

深孔水压致裂地应力测量及应力场反演分析

张延新¹, 宋常胜², 蔡美峰³, 彭 华⁴

(1. 燕山大学 建筑工程与力学学院, 河北 秦皇岛 066004; 2. 河南理工大学 能源科学与工程学院, 河南 焦作 454000;
3. 北京科技大学 土木与环境工程学院, 北京 100083; 4. 中国地质科学院 地质力学研究所, 北京 100081)

摘要: 万福煤矿是一座拟建特大型矿井, 上覆冲积层厚度高达 700 m, 主煤层平均埋深达 1 004.12 m。选择 7 个勘探钻孔、37 个试验段进行深孔水压致裂地应力测量。为保证超千米深孔地应力测量的成功, 对传统水压致裂法的测试技术和设备进行改进, 提高系统的耐压能力和测试精度。测孔最大水平主应力与垂直主应力的比值较大, 平均为 1.97, 说明勘探区现今应力场以水平应力为主导。测得的 21 个印模中有 18 个点位于 NEE-SWW 向, 3 个点位于 NW-SE 向, 符合本区震源机制解得出的挤压应力场方向, 且与新构造活动所反映的区域构造应力场方向一致。结合实际的地质条件和地层参数, 在实测地应力结果的基础上, 提出基于有限元三维地应力拟合分析法反演勘探区现今地应力场, 给出煤层顶板主应力分布曲线并分析井下可能出现的各类不良地质现象。

关键词: 岩石力学; 水压致裂法; 地应力测量; 有限元地应力拟合法

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2010)04 - 0778 - 09

GEOSTRESS MEASUREMENTS BY HYDRAULIC FRACTURING METHOD AT GREAT DEPTH OF BOREHOLES AND NUMERICAL MODELLING PREDICTIONS OF STRESS FIELD

ZHANG Yanxin¹, SONG Changsheng², CAI Meifeng³, PENG Hua⁴

(1. School of Civil Engineering and Mechanics, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China;
2. School of Energy Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454000, China;
3. School of Civil and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;
4. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: Hydraulic fracturing is an efficient method for determining the stress field and is suitable at the early stages of projects when no underground access exists. Wanfu coal mine is located in the southwest of Shandong Province, China, which is prepared to construct with great annual coal capacity. The overburden soil layer is the alluvium of the Yellow River with the thickness of over 700 m. The depth of coal deposit is about 1 004.12 m. Determination of both the orientation and magnitude of in-situ stresses at great depth is quite difficult, so some new stress measurement techniques are employed. In the exploration area, a total of 37 hydrofracturing tests in 7 vertical exploration boreholes drilled from the ground surface are carried out. The results suggest that the maximum horizontal stress is dominantly oriented NEE-SWW. This stress direction is also in agreement with the direction derived from the focal mechanism in the area. At the same time, the maximum horizontal stress orientations are closely consistent with those in the general contemporary stress field in southwest of Shandong Province. The ratio of maximum horizontal principal stress to vertical principal stress is 1.44 - 3.22 with the average of 1.97 in 37 measuring points. It is shown that the prevailing stress field in Wanfu coal mine is controlled by the tectonic horizontal stress. Based on the geological conditions and rock mass properties, a 3D mechanical

收稿日期: 2009 - 10 - 16; **修回日期:** 2010 - 01 - 01

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(50490271)

作者简介: 张延新(1977 -), 男, 博士, 1999 年毕业于河南理工大学采矿工程专业, 现任副教授, 主要从事地应力测量及岩土工程稳定性方面的教学与研究。E-mail: zyx382@163.com

model is established and a regressive method for obtaining regional stress from limited stress data by using a 3D finite element method is proposed. According to the spatial distribution of the stress field, the curves of principal stress for coal roof are plotted; and some adverse geological phenomena are discussed.

Key words: rock mechanics; hydraulic fracturing method; in-situ stress measurement; regression of stress by finite element method(FEM)

1 引言

地应力是存在于地层中的未受工程扰动的天然应力, 是引起地下工程变形和破坏的根本作用力, 是确定工程岩体力学属性, 进行围岩稳定性分析, 实现岩石工程开挖设计和决策科学化的必要前提条件^[1]。对矿山设计来讲, 随着矿井开采深度不断增加, 地应力的作用表现得越来越明显。深部高地应力巷道的维护、冲击地压等灾害现象都与地应力有着密切的关系。查清拟开采范围内地应力的大小和方向, 进行合理的巷道设计, 不仅可以显著改善巷道维护状况, 避免灾害发生, 而且可节约大量支护和维修费用, 显著提高矿井的经济效益^[2]。

由于地下工程的复杂性和地下空间形状的多样性, 利用解析法进行工程稳定性的分析和计算几乎是不可能的。随着高速计算机的应用和各种数值模拟方法的发展, 使地下工程成为一门可以进行定量设计和分析的科学, 但所有的计算及分析都须在掌握地应力分布状况的前提下进行。

产生地应力的原因十分复杂, 也是至今尚不十分清楚的问题。40 多年来的实测和理论分析表明, 地应力的形成主要与地球的各种内动力地质作用和外动力地质作用有关并受其影响。地应力场属于非稳定应力场, 它在空间的分布极不均匀, 且随着时间的推移不断变化。迄今为止, 地应力场还很难用函数形式来表达, 要了解一个地区的地应力状态, 唯一的方法就是首先进行原位地应力测量。

地下工程在小规模范围内或接近地表的深度上进行设计时, 经验类比法往往是有效的。但随着开挖规模和深度的不断加大, 经验类比法越来越失去作用。万福煤矿是兖矿集团在巨野煤田计划开发的第二个年产量超千万吨的大型矿井, 地处黄河冲积平原, 具有冲积层厚、煤层埋深大的特点, 属目前世界冲积层最厚、施工难度最大的矿井^[3]。为提高矿井设计的科学性、安全性和经济性, 地应力测量工作被列为地质勘探的重要内容之一。

地应力测量是一项十分复杂的工作, 其测试方

法很多, 应力解除法和水压致裂法是 2003 年国际岩石力学学会新推荐的 2 种地应力测试方法^[4]。应力解除法的测试深度较浅, 并且需要足够的地下巷道容纳设备^[5]。水压致裂法是利用一对可膨胀的封隔器在选定的测量深度封隔一段钻孔, 然后通过泵入流体对该试验段增压, 同时记录压力随时间的变化过程, 通过对实测记录曲线进行分析, 得到特征压力参数, 再根据理论计算公式, 求得测点处最大和最小水平主应力值及岩石的水压致裂抗拉强度参数, 主应力方位可根据印模确定的破裂方位而定。从理论上讲, 水压致裂法没有测试深度限制, 并且特别适合于在矿山的初期勘探阶段应用^[6~8]。因此, 万福煤矿地应力测量采用水压致裂法。

如何准确反映地下工程中的初始地应力场, 是地下工程面临的一个重要课题。一方面, 现场实测地应力是了解应力场最直接的途径, 但是由于场地和经费等原因, 不可能进行大量的现场测量; 另一方面, 地应力成因复杂, 影响因素众多, 各测点的结果在很大程度上仅反映该点的局部应力, 即测量结果有一定的离散性。因此, 为获得更为准确、适用较大范围的地应力场, 必须针对具体工程的地质条件在实测地应力资料的基础上进行初始应力场的反演计算^[9~10]。目前, 将实测点应力转化为场应力的理论和方法主要有: 边界载荷调整法、应力拟合分析法、应力函数趋势分析法等^[11~16], 其共同特点是以实测地应力值为依据, 建立地质模型, 利用数理统计原理, 拟合出与实测应力值残差平方和最小的地应力场。本文提出的基于有限元三维地应力场拟合分析法, 能够充分考虑研究区域复杂的地质条件和引起地应力的主要因素, 具有计算精度高、运算速度快的特点。该法使实测地应力数据得到更广泛的应用, 从而把初始地应力的研究理论从点应力阶段推向场应力设计阶段。

2 测试技术和设备

为适应万福煤矿特殊的地质条件及深孔地应力测量的要求, 对传统的水压致裂地应力测量技术和设备进行了系统改进(见图 1)。

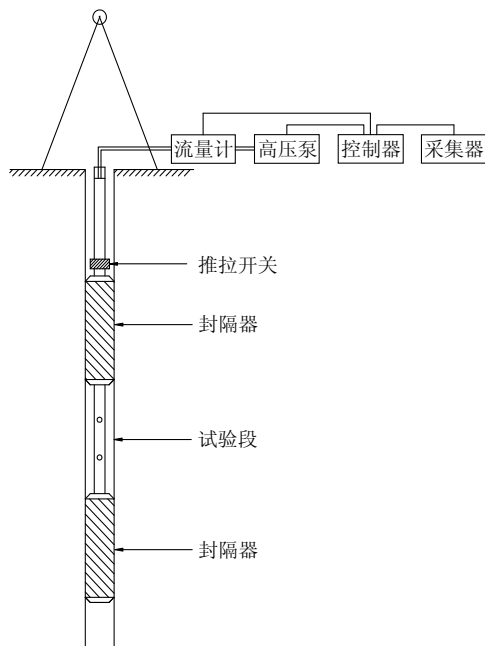


图1 深孔水压致裂地应力测量系统

Fig.1 A schematic view of a hydraulic fracturing system

改进部分主要包括:

- (1) 采用单回路水压致裂加压系统, 将特殊密封的钻杆作为高压管道, 保证测量系统具有一定刚度穿过上覆土层。
- (2) 采用新型高强度推拉开关, 只用一条高压管加压, 分别使封隔器座封和工作段压裂。
- (3) 采用特殊结构的新型封隔器, 耐压强度提高到 70 MPa。
- (4) 回路中增设防塞装置, 防止钻杆铁锈脱落, 堵塞液压管路。
- (5) 采用串列安装的印模器和串列定向器, 一次下钻可进行多段印模, 提高工作效率。
- (6) 采用 16 道实时数据采集系统, 提高数据采集精度, 克服记录仪模拟输出的误差。
- (7) 采用加载和卸载过程自动控制系统, 消除人为因素的影响。

3 深孔水压致裂地应力测量

3.1 工程地质概况

万福勘探区位于山东省菏泽市巨野县和成武县的交界处, 其中心西北距菏泽市约 45 km, 东北距巨野县城约 32 km。该区受黄河冲积影响, 地势自西向东倾斜, 海拔高程 36~46 m, 地形平坦。区域地质构造以近 EW 向的郟城断裂、菏泽断裂等和近 NS 向的曹县断裂、巨野断裂等为主。地层自上而下

为第四系、上第三系、二叠系、石炭系以及奥陶系等。地层岩性主要为冲积层粘土、砂岩、泥岩、煤岩以及灰岩。所测钻孔揭露的主煤层平均埋深达 1 004.12 m, 上覆冲积层平均厚度为 726.42 m。如此厚的上覆冲积层在国内外各类矿山中是少见的, 这给深部岩体地应力测量造成了很大困难^[3]。

3.2 测点布置

万福勘探区地应力测量共选择 7 个勘探钻孔作为应力测试孔(见图 2)。每个钻孔设 3~6 个测点, 共计 37 个, 所有测点均布置在煤层顶底板岩层中。除 W-28 钻孔外, 其他钻孔深度均超过 1 000 m, 最大测点深度为 1 105 m。7 个钻孔中测点分布状况见表 1。

3.3 测量结果

37 个测点的地应力测量结果见表 2。万福勘探区上覆冲积层的平均重度为 20 kN/m³, 岩石的平均重度为 27 kN/m³。

3.4 结果分析

从表 2 可以看出, 万福勘探区地应力分布具有如下规律:

- (1) 勘探区最大水平主应力与垂直主应力的比值, 37 个测点中有 12 个点的比值超过 2.00, 最大比值为 3.22, 最小比值为 1.44, 平均比值为 1.97, 反映出该区地应力状态以水平应力为主的特点。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于中等偏上水平。
- (2) 利用印模器对 21 个测点的最大水平主应力方向进行了测定。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。这一结果与新构造运动及现代震源机制所反映的区域构造应力场方向一致。
- (3) 最大水平主应力与最小水平主应力的比值为 1.22~1.65, 平均为 1.50 左右, 在整个勘探区基本稳定。

(4) 实测地应力值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呈近似线性增长的关系。

(5) 矿区地应力分布状态受多条断裂的影响, 呈现一定程度的不均匀性。勘探区西南角的 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。

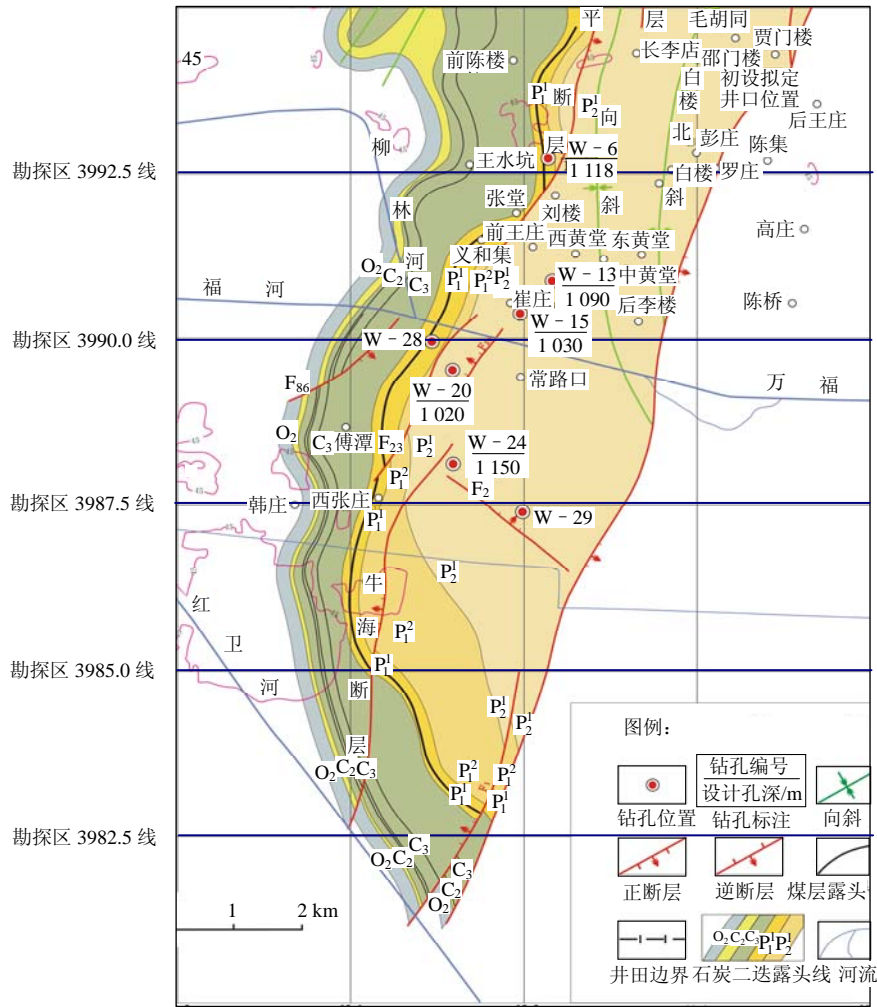


图 2 测试钻孔分布位置及断层分布

Fig.2 Map of test locations and fault distribution

表 1 地应力测试钻孔及测点分布

Table 1 In-situ stress measuring boreholes and distribution of the testing points

钻孔编号	终孔深度/m	上覆冲积层厚度/m	煤层顶板深度/m	测点数	测点深度/m					
					测点 1	测点 2	测点 3	测点 4	测点 5	测点 6
W - 6	1 118.26	652.15	1 028.78	6	890.53	958.72	1 011.39	1 046.27	1 063.12	1 104.90
W - 13	1 086.41	712.60	1 013.55	6	890.34	975.64	1 025.14	1 056.40	1 074.60	1 079.30
W - 15	1 110.90	750.00	1 033.34	5	791.00	859.00	910.00	1 012.00	1 063.00	—
W - 20	1 133.98	720.90	1 045.57	5	799.63	900.43	988.63	1 026.43	1 052.65	—
W - 24	1 134.24	741.70	1 022.21	4	874.69	1 011.41	1 027.87	1 080.41	—	—
W - 28	1 086.73	774.41	826.60	5	813.80	843.81	861.46	879.26	892.24	—
W - 29	1 099.64	724.17	1 058.81	6	855.22	894.08	913.23	1 042.04	1 068.34	1 095.48

4 地应力场反演分析

4.1 三维地应力反演分析基本原理

地应力的分布状况与地下工程的空间位置、岩体性质、岩体自重、地质构造、地形地貌等因素有关, 实测地应力就是这些因素综合作用的反映, 反演地应力场就是对诸因素模拟再现的过程。测点应

表 2 万福勘探区水压致裂地应力测量结果

Table 2 Results of in-situ stress measurement using hydraulic fracturing technique in Wanfu exploration area

钻孔编号	测段深度/m	压裂参数/MPa					主应力值/MPa			破裂方位/(°)
		P_b	P_r	P_s	P_o	T	σ_H	σ_h	σ_v	
W-6-1	890.69~891.69	27.55	21.74	20.40	8.91	5.81	30.55	20.40	18.64	NE65.3
W-6-2	959.85~960.85	25.23	25.02	24.38	9.60	0.21	38.52	24.38	20.46	-
W-6-3	1 010.80~1 011.80	26.29	26.07	24.91	10.11	0.22	38.55	24.91	21.81	-
W-6-4	1 045.65~1 046.65	28.61	25.33	24.28	10.46	3.28	37.05	24.28	22.74	NE78.7
W-6-5	1 062.48~1 063.48	30.62	27.87	26.60	10.63	2.75	41.30	26.60	23.19	-
W-6-6	1 104.40~1 105.40	33.27	29.47	27.67	11.05	3.80	42.49	27.67	24.30	NE62.9
W-13-1	889.84~890.84	26.93	24.92	23.55	8.90	2.01	36.83	23.55	18.47	NE76.8
W-13-2	975.14~976.14	28.09	25.97	24.18	9.76	2.12	36.81	24.18	20.75	-
W-13-3	1 024.64~1 025.64	28.62	26.82	24.50	10.25	1.80	36.43	24.50	22.05	NE63.4
W-13-4	1 055.90~1 056.90	33.17	27.67	25.55	10.56	5.50	38.42	25.55	22.87	-
W-13-5	1 074.10~1 075.10	32.43	25.66	24.50	10.75	6.77	37.09	24.50	23.37	-
W-13-6	1 079.10~1 080.10	35.17	30.60	25.98	10.80	4.57	36.54	25.98	23.50	NE68.5
W-15-1	790.50~791.50	33.00	28.40	21.60	7.91	4.60	28.49	21.60	15.75	NE46.1
W-15-2	858.50~859.50	40.90	35.30	26.00	8.59	5.60	34.11	26.00	17.55	NE44.7
W-15-3	909.50~910.50	41.50	37.60	26.50	9.10	3.90	32.80	26.50	18.90	-
W-15-4	1 011.50~1 012.50	42.80	39.10	27.60	10.12	3.70	33.58	27.60	21.86	-
W-15-5	1 062.50~1 063.50	38.40	36.20	29.00	10.63	2.20	40.17	29.00	22.95	NE52.4
W-20-1	799.13~800.13	40.80	38.30	32.80	8.00	2.50	52.10	32.80	16.16	NE36.0
W-20-2	899.93~900.93	43.70	37.60	34.30	9.00	6.10	56.30	34.30	18.81	-
W-20-3	988.13~989.13	43.10	37.70	35.20	9.89	5.40	58.01	35.20	21.16	-
W-20-4	1 025.93~1 026.93	42.70	33.80	32.70	10.26	8.90	54.04	32.70	22.14	NE39.2
W-20-5	1 052.15~1 053.15	40.90	35.70	33.90	10.53	5.20	55.47	33.90	22.85	NE43.6
W-24-1	874.19~875.19	36.20	31.80	29.10	8.75	4.40	46.75	29.10	18.08	NE45.5
W-24-2	1 011.19~1 012.19	35.60	30.10	28.70	10.12	5.50	45.88	28.70	21.70	-
W-24-3	1 027.37~1 028.37	37.20	30.70	29.70	10.28	6.50	48.12	29.70	22.12	NE67.9
W-24-4	1 079.91~1 080.91	30.40	26.80	24.80	10.80	3.60	36.80	24.80	23.50	NE52.8
W-28-1	813.30~814.30	29.62	26.92	20.47	8.14	2.70	26.35	20.47	16.53	NE98.1
W-28-2	843.31~844.31	31.94	30.38	26.89	8.44	1.56	41.85	26.89	17.32	NE110.6
W-28-3	860.96~861.96	35.95	30.25	26.63	8.61	5.70	41.03	26.63	17.77	-
W-28-4	878.76~879.76	37.89	35.17	28.05	8.79	2.72	40.19	28.05	18.25	-
W-28-5	891.74~892.74	45.78	37.63	30.51	8.93	8.15	44.97	30.51	18.59	NE92.5
W-29-1	890.69~891.69	24.97	22.10	20.34	8.55	2.87	30.37	20.34	18.57	NE38.5
W-29-2	959.85~960.85	28.10	26.88	21.74	8.94	1.22	29.40	21.74	20.39	-
W-29-3	1 010.80~1 011.80	28.32	26.05	23.65	9.13	2.27	35.77	23.65	21.74	-
W-29-4	1 045.65~1 046.65	27.84	26.40	24.85	10.42	1.44	37.73	24.85	22.67	NE32.6
W-29-5	1 062.48~1 063.48	29.76	28.56	27.72	10.68	1.20	43.92	27.72	23.12	-
W-29-6	1 104.40~1 105.40	37.29	32.75	29.99	10.95	4.54	46.27	29.99	24.23	NE39.0

注： P_b 为临界破裂压力， P_r 为裂隙重启压力， P_s 为瞬时关闭压力， P_o 为孔隙水压力， T 为岩石的抗拉强度， σ_H 为最大水平主应力， σ_h 为最小水平主应力， σ_v 为垂直主应力。

力值及所要反演的地应力场可以认为是下列变量的函数:

$$\sigma = f(x, y, z, E, \mu, G, T_1, T_2, \dots) \quad (1)$$

式中: σ 为初始地应力值, 代表应力分量; x, y, z 为地形和地质体各质点空间位置坐标, 可由勘测资料获得; E, μ 分别为地质体的弹性模量和泊松比, 可用试验方法求得; G 为地质体自重因素; T_1, T_2, \dots 为各类地质构造因素, 这些待定因素可以通过建立地质模型和给定边界条件求得。

为全面掌握万福勘探区现今地应力场分布规律, 在地应力场的分析过程中, 采用有限元应力拟合分析法。该方法的突出优点是借助数值分析理论和计算机技术, 把实测地应力资料、工程地质资料和数理统计理论结合起来, 综合考虑影响地应力的各种因素, 保证拟合再现的应力场最大限度地接近真实情况。其基本原理是:

- (1) 根据勘探区地形、地质和物理力学资料, 建立反映实际工程区域的有限元数值模型。
- (2) 根据现今地应力成因理论, 选定铅直方向的自重因素和水平方向的 2 个构造因素作为待定因素, 拟定单位载荷分别进行单因素有限元计算, 得到各因素在单位载荷下的有限元计算值。
- (3) 根据应力线性叠加的原理, 以观测点处单因素的地应力有限元计算值作为自变量, 观测点的地应力回归值为因变量建立多元线性回归方程, 即

$$\sigma_k = \sum_{i=1}^n L_i \sigma_k^i \quad (2)$$

式中: σ_k 对应 k 观测点的地应力回归计算值, $\sigma_k = \{\sigma_{xk}, \sigma_{yk}, \sigma_{zk}, \tau_{xyk}, \tau_{yzk}, \tau_{zxy}\}^T$; L_i 为待定回归系数, $i=1, 2, \dots, n$ 分别对应不同因素; σ_k^i 对应第 i 因素作用下 k 观测点的地应力有限元计算值, $\sigma_k^i = \{\sigma_{xk}^i, \sigma_{yk}^i, \sigma_{zk}^i, \tau_{xyk}^i, \tau_{yzk}^i, \tau_{zxy}^i\}^T$ 。

(4) 根据最小二乘法原理, 假定有 m 个测点的资料, 则地应力实测值与有限元计算地应力回归值的残差平方和方程为

$$S = \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^6 \left(\sigma_{jk}^* - \sum_{i=1}^n L_i \sigma_{jk}^i \right)^2 \quad (3)$$

式中: σ_{jk}^* 为 k 观测点 j 地应力分量的实测值; σ_{jk}^i 为第 i 因素作用下 k 观测点 j 地应力分量的有限元计算值。

(5) 求解使 S 为最小值的正规方程组, 得 n 个回归系数 L_i 。

(6) 计算域内任一点 P 的地应力回归分量, 可由该点单因素作用下有限元计算值线性叠加而成,

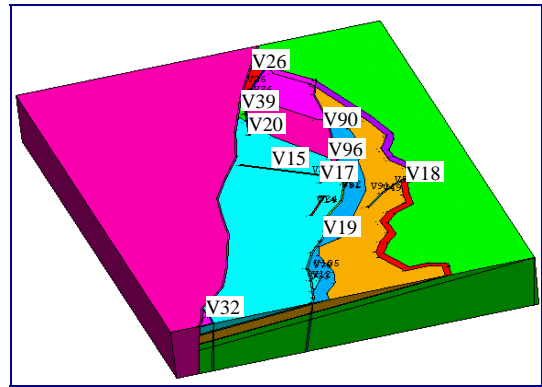
即

$$\sigma_{jP} = \sum_{i=1}^n L_i \sigma_{jP}^i \quad (4)$$

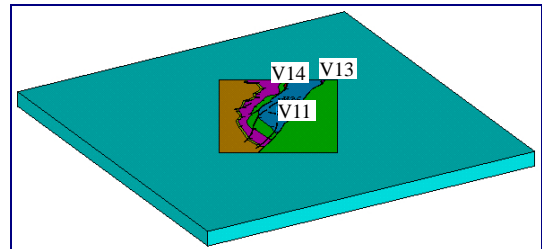
式中: $j=1, 2, \dots, 6$ 对应原岩地应力的 6 个应力分量。

4.2 地质模型及网格划分

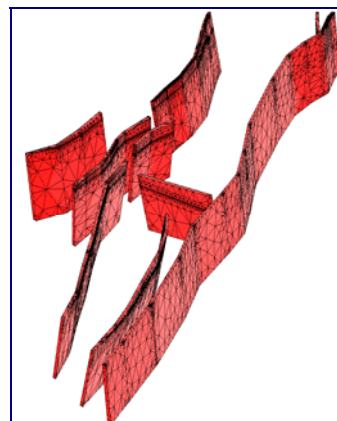
在三维有限元建模过程中, 综合考虑矿井开采范围、地形地貌、地层分布及地质构造等影响因素, 确定了计算域为: EW 分别以 20 402.5 和 20 392.5 km 坐标网格为边界, NS 分别以 3 980.0 和 3 995.0 km 坐标网格为边界, EW 宽 10 km, NS 长 15 km, 上表面深度取到海拔 700 m 水平, 下表面深度取 2 700 m。勘探区有限元地质模型见图 3。计算域内共划分 164 561 个四面体单元, 230 192 个节点。



(a) 勘探区有限元模型



(b) 勘探区与岩石套有限元模型



(c) 断层有限元模型

图 3 勘探区有限元地质模型

Fig.3 Finite element geological model of exploration area

4.3 地层参数

有限元模型的精度主要取决于地质构造及地层的物理力学参数。地质构造主要考虑了勘探区中的田桥、牛海、 F_1 , F_2 , F_3 和王平断层等；岩层主要考虑了前奥陶系、奥陶系、石炭系、下二叠系、上二叠系地层。根据试验结果，地层物理力学参数的选取如表 3 所示。

表 3 地层物理力学参数

Table 3 Physico-mechanical parameters of rock mass

材料介质	弹性模量/GPa	泊松比	重度/($kN \cdot m^{-3}$)
前奥陶系	85	0.22	27
奥陶系	80	0.24	26
石炭系	50	0.29	25
上二叠系	45	0.31	25
下二叠系	60	0.25	25
断层	10	0.32	21

4.4 边界条件

由于边界条件对附近节点有应力集中，为减少边界干扰，简化加载过程，在研究域外围采取套封方法，边界条件作用于岩石套上。根据山东菏泽地区现代地震震源机制解主压应力方向统计资料、区域地质构造资料及地应力测量资料的综合分析，万福勘探区地应力场最大主压应力方向为 $NE57.14^\circ$ 。因此岩石套与研究域的关系应如图 4 所示。由于自重作用和构造运动是引起地应力的主要因素，因此模型的边界条件主要考虑这两方面因素。构造应力场力学模型，见图 4(a)：2 个侧面分别施加水平方向的均布压力 T_1 , T_2 来模拟水平方向构造运动作用，而非加载两侧面边界和底部边界施加法向位移约束。自重应力场力学模型，见图 4(b)：侧面及底部施加位移约束，限制其法向位移，采用岩体实测

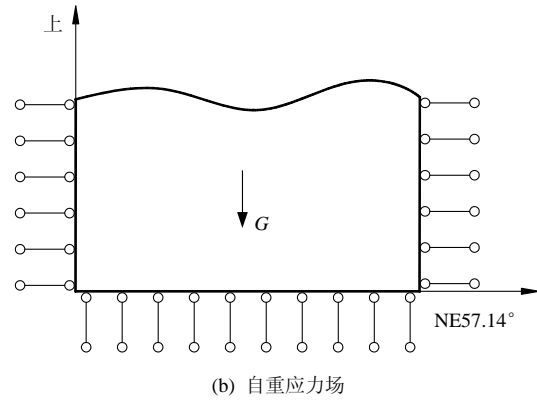
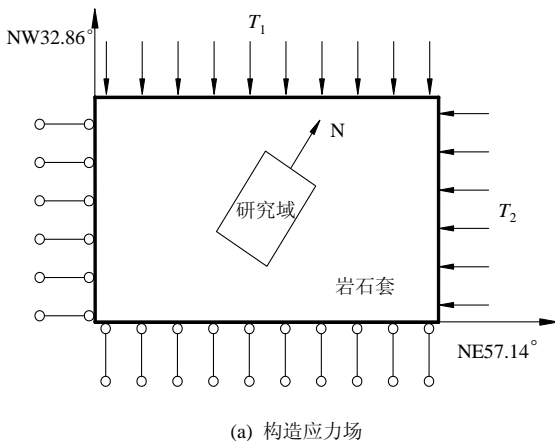


图 4 地应力场力学模型

Fig.4 Mechanical model for in-situ stresses

密度，计算自重作用 G 产生的自重应力场。

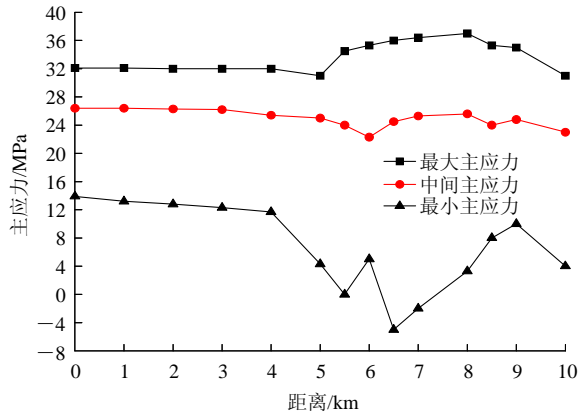
4.5 反演计算及结果分析

利用万福勘探区 37 个实测地应力资料和 3 个单因素(自重应力 G 、构造应力 T_1 , T_2)有限元地应力模拟结果，采用有限元应力拟合分析法，得出相应因素的回归系数。将 3 个单因素的初始载荷分别乘以对应的系数后，同时作用在有限元模型边界上，计算出勘探区地应力场。图 5 为煤层顶板的主应力分布曲线，根据三维地应力场反演分析结果，万福勘探区煤层围岩现今地应力场主要特征如下：

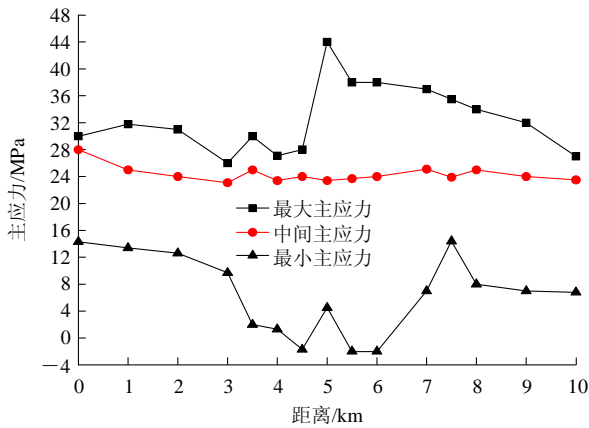
(1) 煤层围岩主要受构造应力和自重应力的作用，且构造应力普遍大于自重应力，工程区地应力场明显受岩性、地形和断层形态的影响；在断层部位主应力值均有所降低，而在断层附近有明显的应力集中区，特别是在田桥断层两侧；后李楼—东黄堂—白楼—李长店一带属应力集中区，主应力方向近 EW 向，其位置正好与白楼背斜和黄堂向斜一致。

(2) 煤田范围内存在垂直主应力减小区，测得的煤层中最小垂直主应力值小于 10 MPa 的普遍存在，与煤层分布基本一致，反映在强大的水平应力作用下，较软的煤层有向上被挤出的趋势。由于上覆冲积层中有巨厚的黏土层，对地下水和煤层瓦斯的封闭性强，而且煤层顶板是高应力作用下的低应力区，所以有形成裂隙的应力场条件，是煤层瓦斯的有利聚集区。

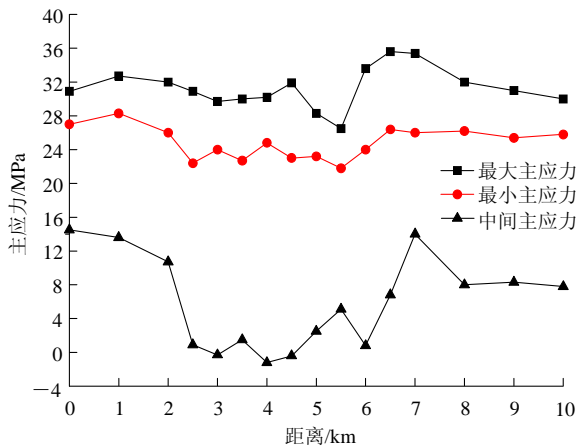
(3) 沿牛海断裂义和集以西的煤层顶板属低应力区，其最大主应力值小于 30 MPa ；最小主应力值小于 10 MPa ，小于岩体自重应力，岩石易产生卸荷裂隙，尤其是奥陶系灰岩在大量的裂隙条件下，有利于岩溶产生溶洞，溶洞中大量的高承压水沿断裂



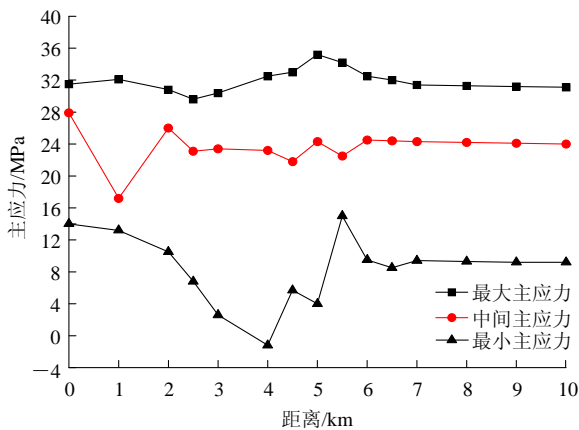
(a) 勘探区 3992.5 线



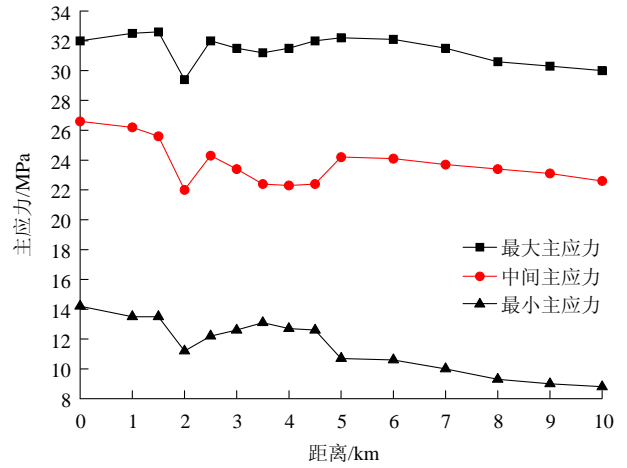
(b) 勘探区 3990.0 线



(c) 勘探区 3987.5 线



(d) 勘探区 3985.0 线



(e) 勘探区 3982.5 线

图 5 煤层顶板主应力分布曲线图

Fig.5 Curves of principal stresses for coal roof

上涌形成突水事故。

(4) 煤层顶板应力状态处于逆断层状态, 即最大主应力接近水平, 最小主应力为垂直方向。

5 结 论

(1) 万福勘探区深孔水压致裂法地应力测量, 完成了 7 个钻孔、37 个测点的现场实测。最大测点深度为 1 105 m, 创造了我国煤矿水压致裂法测量地应力深度的新记录。

(2) 煤田上覆土层的平均厚度高达 700 m 左右, 是国内各类矿山少见的。通过对传统的水压致裂测试技术和设备的改进, 克服了钻孔地质条件复杂、岩芯破碎、局部缩径和胀径等造成的困难, 保证了深孔地应力测量的成功。

(3) 考虑影响地应力分布状态的各项因素, 借助数值模拟技术和数理统计理论, 提出了基于有限元的三维地应力场拟合分析法, 从而将地应力的研究从点应力测量阶段向场应力设计阶段推进一步。

(4) 采用有限元应力拟合分析法, 获取了勘探区较为准确的现今地应力场, 并分析了井下可能出现的各类不良地质现象, 为矿山建设和开采设计提供了科学的依据。

参考文献(References):

[1] 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 in-situ stress measurement[M]. Beijing: Science Press, 2000.(in Chinese))

- [2] 康红普, 林 健, 张 晓. 深部矿井地应力测量方法研究与应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(5): 929 - 933.(KANG Hongpu, LIN Jian, ZHANG Xiao. Research and application of in-situ stress measurement in deep mines[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(5): 929 - 933.(in Chinese))
- [3] 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 and Engineering Exploration. Exploration report of Wanfu coal mine in Juye coalfield[R]. Taian: Shandong Institute of Coal Geological and Engineering Exploration, 2005.(in Chinese))
- [4] HUDSON J A, CORNET F H, CHRISTIANSSON R. ISRM suggested methods for rock stress estimation[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2003, 40(7): 991 - 998.
- [5] LJUNGGRENA C, CHANGAY T, JANSONB T, et al. An overview of rock stress measurement methods[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2003, 40(7): 975 - 990.
- [6] 尤明庆. 水压致裂法测量地应力方法的研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(3): 350 - 353.(YOU Mingqing. Study of the geostresses measurement with hydro-fracture of borehole[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(3): 350 - 353.(in Chinese))
- [7] BOHLOLI B, PATER C J. Experimental study of hydraulic fracturing of soft rocks: influence of fluid rheology and confining stress[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2006, 53(1): 1 - 12.
- [8] KLEE G, RUMMEL F, WILLIAMS A. Hydraulic fracturing stress measurements in Hong Kong[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1999, 36(6): 731 - 741.
- [9] 何江达, 谢红强, 王启智, 等. 官地水电站坝址区初始地应力场反演分析[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(2): 166 - 171.(HE Jiangda, XIE Hongqiang, WANG Qizhi, et al. Inversion analysis of initial geostress in dam site of Guandi hydropower project[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(2): 166 - 171.(in Chinese))
- [10] 周 华, 陈胜宏. 高拱坝坝址区初始地应力场的二次计算[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(4): 767 - 774.(ZHOU Hua, CHEN Shenghong. Two-stage analysis of initial geostress field at dam site[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(4): 767 - 774.(in Chinese))
- [11] HART R. Enhancing rock stress understanding through numerical analysis[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2003, 40(8): 1 089 - 1 097.
- [12] 付成华, 汪卫明, 陈胜宏. 溪洛渡水电站坝区初始地应力场反演分析研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(11): 2 305 - 2 312.(FU Chenghua, WANG Weiming, CHEN Shenghong. Back analysis study of initial geostress field of dam site for Xiluodu hydropower project[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(11): 2 305 - 2 312.(in Chinese))
- [13] 李金锁, 彭 华, 马秀敏, 等. 大丽线铁路隧道工程地应力三维有限元数值模拟分析[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(6): 800 - 803.(LI Jinsuo, PENG Hua, MA Xiumin, et al. Three-dimensional finite element numerical simulation of geostress in Dali railway tunnel of Yunnan[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(6): 800 - 803.(in Chinese))
- [14] 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.
- [15] KONIETZKY H, KAMP L T, HAMMER H, et al. Numerical modelling of in situ stress conditions as an aid in route selection for rail tunnels in complex geological formations in South Germany[J]. Computers and Geotechnics, 2001, 28(7): 495 - 516.
- [16] FRANCO J A M, ARMELIN J L, SANTIAGO J A F, et al. Determination of the natural stress state in a Brazilian rock mass by back analyzing excavation measurements: a case study[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2002, 39(8): 1 005 - 1 032.