

引用格式: 孟静, 张鹏, 王继明, 等, 2024. 山东龙郛煤业 10·20 冲击地压事故区域应力背景与防控研究 [J]. 地质力学学报, 30 (3): 473-486. DOI: [10.12090/j.issn.1006-6616.2023094](https://doi.org/10.12090/j.issn.1006-6616.2023094)

Citation: MENG J, ZHANG P, WANG J M, et al., 2024. Study on regional stress background and prevention of the rock burst accident on October 20th, 2018 in the Longyun Coal Industry area, Shandong, China [J]. Journal of Geomechanics, 30 (3): 473-486. DOI: [10.12090/j.issn.1006-6616.2023094](https://doi.org/10.12090/j.issn.1006-6616.2023094)

山东龙郛煤业 10·20 冲击地压事故区域应力背景与防控研究

孟静^{1,2,3}, 张鹏^{1,2,3}, 王继明⁴, 丰成君^{1,2,3}, 范玉璐^{1,2,3,5}, 戚帮申^{1,2,3},
孙明乾^{1,2,3}

MENG Jing^{1,2,3}, ZHANG Peng^{1,2,3}, WANG Jiming⁴, FENG Chengjun^{1,2,3}, FAN Yulu^{1,2,3,5}, QI Bangshen^{1,2,3},
SUN Mingqian^{1,2,3}

1. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081;
2. 自然资源部活动构造与地质安全重点实验室, 北京 100081;
3. 自然资源部新构造与地壳稳定性科技创新团队, 北京 100081;
4. 中国联合工程有限公司, 浙江 杭州 310051;
5. 北京市勘察设计研究院有限公司, 北京 100081

1. *Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China;*
2. *Key Laboratory of Active Tectonics and Geological Safety, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China;*
3. *Innovation Team of Neotectonism and Crustal Stability, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China;*
4. *China United Engineering Corporation Limited, Hangzhou 310051, Zhejiang, China;*
5. *BGI Engineering Consultants LTD., Beijing 100081, China*

Study on regional stress background and prevention of the rock burst accident on October 20th, 2018 in the Longyun Coal Industry area, Shandong, China

Abstract: [Objective] The stability of underground chambers such as mine tunnels and transportation tunnels is closely related to the stress environment of the surrounding rock mass and the geological conditions of the area. Analyzing the relationship between deep-seated stress and factors such as the orientation and shape of underground chambers can help to proactively mitigate the risks associated with chamber excavation. [Methods] This study, set against the background of the rock burst accident on October 20th in the Longyun Coal Industry area in Shandong, reveals the current stress environment of the shallow crustal layers in western Shandong through in-situ stress measurement and monitoring work. [Results] According to the characteristics of the current ground stress field near the Longyun coal mining area, the study investigates the regional stress background that led to the rock burst accident and proposes corresponding prevention and control suggestions from the perspective of ground stress. The results indicate that the magnitude of the principal stress generally increases linearly with depth within the measurement range, with the maximum horizontal principal stress ranging from 3.48 to 20.76 MPa and a gradient of 0.0182 MPa/m with increasing depth, while the minimum horizontal principal stress ranges from 3.44 to 14.95 MPa with a gradient of 0.0130 MPa/m. The maximum horizontal principal stress azimuth in the

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目 (DD20190317, DD20221738, DD20230540); 国家自然科学基金项目 (U2244226); 中国地质科学院地质力学研究所基本科研业务费项目 (DZLXJK202305)

This research is financially supported by the Projects of the China Geological Survey (Grants No. DD20190317, DD20221738, and DD20230540), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. U2244226), and the Research Fund of the Chinese Academy of Geological Sciences (Grant No. DZLXJK202305).

第一作者: 孟静 (1984—), 女, 在读博士, 高级工程师, 从事区域地壳稳定性分析及城市地质安全风险评价等方面研究。

Email: mexijay@sina.com

通讯作者: 张鹏 (1986—), 男, 博士, 副研究员, 从事地应力测量与实时监测、构造应力场等方面研究。Email: zhangpeng0713@163.com

收稿日期: 2023-06-12; 修回日期: 2023-09-25; 录用日期: 2023-09-25; 网络出版日期: 2023-11-23; 责任编辑: 吴芳

area ranges from NE 43° to 89°, with an average azimuth of NE 75°. The tectonic action in the shallow crust is mainly horizontal, but with increasing depth, they gradually transition to vertical. [Conclusion] The triggering mechanism of the rock burst accident in the Longyun Coal Industry area on 20th October is primarily attributed to the vertical stress exceeding the horizontal principal stress, indicating a current extensional stress environment, especially when the tunnel orientation is parallel to the direction of maximum horizontal principal stress. It is suggested that the angle between the tunnel axis and the direction of maximum horizontal principal stress in the Longyun Coal Industry area should be between 60° and 90°, and that the tunnel roof can be designed as an arch-shaped roof to ensure the stability of the tunnel rock mass.

Keywords: western shandong; rock burst; in-situ stress measurement and monitoring; ground stress field characteristics; rock mass stability

摘要: 矿山巷道、交通隧道等地下硐室围岩稳定与岩体所处区域地应力环境息息相关。分析区域深部地应力与地下硐室走向、形状等因素的关系,有助于提前规避硐室开挖风险。文章以山东龙郛煤业10•20冲击地压事故为背景,通过地应力测量与监测工作,初步揭示了山东西部地壳浅表层现今地应力环境,结合龙郛煤业矿区附近现今地应力场特征,探讨此次冲击地压事故产生的区域应力背景,并从地应力角度提出相应的防控建议。研究表明:测量深度范围内主应力大小总体上与深度成正比线性关系,最大水平主应力值为3.48~20.76 MPa,随深度增加梯度为0.0182 MPa/m;最小水平主应力值为3.44~14.95 MPa,随深度增加梯度为0.0130 MPa/m;区内最大水平主应力方位为北东43°~89°,平均方位为北东75°;地壳浅表层构造作用以水平构造作用为主,但随着深度的增加,逐渐向垂直构造作用转变;龙郛煤业10•20冲击地压事故的诱发机制主要是垂向应力大于水平主应力,现今处于拉张应力环境,尤其是巷道走向平行于最大水平主应力方向;建议龙郛煤业巷道轴线与最大水平主应力方向的夹角为60°~90°,同时巷道顶板可以采用拱形顶板,确保巷道岩体稳定。

关键词: 山东西部;冲击地压;地应力测量与监测;地应力场特征;岩体稳定性

中图分类号: P553 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6616 (2024) 03-0473-14

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2023094

0 引言

山东省是中国重要的矿产资源产地(孔庆友等, 2006; 胡宝群等, 2021; 于学峰等, 2022),同时也是全国冲击地压灾害最严重的省份之一,山东省境内的冲击地压矿井数目约占到全国的30%,埋深超过1000 m的冲击地压矿井数目约占到全国的47%(温向前, 2019)。冲击地压灾害严重威胁作业人员和采矿设备的安全(窦林名等, 2006)。据不完全统计,1966年至今,山东省共发生破坏性冲击地压事故400余次,造成了重大的人员和财产损失,其中,2018年10月20日晚间发生在龙郛煤业的冲击地压事故(以下简称10•20冲击地压事故)是近年来中国最为严重的一次,事故共造成21人死亡,4人受伤(任广艳, 2019)。山东省严重冲击地压事故频发的地质背景亟待深思和探讨。

地下硐室的围岩破坏与稳定性问题,究其内动力原因多与地壳岩层中的地应力作用密切相关(刘士君, 2009)。1776年法国科学家库伦指出材料破

坏实际是剪切破坏,并提出了土的剪切破坏公式,摩尔在此基础上提出了Mohr-Coulomb准则,即材料剪切破裂面上法向应力(σ)与抗剪强度(τ_f)之间存在函数关系(陈仲颐等, 1994)。研究表明大多数岩土材料符合Mohr-Coulomb破坏准则(杨小礼和王作伟, 2010; 胡卫东等, 2017; 于丽等, 2020)。1980年, E. Hoek 和 E.T. Brown 通过分析大量岩石三轴试验资料和现场岩体试验结果,提出用于预测岩石破裂的Hoek-Brown强度准则(Hoek and Brown, 1980)。截止目前, Hoek-Brown强度准则已进行了多次较大的改进(Hoek et al., 1992; 朱合华等, 2013; 李守龙等, 2014),是岩体强度预测及稳定性分析领域应用最广泛的准则之一。

很多学者结合工程实际,围绕地应力对地下硐室围岩稳定性的影响机制开展了大量研究(廖椿庭和施兆贤, 1983; 尹光志等, 1997; 戚蓝和马启超, 2000; 王薇等, 2002; 陈雪峰等, 2015; 余莉等, 2015; 赵维生等, 2015; 谢克珂等, 2019; 孙元春等, 2022; 李鹏等, 2023)。廖椿庭和施兆贤(1983)结合金川矿区地应力实测结果和工程地质特征,分析了矿区地应

力作用特征与巷道变形的关系,认为巷道周围应力分布状态与巷道稳定性密切相关,在查明巷道地应力状态的基础上,通过数值模拟分析,确定合理的巷道走向和断面形状,成功解决了巷道变形和安全运维问题。赵维生等(2015)研究了主应力对巷道交岔点围岩稳定性影响,结果表明在交岔点开挖之前,交岔点附近围岩的主应力方向发生偏转;交岔角($\alpha \leq 90^\circ$)越大,交岔点越稳定;交岔角相同时,新掘巷道轴向较靠近最大水平主应力方向的交岔点更稳定。谢克珂等(2019)以某矿区为案例,对地应力分布对冲击地压的影响进行模拟研究,结果显示随着矿区开采深度的加深,地应力也越来越高,冲击地压发生次数也越多,同时矿区地应力分布直接影响着矿区冲击地压发生的情况,进行开采作业时需结合实际的地应力分布情况来布设具体作业方法;冲击地压的显著特点是释放大量应变能量,因此高地应力是冲击地压发生的必要条件。尹光志等(1997)通过对砚石台煤矿地应力现场测试和计算,结合工程实际指出地应力的大小和方向均对冲击地压有显著影响。戚蓝和马启超(2000)基于数值模拟反演工程区地应力场,探讨了地下硐室长轴向选取和围岩稳定性,指出地下硐室长轴方向与主压应力方向尽可能形成较小夹角。余莉等(2015)总结了不同地应力场环境下硐室走向与最大水平主应力方向的夹角对硐室围岩稳定性的影响。同时众多研究也表明,硐室断面形状对围岩应力分布具有明显影响,施工过程中应根据现场情况及时调整施工方式以保证施工安全进行(王薇等,2002;陈雪峰等,2015)。

工程实践证明地下工程稳定性与其所处地应力环境直接相关,地应力是深部矿产安全开发的重要影响因素之一,查明深部地应力状态,依据地应力场特征采取合理的开采方式是预防冲击地压事故的一个有效途径,掌握区域地应力场特征对于指导矿区规划、改善支护方法、预防巷道内冲击地压等灾害发生均具有重要意义。

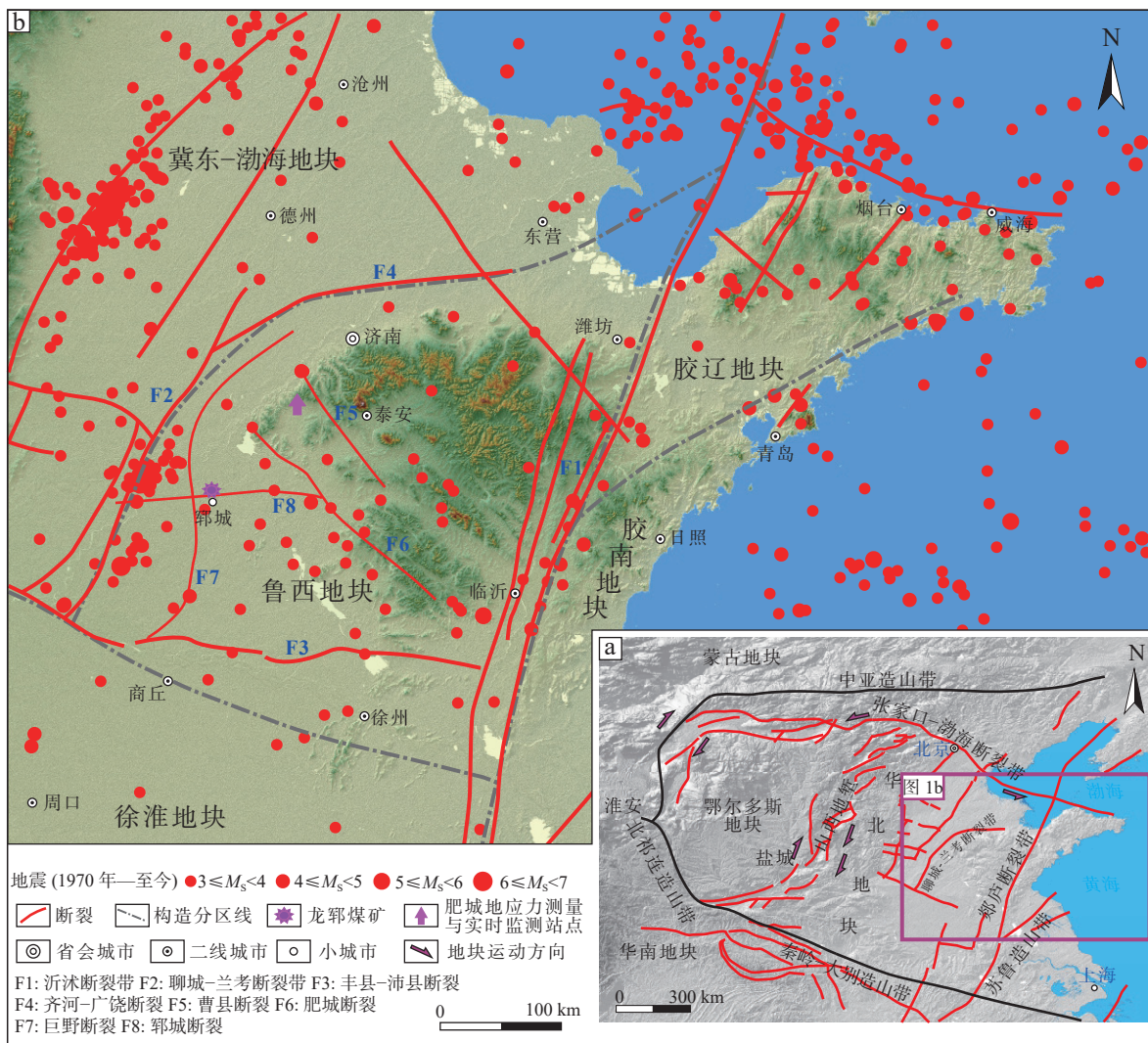
为揭示山东省冲击地压事故频繁发生的内动力原因,文章以龙郓煤业10·20冲击地压事故为研究背景,结合在山东西部获取的水压致裂法地应力测量成果,首先对山东西部现今地应力场特征展开分析,进而探讨龙郓煤业10·20冲击地压事故产生的区域应力背景,并从地应力角度提出相应的防控建议,以期对山东省矿区安全生产保障和现今构造应力场研究提供数据支撑和决策依据。

1 10·20冲击地压事故区域地质背景

山东半岛位于华北克拉通东南部的华北地块,主要包括鲁西地块、胶辽地块、胶南地块和部分冀东-渤海地块。龙郓煤业矿区位于山东省菏泽市鄄城县以北,大地构造上属于鲁西地块(图1)。自中生代以来,受太平洋板块俯冲作用影响,华北克拉通经历了复杂的地质演化过程,特别是晚中生代时期发生的巨量岩石圈减薄,使得其克拉通原有稳定属性已基本丧失,尤其是在东部陆块,发育了大量的伸展构造和断陷盆地(朱日祥等,2011)。古近纪时期,受秦岭-大别山造山带影响,在中生代构造格局的基础上,区内发育了一系列北西-北西西向断裂构造。更新世以来受郯庐断裂带和聊城-兰考断裂带走滑作用影响,又叠加了北东向断裂构造(宋明春,2008)。鲁西地块东、西分别以沂沭断裂带(郯庐断裂带山东境内)和聊城-兰考断裂带为界,南、北分别以丰县-沛县断裂和齐河-广饶断裂为界(李三忠等,2005),区内断裂构造非常发育,并呈北西-北北西向和北东向两组断裂规律性展布,其中北西-北北西向断裂是鲁西地块的主体断裂形式,断裂活动方式以正断为主,而北东向断裂活动方式以走滑为主(金振奎等,1999)。

鲁西地块区域内地震活动分布不均,且以小震为主($M_s < 3.0$),自1970年以来的地震监测结果显示,区内共监测到 M_s 1.0~1.9地震766次, M_s 3.0~3.9地震100次, M_s 4.0~4.9地震15次, M_s 5.0~5.9地震1次, M_s 6.0~6.9地震1次,地震集中分布在各主要活动断裂交汇区或沿各活动断裂展布。鲁西地块地震震源机制解反演结果显示,震源机制解类型主要为正断型和走滑型,鲁西地块最大水平主应力方向为北东东-近东西向(张玲等,2004;山长仑等,2007,2013)。

龙郓煤业10·20冲击地压事故矿区位于鲁西地块西缘,煤矿周边及邻区断裂发育,断裂活动性质以正断为主(丁国瑜,1991;向宏发等,2000)。事故矿区属于全隐蔽的华北型石炭-二叠系煤田,含煤地层为山西组和太原组,其中主采煤层为山西组煤层;井田处于郯城断裂、巨野断裂、肥城断裂和丰县-沛县断裂所围限区域内,总体为走向近南北、倾向东的单斜构造。10·20冲击地压事故发生后,山东省多个相关部门派员组成事故调查组,并聘请国内知名教授、专家组成了专家组参与事故调查。



a—华北地块及邻区构造纲要图；b—山东半岛主要活动断裂及事故点位图

图1 龙郓煤业矿区及周边区域构造地质背景图

Fig. 1 Regional tectonic and geological background map of Longyun Coal Industry and surrounding area

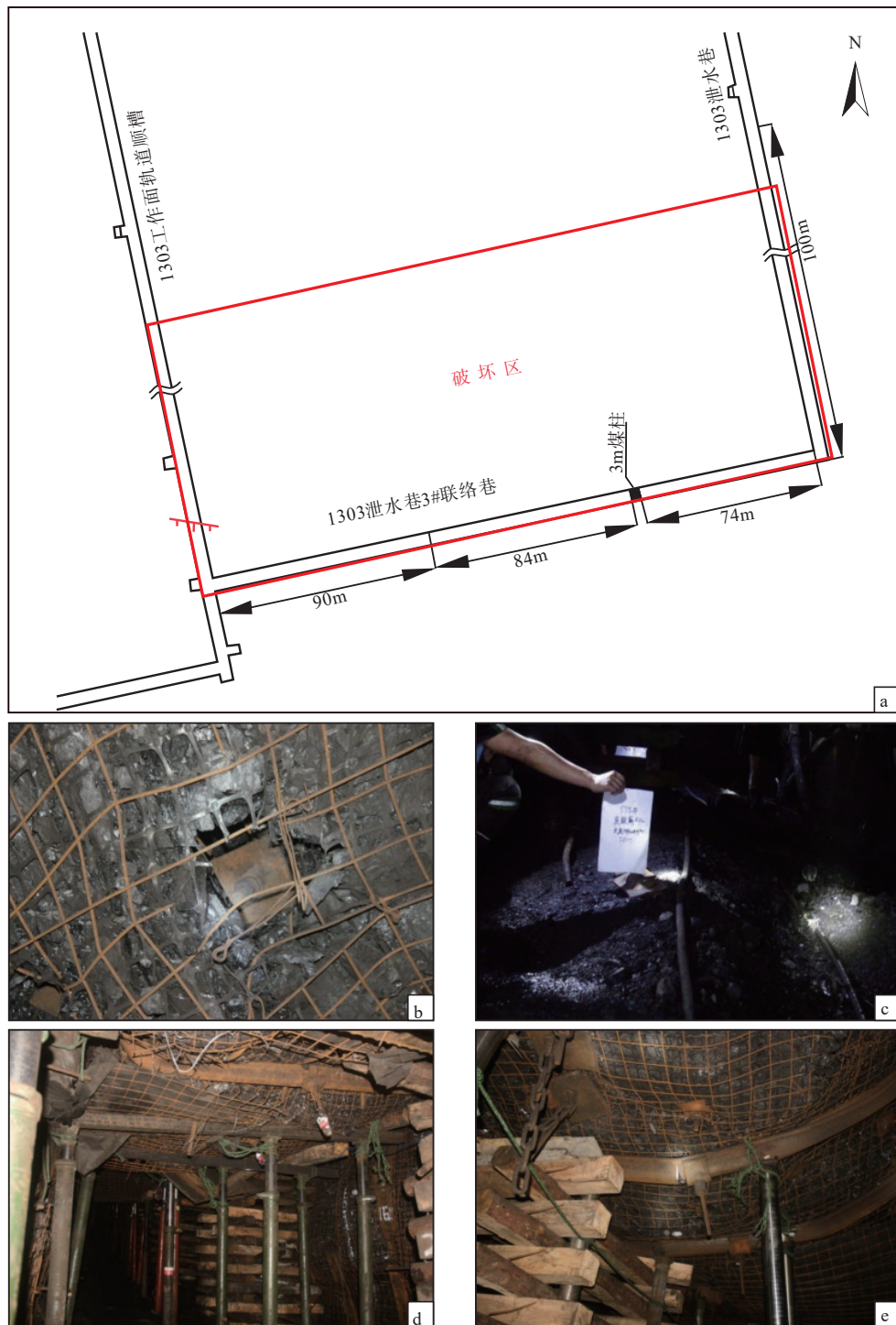
(a) Geotectonic outline of North China block and adjacent areas; (b) Map showing the main active faults and accident locations of Shandong Peninsula

调查发现, 10•20冲击地压事故区煤层埋藏深度1027~1067 m, 巷道破坏区域主要位于1303泄水巷3#联络巷(其中严重破坏段158 m)和部分1303泄水巷(其中严重破坏段40 m; 图2a)。破坏区域主要集中在巷道顶板(图2b—2e), 破坏形式主要表现为巷道顶板明显下沉、顶板锚索梁呈现不同形式的扭曲变形及开裂、局部两帮收敛、个别锚索拉断和锚索梁开裂等。

2 区域构造应力场研究

地应力是反映地球深部地层力学状态的直接

证据(李鹏等, 2017), 也是进行围岩、巷道稳定性分析的主要依据。10•20冲击地压事故发生后不久, 为揭示该事故动力学背景, 同时为山东西部地壳浅表层现今地应力环境研究提供依据, 在充分考虑区域构造地质背景、首都圈地区地应力测量与实时监测总体规划及其对地质体要求的前提下(谭成轩等, 2014), 在泰安市肥城市邓李付村(北纬36.27°, 东经116.72°)开展深孔(620.21 m)地应力测量与监测工作, 测点与矿区直线距离约120 km(图1)。钻孔位于曹县断裂西南盘, 揭露地层岩性主要为灰色-灰黑色角闪花岗岩和花岗闪长岩, 中粗粒结构、块状构造, 风化程度较弱, 岩体较为完整, 完全满足



a—1303 泄水巷及其 3#联络巷示意图; b—顶部锚杆被勒入顶板; c—顶部底鼓; d—两帮收敛, 顶板下沉; e—顶板下沉, 锚索梁开裂

图 2 1303 泄水巷及其 3#联络巷示意图与巷道顶板破坏情况

Fig. 2 Schematic diagram and photos showing 1303 drainage tunnel and its 3# connecting tunnel, illustrating the damage condition of the tunnel roof

(a) Schematic diagram of 1303 drainage tunnel and its 3# connecting tunnel; (b) Photo showing the anchoring rod being squeezed into the roof; (c) Photo showing the roof bottom drumming; (d) Photo showing convergence of both sides and roof subsidence; (e) Photo showing roof subsidence and cracking of the anchor beam

地应力测量和实时监测的需求。

2.1 水压致裂地应力测量

地应力测量选用水压致裂法, 该方法是国际岩石力学学会试验方法委员会推荐的确定岩石应力的方法之一(孙叶, 1998), 具有操作简便、结果可靠、可重复测量等优点(谭成轩等, 2003; 王成虎, 2014), 已被广泛运用在隧道建设、预测地震、地球动力学等诸多领域, 并取得丰硕成果(丰成君等, 2013, 2022)。水压致裂地应力测量主要包括测定地应力大小的压裂试验和确定最大水平主应力方向

的印模试验(张鹏等, 2013; 范玉璐等, 2020)。

依据钻孔岩芯完整性(图3), 在保证数据科学性和合理性的前提下, 沿钻孔深度选取合适深度段开展水压致裂地应力测量试验, 自上而下共选定27个深度段进行压裂试验(图4), 压裂曲线清晰的显示出压裂段岩石脆性破裂、水压裂隙重张和闭合的拐点。而后以压裂试验结果为参考, 选取7个压裂深度段进行印模试验, 试验结果如图5所示, 印模痕迹清晰完整, 准确且完整的记录了压裂段岩石的破裂情况。



a—地应力测量与实时监测钻孔施工现场图; b—钻孔岩芯摆样图; c—典型钻孔岩芯图

图3 山东省肥城深孔钻孔岩芯图

Fig. 3 Pictures of the deep drilling cores in Feicheng, Shandong Province

(a) Site picture of in-situ stress measurement and real-time monitoring drilling construction; (b) Picture of drill cores; (c) Picture of typical drill cores

2.2 地应力测量结果分析

依据压裂试验和印模试验的结果, 按照水压致裂法相关原理, 计算地应力测量结果(表1)。试验结果显示, 在测量深度范围内, 水平主应力值总体随深度的增加而增大, 最大水平主应力 S_{H1} 值为

3.48~20.76 MPa, 最小水平主应力 S_h 值为 3.44~14.95 MPa, 300 m 深度以上三向主应力大小关系为 $S_{H1} > S_h > S_v$, 300 m 以下三向主应力大小关系转换为 $S_{H1} > S_v > S_h$ 。最大水平主应力方位为北东 $43^\circ \sim 89^\circ$, 平均为北东 75° 。

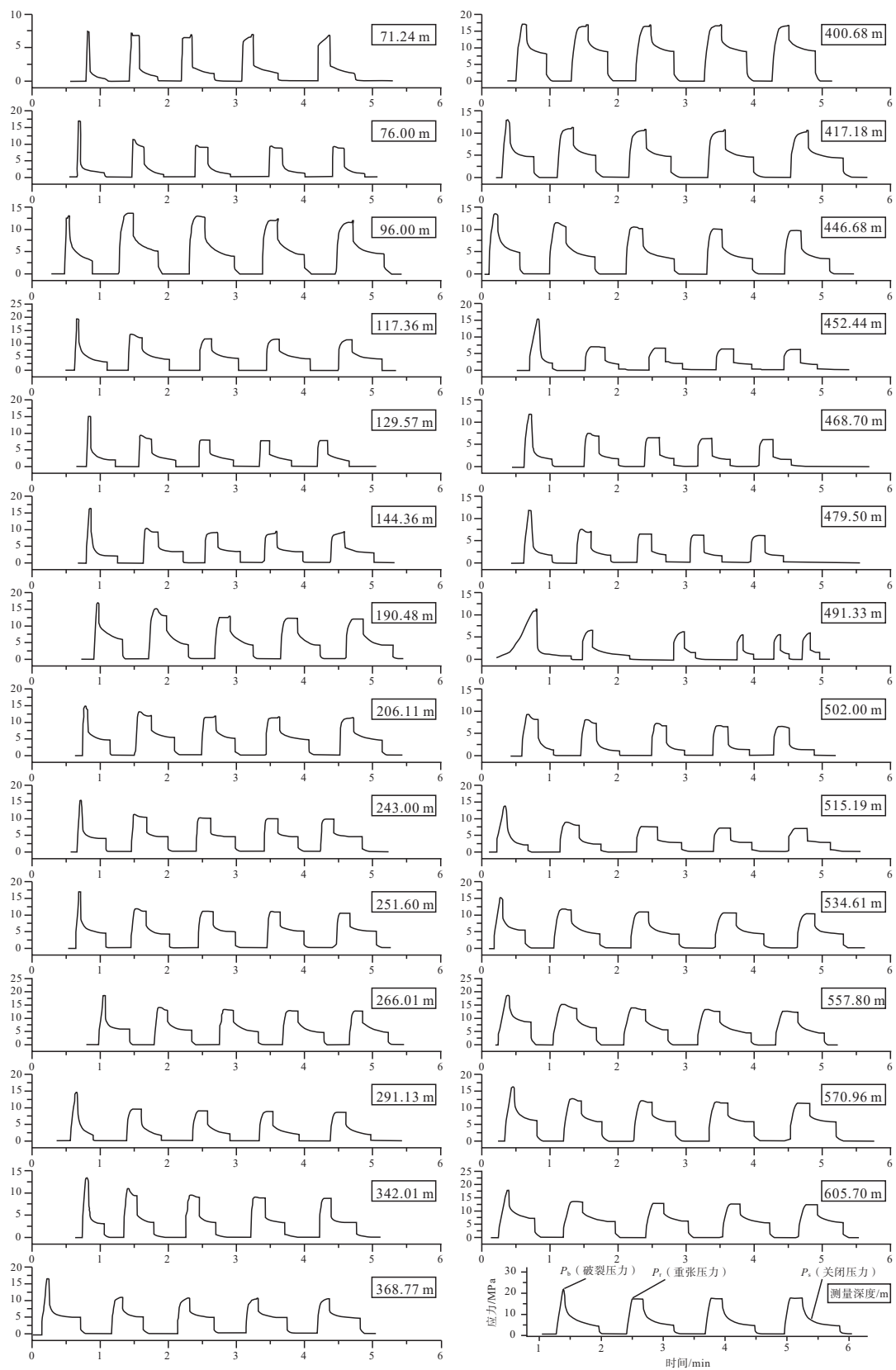


图 4 山东省肥城深孔水压致裂地应力测量压裂曲线

Fig. 4 Fracturing curves of in-situ stress in the deep borehole measured by hydraulic fracturing in Feicheng, Shandong Province

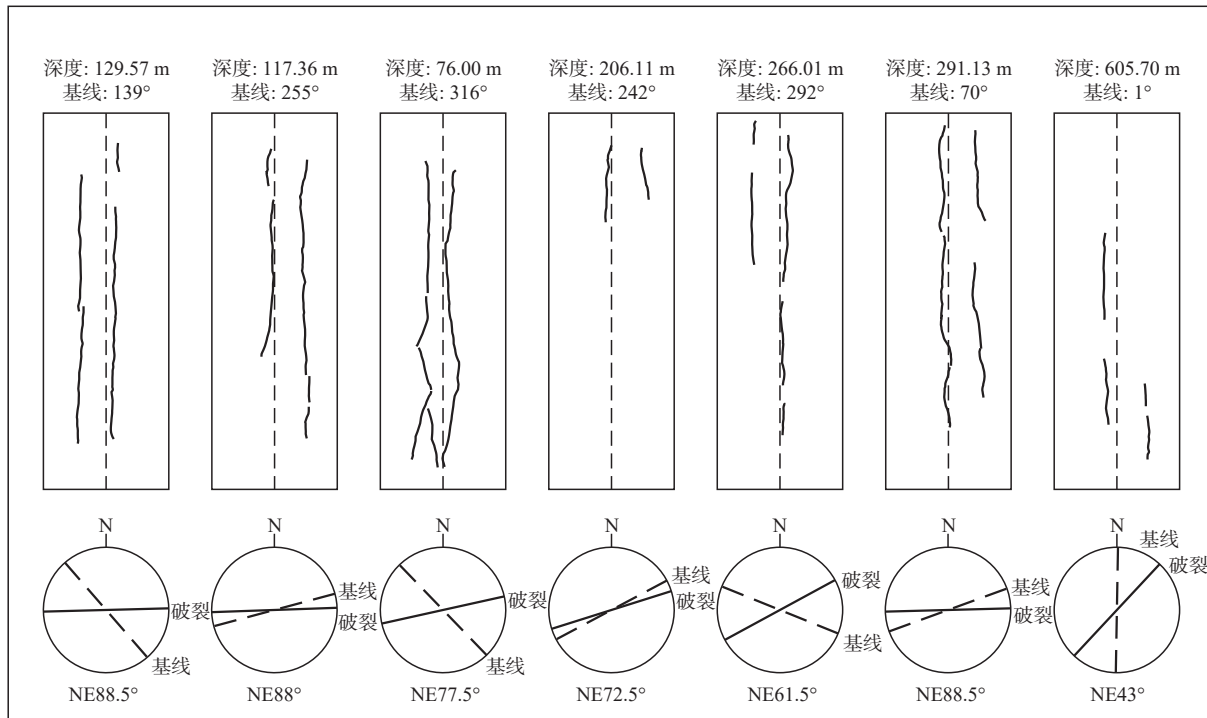


图5 山东省肥城深孔水压致裂最大水平主应力方向印模结果

Fig. 5 Directional impression results of the maximum horizontal principal stress in the deep borehole by hydraulic fracturing in Feicheng, Shandong Province

表1 山东省肥城深孔水压致裂地应力测量结果

Table 1 Results of in-situ stress in the deep drilling core measured by hydraulic fracturing in Feicheng, Shandong Province

序号	深度/m	压裂参数/MPa					主应力值/MPa				水平侧压系数		S _H 方位
		P _H	P ₀	P _b	P _r	P _s	S _H	S _h	S _v	K _H	K _h		
1	71.24	0.71	0.71	8.38	6.13	3.44	3.48	3.44	1.89	1.84	1.82		
2	76.00	0.76	0.76	18.24	8.55	4.46	4.07	4.46	2.01	2.02	2.21	北东78°	
3	96.00	0.96	0.96	14.20	10.37	6.48	8.11	6.48	2.54	3.19	2.55		
4	117.36	1.17	1.17	20.71	10.11	6.58	8.46	6.58	3.11	2.72	2.12	北东88°	
5	129.57	1.30	1.30	17.51	8.85	5.12	5.21	5.12	3.43	1.52	1.49	北东89°	
6	144.36	1.44	1.44	17.61	8.75	6.00	7.81	6.00	3.83	2.04	1.57		
7	190.48	1.90	1.90	18.95	13.36	8.35	9.79	8.35	5.05	1.94	1.66		
8	206.11	2.06	2.06	16.68	11.62	8.22	10.98	8.22	5.46	2.01	1.51	北东73°	
9	243.00	2.43	2.43	17.97	11.73	8.14	10.26	8.14	6.44	1.59	1.26		
10	251.60	2.52	2.52	19.71	12.83	8.98	11.59	8.98	6.67	1.74	1.35		
11	266.01	2.66	2.66	22.28	14.58	9.79	12.13	9.79	7.05	1.72	1.39	北东62°	
12	291.13	2.91	2.91	18.31	10.09	7.61	9.83	7.61	7.71	1.27	0.99	北东89°	
13	342.01	3.42	3.42	17.20	11.73	8.40	10.05	8.40	9.06	1.11	0.93		
14	368.77	3.69	3.69	20.40	12.82	9.91	13.22	9.91	9.77	1.35	1.01		
15	400.68	4.01	4.01	4.01	19.63	14.65	20.31	14.65	10.62	1.91	1.38		
16	417.18	4.17	4.17	17.37	13.17	10.43	13.95	10.43	11.06	1.26	0.94		
17	446.68	4.47	4.47	17.99	13.59	10.72	14.10	10.72	11.84	1.19	0.91		
18	452.44	4.52	4.52	19.96	8.58	7.50	9.40	7.50	11.99	0.78	0.63		
19	468.70	4.69	4.69	16.64	8.95	7.75	9.61	7.75	12.42	0.77	0.62		
20	479.50	4.80	4.80	16.76	9.13	7.86	9.65	7.86	12.71	0.76	0.62		
21	491.33	4.91	4.91	16.28	8.96	7.97	10.04	7.97	13.02	0.77	0.61		
22	502.00	5.02	5.02	5.02	12.55	9.19	10.00	9.19	13.30	0.75	0.69		
23	515.19	5.15	5.15	19.05	12.58	9.23	9.96	9.23	13.65	0.73	0.68		
24	534.61	5.35	5.35	20.58	15.29	12.22	16.02	12.22	14.17	1.13	0.86		
25	557.80	5.58	5.58	24.36	17.58	13.38	16.98	13.38	14.78	1.15	0.91		
26	570.96	5.71	5.71	22.23	16.53	13.47	18.17	13.47	15.13	1.20	0.89		
27	605.70	6.06	6.06	24.11	18.03	14.95	20.76	14.95	16.05	1.29	0.93	北东43°	

注: P_b—破裂压力; P_r—重张压力; P_c—关闭压力; P_H—静水柱压力; P₀—孔隙压力; S_H—最大水平主应力; S_h—最小水平主应力; S_v—垂向主应力(岩石容重取 2650 kg/m³); 最大水平侧压系数K_H=S_H/S_v; 最小水平侧压系数K_h=S_h/S_v.

依据地应力测量结果(表1), 分析主应力大小及方向随深度变化趋势(图6), 初步揭示测点及其周围地壳浅表层现今地应力环境。

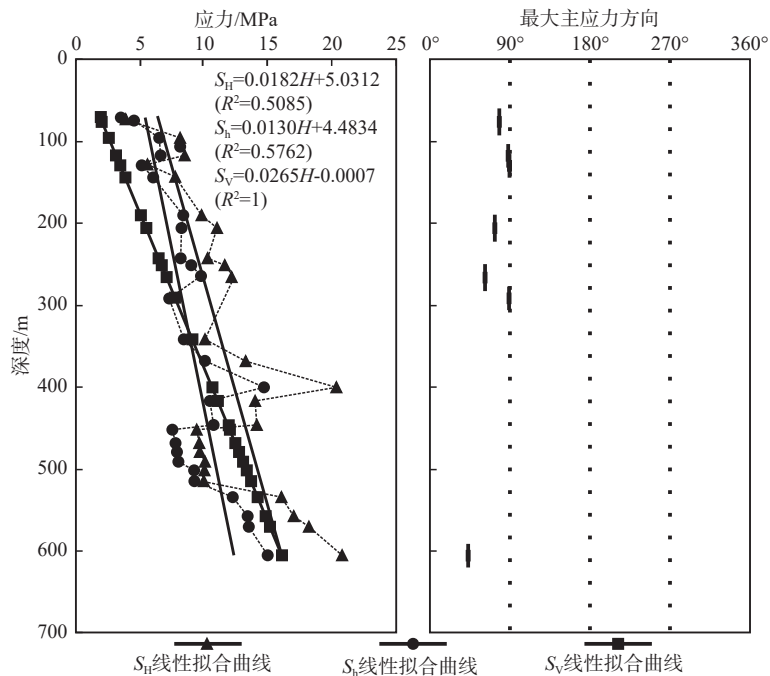


图6 山东省肥城深孔主应力大小及方向随深度变化趋势

Fig. 6 Trends of the magnitude and direction of principal stresses with depth in the deep borehole in Feicheng, Shandong Province

对各深度段测量结果进行拟合, 得到 S_H 和 S_h 随深度的变化规律。

$$S_H = 0.0182H + 5.0312 \quad R^2 = 0.5085$$

$$S_h = 0.0130H + 4.4834 \quad R^2 = 0.5762$$

式中, H 代表测量深度, R 代表相关性系数。

S_H 和 S_h 随深度增加梯度分别为 0.0182 MPa/m 和 0.0130 MPa/m, 略低于华北地区平均水平 (0.0229 MPa/m 和 0.0170 MPa/m; 杨树新等, 2012)。最大水平侧压系数为 1.11~3.19, 平均为 1.66, 最小水平侧压系数为 0.86~2.55, 平均为 1.37, 表明测量深度范围内, 测点及其周围地壳浅表层构造作用以水平运动为主, 而随着深度的增加, 三向主应力大小关系将快速转变为 $S_v > S_H > S_h$ (表2), 构造作用向垂直运动转变, 表明地应力测点及其邻区构造挤压作用较弱, 而以张性构造作用为主, 这与呈北西向串珠状展布的东平湖-南阳湖-独山湖-微山湖-骆马湖-洪泽湖-高邮湖-太湖现今构造地貌所反映的区域动力背景相吻合(吴中海等, 2016)。

地应力实测结果总体上与华北和山东地区已有应力场研究成果相一致。中国区域构造应力场图显示华北地区地壳浅表层现今构造应力场主压

表2 研究区不同深度主应力回归计算结果

Table 2 Regression calculated results of principal stresses at different depths in the study area

深度/m	S_H /MPa	S_h /MPa	S_v /MPa
500	14.1312	10.9834	13.2500
600	15.9512	12.2834	15.9000
610	16.1332	12.4134	16.1650
700	17.7712	13.5834	18.5500
800	19.5912	14.8834	21.2000
900	21.4112	16.1834	23.8500
1000	23.2312	17.4834	26.5000
1027	23.7226	17.8344	27.2155
1067	24.4506	18.3544	28.2755
1100	25.0512	18.7834	29.1500
1200	26.8712	20.0834	31.8000

应力方位以东北-北东东向为主(谢富仁等, 2004)。李鹏等(2017)收集分析了山东省已有的181组地应力实测成果, 认为山东省地壳浅表层地应力状态主要有 $S_H > S_h > S_v$ 和 $S_H > S_v > S_h$ 两种类型, 同时应力状态与深度相关, 并且以沂沭断裂带为界, 山东以西最大水平主应力方向以北东东向为主。

3 事故与地应力状态关系及防治措施探讨

3.1 事故与地应力状态关系分析

矿区采场的布置除结合矿脉的形状和矿区地下工程总体情况来设计外,尚需考虑区域地应力场对不同深度开采巷道围岩稳定性的影响。一般情况下,在 $S_H > S_h > S_V$ 地应力状态下,当巷道轴线与最大水平主应力方向的夹角较大时,应注意巷道侧壁围岩挤压变形破坏;在 $S_H > S_V > S_h$ 地应力状态下,当巷道轴线与最大水平主应力方向的夹角较小时,应注意巷道顶板围岩下沉而冒落,当巷道轴线与最大水平

主应力方向的夹角较大时,应注意巷道侧壁围岩挤压变形破坏;在 $S_V > S_H > S_h$ 地应力状态下,不管巷道轴线与最大水平主应力方向的夹角大或小,均应注意巷道顶板围岩下沉而冒落,尤其是当巷道轴线与最大水平主应力方向的夹角较小时,极易发生巷道顶板围岩下沉而冒落(余莉等,2015)。

龙郓煤业 10·20 冲击地压事故区主要集中分布在 1303 工作面的泄水巷及其 3# 联络巷,其中 3# 联络巷事故严重程度比泄水巷更为严重。根据山东龙郓煤业矿区及邻区现今最大、最小水平主应力随深度增加的梯度,推测在发生冲击地压事故的巷道埋深范围内,三向主应力大小关系为 $S_V > S_H > S_h$,垂向应力占主导作用(表 2,图 7)。

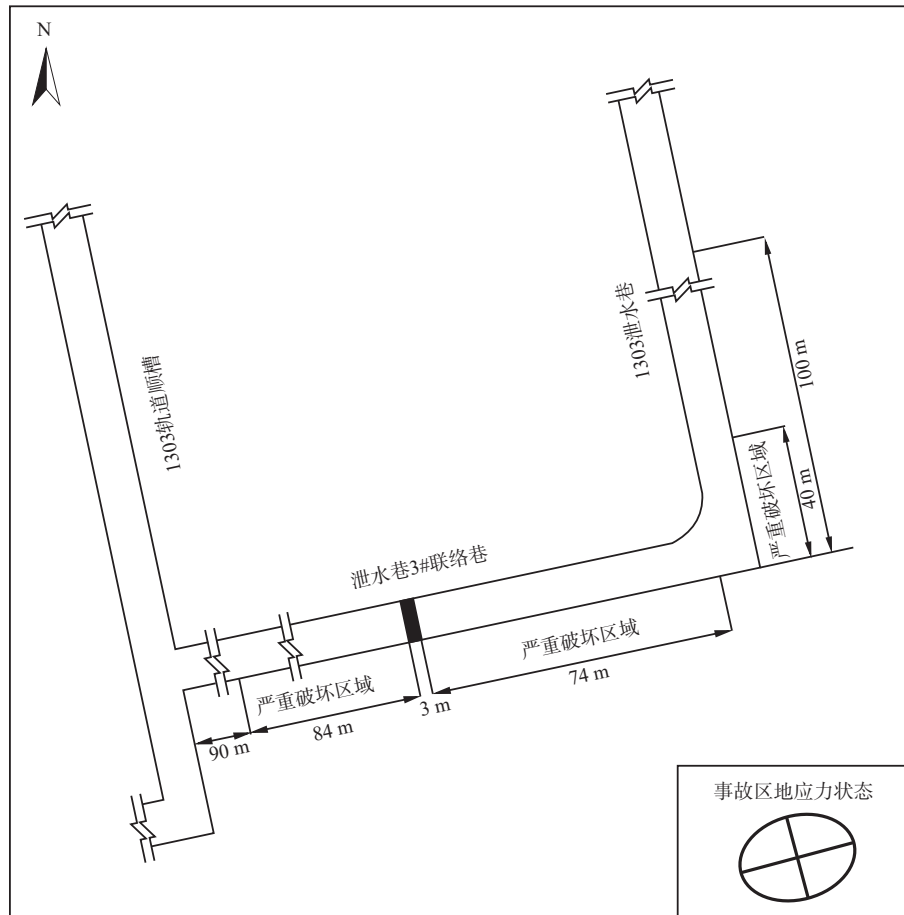


图 7 冲击地压事故区巷道走向与主应力方向关系示意图

Fig. 7 Diagram showing the relationship between the tunnel orientation and the principal stress direction in the rock burst area

在该地应力状态下,当最大水平主应力方向与巷道轴线走向垂直时最有利于巷道围岩的稳定,而随着最大水平主应力方向与巷道轴线走向夹角的不断减小,地应力对巷道围岩稳定性的不利影响也

就越发明显(余莉等,2015)。10·20 冲击地压事故的直接原因是 1303 工作面 3# 联络巷和泄水巷埋深大(1027~1067 m)、煤层自重应力高(表 2),同时,3# 联络巷巷道走向与区域最大水平主应力方向基

本一致,该应力状态不利于巷道围岩稳定,事故区域具备冲击地压发生的地应力背景与冲击倾向性条件。

3.2 防治建议

依据相关研究成果(廖椿庭和施兆贤,1983;尹光志等,1997;戚蓝和马启超,2000;王薇等,2002;陈雪峰等,2015;余莉等,2015;赵维生等,2015;谢克珂等,2019),结合龙郓煤业矿区深部开采现状、地应力场特征、冲击地压发生特点等,文章从地应力状态方面对保障煤矿安全开采提出以下防治建议。

(1)最佳巷道轴线的选择

根据地应力测量结果可知,龙郓煤业及邻区地应力场受水平构造作用较小,深部主要受重力场作用,地应力场随深度增加主要表现为浅部(约深度610 m以上)的 $S_H > S_V > S_h$ 和深部(约深度610 m以下)的 $S_V > S_H > S_h$ 两种应力状态。当三向主应力关系表现为 $S_H > S_V > S_h$ 时,巷道轴线与最大水平主应力方向的夹角一般在 $20^\circ \sim 70^\circ$ 时有助于巷道围岩稳定,而在 $0^\circ \sim 20^\circ$ 和 $70^\circ \sim 90^\circ$ 时不利于巷道围岩稳定;当三向主应力关系表现为 $S_V > S_H > S_h$ 时,巷道轴线与最大水平主应力方向的夹角一般在 $60^\circ \sim 90^\circ$ 时有助于巷道围岩稳定,而在 $0^\circ \sim 30^\circ$ 时不利于巷道围岩稳定,在 $30^\circ \sim 60^\circ$ 时对巷道围岩稳定性的影响一般(余莉等,2015)。因此,应根据地应力场特征科学设计和布设巷道,在地应力状态不利于巷道围岩稳定的区段,应适当调整支护措施,以防止或降低冲击地压发生的概率。

(2)采场顶板形状改进

巷道顶板形状可直接影响煤矿安全开采,也需要引起重视。龙郓煤业巷道顶板多为平顶,在垂向应力较强的地应力作用下,顶板受力过大,易于出现顶板冒落现象,不利于巷道稳定。建议巷道顶板可以采用拱形顶板,使得在巷道外围形成压力拱而减少顶板荷载,从而结合支护措施,增强巷道稳定性。

4 结论

文章通过在山东肥城开展的水压致裂地应力测量工作,初步揭示了山东西部地壳浅表层现今地应力环境,丰富了山东西部地应力场研究资料,并讨论了龙郓煤业10·20冲击地压事故产生原因及防治建议,主要结论和认识如下。

(1)在测量深度范围内,主应力大小总体上与

深度成正比线性关系,最大水平主应力大小为 $3.48 \sim 20.76$ MPa,随深度增加梯度为 0.0182 MPa/m,最小水平主应力大小为 $3.44 \sim 14.95$ MPa,随深度增加梯度为 0.0130 MPa/m,地壳浅表层构造活动以水平运动为主,但随着深度的增加,构造活动逐渐向垂直运动转变。最大水平主应力方位为北东 $43^\circ \sim 89^\circ$,平均方位为北东 75° ,表明山东地区现今为北东东向主压应力环境,与华北地区现今构造应力场主压应力方位(北东—北东东向)基本一致。

(2)龙郓煤业10·20冲击地压事故的诱发机制是巷道理深大、煤层自重垂向应力高,地应力呈 $S_V > S_H > S_h$ 状态,并且1303工作面泄水巷3#联络巷巷道走向与区域最大水平主应力方向基本一致,巷道断面差应力大,极不利于巷道围岩稳定。

(3)建议龙郓煤业巷道轴线与最大水平主应力方向的夹角为 $60^\circ \sim 90^\circ$ 、巷道顶板采用拱形顶板,确保巷道岩体稳定。

References

- CHEN X F, YAO C C, ZHAO J, 2015. Simulating Analyses for Excavation Methods of Deep Buried Large-section Highway Tunnels[J]. Highway Engineering, 40(3): 152-156. (in Chinese with English abstract)
- CHEN Z Y, ZHOU J X, WANG H J, 1994. Soil Mechanics[M]. Beijing: Tsinghua University Press. (in Chinese)
- DING G Y, 1991. Introduction to lithospheric dynamics in China[M]. Beijing: Seismological Press. (in Chinese)
- DOU L M, ZHAO C G, YANG S G, et al., 2006. Prevention and control of rock burst in coal mine[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press. (in Chinese)
- FAN Y L, TAN C X, ZHANG P, et al., 2020. A Study of Current In-situ Stress State and Its Influence on Tectonic Stability in the Xiongan New Area[J]. Acta Geoscientica Sinica, 41(4): 481-491. (in Chinese with English abstract)
- FENG C J, CHEN Q C, TAN C X, et al., 2013. Analysis on current in-situ stress state in northern segment of Longmenshan fault belt[J]. Progress in Geophysics, 28(3): 1109-1121. (in Chinese with English abstract)
- FENG C J, LI B, LI H, et al., 2022. Estimation of in-situ stress field surrounding the Namcha Barwa region and discussion on the tectonic stability[J]. Journal of Geomechanics, 28(6): 919-937. (in Chinese with English abstract)
- HOEK E, BROWN E T, 1980. Empirical Strength Criterion for Rock Masses[J]. Journal of Geotechnical Engineering Division, 106(9): 1013-1035.
- HOEK E, WOOD D, SHAH S, 1992. A modified Hoek-Brown criterion for

- jointed rock masses[C]// Proceedings of the Rock Characterization, Symposium of ISRM. London: British Geotechnical Society. 209-214.
- HU B Q, GAO H D, WANG Y, et al., 2021. A preliminary study on the Mesozoic massive gold metallogenic mechanism of the deep-large fault coupling with critical water in the Jiaodong area, China.[J]. Journal of Geomechanics, 27(4): 585-595. (in Chinese with English abstract)
- HU W D, CAO W G, YUAN Q S, 2017. Upper bound solution for ultimate bearing capacity of ground adjacent to slope based on nonlinear failure criterion[J]. Rock and Soil Mechanics, 38(6): 1639-1646. (in Chinese with English abstract)
- JIN Z K, LIU Z R, SHI Z Z, 1999. Distribution patterns and formation mechanism of faults in the West Shandong Province[J]. Journal of the University of Petroleum, China, 23(5): 1-5. (in Chinese)
- KONG Q Y, ZHANG T Z, YU X F, et al., 2006. Deposits in Shandong province[M]. Ji'nan: Shandong Science and Technology Press. (in Chinese)
- LI P, GUO Q F, LIU H T, et al., 2017. Characteristics of current in-situ stress field and stress accumulation in Shandong region[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 36(9): 2220-2231. (in Chinese with English abstract)
- LI P, YUAN W, ZHANG G M, et al., 2023. Three-dimensional Geostress Inversion Method and Application for Long and Deeply Buried Tunnels: Taking the Yinhe Mountain Tunnel as an example[J]. Railway Investigation and Surveying, 49(6): 1-7. (in Chinese with English abstract)
- LI S L, LI Z L, HUANG G F, 2014. Application of Hoek-Brown failure criterion to stability analysis of tunnel rock mass[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 31(5): 43-46. (in Chinese with English abstract)
- LI S Z, WANG J D, LIU J Z, et al., 2005. Mesozoic structure and its tectonic setting in the western Shandong block[J]. Acta Geologica Sinica, 79(4): 487-497. (in Chinese with English abstract)
- LIAO C T, SHI Z X, 1983. In-situ stress measurements and their application to engineering design in the Jinchuan mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2(1): 103-112. (in Chinese with English abstract)
- LIU S J, 2009. Causes and impact of pressure[J]. Coal Technology, 28(1): 179-181. (in Chinese with English abstract)
- QI L, MA Q C, 2000. On the selection of longitudinal direction and stability of underground opening based on the analysis of in-situ stress field[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 19(S): 1120-1123. (in Chinese with English abstract)
- REN G Y, 2019. The risk of high stress rock burst in large mining depth is high, the understanding is shallow, and heavy casualties are prevented from concentration of sparse personnel: analysis of the "10.20" major accident of Shandong Longyun Coal Industry Co., LTD., Shandong Energy Longmine Group[J]. Jilin Labour Protection(4): 41-43. (in Chinese)
- SHAN C L, LI Y H, LI X, et al., 2007. Characteristics of the focal mechanism for parts of moderate and small earthquakes in Shandong and its neighboring region[J]. North China Earthquake Sciences, 25(4): 27-30, 41. (in Chinese with English abstract)
- SHAN C L, LI X, FAN P L, et al., 2013. The properties of earthquake fault slip and features of crustal stress field in Shandong and nearby regions[J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 34(5-6): 32-39. (in Chinese with English abstract)
- SONG M C, 2008. The composing, setting and evolution of tectonic units in Shandong province[J]. Geological Survey and Research, 31(3): 165-175. (in Chinese with English abstract)
- SUN Y, 1998. Quantitative assessment and research of regional crustal stability[M]. Beijing: Geology Press. (in Chinese)
- SUN Y C, XIN M G, WANG Y, et al., 2022. Measurement and regression analysis of the tunnel Geostress of a heavy haul railway[J]. Railway Investigation and Surveying, 48(1): 16-20, 44. (in Chinese with English abstract)
- TAN C X, SUN Y, WANG L J, 2003. Some problems of in-situ crustal stress measurements[J]. Journal of Geomechanics, 9(3): 275-280, 260. (in Chinese with English abstract)
- TAN C X, ZHANG P, FENG C J, et al., 2014. An approach to deep borehole crustal stress measuring and real-time monitoring and its application in seismogeology research in capital Beijing region[J]. Acta Geologica Sinica, 88(8): 1436-1452. (in Chinese with English abstract)
- WANG C H, 2014. Brief review and outlook of main estimate and measurement methods for in-situ stresses in rock mass[J]. Geological Review, 60(5): 971-996. (in Chinese with English abstract)
- WANG W, WANG L J, WANG H C, et al., 2002. Stability analysis of Kunlun Mountain tunnel for Qinghai-Tibet railway[J]. Acta Geoscientia Sinica, 23(4): 359-362. (in Chinese with English abstract)
- WEN X Q, 2019. Press conference | Interpretation of 《Measures for the prevention and control of rock burst in coal mines in Shandong province》 [EB/OL]. (2019-08-27). http://www.shandong.gov.cn/art/2019/8/27/art_81283_35398.html. (in Chinese)
- WU Z H, ZHOU C J, TAN C X, et al., 2016. The active tectonics and regional crustal stability features in the area of Yangtze River Economic Belt[J]. Journal of Geomechanics, 22(3): 379-411. (in Chinese with English abstract)
- XIANG H F, WANG X C, HAO S J, et al., 2000. Activity of Liaocheng-Lankao buried fault in quaternary[J]. Earthquake Research in China, 16(4): 307-315. (in Chinese with English abstract)
- XIE F R, CUI X F, ZHAO J T, et al., 2004. Regional division of the recent tectonic stress field in China and adjacent areas[J]. Chinese Journal of Geophysics, 47(4): 654-662. (in Chinese with English abstract)
- XIE K K, SHEN Z, HUANG L H, et al., 2019. Analysis and simulation of the impact of stress distribution law on rock burst[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 15(S2): 920-925. (in Chinese with English abstract)

- YANG S X, YAO R, CUI X F, et al., 2012. Analysis of the characteristics of measured stress in Chinese mainland and its active blocks and North-South seismic belt[J]. Chinese Journal of Geophysics, 55(12): 4207-4217. (in Chinese with English abstract)
- YANG X L, WANG Z W, 2010. Limit analysis of earth pressure on shallow tunnel using nonlinear failure criterion[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 41(1): 299-302. (in Chinese with English abstract)
- YIN G Z, XIAN X F, JIN L P, et al., 1997. The effect of crustal stresses on rock burst and evaluation of zone prone to rock burst[J]. Journal of China Coal Society, 22(2): 132-137. (in Chinese with English abstract)
- YU L, YOU Z M, CHEN J P, et al., 2015. Rock classification for tunnels in high Geostress areas[J]. Modern Tunnelling Technology, 52(3): 23-30. (in Chinese with English abstract)
- YU L, LV C, DUAN R Y, et al., 2020. Upper bound limit analysis of three-dimensional collapse mechanism of shallow buried soil tunnel under Pore pressure based on nonlinear Mohr-Coulomb criterion[J]. Rock and Soil Mechanics, 41(1): 194-204. (in Chinese with English abstract)
- YU X F, LI D P, SHAN W, et al., 2022. Yanshanian gold metallogenic system and metallogenic model of the Guilaizhuang gold ore field, western Shandong[J]. Journal of Geomechanics, 28(5): 821-841. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG L, ZHOU C Y, WANG F J, et al., 2004. Characteristics of stress field in each subregion of Shandong area[J]. North China Earthquake Sciences, 22(4): 12-15. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG P, QIN X H, FENG C J, et al., 2013. In-situ stress measurement of deep borehole in Shandong segment of Tan-Lu fracture belt and analysis of its activity[J]. Rock and Soil Mechanics, 34(8): 2329-2335. (in Chinese with English abstract)
- ZHAO W S, HAN L J, ZHAO Z N, et al., 2015. Influence of principal stress on surrounding rock stability of roadway intersection[J]. Rock and Soil Mechanics, 36(6): 1752-1760. (in Chinese with English abstract)
- ZHU H H, ZHANG Q, ZHANG L Y, 2013. Review of research progresses and applications of Hoek-Brown strength criterion[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 32(10): 1945-1963. (in Chinese with English abstract)
- ZHU R X, CHEN L, WU F Y, et al., 2011. Timing, scale and mechanism of the destruction of the North China Craton[J]. Science China Earth Sciences, 54(6): 789-797.
- 陈雪峰, 姚晨晨, 赵杰, 2015. 深埋大断面公路隧道开挖方法数值模拟分析[J]. 公路工程, 40(3): 152-156.
- 陈仲颐, 周景星, 王洪瑾, 1994. 土力学[M]. 北京: 清华大学出版社.
- 丁国瑜, 1991. 中国岩石圈动力学概论[M]. 北京: 地震出版社.
- 窦林名, 赵从国, 杨思光, 等, 2006. 煤矿开采冲击矿压灾害防治[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社.
- 范玉璐, 谭成轩, 张鹏, 等, 2020. 雄安新区现今地应力环境及其对构造稳定性影响研究[J]. 地球学报, 41(4): 481-491.
- 丰成君, 陈群策, 谭成轩, 等, 2013. 龙门山断裂带东北段现今地应力环境研究[J]. 地球物理学进展, 28(3): 1109-1121.
- 丰成君, 李滨, 李惠, 等, 2022. 南迦巴瓦地区地应力场估算与构造稳定性探讨[J]. 地质力学学报, 28(6): 919-937.
- 胡宝群, 高海东, 王运, 等, 2021. 胶东中生代巨量金矿堆积的深大断裂-临界水耦合成矿机制新探[J]. 地质力学学报, 27(4): 585-595.
- 胡卫东, 曹文贵, 袁青松, 2017. 基于非线性破坏准则的临地地基承载力上限分析[J]. 岩土力学, 38(6): 1639-1646.
- 金振奎, 刘泽容, 石占中, 1999. 鲁西地区断裂构造类型及其形成机制[J]. 石油大学学报(自然科学版), 23(5): 1-5.
- 孔庆友, 张天祯, 于学峰, 等, 2006. 山东矿床[M]. 济南: 山东科学技术出版社.
- 李鹏, 郭奇峰, 刘洪涛, 等, 2017. 山东地区现今地应力场特征与应力积累水平分析[J]. 岩石力学与工程学报, 36(9): 2220-2231.
- 李鹏, 袁维, 张光明, 等. 长大深埋高铁隧道三维地应力场反演方法及应用: 以银河山隧道为例[J]. 铁道勘察, 2023, 49(6): 1-7.
- 李三忠, 王金铎, 刘建忠, 等, 2005. 鲁西地块中生代构造格局及其形成背景[J]. 地质学报, 79(4): 487-497.
- 李守龙, 李宗利, 黄高峰, 2014. Hoek-Brown强度准则在隧道岩体稳定分析中的应用研究[J]. 长江科学院院报, 31(5): 43-46.
- 廖椿庭, 施兆贤, 1983. 金川矿区原岩应力实测及在矿山设计中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2(1): 103-112.
- 刘士君, 2009. 冲击地压的成因浅析[J]. 煤炭技术, 28(1): 179-181.
- 戚蓝, 马启超, 2000. 在地应力场分析的基础上探讨地下洞室长轴向选取和围岩稳定性[J]. 岩石力学与工程学报, 19(S): 1120-1123.
- 任广艳, 2019. 大采深高应力冲击地压风险高悬 认识浅防范疏 人员集中伤亡惨重: 山东能源龙矿集团山东龙郛煤业有限公司“10.20”重大事故分析[J]. 吉林劳动保护(4): 41-43.
- 山长仑, 李永红, 李霞, 等, 2007. 山东及附近区域部分中小地震震源机制特征分析[J]. 华北地震科学, 25(4): 27-30, 41.
- 山长仑, 李霞, 范培乐, 等, 2013. 山东及附近区域地震断层错动性质与地壳应力场特征[J]. 地震地磁观测与研究, 34(5-6): 32-39.
- 宋明春, 2008. 山东省大地构造单元组成、背景和演化[J]. 地质调查与研究, 31(3): 165-175.
- 孙叶, 1998. 区域地壳稳定性量化评价[M]. 北京: 地质出版社.
- 孙元春, 辛明高, 汪洋, 等, 2022. 某重载铁路隧道地应力测试与反演分析[J]. 铁道勘察, 48(1): 16-20, 44.
- 谭成轩, 孙叶, 王连捷, 2003. 地应力测量值得注意的若干问题[J]. 地质力学学报, 9(3): 275-280, 260.
- 谭成轩, 张鹏, 丰成君, 等, 2014. 探索首都圈地区深孔地应力测量与实时监测及其在地震地质研究中应用[J]. 地质学报, 88(8): 1436-1452.
- 王成虎, 2014. 地应力主要测试和估算方法回顾与展望[J]. 地质论

附中文参考文献

- 评, 60(5): 971-996.
- 王薇, 王连捷, 王红才, 等, 2002. 青藏铁路昆仑山隧道稳定性分析[J]. 地球学报, 23(4): 359-362.
- 温向前, 2019. 新闻发布会|解读《山东省煤矿冲击地压防治办法》[EB/OL]. (2019-08-27). http://www.shandong.gov.cn/art/2019/8/27/art_81283_35398.html.
- 吴中海, 周春景, 谭成轩, 等, 2016. 长江经济带地区活动构造与区域地壳稳定性基本特征[J]. 地质力学学报, 22(3): 379-411.
- 向宏发, 王学潮, 郝书俭, 等, 2000. 聊城-兰考隐伏断裂的第四纪活动性: 中国东部平原区一条重要的隐伏活动断裂[J]. 中国地震, 16(4): 307-315.
- 谢富仁, 崔效锋, 赵建涛, 等, 2004. 中国大陆及邻区现代构造应力场分区[J]. 地球物理学报, 47(4): 654-662.
- 谢克珂, 沈泽, 黄练红, 等, 2019. 地应力分布对冲击地压影响分析与模拟研究[J]. 地下空间与工程学报, 15(S2): 920-925.
- 杨树新, 姚瑞, 崔效锋, 等, 2012. 中国大陆与各活动地块、南北地震带实测应力特征分析[J]. 地球物理学报, 55(12): 4207-4217.
- 杨小礼, 王作伟, 2010. 非线性破坏准则下浅埋隧道围岩压力的极限分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 41(1): 299-302.
- 尹光志, 鲜学福, 金立平, 等, 1997. 地应力对冲击地压的影响及冲击危险区域评价的研究[J]. 煤炭学报, 22(2): 132-137.
- 余莉, 尤哲敏, 陈建平, 等, 2015. 高地应力地区隧道围岩分级研究[J]. 现代隧道技术, 52(3): 23-30.
- 于丽, 吕城, 段儒禹, 等, 2020. 考虑孔隙水压力及非线性 Mohr-Coulomb 破坏准则下浅埋土质隧道三维塌落机制的上限分析[J]. 岩土力学, 41(1): 194-204.
- 于学峰, 李大鹏, 单伟, 等, 2022. 鲁西归来庄金矿田燕山期金成矿系统及成矿模式[J]. 地质力学学报, 28(5): 821-841.
- 张玲, 周翠英, 王锋吉, 等, 2004. 山东地区各分区地震应力场特征分析[J]. 华北地震科学, 22(4): 12-15.
- 张鹏, 秦向辉, 丰成君, 等, 2013. 郯庐断裂带山东段深孔地应力测量及其现今活动性分析[J]. 岩土力学, 34(8): 2329-2335.
- 赵维生, 韩立军, 赵周能, 等, 2015. 主应力对巷道交岔点围岩稳定性影响研究[J]. 岩土力学, 36(6): 1752-1760.
- 朱合华, 张琦, 章连洋, 2013. Hoek-Brown 强度准则研究进展与应用综述[J]. 岩石力学与工程学报, 32(10): 1945-1963.
- 朱日祥, 陈凌, 吴福元, 等, 2011. 华北克拉通破坏的时间、范围与机制[J]. 中国科学: 地球科学, 41(5): 583-592.