

超深上仰孔卸压爆破集中煤柱工艺技术研究

邵红旗

(中煤科工集团西安研究院有限公司, 陕西 西安 710077)

摘要:为了防治浅埋近距离煤层群开采时下组煤采出上覆集中倾向煤柱易发生的动力压架灾害,在分析超深孔卸压松动爆破防灾原理基础上,提出了一种超深上仰孔卸压爆破集中煤柱技术,通过理论分析、地面传爆试验及井下工业性试验,解决完善了该技术的 3 大工艺技术难题:一是利用自主研发的装药装置,解决了超深(最深达 110 m)上仰孔(仰角 30°)安全快速安装炸药难题;二是根据钻孔爆破裂隙圈半径及煤柱塑性区宽度理论计算结果找到了最佳炮孔布设间距;三是利用地面传爆试验和 C-S 双液浆凝胶特性试验解决了超长装药段(最长达 16 m)炸药安全传爆及炮孔堵塞难题,优化了起爆方法,消除了管道效应,核算了爆破振动安全允许距离,实现了安全、高效封孔。该工艺技术的成功应用表明其具有工程借鉴及推广应用意义。

关键词:浅埋近距煤层;集中煤柱;超深上仰孔;卸压爆破;压架灾害

中图分类号:TD235.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2019)08-0056-05

Pressure relief blasting of concentrated coal pillars with super long upward holes

SHAO Hongqi

(Xi'an Research Institute of China Coal Technology & Engineering Group Corp., Xi'an Shaanxi 710077, China)

Abstract: In order to prevent the support crushing disaster, a technique is presented for pressure relieve blasting of concentrated coal pillars with the super long upward hole through analysis of the theory of disaster prevention by pressure relief and loosening blasting with super long upward holes. Three technical difficulties have been solved through field practices and some experiments. First, an explosive charging device was developed by ourselves for quick explosive charging even to 110m hole depth with the angle to 30°. Second, the optimal spacing of blasting holes was found through theoretical calculation. Third, the explosive safety detonation and elimination of plugging of the super long upward hole was achieved through the explosive test and the cement-silicate grouting's setting properties test. Successful field blasting practices proved the technique can provide engineering reference and be promoted.

Key words: shallowly-buried short-distance coal seams; concentrated coal pillar; super deep upward hole; blasting for pressure relief; support crushing disaster

0 引言

陕北侏罗纪煤田进入煤层群下组煤开采时,需采出上覆各种残留煤柱,这时往往伴随着强矿压显现问题,其中较普遍且危害性大的矿压灾害就是切顶压架灾害^[1]。

关于神东矿区侏罗纪煤田薄基岩厚风积沙型浅埋近距离煤层群开采动压压架灾害防治技术方面的研究,成果丰硕,鞠金峰等^[1-2]利用关键层理论分析压架机理的基础上提出了煤柱边界预掘空巷或预爆破、煤柱边界未压实采空区充填及煤柱边界上方关

键块体结构预爆破强放等防治对策。屠世浩等^[3]采用弹性能理论,对覆岩变形破坏、冲击式来压原因、压架机理、地表移动规律和井下矿压规律关系等进行了研究,针对性地提出了残留煤柱爆破放顶卸压、地面钻孔注砂充填煤房和合理控制采高等控制和预防措施。付兴玉等^[4]通过分析超前支承压力作用下小煤柱保持稳定时的临界弹性核宽度、动载荷作用下工作面覆岩结构及支架载荷,对动载矿压的发生机理进行研究的基础上提出了煤柱爆破防治措施。李浩荡等^[5-6]在文献[1]压架机理分析的基础上,提

收稿日期:2018-09-27 DOI:10.12143/j.tkgc.2019.08.008

基金项目:陕西省工业科技攻关项目(编号:2016GY-161)

作者简介:邵红旗,男,汉族,1982年生,副研究员,岩土工程专业,硕士,主要从事矿山地质灾害防治方面的研究工作,陕西省西安市高新区锦业一路 82 号,shaohongqi@cctegxian.com。

引用格式:邵红旗.超深上仰孔卸压爆破集中煤柱工艺技术研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(8):56-60.

SHAO Hongqi. Pressure relief blasting of concentrated coal pillars with super long upward holes[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019,46(8):56-60.

出了煤柱爆破的治理方案。徐敬民等^[7]综合考虑下煤层采动、超前支承压力及关键块体逆向回转滑落失稳是造成工作面发生强烈动载矿压的根本原因,并提出了煤柱爆破的防治措施。

可见煤柱爆破是治理压架灾害的一种普遍且有效的技术措施,但是理论分析必须与实践相结合才能创造更大的经济和社会效益。本文创新性地提出了一种井下超深上仰孔卸压爆破集中煤柱防治动灾技术,与国内文献报道的煤柱爆破技术相比,突破了现行技术规范、规程,解决了 3 大工艺技术难题,分别是当炮孔深达 110 m,仰角达 30°时的安全高效装药难题、当装药段长度达 16 m 时的炸药安全传爆及炮孔堵塞难题。经工程实践验证,该工艺技术具

有工程借鉴和推广应用价值。

1 工程概况

神木某矿 3301 工作面,属于典型薄基岩、厚风积沙型浅埋近距离煤层群开采,埋深 157.07~101.50 m,倾向宽 200 m,走向长 2260 m,平均采高 2.8 m,与上覆 2-2 煤层间距 36~42 m。上覆 2-2 煤平均厚 4.2 m,煤质较硬,3301 面回采时从切眼开始需经历上覆 2-2 煤无煤区、实煤体区、房采空区、旺采采空区、倾向集中条带煤柱区及长壁综采采空区,详见图 1 所示。覆岩结构极其复杂,根据类似采矿地质条件下的生产实践经验,3301 工作面回采经历上覆 2 条集中倾向煤柱(分别是 14 m 和 7 m

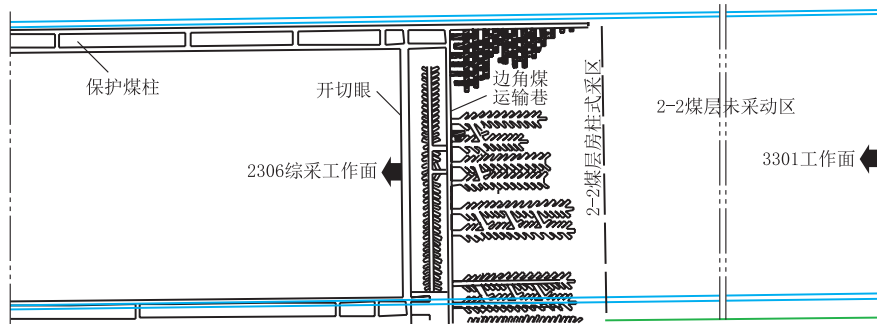


图 1 工作面与上覆煤柱位置关系图

Fig.1 Layout of working face and concentrated coal pillars

宽)时,易发生动力压架灾害。

2 超深孔卸压松动爆破防灾原理

2.1 超深孔松动爆破原理

现行国家标准^[8]定义:炮孔直径 ≤ 50 mm,炮孔深度 > 5 m 的爆破作业叫浅孔爆破;炮孔直径 > 50 mm,并且深度 > 5 m 的爆破作业叫深孔爆破。文献^[9]认为:钻孔直径为 40~60 mm,深度 8~15 m,充分利用爆破能量,使爆破对象成为裂隙发育体且不产生抛掷叫深孔松动爆破;炮孔深度在 15 m 以上,炮孔直径在 75 mm 以上的叫超深孔松动爆破。本文涉及的工程中炮孔深度达 110 m,属于超深孔松动爆破范畴。

由文献^[9]可知超深孔松动爆破原理为:利用不耦合装药空隙的存在减小作用在孔壁上的爆压峰值,并为炮孔间提供了聚能的临空面。削减后的爆压峰值不致使孔壁产生明显的压缩破坏,只切向拉力使炮孔四周产生径向裂纹,加之临空面聚能作用使孔间连线产生应力集中,孔间裂纹发展,而滞后的

高压气体沿缝产生“气刃”劈裂作用,使周边孔间连线上裂纹全部贯通。

2.2 超深孔卸压松动爆破防灾原理

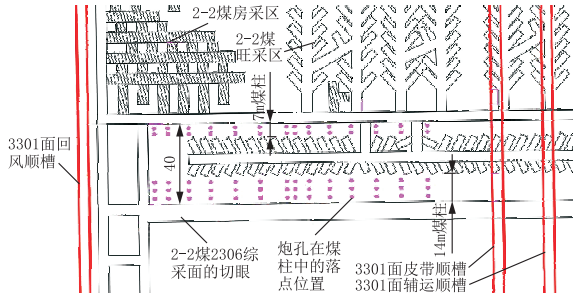
浅埋近距离煤层群开采时下组煤采出上覆残留集中倾向煤柱动力压架灾害的本质是,上覆残留煤柱顶板坚硬,物理力学性质好,残留煤柱具有冲击倾向性,层间岩层的综合抗剪能力弱 3 个综合因素导致灾害的发生。即下组煤采出上覆残留煤柱时,具有冲击倾向性的残留煤柱突然失稳破坏,使残留煤柱的顶板具有了向下断裂运动的巨大冲击动能,层间岩层不足以抵抗这种强度冲击动载时,导致工作面发生切顶压架灾害。

超深孔卸压松动爆破防灾原理是,通过对残留煤柱的松动爆破,降低煤柱的集中应力,弱化残留煤柱的强度,消除或减弱残留煤柱的冲击倾向性,同时又有控制地卸压,使煤柱保持一定结构上的完整性,达到防止煤柱动态瞬间突变失稳破坏的目的,利用超前支承压力缓慢压坏煤柱,确保残留煤柱的顶板缓慢准静态断裂下沉破坏,不致瞬间动载矿压显现,

达到能量阶段释放,动压缓慢化解的目的,防止动载切顶压架灾害发生。

2.3 动灾防治方案

根据工作面的采矿地质条件,制定防灾方案为



从 3301 工作面两侧顺槽施工超深上仰钻孔,准确打中靶区为 7 m 宽和 14 m 宽的 2 条集中倾向煤柱,对这 2 条残留煤柱进行卸压松动爆破,防止动灾发生,详见图 2 所示。

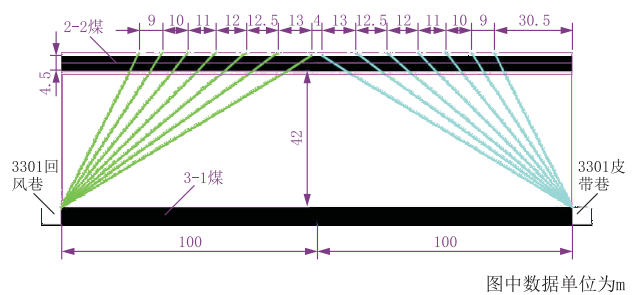


图 2 煤柱爆破钻孔平面及剖面图

Fig.2 Planar and sectional view of blasting holes

本方案的实施面临井下超深上仰孔的准确打中煤柱靶区、超深孔装药、最佳钻机间距、超长装药段安全传爆、超深孔炮孔堵塞及管道效应消除等诸多难题。经过钻探工艺试验,利用我单位自制 ZDY4000L 型井下专业坑道履带钻机及扶正器等,顺利解决了准确打中煤柱靶区的难题,在此不做详述,其它工艺难题解决方法详见下文所述。

3 装药工艺研究

超深上仰孔卸压松动爆破面临的首要难题就是安全高效装药,也是长钻孔深度不能达到 110 m 的主要技术“瓶颈”,据资料显示,深孔爆破装药形式,有通过压风向孔内吹入粉末炸药的,该方法能够实现一定装药长度,但孔内炸药粉末分布不均匀,易出现殉爆现象同时在装药过程中,药粉受摩擦易发生燃烧甚至爆炸,安全无保障,且不利于在井下实施。固体药卷装药,有利于竹筒片固定药卷,再使竹筒相互连接,但由于竹筒连接处不稳定,装药容易卡住,因此无法推广应用。也有利用混凝土喷射原理用喷

射设备往炮孔内喷射浆状炸药以实现钻孔装药的,但是在钻孔内的喷射深度有限。陈苏社^[10]使用 PVC 管装药工艺及木楔封口技术成功解决了 50 m 超深孔的装药难题,但是不能应用于本工程所面临的 110 m 的超深炮孔。为了实现炮孔安全高效装药,自主研发了特殊装药装置^[11],其结构如图 3 所示。装药方法为:把加工好的装药装置用钻机缓慢送至孔内,装药装置内装有设计量的炸药,装药装置送至距离孔底约 1 m 时,孔口钻杆接水泵,用水泵水力通过钻杆内的空心把炸药管从装置内推出,炸药管与顶部的钩爪体通过螺纹连接,水力把炸药管推出装置后,钩爪体自动弹开挂在孔底的孔壁上,防止炸药下滑,同时缓慢退出装药铜管装置,整个过程中最为重要的就是要防治炮线被扯断,同时把握好装置距离孔底的距离,让炸药管刚好挂在需要爆破的煤柱内,经过对 88 个超深上仰钻孔的安全高效装药实践验证,该装置可实现径向不耦合柱状连续装药,成功解决了井下超深上仰炮孔装药难题。

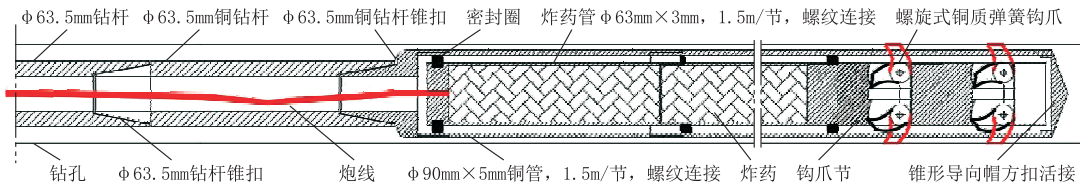


图 3 装药装置结构图

Fig.3 Structure of explosive charging device

4 最佳炮孔间距确定

最佳炮孔间距主要依据 2 个方面来确定:一是

钻孔柱状不耦合装药时裂隙圈半径的 2 倍要大于炮孔间距,即爆破作业形成的裂隙圈要互相交圈才能保证对煤柱的有效松动卸压作用;二是爆破形成的

裂隙交圈只需覆盖煤柱的弹性核部分,不需浪费钻孔和炸药去松动爆破煤柱的塑性区。

4.1 钻孔爆破裂隙圈半径计算

按照岩石的破坏特征,爆破作用在岩石中一般形成 3 个区:扩大空腔、压碎区及裂隙区。岩石的爆破主要依靠的就是破裂区,依据本爆破工程的实际工况,当采用柱状不耦合装药时,本文按爆生气体准静压作用来计算裂隙圈半径^[12]:

$$R_p = (P_0 / \sigma_t)^{1/2} r_b$$

$$P_0 = \rho_0 D^2 (r_c / r_b)^6 / 8$$

式中: R_p ——裂隙圈半径, m; P_0 ——作用于炮孔壁的准静态压力, Pa; ρ_0 ——炸药密度, 1200 kg/m³; D ——炸药爆速, 取 3200 m/s; r_c ——装药半径, 取 0.035 m; r_b ——炮孔半径, 取 0.043 m; σ_t ——煤体的抗拉强度, 取 1.5 MPa。

计算得: $P_0 = 4466.72$ MPa; $R_p = 2.35$ m。

4.2 残留煤柱塑性区宽度计算

由极限平衡理论^[13], 靠近工作面侧集中煤柱屈服区宽度为:

$$Y = \frac{m_0}{2\xi f} \ln \frac{K\gamma H + c \cot\phi}{\xi c \cot\phi}$$

式中: K ——应力集中系数, 取 2.06; m_0 ——上煤层平均采厚, 取 4.2 m; ξ ——三轴应力系数, $\xi = (1 + \sin\phi) / (1 - \sin\phi) = 2.37$; ϕ ——煤体内摩擦角, 取 24°; f ——上煤层与其顶底板接触面间摩擦因数, 取 0.2; γ ——上煤层覆岩容重, 取 21.3 kN/m³; H ——上煤层埋深, 取 90 m; c ——煤体粘聚力, 取 0.64 MPa。

计算得: $Y = 2.0$ m。

依据钻孔爆破裂隙圈半径及残留煤柱塑性区宽度计算结果, 结合煤矿宽度条件, 可确定最佳炮孔间距为 4 m。

5 安全传爆及炮孔堵塞

5.1 地面传爆试验

试验目的是为了解决超长装药段(最长达 16 m)炸药的安全传爆难题。因为研制的钻孔装药装置本身的结构使炸药药卷和 PVC 塑料管之间有一环状空气间隙, PVC 塑料管与钻孔孔壁之间又存在一环状空气间隙, 这就导致了炸药爆炸时的双重管道效应, 本来装药段长度就长达 16 m, 同时又面临着双重管道效应, 就更增加了炸药的安全传爆难度。为此专门在地面露天矿坑中设计并模拟井下钻孔真实起爆条

件的炸药传爆试验, $\phi = 70$ mm 的水胶炸药装在内径为 75 mm、壁厚 3 mm 的塑料管内, 再用一个内径为 90 mm 的塑料管来模拟钻孔(如图 4 所示)。由传爆试验得知, 一个电雷管最大只能安全传爆水胶炸药约 3 m, 就是说 16 m 长的装药段大概约需要 5 发电雷管、连接 10 根脚线才能保证炸药安全传爆, 进而达到松动卸压爆破煤柱的效果, 施工工序极其复杂, 无疑是给井下施工带来了极大的不安全因素, 既不安全又费工费时。为此借鉴煤炭行业标准^[14]中导爆索的起爆性能试验方法, 对整个装药段铺设直径为 6.5 mm、爆速 < 6000 m/s 的煤矿许用导爆索, 装药段外端只需绑扎 1 发电雷管, 连接 2 根脚线再次进行了传爆试验, 传爆效果很好, 这种“导爆索+电子雷管”的混合起爆方法不仅解决了超长装药段炸药的安全传爆难题, 而且消除了炸药爆炸时的管道效应。



图 4 露天矿坑传爆试验

Fig.4 Detonation test in open pits

5.2 C-S 浆液凝结特性试验

众所周知良好的炮孔堵塞质量能够提高爆破松动效果, 但为了解决超深上仰炮孔堵塞工艺难题, 选用 P.O 42.5 硅酸盐水泥, 模数 $M = 3.2$ 、波美度为 40 的水玻璃作为原材料进行了不同水灰比和不同体积比, 在静水和动水条件下的水泥-水玻璃双液浆凝胶特性试验, 配比参数及试验数据结果详见表 1 所示。

表 1 静动水条件下浆液凝胶时间对比

Table 1 Setting time under the conditions of dynamic and static water

序号	W/C	V _c /V _s	凝胶时间/min	
			静水条件	动水条件
1	0.8 : 1	1 : 1	1.82	2.35
2	0.8 : 1	2 : 1	1.58	1.83
3	0.8 : 1	3 : 1	0.92	1.32
4	1 : 1	1 : 1	1.90	2.15
5	1 : 1	2 : 1	1.32	1.57
6	1 : 1	3 : 1	1.17	1.20

根据试验结果, 认为水灰比为 1 : 1, 水泥浆与水玻璃的体积为 1 : 1 时, 为最佳浆液配比参数, 原因是凝胶时间不是太短, 利于现场双液注浆泵注浆施工,

凝胶时间又不是太长,方便提高施工效率,同时浆液结实率为100%,无收缩。经井下现场注浆试验及工程实际检验,这种水泥—水玻璃双液注浆堵塞炮孔工艺技术能实现井下超深上仰炮孔的安全堵塞,同时又达到了快速封孔和消除炸药爆炸的管道效应的目的。

5.3 振动安全允许距离核算

依据国标^[9]中的公式计算单段最大起爆药量:

$$Q = R^3 / (K/V)^{3/\psi}$$

式中: R ——爆破振动安全允许距离,取71.6 m; V ——保护对象所在地安全允许质点振速,依据文献^[8],取10 cm/s; K 、 ψ ——与爆破点至保护对象间的地形、地质条件有关的系数和衰减指数, K 取220、 ψ 取1.7。

计算得: $Q = 1569.5$ kg。即如果齐发药量 ≥ 1596.5 kg,则 R 肯定大于71.6 m,能够确保巷道顶板的安全稳定。

6 结语

(1)本文成功解决的3大工艺技术难题能使超深上仰孔卸压爆破集中煤柱技术更好地应用于浅埋近距煤层下组煤采出上覆集中煤柱时动灾防治工程中。

(2)能使这种技术的应用范围更宽广,如强制放顶、煤层增透、冲击矿压防治、提高块煤率等。

(3)该技术的成功应用表明其具有工程借鉴和推广应用价值。

(4)为了完善该技术,应该形成一套行之有效的爆破效果评价方法,不能是某种单一的监测手段来间接评价爆破效果,建议利用矿压监测、岩层及地表移动监测、槽波CT透视扫描、微震监测、煤柱集中应力监测等多手段,形成一整套井上下综合立体爆破效果评价方法,也是作者继续研究的方向。

参考文献(References):

- [1] 鞠金峰,许家林,朱卫兵,等.近距离煤层工作面出倾向煤柱动载矿压机理研究[J].煤炭学报,2010,35(1):15-20.
JU Jinfeng, XU Jialin, ZHU Weibing, et al. Mechanism of strong strata behaviors during the working face out of the upper dip coal pillar in contiguous seams[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(1): 15-20.
- [2] 鞠金峰,许家林.浅埋近距离煤层出煤柱开采压架防治对策[J].采矿与安全工程学报,2013,30(3):323-330.
JU Jinfeng, XU Jialin. Prevention measures for support crushing while mining out the upper coal pillar in close distance shallow seams[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2013, 30(3): 323-330.
- [3] 屠世浩,窦凤金,王志军,等.浅埋房柱式采空区下近距离煤层

- 综采顶板控制技术[J].煤炭学报,2011,36(3):365-370.
TU Shihao, DOU Fengjin, WAN Zhijun, et al. Strata control technology of the fully mechanized face in shallow coal seam close to the above room-and-pillar gob[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(3): 365-370.
- [4] 付兴玉,李宏艳,李凤明,等.房式采空区集中煤柱诱发动载矿压机理及防治[J].煤炭学报,2016,41(6):1375-1383.
FU Xingyu, LI Hongyan, LI Fengming, et al. Mechanism and prevention of strong strata behaviors induced by the concentration coal pillar of a room mining goaf[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(6): 1375-1383.
- [5] 李浩荡,杨汉宏,张斌,等.浅埋房式采空区集中煤柱下综采动载控制研究[J].煤炭学报,2015,40(S1):6-11.
LI Haodang, YANG Hanhong, ZHANG Bin, et al. Control study of strong strata behaviors during the fully mechanized working face out of concentrated coal pillar in a shallow depth seam in proximity beneath a room mining goaf[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(S1): 6-11.
- [6] 李浩荡,张斌.浅埋深综采工作面过集中煤柱压架机理分析[J].煤炭科学技术,2016,44(9):54-60.
LI Haodang, ZHANG Bin. Analysis on powered support jammed mechanism of fully-mechanized coal mining face in shallow depth mine pass through over concentrated coal pillar[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(9): 54-60.
- [7] 徐敬民,朱卫兵,鞠金峰.浅埋房采区下近距离煤层开采动载矿压机理[J].煤炭学报,2017,42(2):500-509.
XU Jingmin, ZHU Weibing, JU Jinfeng. Mechanism of dynamic mine pressure occurring below adjacent upper chamber mining goaf with shallow cover depth[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(2): 500-509.
- [8] GB 6722-2014,爆破安全规程[S].
GB 6722-2014, Safety regulations for blasting[S].
- [9] 袁绍国,石斌.水平超深孔松动爆破在地下煤矿综采面的应用[J].爆破,2013,30(3):62-64.
YUAN Shaoguo, SHI Bin. Application of loosening blasting with super deep horizontal hole in fully mechanized face of underground coal mine[J]. Blasting, 2013, 30(3): 62-64.
- [10] 陈苏社.50m超深孔爆破强制放顶技术研究[J].煤炭工程,2013,45(7):58-60.
CHEN Sushe. The technology of 50m super hole blasting overhead caving[J]. Coal Engineering, 2013, 45(7): 58-60.
- [11] 李建文,徐拴海,邵红旗,等.采空区下伏煤层的综采冲击地压防治系统及其方法;CN106050237A[P].2016-10-26.
LI Jianwen, XU Shuanhai, SHAO Hongqi, et al. Treatment of impact ground pressure induced by comprehensive mining of coal seams overlaid gobs; CN106050237A[P]. 2016-10-26.
- [12] 戴俊,负永峰,王小林,等.爆破工程[M].北京:机械工业出版社,2015.
DAI Jun, YUN Yongfeng, WANG Xiaolin, et al. Blasting engineering[J]. Beijing: China Machine Press, 2015.
- [13] 钱鸣高,石平五,许家林,等.矿山压力与岩层控制[M].徐州:中国矿业大学出版社,2010.
QIAN Minggao, SHI Pingwu, XU Jialin, et al. Mining pressure and strata control[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2010.
- [14] MT 519-2006,煤矿许用导爆索[S].
MT 519-2006, Permissible detonating cord[S].

(编辑 王建华)