

# 双鸭山矿区深部地应力分布规律与区域构造作用分析

赵善坤<sup>1,2</sup>, 张宁博<sup>1,2</sup>, 张广辉<sup>1,2</sup>, 李志国<sup>3</sup>, 舒龙勇<sup>1,2</sup>

(1. 煤炭科学技术研究院有限公司 安全分院, 北京 100013; 2. 煤炭科学研究总院 煤炭资源高效开采与洁净利用  
国家重点实验室, 北京 100013; 3. 黑龙江龙煤矿业控股集团 双鸭山矿业分公司, 黑龙江 双鸭山 155100)

**摘要:**采用空心包体三维应力解除法对双鸭山矿区 7 个矿井不同开采水平的 22 个测点进行了地应力实测分析。受多期地质构造运动复合叠加作用的影响, 实测所得地应力数据离散型较大, 但整体表现为深部属于以水平应力为主, 且最大主应力大多在 30 MPa 以上的  $\sigma_H > \sigma_h > \sigma_v$  型高地应力场。最大主应力、侧压系数以及水平差应力整体上均随深度的增加而增大。深部最大主应力方向平均为  $169.73^\circ$ , 总体趋于 NW—SE 方向, 水平差应力均值为 17.52 MPa, 主应力回归方程中应力梯度和常数项比值悬殊, 表明该区域岩体受剪切作用显著, 与现场巷道围岩破碎、巷道动压灾害显现频繁相对应。此外, 通过对双鸭山煤田区域构造空间展布特征分析推断得出区域应力场呈“山”字形分布, 是长期受近南北挤压力作用而发生力学性质转变的结果, 结合区域内地应力实测结果, 可作为矿井深部开拓设计和区域动力区划的重要参考。

**关键词:**地应力; 区域构造作用; 深部开采; 双鸭山矿区

中图分类号: TD311 文献标志码: A 文章编号: 0253-2336(2018)07-0026-07

## Analysis on stress distribution law of deep stratum and effect of regional tectonics in Shuangyashan Coal Mining Area

ZHAO Shankun<sup>1,2</sup>, ZHANG Ningbo<sup>1,2</sup>, ZHANG Guanghui<sup>1,2</sup>, LI Zhiguo<sup>3</sup>, SHU Longyong<sup>1,2</sup>

(1. Mine Safety Branch, China Coal Research Institute, Beijing 100013, China; 2. National Key Lab of Coal Resources High Efficient Mining and Clean Utilization, China Coal Research Institute, Beijing 100013, China; 3. Shuangyashan Branch, Heilongjiang Longmei Mining Holding Group Co., Ltd., Shuangyashan 155100, China)

**Abstract:** In-situ stresses are measured at 22 different points in different mining level from seven coal mines of Shuangyashan coal mining area by means of boring stress-relief method with hollow inclusion triaxial strain gauge. Though the stress measurement data discreteness is very great under the influence of the composite superimposition of multi-stage tectonic movement, the horizontal stress is predominate in depth and the value of the maximum horizontal principal stress is more than 30 MPa, the type of stress field belongs to  $\sigma_H > \sigma_h > \sigma_v$ . The variation of maximum horizontal principal stress, coefficient of horizontal pressure and horizontal differential stress almost linearly increase with depth, average angle of the maximum principal stress direction is  $169.73^\circ$ , which is almost NW—SE nearly horizontal. The regional rock mass is obviously affected by shear and the dynamic pressure disasters is frequently because the value of average horizontal differential stress is 17.52 MPa and the ratio of stress gradient and constant term is larger in the principal stress regression equation. Furthermore, according to the distribution of tectonic space in Shuangyashan coalfield, the geologic stress distribute in "mountain" glyph which was made by the north-south extrusion in long time. Combined with the results of in-situ stress, it can be used as an important reference for deep mining design and regional dynamic zone.

**Key words:** in-situ stress; geological tectonics; distribution laws; deep mining; Shuangyashan Coal Mining Area

收稿日期: 2018-02-09; 责任编辑: 赵 瑞 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2018.07.004

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金资助项目(51704159, 51674143); 国家重点研究发展计划资助项目(2017YFC0804203); 国家科技重大专项资助项目(2016ZX05045003-006-002); 中国煤炭科工集团科技创新基金重点资助项目(2014ZD008)

作者简介: 赵善坤(1982—), 男, 辽宁葫芦岛人, 副研究员, 博士研究生。Tel: 010-84261895, E-mail: zhaoshankuncom@163.com

引用格式: 赵善坤, 张宁博, 张广辉, 等. 双鸭山矿区深部地应力分布规律与区域构造作用分析[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(7): 26-32.

ZHAO Shankun, ZHANG Ningbo, ZHANG Guanghui, et al. Analysis on stress distribution law of deep stratum and effect of regional tectonics in Shuangyashan Coal Mining Area[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(7): 26-32.

## 0 引言

地应力是不同地质时期地壳运动累积形成的天然应力,也是引起地下工程围岩变形破坏和结构失稳的根本作用力,主要由自重应力、构造应力和剩余应力等组成<sup>[1]</sup>。其中自重应力由岩体自身重力引起,其分布特征和量值估算相对简单。构造应力由地质构造运动累积形成,分活动构造应力和残余构造应力。其中活动构造应力因影响范围的不同分为区域构造应力和局部构造应力。层状赋存特征的煤系地层其构造应力受水平方向构造运动影响较大,其大小、方向与构造运动的类型规模、时空演化以及经历次数相关。随着时间的推移和外部扰动因素的影响,构造应力的量值大小和空间分布不断发生变化,难以用函数进行评估。准确的地应力资料不仅是深部地下工程开采设计的基础,分析深部巷道围岩产生非连续大变形和冲击地压等动力灾害的必备条件,更是制约深部煤炭未来精准开采和安全高效开采的关键因素。

目前,国内外地应力的实测方法主要以测量岩体中应力应变为依据的力学法和以测量岩体中声发射、电阻率等信息变化为依据的地球物理法为主,辅以区域地质构造和实测地点岩体破坏的特征,并结合岩石力学等相关理论,综合确定地应力的方向<sup>[2-4]</sup>。其中,应力解除法因其测量精度高(单孔即可获得测点的三维应力)、施工简单且适用性强的特点,被广泛应用于岩土工程的地应力测量。通过对区域不同深度测点地应力实测的基础上,结合区域地质构造特征和数值反演分析,即可获得研究工程区域的地应力分布特征,进而指导工程设计和安全决策<sup>[5]</sup>。蔡美峰等<sup>[6]</sup>采用完全温度补偿空心包体应变计测量了玲珑金矿主矿区7个水平的地应力,并得出其随采深的分布规律,王连国等<sup>[7]</sup>通过采用钻孔应力解除法系统对霍州矿区的地应力进行实测,并分析了地应力与巷道支护的关系,王迎超等<sup>[8]</sup>在研究区域构造与实测地应力数据的基础上,将平顶山矿区按地应力场类型和空间特征划分为3个区域;康红普等<sup>[9-10]</sup>在实测地应力的基础上,提出支护应力场的概念,并对潞安矿区、晋城矿区的地应力分布规律进行了分析;肖同强等<sup>[11]</sup>基于地应力实测数据,模拟分析了巨野煤田深部构造区域地应力分布与岩层稳定性的问题。

笔者采用空心包体三维应力解除法对双鸭山矿

区7个矿井22个测点进行了地应力实测,查清了矿区的地应力场类型及最大主应力、侧向应力等随深部变化的分布规律,分析了矿区地质构造现状及其运移演化规律,推断出区域地质应力场的分布特征,为双鸭山矿区深部煤炭的安全开采提供了有力的数据参考。

## 1 双鸭山矿区地应力测量

本次地应力测试主要采用 KBJ 型 12 通道空心包体应变仪进行。煤矿根据开采水平和采区巷道岩性的不同布置 3~4 个测点,测点主要选择在周边未受工程扰动或者扰动应力影响相对较小、无明显构造影响的岩石巷道或者永久硐室内,测试过程打钻施工及测试人员相对固定,应力解除过程中时刻确保数据线平直紧绷,套孔钻头每 2 cm 读取一次应变值,解除深度 30~45 cm,确保测量数据的稳定可靠。具体测点布置及测试结果见表 1。通过测点应变-解除距离变化曲线可以看出,随着套孔解除深度的增加,各组应变片从零开始逐渐缓慢增加,当解除接近测量断面时,应变曲线达到最大值后向反方向变化并趋于稳定,应力解除曲线连续完整,数据有效,如图 1 所示。

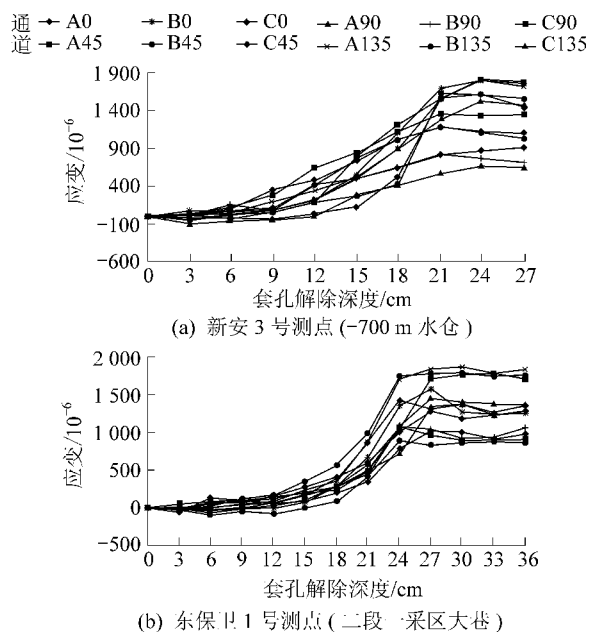


图1 部分应力解除过程实测曲线

Fig.1 Measured curves of partial stress relief process

## 2 矿区地应力场特征分析

### 2.1 矿区地应力场类型

根据地应力3个主应力的空间关系是目前研究

地应力场分布特征、划分地应力场类型的主要依据<sup>[12]</sup>。但由于地应力状态受区域地形地貌及构造运动等因素的影响,其最大主应力 $\sigma_H$ 、最小主应力 $\sigma_h$ 和垂直应力 $\sigma_v$ 三个主应力的方向及大小在时间和空间上是非稳定的。因此,基于现场实测结果并结合区域地质构造分布,是研究其地应力场类型的合理途径。

由表1可以看出,有21个测点的最大主应力近似于水平方向,其3个主应力的方向关系也以 $\sigma_H >$

$\sigma_h > \sigma_v$ 为主。其中仅新安煤矿3号测点中间主应力为垂直应力( $\sigma_H > \sigma_v > \sigma_h$ ),这应与测点周边分布6组正断层相关。说明本区域是以水平应力为主的大地动力场。同时,根据Anderson依地应力大小而划分断层类型标准,该区域(埋深为435~699 m)大部分以水平主应力占主导地位,垂直主应力为最小主应力,属逆断型应力状态,有利于逆断层的发育活动。这与双鸭山矿区多逆断层发育的事实相符合。

表1 双鸭山矿区地应力测量结果

Table 1 In-situ stress measurement results in Shuangyashan Coal Mining Area

序号	测点位置	深度/m	最大主应力			中间主应力			最小主应力		
			数值/ MPa	方向/ (°)	倾角/ (°)	数值/ MPa	方向/ (°)	倾角/ (°)	数值/ MPa	方向/ (°)	倾角/ (°)
1	新安-700 m 水仓	698	40.57	198.74	5.99	20.71	289.71	9.05	19.92	255.63	-79.12
2	新安-500 m 轨道巷	500	43.62	222.76	9.55	19.60	313.11	6.98	15.72	259.56	-78.12
3	新安七采区-700 m 水仓	696	33.74	192.17	-6.01	20.33	331.95	-82.15	17.05	101.64	-5.03
4	新安七采区输送带石门	497	37.29	238.58	-3.91	19.95	345.23	-15.14	15.69	134.12	-74.33
5	双阳西四采区右大巷	435	28.06	174.50	8.79	17.52	81.86	16.58	14.21	111.37	-71.11
6	双阳西四采区石门	436	30.09	161.70	-2.48	15.96	70.98	-16.26	14.67	260.14	-73.54
7	双阳西二区轨道上山	602	49.24	138.89	-5.76	20.13	48.21	-6.76	19.17	268.97	-81.10
8	集贤四片车场	573	36.61	165.77	-7.90	21.57	78.35	17.97	18.61	233.01	70.25
9	集贤二段入风斜井	446	33.03	173.64	-12.05	15.54	86.93	13.59	14.62	233.34	72.32
10	集贤井底车场	485	38.91	192.26	-2.25	19.14	283.60	-18.33	15.53	95.51	-71.52
11	东二-490 m 回风石门	483	32.25	107.28	-2.54	17.38	17.73	10.01	15.01	183.17	79.65
12	东二南二下延回风巷	495	30.98	162.82	8.57	19.39	69.98	18.12	14.60	97.03	-70.81
13	东荣二矿-440 m 轨道巷	440	35.96	168.84	-3.91	16.65	79.33	14.98	13.97	244.01	74.50
14	东保卫一采区西大巷	500	45.41	225.05	-0.84	18.05	315.09	-2.63	17.45	117.38	-87.23
15	东保卫-640 m 抽采硐室	640	52.58	248.99	-9.04	22.91	341.52	-9.50	21.96	116.13	-76.83
16	东保卫-690 m 石门钻场	699	39.64	194.31	13.88	26.02	283.54	-3.15	23.35	181.02	-75.75
17	东荣三矿东十前石门	552	30.88	125.36	-2.56	15.82	35.73	10.11	13.99	201.95	78.62
18	东荣三矿东五片车场	552	33.91	113.27	8.19	17.35	27.69	14.27	14.12	197.71	-80.81
19	东荣三矿东三上山	501	27.16	117.92	-3.28	14.77	30.18	13.19	12.91	36.29	74.52
20	东荣一矿-450 m 北翼巷	516	28.41	75.23	13.15	15.17	345.65	5.25	12.93	151.19	83.15
21	东荣一矿北翼回风巷	506	29.71	67.12	3.14	14.96	351.83	3.82	12.97	158.73	-75.61
22	东荣一矿北翼轨道巷	516	31.92	70.84	7.26	15.51	337.26	1.97	13.35	160.09	72.59

同时,该矿区地应力量级大部分在30 MPa以上,占总测点数量的81.8%,根据应力量级相关判断标准:小于10 MPa为低应力区;10~18 MPa为中等应力区;18~30 MPa为高应力区;大于30 MPa为超高应力区,因此本区域属于典型的高-超高应力区。

## 2.2 矿区主应力方向分布规律

矿区内各测点均有2个主应力近似于水平方向,其中最大主应力方向介于67.12°~248.99°,平均为169.73°,总体属于NW—SE向;其中新安矿最大主应力方向为192.17°~238.58°,平均为213.06°,属于NE—SW向;双阳矿为174.5°~138.89°,平均为

158.36°, 属于 NW—SE 向; 集贤矿为 165.77°~192.26°, 平均为 177.22°, 属于 NW—SE 向; 东保卫矿为 194.31°~248.99°, 平均为 222.78°, 属于 NE—SW 向; 东荣一矿为 67.12°~75.23°, 平均为 71.06°, 属于 NE—SW 向; 东荣二矿为 107.28°~168.84°, 平均为 146.31°, 属于 NE—SW 向; 东荣三矿为 113.27°~125.36°, 平均为 118.85°, 属于 NE—SW 向。

从表 1 可以看出, 同一矿区内的不同区域其主应力方向受地形地貌、地层岩石组合、局部构造等因素影响, 最大主应力的变化较大, 离散型较强, 这正反映了本区不同时期地质构造运动的复合叠加作用的复杂性。同时, 根据黑龙江省及邻区震源机制结果可知, 该区主张应力场的优势方向为 NW 向, 主压应力的优势方向为北东向, 整个区域以水平应力场起主导作用, 这与现场测试结果均比较接近<sup>[13]</sup>。

### 2.3 矿区主应力方向分布规律

该区域最大水平主应力的取值范围为 27.16~49.24 MPa, 平均为 35.68 MPa; 最小水平主应力的取值范围为 14.77~26.02 MPa, 平均为 18.38 MPa; 垂直主应力的取值范围为 12.91~23.35 MPa, 平均为 15.99 MPa。3 个主应力大小随深度变化如图 2 所示。3 个主应力的数据分布在趋势线的两侧, 表现为随埋深呈近似线性增加的关系。采用最小二乘法

对 3 个主应力随采深的变化进行线性回归拟合, 拟合结果如下:

$$\begin{cases} \sigma_H = 5.38H + 341.16 & (R^2 = 0.200\ 1) \\ \sigma_h = 20.18H + 163.96 & (R^2 = 0.488\ 8) \\ \sigma_v = 21.50H + 191.09 & (R^2 = 0.572\ 2) \end{cases} \quad (1)$$

从图 2 可知, 数据总体分布存在较大离散型, 尤其是进入深部, 采深超过 600 m 以后, 其离散型更加明显, 3 个主应力回归方程的相关系数  $R^2$  较小也说明了这一点。这可能与矿区开采扰动、局部地质构造及不同地区的地质条件差异等因素有关。这与该区域受多期地质构造运动影响, 区域构造发育且分布复杂密切相关。

同时, 由于主应力的回归方程中, 应力梯度和常数项是区域构造作用强弱的间接反映。应力梯度小而常数项大, 这表明该区域受水平构造作用强烈, 反之这表明该区域水平构造作用不明显。其中, 该区域 3 个主应力回归方程中均有较大的常数项, 尤其是最大水平主应力  $\sigma_H$  的应力梯度和常数项相差悬殊, 其常数项近似其他 2 个主应力常数项的 2 倍, 说明该区域的水平构造作用较强烈。此外, 该区域最大主应力  $\sigma_H$  的增长速率相对于最小主应力  $\sigma_h$  和垂直应力  $\sigma_v$  要缓慢一些, 不仅表明该区域地质构造运动复杂, 影响范围较大, 也从侧面验证了地球浅部区域以水平构造应力为主的论断<sup>[14]</sup>。

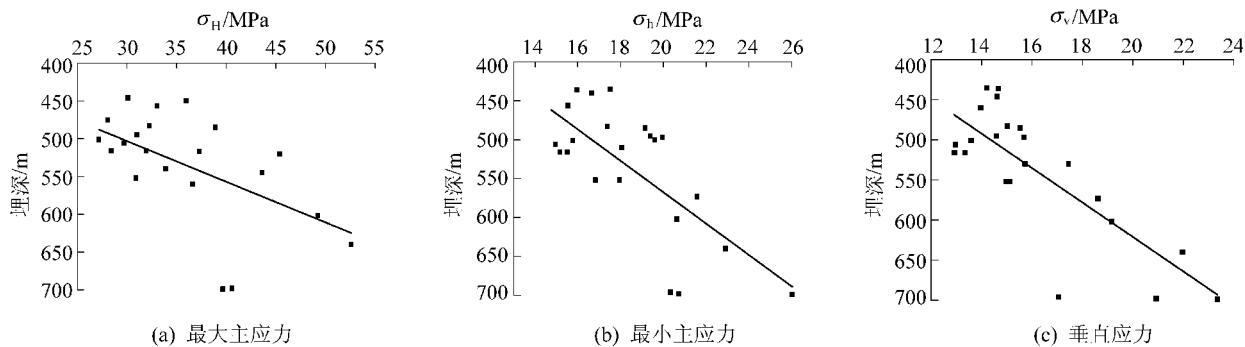


图 2 双鸭山矿区主应力随埋深分布变化

Fig.2 Variation of in-situ stress with depth in Shuangyashan Coal Mining Area

### 2.4 侧压系数随埋深变化分布规律

采用水平主应力与垂直应力的比值, 即侧压系数来描述地下某点的地应力状态和地应力随深度的变化规律, 用以表征水平构造应力和工程区地应力状态的方法已在全球广泛的应用<sup>[15]</sup>。笔者借鉴 Hoek-Brown 关于侧压系数随埋深  $H$  变化的双曲线拟合处理方法, 分析了双鸭山矿区最大主应力与垂直应力之比  $K_H$ 、最小主应力与垂直应力之比  $K_h$ 、平

均水平应力与垂直主应力之比  $K_{av}$  等 3 个主应力侧压系数随埋深  $H$  的变化规律, 其中  $H$  介于 435~699 m。以  $K=a/H+b$  (式中  $a$ 、 $b$  均为待定系数) 的形式回归分析了双鸭山矿区 3 个侧压系数随埋深的变化规律, 以及表示 3 个侧压系数分布取值范围的内外包络线, 如图 3 所示。其中, 为了彰显包络线的曲线性, 将埋深由实际的 400~700 m, 延伸到 200~1 000 m,  $X$  轴比值也有所扩展。



$$\begin{cases} K_H = \frac{700}{H} + 1.05 & \left( \frac{360}{H} + 0.91 < K_H < \frac{455}{H} + 2.31 \right) \\ K_h = \frac{270}{H} + 0.61 & \left( \frac{220}{H} + 0.43 < K_h < \frac{352}{H} + 0.75 \right) \\ K_{av} = \frac{498}{H} + 0.73 & \left( \frac{301}{H} + 0.75 < K_{av} < \frac{350}{H} + 1.35 \right) \end{cases} \quad (2)$$

从图3可以看出,3个侧压系数随埋深变化的趋势,在400~600 m处的分布较为集中,而在600 m以上的分布较为零散。其中 $K_H$ 的分布范围是2.05~2.66,平均为2.38; $K_h$ 的分布范围为1.00~1.25,平均为1.14; $K_{av}$ 的分布范围为1.44~1.86,平均为1.68。尽管该区域所得出的 $K_{av}$ 分布范围较Hork和Brown所得出的( $100/H+0.3 \leq K_{av} \leq 1500/H+0.5$ )偏小,但

由于该区域所测数据均属沉积岩,其力学性质和储能特性较变质岩、岩浆岩相差较大,同时煤系地层中的断层、褶皱、已采空区以及采动应力等因素的影响,对其分布范围也有较大影响。但其整体特征与Hoek和Brown所测得结果相似,且其整体分布也落在康里普<sup>[13]</sup>对中国煤矿所划的区间之内。此外,3个侧压系数均值均大于1,表明该区域水平构造应力影响显著,随着深度的增加,在1200 m的范围内,水平构造应力的主导作用依旧明显。一方面该结论与地层浅部,构造应力处于主要地位相吻合,再次证实了该区域的地应力场经多次构造运动影响复杂,另一方面也表明不同地质时期的构造运动在地层不同深度处均留下印迹,地层应力分布复杂多变。

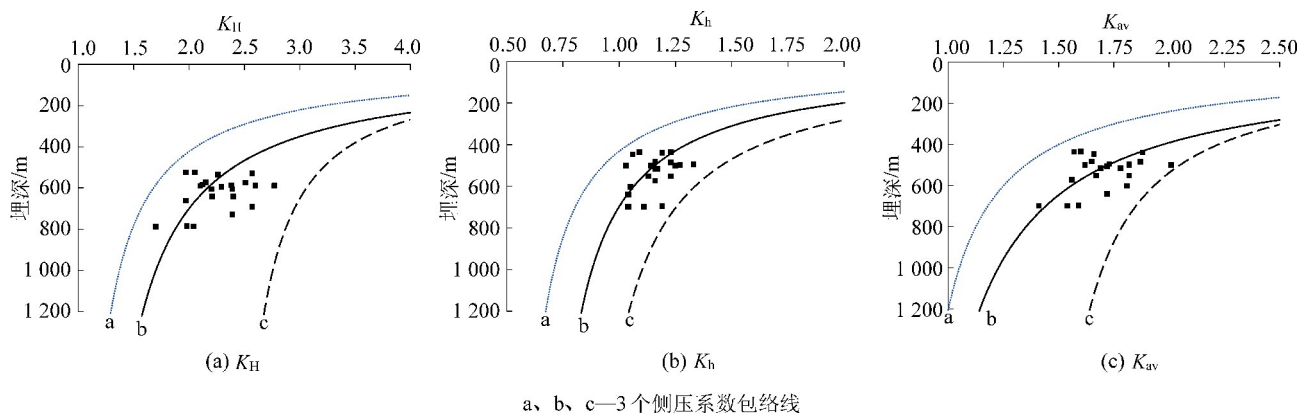


图3 双鸭山矿区3个侧压系数随埋深变化

Fig.3 Three lateral pressure coefficients variation with depth in Shuangyashan Coal Mine Area

## 2.5 水平差应力随埋深变化分布规律

在一定条件下,岩体总体表现出抗压不抗拉的特征。对于煤系地层的沉积岩来说,水平差应力的大小直接影响到地层岩体的赋存特性以及地下工程体的稳定特性。较大的水平差应力(剪应力)不仅会导致褶皱、断层等地质构造的形成,更容易造成岩体发生节理裂隙、原生裂纹等,岩石质量指标RQD值也会大幅降低。同时,对于地下工程体而言,较大的剪应力易导致其围岩变形破坏,提高围岩的支护难度,对于煤矿巷道更易造成冲击地压等动力灾害的发生。

该区域的水平差应力随深度变化如图4所示。从图中可以看出, $\sigma_H - \sigma_h$ 的分布离散性较强,但整体上随埋深增加其值有增大的趋势,但线性相关性不强。这与杨树新<sup>[16]</sup>就中国大陆地区地应力场分析所得结果有一定差异。这除了与层状沉积特性的煤系地层结构有关,更与其所受构造应力控制、地形地

貌以及地下水等因素干扰相关。此外, $\sigma_H - \sigma_h$ 的值为10.54~29.67 MPa,平均为17.52 MPa。如此大的水平差应力表明该区域地层岩体受剪切作用显著,岩体完整性差,这与该区域大小断层发育、工作面顶板破碎,冒顶严重及巷道片帮、炸帮等现象突出相对应。这也解释了该区域集贤煤矿、新安煤矿以及东保卫煤矿等矿井冲击地压多发生在巷道,且多表现为顶底板变形的问题。

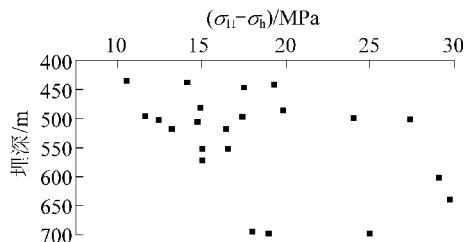


图4 双鸭山矿区水平差应力随埋深分布

Fig.4 Distribution of horizontal differential stress with buried depth in Shuangyashan Coal Mining Area

### 3 双鸭山煤田构造演化及控制特征

双鸭山煤田位于黑龙江东部,三江盆地西部,绥滨集贤拗陷的南部。自印支运动以来,双鸭山盆地所处的滨太平洋构造域受到二叠纪末与华北板块的碰撞拼合,以及中三叠世扬子板块与华北板块碰撞拼合的影响,不仅使得该区域长期处于近SN向挤压抬升的构造应力影响,也使得该区域三叠系地层区域性缺失。燕山期(侏罗纪早中期),随着环太平洋板块向欧亚板块俯冲的增强,该区域受自SE向NW挤压作用影响,形成了呈NNE展布的大型继承性挤压挠曲盆地,是双鸭山盆地的成型初期。四川期,随着依泽奈崎板块以NNW向高速率向欧亚板块的斜向俯冲,区域最大主应力方向沿顺时针向SN向挤压转变,地层呈现出EW走向构造发育。其中煤田南部主干断裂双鸭山逆冲断层呈NW—EW—NE方向延伸,与其配套的张扭性断裂发育地区呈NE向展布。同时燕山期所形成的逆掩断层或逆断层转化为正断层,表现为NNE向缩短和NW向伸展的特征。进入华北期后,由于太平洋板块向亚洲大陆俯冲方向的变化,东部区域应力场的性质发生改变,双鸭山盆地随之发生差异性沉降,桦南隆起因受到强烈挤压作用而全面抬升,使双鸭山盆地进一步剥蚀。进入喜山期后,受早期盆地抬升、剥蚀的影响,盆地形态呈向南侧倾斜的向斜构造。同时,在区域NW—SE向张拉作用和NNE向张性断裂活动的影响下,盆地表层发生拉张沉降。在晚第三纪和第四纪时期,由于东北地区主压应力场为NE向,近EW向断裂表现为张扭活动,同时盆地内NNE向断裂发生右旋走滑活动,煤田进一步形成<sup>[17]</sup>。

双鸭山矿区构造由近南北和近东西走向展布的次级隆起带拗陷带及弧形构造组成,总体呈一东西弧形展布的向斜构造。由于区域地质构造经历地质作用的多期性和内部结构的复杂性,局部地区构造应力场与大区域总体构造应力场可能不尽一致<sup>[18]</sup>。这与该区域不同矿井地应力的测量结果相对应。

东西向构造:西部构造分布整体较东部复杂,深部较浅部多变。其中东部与主压性结构面呈直交的张性断裂群,其破断面粗糙不平,无明显擦痕,破碎带宽度较小,透水性强,多为高角度的正断层,如七星轴张断裂等,区七星矿和东保卫矿井底车场及采区巷道施工困难,这与该区域是整个双鸭山矿区地应力最大的位置相对应。北东向中小型张扭性断裂

发育,以高角度正断层为主,断面平直光滑,沿倾向方向多有断裂分支出现,呈雁阵式展布。北西向压扭性断裂以逆断层为主,多产生在紧密褶皱附近且沿轴向分布,落差多在30 m以上,大多作为井田边界,如岭东煤矿的八井、十井等,该区域地应力方向变化较大,这与多期构造运动影响相对应。南北向构造:以具有继承性特征的褶曲构造为主。这些褶曲大多是短轴的中小型背斜,呈不对称分布,附近伴有岩浆岩侵入。其中马鞍山附近的横踏褶皱与弧形构造体系反接,说明区内弧形构造内侧应力对区内褶曲有增强作用。

由于局部的低级构造分布于主体构造之中,是局部应力场变化和边界条件不同的产物。因此,通过双鸭山煤田内构造空间展布特征可得出,西翼长而宽,东翼短较窄,“孤顶”挤压强烈而两翼散开的趋势。双鸭山向斜和七星向斜相对倾斜,并在内部马鞍山附近有帚状构造、秃顶山附近雁阵式构造存在,由此可推断区域应力场呈“山”字形分布,是长期受近南北挤压力作用而发生力学性质转变的结果,结合区域内地应力实测结果,可作为矿井深部开拓设计和区域动力区划的重要参考。

### 4 结 论

1) 双鸭山矿区因受多期地质构造运动复合叠加作用的影响,深部主应力方向变化较大,但2个主应力方向总体近似水平,最大主应力方向平均为169.73°,总体趋于NW—SE方向。绝大多数测点地应力场属于 $\sigma_H > \sigma_h > \sigma_v$ 型,即以水平应为主的大地动力场,与矿区内多逆断层发育相吻合。最大主应力在30 MPa以上占总测点数的81.8%,属于典型的高-超高地应力区,这与现场巷道变形严重、动压灾害显现频繁相对应。

2) 矿区最大、最小水平主应力虽整体表现为随深度的增加而增大的趋势,但数据分散性较大,尤其是超过600 m以后,离散型明显加强。这与区域内构造发育和开采扰动复杂相关,这一点通过主应力回归方程中应力梯度和常数项比值的悬殊关系可以说明。

3) 侧压系数以及水平差应力整体随深度的增加而增大,但离散性较强。其中水平差应力的均值在17.52 MPa,说明该区域岩石受剪切作用显著,岩体完整性差,这与该区域大小断层发育、工作面顶板破碎,冒顶严重及巷道片帮、炸帮等现象突出相对应。这也解释了该区域集贤煤矿、新安煤矿以及东

保卫煤矿等矿井冲击地压多发生在巷道且多表现为顶底板变形的问题。

4) 通过对双鸭山煤田区域构造空间展布特征分析推断得出区域应力场呈“山”字形分布,是长期受近南北挤压力作用而发生力学性质转变的结果,结合区域内地应力实测结果,可作为矿井深部开拓设计和区域动力区划的重要参考。

#### 参考文献(References):

- [1] 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.
- [2] LAVROV A. The Kaiser effect in rocks: principles and stress estimation techniques [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2003, 40(2): 151-171.
- [3] CHRISTIANSSON R. The latest development for in-situ rock stress measuring techniques[C]//Proceedings of the International Symposium on in-situ Rock Stress. Trondheim, Norway, 2006: 3-10.
- [4] 景 峰.中国大陆浅源地壳应力场分布规律及工程扰动特征研究[D].北京:中国科学院,2008:12-19.
- [5] 王成虎,张彦山,郭啟良,等.工程区地应力场的综合分析法研究[J].岩土工程学报,2011,33(10):1562-1568.  
WANG Chengyu, ZHANG Yanshan, GUO Qiliang, et al. New integrated analysis method to analyses stress regime of engineering area [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(10): 1562-1568.
- [6] 蔡美峰,刘卫东,李 远.玲珑金矿深部地应力测量及矿区地应力场分布规律[J].岩石力学与工程学报,2010,29(2):227-234.  
CAI Meifeng, LIU Weidong, LI Yuan. In-situ stress measurement at deep position of Linglong gold mine and distribution law of in-situ stress field in mine area [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(2): 227-234.
- [7] 王连国,陆银龙,杨新华,等.霍州矿区地应力分布规律实测研究[J].岩石力学与工程学报,2010,29(S1):2768-2775.  
WANG Lianguo, LU Yinglong, YANG Xinhua, et al. Study of distribution characteristic of in-situ stresses for Huozhou mining area [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(S1): 2768-2775.
- [8] 王迎超,靖洪文,陈坤福,等.平顶山矿区地应力分布规律与空间区划研究[J].岩石力学与工程学报,2014,33(S1):2620-2628.  
WANG Yingchao, JING Hongwen, CHEN Kunfu, et al. Study on distribution regularities and regional division of in-situ stress for Pingdingshan Mining Area [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(S1): 2620-2628.
- [9] 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.
- [10] 康红普,林 健,张 晓,等.潞安矿区井下地应力测量及分布规律研究[J].岩土力学,2010,31(3):827-833.  
KANG Hongpu, LIN Jian, ZHANG Xiao, et al. In-situ stress measurements and distribution laws in Lu'an underground coal mines [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(3): 827-833.
- [11] 肖同强,支光辉,张治高.深部构造区域地应力分布与巷道稳定关系研究[J].采矿与安全工程学报,2013,30(5):659-664.  
XIAO Tongqiang, ZHI Guanghui, ZHANG Zhigao. Relationship between ground stress distribution and roadway stability in deep tectonic region [J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2013, 30(5): 659-664.
- [12] 孙卫春,闵 弘,王川婴.三维地应力测量及地质力学分析[J].岩石力学与工程学报,2008,27(S2):3778-3785.  
SUN Weichun, MIN Hong, WANG Chuanying. Three dimensional geostress measurement and geomechanical analysis [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(S2): 3778-3785.
- [13] 杨继权,王秀琴,刘殿生,等.黑龙江省大地构造单元划分及特征[J].世界地质,2007,26(4):426-436.  
YANG Jiquan, WANG Xiuqing, LIU Diansheng, et al. Division and characters of geotectonic unit of Heilongjiang Province [J]. Global Geology, 2007, 26(4): 426-436.
- [14] BROWN E T, HOEK E. Technical note trends in relationships between measured in-situ stress and depth [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1978, 15(4): 211-215.
- [15] 陈志敏.不同岩性侧压比随深度变化规律探讨[J].西部探矿工程,2006(6):99-103.  
CHEN Zhimin. Discussion on change law of different lithology's side pressure ratio with depths [J]. West-China Exploration Engineering, 2006(6): 99-103.
- [16] 杨树新.中国陆域地壳应力场分布特征研究[D].北京:北京交通大学,2013.
- [17] 曹成润,郑庆道.黑龙江省东部残留盆地群构造演化特征及其油气勘探意义[J].吉林大学学报:地球科学版,2003,33(2):167-172.  
CAO Chengrun, ZHENG Qingdao. Structural evolution features and its significance of hydrocarbon exploration in relict basin group, eastern Heilongjiang province [J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2003, 33(2): 167-172.
- [18] 张延新,蔡美峰.地应力场与地质构造运动关系研究[J].铜业工程,2004,21(3):7-9.  
ZHANG Yanxin, CAI Meifeng. Study on the relationship between in-situ stress field and tectonization [J]. Copper Engineering, 2004, 21(3): 7-9.