

# 万福煤矿地应力场分布规律及其与地质构造的关系

蔡美峰<sup>1</sup>, 彭 华<sup>1,2</sup>, 乔 兰<sup>1</sup>, 马秀敏<sup>2</sup>

(1. 北京科技大学 土木与环境工程学院, 北京 100083; 2. 中国地质科学院 地质力学研究所, 北京 100080)

**摘 要:** 为了保证山东万福煤矿矿井建设和开采的安全, 在前期勘探阶段即采用水压致裂法进行了矿区地应力场测量. 分析了矿区的区域地质构造与现今构造运动特征、地震活动性及区域构造应力场, 以及根据实测结果获得的矿区地应力场分布规律, 确立了矿区实测地应力场与区域地质构造的一致性关系.

**关键词:** 地应力场; 分布规律; 地质构造

**中图分类号:** P548      **文献标识码:** A

## Distribution law of in-situ stress field and its relationship to regional geological structures in Wanfu Coal Mine

CAI Mei-feng<sup>1</sup>, PENG Hua<sup>1,2</sup>, QIAO Lan<sup>1</sup>, MA Xiu-min<sup>2</sup>

(1. School of Civil and Environment Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. Research Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100080, China)

**Abstract:** In order to ensure safety of capital construction and mining operation in Wanfu Coal Mine, in-situ stress measurement with hydraulic fracturing technique was carried out in the early exploration stage. The characteristics of regional geological structures and tectonic movements, as well as the earthquake activities and regional tectonic stress field were analyzed. Based on results of hydraulic fracturing measurement, the distribution law of in-situ stress field in Wanfu Coal Mine was obtained. Through comparison analysis, the distribution law of in-situ stress field obtained by the practical measurement shows good agreement with the regional tectonic stress field.

**Key words:** in-situ stress field; distribution law; tectonic structures

地应力是存在于地层中的未受工程扰动的天然应力, 它是引起采矿工程变形和破坏的根本作用力, 是进行围岩稳定性分析, 实现采矿工程开采设计和决策科学化的必要前提条件<sup>[1]</sup>. 产生地应力的原因十分复杂. 几十年的实测和理论分析表明, 重力作用和构造运动是引起地应力的主要原因, 其中尤以水平方向的构造运动对地应力的形成影响最大. 当前的应力状态主要受最近一次的构造运动所控制, 但也与历史上的构造运动有关<sup>[2]</sup>. 万福煤矿是一座在建矿山, 该矿位于山东省巨野县和成武县的交界处, 是巨野煤田的一部分. 煤田冲积层厚达数百米, 煤层埋藏深, 矿井建成后生产水平将全部位于千米以下, 是迄今为止我国开采深度最大的矿井. 在这样大的深部进行施工和开采, 是对传统采矿技术的一个巨大的挑战. 各类支护工程的设计、施工, 开采过程的安全组织与实施, 以岩爆、冲击地压等为主要特征的冲击性动力地质灾害的预防与控制都将是矿山必须面对的问题, 而这些问题都与地应力有关<sup>[3]</sup>. 为此, 在进行地质勘

探的同时, 采用水压致裂法进行了矿区地应力现场实测. 本文根据实测结果分析了矿区地应力场分布规律及其与地质构造的关系.

## 1 区域地质构造及现今构造运动特征

### 1.1 区域地质构造

鲁西南广阔平原区是华北新生代沉降区的一部分, 它是由东明拗陷、济宁拗陷和埕宁伏隆起等几部分组成, 各大型拗陷内部又有若干次级凹陷和凸起. 万福煤矿所在区域为菏泽 - 济宁缓倾斜拗陷区, 该拗陷区呈 SN 向展布于鲁西南菏泽 - 曹县 - 济宁一带. 其西、南分别为聊城 - 兰考断裂、新商断裂, 东部为鲁中南隆起, 近 EW、近 SN 和 NW 向断裂较为发育, 以正断层为主. 基底为古生界及震旦亚界, 缺失下地三系, 上覆上第三系和第四系, 厚度 400 ~ 1 200 m. 该单元以正磁异常和重力异常为主, 西界为 NE 向的异常梯度带, 北界为 NWW 向的异常梯度带.

万福煤矿矿区没有大的断裂带, 但南北向和东西向各有 2 条断裂, 南北为曹县断裂和巨野断裂, 东西为郓城断裂和菏泽断裂. 该区近 EW、近 SN 和 NW 向断裂较为发育, 以正断层为主. 矿区属于次不稳定区, 地壳呈镶嵌状, 地壳断裂和盖层断裂较为发育, 以正重磁异常为主, 西部为 NE 向异常梯度带, 北部为 NWW 向异常梯度带, 地震基本烈度 VI ~ VII 度<sup>[4]</sup>. 井田断裂构造体系如图 1 所示.

### 1.2 现今构造运动特征

早第三纪时, 以广饶 - 齐河断裂和聊城 - 兰考断裂为界, 各拗陷强烈发育, 控制着第三系的巨厚沉积; 晚第三纪初继续有充填式沉积, 其后则普遍发生超复. 到晚第三纪 - 第四纪仍有继承性活动, 拗陷范围不断扩展, 越过上述两断裂到达今日山区和平原之界线<sup>[5]</sup>. 第四纪以来, 华北平原已浑然一体, 呈总体沉降的形势. 济阳拗陷内, 早第三纪中晚期有玄武岩喷发, 至晚第三纪 - 第四纪初虽然喷发规模有所减弱, 但范围仍较广; 控制隆起、拗陷的边界断裂继续出现 400 ~ 1 000 m 的落差. 泰、沂、蒙山区继承性抬升, 由弧形断裂控制的单断盆地自东向西收缩, 莱芜、蒙山断裂东段第四纪张性断距只有 1 ~ 2 m, 而由这些断裂控制的盆地西段则有上百米的新沉积, 表明断裂活动西强东弱. 鲁西南开始沉降, 形成新拗陷区, 沉降幅度东小西大, 呈阶梯式, 由于东西向断裂第四纪活动的强弱不同, 又有南大北小的沉降差异.

沂沭断裂带新生代以来表现以压性活动为主, 东西两地堇上升隆起, 断裂带内新地层几乎全部缺失. 第四纪中 - 晚期受北西向断裂切割, 带内局部发生断陷, 形成 3 个小型盆地, 沉降幅度北小南大.

山东地壳厚度在 32 ~ 40 km 之间变化, 莫氏面的起伏变化大都与表层构造的隆起、拗陷反向对应; 沂沭断裂带在深部莫氏面为微微凹陷的破碎带, 而其它大型断裂在深部都处于莫氏面隆起带或斜坡带上, 明显反映出它们在新生代的活动方式和力学性质是不相同的.

## 2 地震活动性及区域构造应力场

### 2.1 地震活动性

山东省破坏性地震频率较低, 从公元前 70 年至 1983 年 11 月底止, 2000 多年间共记载  $M_s \geq 4.7$  级地震 38 次, 主要集中在分布在东明 - 聊城、郯城 - 渤海、临朐 - 惠民以及北部的燕山 - 渤海地震带上<sup>[6]</sup>. 本省破坏性地震具有较高的强度, 在总共 38 次地震中  $\geq 6$  级者共 13 次, 最大一次达 8.5 级. 地震带多数与

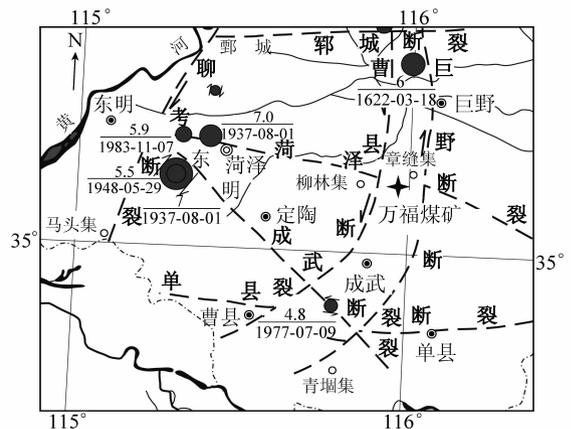


图 1 万福井田断裂构造体系

Fig. 1 Regional tectonic structures around Wanfu Coal Mine

大型构造块体控制边界的断裂构造密切相关。因此, 构造块体内部地震活动水平低。本省破坏性地震震源深度在 30 km 左右, 而弱震的震源也都在 30 km 以内。

## 2.2 地震构造基本特征

历史破坏性地震与主要断裂带分布基本一致; 地震活动频度低但释放能量较高; 北东、北西 2 组主要断裂之交叉、交汇处是 6 级以上地震的主要发生场所; 30 km 左右深度是强震多发的壳层; 矿区附近历史地震活动性如图 1 所示。由图 1 可知, 矿区附近聊城 - 兰考断裂带南段的菏泽地区, 地震震中比较集中, 具有丛集现象, 在菏泽不足 1 km<sup>2</sup> 的范围内具有 5 级以上地震 7 ~ 8 次, 1937 年的 7 级地震的震中就位于此处。原因可能是由于聊城 - 兰考断裂现今构造活动强烈, 且这一部位多组断裂交汇, 构造复杂, 易于较快积累能量, 形成重复地震; 另一可能原因, 与历史大地震的长期地震活动有关, 历史大地震发生后, 该区的应力场有一个调整过程, 此时介质已比较破碎, 调整中某些不均匀部位积累的剩余能量会不断释放。实践证明, 这种调整中的余震活动常常持续很长时间, 几十年甚至上百年, 地震震级越大持续时间越长。

## 2.3 震源机制解反映的区域现今构造应力场

1937-08-01 菏泽 7.0 级地震震源机制解和 1983-11-07 菏泽 5.9 级地震震源机制解见表 1<sup>[6]</sup>。

表 1 菏泽 1937-08-01 的 7.0 级和 1983-11-07 的 5.9 级地震震源机制解

Table 1 Focus mechanism of  $M_L$  7.0 earthquake in Heze on Aug. 1, 1937 and  $M_L$  5.9 earthquake on Nov. 7, 1983

时 间		节面 A	节面 B	断层面 A	断层面 B	主压应力	主张应力	中等主应力
1937-08-01	走向/(°)	43	132	42	133	87	177	275
	倾向	SE	NE					
	倾角/(°)	80	82	8	10	13	2	77
1983-11-07	走向/(°)	42	114	205	312	251	352	94
	倾向	NW	SW					
	倾角/(°)	51	70	20	39	44	11.5	44

由上述的震源机制解可看出, 1937 年与 1983 年 2 次地震虽相距 46 a, 但应力场方向稳定, 基本是在同一应力场作用下发生的, 2 次地震的 2 个可能的震源断层面的方向均为北东向和北西向, 倾角均大于 45°, 其中有 3 个断层面倾角为 70 ~ 82°, 近于直立。该区域主压应力方向为近东西向或北东东向。断层面有一定倾角, 但构造运动仍可判别为以平推运动为主。

## 3 矿区地应力场分布规律

万福煤矿在勘探阶段, 共进行了 29 个钻孔的勘探。其中: W-6, W-13, W-15, W-20, W-24, W-28, W-29 的 7 个能控制矿区地应力场的钻孔被选定用于水压致裂地应力测量。测量时间为 2004 年 10 月至 2005 年 1 月。7 个测量钻孔中, 除 W-28 进行水压致裂测量试验时尚未终孔, 深度只有 896.68 m 外, 其余 6 个测量钻孔深度均接近或超过 1 100 m。29 个勘探钻孔 (W-1 ~ W-29) 的分布位置和 7 个水压致裂测量试验钻孔的地质和结构参数见文献 [7]。

在 7 个测量测孔中, 有 4 个孔进行了 6 段水压致裂试验, 2 个孔进行了 5 段水压致裂试验, 1 个孔进行了 4 段水压致裂试验。根据每段水压致裂试验测得的 3 个压裂参数 (初始开裂压力  $P_i$ , 裂隙重张压力  $P_r$ , 关闭压力  $P_s$ ) 和地下水孔隙压力  $P_0$ , 即可计算出各压裂段 (测点) 2 个水平主应力 (最大水平主应力  $\sigma_H$  和最小水平主应力  $\sigma_h$ ) 的大小; 通过压模试验测出压裂裂隙的方位即可确定各测点主应力的方向; 垂直主应力  $\sigma_v$  的大小由自重应力确定。7 个测量钻孔的 37 个测点的水压致裂地应力实测结果, 包括水压致裂试验压力 - 时间曲线, 3 个压裂参数  $P_i$ ,  $P_r$ ,  $P_s$  和地下水孔隙压力  $P_0$ , 3 个主应力  $\sigma_H$ ,  $\sigma_h$ ,  $\sigma_v$  的大小和方向参见文献 [6]。根据水压致裂 7 个钻孔的 37 个测点的地应力实测数据<sup>[7]</sup>, 经统计和分析, 万福煤矿地应力场分布存在如下规律:

(1) 矿区最大水平主应力  $\sigma_H$  与垂直主应力  $\sigma_v$  (根据自重应力计算) 的比值, 37 个测点中有 12 个点的比值超过 2, 最大为 3.22, 最小为 1.44, 平均为 1.97. 反映出矿区地应力状态以水平应力为主导的特点. 与整个华北地区的构造应力场比较, 万福煤矿的地应力大小属中等偏上水平.

(2) 在 37 个测点中, 有 21 个测点采用印模器测定了最大水平主应力的方向. 其中, 18 个测点位于 NE ~ SW 向, 3 个测点位于 NW ~ SE 向, 平均走向为 NE60°左右.

(3) 最大水平主应力  $\sigma_H$ 、最小水平主应力  $\sigma_h$  和垂直主应力  $\sigma_v$  均随深度的增加而增加. 其中, W-6, W-13, W-15 和 W-29 钻孔的最大水平主应力和最小水平主应力均随深度成近似线性增长的关系.

(4) 最大水平主应力与最小水平主应力的比值 ( $\sigma_H/\sigma_h$ ) 在整个矿区基本稳定, 为 1.22 ~ 1.65, 平均为 1.50 左右.

(5) 同一水平 2 个水平主应力的差值 ( $\sigma_H - \sigma_h$ ) 为 5.9 ~ 22.8 MPa, 平均为 13.57 MPa; 最大水平主应力与垂直主应力的差值 ( $\sigma_H - \sigma_v$ ) 为 9.0 ~ 37.5 MPa, 平均为 19.63 MPa (表 2). 相对国内其它地区而言属于应力差水平较高地区.

(6) 矿区地应力分布状态受断裂的影响, 呈现一定程度的不均匀性. 矿区西南角的 W-20, W-28 和 W-24 钻孔处于断裂端点附近, 应力较为集中, 测量应力值较大; 而位于断裂两旁的 W-6, W-13 和 W-29 钻孔应力值相对较小.

#### 4 矿区地应力场与地质构造的关系

由上述区域地质构造与现今构造活动特征和区域地震活动性及震源机制解的分析可知, 鲁西南地区是华北陆缘盆地的南部边缘, 构造活动十分复杂. 主要构造运动都是在水平应力控制下的构造活动, 说明万福煤田的地应力场是被水平方向的构造应力场所控制. 先是在 NEE ~ SWW 向

区域挤压应力场作用下, 引起 NNE ~ NE 向断裂作顺扭运动, NW ~ NWW 向断裂作反扭运动; 再以东濮凹陷所对应的上地幔隆起作用而引起的水平引张运动, 并造成地壳减薄沉降运动. 山东现代构造运动以断块调整性的升降运动为主, 但鲁西隆起区内之弧形断裂带垂直形变速率均较低, 绝大部分小于 0.1 mm/a, 说明该区断裂带的现代构造活动以水平扭动为主, 垂直运动分量很小. 据震源机制解和地质资料分析, 山

表 2 万福煤矿水压致裂地应力实测各主应力之间的关系

Table 2 Relationship between principal stresses measured by hydraulic fracturing technique in Wanfu Coal Mine

测孔号	测段深度/m	主应力比值		主应力差值/MPa	
		$\sigma_H/\sigma_h$	$\sigma_H/\sigma_v$	$\sigma_H - \sigma_h$	$\sigma_H - \sigma_v$
W-6	890.69 ~ 891.69	1.50	1.64	10.2	11.9
	959.85 ~ 960.85	1.58	1.88	14.1	18.1
	1 010.80 ~ 1 011.80	1.55	1.77	13.6	16.7
	1 045.65 ~ 1 046.65	1.53	1.63	12.8	14.3
	1 062.48 ~ 1 063.48	1.55	1.78	14.7	18.1
	1 104.40 ~ 1 105.40	1.54	1.75	14.8	18.2
W-13	889.84 ~ 890.84	1.56	1.99	13.3	18.4
	975.14 ~ 976.14	1.52	1.77	12.6	16.1
	1 024.64 ~ 1 025.64	1.49	1.65	11.9	14.4
	1 055.90 ~ 1 056.90	1.50	1.68	12.9	15.6
	1 074.10 ~ 1 075.10	1.51	1.59	12.6	13.7
W-15	1 079.10 ~ 1 080.10	1.41	1.55	10.6	13.0
	790.50 ~ 791.50	1.32	1.81	6.9	12.7
	858.50 ~ 859.50	1.31	1.94	8.1	16.6
	909.50 ~ 910.50	1.24	1.74	6.3	13.9
	1 011.50 ~ 1 012.50	1.22	1.54	6.0	11.7
W-20	1 062.50 ~ 1 063.50	1.39	1.75	11.2	17.2
	799.13 ~ 800.13	1.59	3.22	19.3	35.9
	899.93 ~ 900.93	1.64	2.99	22.0	37.5
	988.13 ~ 989.13	1.65	2.74	22.8	36.9
	1 025.93 ~ 1 026.93	1.65	2.44	21.3	31.9
W-24	1 052.15 ~ 1 053.15	1.64	2.43	21.6	32.6
	874.19 ~ 875.19	1.61	2.59	17.7	28.7
	1 011.19 ~ 1 012.19	1.60	2.11	17.2	24.2
	1 027.37 ~ 1 028.37	1.62	2.18	18.4	26.0
	1 079.91 ~ 1 080.91	1.48	1.57	12.0	13.3
W-28	813.30 ~ 814.30	1.29	1.59	5.9	9.8
	843.31 ~ 844.31	1.56	2.42	15.0	24.5
	860.96 ~ 861.96	1.54	2.31	14.4	23.3
	878.76 ~ 879.76	1.43	2.20	12.1	21.9
	891.74 ~ 892.74	1.47	2.42	14.5	26.4
W-29	890.69 ~ 891.69	1.49	1.64	10.0	11.8
	959.85 ~ 960.85	1.35	1.44	7.7	9.0
	1 010.80 ~ 1 011.80	1.51	1.65	12.1	14.0
	1 045.65 ~ 1 046.65	1.52	1.66	12.9	15.1
	1 062.48 ~ 1 063.48	1.58	1.90	16.2	20.8
1 104.40 ~ 1 105.40	1.54	1.91	16.3	22.0	

东省目前受主压应力轴为 NEE ~ SWW 向的应力场控制。

万福煤矿实测获得的最大水平主应力的方向, 平均为 NE60°左右. 这一结果与上面区域地质构造和震源机制解分析的构造应力场的方向是吻合的.

## 5 结 论

(1) 万福煤矿水压致裂地应力实测结果表明, 矿区最大水平主应力是自重应力的 2 倍左右, 反映出矿区地应力状态以水平构造应力为主导的特点, 符合地壳表层地应力分布以水平应力为主导的普遍规律. 与整个华北地区的构造应力场比较, 万福煤矿的地应力大小属中等偏上水平.

(2) 万福煤矿最大水平主应力、最小水平主应力和垂直主应力均随深度的增加而增加, 多数钻孔随深度呈近似线性增长的关系. 由于该矿的煤层均位于 -1 100 m 水平以下, 因此在开采过程中将会遇到很大的地应力的作用. 为了保证开采的安全, 必须采取合理的支护和加固措施, 并在开采过程中对高应力引起的各种地压活动和动力灾害进行全过程监测与控制.

(3) 矿区同一平面内主应力的差值反映矿区岩体不稳定的程度, 通常主应力差大, 容易产生围岩变形和破坏. 因为主应力差代表的是剪应力, 根据莫尔强度理论, 岩石破坏主要是剪切破坏. 万福煤矿在进行巷道设计时, 应尽可能使巷道断面的宽高比与断面内两个主应力的比值相一致, 这样才能改善围岩应力分布, 减少巷道变形和破坏.

(4) 万福煤矿 21 个测点实测获得的最大水平主应力的方为 NE32.6° ~ NE110.6°, 平均为 NE60°左右, 即 NEE - SWW 向. 这一结果与区域地质构造和震源机制解分析的构造应力场的方向是相当吻合的. 从地应力角度考虑, 当巷道轴线方向与最大水平主应力方向一致时, 有利于巷道稳定.

(5) 巨野煤田万福煤矿勘探区的地应力测量结果进一步从实践上证实了菏泽 - 济宁缓倾斜拗陷区断裂构造的力学成因和作用机制, 二者之间的良好吻合恰好说明了该矿地应力场测量结果的准确性.

## 参考文献:

- [1] 于学馥, 郑颖人, 刘怀恒, 等. 地下工程围岩稳定分析 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1983.  
Yu Xuefu, Zhen Yingren, Liu Huaiheng, et al. Stability analysis of surrounding rock mass in underground engineering [M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1983.
- [2] 蔡美峰. 地应力测量原理和技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2000.  
Cai Meifeng. Principle and techniques of rock stress measurement [M]. Beijing: Science Press, 2000.
- [3] 蔡美峰. 金属矿山采矿设计优化与地压控制 - 理论与实践 [M]. 北京: 科学出版社, 2001.  
Cai Meifeng. Optimization of mining design and control of ground pressure in metal mines-theory and practice [M]. Beijing: Science Press, 2001.
- [4] 山东煤炭地质工程勘察研究院. 山东省巨野煤田万福井田勘探报告 [R]. 泰安: 山东煤炭地质工程勘察研究院, 2005.  
Shandong Institute of Coal Geological-Engineering Exploration. Exploration report of Wanfu coal mine in Juye coalfield [R]. Tai'an: Shandong Institute of Coal Geological-Engineering Exploration, 2006.
- [5] 王学潮. 聊城 - 兰考断裂综合研究及黄河下游河道稳定性分析 [M]. 北京: 黄河水利出版社, 2001.  
Wang Xuechao. Synthetical study of Liaocheng-Lankao fracture and stability analysis of Yellow River course in lower reaches [M]. Beijing: Yellow River Water Conservancy, 2001.
- [6] 胡长和. 1937 年菏泽地震 [M]. 北京: 地震出版社, 1991.  
Hu Changhe. Earthquake occurred in Heze in 1973 [M]. Beijing: Earthquake Press, 1991.
- [7] 蔡美峰, 陈长臻, 彭 华, 等. 万福煤矿深部水压致裂法地应力测量 [J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25 (3): 1 069 - 1 074.  
Cai Meifeng, Chen Changzhen, Peng Hua, et al. In-situ stress measurement by hydraulic fracturing technique in deep position of Wanfu Coal Mine [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25 (3): 1 069 - 1 074.