



陕西煤矿冲击地压发生规律与分类防治

潘俊锋 刘少虹 马文涛 夏永学 王书文 冯美华

引用本文:

潘俊锋, 刘少虹, 马文涛, 等. 陕西煤矿冲击地压发生规律与分类防治[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(1): 95–105.

PAN Junfeng, LIU Shaohong, MA Wentao. Occurrence law and classification prevention of rock burst in coal mines of Shaanxi Province[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(1): 95–105.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1492>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

我国东北矿区冲击地压发生特征及防治现状

Characteristics and prevention and control status quo of rock burst in Northeastern Mining Area of China

煤炭科学技术. 2021, 49(3): 49–56 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021.03.005>

基于负煤柱巷道布置的煤矿冲击地压防治技术研究

Study on mine rock burst prevention and control technology based on gateway layout with negative coal pillars

煤炭科学技术. 2019(1) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/392507bb-24fa-4dd7-a055-15a3a9de94d3>

坚硬顶板工作面高静载型冲击地压防治研究

Research on rock burst prevention of high static coal seam in hard roof working face

煤炭科学技术. 2019(3) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/9573fe5f-2b1d-4d89-b04d-05b9ea0e5ee8>

深部煤巷顶帮控制防治冲击地压的研究

Study on mine rock burst prevention and control with roof and sidewalls control in mine deep seam gateway

煤炭科学技术. 2018(10) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/21607716-a6e8-430f-9106-b32cbce21e40>

钻孔卸压防治冲击地压机理及影响因素分析

Analysis on mechanism and influencing factors of drilling pressure relief to prevent rock burst

煤炭科学技术. 2020, 48(5) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/ae8d1166-334a-4ae3-b831-a05d5c17e602>

煤矿褶皱构造区冲击地压机理研究及防治实践

Study on mechanism of rock burst in fold structure area of coal mine and its prevention practice

煤炭科学技术. 2021, 49(6): 82–87 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/ed36cc50-4f7f-485f-9d49-f6321f2893d2>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



移动扫码阅读

潘俊锋, 刘少虹, 马文涛, 等. 陕西煤矿冲击地压发生规律与分类防治[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(1): 95–105.

PAN Junfeng, LIU Shaohong, MA Wentao, *et al.* Occurrence law and classification prevention of rock burst in coal mines of Shaanxi Province[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(1): 95–105.

陕西煤矿冲击地压发生规律与分类防治

潘俊锋^{1,2}, 刘少虹³, 马文涛^{1,2}, 夏永学^{1,2}, 王书文⁴, 冯美华^{1,2}

(1. 中煤科工开采研究院有限公司, 北京 100013; 2. 煤矿灾害防控全国重点实验室(冲击地压防控分实验室), 北京 100013; 3. 国家能源集团国源电力(神东电力)公司, 北京 100033; 4. 中国中煤能源集团有限公司, 北京 100120)

摘 要:随着煤炭资源开采区域不断向西部以及深部转移, 西部地区冲击地压矿井数量呈井喷式增长。陕西省作为煤炭大省, 煤炭开发供应规模稳居全国前列, 但冲击地压灾害尤为突出, 为了有效遏制本地区煤矿冲击地压频繁发生势头, 并为类似条件矿区冲击地压防治提供借鉴, 通过分析陕西煤矿 10 年来的 24 座矿井、85 起冲击地压案例, 基本厘清了冲击地压发生规律, 并开展了基于主控因素的分类防治研究。研究结果表明: 陕西省煤矿冲击地压具有灾害矿井集中、灾害程度严重、多灾害叠加影响显著、防治难度大等特点; 冲击地压监测技术、防治技术与地方法规建设历程几乎同步, 达到了起步晚, 起点高, 示范效应强的结果; 基于冲击地压主控因素, 将陕西省冲击地压划分为 3 大类, 分别为: 坚硬顶板主导型、地质构造主导型和宽煤柱主导型, 并针对主控因素提出弱化坚硬顶板、转移煤柱高集中应力、释放构造应力的防治方法。通过 10 年来的工程实践, 不断优化矿井开采设计, 探索煤层厚硬顶板千米顺层钻孔区域压裂新技术, 加大防冲卸压技术的落实, 冲击地压显现逐年减少, 成果显著。

关键词:冲击地压; 陕西煤矿; 冲击地压监测; 冲击地压防治; 主控因素; 分类防治

中图分类号: TD324

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2024)01-0095-11

Occurrence law and classification prevention of rock burst in coal mines of Shaanxi Province

PAN Junfeng^{1,2}, LIU Shaohong³, MA Wentao^{1,2}, XIA Yongxue^{1,2}, WANG Shuwen⁴, FENG Meihua^{1,2}

(1. CCTEG Coal Mining Research Institute, Beijing 100013, China; 2. National Key Laboratory for Coal Mine Disaster Prevention and Control(Laboratory of Prevention and Control of Rock Burst), Beijing 100013, China; 3. State Energy Group Guoyuan Electric Power (Shendong Electric Power) Company, Beijing 100033, China; 4. China National Coal Group Co., Ltd., Beijing 100120, China)

Abstract: With coal resource extraction areas are constantly shifting towards the west and deeper regions, and the number of rock burst mines in the western region is increasing rapidly. As a major coal province, Shaanxi Province has a stable scale of coal development and supply, ranking among the top in the country. However, rock burst disasters are particularly prominent. In order to effectively curb the frequent occurrence of rock burst in local coal mines and provide reference for rock burst prevention and control in areas with similar conditions, the occurrence law of rock burst has been basically clarified by analyzing 24 mines and 85 rock burst cases in Shaanxi coal mines over the past 10 years, and conducted classified prevention and control research based on the main control factors. The research results indicate that coal mine rock burst in Shaanxi Province has the characteristics of concentrated disaster mines, severe disaster severity, significant overlapping effects of multiple disasters, and high difficulty in prevention and control; The monitoring technology and prevention technology of rock burst are almost synchronized with the construction process of local regulations, achieving a late start, high starting point, and demonstration effect; Based on the main controlling factors of rock burst, rock burst in Shaanxi Province is divided into three categories: hard roof dominant type, wide coal pillar dominant type, and geological structure dominant type. In response to the main con-

收稿日期: 2023-10-17

责任编辑: 朱恩光

DOI: 10.12438/cst.2023-1492

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2022YFC3004604); 国家自然科学基金面上资助项目(52174186); 国家高层次人才计划资助项目(020403050009)

作者简介: 潘俊锋(1979—), 男, 陕西旬邑人, 研究员, 博士生导师。E-mail: panjunfeng@yeah.net

trolling factors, prevention and control methods for weakening hard roof, transferring high concentrated stress of coal pillar, and releasing structural stress are proposed. Through 10 years of engineering practice, continuous optimization of mine mining design, exploration of new fracturing technologies for drilling areas along the thick and hard roof of coal seams, and increased implementation of anti burst and pressure relief technologies, the occurrence of rock burst has been decreasing year by year, with significant achievements.

Key words: rock burst; coal mine in Shaanxi Province; impact ground pressure monitoring; prevention and control of rock burst; main control factors; classified prevention and control

0 引 言

煤矿冲击地压发生与地质赋存特征密切相关, 由于同一地区, 其煤岩层地质赋存特征相似, 因此冲击地压在发生区域上也表现出显著的区域性聚集特征^[1-2]。过去东部地区, 例如山东省为我国冲击地压矿井数量最多, 发生灾害起数最多地区, 主要受大采深与断层、褶曲地质构造影响; 黑龙江省以龙煤集团下属各矿区为主, 开采煤层数量较多, 多达 20 层煤可采, 主要受多层煤上下压茬煤柱以及厚硬顶板、断层构造影响; 江苏省徐州矿区也主要受大采深与煤柱等影响^[3-7]。随着煤炭资源开采区域逐渐向西部以及深部转移, 西部地区冲击地压矿井呈井喷式暴增, 尤其是以陕西省表现尤为突出, 这其中不乏针对该地区地质条件灾害发生与治理研究缺乏的原因^[8-9]。

自 2013 年 1 月陕西省发生首起煤矿冲击地压至今已 10 年, 冲击地压矿井数量已经发展到 24 座。笔者对这 24 座矿井 85 起冲击地压案例进行统计分析, 获得了冲击地压发生规律, 介绍了陕西省冲击地压监测技术、防治技术与法规管理发生历程, 最后总结了基于主控因素的冲击地压分类防治方法与成效, 为西部相似矿区冲击地压防治提供宝贵经验与技术借鉴。

1 冲击地压发生规律

1.1 冲击地压矿井分布特征

陕西省自 2013 年 1 月胡家河煤矿首次认定为冲击地压矿井, 至今共有认定冲击地压矿井 24 座, 矿井数量仅次于山东省, 位列全国第二, 总产能达到 9 535 万 t/a, 以彬长矿区、永陇矿区为核心, 向外放射状分布, 越靠近核心冲击危险性越高。冲击地压矿井地理位置如图 1 所示。从 2013 年黄陵侏罗纪煤田开发到现在, 10 年间冲击地压灾害对陕西省煤矿生产的影响始终持续着, 冲击地压灾害已经成为威胁煤矿安全生产的主要灾种。

24 座冲击地压矿井中, 煤层强冲击危险性的有 5 座, 中等的有 7 座, 弱的有 12 座, 一半冲击地压矿

井所采煤层具有中等及以上冲击危险。24 座冲击地压矿井中有 20 座属于五类灾害叠加矿井, 瓦斯、水害、自然发火与冲击地压灾害并存, 属于全国范围内受到多灾害叠加影响最为严重、防治难度最大的矿井群。其中全国认定的 5 座严重冲击地压矿井, 全部位于陕西, 彬长矿区 4 座, 永陇矿区 1 座。

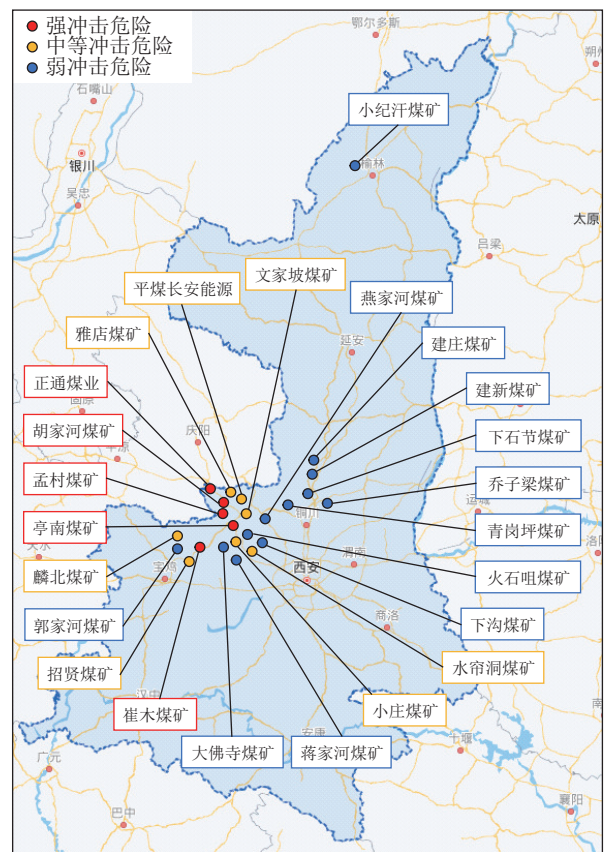


图 1 陕西省 24 座冲击地压矿井分布

Fig.1 Distribution of 24 rock burst mines in Shaanxi Province

1.2 冲击地压发生时期

陕西省以往冲击地压主要发生在回采、掘进和中央大巷服务期间, 如图 2 所示。其中发生在回采期间的为 56 起, 占 67%; 发生在掘进时期的为 14 起, 占 17%; 发生在大巷服务时期的为 13 起, 占 16%。可见, 采掘期间发生的冲击地压占事故总数的 84%, 回采时期冲击地压的发生起数最多。

掘进期间冲击地压数目峰值的年度是 2013 年, 回采期间冲击地压数目峰值的年度是 2015 年, 大巷

服务期间冲击地压数目峰值的年度是2019年。首先,2013年掘进期间即发生冲击地压,说明陕西省煤层局部基础静载荷相对较高,矿井开拓或首采工作面掘进即会出现冲击;而回采期间冲击地压通常是在盘区内第2个工作面回采时才会发生,因此年度稍微滞后;大巷服务期间冲击地压要到2019年达到峰值,这是由于大巷周边采掘活动充分开展对大巷冲击地压的发生造成一定影响。

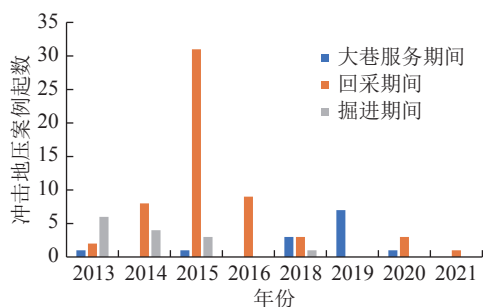


图2 陕西冲击地压发生的采掘时期

Fig.2 Mining period of rock burst occurrence in Shaanxi Province

1.3 冲击地压发生区域

如图3所示,分析可得掘进巷道冲击地压发生区域至掘进工作面最小距离大多小于5 m,滞后掘进工作面5 m以外虽也有冲击地压发生,但数目明显降低。

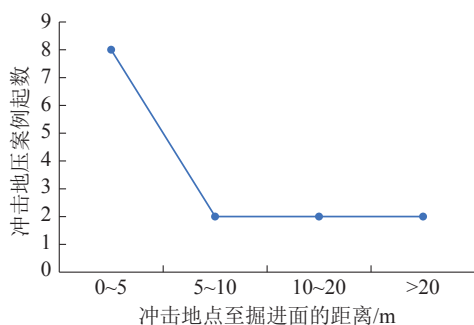


图3 掘进工作面冲击地压发生主要区域

Fig.3 Main areas of rock burst occurrence in excavation face

如图4所示,回采工作面冲击地压大多发生在工作面前0~50 m,工作面前50 m以外虽也有冲击地压发生,但数目明显降低。回采扰动是回采工作面冲击地压发生的重要影响因素。这43次冲击均是位于冲击显现临界状态,受到回采扰动影响出现冲击。

如图5所示,在中央、盘区大巷及盘区水仓服务期间有冲击地压发生,以中央大巷冲击发生次数居多,达到69.23%;回采期间83.93%冲击地压发生于邻空巷道,此外灌浆巷、回风巷、运输巷也有冲击地压发生;掘进期间冲击地压发生地点相对比较平均,中央大巷、盘区大巷、邻空巷道、灌浆巷、泄水巷、回风巷、运输巷掘进期间均有冲击地压发生。

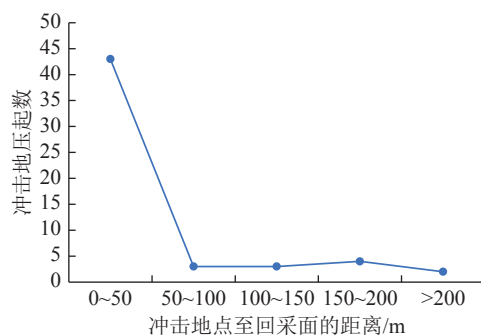


图4 回采工作面冲击地压发生主要区域

Fig.4 Main areas of rock burst occurrence in mining face

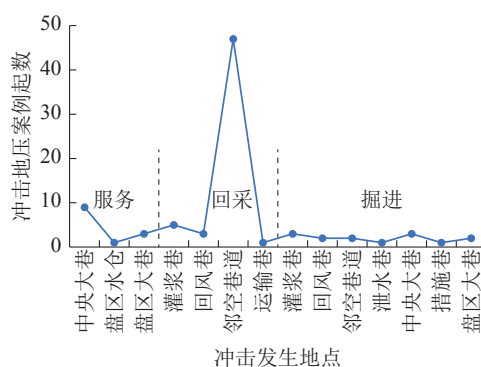


图5 冲击地压发生地点与起数

Fig.5 Rock burst occurrence location and number

2 冲击地压10年探索历程

2.1 监测技术发展历程

从2013年至今10年来陕西省内冲击地压矿井在冲击地压监测预警技术方面经历了4次大的变革,如图6所示。2013—2014年为冲击地压监测技术装备配置阶段,当时由于之前对冲击地压没有经验认识,主要是应对法规要求,各矿区域监测引进了波兰ARAMIS ME微震监测系统,局部监测采用传统的煤层钻屑法。2014—2017年为矿井对冲击地压认识阶段,通过近2年的探索,大家发现彬长、永陇等矿井煤层一般抗压强度20 MPa左右,钻屑法不吐粉,孔深也不到位,因此引进了煤体应力在线监测系统,进行局部监测。2017—2021年为监测技术发展第3阶段,冲击地压矿井发现采用煤体应力局部监测不适应掘进工作面,一方面掘进工作面危险性无法监测,另一方面掘进应力反应不敏感,因此引进了波兰ARES 5地音监测系统,随着掘进工作面推进而监测。2021年至今,一些近水平煤层的冲击地压矿井发现,单靠井下微震监测系统,垂直方向的定位精度难以满足灾害防范要求,因此进一步引进了波兰ARP2018地面微震监测系统,形成了井上下立体监测模式^[10-11]。至此,陕西省尤其是彬长矿区区域监测采用井上下

立体监测、回采工作面监测采用应力在线监测、超前两巷重点区域以及掘进工作面采用地音监测,形成了动静载分源、全尺度、全频段、全要素监测模式。



Fig.6 Development history of rock burst monitoring technology

2.2 防治技术探索历程

从2013年至今10年来陕西省内矿井在冲击地压防治技术方面也经历了4次大的变革,如图7所示。2013—2014年为冲击地压防治技术装备配置阶段,当时主要是应对法规要求,各矿主要针对煤层、底板采用直径为113 mm的大直径钻孔卸压方法。2014—2020年为矿井对防治效果认识阶段,2014年彬长矿区“9·9”冲击地压事故发生后,开始引进了高瓦斯矿井顶板深孔爆破断顶技术。2020—2021年,由于陕西省监管监察单位对冲击地压矿井加大管控力度,在相关法规中明确了防冲卸压技术参数,鉴于彬长、永陇等矿区煤层硬度大,采用直径113 mm大直径钻孔不宜塌孔,强制推行直径150 mm钻孔卸压技术^[12],彬长矿区一些矿井针对底鼓问题增加了底板爆破措施。同时2020年至今,在建设期的孟村煤矿中央大巷在周边没有采掘活动的情况下,2条大巷在构造区发生自发型冲击地压,中煤科工开采研究院首次采用千米钻机进行煤层顶板区域压裂,实现了中央大巷冲击地压的防治,该项技术迅速在彬长矿区大范围推广^[13-14],为了进一步升华效果,在孟



Fig.7 Development history of rock burst prevention and control technology

村矿401102回采工作面首次尝试了顶板地面压裂“先压后采、人造解放层”防治冲击地压技术,也取得了显著成效,2021年彬长矿区“10·11”冲击地压事故进一步证明,该项技术需要推广应用。为此国家矿山安全监察局在彬长矿区召开全国现场会进行观摩推广。至此,彬长矿区探索出了一条优化设计-区域卸压-局部卸压-强力防护-精细管理的防冲模式,正在实现冲击地压灾害源头治、地面治的目标。

2.3 管理法规探索历程

冲击地压得以防治,不仅需要先进适用的技术,也需要标准规范的管理制度进行技术定型与推广。陕西省自胡家河煤矿于2013年6月被鉴定为冲击地压矿井后,陕西省各级监管监察部门也积极开展防冲知识扫盲学习,借助科研院所进行相关法规的制定。2014年9月,受咸阳市煤炭工业局邀请,中煤科工开采研究院在咸阳市开展了首次冲击地压技术培训。2016年9月,课题组协助陕西省安委会出台了《陕西省煤矿冲击地压防治十条规定》,陕西省首个冲击地压法规出台。2017年5月,原国家煤监局组织课题组首次前往陕西进行冲击地压调研,陕西冲击地压受到国家关注。2019年12月,陕西省咸阳市人民政府印发了《咸阳市煤矿冲击地压防治管理办法》。2021年4月,课题组主持制定了《陕西省煤矿冲击地压防治规定》,为全国首例,由陕西省四部门共同发布。历经整整10年的技术与条件的互馈反应探索,陕西省煤矿冲击地压逐步形成了自身的技术路线与管理方法,冲击地压防治由过去的认识探索走向了分类防治,2023年2月,《陕西煤矿冲击地压“一类一策”防治建议》,由课题组协助完成,为全国首例,由国家矿山安全监察局陕西局发布。

3 冲击地压类型与治理

3.1 冲击地压发生影响因素

1) 开采深度影响。分析现有冲击地压案例,487.3 m埋深是陕西省冲击地压发生的临界深度。此外,如图8所示,陕西省冲击地压发生起数与埋深虽然并未表现出明显的正相关关系,因为陕西省冲击地压主要出现在彬长矿区、麟游矿区一带,该区域煤层埋深大部分聚集在700 m左右,千米深井还没有,所以冲击地压多集中在采深600~700 m。埋深小于700 m的冲击地压发生于亭南煤矿、胡家河煤矿和文家坡煤矿;埋深大于700 m的冲击地压发生于孟村煤矿和正通煤业。

2) 煤岩冲击倾向性。陕西省冲击地压多发生于强冲击倾向煤层,并且顶板岩层多具有弱冲击倾向

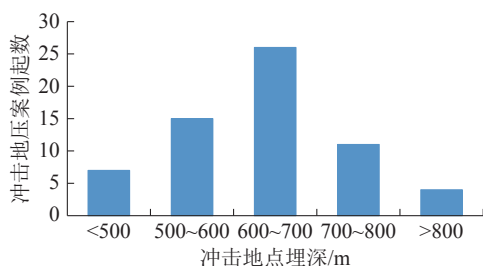


图8 冲击地压发生起数与埋深关系

Fig.8 Relationship between rock burst number and burial depth

性,仅有亭南矿冲击地压发生区域所在顶板具有强冲击倾向性。总体上看,当陕西省的煤岩层特征出现“煤层弱冲击+顶板弱冲击”时,煤岩层自身就已具备发生冲击地压的能力,当外界载荷环境满足冲击

启动判别准则时即会发生冲击,当煤层或顶板岩层具有“强冲击倾向性”时,对外界载荷环境的要求更低,冲击地压更容易发生。

3)地应力场。陕西省最大主应力为水平应力在16.50~38.67 MPa,属于高及超高地应力区。陕西省最大水平主应力的方位角大部分处于 $47^{\circ}\sim 175^{\circ}$,各个冲击地压发生巷道轴向与最大水平主应力的夹角 $5^{\circ}\sim 75^{\circ}$ 。由表1可知,仅有49次冲击地压发生时最大水平主应力与巷道轴线的夹角小于 45° ,其余34次冲击地压发生时的夹角均大于等于 45° ,说明当最大水平主应力与巷道轴线的夹角较大对于冲击地压的发生起到一定的促进作用,导致巷道冲击危险性的升高,但地应力场并非主要因素。

表1 冲击地压与地应力关系

Table 1 Relationship between impact ground pressure and ground stress

地应力场类型	最大水平主应力/MPa	冲击巷道方位角/($^{\circ}$)	最大水平主应力与冲击巷道夹角/($^{\circ}$)	冲击起数
构造应力主导型	16.5 ~ 20.4	144 ~ 175	5 ~ 36	44
	18.0 ~ 33.9	59 ~ 75	59 ~ 75	18
	24.9 ~ 26.4	130 ~ 145	45	2
	26.0 ~ 38.0	145 ~ 171	56 ~ 75	14
	37.3 ~ 38.7	47 ~ 57	5 ~ 11	5

4)煤层厚度影响。如图9所示,陕西省冲击地压多发生于厚度大于10 m的煤层,但也并非煤层越厚冲击地压发生的概率越大,陕西省冲击地压多集中10~20 m的煤层内。说明煤层厚度对于冲击地压的发生起到一定的促进作用,导致巷道冲击危险性的升高,但煤层厚度并非主控因素。

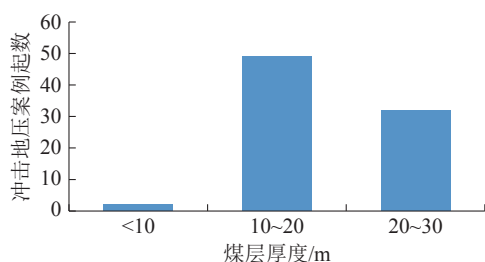


图9 冲击地压发生与煤层厚度关系

Fig.9 Relationship between rock burst and coal seam thickness

5)坚硬顶板影响。陕西省发生过冲击地压地点顶板岩层,一般直接顶厚度为0~8.52 m,煤层上方至煤层距离0~100 m范围内必有一定厚度10~49 m不等的坚硬砂岩层或者坚硬砂岩层组,粗略统计见表2。说明坚硬顶板是陕西省冲击地压发生的主控因素。

6)构造影响。如图10所示,距离断层200 m范围内呈距离断层越近冲击地压发生起数越高,由此推断断层构造的影响范围约为200 m,断层附近冲击地压发生概率较高;200 m以外虽也有冲击地压发生,但断层因素非主要影响因素。

陕西省A3向斜、A4背斜、A5向斜,X1向斜(壕口子向斜),南玉子向斜(哪坡—曹杏湾—公坡寺),路家一小灵台背斜附近均有冲击地压发生。

如图11所示,并没有出现距离向斜轴部越近冲击地压发生数目激增的现象,但是可以注意到大部分冲击地压发生在褶曲构造附近区域,说明褶曲对冲击地压具有一定的影响,但影响比较有限,原因是陕西省的褶曲构造两翼倾角较小,造成应力集中的程度有限。需要注意的是,断层和褶曲复合构造区冲击地压频发。

7)煤柱宽度影响。陕西省90%以上冲击地压发生在区段煤柱区。既可能在宽度30、44.5和69 m区段煤柱区,也可能发生在宽度15、20、21、25和34 m巷间煤柱区,也有大巷保护煤柱区。

如图12所示,净宽30~69 m区段煤柱区发生冲击地压48次,其中有18次冲击时,区段煤柱内布置有巷道;净宽15~35 m巷间煤柱区发生冲击地压

表 2 冲击地压发生起数与顶板岩性关系统计
Table 2 Statistics of relationship between rock burst occurrence and roof lithology

直接顶岩性 (下→上)	直接顶厚度/m (下→上)	基本顶岩性	基本顶厚度/m	冲击起数
泥质粉砂岩	2.7	中粒砂岩	5.7	10
		泥质粉砂岩	7.1	
		中粒砂岩	2.4	
		含砾粗砂岩	2.1	
砂质泥岩	0.6	细粒砂岩	49	1
		粗砂岩		
中粒砂岩	3.5	粉砂岩	18.5	1
		粉砂岩	13.2	
		粗粒砂岩	35.8	
泥岩	1.3	粗粒砂岩	6.8	1
		细粒砂岩	14.5	
		粗粒砂岩	20.5	
砂质泥岩	3.4	细粒砂岩	8.3	2
		粉砂岩	12.9	
		砂岩	1.8	
砂质泥岩	3.4	细粒砂岩	7.8	11
		粗粒砂岩	2.4	
		中粒砂岩	5.9	
		粗砂岩	17.0	
		粉砂岩	4.0	
		含砾砂岩	9.8	
		中砂岩	7.0	
砂质泥岩	12.0	粗粒砂岩	15.5	2
		细粒砂岩	2.1	
		粗粒砂岩	3.4	
砂质泥岩	8.5	粉砂岩	19.3	41
		细粒砂岩		
泥岩	0.3	细粒砂岩	24.7	2
		粗粒砂岩		
无	—	粗粒砂岩	12.2	5
		含砾粗砂岩	15.6	
		粉砂岩	5.6	
无	—	细砂岩	13.7	6

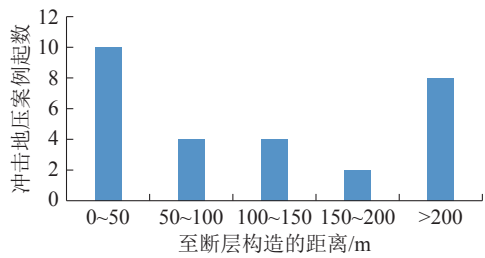


图 10 冲击地压发生与断层距离关系
Fig.10 Relationship between rock burst and fault distance

26 次。尤其是在区段煤柱内布置巷道,将会导致煤柱区冲击危险性进一步升高。可见,宽煤柱是陕西省导致冲击地压发生的主控因素之一。

8)巷道交叉影响。如图 13 所示,统计分析得陕西省 70% 冲击地压事故发生在多巷道交叉附近。形成巷道交叉以联络巷、水仓、硐室和泄水巷居多,因此优化工作面设计时需要减少上述巷道的数量。多巷道交叉区域也是掘进和回采时均发生冲击,并且距离巷道交叉位置越近,冲击地压发生次数也越多,

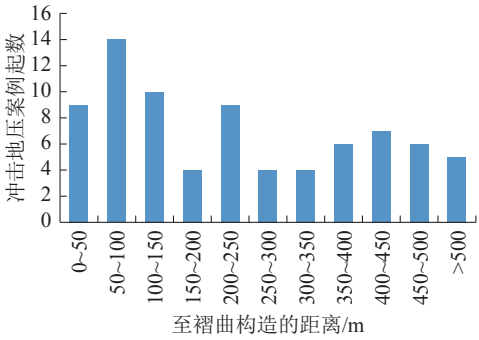


图 11 冲击地压发生与褶曲距离关系
Fig.11 Relationship between rock burst and folding distance

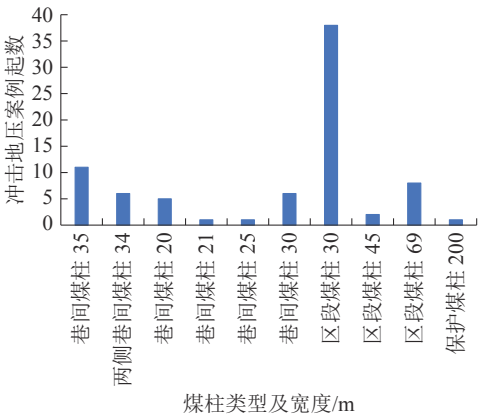


图 12 冲击地压发生与煤柱宽度关系
Fig.12 Relationship between rock burst and coal pillar width

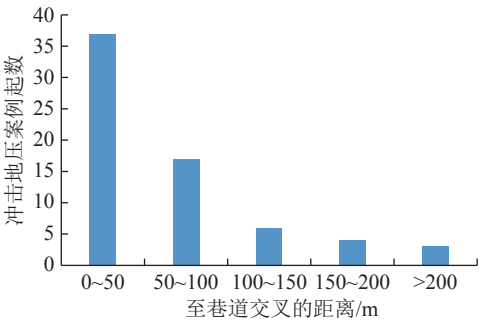


图 13 冲击地压发生与巷道交叉
Fig.13 Impact ground pressure occurrence and roadway intersection

说明在陕西省多巷道交叉时会大幅增大冲击危险性,在冲击危险性预评价中划分冲击危险区域时需要对其进行重点考虑,采取适当的措施以降低其冲击危险。

3.2 主要类型及其治理

3.2.1 冲击地压类型划分

综合陕西省冲击地压发生特征以及 24 座冲击地压矿井的实际情况,可知煤岩冲击倾向性、坚硬顶板、地质构造、厚底煤、宽煤柱、巷道密集、孤岛大煤柱和煤层厚度变化等因素对冲击地压的发生均有

影响。这些因素中,坚硬顶板、地质构造及宽煤柱对冲击地压的影响程度更高、影响范围更广,称为主控因素;而煤岩冲击倾向性、厚底煤、巷道密集、孤岛大煤柱和煤层厚度变化等因素由于影响程度相对较低,称为辅助因素,具体见表 3。无论是主控因素还

是辅助因素,都不是独立作用,都存在交叉组合,但主控因素是核心,如果消除主控诱发因素,其他辅助因素将不再是影响因素。

目前在煤柱设计上“能减尽减、能小尽小”,一方面取消了灌浆巷布置,并将工作面泄水巷调整到

表 3 陕西省 24 座冲击地压矿井主控因素
Table 3 Main control factors for 24 rock burst mines in Shaanxi Province

矿井	主采煤层	煤层冲击倾向	顶板冲击倾向	煤层冲击危险	采深/m	顶板岩层	区段煤柱类型	构造发育程度	底煤薄厚	主控因素	辅助因素
陕西彬长胡家河矿业有限公司	4	强	弱	强	578 ~ 790	坚硬顶板	宽煤柱	复杂构造	厚底煤	坚硬顶板复杂构造宽煤柱	大采深、局部巷道密集、大巷煤柱、厚底煤
陕西彬长孟村矿业有限公司	4	强	弱	强	400 ~ 900	坚硬顶板	宽煤柱	复杂构造	厚底煤	坚硬顶板复杂构造宽煤柱	大采深、局部巷道密集、大巷煤柱、厚底煤
陕西正通煤业有限公司	4	强	弱	强	820 ~ 1 089	坚硬顶板	窄煤柱	简单构造	厚底煤	坚硬顶板复杂构造	大采深、局部巷道密集、大巷煤柱、厚底煤
陕西长武亭南煤业有限责任公司	4	强	弱 (二盘区强)	强	410 ~ 730	坚硬顶板	宽煤柱	简单构造	厚底煤	坚硬顶板宽煤柱	大采深、局部巷道密集、大巷煤柱、地质构造、厚底煤
陕西永陇能源开发建设有限公司	3	弱	弱	强	650	坚硬顶板	宽煤柱	复杂构造	回采巷道薄底煤 北翼运输大巷厚底煤	坚硬顶板复杂构造宽煤柱	大采深、煤厚变化、局部巷道密集、局部厚底煤
陕西彬长文家坡矿业有限公司	4	弱	弱	中等	550 ~ 809	坚硬顶板	宽煤柱	局部复杂构造	回采巷道薄底煤	坚硬顶板宽煤柱	大采深、煤厚变化、局部巷道密集、局部地质构造
陕西彬长小庄矿业有限公司	4	弱	弱	中等	350 ~ 850	坚硬顶板	宽煤柱	局部复杂构造	厚底煤	坚硬顶板区段宽煤柱	大采深、煤厚变化、局部巷道密集、局部地质构造、厚底煤
陕西金源招贤矿业有限公司	3	弱	弱	中等	400 ~ 700	坚硬顶板	宽煤柱	复杂构造	大于1.5 m厚底煤	坚硬顶板复杂构造宽煤柱	大采深、煤厚变化、局部巷道密集、大于1.5 m厚底煤
陕西麟北煤业开发有限责任公司	2 2 ¹	弱	弱	中等	534 ~ 818	坚硬顶板	宽煤柱	复杂构造	薄底煤或不留底煤	坚硬顶板复杂构造宽煤柱	大采深、局部巷道密集
彬县水帘洞煤炭有限责任公司	4	弱	弱	中等	311 ~ 401	坚硬顶板	窄煤柱	局部复杂构造	薄底煤	坚硬顶板	大采深、煤厚变化、局部巷道密集、局部地质构造、孤岛工作面
陕西华彬雅店煤业有限公司	1 4	弱	弱	中等	497 ~ 892 472 ~ 886	坚硬顶板	宽煤柱	复杂构造	1煤无底煤 4煤1 ~ 4 m底煤	坚硬顶板复杂构造宽煤柱	大采深、煤厚变化、局部巷道密集、4煤厚底煤
平煤长安能源有限公司	—	—	—	中等	—	—	—	—	—	—	—
陕西华电榆横煤电有限公司 小纪汗煤矿	2	弱	弱	弱	405 ~ 445	坚硬顶板	宽煤柱	构造不发育	不留底煤	坚硬顶板宽煤柱	较大采深、区段宽煤柱
陕西煤业集团黄陵建庄矿业有限公司	4 ²	弱	弱	弱	407 ~ 740	厚硬顶板	窄煤柱	断层构造	薄底煤	坚硬顶板复杂构造	大采深、局部巷道密集、大巷煤柱、孤岛煤柱
陕西建新煤化有限责任公司	4 ²	弱	弱	弱	394 ~ 818	坚硬砂岩顶板	宽煤柱	简单构造	薄底煤	坚硬顶板宽煤柱	大采深、局部巷道密集、地质构造
陕西陕煤铜川矿业有限公司 下石节煤矿	4 ² 3 ²	弱	弱	弱	550 ~ 650	坚硬砂岩顶板	宽煤柱	断层构造	不留底煤	坚硬顶板宽煤柱	大采深、局部巷道密集、断层构造
陕西郭家河煤业有限责任公司	3	弱	弱	弱	680 ~ 860	坚硬砂岩顶板	宽煤柱	复杂构造	薄底煤	坚硬顶板复杂构造宽煤柱	大采深、煤厚变化、工作面外错、局部巷道密集
陕西火石咀煤矿有限责任公司	4 ²	弱	弱	弱	645 ~ 724	顶板较坚硬	宽煤柱	简单构造	薄底煤	无	大采深、煤厚变化、局部巷道密集

续表

矿井	主采煤层	煤层冲击倾向	顶板冲击倾向	煤层冲击危险	采深/m	顶板岩层	区段煤柱类型	构造发育程度	底煤薄厚	主控因素	辅助因素
彬县煤炭有限责任公司下沟煤矿	4	弱	弱	弱	337 ~ 530	厚硬顶板	窄煤柱	小断层、15° ~ 18° 褶曲	1 ~ 2 m 底煤	褶曲构造	采区下山煤柱、局部巷道密集、1 ~ 2 m底煤
彬县煤炭有限责任公司蒋家河煤矿	4	弱	弱	弱	440 ~ 545	厚层顶板	窄煤柱	构造不发育	不留底煤	坚硬顶板	较大采深、局部巷道密集、煤厚变化
陕西彬长大佛寺矿业有限公司	4 ^上	弱	弱	弱	265 ~ 642 312 ~ 725	局部坚硬顶板	宽煤柱	局部断层构造	薄底煤	局部坚硬顶板和断层构造、宽煤柱	较大采深、局部巷道密集、煤厚变化、局部厚底煤
旬邑县中达燕家河煤矿有限公司	5 8	弱	弱	弱	374 ~ 383 295 ~ 702	坚硬顶板	窄煤柱	断层构造	回采巷道薄底煤大巷局部厚底煤	断层构造坚硬顶板	较大采深、采区下山煤柱、局部巷道密集
陕西旬邑青岗坪矿业有限公司	4	弱	弱	弱	430 ~ 510	坚硬砂岩顶板 高位巨厚覆岩	宽煤柱	断层构造、褶曲构造	薄底煤、局部1.5 m	坚硬砂岩顶板、宽煤柱	较大采深、断层、褶曲、局部巷道密集、煤厚变化

注：底煤薄厚以厚度1 m为分界。

底板岩层内,或者布置盘区集中泄水巷在底板岩层中;另一方面将复合灾害较轻的矿井,煤柱调整为宽度不大于6 m,一定程度上降低了宽煤柱的冲击风险。地质构造影响往往是较大地质构造或构造群,具有大范围区域性、周期性影响特点,主要体现在顶板、底板,但是不管宽煤柱还是构造主导,都离不开上覆顶板加载作用,因此陕西煤矿冲击地压在多种因素作用下形成以下主要场景。

基于冲击地压主控因素,这里将陕西省冲击地压划分为3大类,分别为:坚硬顶板主导型、地质构造主导型和宽煤柱主导型。主要防治思路是:基于主控因素分类后,分析各类冲击地压的发生特点,并将主控因素作为冲击地压防治的重点,针对主控因素提出主导防治方法,此外,针对辅助因素的其他防治方法需要根据现场实际情况进行选择。

3.2.2 冲击地压分类防治

1)厚硬顶板主导型冲击地压防治

陕西省24座冲击地压矿井有18座均不同程度地受到煤层上覆厚硬顶板的影响。对该类型冲击地压起到关键作用的通常为煤层巷道上部垂距100 m范围内赋存厚度大于10 m的砂岩岩层,矿井受影响的范围一般能达到1-2采区(盘区),甚至整个矿井,因此厚硬顶板属于区域性影响因素^[15]。而厚硬顶板的影响时期通常从矿井服务初期,同一采区(盘区)连续分布的第2或第3个回采工作面开始。随着矿井开采范围的增大,采空区面积的增大,坚硬顶板的影响程度也逐渐升高,主要原因是当仅有小范围采空时主要是上覆低位坚硬顶板产生影响,但是当大范围采空后高位坚硬顶板的影响将会出

现,形成高位+低位坚硬顶板的叠加影响。此时,影响的不仅是回采工作面,还有中央大巷或采区(盘区)大巷。典型的厚硬顶板主导型冲击地压案例包括,亭南矿206、207工作面邻空巷道冲击地压显现,文家坡矿4104工作面回采期间邻空巷道冲击地压显现等。

坚硬顶板主导型冲击地压防治的关键是区域性弱化坚硬顶板,通常“一次”施工便可完成治理,能够从根本上消除该因素的影响,不必长期反复对同一块顶板进行弱化,坚硬顶板处理后不存在时间效应。但需要注意,对坚硬顶板的处理必须满足2点要求:①同一层位的坚硬顶板必须区域性充分弱化,即将坚硬顶板切成的块度足够小;②弱化坚硬顶板的层位必须合理,高位、低位坚硬顶板一般需要同时处理。课题组针对高低顶板分别开发了高位顶板地面区域压裂技术、低位顶板井下千米钻机区域水力压裂技术。文献[16-18]有具体报道,在此不再赘述。其中地面区域压裂:压裂规模大,可实现区域高位或低位坚硬顶板弱化;井下超长水平孔局部压裂:压裂规模中等,可实现局部中位或低位坚硬顶板弱化。对于上覆岩层100 m范围内存在多层厚硬顶板,可采用井地协调立体压裂技术,如图14所示。

2)宽煤柱主导型冲击地压防治

宽煤柱主导型冲击地压在陕西省分布较为广泛,24座冲击地压矿井有16座均不同程度地受到宽煤柱的影响。早期,煤矿在宽煤柱内布置有泄水巷和灌浆巷,形成“三巷两煤柱”和“四巷三煤柱”的局面,导致宽煤柱及其影响巷道的冲击危险性进一步升高。后期,由于设计优化,取消了灌浆巷布置,并将工作

面泄水巷调整到底板岩层内,或者布置盘区集中泄水巷在底板岩层中,一定程度上降低了宽煤柱的冲击风险。从根本、源头上解决宽煤柱问题的方法,是将宽煤柱调整为宽度不大于 6 m 的窄煤柱或无煤柱;但在实际操作时,受到水、火、瓦斯等其他灾害的影响,窄煤柱护巷在多灾害矿井现阶段难以采用。宽煤柱留设后,会与上覆坚硬顶板形成“T”型结构,使得宽煤柱相邻巷道冲击危险性大幅提升,尤其在遇到断层、巷道交叉等特殊区域或“见方”“来压”等特殊时期时,冲击危险性将进一步升高,甚至导致冲击地压显现。

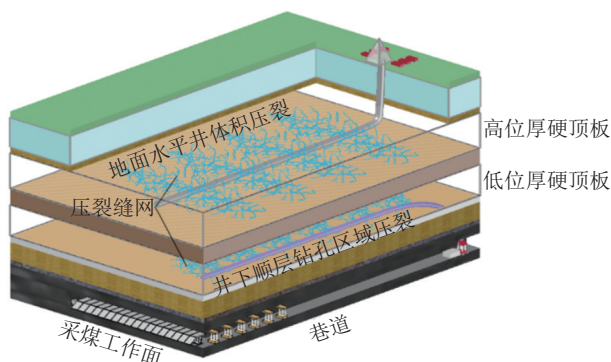


图 14 厚硬顶板井地协同立体压裂方案示意

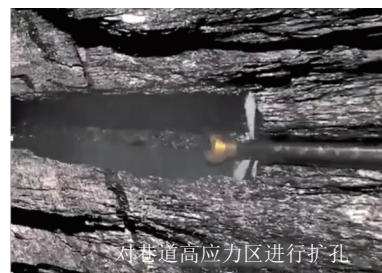
Fig.14 Schematic of collaborative three-dimensional fracturing scheme for thick hard top plate well and ground

宽煤柱主导型冲击地压防治的关键是转移煤柱的高集中应力,将应力峰值及其显著影响范围向远离巷道空间方向转移。为了高效实现该目的,开发了煤层水力旋切扩孔掏槽技术,对巷道侧向高应力区进行扩孔,形成远大于钻孔直径的卸压空间,施工效果如图 15 所示,掏槽后的空洞大小为 150 mm 钻孔的 45~60 倍,其有效卸压半径达 4.0 m 以上。通过现场实施,解决了常规大直径钻孔单孔卸压空间小、应力恢复快的问题;显著提高卸压效果的同时,极大降低卸压孔密度,减小对巷道支护的破坏;具有一次预卸压到位,避免反复解危,降低对生产干扰等优势;适合远程遥控作业,应用前景广阔。

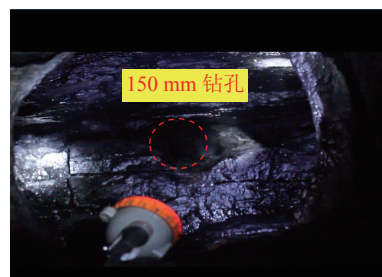
扩孔后,巷道侧向峰值应力降低 40% 以上,巷道底鼓量降低 60%,扩孔区域未发生能量大于 10^4 J 的微震事件,技术实施前后钻孔应力监测变化曲线如图 16 所示。

3) 构造主导型冲击地压防治

地质构造主导型冲击地压在陕西省分布较为广泛,24 座冲击地压矿井有 12 座均不同程度受到地质构造的影响。地质构造影响范围一般为地质构造周边 0~300 m,通常发育程度更高的地质构造影响



(a) 巷道煤体水射流扩孔



(b) 水射流扩孔与大直径钻孔对比

图 15 煤层水力旋切扩孔掏槽示意

Fig.15 Schematic of hydraulic rotary cutting and expanding hole cutting in coal seam

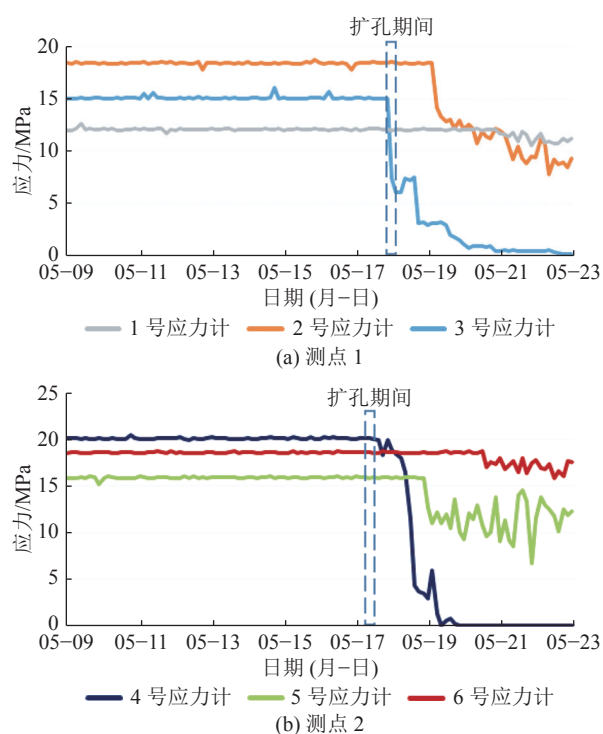


图 16 煤层水力旋切扩孔掏槽对应力分布的影响

Fig.16 Effect of hydraulic rotary cutting and expanding of coal seam on stress distribution

范围会更大。并且地质构造的影响在时间上持续性很长,只要其周边有采掘活动,地质构造的影响就始终存在,无法完全消除。因此,当服务周期较长的煤层大巷遇到大型地质构造,不但掘进期间冲击地压显现频繁,后期使用期间冲击地压也呈周期性

显现的规律,例如高家堡一盘区大巷、孟村受复合构造区影响的煤层大巷、崔木矿中央大巷等,这些大巷最终结果为封闭处理或调层位至顶板岩层或每年不停维修,耗费巨大。而服务周期较短的采煤工作面,在设计时通常会避开大型地质构造,但在掘进中常会揭露一些落差在0~10 m的小型断层,这些断层常会导致周边煤体冲击危险性升高,尤其是附近还有褶曲构造,形成了复合构造区,影响更是巨大,例如胡家河矿“10·11”冲击地压事故就发生在复合构造区。

地质构造主导型冲击地压防治的关键是释放构

造应力,构造应力主要赋存于煤层顶板与底板中。由于任何人工措施都不可能将地质构造完全消灭,而只要地质构造存在,周边区域构造应力的集聚和升高就始终进行着,所以对于地质构造主导型冲击地压的防治核心是扰乱其水平应力集中方向,同时兼顾降低垂直应力的集中程度。如图17所示,孟村煤矿发生全国罕见的在用大巷冲击地压,在没有可借鉴经验基础上,课题组提出对断层东翼的煤层上覆顶板采用千米钻机进行区域性水力压裂,对断层东翼水平应力、垂直应力集中都实现了扰动,从而实现了大巷冲击地压的防治。

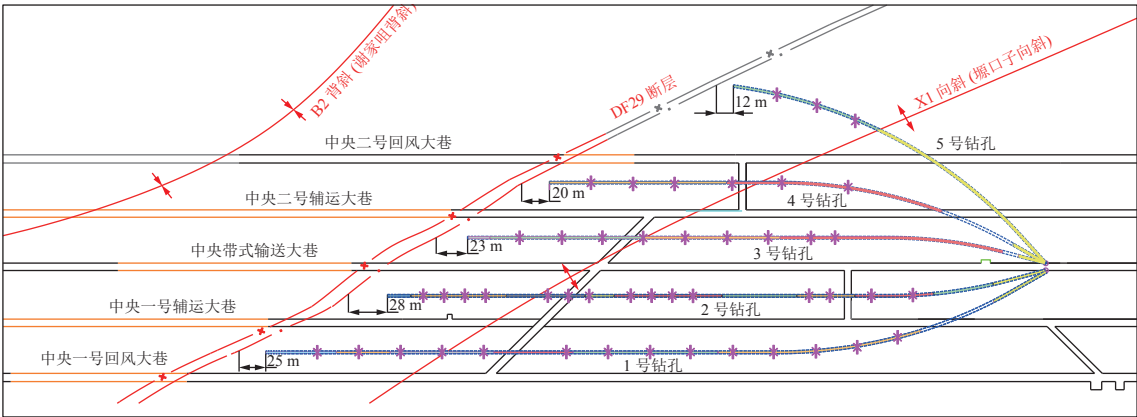


图 17 孟村煤矿顶板千米顺层区域压裂钻孔布置^[19]

Fig.17 Layout plan of roof bedding regional fracturing boreholes in Mengcun Coal Mine^[19]

3.3 防治成效

陕西省冲击地压出现在2013年1月,当时许多矿井正在建设阶段,随着相似条件的黄陇侏罗纪煤田彬长、永陇矿区大规模开发,冲击地压矿井数量、发生次数井喷式增长,如图18所示,2015年达到冲击地压显现的峰值;从2016年后,彬长矿区各矿对冲击地压加大研究,优化矿井开采设计,加大防冲卸压技术的落实,冲击地压显现逐年减少,尤其是近3年来煤层厚硬顶板千米顺层钻孔区域压裂技术试验成功后,随着各矿井陆续推广应用,冲击地压事故数目明显降低。

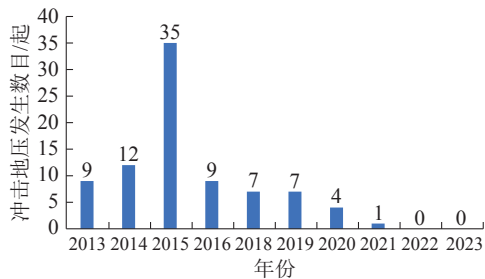


图 18 2013—2023 年陕西省冲击地压发生起数

Fig.18 Number of rock burst events in Shaanxi Province during 2013—2023

4 结 论

1)陕西省煤矿冲击地压具有灾害矿井集中、灾害程度严重、多灾害叠加影响显著、防治难度大等特点。考虑到冲击地压灾害自身的影响因素众多、作用机理复杂、现场动态多变的特征,需要开展陕西省冲击地压区域性、源头性及全面性治理。

2)基于主控因素对陕西省冲击地压进行分类,并针对每种类型冲击地压提出了防治对策,建议了防治新技术,以实现防冲效率及效果的提升。

3)针对各煤矿、采区(盘区)、工作面的实际情况,进行防控对策的进一步细化和具体化,形成各矿井的“一类一策”。对于陕西省煤矿冲击地压灾害治理依然任重道远,仍需要进一步开展系统化、科学化、精细化研究。

参考文献(References):

[1] 潘一山,李忠华,章梦涛.我国冲击地压分布、类型、机理及防治研究[J].岩石力学与工程学报,2003,22(11):1844-1851.
PAN Yishan, LI Zhonghua, ZHANG Mengtao. Research on the distribution, types, mechanisms, and prevention of rockburst in China[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003,

- 22(11): 1844–1851.
- [2] 齐庆新, 李一哲, 赵善坤, 等. 我国煤矿冲击地压发展 70 年: 理论与技术体系的建立与思考[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(9): 1–40.
 QI Qingxin, LI Yizhe, ZHAO Shankun, *et al.* 70 years of development of coal mine rock burst in China: establishment and reflection of theoretical and technical systems[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(9): 1–40.
- [3] 窦林名, 田鑫元, 曹安业, 等. 我国煤矿冲击地压防治现状与难题[J]. 煤炭学报, 2022, 47(1): 152–171.
 DOU Linming, TIAN Xinyuan, CAO Anye, *et al.* Current situation and difficulties in the prevention and control of coal mine burst in China[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 152–171.
- [4] 姜耀东, 赵毅鑫. 我国煤矿冲击地压的研究现状: 机制、预警与控制[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(11): 2188–2204.
 JIANG Yaodong, ZHAO Yixin. Research status of coal mine rock-burst in China: mechanism, warning and control[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(11): 2188–2204.
- [5] 许胜铭, 李松营, 李德翔, 等. 义马煤田冲击地压发生的地质规律[J]. 煤炭学报, 2015, 40(9): 2015–2020.
 XU Shengming, LI Songying, LI Dexiang, *et al.* Geological characteristics of rock burst occurrence in Yima coalfield[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(9): 2015–2020.
- [6] 窦林名, 周坤友, 宋士康, 等. 煤矿冲击矿压机理、监测预警及防控技术研究[J]. 工程地质学报, 2021, 29(4): 917–932.
 DOU Linming, ZHOU Kunyou, SONG Shikang, *et al.* Research on the mechanism, monitoring, early warning and prevention and control technology of coal mine rock burst[J]. Journal of Engineering Geology, 2021, 29(4): 917–932.
- [7] 潘一山, 宋义敏, 刘 军. 我国煤矿冲击地压防治的格局、变局和新局[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(9): 2081–2095.
 PAN Yishan, SONG Yimin, LIU Jun. The pattern, changes, and new situation of coal mine rockburst prevention and control in China[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(9): 2081–2095.
- [8] 潘俊锋, 简军峰, 刘少虹, 等. 黄陇侏罗纪煤田冲击地压地质特征与防治[J]. 煤矿开采, 2019, 24(1): 110–115.
 PAN Junfeng, JIAN Junfeng, LIU Shaohong, *et al.* Geological characteristics and prevention of rock burst in Huanglong Jurassic coal field [J]. Coal Mining, 2019, 24(1): 110–115.
- [9] 刘育晖, 张 晔, 赵 恒. 陕西彬长矿区冲击地压防治现状[J]. 煤矿开采, 2017, 22(6): 92–95.
 LIU Yuhui, ZHANG Ye, ZHAO Heng. Current situation of rock-burst prevention and control in Binchang mining area, Shaanxi [J]. Coal Mining, 2017, 22(6): 92–95.
- [10] 王元杰, 刘 宁, 陈法兵, 等. 基于井上下微震联合监测技术的地面水平井分段压裂效果分析[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2023, 5(3): 87–97.
 WANG Yuanjie, LIU Ning, CHEN Fabing, *et al.* Analysis of segmented fracturing effect in surface horizontal wells based on joint monitoring technology of upper and lower microseisms[J]. Journal of Mining and Rock Formation Control Engineering, 2023, 5(3): 87–97.
- [11] 杜涛涛. 冲击地压煤矿井上下微震联合监测技术[J]. 煤矿安全, 2022, 53(7): 92–98.
 DU Taotao. Joint monitoring technology for upper and lower microseisms in coal mines with impact ground pressure[J]. Safety in Coal Mines, 2022, 53(7): 92–98.
- [12] 陈 涛. 煤巷底板防冲钻孔释能解危原理及参数优化[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(5): 21–31.
 CHEN Tao. Principle and parameter optimization of energy release and danger relief for coal roadway floor anti erosion drilling[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(5): 21–31.
- [13] 吴学明, 马小辉, 吕大钊, 等. 彬长矿区“井上下”立体防治冲击地压新模式[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(3): 19–26.
 WU Xueming, MA Xiaohui, LYU Dazhao, *et al.* A new model for three-dimensional prevention and control of rock burst in the Binchang mining area[J]. Coal Geology and Exploration, 2023, 51(3): 19–26.
- [14] 门 鸿, 赵华全, 姜耀东, 等. 特厚煤层地面 L 型水平井分段压裂技术应用研究[J]. 煤矿安全, 2023, 54(7): 50–58.
 MEN Hong, ZHAO Huaquan, DOU Guidong, *et al.* Research on the application of segmented fracturing technology in L-shaped horizontal wells on the surface of ultra-thick coal seams[J]. Safety in Coal Mines, 2023, 54(7): 50–58.
- [15] 齐庆新, 马世志, 孙希奎, 等. 煤矿冲击地压源头防治理论与技术架构[J]. 煤炭学报, 2023, 48(5): 1861–1874.
 QI Qingxin, MA Shizhi, SUN Xikui, *et al.* Theoretical and technical framework for prevention and control of coal mine rock-burst source[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(5): 1861–1874.
- [16] 潘俊锋, 康红普, 闫耀东, 等. 顶板“人造解放层”防治冲击地压方法、机理及应用[J]. 煤炭学报, 2023, 48(2): 636–648.
 PAN Junfeng, KANG Hongpu, YAN Yaodong, *et al.* Method, mechanism, and application of preventing and controlling rock-burst in the “artificial liberated layer” of roof[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(2): 636–648.
- [17] 潘俊锋, 陆 闯, 马小辉, 等. 井上下煤层顶板区域压裂防治冲击地压系统及应用[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(2): 106–115.
 PAN Junfeng, LU Chuang, MA Xiaohui, *et al.* Fracturing prevention and control of rock burst in the roof area of upper and lower coal seams and its application[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(2): 106–115.
- [18] 潘俊锋, 刘少虹, 高家明, 等. 深部巷道冲击地压动静载分源防治理论与技术[J]. 煤炭学报, 2020, 45(5): 1607–1613.
 PAN Junfeng, LIU Shaohong, GAO Jiaming, *et al.* Theory and technology of dynamic and static load source separation prevention and control for deep roadway impact[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(5): 1607–1613.
- [19] 潘俊锋, 闫耀东, 马小辉, 等. 考虑时变特性的煤层大巷群冲击地压机理及防治[J]. 煤炭学报, 2022, 47(9): 3384–3395.
 PAN Junfeng, YAN Yaodong, MA Xiaohui, *et al.* Mechanism and prevention of coal seam main roadway group rockburst considering time-varying characteristics[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(9): 3384–3395.