School of Emergency Management and Safety Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China; 2. China Pingmei Shenma Energy and Chemical Group Co., Ltd., Pingdingshan 467000, China)

**Abstract:** To investigate the distribution pattern and influencing factors of in-situ stress for deep levels in the Shoushan No.1 Mine, according to the measured in-situ stress data of the mine, the tectonophysics and rock mechanics and numerical simulation methods were applied to study the type, magnitude and direction distribution pattern of in-situ stress. The distribution characteristics of in-situ stress field was simulated. The effect of buried depth, lithology and geological structure on the in-situ stress distribution was analyzed. The main factor of in-situ stress distribution was determined. The research shows that the in-situ stress values obtained by the multiple regression analysis of inversion method are consistent

收稿日期: 2023-12-03 修回日期: 2023-12-28 责任编辑: 韩晋平 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2023.1646

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(41430640); 国家自然科学基金联合基金重点资助项目(U1704242)

作者简介: 郭德勇(1964—), 男, 河南焦作人, 教授, 博士生导师。Tel: 010-62339669, E-mail: kjkfg@cumtb.edu.cn

引用格式: 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(5): 2360-2375.

GUO Deyong, CHUAI Xiaosheng, ZHANG Tiegang, et al. Distribution pattern and influencing factors of in-situ stress for deep levels in Shoushan No.1 Coal Mine[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(5): 2360-2375.



移动阅读

with the measured values. The relative error is less than 20% and the results are reliable. The coal and rock mass of mine is in a state of three-dimensional compressive stress. The principal stresses relation of coal seam is  $S_H > S_V > S_h$ . The in-situ stress increases firstly, then decreases and finally increases from the north to the south of the mine. The magnitude of in-situ stress is 28–44 MPa and belongs to the high stress level. The in-situ stress direction is NEE. The buried depth controls the magnitude and type distribution of the in-situ stress. With the increase of buried depth, the principal stress is increasing and the stress field type has the changing tendency from the dynamic stress field to quasi-hydrostatic pressure field. The lithology has a closely relationship with the in-situ stress. From mudstone to sandstone or limestone, the in-situ stress is increasing. The larger the elasticity module is, the higher the in-situ stress is. The difference of stratum lithology causes the discrete distribution of in-situ stress and the deflection angle of in-situ stress direction is less than  $10^\circ$ . The relation between the in-situ stress and the buried depth and the elasticity modulus is expressed as  $\sigma_H=0.035 0H+0.468 1E-8.551 3$  in the mine. The geological structure is the main controlling factor of in-situ stress in the mine. The fold shape controls the horizontal stress distribution of the in-situ stress. The in-situ stress of the syncline inner arc is more than that of the anticline inner arc. With the increase of the fold crook degree, the in-situ stress of inner arc increases gradually, and its stress gradient increases gradually. The in-situ stress of fault zone is decreasing and the in-situ stress of the fault pinch-out side is greater. The in-situ stress direction deflects along the fault strike. The larger the angle between maximum horizontal principal stress and the fault strike is, the greater deflection angle of maximum horizontal principal stress direction is. The in-situ stress of the tectonic association zone of fault and syncline is more than that of the tectonic association of fault and anticline. The tectonic association causes the unidirectional distribution of the in-situ stress direction.

**Key words:** in-situ stress measurement; stress relief method; tectonophysics; Shoushan No.1 Coal Mine

随着煤矿开采深度增加,地质构造环境复杂且地应力急剧增大<sup>[1]</sup>。地应力是煤与瓦斯突出、冲击地压和巷道变形破坏的主要动力来源,尤其地应力的大小和方向决定了井下巷道的布置方式及煤岩动力灾害发生的类型与强度。然而目前仍无法精准确定地应力在三维空间中的分布规律及定量特征,主要原因在于地应力成因复杂且影响因素众多,各因素对地应力的作用不尽相同<sup>[2-3]</sup>。因此,定量分析地应力分布特征及影响因素对预防矿井动力灾害具有重要意义。

关于地应力的研究主要分为2个方面:一是通过应力解除法<sup>[4]</sup>、水压致裂法<sup>[5]</sup>、应力恢复法<sup>[6]</sup>和声发射法<sup>[7]</sup>等进行地应力实测,运用平面应力解析法计算测点地应力的大小和方向信息,进而获得地应力分布规律。相关学者<sup>[8-12]</sup>在潞安矿区、晋城矿区、平顶山矿区、西山矿区、鄂尔多斯矿区、巨野煤田、大同矿区和淮南矿区等广泛开展地应力测试工作,分析了地应力大小、方向和类型分布特征及主应力与侧压系数随埋深的变化规律;总结了我国煤矿矿区地应力场特征并建立了“中国煤矿井下地应力数据库”<sup>[13-15]</sup>。二是利用数值模拟进行地应力场区域反演分析,从而实现由“点”到“场”的定量研究,目前地应力场模拟方法主要包括<sup>[16-19]</sup>侧压系数法、边界载荷调整法、应力函数法、有限元数学模型回归分析法、神经网络法、遗传算法等,如余大军等<sup>[20]</sup>利用FLAC<sup>3D</sup>横观各向同性模型和各向同性模型提高了复杂地质条件下地应力场

的反演精度;李飞等<sup>[21]</sup>基于地应力稀少样本数据提出了GMDH神经网络算法;KHADEMIAN等<sup>[22]</sup>运用BEM-FEM3D局部与远场混合算法预测了Seymare坝区的地应力分布规律;ZHANG等<sup>[23]</sup>构建了基于遗传算法优化的反向传播神经网络算法的地应力预测模型。地应力的影响因素较多,目前主要围绕地质构造、地形条件、区域应力边界条件、水文地质条件、岩体性质、孔隙及流体压力等因素对地应力的影响展开研究<sup>[24-30]</sup>,如康红普等<sup>[31]</sup>分析了煤矿大型向斜及断层区地应力场分布特征;翁剑桥等<sup>[32]</sup>指出断层扰动带内地应力方向和大小发生显著变化;ZHOU等<sup>[33]</sup>获得了走滑断层构造组合区的地应力分布规律;LI等<sup>[34]</sup>通过开展岩石力学试验得到弹性模量与地应力大小呈正相关性。

上述研究主要从地应力实测分析、地应力场反演及单因素对地应力场的影响展开,然而地应力场反演精度有待进一步提高,且多因素对地应力的作用研究仍存在不足。因此,针对首山一矿开展地应力测试,运用构造物理学、岩石力学和数值模拟方法,定量分析矿井深部地应力分布规律,探讨埋深、岩性和地质构造对地应力的影响,以获取各因素及其综合作用下的地应力分布规律。研究成果对矿井巷道布置、支护设计优化及动力灾害防治具有重要参考价值。

## 1 矿井构造特征

首山一矿位于平顶山矿区东部,该区域属于秦岭—

大别山造山带北侧逆冲推覆构造系。矿区周围以大角度千米落差的襄郑断裂、郑县断裂、鲁叶断裂和洛岗断裂为界,形成了独特的板块隆起单元。矿区受轴向 NW 李口向斜控制,两翼次级褶皱发育,由北向南依次为襄郑背斜、灵武山向斜、白石山背斜、郭庄背斜、牛庄向斜和郝堂向斜等。矿区主要发育 NWW—NW、NNE—NE 向 2 组断裂构造,如锅底山断裂、白石沟—霍堰断裂等。自含煤地层形成以来,该区域主要经历了印支、燕山、喜山 3 期构造运动<sup>[35]</sup>。印支期在华北板块南缘产生 NS 向挤压作用,对矿区影响较小,区内几乎不发育 EW 向构造;早燕山期太平洋板块向华北板块俯冲形成 NW 向挤压作用,使矿区发育 NW—NWW 向走滑断层,如襄郑断裂;晚燕山期印度板块向北俯冲并形成 NE 向挤压作用,使矿区内部发育一系列 NWW—NW 向褶皱及 NW 向压剪性和 NE

向张剪性断裂,如李口向斜、白石沟—霍堰断裂等;喜山期以拉张、拗陷为主,使矿区先存的 NNE—NE 向断裂表现为张剪性活动,如洛岗断层为右行张剪性断层。可见,区域地质构造控制矿区构造,而矿区构造进一步影响矿井构造。

首山一矿井田内褶皱及断裂中等发育,主体构造为白石山背斜、灵武山向斜及李口向斜,均为纵弯褶皱,轴向 320°,两翼倾角 10°~20°。矿井已探明大中型断层 14 条,走向以 NNE—NEE 向为主,沟李封断层和高沟逆断层在井田内延展长度最大,其中沟李封断层位于井田西侧,切割白石山背斜和灵武山向斜,落差约 150 m,延展长度 5 500 m;高沟逆断层位于白石山背斜轴部附近,落差约 40 m,延展长度 2 070 m;其余断层位于沟李封断层东侧,落差 10~30 m,延展长度均小于 1 000 m,呈雁列式分布(图 1)。在地质史上,

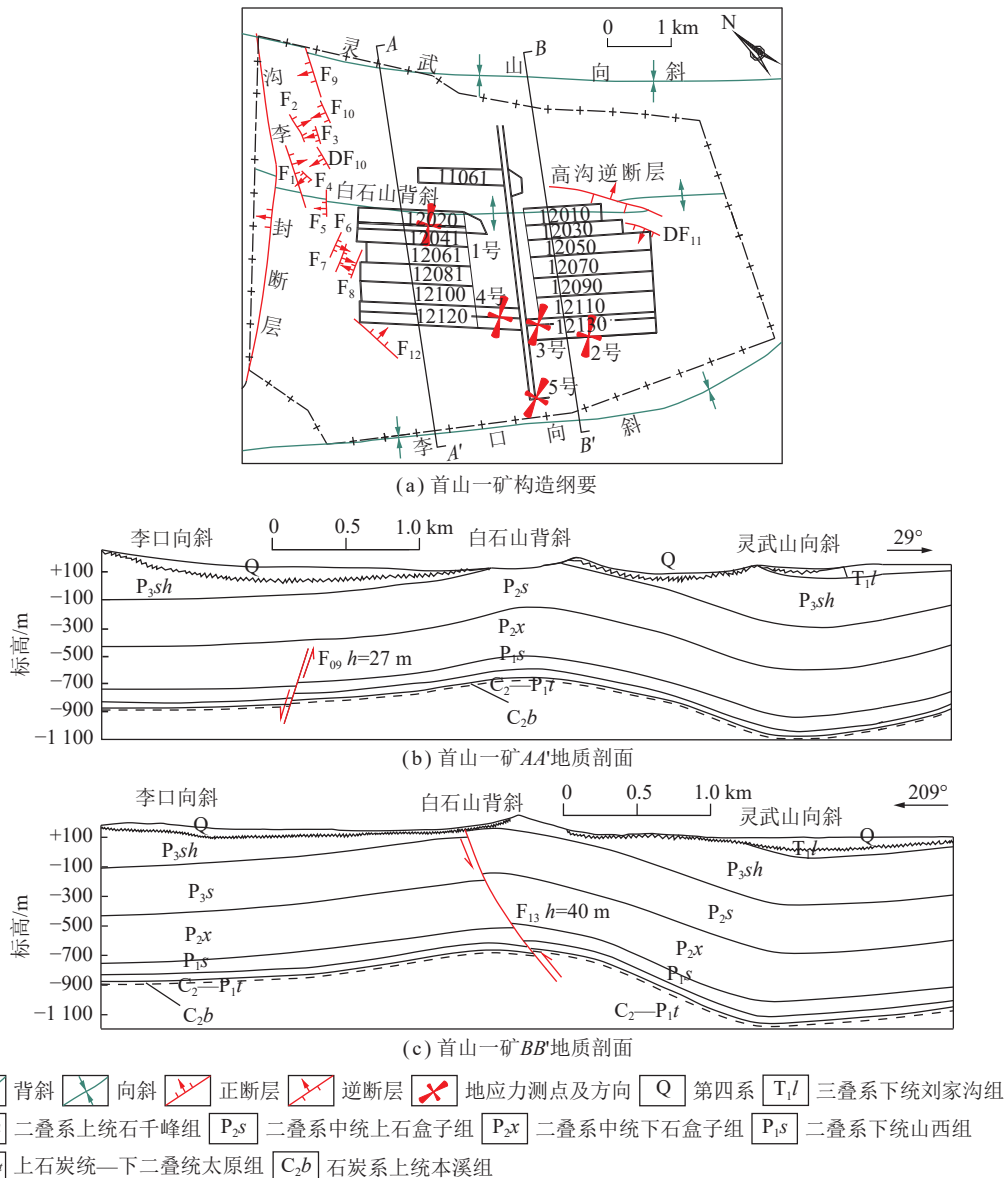


图 1 首山一矿构造纲要及地应力测点布置

Fig.1 Geological structure map and in-situ stress measuring point arrangement of Shoushan No.1 Coal Mine

晚燕山期 NE 向构造应力场作用使矿井内部形成一系列 NW—NWW 向褶皱以及 NW 向压剪性和 NE 向张剪性断裂, 如灵武山向斜、白石山背斜、沟李封断层等; 在喜山期 NNE 向水平挤压与 NEE 向水平伸展应力场作用下, 矿井先存的 NNE—NE 向断裂表现为张剪性活动, 如沟李封断层为右行张剪性断层。最终使矿井形成了现今的构造格局。

## 2 矿井地应力实测

### 2.1 测试原理

根据首山一矿地质条件, 采用 KX-2002 型空心包体应力计测试矿井地应力, 其原理为: 当一块岩石从三维受力状态的岩体中解除后, 由于岩石自身的弹性效应会发生膨胀变形, 变形量和初始应力状态相关。对该岩块进行应力解除后测量应变值, 并确定弹性模量  $E$ 、泊松比  $\nu$  等力学参数; 然后运用胡克定律计算应力的方向和大小, 即为该点原岩地应力。

### 2.2 测点布置

为了准确反映矿井地应力状态, 结合现场工程条件, 在矿井不同开采水平布置 5 个地应力测点 (图 1)。地应力测点所在区域地层及岩性分布如图 2 所示, 1 号测点位于已<sub>15-17</sub>-12020 工作面底板瓦斯治理巷二 602.00 m 处, 所属地层为上石炭统一下二叠统太原组 ( $C_2-P_1t$ ) 上部灰岩段  $L_1$ , 岩性为砂质泥岩; 2 号测点布置于已<sub>15-17</sub>-12130 机巷底板抽放巷 605.00 m 处, 所属地层为  $C_2-P_1t$  上部灰岩段  $L_1$ , 岩性为灰岩; 3 号测点位于已<sub>15-17</sub>-12130 工作面底板瓦斯治理巷二 195.00 m 处, 所属地层为  $C_2-P_1t$  上部灰岩段  $L_1$ , 岩性为粉砂岩; 4 号测点布置于已<sub>15-17</sub>-12120 中间底板抽放巷 32.00 m 处, 所属地层为  $C_2-P_1t$  上部灰岩段  $L_1$ , 岩性为细砂岩; 5 号测点位于-850 m 水平运输大巷变电所 26.00 m 处, 所属地层为  $C_2-P_1t$  下部灰岩段  $L_3$ , 岩性为灰岩, 地应力测点钻孔参数见表 1。

### 2.3 测试流程

地应力现场实测步骤主要包括测试准备、打测试孔、安装空心包体应力计、应力解除、采集数据、围压

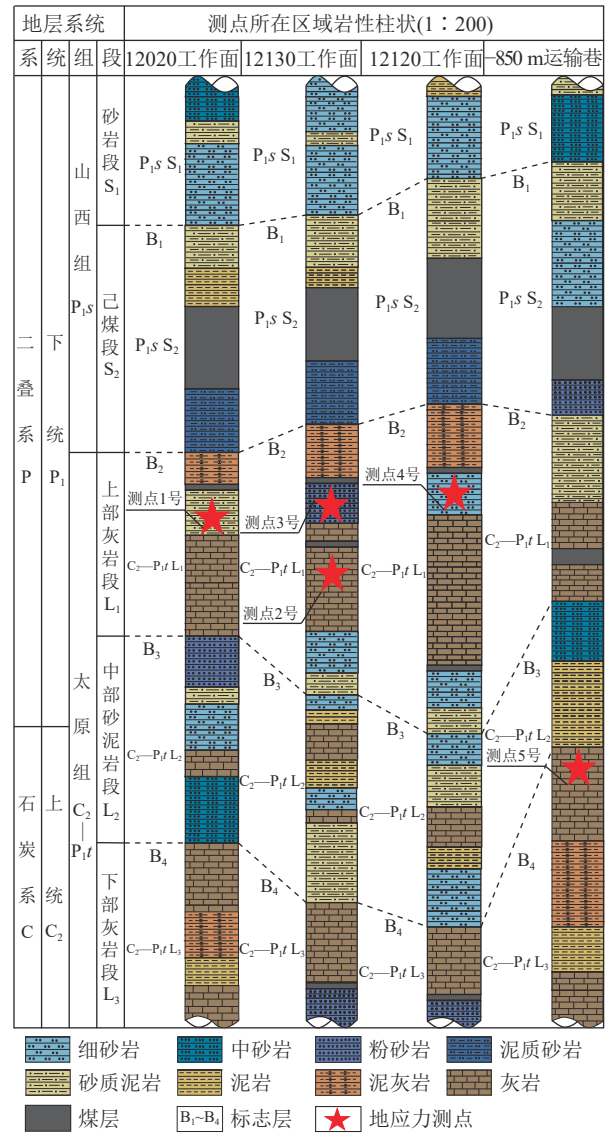


图 2 首山一矿地应力测点所在区域地层综合柱状  
Fig.2 Comprehensive regional strata log diagram of in-situ stress measuring points in Shoushan No.1 Coal Mine

率定及计算分析等, 测试流程如图 3 所示。

### 2.4 测试结果

将实测应变值导入至 Origin 软件, 绘制应变与解除距离曲线, 代表性测点的应变-解除距离曲线及包体岩心如图 4 所示, 图中 A、B、C 为小孔孔壁上 3 个应变片测点, 互呈 120°分布,  $\varepsilon_z$  为轴向应变、 $\varepsilon_\theta$  为周向

表 1 首山一矿深部地应力测点基本参数

Table 1 Basic parameters of in-situ stress measuring points for deep levels in Shoushan No.1 Coal Mine

测点	测点位置	标高/m	埋深/m	岩性	钻孔深度/m	钻孔方位/(°)	钻孔倾角/(°)	探头安装角/(°)
1号	已 <sub>15-17</sub> -12020工作面底板瓦斯治理巷二	-597.00	717.30	砂质泥岩	11.73	230.00	4.20	349.20
2号	已 <sub>15-17</sub> -12130机巷底板抽放巷	-810.00	945.50	灰岩	11.15	45.00	3.70	129.60
3号	已 <sub>15-17</sub> -12130工作面底板瓦斯治理巷二	-804.00	934.10	粉砂岩	10.64	224.00	3.60	50.40
4号	已 <sub>15-17</sub> -12120中间底板抽放巷	-775.00	915.30	细砂岩	12.25	50.50	6.20	127.44
5号	-850水平运输大巷变电所	-843.00	1 005.00	灰岩	13.64	43.50	4.80	91.80

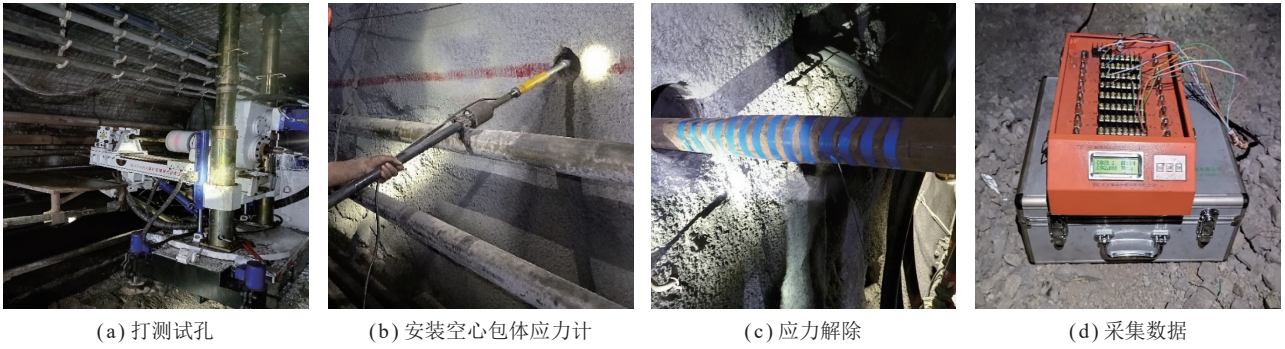


图 3 首山一矿地应力现场实测

Fig.3 In-situ stress measurements in Shoushan No.1 Coal Mine

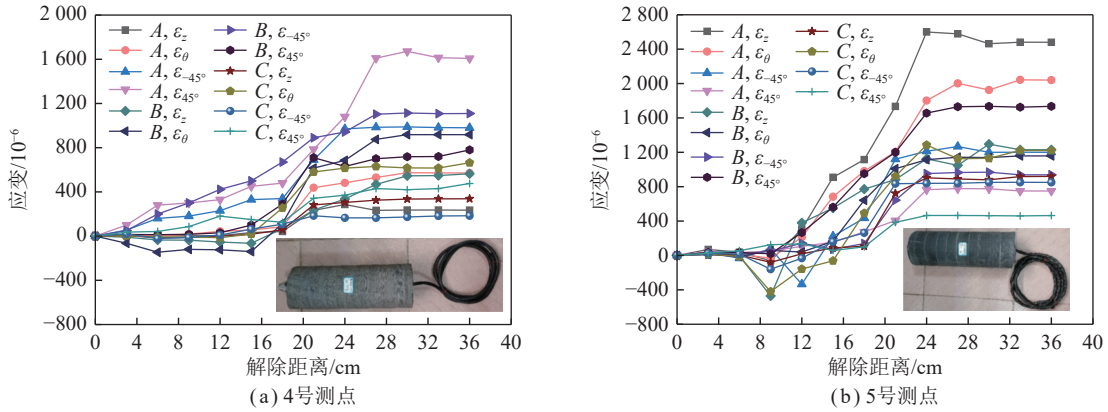


图 4 首山一矿典型应力解除曲线及包体岩心

Fig.4 Typical strain-relieving distance curves and hollow inclusions of rock core in Shoushan No.1 coal mine

应变、 $\epsilon_{45^\circ}$ 为与钻孔轴线成  $45^\circ$ 的斜向应变、 $\epsilon_{-45^\circ}$ 为与钻孔轴线成  $-45^\circ$ 的斜向应变。分析可知,应变-解除距离曲线分为 3 个阶段:第 1 阶段为应变波动阶段,该阶段远离应变计,对应变片数值影响较小;第 2 阶段为应变增加阶段,随着解除距离增加,应变计周围岩体脱离,应力开始释放,各应变片数值随解除距离的增加而增大;第 3 阶段为应变稳定阶段,随着解除

距离不断增加,测点应力完全释放,各应变片数值趋于稳定。

利用围压率测定仪测试包体岩芯的弹性模量和泊松比,结合各通道最终稳定应变值和钻孔参数,计算三维应力分量  $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$ 、 $\sigma_z$ 、 $\tau_{xy}$ 、 $\tau_{yz}$ 、 $\tau_{zx}$ 。基于应力状态不变量公式<sup>[36]</sup>分别对 6 个应力分量进行求解,进而获得三维地应力结果,见表 2。

表 2 首山一矿深部三维地应力测试结果

Table 2 Measuring results of three-dimensional in-situ stress for deep levels in Shoushan No.1 Coal Mine

测点	最大主应力 $\sigma_1$			中间主应力 $\sigma_2$			最小主应力 $\sigma_3$		
	大小/MPa	方向/( $^\circ$ )	倾角/( $^\circ$ )	大小/MPa	方向/( $^\circ$ )	倾角/( $^\circ$ )	大小/MPa	方向/( $^\circ$ )	倾角/( $^\circ$ )
1号	25.38	239.64	-8.77	17.77	-36.72	35.69	13.40	161.42	52.92
2号	33.69	240.90	1.01	19.65	-28.75	19.25	16.54	148.02	70.72
3号	35.13	212.19	22.70	27.13	38.31	67.17	19.80	122.87	-2.28
4号	34.39	239.10	-5.89	16.54	-56.41	76.42	10.26	150.38	12.19
5号	41.25	217.67	18.63	29.23	31.87	71.29	19.68	127.07	1.76

### 3 矿井地应力分布规律

#### 3.1 地应力分布规律

运用平面应变理论<sup>[36]</sup>对矿井地应力数据进行解析,结果见表 3。分析表 3 可知,矿井地应力分布

如下:

(1) 地应力类型分布,1 号和 2 号测点最大水平主应力  $\sigma_H$ 、垂向主应力  $\sigma_V$  和最小水平主应力  $\sigma_h$  关系为  $\sigma_H > \sigma_h > \sigma_V$ ,属于逆断层应力场类型;3 号~5 号测

表3 首山一矿深部地应力解析结果

Table 3 Analytical solution of in-situ stress for deep levels in Shoushan No.1 Coal Mine

测点	埋深/m	最大水平主应力 $\sigma_H$		最小水平主应力 $\sigma_h$ /MPa	垂直主应力 $\sigma_v$ /MPa	侧压系数			地应力场类型
		大小/MPa	方向/(°)			$K_H$	$K_{av}$	$K_h$	
1号	717.3	25.15	236.64	16.23	15.17	1.66	1.36	1.07	逆断层应力场
2号	945.5	33.68	238.33	19.31	16.88	1.99	1.57	1.14	逆断层应力场
3号	934.1	33.94	65.99	19.81	28.31	1.20	0.95	0.70	走滑断层应力场
4号	915.3	34.20	241.14	10.54	16.45	2.08	1.36	0.64	走滑断层应力场
5号	1 005.0	40.02	74.80	19.69	30.45	1.31	0.98	0.65	走滑断层应力场

点主应力关系为  $\sigma_H > \sigma_v > \sigma_h$ , 属于走滑断层应力场类型; 最大侧压系数  $K_H$  为 1.20~2.08, 均大于 1, 平均为 1.65,  $\sigma_H$  均大于  $\sigma_v$ 。可见, 矿井以水平构造应力为主。

(2) 地应力大小分布, 矿井  $\sigma_H$  为 25.15~40.02 MPa, 平均为 33.40 MPa;  $\sigma_h$  为 10.54~19.69 MPa, 平均为 17.12 MPa;  $\sigma_v$  为 15.17~30.45 MPa, 平均为 21.45 MPa。1号测点  $\sigma_H > 18$  MPa, 属于高应力水平; 2号~5号测点  $\sigma_H$  均大于 30 MPa, 属于超高应力水平。可知, 矿井属于高应力水平。

(3) 地应力方向分布, 地应力的最大水平主应力方向为 N56.64°E~N74.80°E, 平均值 N63.38°E, 与区域构造应力场 NE~NEE 向一致 (图 1)。

综上所述, 首山一矿以水平构造应力为主, 属于高应力水平, 最大水平主应力方向为 NEE 向。

## 3.2 地应力场数值模拟

### 3.2.1 数值计算模型

根据首山一矿钻孔柱状图、已组煤层底板等高线图、井上与井下对照图、47号和51号勘探线地质剖面图 (图 1(b)、(c)) 建立三维地质力学模型。模型能充分反映灵武山向斜、白石山背斜、李口向斜以及高沟逆断层、沟李封断层等构造特征。模型坐标南起 3737500, 北至 3748500, 东至 38450000, 西至 38440000, 模型范围 6 600 m×6 000 m×1 400 m(长×宽×高), 共划分 2 464 110 个单元、44 425 个节点, 并对已组煤层进行精细化网格划分, 建立的数值计算模型如图 5(a) 所示。

根据矿井实测数据及生产地质报告<sup>[37]</sup>, 运用加权平均算法计算各层物理力学参数, 并将模型划分为 9 个地层, 其主要物理力学参数包括弹性模量  $E$ 、泊松比  $\nu$ 、黏聚力  $c$ 、内摩擦角  $\varphi$ 、密度  $\rho$  (表 4)。选取莫尔-库伦本构模型对地层进行描述。

### 3.2.2 模型边界条件

岩体自重应力与构造应力是地应力的主要组成部分, 分别考虑自重应力、 $x$  和  $y$  向水平挤压构造应力

以及  $xy$  平面、 $yz$  平面和  $xz$  平面剪切构造应力 (图 5(b))。模型边界条件如下: ① 施加自重载荷, 约束模型  $x$  向、 $y$  向及底部边界法向位移; ②  $x$  向两侧面施加均匀法向位移, 大小 0.1 m, 约束模型  $y$  向及底部边界法向位移; ③  $y$  向两侧面施加均匀法向位移, 大小 0.1 m, 约束模型  $x$  向及底部边界法向位移; ④ 在模型  $x$  向、 $y$  向侧面施加切向位移, 大小 0.1 m, 约束模型  $x$  向、 $y$  向及底部边界法向位移; ⑤ 在模型垂直  $y$  边界上施加  $z$  向切向位移, 大小 0.1 m, 约束  $x$  向、 $z$  向及底部边界法向位移; ⑥ 在模型垂直  $x$  边界上施加  $z$  向切向位移, 大小 0.1 m, 约束模型  $y$  向、 $z$  向及底部边界法向位移。

### 3.2.3 回归反演分析

(1) 多元回归反演分析法。基于三维地质力学模型, 运用多元回归反演分析法<sup>[17]</sup>, 计算各影响因素单独作用下的模型“观测值”, 并结合实测值进行回归分析, 进而获得应力回归方程。

将地应力回归计算值  $\hat{\sigma}_k$  作为因变量, 对应点的实测值作为自变量, 则回归方程为

$$\hat{\sigma} = \sum_{i=1}^n L_i \sigma_k^i \quad (1)$$

式中,  $k$  为观测点序号;  $\hat{\sigma}_k$  为第  $k$  观测点的回归计算值;  $L_i$  为相应于自变量的多元回归系数;  $\sigma_k^i$  为相应应力分量计算值的单列矩阵;  $n$  为工况数。

假设有  $m$  个观测点, 则最小二乘法残差平方和  $S_c$  为

$$S_c = \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^6 \left( \sigma_{jk}^* - \sum_{i=1}^n L_i \sigma_{jk}^i \right)^2 \quad (2)$$

式中,  $\sigma_{jk}^*$  为  $k$  观测点  $j$  应力分量的观测值;  $\sigma_{jk}^i$  为  $i$  工况下  $k$  观测点  $j$  应力分量的回归计算值。

根据最小二乘法原理, 求解使  $S_c$  最小值的正规方程组, 得  $n$  个待定回归系数  $L_i$ , 则计算域内任一点  $P$  的回归初始应力, 可由各工况回归计算值迭加而得

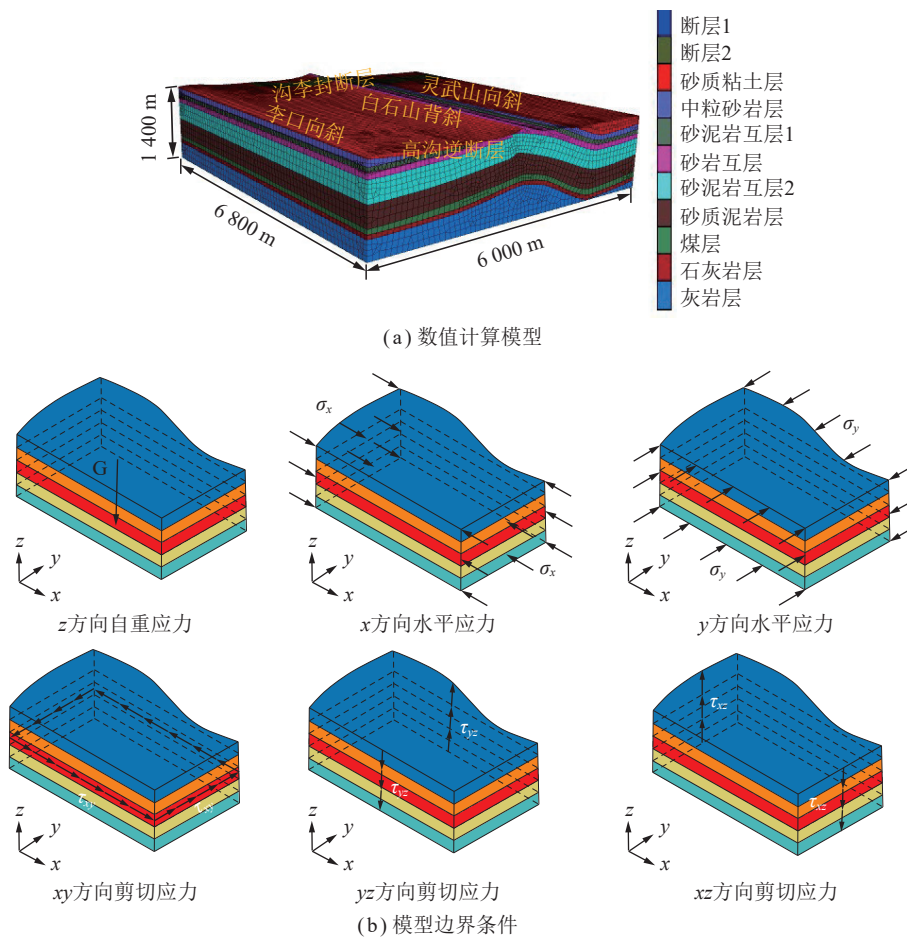


图 5 首山一矿数值计算模型及边界条件

Fig.5 Numerical simulation model and boundary condition in Shoushan No.1 Coal Mine

表 4 首山一矿煤岩体物理力学参数

Table 4 Physico-mechanical parameters of coal and rock masses in Shoushan No.1 Coal Mine

序号	地层	地层代号	复合岩层	平均厚度/m	E/GPa	$\nu$	c/MPa	$\varphi/(^\circ)$	$\rho/(kg \cdot m^{-3})$
1	第四系	Q	砂质黏土层	0~156.00	9.00	0.26	1.20	15	2 400
2	三叠系下统刘家沟组	T <sub>1</sub> l	中粒砂岩层	130.00	24.28	0.25	2.60	30	2 700
3	二叠系上统石千峰组	P <sub>3</sub> sh	砂泥岩互层1	320.00	23.12	0.26	2.10	27	2 650
4	二叠系中统上石盒子组	P <sub>2</sub> s	砂岩互层	312.00	26.28	0.25	2.60	30	2 750
5	二叠系中统下石盒子组	P <sub>2</sub> x	砂泥岩互层2	321.00	23.12	0.26	2.10	27	2 650
6	二叠系下统山西组	P <sub>1</sub> s	砂质泥岩层	85.00	17.56	0.26	1.60	25	2 650
7	二叠系下统山西组煤层	己 <sub>15-17</sub>	煤层	6.15	6.00	0.24	2.50	26	1 820
8	太原组一本溪组	(C <sub>2</sub> -P <sub>1</sub> t)-C <sub>2</sub> b	石灰岩层	77.00	26.80	0.18	3.00	32	2 500
9	寒武系上统崮山组	C <sub>3</sub> g	灰岩层	96.92	29.80	0.18	3.00	32	2 550
10	井田内断层	F <sub>13</sub> 、F <sub>14</sub>	断层		9.00	0.28	1.50	25	2 400

$$\sigma_{jP} = \sum_{i=1}^n L_i \sigma_{jP}^i \quad (3)$$

式中,  $j=1,2,\dots,6$  为 6 个应力分量。

(2) 应力回归系数。以 5 个实测地应力数据为基础, 进行最小二乘多元线性回归分析, 求解回归系数:

$L_1=1.40, L_2=1.76, L_3=1.23, L_4=0.79, L_5=6.22, L_6=2.87$ , 复合相关系数  $r=0.904 2$ , 地应力场回归方程为

$$\sigma_d = 1.40\sigma_w + 1.76\sigma_{g1} + 1.23\sigma_{g2} + 0.79\sigma_{g3} + 6.22\sigma_{g4} + 2.87\sigma_{g5} + 3.74 \quad (4)$$

式中,  $\sigma_d$  为地应力场的回归计算值;  $\sigma_w$  为自重引起的

应力场;  $\sigma_{g1}$  和  $\sigma_{g2}$  分别为  $x$ 、 $y$  方向均匀挤压构造运动产生的应力场;  $\sigma_{g3}$ 、 $\sigma_{g4}$  和  $\sigma_{g5}$  分别为  $xy$ 、 $yz$  和  $xz$  平面剪切构造运动产生的应力场。

(3) 应力反演回归分析。为验证地应力反演结果的可靠性, 通过 FLAC<sup>3D</sup> 软件后处理功能, 提出地应力测点的回归值, 并与实测值进行对比 (表 5), 绘制地应力实测值与回归值对比柱状图 (图 6)。分析可知, 地应力反演回归值整体上与实测应力值接近, 正应力回归值与实测值绝对误差为 0.02~4.77 MPa, 平均相对

误差为 1.65 MPa, 相对误差为 2.10%~15.67%, 平均相对误差为 7.26%; 剪应力反演回归值与实测值绝对误差为 0.01~2.53 MPa, 平均相对误差为 0.26 MPa, 相对误差为 0.10%~31.25%, 平均相对误差为 18.58%; 主应力反演回归值与实测值绝对误差为 0.52~4.73 MPa, 相对误差为 1.72%~16.36%, 平均相对误差 7.41%。可见, 在正应力和主应力值上回归拟合效果较好, 剪应力效果稍差。多元回归反演分析法获得的地应力计算值与实测值吻合, 相对误差小于 20%, 结果可靠。

表 5 首山一矿地应力实测值与回归值对比分析

Table 5 Comparison of measured values and regression values of in-situ stress in Shoushan No.1 Coal Mine

测点	应力对比项	正应力/MPa			剪应力/MPa			三向主应力/MPa		
		$\sigma_x$	$\sigma_y$	$\sigma_z$	$\tau_{xy}$	$\tau_{yz}$	$\tau_{xz}$	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_3$
1号	实测值	23.14	18.24	15.17	3.72	2.57	0.32	25.38	17.77	13.40
	回归值	20.99	16.64	13.86	3.27	2.39	0.22	22.95	16.34	12.20
	绝对误差	2.15	1.60	1.31	0.45	0.18	0.10	2.43	1.43	1.20
	相对误差/%	9.29	8.77	8.64	12.10	7.00	31.25	9.57	8.05	8.96
2号	实测值	30.27	22.73	16.88	6.12	0.70	-0.73	33.69	19.65	16.54
	回归值	29.37	21.60	15.66	6.29	0.69	-0.74	32.89	18.42	15.32
	绝对误差	0.90	1.13	1.22	-0.17	0.01	0.01	0.80	1.23	1.22
	相对误差/%	2.97	4.97	7.23	2.78	1.43	1.34	2.37	6.26	7.38
3号	实测值	23.88	29.89	28.31	6.40	-2.58	1.26	35.15	27.13	19.80
	回归值	22.69	28.57	27.28	6.59	-2.52	-1.27	34.02	26.12	18.40
	绝对误差	1.19	1.32	1.03	-0.19	-0.06	2.53	1.13	1.01	1.40
	相对误差/%	4.98	4.42	3.64	2.97	2.33	200.79	3.21	3.72	7.07
4号	实测值	28.08	16.66	16.45	10.36	2.06	0.92	34.39	16.54	10.26
	回归值	28.67	17.21	17.47	10.38	2.12	0.82	34.98	17.59	10.78
	绝对误差	-0.02	-0.03	-0.06	-0.01	-0.03	0.11	0.59	1.05	0.52
	相对误差/%	2.10	3.30	6.20	0.19	2.91	10.87	1.72	6.35	5.67
5号	实测值	27.19	32.52	30.45	9.81	-2.70	-2.46	41.25	29.23	19.68
	回归值	23.42	28.34	25.68	9.80	-2.74	-2.43	36.52	25.45	16.46
	绝对误差	3.77	4.18	4.77	0.01	0.04	-0.03	4.73	3.78	3.22
	相对误差/%	13.87	12.85	15.67	0.10	1.48	1.22	11.47	12.93	16.36

### 3.2.4 模拟结果分析

通过对三维地质力学模型进行求解, 获得首山一矿三维主应力分布云图和煤层平面应力分布云图 (图 7)。分析图 7 可知, 矿井  $S_H$ 、 $S_V$ 、 $S_h$  均为压应力, 表明整个矿井煤岩体处于三维压应力状态。随埋深增加主应力均逐渐增大; 在煤层中三向主应力整体呈现:  $S_H > S_V > S_h$ , 以走滑断层应力场为主, 部分区域呈现:

$S_H > S_h > S_V$ , 以逆断层应力场为主, 说明煤层地应力以水平构造应力为主。褶皱与断层构造对煤层  $S_V$  影响较小, 对  $S_H$ 、 $S_h$  影响较大, 在沟李封断层带内和高沟逆断层带内地应力较小, 在灵武山向斜轴部和李口向斜轴部地应力较大, 而白石山背斜轴部地应力较小。

利用 Surfer 软件提取已组煤层最大水平主应力



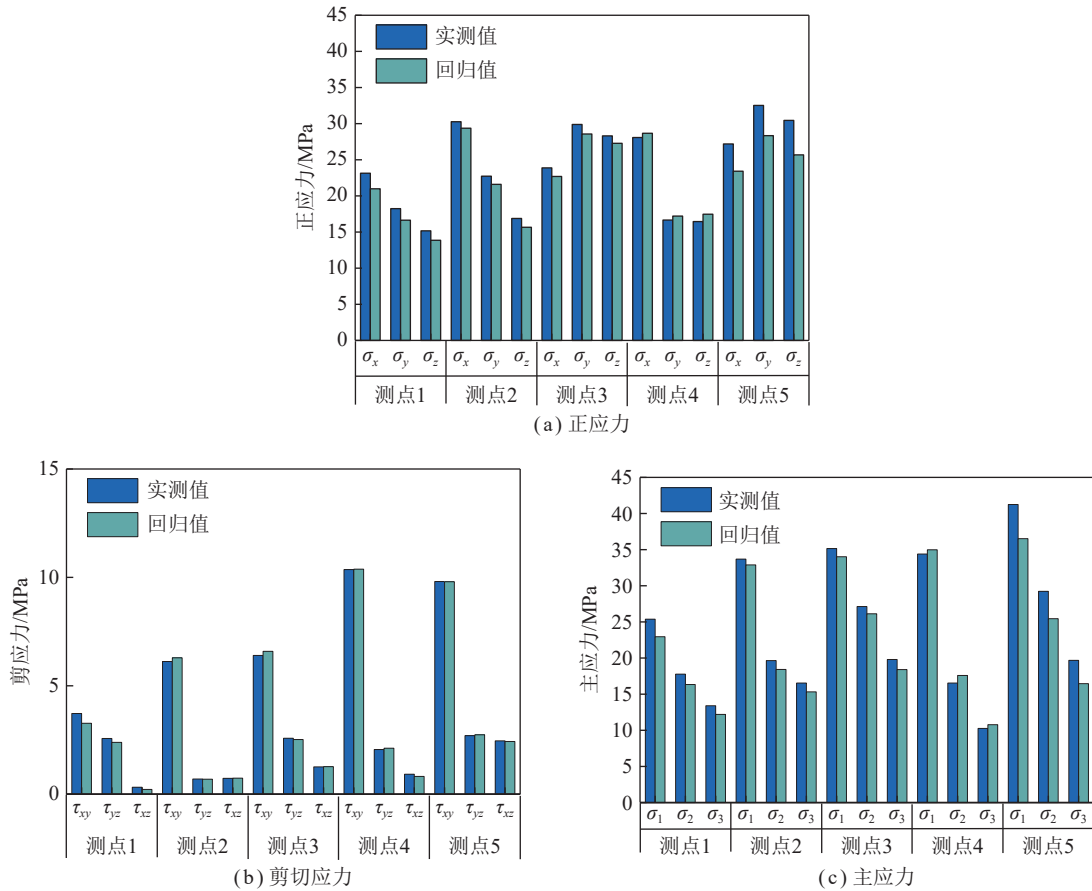


图 6 首山一矿地应力实测值与回归值对比

Fig.6 Histogram of comparison between measured values and regression values of in-situ stress in Shoushan No.1 Coal Mine

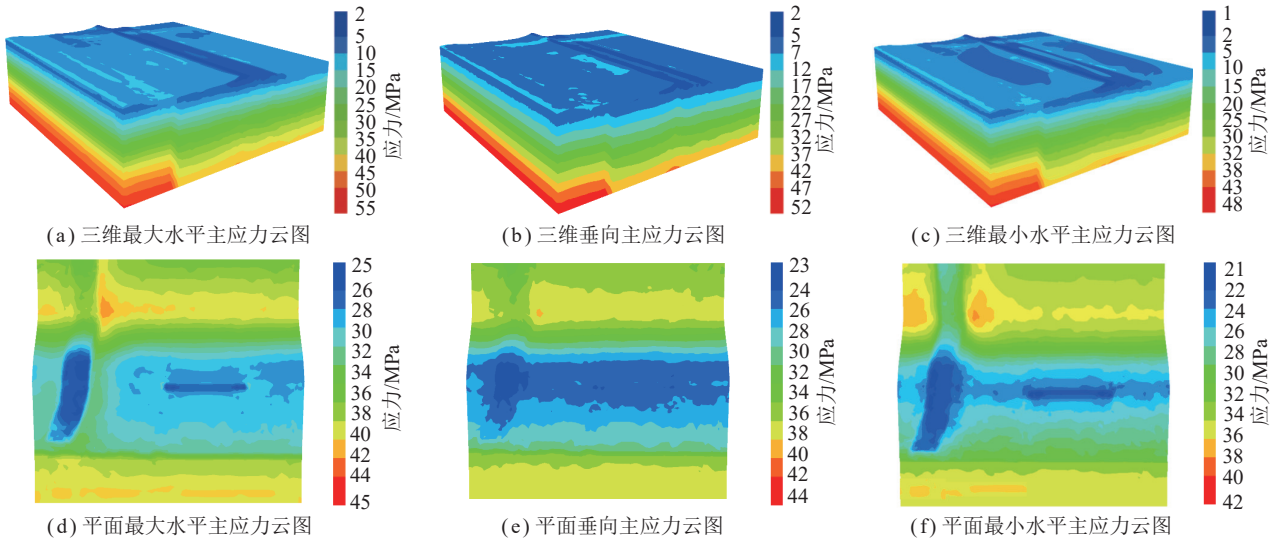


图 7 首山一矿地应力场分布云图

Fig.7 Distribution gap of in-situ stress field in Shoushan No.1 Coal Mine

大小和方向分布 (图 8)。煤层地应力为 25~44 MPa, 集中于 28~42 MPa, 属于高应力水平。灵武山向斜轴部应力较大、翼部较小, 应力值由轴部的 44 MPa 向翼部减小至 36 MPa; 白石山背斜轴部应力较小、翼部应力较大, 应力值由轴部的 25 MPa 向翼部增大至

36 MPa; 李口向斜轴部应力较大、翼部较小, 应力值由轴部的 42 MPa 向翼部减小至 34 MPa, 可见, 地应力由矿井北部向南部先增大后减小再增大。断层影响带内地应力较小, 断层尖灭端较大, 如沟李封断层与高沟逆断层带内地应力分别为 25~28 MPa 和 25~

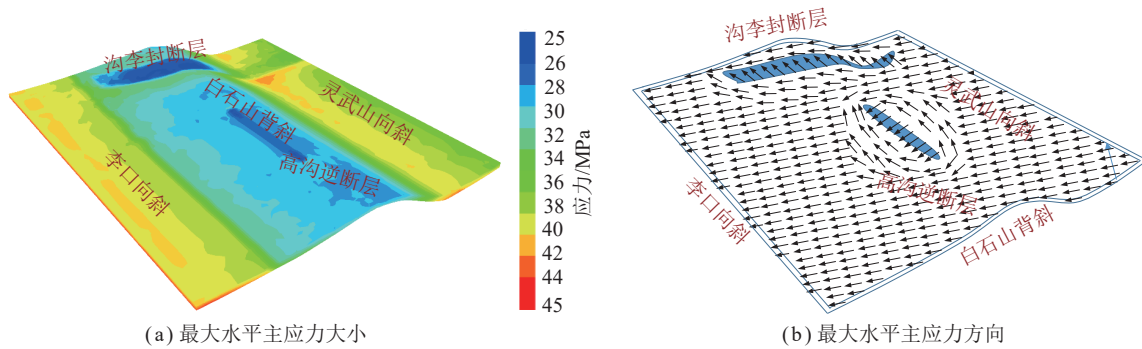


图 8 首山一矿已组煤层最大水平主应力大小和方向分布

Fig.8 Distribution of maximum horizontal principal stress level and direction in Ji coal seam of Shoushan No.1 Coal Mine

26 MPa, 断层尖灭端地应力分别异常增大至 36 MPa 和 32 MPa。地应力场方向为 NEE 向, 仅在断层区域应力场方向发生偏转, 断层带内应力场方向与断层走向垂直, 断层端部应力方向沿断层走向偏转, 且尖灭端应力场方向偏转最大, 断层规模越大对应力场方向影响范围越大, 如沟李封断层对应力场方向的影响范围大于高沟逆断层。

可见, 矿井煤岩体处于三维压应力状态, 煤层主应力关系为  $\sigma_H > \sigma_V > \sigma_h$ , 地应力由矿井北部向南部呈现先增大后减小再增大的变化趋势, 地应力为 28~44 MPa, 属于高应力水平, 应力方向 NEE 向。

#### 4 矿井地应力影响因素分析

##### 4.1 埋深

根据地应力的定量函数关系式可知<sup>[35,38]</sup>: 地应力与埋深、弹性模量、泊松比、构造应力和孔隙压力密切相关。因此, 选取埋深、岩性和地质构造因素探讨其对地应力分布的影响。采用最小二乘法对  $\sigma_H$ 、 $\sigma_h$ 、 $\sigma_V$  与埋深的关系进行线性拟合 (图 9), 结果为

$$\begin{cases} \sigma_H = 0.0503H - 12.0196, R^2 = 0.9667 \\ \sigma_h = 0.0222H - 3.9174, R^2 = 0.7941 \\ \sigma_V = 0.0279H - 6.1802, R^2 = 0.8992 \end{cases} \quad (5)$$

分析图 9 可知, 矿井主应力与埋深具有较好的线性关系, 即随埋深增加地应力逐渐增大。但呈现规律有所不同, 其中垂直主应力的回归系数为 0.0279, 大于上覆岩层平均容重, 可见褶皱形成的构造应力场对垂直主应力产生一定影响。 $\sigma_H$  与埋深的线性关系最为理想,  $\sigma_h$  与埋深的离散性高于  $\sigma_H$ , 主要是由于水平应力与构造环境和岩体的非均质等因素有关<sup>[39-40]</sup>。随埋深增加, 三向主应力关系不断转化, 当埋深为 600~800 m 时, 主应力关系为  $\sigma_H > \sigma_h > \sigma_V$ , 逆断层应力场占主导; 埋深大于 800 m 时, 主应力关系为  $\sigma_H > \sigma_V > \sigma_h$ , 走滑断层应力场占主导。可见, 随埋深增加, 地应力逐渐增大, 应力场类型由大地动力场向准静水压力场过渡。

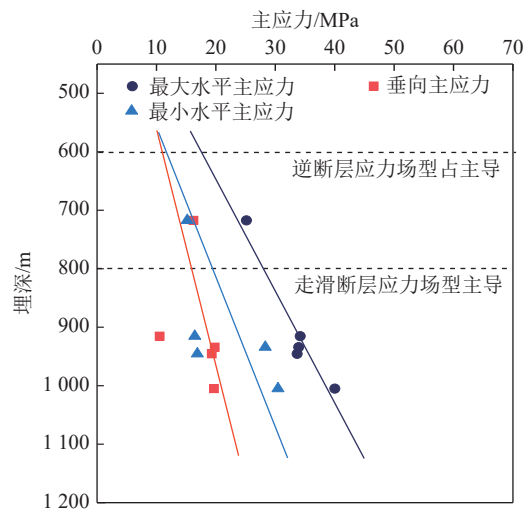


图 9 首山一矿深部地应力与埋深的关系

Fig.9 Relationship between in-situ stress for deep levels and burial depth in Shoushan No.1 Coal Mine

##### 4.2 岩性

岩性是影响地应力分布的重要内在因素, 岩石矿物组分、结构及胶结程度决定了岩石力学性质, 进而影响地应力分布。通过对矿区地应力资料进行统计<sup>[10-11,35]</sup>, 共获得含岩性参数的 55 组数据, 将每组地应力值校正至统一深度, 分析三向主应力及平均水平主应力  $\sigma_{av}$  的分布规律 (表 6)。结果表明,  $\sigma_V$  与岩性相关性不明显, 而  $\sigma_H$ 、 $\sigma_h$  和  $\sigma_{av}$  与岩性相关性较强, 具体

表 6 平顶山矿区不同岩性地层地应力分布

Table 6 Distribution of in-situ stress of different lithostratigraphy in Pingdingshan mining area

岩性	$\sigma_H$ /MPa	$\sigma_V$ /MPa	$\sigma_h$ /MPa	$\sigma_{av}$ /MPa	计数
泥岩	24.67	16.74	16.67	20.67	7
砂质泥岩	25.55	19.36	14.99	20.27	23
中砂岩	29.38	20.20	15.51	22.44	4
细砂岩	33.69	21.81	17.09	25.39	10
粉砂岩	37.05	21.76	18.39	27.72	7
灰岩	38.06	20.75	19.57	28.81	4

表现为:从泥岩→砂岩→灰岩的 $\sigma_H$ 、 $\sigma_h$ 和 $\sigma_{av}$ 值逐渐增大。通常煤系地层中泥岩抗压强度小于砂岩和灰岩,可见,地应力随岩性的变化规律与岩石抗压强度有较好的对应性,即从泥岩到砂岩或灰岩,地应力增大。

弹性模量是影响地应力分布的重要力学参数,根据矿井实测地应力数据,结合前人研究成果<sup>[10-11]</sup>,共获得含弹性模量的 17 组数据资料,采用线性拟合法分析地应力与弹性模量的关系(图 10)。结果表明,最大水平主应力与弹性模量呈正相关性,相关系数为 0.71,即埋深相同,弹性模量越大地应力越大。

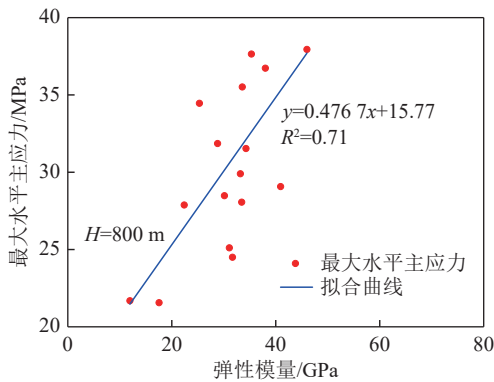


图 10 研究区地应力与弹性模量的关系

Fig.10 Relationship between in-situ stress and elasticity modulus in the research area

岩性组合对地应力大小和方向均有重要影响。在纵向上,由于岩性组合界面处岩石力学性质存在差异造成水平变形不一致,交界面附近上下两侧岩体发生应力突变,产生方向相反的附加应力(图 11(a)、(b))。在横向各项同性及变形连续条件下,由静力学平衡条件可知砂岩和泥岩产生的附加应力<sup>[3]</sup>为

$$\sigma_f = \sigma_{HA} = \sigma_{hA} = \sigma_{HB} = \sigma_{hB} = \frac{E_A v_B - E_B v_A}{E_A (1 - v_B) + E_B (1 - v_A)} \sigma_v \quad (6)$$

式中, $\sigma_f$ 为附加应力; $\sigma_{HA}$ 、 $\sigma_{hA}$ 和 $\sigma_{HB}$ 、 $\sigma_{hB}$ 分别为砂岩和泥岩在 $x$ 、 $y$ 方向上的主应力; $E_A$ 和 $v_A$ 、 $E_B$ 和 $v_B$ 分别为砂岩和泥岩的弹性模量、泊松比。

首山一矿二叠系山西组( $P_1s$ )和石炭—二叠系太原组( $C_2-P_1t$ )地层广泛分布砂泥岩互层结构,矿井实测地应力数据显示,当平均埋深为 800 m 时,附加应力能够引起 5~8 MPa 的变化,且岩层间岩石力学参数相差越大,产生的附加应力越大,地应力变化越大。

在横向上,岩石力学性质的差异也能够产生附加应力,并造成地应力方向偏转(图 11(c)、(d))。最大水平主应力方向与岩性组合界面存在以下 3 种关系<sup>[3]</sup>: 平行、垂直或斜交。① $\theta=90^\circ$ 时,剪应力 $\sigma_f \cos \theta$ 为 0,

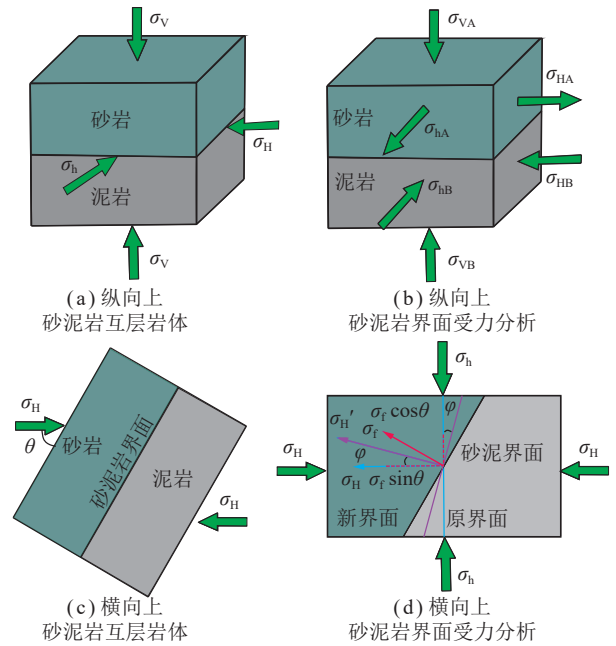


图 11 地应力在岩性组合界面处的变化机制

Fig.11 Changing mechanism of in-situ stress in the lithologic association interface

最大水平主应力增加 $\sigma_f$ ,但主平面不发生偏转,最大水平主应力方向不变;② $\theta=0^\circ$ 时,只有当界面两侧岩体的力学参数相差较大时, $\sigma_f$ 才能大于原水平主应力差,因此 $\theta=0^\circ$ 时,只改变了最小水平主应力大小,应力方向通常不变;③当二者斜交时,附加应力引起主坐标系产生变化,形成新的主平面,应力方向偏转 $\varphi$ ,通常引起应力方向发生最大偏转的 $\theta=45^\circ$ 。由于煤系地层中砂泥岩的力学性质相差较大,可引起地应力发生最大变化。因此,以首山一矿砂泥岩界面为例,取平均值 $\sigma_H=35$  MPa,当 $\theta=45^\circ$ 时,最大附加应力 $\sigma_f=7.5$  MPa, $\sigma_H$ 的偏转角 $\varphi=5.2^\circ$ 。可见,地层岩性的差异造成地应力大小离散分布、应力方向偏转角不超过 $10^\circ$ 。

### 4.3 地质构造

#### 4.3.1 褶皱

褶皱形态对地应力大小的影响实质上是地层曲率与应力大小之间的关系。在三维空间里,地层被认为是二次曲面,当地层所受应力不超过岩石抗拉强度时,地层曲率与应力值具有以下定量关系:

$$\sigma = EdK < |\sigma_t| \quad (7)$$

式中, $\sigma$ 为地层所受应力,MPa; $d$ 为地层厚度,m; $K$ 为最大曲率值; $\sigma_t$ 为岩石抗拉强度,MPa。

式(7)表明,在地层岩石弹性模量和厚度不变时,地层曲率越大,即地层弯曲程度越大地应力越大。

首山一矿为典型的纵弯褶皱构造矿井,为了清晰

地分析褶皱形态对地应力分布的影响, 于 47 号勘探线位置做最大水平主应力剖面图, 分析李口向斜、白石山背斜和灵武山向斜组成的纵弯褶皱区域地应力分布规律 (图 12)。结果显示, 李口向斜内弧 A 区和灵武山向斜内弧 C 区均为高应力集中区, 地应力集中在 38~42 MPa 和 40~44 MPa, 李口向斜内弧 A 区应力值和应力梯度值均小于灵武山向斜内弧 C 区; 白石山背斜内弧 B 区为相对高应力值区, 地应力集中在 34~38 MPa, 向斜内弧应力值 (A 区、C 区) 明显大于背斜内弧应力值 (B 区), 且褶皱弯曲程度越大, 其内弧地应力越大, 应力梯度越大。矿井实测地应力显示, 1 号和 5 号测点分别位于白石山背斜和李口向斜内弧区域, 1 号测点地应力为 25.15 MPa, 5 号测点地应力为 40.02 MPa, 可见李口向斜内弧应力值明显大于白石山背斜内弧。

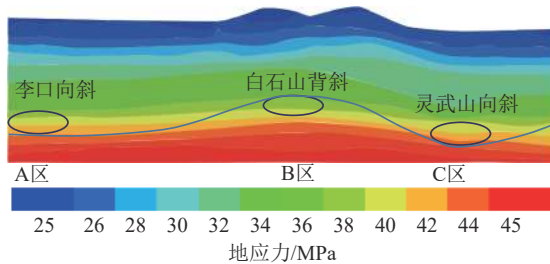


图 12 首山一矿纵弯褶皱区域地应力分布

Fig.12 Distribution diagram of in-situ stress of longitudinal folding in Shoushan No.1 Coal Mine

综上所述, 褶皱形态控制地应力的水平主应力分布, 向斜内弧应力值大于背斜内弧, 且褶皱弯曲程度越大, 其内弧地应力越大, 应力梯度越大。

### 4.3.2 断层

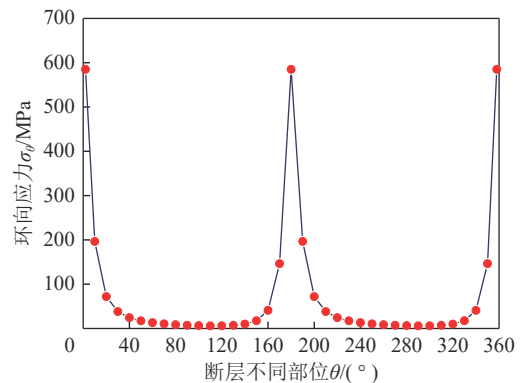
断层对地应力场的影响具体表现为地应力值降低和地应力方向偏转<sup>[41]</sup>。为了更好地揭示断层对地应力大小和方向的影响, 选取表征断层不同部位的参数  $\theta$  和表征  $\sigma_H$  方向与断层走向夹角的参数  $\alpha$  分析其对地应力的影响。采用无限大受压平板椭圆孔口平面应变模型<sup>[42]</sup>, 分析断层附近地应力的变化规律。

$$\begin{cases} \sigma_\theta = \sigma_H \frac{1 - m^2 + 2m \cos 2\alpha - 2 \cos 2(\theta + \alpha)}{1 + m^2 - 2m \cos 2\theta} + \\ \sigma_v = \frac{1 - m^2 + 2m \cos 2(90^\circ - \alpha) - 2 \cos 2(270^\circ - \theta - \alpha)}{1 + m^2 - 2m \cos 2(360^\circ - \theta)} \\ \sigma_p = 0 \end{cases} \quad (8)$$

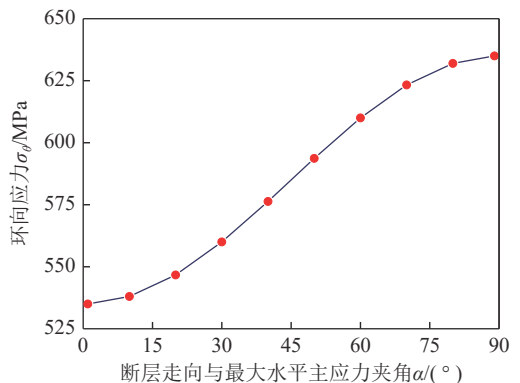
式中,  $\sigma_\theta$  和  $\sigma_p$  分别为环向应力和径向应力, MPa;  $m$  为断层长度与宽度的关系,  $m=(a-b)/(a+b)$ ;  $\theta$  为断层不同部位;  $\alpha$  为断层走向与最大水平主应力的夹角。

(1) 参数  $\theta$  对地应力分布的影响。根据矿井实测

地应力数据, 取平均值  $\sigma_H=35$  MPa 和  $\sigma_v=30$  MPa, 当  $m=0.8$ ,  $\alpha=45^\circ$  时, 代入式 (8), 绘制  $\theta$  在  $0 \sim 360^\circ$  内的环向应力曲线 (图 13(a))。分析图 13(a) 可知, 环向应力在断层边缘变化剧烈, 在断层端部 (即  $\theta$  为  $0^\circ$ 、 $180^\circ$ 、 $360^\circ$  时) 发生应力集中, 环向应力为边界应力的 10~20 倍, 由此可知, 断层端部剪应力较大, 导致最大水平主应力方向与剪应力方向一致, 即沿着断层走向发生偏转。



(a) 参数  $\theta$  对应力分布的影响



(b) 参数  $\alpha$  对应力分布的影响

图 13 断层各因素对地应力的影响

Fig.13 Effect of each factor of fault to in-situ stress

(2) 参数  $\alpha$  对地应力分布的影响。将  $\sigma_H=35$  MPa 和  $\sigma_v=30$  MPa,  $m=0.8$ ,  $\theta=0^\circ$  (断层端部) 代入式 (8) 中, 得到夹角  $\alpha$  在  $0^\circ \sim 90^\circ$  内的断层端部环向应力曲线 (图 13(b))。分析可知, 最大水平主应力方向与断层走向夹角  $\alpha$  对地应力分布影响显著, 随着  $\alpha$  增大, 断层端部环向应力逐渐增大。可见, 最大水平主应力方向与断层走向夹角越大, 断层端部环向应力越大, 最大水平主应力方向偏转程度越大。

以矿井沟李封断层和高沟逆断层为例分析断层对地应力分布的影响 (图 14)。沟李封断层带内和高沟逆断层带内应力值较低, 分布于 25~28 MPa, 沟李封断层尖灭端存在 A、B 两个应力集中区, A 区地应力最大值为 37 MPa, B 区最大值为 32 MPa; 高沟逆断层尖灭端存在 C、D 两个应力集中区, 地应力最大值

均为 32 MPa。沟李封断层带内和高沟逆断层带内地应力方向垂直于断层走向,在靠近断层端部区域地应力方向沿着断层走向偏转(图 8(b)),高沟逆断层端部应力方向最大偏转角可达 90°,明显大于沟李封断层,由于沟李封断层走向与  $\sigma_H$  方向夹角为 17°,高沟逆断层与  $\sigma_H$  方向夹角为 71°,夹角  $\alpha$  越大断层端部剪应力越大,因此高沟逆断层端部  $\sigma_H$  方向偏转程度大于沟李封断层。可见,断层带内应力降低、断层尖灭端应力集中,地应力方向沿着断层走向偏转,与断层走向夹角越大,地应力方向偏转角越大。

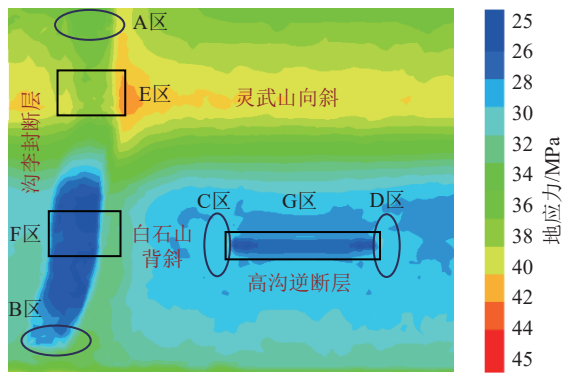


图 14 首山一矿断层及构造组合区地应力分布

Fig.14 In-situ stress distribution diagram of fault and tectonic association in Shoushan No.1 Coal Mine

### 4.3.3 构造组合

首山一矿构造组合形式主要有 2 种:一是纵弯褶皱伴生断层的构造组合,如高沟逆断层为白石山背斜形成过程中的伴生构造;二是多期构造运动作用下断层切割褶皱的构造组合,如白石山背斜和灵武山向斜在后期压剪构造应力场作用下被沟李封断层切割,最终形成断褶构造组合形式。

下面以沟李封断层与灵武山向斜构造组合、沟李封断层与白石山背斜构造组合以及高沟逆断层与白石山背斜构造组合为例,分析构造组合对地应力分布的影响,矿井构造组合区地应力分布如图 14 所示。分析图 14 可知,沟李封断层与灵武山向斜构造组合 E 区地应力为 38~44 MPa,沟李封断层与白石山背斜构造组合 F 区地应力为 25~34 MPa,高沟逆断层与白石山背斜构造组合 G 区地应力为 25~30 MPa,构造组合 E 区应力值明显大于 F 区和 G 区,可见,断层切割复式褶皱时,断层与向斜构造组合区应力值大于断层与背斜构造组合区。同时可知,构造组合 E 区、F 区和 G 区地应力方向分布紊乱。

### 4.4 讨论

地应力的影响因素多且复杂,埋深、岩性和地质构造是影响地应力分布的主要因素,各因素对地应力

的影响程度不尽相同,且每种因素对地应力的影响不是独立的,而是共同作用的:

(1)当地层平缓、无断层影响且岩性条件相同时,埋深越大地应力越大,如 2 号和 5 号测点所在区域地层平缓且无断层影响,岩性均为灰岩,2 号测点地应力为 33.68 MPa,5 号测点地应力为 40.02 MPa,呈现地应力随埋深增加而逐渐增大的变化趋势;当地层平缓、无断层影响且埋深相同时,岩石抗压强度和弹性模量越大地应力越大,在岩性组合界面处易发生地应力大小突变和应力方向偏转,如实测应力数据显示,从泥岩到砂岩或灰岩,地应力增大,弹性模量越大地应力越大,在砂泥岩交界处产生约 7.5 MPa 的附加应力,地应力方向偏转角可达 5.2°。可见,埋深与岩性对地应力分布均产生影响,下面采用 3 种多元回归模型<sup>[15]</sup>建立地应力  $\sigma_H$  与埋深  $H$  和弹性模量  $E$  的关系,回归模型为

$$\begin{cases} \sigma_H = aH + bE + c\sqrt{E} + d \\ \sigma_H = aH \frac{\nu}{1-\nu} + bE + c \\ \sigma_H = aH + bE + c \end{cases} \quad (9)$$

式中,  $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$  为待定回归系数。

选取平顶山东部矿区地应力数据(表 7)进行回归分析,地应力回归公式为

$$\begin{cases} \sigma_H = 0.0303H + 0.6770E - 0.0681\sqrt{E} - 3.0873 \\ \sigma_H = 0.1121H \frac{\nu}{1-\nu} + 0.7890E - 9.5980 \\ \sigma_H = 0.0350H + 0.4687E - 8.5513 \end{cases} \quad (10)$$

结果表明,地应力随埋深和弹性模量的增大而增大,模型 1~3 的拟合相关系数分别为 0.7665、0.6500 和 0.8659,对比可知,模型 3 回归结果更优。因此,研究区地应力与埋深、弹性模量的关系可用模型 3 表征。

(2)通过现场实测、数值模拟和理论分析可知,地质构造对矿井地应力分布影响显著,呈现褶皱构造控制地应力区域分布、断层构造控制地应力局部分布,即由向斜轴部向翼部地应力逐渐减小、由背斜轴部向翼部地应力逐渐增大,且地应力方向与区域应力场方向一致,如 3 号和 5 号测点分别位于李口向斜翼部(应力值 33.94 MPa)和轴部(40.02 MPa)区域,地应力由李口向斜轴部向翼部逐渐减小,1 号和 4 号测点分别位于白石山背斜轴部(应力值 25.15 MPa)和翼部(应力值 34.20 MPa)区域,地应力由白石山背斜轴部向翼部逐渐增大。断层带内地应力数值降低、应力方向偏转,断层尖灭端易形成应力集中区且应力方向偏转较大,如高沟逆断层尖灭端存在 2 个应力集中区,

表7 研究区地应力与埋深、弹性模量统计

Table 7 Statistical table in-situ stress and burial depth and elasticity modulus in the research area

序号	最大水平主应力 $\sigma_H$ /MPa	埋深 $H$ /m	弹性模量 $E$ /GPa	序号	最大水平主应力 $\sigma_H$ /MPa	埋深 $H$ /m	弹性模量 $E$ /GPa
1	22.06	633	22.40	10	31.14	790	34.28
2	17.45	556	31.07	11	37.07	835	33.57
3	28.03	555	39.50	12	22.80	846	17.56
4	27.56	900	31.68	13	25.15	717	33.45
5	28.30	657	25.32	14	33.68	946	30.13
6	25.74	547	35.32	15	33.94	934	40.94
7	37.05	807	38.00	16	34.20	915	33.20
8	43.35	914	46.00	17	40.02	1 005	28.81
9	19.60	723	11.95				

地应力最大值为 32 MPa, 应力方向偏转角可达 90°。断褶构造组合附近存在相对应力集中区, 应力方向分布无序, 如矿井构造组合 E、F 和 G 区地应力相对较高, 分别为 38~44、25~34 和 25~30 MPa, 且构造组合区应力方向分布紊乱。

综上所述, 研究区位于弱构造变形区时, 应力场类型属于自重应力场, 埋深是影响地应力分布的主控因素, 地层岩性的差异造成地应力大小离散分布、应力方向偏转; 研究区位于强构造变形区时, 应力场类型为构造应力场, 埋深影响垂向主应力分布, 构造形态影响水平主应力分布, 地质构造是地应力分布的主控因素。可见, 地质构造是影响首山一矿地应力分布的主控因素。

## 5 结 论

(1) 多元回归反演分析法获得的地应力计算值与实测值吻合, 相对误差小于 20%, 结果可靠。矿井煤层处于三维压应力状态, 煤层主应力关系为  $S_H > S_V > S_h$ , 地应力由矿井北部向南部呈现先增大后减小再增大的变化趋势, 地应力为 28~44 MPa, 属于高应力水平, 应力方向为 NEE 向。

(2) 埋深影响地应力大小和类型, 随埋深增加主应力增大, 应力场类型向准静水压力场过渡; 岩性与地应力密切相关, 从泥岩到砂岩或灰岩, 地应力增大, 弹性模量越大地应力越大, 地层岩性的差异造成地应力大小离散分布、应力方向偏转角不超过 10°; 矿井地应力与埋深、弹性模量的关系可表示为  $\sigma_H=0.035 0H+0.468 1E-8.551 3$ 。

(3) 地质构造是影响首山一矿地应力分布的主控因素, 褶皱形态控制地应力的水平主应力分布, 向斜内弧应力值大于背斜内弧, 且褶皱弯曲程度越大, 其内弧地应力越大, 应力梯度越大; 断层带内应力降低、

断层尖灭端应力集中, 地应力方向沿着断层走向偏转, 与断层走向夹角越大, 应力方向偏转角越大; 断层切割复式褶皱时, 断层与向斜构造组合区应力值大于断层与背斜构造组合区, 且均造成地应力方向分布紊乱。

## 参考文献(References):

- [1] 袁亮. 深部采动响应与灾害防控研究进展[J]. 煤炭学报, 2021, 46(3): 716-725.  
YUAN Liang. Research progress of mining response and disaster prevention and control in deep coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(3): 716-725.
- [2] 李静, 刘晨, 刘惠民, 等. 复杂断层构造区地应力分布规律及其影响因素[J]. 中国矿业大学学报, 2021, 50(1): 123-137.  
LI Jing, LIU Chen, LIU Huimin, et al. Distribution and influencing factors of in situ stress in complex fault tectonic region[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2021, 50(1): 123-137.
- [3] 徐珂, 戴俊生, 商琳, 等. 南堡凹陷现今地应力特征及影响因素[J]. 中国矿业大学学报, 2019, 48(3): 570-583.  
XU Ke, DAI Junsheng, SHANG Lin, et al. Characteristics and influencing factors of in situ stress of Nanpu Sag, Bohai Bay Basin, China[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2019, 48(3): 570-583.
- [4] CAI M, PENG H. Advance of in situ stress measurement in China[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2011, 3(4): 373-384.
- [5] HAIMSON B C, LEE M Y, SONG I. Shallow hydraulic fracturing measurements in Korea support tectonic and seismic indicators of regional stress[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2003, 40(7/8): 1243-1256.
- [6] JIANG J, LIU Q, XU J. Analytical investigation for stress measurement with the rheological stress recovery method in deep soft rock[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2016, 26(6): 1003-1009.
- [7] QIAO L, XU Z H, ZHAO K, et al. Study on acoustic emission In-situ stress measurement techniques based on plane stress condition[J]. *Procedia Engineering*, 2011, 26: 1473-1481.
- [8] 康红普, 姜铁明, 张晓, 等. 晋城矿区地应力场研究及应用[J]. 岩石

- 力学与工程学报, 2009, 28(1): 1-8.
- KANG Hongpu, JIANG Tieming, ZHANG Xiao, et al. Research on in situ stress field in Jincheng mining area and its application[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(1): 1-8.
- [9] 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.
- ZHANG Jian, KANG Hongpu, LIU Aiqing, et al. Distribution law of underground in situ stress field in Xishan coal mine field, Shanxi Province[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(12): 4006-4016.
- [10] 张延新, 蔡美峰, 王克忠. 平顶山—矿地应力分布特征研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(23): 4033-4037.
- ZHANG Yanxin, CAI Meifeng, WANG Kezhong. Study on distribution characteristics of in situ stresses for Pingdingshan No.1 mine[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(23): 4033-4037.
- [11] 蔡美峰, 郭奇峰, 李远, 等. 平煤十矿地应力测量及其应用[J]. *北京科技大学学报*, 2013, 35(11): 1399-1406.
- CAI Meifeng, GUO Qifeng, LI Yuan, et al. In situ stress measurement and its application in the 10th Mine of Pingdingshan Coal Group[J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2013, 35(11): 1399-1406.
- [12] 刘泉声, 刘恺德. 淮南矿区深部地应力场特征研究[J]. *岩土力学*, 2012, 33(7): 2089-2096.
- LIU Quansheng, LIU Kaide. Characteristics of in situ stress field for deep levels in Huainan coal mine[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33(7): 2089-2096.
- [13] 李鹏, 苗胜军. 中国煤矿矿区地应力场特征与断层活动性分析[J]. *煤炭学报*, 2016, 41(S2): 319-329.
- LI Peng, MIAO Shengjun. Analysis of the characteristics of in situ stress field and fault activity in the coal mining area of China[J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(S2): 319-329.
- [14] KANG H, ZHANG X, SI L, et al. In-situ stress measurements and stress distribution characteristics in underground coal mines in China[J]. *Engineering Geology*, 2010, 116(3/4): 333-345.
- [15] 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(1): 23-33.
- KANG Hongpu, YI Bingding, GAO Fuqiang, et al. Database and characteristics of underground in situ stress distribution in Chinese coal mines[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(1): 23-33.
- [16] 蒙伟, 何川, 张钧博, 等. 高地温高地应力下岩体初始地应力场反演分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2020, 39(4): 749-760.
- MENG Wei, HE Chuan, ZHANG Junbo, et al. Inverse analysis of the initial geostress field of rock masses under high geo-temperature and high geostress[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, 39(4): 749-760.
- [17] 张延新, 宋常胜, 蔡美峰, 等. 深孔水压致裂地应力测量及应力场反演分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, 29(4): 778-786.
- ZHANG Yanxin, SONG Changsheng, CAI Meifeng, et al. Geostress measurements by hydraulic fracturing method at great depth of boreholes and numerical modelling predictions of stress field[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(4): 778-786.
- [18] LI G, MIZUTA Y, ISHIDA T, et al. Stress field determination from local stress measurements by numerical modelling[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2009, 46(1): 138-147.
- [19] FENG J, SHANG L, LI X, et al. 3D numerical simulation of heterogeneous in situ stress field in low-permeability reservoirs[J]. *Petroleum Science*, 2019, 16(5): 939-955.
- [20] 余大军, 杨张杰, 郭运华, 等. 基于FLAC<sup>3D</sup>横观各向同性模型的煤矿井田初始地应力场反演方法[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(10): 3427-3434.
- YU Dajun, YANG Zhangjie, GUO Yunhua, et al. Inversion method of initial geostress in coal mine field based on FLAC<sup>3D</sup> transverse isotropic model[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(10): 3427-3434.
- [21] 李飞, 周家兴, 王金安. 基于稀少样本数据的地应力场反演重构方法[J]. *煤炭学报*, 2019, 44(5): 1421-1431.
- LI Fei, ZHOU Jiaying, WANG Jin'an. Back-analysis and reconstruction method of in situ stress field based on limited sample data[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(5): 1421-1431.
- [22] KHADEMIAN Z, SHAHRIAR K, GHAROUNI NIK M. Developing an algorithm to estimate in situ stresses using a hybrid numerical method based on local stress measurement[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2012, 55: 80-85.
- [23] ZHANG S, LV J, YUAN X, et al. BP neural network with genetic algorithm optimization for prediction of geo-stress state from wellbore pressures[J]. *International Journal of Computational Intelligence and Applications*, 2016, 15(3): 1650013.
- [24] MATSUKI K, NAKAMA S, SATO T. Estimation of regional stress by FEM for a heterogeneous rock mass with a large fault[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2009, 46(1): 31-50.
- [25] HAN J, ZHANG H, LIANG B, et al. Influence of large syncline on in situ stress field: A case study of the Kaiping Coalfield, China[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2016, 49(11): 4423-4440.
- [26] YIN S, XIE R, WU Z, et al. In situ stress heterogeneity in a highly developed strike-slip fault zone and its effect on the distribution of tight gases: A 3D finite element simulation study[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2019, 99: 75-91.
- [27] 王胜本, 张晓. 煤矿井下地质构造与地应力的关系[J]. *煤炭学报*, 2008, 33(7): 738-742.
- WANG Shengben, ZHANG Xiao. Relation between geological structures and in situ stresses in underground coal mines[J]. *Journal of China Coal Society*, 2008, 33(7): 738-742.
- [28] 陈群策, 毛吉震, 侯砚和. 利用地应力实测数据讨论地形对地应力的影响[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(23): 3990-3995.
- CHEN Qunce, MAO Jizhen, HOU Yanhe. Study on influence of topography on in situ stress by interpretation of measurement data of in situ stress[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(23): 3990-3995.
- [29] 陈世杰, 肖明, 陈俊涛, 等. 断层对地应力场方向的扰动规律及反演分析方法[J]. *岩石力学与工程学报*, 2020, 39(7): 1434-1444.
- CHEN Shijie, XIAO Ming, CHEN Juntao, et al. Disturbance law of

- faults to in situ stress field directions and its inversion analysis method[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, 39(7): 1434–1444.
- [30] LIU J, YANG H, WU X, et al. The in situ stress field and micro-scale controlling factors in the Ordos Basin, central China[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2020, 135: 104482.
- [31] 康红普, 吴志刚, 高富强, 等. 煤矿井下地质构造对地应力分布的影响[J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, 31(S1): 2674–2680.  
KANG Hongpu, WU Zhigang, GAO Fuqiang, et al. Effect of geological structures on in situ stress distribution in underground coal mines[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(S1): 2674–2680.
- [32] 翁剑桥, 曾联波, 吕文雅, 等. 断层附近地应力扰动带宽度及其影响因素[J]. *地质力学学报*, 2020, 26(1): 39–47.  
WENG Jianqiao, ZENG Lianbo, LYU Wenya, et al. Width of stress disturbed zone near fault and its influencing factors[J]. *Journal of Geomechanics*, 2020, 26(1): 39–47.
- [33] ZHOU Z, CHEN Z, WANG B, et al. Study on the applicability of various In-situ stress inversion methods and their application on sinistral strike-slip faults[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2023, 56(4): 3093–3113.
- [34] LI Z, LIU X, YANG Y, et al. Influences of lithology on in situ stress field in low permeability reservoirs in Bonan Oilfield, Bohai Bay Basin, China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2019, 46(4): 729–738.
- [35] 郭德勇, 揣筱升, 张建国, 等. 平顶山矿区构造应力场演化规律及分布特征[J]. *岩石力学与工程学报*, 2022, 41(6): 1208–1222.  
GUO Deyong, CHUAI Xiaosheng, ZHANG Jianguo, et al. The evolution pattern and distribution characteristics of tectonic stress field in Pingdingshan mining area[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2022, 41(6): 1208–1222.
- [36] 徐芝纶. 弹性力学简明教程 [M]. 4 版. 北京: 高等教育出版社, 2013.
- [37] 河南平宝煤业有限公司. 河南平宝煤业有限公司首山一矿矿井生产地质报告[R]. 河南: 河南平宝煤业有限公司, 2014.
- [38] 王平. 地质力学方法研究: 不同构造力作用下地应力的类型和分布[J]. *石油学报*, 1992, 13(1): 1–12.  
WANG Ping. A geomechanical technique—Types and distribution of geostress under various tectonic forces[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 1992, 13(1): 1–12.
- [39] BROWN E T, HOEK E. Trends in relationships between measured in situ stresses and depth[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1978, 15(4): 211–215.
- [40] 景锋, 盛谦, 张勇慧, 等. 中国大陆浅层地壳实测地应力分布规律研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, 26(10): 2056–2062.  
JING Feng, SHENG Qian, ZHANG Yonghui, et al. Research on distribution rule of shallow crustal geostress in China mainland[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(10): 2056–2062.
- [41] 苏生瑞. 断裂构造对地应力场的影响及其工程意义[J]. *岩石力学与工程学报*, 2002, 21(2): 296.  
SU Shengrui. Influence of fault structure on geostress field and its engineering significance[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2002, 21(2): 296.
- [42] 吴顺川. 岩石力学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2021.