

DOI: 10.11779/CJGE201902009

# 电荷感应法检测煤层注水防冲效果研究

王 岗<sup>1</sup>, 潘一山<sup>1, 2</sup>, 肖晓春<sup>1</sup>

(1. 辽宁工程技术大学力学与工程学院, 辽宁 阜新 123000; 2. 辽宁大学, 辽宁 沈阳 110036)

**摘 要:** 为了探究电荷感应法检测煤层注水防冲效果, 采用试验方法开展了不同含水率煤样单轴压缩破坏电荷规律的研究。理论分析了水对煤样物理力学性质和煤样产生电荷信号特征影响的规律, 并对现场煤层注水过程进行了电荷感应现场监测, 分析了注水前、中、后电荷信号变化规律以及产生原理。研究表明: 水的存在减弱了煤样内部颗粒之间的摩擦作用, 促进了微孔裂隙的增长与发育, 导致水对电荷信号的产生起到弱化作用, 出现有应力降而无电荷信号产生以及电荷信号滞后的现象; 随含水率增高, 煤样电荷均幅呈指数函数递减趋势; 得到了煤样电荷均值与含水率的关系式, 进而得到耿村煤矿符合煤层注水防冲要求的含水率增量对应的电荷降幅理论百分比为 50.13%。由此可根据现场煤层注水前、后电荷降幅实际百分比与理论百分比相比较, 就可对煤层注水防冲效果进行初步评价; 现场监测结果表明煤层注水前和注水过程中, 监测的电荷幅值较大, 注水后电荷幅值与注水前相比降幅为 52.65%, 大于试验室理论结果, 符合煤层注水要求。因此, 电荷感应方法可以用来检测煤层注水防冲效果, 但还需要大量的试验室以及现场试验进行不断的修正和完善。

**关键词:** 电荷感应; 煤样; 含水率; 煤层; 注水; 检测

**中图分类号:** TU324

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-4548(2019)02-0311-09

**作者简介:** 王 岗(1992-), 男, 博士研究生, 研究方向为煤岩动力灾害的预测与防治。E-mail: wg\_0404@163.com。

## Detection of effects of rock burst prevention by water injection into coal seam using charge induction method

WANG Gang<sup>1</sup>, PAN Yi-shan<sup>1, 2</sup>, XIAO Xiao-chun<sup>1</sup>

(1. School of Mechanics and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China; 2. Liaoning University, Shenyang 110036,

China)

**Abstract:** For detecting the effects of rock burst prevention by water injection into coal seam using the charge induction method, an experimental method is adopted to study the charge laws during the destruction process of coal samples with different moisture contents under uniaxial compression. The influences of water on the physical and mechanical properties of coal samples and the characteristics of the generated charge signals are analyzed. The charge induction method is used to monitor the process of water injection into coal seam. The change laws of charge signals and the principles of their production before, during and after water injection are analyzed. The results show that the presence of water weakens the friction between particles inside the coal samples and promotes the growth and development of micro porous cracks, causing water to weaken the production of charge signals. There is a phenomenon of stress drop without charge signal generation and hysteresis of charge signals. With the increase of moisture content, the average amplitude of charge of coal samples decreases exponentially. The relationship between the average amplitude of charge and the moisture content of coal samples is obtained, so the theoretical percentage of the charge drop corresponding to the increment of moisture content that meets the requirements of rock burst prevention in Gengcun coal mine is 50.13%. Therefore, the effects of rock burst prevention by water injection into coal seam can be evaluated according to the comparison between the actual and theoretical percentages of charge amplitude drop. The results of field monitoring show that charge amplitude is larger before and during water injection. The charge amplitude after water injection decreases by 52.65% compared with that before water injection, which is greater than the theoretical one of laboratory tests and meets the requirements of water injection into coal seam. Therefore, the charge induction method can be used to detect the effects of rock burst prevention by water injection into coal seam. However, a large number of laboratory and field tests are also required to correct and improve the proposed method continuously.

**基金项目:** 国家重点研发计划项目 (2016YFC0801403-4, 2017YFC0804208); 国家自然科学基金面上项目 (51774164, 51374123)

**收稿日期:** 2017-12-18

**\*通讯作者** (E-mail: panyish\_cn@sina.com)

**Key word:** charge induction; coal sample; moisture content; coal seam; water injection; detection

## 0 引言

冲击地压作为一种典型的煤岩动力灾害,其突发性和剧烈破坏性等特征对煤矿安全生产构成了极大的威胁<sup>[1-2]</sup>。目前常用的冲击地压防治方法有开采保护层、煤层注水、煤层卸压爆破、大孔径钻孔卸压、深孔断顶爆破、深孔断底爆破等<sup>[3-4]</sup>。其中煤层注水是一种从根本上有效防治冲击地压的区域性或局部性措施。它通过利用高压注水泵对开采具有冲击危险性的煤层注水,使高应力区域煤体孔隙裂隙增加与发育,释放或转移煤层应力,以期对冲击地压进行解危<sup>[5-6]</sup>。同时煤层注水后,煤体的含水率增加,煤体的物理力学性质相应发生变化,湿润后的煤颗粒间黏结力和摩擦系数降低,煤体裂隙增多,塑性增强,脆性减弱,煤体内的弹性能充分释放,冲击倾向性减弱,从而起到防治冲击地压的作用<sup>[7-9]</sup>。煤层注水作业后,往往需要对煤层注水的防冲效果进行检测。中国大部分矿井煤层注水防冲效果检验依据为:高压注水时,含水率增量不少于3%为准,静压注水时含水率增量不小于2%为准;或煤层含水率低于5%时,含水率增量不得低于3%;煤层含水率高于5%时,含水率增量不得低于2%。目前中国主要的煤层注水效果检测方法为,通过注水煤层打钻测定注水前、后每米钻屑含水率的变化情况对注水效果进行检测,但此方法存在检测工作量大、检测孔和注水孔布置矛盾等问题<sup>[10]</sup>。因此,就需要更加便捷、有效的新手段来对煤层注水效果进行检测。

基于煤岩体变形破坏过程有电荷产生,且煤岩变形破裂过程产生的电荷信号与煤岩动力过程密切相关,煤岩破裂面上分离电荷量的异常升高或降低与应力突变具有较好的对应关系,电荷幅值的量化分析可作为煤岩破裂过程力学性质变化以及动力显现的预警信息<sup>[11-14]</sup>。煤岩体破裂产生的电荷可利用高灵敏度的电荷采集系统进行提取和分析,由此可形成煤岩破裂失稳的电荷感应监测方法<sup>[15]</sup>。电荷监测方法具有操作简单、非接触、连续性、抗干扰性强等优点。关于电荷感应方法的主要研究有:赵扬锋等<sup>[16]</sup>对单轴压缩条件下煤样电荷信号规律进行了试验研究,得出煤样在加载初期由于煤样内部原生裂纹处于压密阶段而有电荷信号产生,随着荷载的不断增大,电荷信号数量有所增加且电荷幅值也增大。潘一山等<sup>[17]</sup>对三轴条件下含瓦斯煤岩破裂电荷信号规律进行了研究,得到随着荷载的逐渐增大,煤样破坏过程不断有电荷信号产生,且电荷信号数量逐渐增多,电荷幅值逐渐增大。围压

越大,电荷感应信号曲线波动越强烈,围压对电荷感应信号起到放大、强化作用。王岗等<sup>[18]</sup>对煤体剪切破坏过程中的电荷规律进行了研究,得出煤体剪切破坏过程中有显著电荷感应信号产生,电荷信号异常区域对应于剪应力突变阶段。随剪切角增大,煤体应力峰值前电荷信号逐渐减少并不断向剪应力峰值附近集中。上述研究成果对不同含水率煤体受载破坏电荷信号规律以及水对电荷产生机制影响的探究起到重要的指导作用,进而可为应用电荷感应方法检测煤层注水防冲效果提供理论根据。

煤层注水时,高压水作用使采掘工作面前方高应力区域煤层裂隙增加与发育,释放或转移煤层应力,使工作面前方煤体应力状态重新处于动态变化之中<sup>[19]</sup>。因此注水前、注水中和注水后煤体电荷幅值也随之产生变化。那么如果能够通过试验室试验探究出不同含水率煤样破坏电荷幅值与煤样含水率的关系,进而得到符合煤层注水要求的含水率增量对应的电荷幅值变化理论百分比,再根据现场煤层注水前、后电荷幅值变化实际百分比,并与理论百分比相比较,就可对注水后煤层含水率是否达到要求进行评价,进而可以检测煤层注水防冲效果。

基于以上分析,本文将首先对电荷感应法检测煤层注水防冲效果进行理论研究,然后开展不同含水率煤样单轴压缩破坏电荷信号规律的试验研究,探究不同含水率煤样物理力学性质、电荷信号特征以及水对电荷的影响机制,深入探究煤样破坏电荷幅值与含水率的关系。最后开展煤层注水过程现场电荷监测试验,对注水前、中、后电荷信号的变化规律以及电荷幅值的变化进行分析,以及根据试验室理论结果对现场煤层注水防冲效果进行指导。

## 1 电荷感应法检测煤层注水防冲效果理论研究

### 1.1 煤层注水防治冲击地压理论研究

煤层注水后,在水压力作用下的煤体 Mohr—Coulomb 强度准则为

$$\tau = \sigma \tan \varphi + c' \quad (1)$$

式中,  $c' = c - \alpha p \tan \varphi$ ,  $c'$  为含水煤体的黏聚力,  $c$  为天然煤体的黏聚力。 $\alpha$  为等效孔隙压力系数,其大小取决于煤岩的孔隙、裂隙发育程度,  $0 \leq \alpha \leq 1$ ;  $p$  为孔隙水压力。

综上所述,煤层注水作用使得煤体黏聚力减小量为  $\alpha p \tan \varphi$ , 由式(1)可得,注水压力对煤体强度的影响如图1所示。

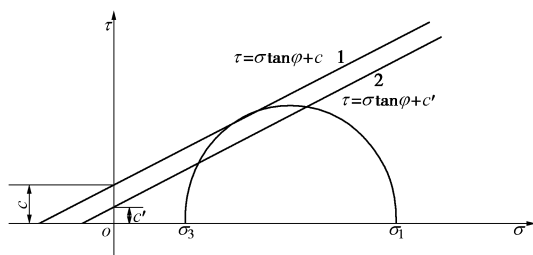


图1 水对煤体强度的影响

Fig. 1 Influences of water on strength of coal

由图1可以看出,因注水压力对煤体莫尔-库仑强度准则的影响,会导致不发生破坏的干燥煤层被注水软化后有可能发生破坏,煤体是否发生破坏取决于煤层注水的压力和煤体本身的物理力学性质。由式(1)可知煤岩的受载能力受到黏聚力 $c$ 和正应力产生的内摩擦力 $\sigma \tan \varphi$ 两部分构成。煤层注水后,煤体矿物颗粒间的黏聚力降低或完全丧失,摩擦系数降低,煤岩的强度降低,煤岩变形破坏呈现塑性特征,煤岩变形过程中积存弹性能的能力减弱,导致采掘工作面前方煤体应力集中程度削弱,峰值应力向煤体深部转移。因此,煤层注水可从根本上消除或缓解冲击地压的危险性。

## 1.2 煤岩破裂产生电荷理论研究

煤岩受载破裂时,受新生裂纹萌生和原生裂纹扩展的影响,在裂纹表面和尖端产生了位错和滑移,导致了裂纹界面间的摩擦出现,此过程分离出的正、负电荷向不同方向迁移、聚集和突变,宏观表现为裂隙壁面不均匀的电荷分离现象<sup>[20]</sup>。同时,受原子的运动和转移,形成空位,原子向不同的空位处跳跃,其不断地反复运动和转移导致了在不同的电荷积聚界面处形成微电势垒。因此,电荷产生机制可用受载介质裂纹滑移摩擦生电和微裂纹界面势垒变化等理论进行解释,因此电荷产生机制可表示成图2<sup>[21]</sup>。然而煤体含水后,湿润后的煤颗粒间黏结力和摩擦因子降低,水主要通过改变裂隙面的摩擦状态而影响煤体产生电荷机制,进而导致不同含水率煤体电荷规律不同,这为采用电荷感应法对煤层注水前、后电荷信号的定性以及定量分析来检测煤层注水防冲效果提供了依据。但水分具体对煤体电荷信号规律的影响如何,还需通过不同含水率煤样受载破坏电荷规律的试验进行揭示。

## 2 不同含水率煤样电荷监测试验

为了研究不同含水率煤样破裂电荷信号规律,试验对实际工程中煤岩结构受载形式进行简化,开展单轴压缩条件下煤样变形破坏电荷监测试验,对不同含水率煤样变形破坏电荷信号变化规律进行分析,深入探究水对煤样破裂电荷信号的影响。

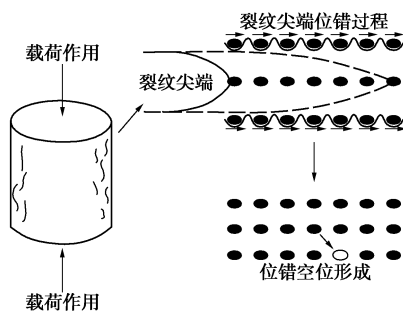


图2 裂纹滑移和摩擦界面位错势垒生电机制

Fig. 2 Mechanism of charge generation by potential barrier of crack sliding and friction interface dislocation

### 2.1 试验系统

试验系统是由加载系统、屏蔽系统、电荷信号监测系统组成的综合采集监测系统,试验系统如图3所示。



图3 试验系统

Fig. 3 Experimental system

试验加载系统为多功能电液伺服压力机,最大轴向荷载为6000 kN。屏蔽系统为自行研制的多功能圆柱屏蔽钢筒(图3中的三轴压力室),经多次试验测试,屏蔽效果符合试验要求,并且与压力机连接的压头与试样之间用绝缘纸进行绝缘。电荷信号监测系统为多通道电荷感应信号采集监测系统,主要由电荷感应探头、电荷放大器和数据采集器3部分组成。其中电荷放大器是电荷监测系统的核心部件。其工作原理为电荷放大器内置电荷采集电路板,利用反馈标准电容接收分离电荷,反馈标准电容为10 pF,通过前置放大电路放大100倍后以微电势信号输出,在数据处理软件中利用电容容量和放大倍数反算电荷量后进行量化分析。

### 2.2 试样制备及试验方案

试验煤样所用的原煤来自河南耿村矿13230工作面。采样时将井下大块原煤试样(尺寸不小于200 mm×200 mm×200 mm)采用塑料薄膜密封后运至井上装木箱,木箱周围由泡沫材料填充,运至实验室后将大块的煤体通过岩石取芯机制备成高度为100 mm,

直径为 50 mm 的圆柱形标准煤体试样。试验所用煤样共分为 3 组, 每组 3 块煤样, 第一组为自然含水状态, 不做其它处理, 编号分别为 M-1、M-2、M-3; 第二组煤样在蒸馏水中浸泡 1 d, 编号分别为 M-4、M-5、M-6; 第三组煤样在蒸馏水中浸泡 3 d 进行饱水处理 (经预先试验已得出煤样浸泡超过 3 d, 含水率不再改变), 编号分别为 M-7、M-8、M-9, 各组煤样如图 4 所示。



图 4 试样实物图

Fig. 4 Photo of test samples

试验方案为: 单轴压缩条件下对不同含水率煤样进行加载破坏, 采用位移方式施加荷载, 加载速率为 0.02 mm/s, 加载方向与试样层理方向垂直。电荷监测

系统采样频率设为 2500 Hz, 试验中将探头布置于试样的两侧, 距离试样表面 5~10 mm 左右。

3 试验结果与分析

3.1 煤样变形破坏特征结果分析

图 5 为不同含水率煤样单轴压缩破坏应力应变曲线及破坏实物图, 表 1 为煤样力学性质相关参数。

由图 5 可以看出, 不同含水率煤样受载变形破坏特征不同。由图 5 (a) 及表 1 可以看出天然煤样的抗压强度较高, 均值为 10.71 MPa, 应力峰前变形几乎是线弹性的, 在发生主破裂前几乎没有先兆。峰后应力应变曲线较陡, 且经历时间较短, 应变脆性特征明显。由表 1 可知天然煤样弹性模量较大, 冲击能指数较大, 冲击倾向性较强, 在应力峰值前, 可以看成是煤体蓄能过程, 当应力达到极限强度时煤样整体失去承载能力并将能量瞬间释放而发生突然失稳破坏, 冲击危害程度较大。由破坏实物图可以看出煤样受载损伤程度较大, 承载结构面发生了断裂似拉伸劈裂破坏。由图 5 (b) 和表 1 可以看出, 与天然煤样相比, 由于含水率的增加, 浸水 1 d 煤样抗压强度降低, 均值为

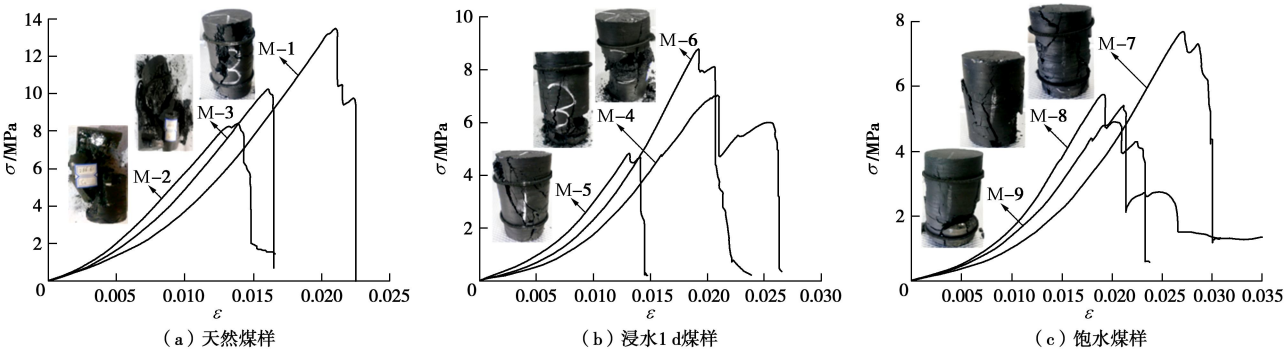


图 5 煤样应力 - 应变全程曲线及破坏实物图

Fig. 5 Whole stress-strain curves and failure modes of coal samples

表 1 煤样力学性质相关参数

Table 1 Parameters related to mechanical properties of coal samples

试样 编号	处理 方式	含水率 $w$ /%	弹性模量 /GPa	单轴抗压强度 /MPa	冲击能指数 $K_E$	含水率 $w$ 均值/%	弹性模量均 值/GPa	单轴抗压强度 均值/MPa	冲击能指数 $K_E$ 均值
M-1	天然 处理	7.34	0.640	13.48	7.87	7.50	0.628	10.71	10.00
M-2		7.71	0.608	8.40	5.35				
M-3		7.45	0.636	10.26	16.77				
M-4	浸水 1 d	7.99	0.335	7.02	1.88	8.52	0.387	6.87	3.30
M-5		7.87	0.369	4.84	4.47				
M-6		9.71	0.458	8.75	3.55				
M-7	饱水 处理	11.50	0.284	7.71	3.58	9.60	0.281	6.28	2.50
M-8		8.01	0.302	5.76	2.42				
M-9		9.28	0.256	5.39	1.50				

6.87 MPa, 弹性模量减小, 轴向应变增大。峰后应力应变曲线变为平缓, 塑性特征有所显现。冲击能指数明显减小, 冲击倾向性减弱。由破坏实物图可以看出, 相比于天然煤样, 破坏程度减小, 完整性较好, 有明显的剪切裂纹, 煤样主要发生拉剪破坏。

由图 5 (c) 和表 1 可以看出, 由于饱水煤样含水率较高, 煤体矿物颗粒间的黏结力降低或完全丧失, 摩擦系数降低, 单轴抗压强度较小, 均值为 6.28 MPa, 弹性模量较小, 峰后应力应变曲线更加平缓, 有明显的应变软化阶段且持续时间较长, 峰后应力跌落次数较多, 煤样经历了多次渐进破坏过程。煤样冲击能指数较小, 冲击倾向性较弱。从破坏实物图可以看出, 饱水煤样破坏程度较小, 完整性较好, 煤样只是局部发生小型破裂而失去承载能力, 并没有像天然煤样发生整体失稳破坏。可见煤层注水通过水改变煤体的物理力学性质, 如降低煤体强度和减弱煤体冲击倾向性等起到防治冲击地压的作用。

### 3.2 煤样电荷信号监测结果与分析

图 6~8 为不同含水率煤样受载破坏典型应力 - 电荷随时间变化曲线, 表 2 为不同含水率煤样电荷平均幅值统计结果, 图 9 为不同含水率煤样破坏电荷信号平均幅值与含水率关系。

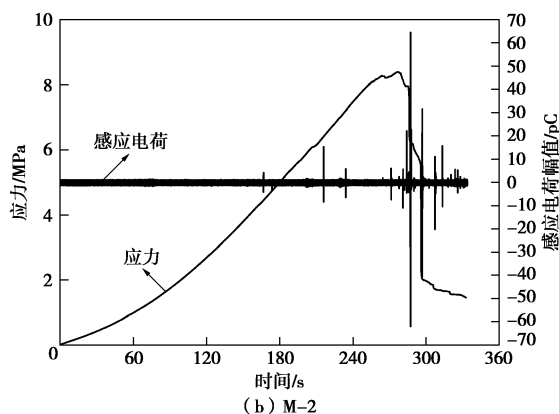
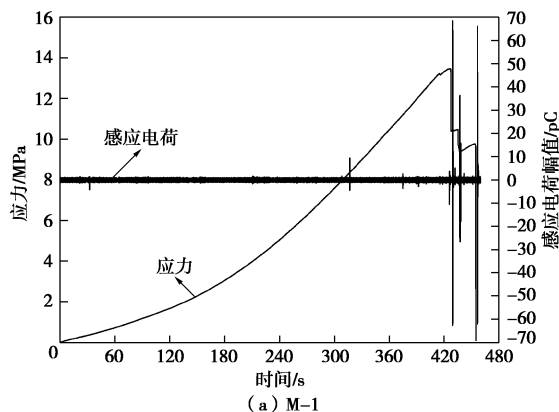


图 6 天然煤样应力 - 电荷 - 时间变化曲线

Fig. 6 Stress-charge-time curves of natural coal samples

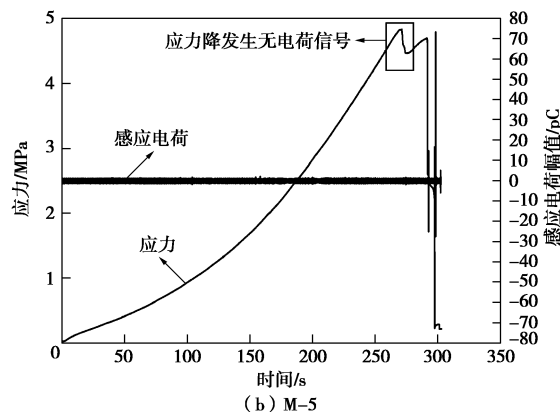
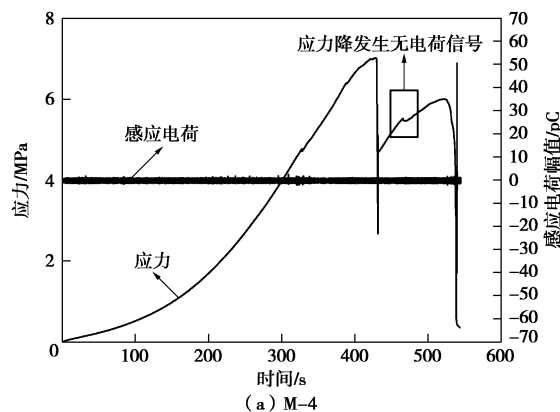


图 7 浸水 1 d 煤样应力 - 电荷 - 时间变化曲线

Fig. 7 Stress-charge-time curves of coal samples after soaking of 1 day

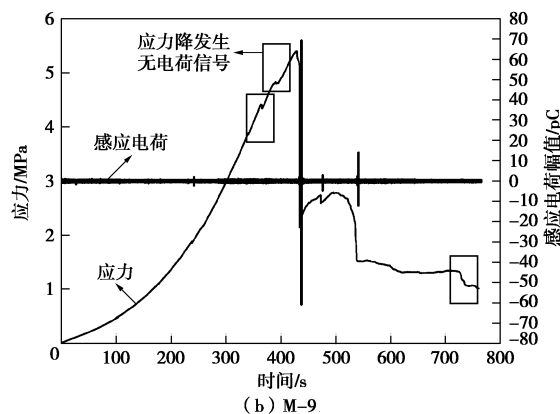
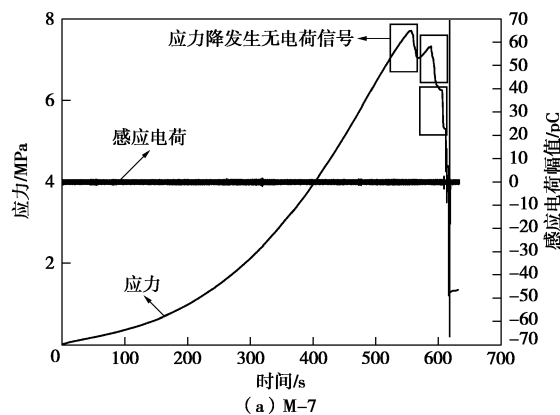


图 8 饱水煤样应力 - 电荷 - 时间变化曲线

Fig. 8 Stress-charge-time curves of saturated coal samples



表 2 不同含水率煤样电荷平均幅值

Table 2 Average amplitudes of charge of coal samples with different moisture contents									
试样编号	M-1	M-2	M-3	M-4	M-5	M-6	M-7	M-8	M-9
含水率 w/%	7.34	7.71	7.45	7.99	7.87	9.71	11.50	8.01	9.28
电荷均值 V/pC	0.388	0.358	0.362	0.263	0.308	0.153	0.226	0.214	0.166

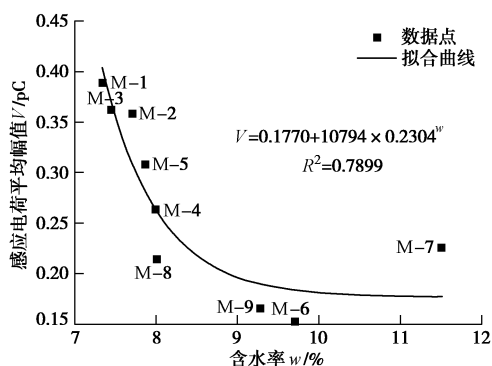


图 9 煤样电荷平均幅值与含水率关系

Fig. 9 Relationship between average amplitude of charge and moisture content of coal samples

(1) 不同含水率煤样电荷信号规律对比分析

由于水对煤样内部结构性质的影响，导致不同含水率煤样在受载破坏过程中产生的电荷信号变化规律有所不同。如图 6 天然煤样在加载初期，煤样处在孔隙裂隙压密和弹性变形阶段，煤样中裂纹尖端附近的能量不足以使微破裂继续扩展，裂纹扩展终止，累积损伤较小，该阶段电荷信号比较微弱；随着应力水平的逐渐增加，煤样处于非线性变形阶段，该阶段煤样累积了足够的能量，变形开始加速，煤样内部产生了大量的微破裂并汇合、贯通，煤样内部裂纹开始逐渐形成与扩展，累积损伤也不断增加，同时煤样内部颗粒间相互摩擦的机会增多，内部晶粒局部被束缚的电荷逃逸成自由电荷的数量增多，导致电荷信号数量逐渐增多且电荷信号幅值也有所增大；当应力继续增加，达到极限应力时，煤样发生失稳破坏，由于煤样内部裂纹迅速扩展，能量瞬间释放，累积损伤急剧发生变化，电荷信号强度瞬间达到峰值，约为 70 pC。随后煤样进入破坏阶段，承载结构面发生快速失稳破坏，应力跌落次数较少，因此产生的电荷信号较少，但由于释放能量较大，电荷信号幅值较大。总体来看，天然煤样破坏过程中，产生的电荷信号随着荷载的增加有逐渐增强的趋势，并且电荷信号的产生与应力变化具有较好的一致性。

浸水 1 d 煤样破裂电荷信号特征如图 7 所示。在加载初期，与天然煤样相似，几乎没有明显的电荷信号产生；随着应力水平的逐渐增加，煤样处于非线性变形阶段，该阶段煤样累积了足够的能量，变形开始加速，煤样内部裂纹开始形成与扩展，但此阶段几乎没有电荷信号产生。当外部荷载达到煤样极限强度

时，煤样开始发生失稳破坏，此时 M-4 煤样有低值电荷信号产生，M-5 煤样即使有约 0.5 MPa 的应力降发生但依然没有电荷信号产生；随后煤样进入变形破坏阶段，M-4 和 M-5 煤样都直至最后一次大幅值应力降时才有电荷信号产生，电荷信号达到峰值，这期间 M-4 煤样出现一次应力降但无电荷信号产生。

饱水煤样破裂电荷信号特征如图 8 所示，在应力峰前电荷信号特征与浸水 1 d 煤样电荷信号特征相似，几乎没有电荷信号产生，如 M-9 煤样在临近峰值应力，出现小幅度应力降时也没有电荷信号产生，这与天然煤样截然相反；当外部荷载达到煤样抗压强度时，煤样开始发生失稳破坏，M-7 煤样有应力降但依然没有电荷信号产生，M-9 煤样由于应力降较大电荷信号达到峰值；随后煤样进入变形破坏阶段，应变软化阶段比较明显，承载结构面发生多次渐进滑移破坏，但并不是每次破坏都有电荷信号产生，M-7 煤样有两次应力降无电荷信号产生现象，直至最后一次大幅度应力降时才有电荷信号产生。M-9 煤样也只有两次较低幅值电荷信号产生，其中第二次应力降达 1 MPa，电荷幅值却只有 14 pC。总体来看，饱水煤样与浸水 1 d 煤样电荷信号特征相似，相比于天然煤样电荷信号减少，电荷幅值减小，有应力降却无电荷信号产生，在相同应力降情况下产生的电荷幅值也比天然煤样小。

综上所述，根据不同含水率煤样电荷信号特征以及 1.2 节中已讨论的煤岩介质破裂产生电荷机制可知，水分主要通过降低煤颗粒间黏结力和摩擦系数，同时促进煤样裂隙的增加与发育，导致煤样含水率越高，受载破坏裂隙发育与扩展程度越低，由天然煤样的整体断裂式拉伸劈裂破坏向浸水煤样的局部小破裂破坏而转变，最终导致煤样含水率越高，电荷信号呈现信号越少且幅值越小的趋势。

(2) 煤样电荷幅值与含水率关系以及煤层注水防冲效果评价分析

从上述分析可以得出，随着含水率的增大，煤样破坏过程产生的电荷信号幅值有减小的趋势，这与煤样浸水后冲击倾向性减弱，裂纹扩展所致的位错和滑移效应较弱，裂纹扩展过程释放的能量值较低有关。统计了不同含水率煤样破坏过程电荷信号平均幅值，见表 2。将各组煤样电荷均值与其含水率的关系绘制成图，如图 9 所示。可以看出，随着含水率的增大，煤样破坏过程电荷平均幅值有减小的趋势，从拟合曲

线可以看出两者具有指数递减函数关系, 拟合关系式为电荷平均幅值  $V=0.1770+10794 \times 0.2304^w$ ,  $w$  为煤样含水率。由此可将电荷幅值作为反映煤体含水率变化情况的指标。进而可以通过现场煤层注水前、后电荷均值变化情况, 对注水后煤层含水率是否达到要求进行评价。例如耿村煤矿煤层注水防冲要求为, 当注水前煤层含水率高于 5%, 高压注水时, 含水率增量不少于 2%。如果将试验室天然煤样的含水率 7.5% 作为注水前煤层含水率, 那么注水后煤层含水率应不低于 9.5%, 将其代入方程  $V=0.1770+10794 \times 0.2304^w$  中, 可得注水后煤体电荷均值应不高于 0.186 pC, 相比于天然煤体电荷均值 0.373 pC, 理论降幅为 50.13%。因此就可以根据现场煤层注水前、后的电荷均值, 得到电荷降幅的实际百分比, 与理论百分比进行比较, 就可对煤层注水后的含水率是否符合防冲要求进行检测。如果实际电荷降幅百分比大于理论值, 那么此次注水作业符合要求。相反, 如果实际电荷降幅百分比小于理论值, 则需继续进行注水作业, 直到电荷降幅百分比达到或超过理论值, 方可结束注水作业。

## 4 煤层注水过程电荷监测现场应用

### 4.1 现场实施方案

由于试验室试验煤样来自河南耿村煤矿 13230 工作面, 因此电荷感应现场应用选择在耿村煤矿 13230 工作面风巷, 测点具体位置为距工作面 40 m 的煤层注水钻场。煤层注水钻孔直径为 45~90 mm, 注水压力为 8~12 MPa。在注水孔附近专门设计了电荷测试孔, 测试孔距注水孔 2 m 左右, 距底板距离约为 1.5 m, 孔深为 3 m 左右, 孔径为 50 mm。监测时首先在传感器外部套上一层屏蔽铜网, 再将传感器放到监测孔底部, 并在孔口塞入一团屏蔽铜网, 从监测结果来看, 屏蔽效果较好。电荷信号监测共分为 3 个阶段, 分别为注水前、注水中和注水后。由于注水前和注水中, 煤层注水作业要进行相关的安装措施, 同时受到井下其他复杂环境的影响, 导致电荷监测时间较短为 5 min。煤层注水后, 测点无注水作业, 可进行较好的电荷监测试验。为了更好地检测注水效果, 电荷监测时间增加到 10 min, 同时注水作业后相隔一天再进行注水后的电荷监测。电荷监测仪为 YCD5 型便携式矿用煤岩电荷监测仪, 如图 10 所示, 其具有显示、储存、数据计算等功能, 同时具有操作简单、抗干扰性强、低耗电等优点。

### 4.2 测试结果与分析

煤层注水前、注水中和注水后的电荷信号监测结果如图 11 所示。



图 10 便携式电荷监测仪

Fig. 10 Portable charge monitor

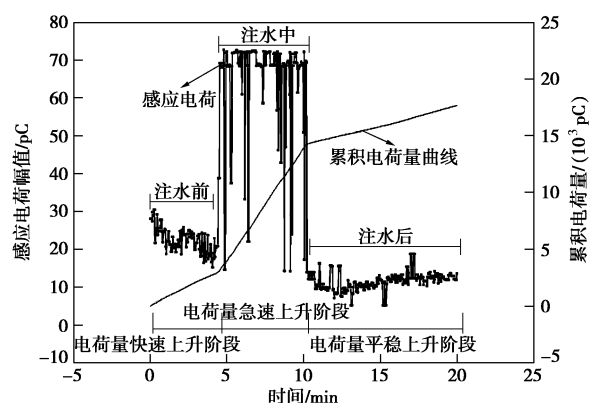


图 11 煤层注水前中后电荷幅值以及累积电荷量变化曲线

Fig. 11 Amplitudes of charge and change of cumulative charge before and after coal seam infusion

由图 11 可以看出, 注水前煤体处于天然状态, 回采工作面前方煤体在上覆岩层较高压力作用下, 使得监测到的电荷幅值较大, 均值约为 24.5 pC, 累积电荷量曲线处于快速上升阶段。而煤层注水时, 施加的注水压力一般大于煤体所承受的应力, 带有一定高压力的饱和水对煤体中的孔隙裂隙有促生作用, 注水钻孔周围煤体在压力水持续作用下不断发生破裂, 水对裂隙尖端的楔入作用, 使煤体中原有裂隙扩展, 并产生新的裂隙, 在破裂过程中由于内外部裂纹的导通, 使得内外部破裂尖端发射的大量电子直接飞入空间, 大量电子的逃逸使得裂纹尖端积聚了相当数量的电荷, 同时煤岩颗粒之间相互摩擦机会增多, 局部被束缚的电荷逃逸成自由电荷的数量增多。所以注水过程中监测到的电荷幅值较大, 均值达到 65.2 pC, 大于注水前的电荷幅值, 累积电荷量曲线处于急速上升阶段。煤层注水后, 煤体的含水率增加, 煤体的物理力学性质相应发生变化, 湿润后的煤颗粒间黏结力和摩擦系数降低, 煤体裂隙增多并发育充分, 强度降低、塑性增强, 煤体内的弹性能得到部分释放, 煤体冲击倾向性减弱, 受载破裂释放能量较低, 导致电荷信号幅值较小。与煤层注水前和注水过程中相比, 电荷信号幅值明显降低, 其中有几处较大信号可能是由于残余破裂导致, 电荷幅值的总体降低与峰值应力转移、冲击危

险性降低是一致的,此过程电荷均值约为 11.6 pC,累积电荷量曲线处于平稳上升阶段,与注水前相比电荷降幅为 52.65%,大于试验室得到的理论值 50.13%,在理论上符合煤层注水防冲要求。同时根据现场取样测定含水率增量也达到了煤层注水要求。

从以上分析可以得出,电荷感应法可以检测煤层注水防治冲击地压效果,此方法具有简单易行,不影响生产的优点,解决了采用钻屑量法检测煤层注水效果而存在的检测工作量大、检测孔和注水孔布置矛盾等问题。但此方法尚处于试验阶段,还需要大量的试验室以及现场试验进行不断的完善和修正,方能更好的对煤层注水防冲效果进行检测。

## 5 结 论

通过对不同含水率煤样受载变形破坏特征以及产生电荷信号规律的试验研究与分析,并通过对现场煤层注水过程电荷监测结果分析,得到以下 5 点结论。

(1)煤样浸水后,抗压强度降低,弹性模量减小,冲击倾向性减弱,煤样受载由发生整体断裂式破坏逐渐向发生局部小破裂破坏而转变。

(2)水的存在减弱了煤样内部颗粒之间的摩擦作用,同时促进了裂隙的增加与发育,导致水对电荷信号的产生起到弱化作用。含水率越高,煤样受载破裂电荷信号越少且电荷幅值越小。

(3)煤样电荷均值与含水率具有指数函数递减关系,拟合关系式为  $V=0.1770+10794 \times 0.2304^w$ ,进而可以得到符合耿村煤矿煤层注水防冲要求的含水率增量对应的电荷降幅理论百分比为 50.13%。由此可对现场煤层注水后的含水率是否符合防冲要求进行初步评价。

(4)注水过程中由于压力水对煤体的压裂,导致煤体产生的电荷幅值较大,累积电荷量曲线呈急速上升趋势;煤层注水后内部微孔裂隙充分发育,煤体冲击倾向性减弱,受载破裂释放能量较低,导致电荷信号幅值减小,累积电荷量曲线呈平稳上升趋势。

(5)煤层注水前、中、后的电荷信号变化规律以及电荷均值的量化分析说明电荷感应方法可以用来检测煤层注水防冲效果,但还需要大量的试验室以及现场试验进行不断的验证和修正。

## 参考文献:

[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 Yi-shan, LI Zhong-hua, ZHANG Meng-tao. Distribution, type, mechanism and prevention of rock burst in

China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, **22**(11): 1844 - 1851. (in Chinese))

[2] 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 Yao-dong, ZHAO Yi-xin. State of the art: investigation on mechanism, forecast and control of coal bumps in China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, **34**(11): 2188 - 2204. (in Chinese))

[3] 姜耀东, 潘一山, 姜福兴, 等. 我国煤炭开采中的冲击地压机理和防治[J]. 煤炭学报, 2014, **39**(2): 205 - 213. (JIANG Yao-dong, PAN Yi-shan, JIANG Fu-xing, et al. State of the art review on mechanism and prevention of coal bumps in China[J]. Journal of China Coal Society, 2014, **39**(2): 205 - 213. (in Chinese))

[4] 齐庆新, 欧阳振华, 赵善坤, 等. 我国冲击地压矿井类型及防治方法研究[J]. 煤炭科学技术, 2014, **42**(10): 1 - 5. (QI Qing-xin, OUYANG Zhen-hua, ZHAO Shan-kun, et al. Study on types of rock burst mine and prevention methods in China[J]. Coal Science and Technology, 2014, **42**(10): 1 - 5. (in Chinese))

[5] 潘一山. 煤与瓦斯突出、冲击地压复合动力灾害一体化研究[J]. 煤炭学报, 2016, **41**(1): 105 - 112. (PAN Yi-shan. Integrated study on compound dynamic disaster of coal-gas outburst and rockburst[J]. Journal of China Coal Society, 2016, **41**(1): 105 - 112. (in Chinese))

[6] 王淑坤, 张万斌. 煤层注水预防冲击地压的机理探讨[J]. 煤炭学报, 1989, **16**(2): 69 - 80. (WANG Shu-kun, ZHANG Wan-bin. Discussion on the mechanism of rockburst prevention by coal seam water infusion[J]. Journal of China Coal Society, 1989, **16**(2): 69 - 80. (in Chinese))

[7] 肖知国, 孟雷庭. 煤层注水对裂隙扩展及水分分布影响的数值分析[J]. 煤矿安全, 2016, **47**(1): 159 - 162, 166. (XIAO Zhi-guo, MENG Lei-ting. Numerical analysis of effect of coal seam water injection on crack propagation and water distribution[J]. Safety in Coal Mines, 2016, **47**(1): 159 - 162, 166. (in Chinese))

[8] 肖知国, 王兆丰. 煤层注水防治煤与瓦斯突出机理的研究现状与进展[J]. 中国安全科学学报, 2009, **19**(10): 150 - 158. (XIAO Zhi-guo, WANG Zhao-feng. Status and progress of studies on mechanism of preventing coal and gas outburst by coal seam infusion[J]. China Safety Science Journal, 2009, **19**(10): 150 - 158. (in Chinese))

[9] 石欣雨, 文国军, 白江浩, 等. 煤岩水力压裂裂缝扩展物理模拟实验[J]. 煤炭学报, 2016, **41**(5): 1145 - 1151. (SHI



- Xin-yu, WEN Guo-jun, BAI Jiang-hao, et al. A physical simulation experiment on fracture propagation of coal petrography in hydraulic fracturing[J]. Journal of China Coal Society, 2016, **41**(5): 1145 - 1151. (in Chinese))
- [10] 孟筠青, 何学秋, 聂百胜, 等. 电磁辐射法监测煤层注水防突效果的研究[J]. 矿业研究与开发, 2012, **32**(4): 65 - 68. (MENG Jun-qing, HE Xue-qiu, NIE Bai-sheng, et al. Study on technique of using electromagnetic emission to monitor the effect of coal and gas outburst prevention by water injection to coal seam[J]. Mining R & D, 2012, **32**(4): 65 - 68. (in Chinese))
- [11] ВОЛАРОВИЧ М П и, ПАРХОМЕНКО Э И. Пьезоэлектрический эффект горных пород[J]. ДАН СССР, 1954, **99**(2): 239. (VOLAROVICH M P, PARKHOMENKO E I. Piezoelectric effect in rocks[J]. Doklady Akademii Nauk SSSR, 1954, **99**(2): 239. (in Russian))
- [12] ВОЛАРОВИЧ М П И, ПАРХОМЕНКО Э И. Пьезоэлектрический эффект горных пород, Изв[J]. АнСССР, сер.геофиз, 1955(2): 215 - 222. (VOLAROVICH M P, PARKHOMENKO E I. Piezoelectric effect in rocks[J]. Izvestiia Akademii Nauk SSSR Seria Geofiziki, 1955(2): 215 - 222. (in Russian))
- [13] 唐 治, 潘一山, 李忠华, 等. 煤岩破裂过程中电荷感应机理分析[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(6): 1156 - 1160. (TANG Zhi, PAN Yi-shan, LI Zhong-hua, et al. Charge induction mechanism in the process of fracture of coal-rock[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(6): 1156 - 1160. (in Chinese))
- [14] 潘一山, 赵扬锋, 李国臻. 冲击地压预测的电荷感应技术及其应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, **31**(增刊 2): 3988 - 3993. (PAN Yi-shan, ZHAO Yang-feng, LI Guo-zhen. Charge-induced technique of rock burst prediction and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, **31**(S2): 3988 - 3993. (in Chinese))
- [15] 付 琳, 潘一山, 李国臻. 岩体电荷检测仪的研制[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2008, **27**(增刊): 110 - 112. (FU Lin, PAN Yi-shan, LI Guo-zhen. Development of charge detector for rockmass[J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science), 2008, **27**(S0): 110 - 112. (in Chinese))
- [16] 赵扬锋, 潘一山, 刘玉春, 等. 单轴压缩条件下煤样电荷感应试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, **30**(2): 306 - 312. (ZHAO Yang-feng, PAN Yi-shan, LIU Yu-chun, et al. Experimental study of charge induction of coal samples under uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, **30**(2): 306 - 312. (in Chinese))
- [17] 潘一山, 罗浩, 肖晓春, 等. 三轴条件下含瓦斯煤力电感应规律的试验研究[J]. 煤炭学报, 2012, **37**(6): 918 - 922. (PAN Yi-shan, LUO Hao, XIAO Xiao-chun, et al. Experimental study on mechanical-charge induction law of coal containing gas under triaxial compression[J]. Journal of China Coal Society, 2012, **37**(6): 918 - 922. (in Chinese))
- [18] 王 岗, 潘一山, 肖晓春, 等. 煤体剪切破坏电荷感应规律试验研究[J]. 安全与环境学报, 2016, **16**(3): 103 - 108. (WANG Gang, PAN Yi-shan, XIAO Xiao-chun, et al. Experimental study on the charge induction regularity in the shearing process of coal[J]. Journal of Safety and Environment, 2016, **16**(3): 103 - 108. (in Chinese))
- [19] 章梦涛, 宋维源, 潘一山. 煤层注水预防冲击地压的研究[J]. 中国安全科学学报, 2003, **13**(10): 69 - 72. (ZHANG Meng-tao, SONG Wei-yuan, PAN Yi-shan. Study on water pouring into coal seam to prevent rock-burst[J]. China Safety Science Journal, 2003, **13**(10): 69 - 72. (in Chinese))
- [20] 何学秋, 王恩元, 聂百胜, 等. 煤岩流变电磁动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2003. (HE Xue-qiu, WANG En-yuan, NIE Bai-sheng, et al. Electromagnetic dynamics of coal and rock rheology [M]. Beijing: Science Press, 2003. (in Chinese))
- [21] 肖晓春, 金 晨, 赵 鑫, 等. 组合煤岩冲击倾向电荷判据试验研究[J]. 岩土力学, 2017, **38**(6): 1620 - 1628. (XIAO Xiao-chun, JIN Chen, ZHAO Xin, et al. Experimental study on the charge criterion of coal-rock bodies burst tendency[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, **38**(6): 1620 - 1628. (in Chinese))