爆破卸压技术防治冲击地压的应用与检验

顾合龙[1],南 华[1],王 文[1],徐程川[1],林 东[1,2]
(1. 河南理工大学 能源科学与工程学院,河南 焦作 454000; 2. 中国煤炭科工集团武汉设计研究院有限公司,湖北 武汉 430064)

摘 要: 为进一步改善爆破卸压预防冲击地压过程中卸压前后信息识别、提取困难及卸压效率低的现状,基于能量释放的电磁辐射原理,针对杨村煤矿冲击地压特点,结合该矿工程地质概况及爆破参数,阐述利用电磁辐射法对卸压爆破进行监测,通过现场试验与电磁辐射强度、脉冲数指标的监测分析,得出爆破卸压前后的电磁辐射规律及各指标变化规律。结果表明: 电磁辐射指标尤其是强度指标可以有效反馈爆破卸压前后的弹性能变化规律,该指标对爆破卸压地点及爆破强度的确定具有指导作用,现场工程实践取得良好的检验效果。

关键词: 卸压爆破; 冲击地压; 电磁辐射指标; 爆破参数
中图分类号: TD324 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2336(2016)04-0022-05

Inspection and application of blasting and pressure released technology to mine pressure bump prevention and control

Gu Helong[1], Nan Hua[1], Wang Wen[1], Xu Chengchuan[1], Lin Dong[1,2]
(1. *School of Energy Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo* 454000, *China*;
2. *Wuhan Design and Research Institute Company Limited, China Coal Technology and Engineering Group, Wuhan* 430064, *China*)

Abstract: In order to further improve the information identification and pick up difficulties before and after the pressure released during the mine pressure bump prevention and control process with the blasting pressure releasing and the status of the low pressure releasing efficiency, based on the electromagnetic radiation principle of the energy released, according to the mine pressure bump features of Yangcun Mine, in combination with the mine engineering geological conditions and the blasting parameters, the electromagnetic radiation method was applied to monitor and measure the pressure released with the blasting. With the site test and the monitoring and measuring on the electrom agnetic radiation strength and pulse number index, the electromagnetic radiation law and each index variation law before and after the blasting pressure released were obtained. The results showed that the electromagnetic radiation index, especially the strength index could effectively feed back the variation law of the elastic energy before and after the blasting pressure released and the index could have the guidance function to set up the blasting pressure released location and the blasting strength. The site engineering practices obtained excellent inspection effect.

Key words: mine pressure released blasting; mine pressure bump; electromagnetic radiation index; blasting parameters

0 引 言

冲击地压是煤岩体中聚积的弹性变形能在一定条件下的突然猛烈释放,导致煤岩体失稳、爆裂并弹出的动力灾害现象。随着我国煤炭采掘深度的增加和采掘强度的增大,冲击地压事故呈上升趋势,防治方法的重要性凸显。目前煤岩体卸压方法有爆破卸压、煤层注水、钻孔卸压、定向裂缝等[1]。由于卸压爆破效果理想,被广泛应用于防治煤矿动力灾害[2-4],采用深孔爆破的方法能够使工作面及巷道两帮形成卸压破坏区,并使应力增高区向煤岩深部转移,最大限度地释放煤岩体内

收稿日期: 2015-10-20; **责任编辑:** 杨正凯 **DOI:** 10.13199/j.cnki.cst.2016.04.005
基金项目: 国家自然科学基金煤炭联合基金重点资助项目(U1261207); 河南理工大学青年基金资助项目(72511/119)
作者简介: 顾合龙(1988—),男,河南商丘人,硕士研究生。**通讯作者:** 王 文,讲师,博士研究生,E-mail: Wangwen2006@hpu.edu.cn
引用格式: 顾合龙,南 华,王 文,等.爆破卸压技术防治冲击地压的应用与检验[J].煤炭科学技术,2016,44(4):22-26.
Gu Helong, Nan Hua, Wang Wen, *et al*. Inspection and application of blasting and pressure released technology to mine pressure bump prevention and control[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(4): 22-26.

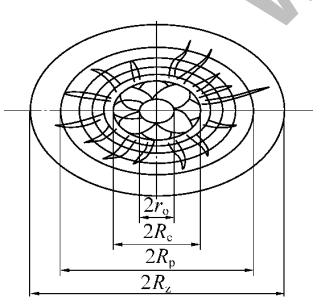
中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

的弹性能,减缓或消除发生冲击地压的危险。深孔爆破卸压的效果与爆破参数设置有很大关系,爆破参数设置不当可使应力集中区域的应力更加集中,加速煤岩的破坏变形失稳。因此,爆破卸压效果的检验非常必要。

许多学者研究表明煤岩体受载变形中会产生电磁辐射,窦林名[5-10]、王恩元[11-13]、何学秋[14]、陆菜平[15-16]等利用电磁辐射预测冲击地压。电磁辐射的强度与应力具有耦合关系,即应力越大,电磁辐射强度越大,电磁辐射强度具有一定的临界值,超过此临界值会有发生冲击地压的危险。李忠辉[17]、聂百胜[18]、王云海[19]等成功地将电磁辐射技术运用到爆破卸压工程实践的监测中。基于此,笔者结合该矿爆破卸压前后的电磁辐射强度与脉冲数的变化规律,分析爆破前后的煤体应力及破坏变形规律,达到检验爆破卸压效果的目的,取得良好的效果。

1　爆破卸压原理

煤体内的高应力是形成冲击地压的主要原因,卸压爆破是通过振动破坏对煤岩体结构进行改造,重新形成以爆炸点为中心顺次向外的破碎区、裂隙区、弹性区,如图 1 所示,导致围岩深部应力重新分布,产生大范围应力降低区,促使应力较为集中的弹性区转移到围岩深处,围岩应力场得到改善,此外,卸压爆破产生的松动圈本身存在受压致密过程,在一定时间之内,可以使周围煤岩体受压变形量直接被爆破产生的松动圈吸收,从而减小表面煤岩体的变形量,达到防治冲击地压的目的。



r_0—钻孔半径; R_e—破碎区半径; R_p—裂隙区半径; R_z—弹性区半径

图 1　炸药爆炸后煤岩体破坏区域

Fig. 1　Coal failure region after explosive detonation

2　能量释放的电磁辐射规律

煤岩体破坏形式分为拉破坏或剪破坏,当煤岩体受爆破振动破坏时裂隙扩展,压缩区域的裂隙尖端表面自由电荷的浓度升高,拉伸区自由电荷浓度降低,自由电荷由高浓度向低浓度运移,在此过程中产生电磁辐射。煤岩体所受载荷越大,变形越大,积聚的能量越高,电磁辐射能就越高,煤岩体在应力为 σ、应变 $\varepsilon=\sigma/E$ 时具有的能量 W 为

$$W=\sigma\varepsilon=\sigma^2/E \tag{1}$$

式中,E 为煤岩的弹性模量。

假设电磁辐射能与此能量具有正比例关系,则电磁辐射能 W_e 为[20]

$$W_e=a_eW \tag{2}$$

又有 $a_e=aE$,则 $W_e=a\sigma^2$,其中 a_e、a 为比例常数。

由电磁辐射理论可知,电磁辐射能量 W_e 为

$$W_e=\varepsilon' E'^2V/2 \tag{3}$$

其中: ε' 煤岩体介电常数; E' 为电磁辐射强度幅值; V 为煤岩体体积; 由于 V、ε' 变化不大,可以认为由于 V、ε' 变化不大,将 $V\varepsilon'/2$ 看作常数 b。W_e 与强度幅值 E' 存在以下关系:

$$W_e=bE'^2 \tag{4}$$

由此可得:

$$E'=K\sigma \tag{5}$$

其中,K 为常数。所以电磁辐射强度 E' 与应力 σ 具有正比例关系。

根据电力耦合模型得电磁辐射脉冲数 ΔN 与应力关系为

$$\Delta N=N_m\frac{m}{\sigma_0}\left(\frac{\sigma_1-\sigma_3/2}{\sigma_0}\right)^{m-1}\exp\left[-\left(\frac{\sigma_1-\sigma_3/2}{\sigma_0}\right)^m\right]\Delta\sigma \tag{6}$$

式中: $\Delta\sigma$ 为应力变化量; N_m 为煤样全破坏的累计电磁辐射脉冲数; m、σ_0 为 Weil-bull 分布函数参数; σ_1、σ_3 分别为轴向应力和围压。

煤岩变形破裂过程产生的电磁辐射脉冲数和强度与应力及煤岩体破坏频次关系密切。

3　爆破卸压工程实践

3.1　工程概况

杨村煤矿煤层埋深 6001 000 m,开采中的 1101 工作面具有高冲击危险性,煤层倾角 11°,煤层厚 1.812.5 m,平均厚度为 7.6 m,基本顶为平均厚度 24.5 m 的砾岩,直接顶为平均厚度 26 m 的泥岩,直接底为平均厚度 14.2 m 的砂质泥岩。

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

3.2　爆破参数

结合电磁辐射监测情况，工作面前方回风平巷两帮及运输平巷上帮，炮眼间距均为 5 m，孔深 15 m，孔径 75 mm，回风平巷下帮钻孔方向为俯角 10°15°，距底板 0.5 m，垂直煤壁单排布置；运输平巷及回风平巷上帮钻孔方向为仰角 10°15°，距底板 0.5 m，垂直煤壁布置。每个炮眼装药量 4 kg，封泥长 6.5 m，反向装药，串联连线，双雷管（眼中、眼底各雷管起爆。雷管为同段位毫秒延期电雷管，炸药为矿用硝胺炸药。35 个炮眼同时起爆，1 次装药 1 次起爆，卸压钻孔布置如图 2 所示。

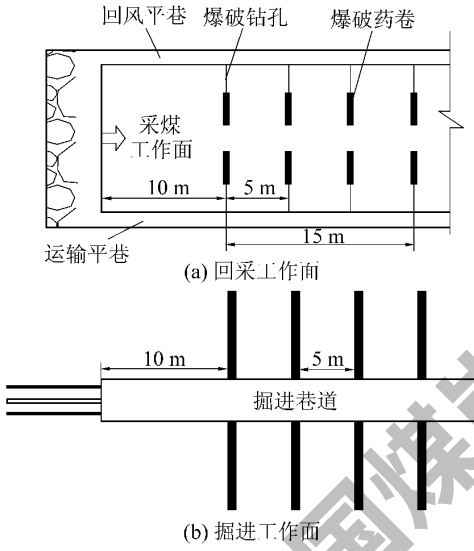


图 2　卸压爆破钻孔布置

Fig. 2　Layout of drilling in blasting destressing

3.3　爆破工艺

1）钻孔。工作面前方 200 m 范围内，按设计爆破参数，用煤电钻沿平行于煤层方向垂直煤壁钻孔，孔深达预定深度 15 m。

2）装药。将炸药连同雷管按反向装药方式推入孔中。

3）封孔。用封炮泥按要求密封钻孔剩余部分长度。

4）起爆。将每个待爆孔的引线接到母线上，把母线延伸到安全地点并连接到起爆器，合上起爆器开关引爆，卸压爆破的装药结构如图 3 所示。

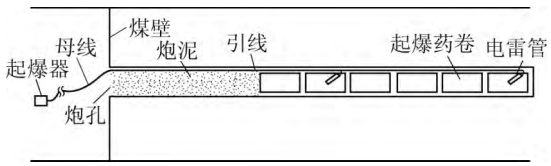


图 3　卸压爆破装药结构示意

Fig. 3　Structural diagram of charge in blasting destressing

3.4　效果检验

电磁辐射强度与脉冲数临界值对预测冲击地压具有重要意义，根据试验及该煤矿的具体情况确定指标，1101 工作面运输平巷为沿空掘巷位于压力降低区，取该区域监测数据的均值 E_p，1101 工作面运输平巷电磁辐射的平均值记录结果见表 1。

表 1　电磁辐射平均值记录结果

Table 1　Descriptive results of average EME

监测数据编号	强度/mV	每秒脉冲数/次
1-1	58	50
1-2	40	47
1-3	64	81
1-4	46	25
1-5	52	49
1-6	56	55
1-7	42	41
1-8	20	32
1-9	34	51
1-10	18	75
1-11	72	50

由临界值公式可得强度临界值 $K_L = K_E E_P$，其中：K_E 为强度富裕系数，取 1.5；E_P 为强度平均值，取 46 mV。计算得 $K_L = 69$ mV。

每秒脉冲临界值 $N_L = K_N N_P$，其中：K_N 为脉冲富裕系数，取 1.5；N_P 为每秒脉冲平均数，取 51 次。计算得 $N_L = 76.5$ 次。

由于电磁辐射测得的数据受到一定干扰，为降低冲击地压危险性取强度临界值 65 mV，每秒脉冲临界值 70 次，当监测的电磁辐射强度与脉冲数接近或者大于上述值，须采取措施进行卸压，直至监测数据小于此临界值且保持稳定。

电磁辐射强度与脉冲数是电磁辐射的 2 个重要灵敏指标，分别反映煤岩体受载程度和煤岩体破裂变形频次。在 1101 工作面运输及回风平巷进行电磁辐射监测过程中，发现在 2013 年 11 月 14 日及其之前的 23 天，区域内距离终采线 330550 m（图 4、图 5 中横坐标）范围内，电磁辐射强度值多处监测测点强度均值超过或接近电磁辐射强度临界值 65 mV 和每秒脉冲临界值 70 次，并伴随多次煤炮的发生，如图 4 所示。

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

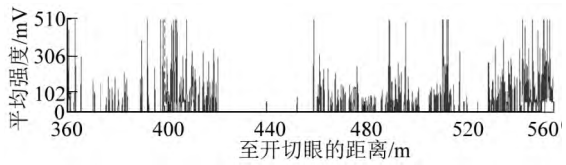


图 4　1101 工作面运输平巷 11 月 14 日电磁辐射图(爆破卸压前)

Fig. 4　Strength graph of EME in No. 1101 working face roadway on Nov. 14(before blasting destressing)

2013 年 11 月 15 日对该区域实施爆破卸压后，强度均值与脉冲次数均值降到临界值以下，煤炮明显减少，冲击危险基本解除，但距停采线 420 m 处强度值和脉冲数均出现异常，应密切关注该地点的电磁辐射动态变化情况，必要时可实施二次卸压，如图 5 所示。爆破卸压前弹性能释放速度小于弹性能积聚速度造成应力集中程度增大，围岩变形破坏加剧，冲击危险性增大。卸压爆破主动地改变了围岩破坏次序，人为制造破坏区，弹性能得到有效释放，使得卸压区域力学性能弱化，围岩应力重新分布，应力峰值向煤岩深部转移，使得支护结构与煤岩体组成的结构圈处于低应力区内，为围岩变形提供补偿空间，并缓冲来自煤岩深部承载结构的变形，降低冲击危险。

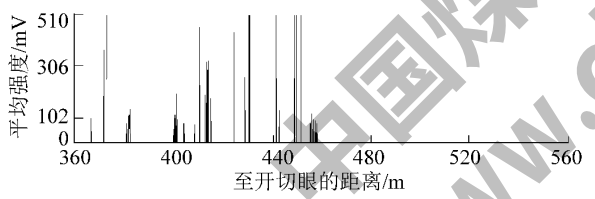


图 5　1101 工作面运输平巷 11 月 16 日电磁辐射图(爆破卸压后)

Fig. 5　Strength graph of EME in No. 1101 working face roadway on Nov. 16(after blasting destressing)

爆破卸压前后，电磁辐射 2 个重要指标均有显著变化，不同位置测点电磁辐射强度均值与脉冲数均值的变化规律如图 6 和图 7 所示。卸压前，电磁辐射强度及分布离散程度较大，弹性能及应力分布不均匀，围岩体内积聚大量弹性能且多处超过临界值，脉冲数少数几处有突变，突变值远高于临界值，其余各处基本稳定，离散程度较小。当冲击地压发生前应力及弹性能积聚较大，且随位置变化而变化，非均匀性明显，而破坏频次除少数几处有明显增高外，基本稳定，应力与破坏频次之间并无明显规律。爆破卸压前，各种干扰因素都有可能引发冲击地压，通过卸压爆破，释放能量以后，电磁辐射辐值及脉冲数均降到临界值以下，且分布均匀，应力分布状态得到调整，围岩载荷趋于均匀，脉冲数几乎为零，变形破坏几乎停滞，冲击危险程度降低，爆破卸压取得良好的效果。

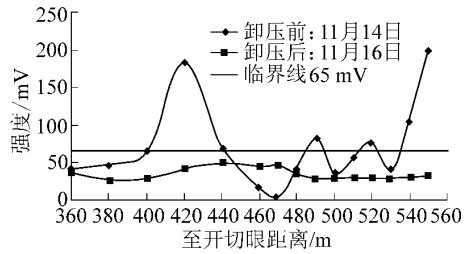


图 6　爆破卸压前后电磁辐射能量变化情况

Fig. 6　Changing situation of strength index in before and after blasting destressing

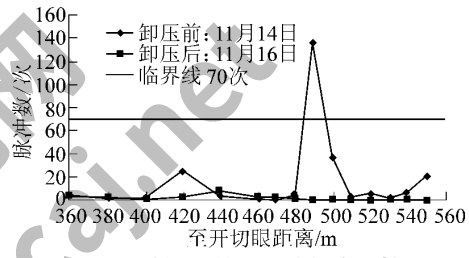


图 7　爆破卸压前后脉冲数变化情况

Fig. 7　Changing situation of pulse number index in before and after blasting destressing

因此，电磁辐射及其指标能反映出煤岩不同位置的破坏变形程度及应力、弹性能分布情况，为爆破参数的合理确定及优化提供参考，进而最大限度地释放聚集在煤岩体中的弹性能，提高卸压爆破的效果。

4　结　　论

1) 卸压爆破可以使围岩释放大量弹性能，改变围岩应力分布状态，降低应力及其分布的离散程度，使应力峰值向煤岩深部转移，达到防治冲击地压的目的。

2) 冲击地压是围岩应力集中的结果，发生冲击地压前，围岩应力、弹性能较大; 部分区域变形破坏频次较大，弹性能与破坏频次之间无明显规律。

3) 电磁辐射的强度指标，能够反映围岩应力状态及弹性能的积聚，可以用电磁辐射强度指标作为冲击地压敏感指标来检验爆破效果，脉冲数能够反映煤岩变形破坏剧烈程度，也具有重要指导参考价值。

4) 电磁辐射能够实现围岩动态监测，反映区域内围岩不同位置的应力、弹性能及变形破坏剧烈程

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

度，为爆破参数的优化提供参考。

参考文献(References) :

[1] 钱鸣高，石平五，许家林.矿山压力与岩层控制 [M] .徐州: 中国矿业大学出版社，2010.

[2] 李剑锋，何　港，国兴福.深孔卸压爆破控制冲击地压的机理及应用 [J] .煤炭科技，2008(1) : 75-77.
Li Jianfeng，He Gang，Guo Xingfu. Mechanism and application of deep hole pressure relief blast to control rock burst [J] .Coal Science & Technology Magazine，2008(1) : 75-77.

[3] 蔡建德，刘建辉，李化敏.爆破卸压技术在防治岩爆中的应用 [J] .爆破 2008，25(1) : 1-3.
Cai Jiande，Liu Jianhui，Li Huamin. Application of relieving shot in prevention of rock brust，Blasting，2008，25(1) : 1-3.

[4] 李永刚，徐国元.控制巷道岩爆的爆破卸压法 [J] .采矿技术，2006，6(4) : 23-25.
Li Yonggang，Xu Guoyuan. Blasting pressure relief to control rock bursting tunnel [J] .Mining Technology，2006，6(4) : 23-25.

[5] 窦林名，何学秋，王恩元.冲击地压预测的电磁辐射技术及应用 [J] .煤炭学报，2004，29(4) : 396-399.
Dou Linming，He Xueqiu，Wang Enyuan. Electromagnetic emission technique of monitoring rock burst and its application [J] .Journal of China Coal Society，2004，29(4) : 396-399.

[6] 窦林名，何学秋.冲击地压危险预测的电磁辐射原理 [J] .地球物理学进展，2005，20(2) : 427-431.
Dou Linming，He Xueqiu. Monitoring rock burst by electromagnetic emission [J] .Progress in Geophysics，2005，20(2) : 427-431.

[7] 窦林名，何学秋，王恩元，等.由煤岩变形冲击破坏所产生的电磁辐射 [J] .清华大学学报，2001，41(12) : 86-88.
Dou Linming，He Xueqiu，Wang Enyuan，*et al*. Electromagnetic emission in rock and coal burst failures [J] . Journal of Tsinghua University，2001，41(12) : 86-88.

[8] 窦林名，何学秋.由煤岩变化破坏引起的电磁辐射 [J] .清华大学学报，2001，41(12) : 86-88.
Dou Linming，He Xueqiu. Electromagnetic emission in rock and coal burst failures [J] . Journal of Tsinghua University，2001，41 (12) : 86-88.

[9] 窦林名，何学秋.冲击地压防治理论与技术 [M] .徐州: 中国矿业大学出版社，2001.

[10] 窦林名，何学秋.采矿地球物理学 [M] .北京: 中国科学文化出版社，2002.

[11] 王恩元，何学秋，刘贞堂.受载岩石电磁辐射特性及其应用研究 [J] .岩石力学与工程学报，2002，21(10) : 1473-1477.
Wang Enyuan，He Xueqiu，Liu Zhentang. Study on electromagnetic emission characteristics of loaded rock and its applications [J] . Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2002，21 (10) : 1473-1477.

[12] 王恩元.电磁辐射法监测煤与瓦斯突出危险性技术及其应用研究 [D] .徐州: 中国矿业大学，1999.

[13] 王恩元，何学秋，刘贞堂，等. 煤岩动力灾害电磁辐射监测仪及其应用 [J] . 煤炭学报，2003，28(4) : 366-369.
Wang Enyuan，He Xueqiu，Liu Zhentang，*et al*. Electromagnetic radiation detector of coal or rock dynamicdisasters and its application [J] .Journal of China Coal Society，2003，28(4) : 366-369.

[14] 何学秋，刘明举.含瓦斯煤岩破坏电磁动力学 [M] .徐州: 中国矿业大学出版社，1995.

[15] 陆菜平，窦林名.电磁辐射检验卸压爆破效果的技术 [J] .煤炭科学技术，2004，32(1) : 15-18.
Lu Caiping，Dou Linming. Electric magnetic emission technology to measure pressure release blasting results [J] .Coal Science and Technology，2004，32(1) : 15-18.

[16] 陆菜平，窦林名，吴兴荣，等.基于能量机理的卸压爆破效果电磁辐射检验 [J] .岩石力学与工程学报，2005，24(6) : 1014-1017.
Lu Caiping，Dou Linming，Wu Xingrong，*et al*. Electormagnetic emission testing method for the effect of relieve-shot based on energy mechanism [J] . Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2005，24(6) : 1014-1017.

[17] 李忠辉，王恩元，何学秋，等.电磁辐射实时监测煤与瓦斯突出在煤矿的应用 [J] .煤炭科学技术，2005，33(9) : 31-33.
Li Zhonghui，Wang Enyuan，He Xueqiu，*et al*. Application of electric magnetic radiation to on-time m onitoring and measuring of coal and gas outburst in mine [J] .Coal Science and Technology，2005，33(9) : 31-33.

[18] 聂百胜，翟盛锐，刘文波，等. 成庄矿煤岩破坏电磁辐射特性及其应用研究 [J] .煤炭科学技术，2007，35(2) : 58-61.
Nie Baisheng，Zhai Shengrui，Liu Wenbo，*et al*. Research on electric magnetic radiation features of coal and rock failure in Chengzhuang Mine and application [J] .Coal Science and Technology，2007，35(2) : 58-61.

[19] 王云海，撒占友.冲击地压电磁辐射前兆规律的初步研究 [J] 煤矿安全，2003，34(4) : 14-17.
Wang Yunhai，Sa Zhanyou. Preliminary study on indications law of rock burst electromagnet radiation [J] . Safety in Coal Mines，2003，34(4) : 14-17.

[20] 徐文全，王恩元，刘贞堂，等. 基于钻孔电磁辐射法的爆破卸压效果检验方法 [J] . 煤炭学报，2012，37(2) : 279-284.
Xu Wenquan，Wang Enyuan，Liu Zhentang，*et al*. A study on testing the effect of blasting releasing pressurebased on drilling electromagnetic radiation [J] .Journal of China Coal Society，2012，37 (2) : 279-284.

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net