



推荐阅读：

[冲击地压](#)

[煤矿深部开采煤岩动力灾害多尺度分源防控理论与技术架构](#)

[煤矿典型动力灾害风险精准判识及监控预警关键技术研究进展](#)

[煤矿冲击地压扰动响应失稳理论及应用](#)

[煤矿冲击地压启动理论及其成套技术体系研究](#)

[考虑区域地应力特征的裂隙煤岩流固耦合特性实验](#)

[冲击地压应力波作用机理](#)

[浅埋煤层群采场周期来压顶板结构及支架载荷](#)

[我国煤炭深部开采冲击地压特征、类型及分源防控技术](#)

[急倾斜煤层开采覆岩联动致灾特征分析](#)

[深井煤岩瓦斯动力灾害模拟实验系统](#)

[煤矿火灾防治](#)

[煤矿热动力灾害及特性](#)

[羟基（—OH）对煤自燃侧链活性基团氧化反应特性的影响](#)

[煤氧化特性的 STA-FTIR 实验研究](#)

[浸水过程对长焰煤自燃特性的影响](#)

[采空区煤自燃预测的随机森林方法](#)

[基于等效氧化暴露时间理论的褐煤自燃特性研究](#)

[\[BMIM\]\[BF4\]对不同变质程度煤自燃热行为的影响研究](#)

[煤炭自然发火介尺度分析：从表征体元宏观模型到孔隙微观模型](#)

[瓦斯治理](#)

[煤与瓦斯共采三维大尺度物理模拟实验系统的研制与应用](#)



推荐阅读：

[高压气液两相射流多级脉动破煤岩特性及致裂机理](#)

[我国煤矿瓦斯爆炸抑爆减灾技术的研究进展及发展趋势](#)

[直接法瓦斯含量测定结果准确性实验研究](#)

[裂隙煤体注浆浆液扩散规律及变质量渗流模型研究](#)

[基于热-流-固体系参数演变的煤与瓦斯突出能量演化](#)

[三轴加载煤体瓦斯渗流速度-温度联合响应特征](#)

[煤体结构与甲烷吸附/解吸规律相关性实验研究及启示](#)

[基于 CT 三维重建煤骨架结构模型的渗流过程动态模拟研究](#)

[CH₄, CO₂和 N₂多组分气体在煤分子中吸附热力学特性的分子模拟](#)

[粉尘通风](#)

[基于风量特征的矿井通风系统阻变型单故障源诊断](#)

[煤矿粉尘防控与职业安全健康科学构想](#)

[湍流状态下竖直管道内甲烷-煤尘预混特征及爆炸过程数值模拟](#)

[工作面与采空区漏风交换风量测算方法](#)

[综采工作面滚筒旋流风对截割煤尘侧向逸散规律的影响](#)

[出口直径对内混式空气雾化喷嘴雾化特性及降尘性能的影响](#)



移动阅读

朱小景,王爱文,李祁,等.煤与瓦斯复合体受载变形破坏特征及微震-电荷感应规律[J].煤炭学报,2020,45(5):1719-1725. doi:10.13225/j.cnki.jccs.DY20.0253
 ZHU Xiaojing, WANG Aiwen, LI Qi, et al. Deformation and failure characteristics and microseismic-charge induction rules of coal and gas complex under loading [J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45 (5): 1719-1725. doi:10.13225/j.cnki.jccs.DY20.0253

煤与瓦斯复合体受载变形破坏特征及微震-电荷感应规律

朱小景¹,王爱文¹,李祁¹,王凯兴¹,罗浩²

(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 信息学院,辽宁 沈阳 110036)

摘要:针对冲击地压-煤与瓦斯突出复合动力灾害预测手段欠缺、前兆信息监测方法不完善这一工程现状,利用自主研发的高频微震全波形实时监测系统和电荷感应监测系统开展了煤与瓦斯复合体受载变形破坏试验,分析了不同瓦斯压力下煤与瓦斯复合体变形破坏特征及微震信号和电荷感应信号显现规律的关系,以及瓦斯压力对3者的影响。结果表明:煤与瓦斯复合体变形破坏可分为3个阶段,即弹性阶段、屈服强化阶段和破坏阶段,随着瓦斯压力的增大,煤与瓦斯复合体的抗压强度、弹性模量和软化模量减小,冲击倾向性降低,弹性和屈服强化阶段持续时间缩短;煤与瓦斯复合体变形破坏过程中有微震信号和电荷感应信号产生,且两种信号的峰值振幅均出现在煤与瓦斯复合体的破坏阶段;随着瓦斯压力的增大,微震信号和电荷感应信号数量增加且越来越分散,振幅增大,峰值振幅对应的应力降速率增大,同时,微震信号峰值振幅所在波形的起始振幅增大,峰值振幅前移,且越来越接近起始振幅。煤与瓦斯复合体中瓦斯压力越大,越容易发生冲击地压-煤与瓦斯突出复合动力灾害,通过微震信号和电荷感应信号的监测能够在一定程度上判断复合体所处的变形破坏阶段,结合瓦斯压力大小可预判复合动力灾害的类型和危险性。

关键词:煤与瓦斯复合体;微震-电荷感应规律;应力降速率;冲击地压;煤与瓦斯突出;复合动力灾害

中图分类号:TD713; TD315 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-9993(2020)05-1719-07

Deformation and failure characteristics and microseismic-charge induction rules of coal and gas complex under loading

ZHU Xiaojing¹, WANG Aiwen¹, LI Qi¹, WANG Kaixing¹, LUO Hao²

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

Abstract: In view of the current situation that the prediction means on the composite dynamic disasters of rockburst-coal and gas outburst are limited and the monitoring method of precursory information is not sufficient, the deformation and failure monitoring test of coal and gas complex under loading was carried out by using a high-frequency micro-seismic full waveform real-time monitoring system and a charge induction monitoring system with independent research and development. The relationship between the deformation and failure characteristics of coal and gas complex and the rules of micro-seismic signals and charge induction signals under different gas pressures was analyzed. Also, the influence of gas pressure on them was analyzed. The results show that the deformation and failure of coal and gas complex can be divided into three stages: elasticity stage, yield and strengthening stage, and failure stage. With the increase of gas pressure in

coal and gas complex, the compressive strength, elastic modulus and softening modulus of coal and gas complex decrease, the bursting tendency reduces, the duration of elastic and yield strengthening stage shortens. There are microseismic signals and charge induction signals generated in the deformation and failure process of coal and gas complex, and the peak amplitudes of two signals both appear in the failure stage of coal and gas complex. With the increase of gas pressure, the number of microseismic signals and charge induction signals increases, the signals become more and more dispersed, the amplitudes increase, the stress drop rate corresponding to peak amplitude increases. At the same time, the initial amplitude of microseismic signal waveform containing peak amplitude increases, the peak amplitude moves forward, and more and more closes to the initial amplitude. The higher the gas pressure in coal and gas complex is, the easier the rockburst-coal and gas outburst composite dynamic disaster is to occur. The deformation and failure stage of complex can be estimated through monitoring of microseismic signals and charge induction signals to a certain extent, and in combination with the gas pressure, the type and hazard of composite dynamic disasters can be estimated.

Key words: coal and gas complex; microseismic-charge induction rules; the stress drop rate; rockburst; coal and gas outburst; composite dynamic disaster

冲击地压和煤与瓦斯突出是煤矿开采中遇到的主要动力灾害,并且随着开采深度的增加,出现了二者的复合动力灾害现象,甚至引发瓦斯、煤尘爆炸等次生灾害,对矿山安全生产造成了极大的威胁^[1-3]。因此,对于这种复合型煤矿动力灾害的预测预报成为采矿工程的亟需。研究发现,煤体受载破裂时会以震动波(微震信号)形式释放变形能,并伴有电荷感应信号出现,且两种信号的显现特征和规律与煤体裂纹的产生、发展、贯通等过程密切相关^[4-6]。因此,可以通过监测分析煤体产生的微震和电荷感应信号的显现特征与规律,判断煤体应力状态与破裂情况,进一步指导实际工程中煤矿动力灾害的预测。

目前,已有部分专家学者对煤体受载下的微震和电荷感应信号特征与规律进行了比较细致的研究。陆菜平等^[7]研究了三河尖煤矿组合煤试样从变形破裂直至冲击破坏全过程的微震信号,得出了煤冲击前兆微震频谱演化规律。王晓南等^[8]通过对单轴受压的不同煤岩组合试样进行声发射和微震试验,得出了煤岩组合体冲击破坏的声发射及微震效应规律。杨永杰^[9]系统地分析了煤强度、变形及微震特征。赵扬锋、刘玉春等^[10-11]研究了含水煤岩单轴压缩下微震信号的特征,及不同组合比例煤岩的电荷感应与微震规律。潘一山、罗浩等^[12-15]深入研究了含瓦斯煤岩加载破坏过程中声-电前兆信息及围压卸荷过程中瓦斯渗流规律及电荷感应特征。肖晓春等^[16]研究了煤体冲击倾向性及声-电荷时频特征随着含水率的变化规律。上述专家、学者在煤受载破裂的微震信号和电荷感应信号的特征规律方面取得了一定的研究成果,但对于煤与瓦斯复合体微震信号特征规律的研究还未涉及,更没有综合分析其微震与电荷感应规律的相关研究。而实际工程中,瓦斯的存在对煤体的

强度及变形破裂行为有很大影响,并且这些影响往往是促使煤矿复合型动力灾害发生的内在原因,因此,采用多种监测手段综合监测与分析含瓦斯煤体的多种信息是进行复合灾害预测预警的最有效途径^[17-20]。故研究煤与瓦斯复合体的变形破坏特征及微震-电荷感应规律,对于辨析复合动力灾害前兆信息及灾害预测具有重要的理论及现实意义。

笔者通过自主研发的高频微震全波形实时监测系统及电荷感应监测系统,开展实验室煤与瓦斯复合体受载变形破坏试验,监测不同瓦斯压力下煤与瓦斯复合体的变形破坏力学行为与微震信号和电荷感应信号,进而分析瓦斯压力对煤与瓦斯复合体变形破坏特征与微震-电荷感应规律的影响。

1 试验系统

如图1所示,试验采用的测试系统包括高频微震全波形实时监测系统、电荷感应监测系统、加载及其控制系统、三轴压力室、瓦斯及压力表。

高频微震全波形实时监测系统由数据采集器、双增益前置放大器、三分量振动速度传感器组成。数据采集器每个通道的采样频率0~100 kHz,本试验选择12.5 kHz;双增益前置放大器可分别使信号增益32,512倍,为更好地观察信号特征,选择512倍增益;三分量振动速度传感器频响范围为10~1 400 Hz。

电荷感应监测系统由数据采集器、信号放大器和电荷感应传感器组成。本试验中数据采集器采样频率设为2.5 kHz;信号放大器可将接收的分离电荷放大100倍后以微电势信号输出;电荷感应传感器灵敏度为10⁻¹¹ C。

加载及其控制系统采用SANS XYB605C型电液

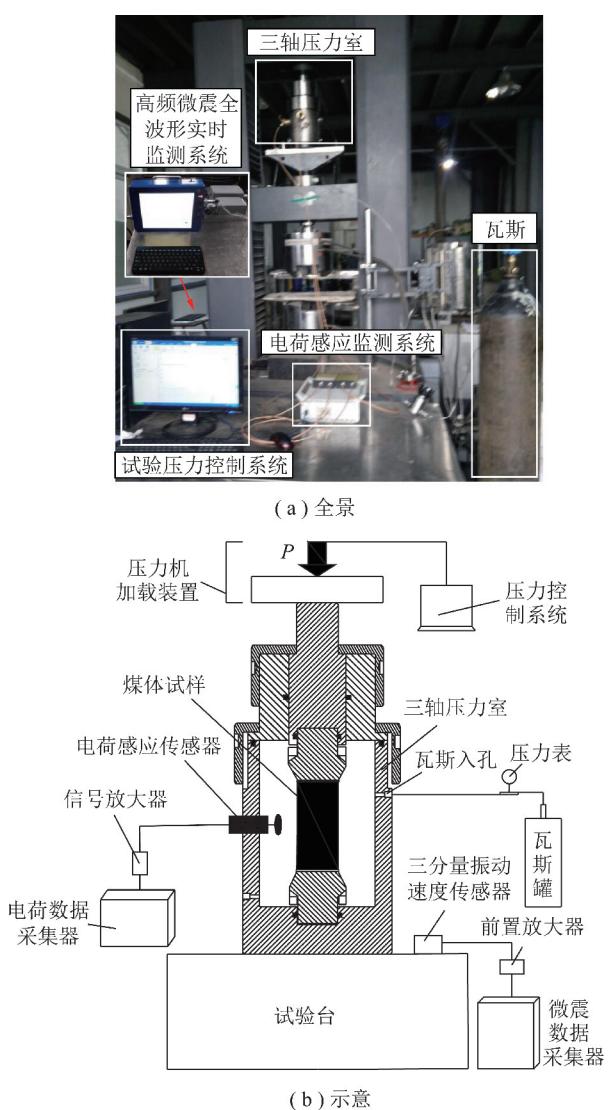


图1 试验系统

Fig. 1 Experiment system

伺服万能试验机。三轴压力室通过传力柱、导向筒、上端盖、压紧螺母、缸体、上下端圆形压头组成加持密闭容器,利用传力柱传递压力机施加的轴向载荷对试样加载,并通过密闭容器侧面的瓦斯出入孔连接压力表,再由压力表连接瓦斯罐,完成瓦斯的注入与排放,且三轴压力室具有屏蔽外界电磁干扰的作用。

2 煤与瓦斯复合体变形破坏微震和电荷感应信号监测试验

2.1 试样制备

试验所用原煤取自阜新恒大煤矿埋深850 m处某含瓦斯煤层,将选取的原煤试块取芯和切割,加工成 $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的圆柱形标准试样,并将其断面磨平,平整度在0.2 mm以内。试样如图2所示。

2.2 试验方案及步骤

试验方案:试样分成3组,每组3块,对3组试样分



图2 煤体试样

Fig. 2 Coal samples

别进行0,1,2 MPa三个等级瓦斯压力下的加载破坏试验,采用加载速率为0.2 mm/min的位移控制方式加载,加载方向垂直于试样层理。三分量振动速度传感器置于三轴压力室下部传感器放置槽中;电荷感应传感器置于三轴压力室侧面,距离试样表面5~10 mm。

试验步骤:① 将试样置于三轴压力室中,上下垫有绝缘刚性压垫,保证试样受力均匀,压力室连接瓦斯罐和压力表,安装振动速度传感器和电荷感应传感器;② 启动试验机对试样施加一较小载荷,使其与压头完全接触,同时向密闭装置内缓慢注入规定压力值的瓦斯气体,保持48 h,使试样充分吸附瓦斯达到吸附平衡。③ 调试各监测系统,确认微震监测系统正常并有效避免背景噪声的影响,确认电荷感应监测系统正常且电磁屏蔽效果良好。④ 开始试验,使瓦斯压力稳定在规定值,试验机保持以0.2 mm/min加载速率对所有试样加载,同时实时监测应力、应变、微震和电荷感应信号,直至试样破坏,停止微震信号和电荷感应信号采集,关闭瓦斯气通道,停止加载。

3 试验结果与分析

将试验数据进行处理,绘制煤与瓦斯复合体变形破坏全程应力-应变曲线、应力-时间曲线、振动速度-时间曲线和电荷感应幅值-时间曲线。鉴于每组试样试验结果比较接近,故每组只选取一个有代表性的试样试验结果进行分析。

3.1 煤与瓦斯复合体变形破坏特征分析

图3为不同瓦斯压力下煤与瓦斯复合体应力-应变曲线,由图3可知,煤与瓦斯复合体变形破坏全程可大致分3个阶段:弹性阶段(O_A_0 段即(0~70%) σ_c)、屈服强化阶段(A_iB_i 段即(70%~100%) σ_c)和破坏阶段(B_iC_i 段即峰后应力降至0或0附近残余强度处),其中*i*=0,1,2, σ_c 为抗压强度。

瓦斯压力为0 MPa时,试样抗压强度为9.89 MPa;应力-应变曲线的 OB_0 段基本呈线性上升,弹性模量约为13.94 MPa;抗压强度后 B_0C_0 段曲

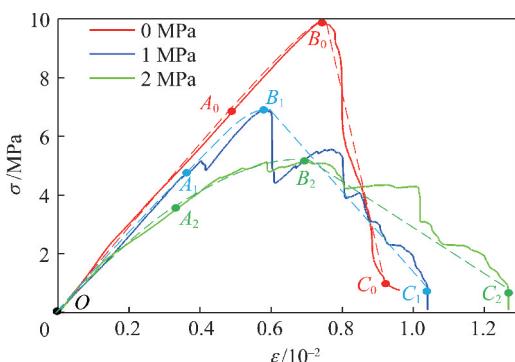


图3 不同瓦斯压力下煤与瓦斯复合体应力-应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curves of coal and gas complex with different gas pressure

线呈现“断崖式”下降趋势,波动很小,直至残余强度,软化模量约为49.45 MPa。这一变形破坏特征属于典型的强冲击倾向性煤体,即在抗压强度前煤体积蓄大量弹性能量,能量损耗很少,当外加载荷超过抗压强度时,煤体瞬间发生失稳破坏,积蓄的弹性能量被突然释放,转化为碎煤携带着动能向外弹射,在井下现场则构成严重冲击地压事故。

瓦斯压力为1 MPa时,试样抗压强度为6.93 MPa;应力-应变曲线的OA₁段仍基本呈线性上升趋势,弹性模量约为12.87 MPa,A₁B₁段出现一次明显波动,抗压强度后B₁C₁段曲线呈明显的“波动式”下降趋势,直至降到0附近,软化模量约为15.03 MPa。这一变形破坏特征具有典型的煤与瓦斯复合煤层的煤体力学特性,瓦斯的参与使煤体达到抗压强度前不能持续积蓄弹性能量,存在能量损耗的情况,当超过抗压强度后发生破坏又不是瞬间释放弹性能量,而是断续地释放。因此,煤与瓦斯复合煤层发生冲击地压时,煤体弹射现象造成的破坏相对较轻。

瓦斯压力为2 MPa时,试样抗压强度为5.16 MPa;应力-应变曲线的O₂A₂段呈抛物线式的曲线上升趋势,弹性模量约为10.52 MPa;A₂B₂段曲线出现多次波动;抗压强度后B₂C₂段曲线呈现“阶梯式”下降趋势,直至降到0附近,软化模量约为9.03 MPa。这一变形破坏特征同冲击地压-煤与瓦斯突出复合动力灾害的煤体力学性质相似,由于瓦斯压力发挥的作用增大,使试样变形破坏全程持续有大量裂纹产生、发展、贯通,因此抗压强度和弹性模量比瓦斯压力为0和1 MPa时试样对应的值更小,软化模量更大,即冲击倾向性相比于前两者更弱。但达到抗压强度后,由于外加载荷和瓦斯的共同作用,导致应力-应变曲线呈“阶梯式”下降,说明每次能量释放都是迅速直接地释放,煤体裂纹的发育程度也更高、更均匀。所以,这种煤层一旦突发失稳,将造成大量碎

煤和瓦斯瞬间涌出,危害程度更为严重。

3.2 煤与瓦斯复合体微震-电荷感应规律分析

图4~6分别是瓦斯压力为0,1,2 MPa时煤与瓦斯复合体变形破坏的应力-时间曲线和微震-电荷感应监测结果,其中微震信号振动速度用V_m表示;电荷感应幅值用A_c表示。图7为图4~6中对应的微震信号峰值振幅处波形放大图。

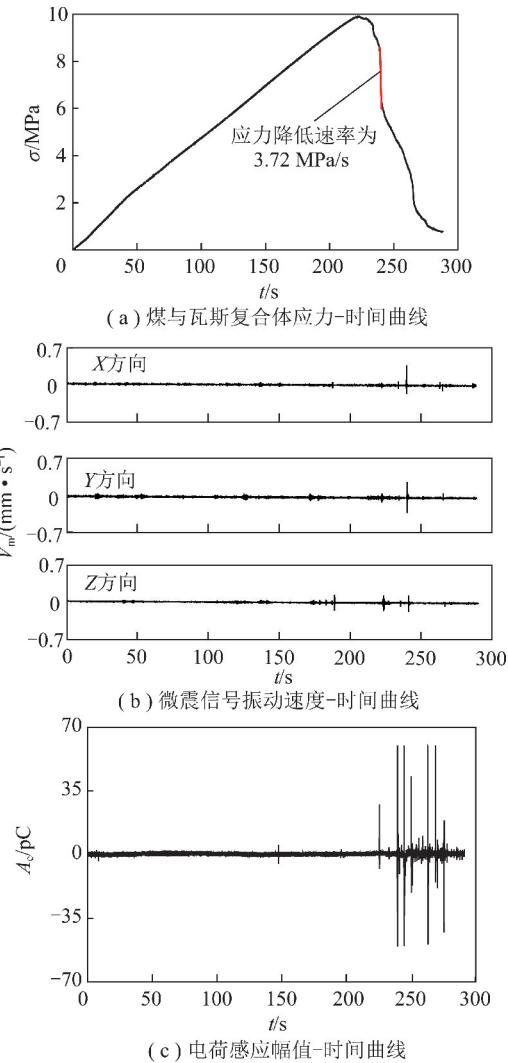


图4 瓦斯压力为0 MPa时应力-时间曲线和微震-电荷感应监测结果

Fig. 4 Stress-time curve and microseismic-charge induction monitoring results when gas pressure is 0 MPa

由图4可知,瓦斯压力为0 MPa时,试样弹性和屈服强化阶段持续时间为222.99 s,且微震信号和电荷感应信号在这2个阶段基本没有产生,主要集中在破坏阶段。这与图3中瓦斯压力为0 MPa的试样应力应变规律吻合,试样未达到抗压强度前无明显的破裂,故基本没有微震信号和电荷感应信号出现;试样达到抗压强度后,瞬间发生失稳破坏,产生了明显的微震信号和电荷感应信号。微震信号三分量的峰值振幅分别为0.39,0.31,0.17 mm/s,电荷感应信号峰

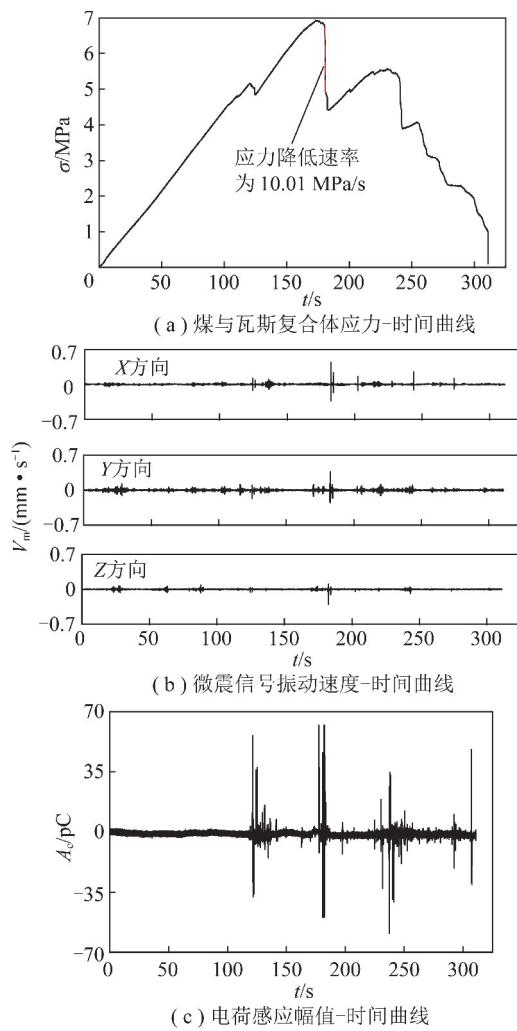


图5 瓦斯压力为1 MPa时应力-时间曲线和微震-电荷感应监测结果

Fig. 5 Stress-time curve and microseismic-charge induction monitoring results when gas pressure is 1 MPa

值振幅为60 pC, 对应时刻约为239.73 s, 此时正对应着应力达到抗压强度后瞬间降低的时刻, 此时应力降速率为3.72 MPa/s(应力-时间曲线斜率), 由图7(a)可见, 该时刻微震波形起始振幅较小。

由图5可知, 瓦斯压力为1 MPa时, 试样弹性和屈服强化阶段持续时间为173.58 s, 且在屈服强化阶段有小振幅微震信号和电荷感应信号产生, 但两种信号仍集中在破坏阶段。这与图3中瓦斯压力1 MPa的试样应力应变规律吻合, 试样在屈服强化阶段的破裂过程促使微震信号和电荷感应信号显现, 破坏阶段多次破裂、应力骤降则使微震和电荷信号密集产生。微震信号三分量的峰值振幅分别为0.45, 0.38, 0.32 mm/s, 电荷感应信号峰值振幅为63 pC, 对应时刻约为182.47 s, 此时正对应着应力达到抗压强度后瞬间降低的时刻, 此时应力降速率为10.01 MPa/s, 由图7(b)可见, 该时刻微震波形起始振幅比瓦斯压

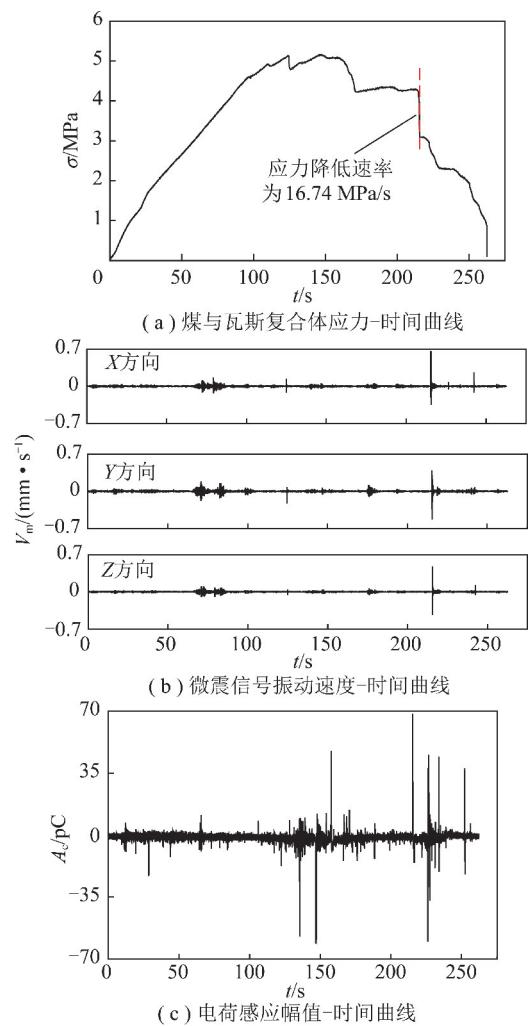


图6 瓦斯压力为2 MPa时应力-时间曲线和微震-电荷感应监测结果

Fig. 6 Stress-time curve and microseismic-charge induction monitoring results when gas pressure is 2 MPa

力为0 MPa时大, 且峰值振幅前移。

由图6可知, 试样弹性和屈服强化阶段持续时间为147.36 s; 微震信号和电荷感应信号比较分散, 在试样变形破坏全程都有产生, 但在试样抗压强度前普遍较弱, 在抗压强度后显现则非常剧烈, 由图3中瓦斯压力2 MPa时试样的应力应变规律可知, 这与试样各个阶段的裂纹产生数量、裂纹的发展和贯通程度密切相关。微震信号三分量的峰值振幅分别为0.66, 0.53, 0.48 mm/s, 电荷感应信号峰值振幅为68 pC, 对应时刻约为215.51 s, 与应力达到抗压强度后瞬间降低的时刻吻合, 此时应力降速率为16.74 MPa/s, 由图7(c)可知, 该时刻微震波形起始振幅比瓦斯压力为0 MPa和1 MPa时大, 且起始振幅后直接达到了峰值振幅。

通过上述3组试验结果对比可知, 随着瓦斯压力增大, 煤与瓦斯复合体弹性和屈服强化阶段持续时间

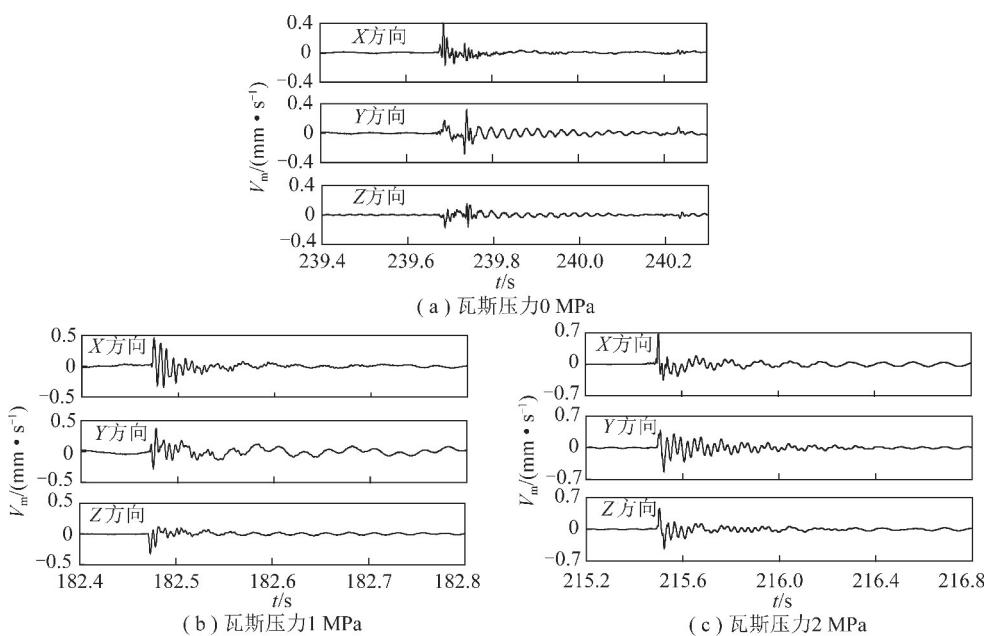


图7 不同瓦斯压力下微震信号峰值振幅处波形放大图

Fig. 7 Wave magnification of microseismic signal at peak amplitude with different gas pressure

缩短,微震信号和电荷感应信号数量增加且越来越分散,振幅增大,微震信号的峰值振幅所在波形起始振幅增大,且峰值振幅前移,越来越接近起始振幅,两种信号峰值振幅对应的应力降速率增大。分析原因在于:试样达到抗压强度前,瓦斯压力的参与使试样破裂加速,裂纹扩展,裂纹发展更广泛;试样达到抗压强度后,裂纹越多,越容易有大量的瓦斯进入裂纹中,使裂纹发展、贯通的更迅速。

3.3 煤与瓦斯复合体动力破坏类型判断方法

根据试验研究得到,当煤与瓦斯复合体受载时,瓦斯压力对煤与瓦斯复合体的变形破坏特征具有明显影响,通过微震信号和电荷感应信号的监测能够在一定程度上反映煤与瓦斯复合体所处的变形破坏阶段,且根据瓦斯压力大小可以初步判别煤与瓦斯复合体的动力破坏类型及危险性。

(1)当煤与瓦斯复合体中无瓦斯或瓦斯压力接近于0时,对于煤与瓦斯复合体监测发现有微震信号和电荷感应信号产生,意味着监测点附近煤与瓦斯复合体已经开始破坏,复合体受载达到了其抗压强度,此时极易发生冲击地压。

(2)当煤与瓦斯复合体中瓦斯含量少或瓦斯压力较小时,对于煤与瓦斯复合体监测发现有间歇性的微弱微震信号或电荷感应信号出现,意味着监测点附近煤与瓦斯复合体进入了屈服强化阶段,有明显裂纹产生,此时需要及时采取防治措施,否则容易发生以冲击地压为主导的冲击地压-煤与瓦斯突出复合型动力事故。

(3)当煤与瓦斯复合体中瓦斯含量大、瓦斯压力

明显较大时,对于煤与瓦斯复合体监测发现有频繁的比较明显的微震信号或电荷感应信号产生,意味着监测点附近煤与瓦斯复合体有大量裂纹产生,复合体受载正不断接近抗压强度,此时需要采取一定预防措施,否则容易进一步导致冲击地压-煤与瓦斯突出复合动力灾害。

4 结 论

(1)煤与瓦斯复合体变形破坏可分为3个阶段,即弹性阶段、屈服强化阶段和破坏阶段,随着瓦斯压力增大,煤与瓦斯复合体抗压强度、弹性模量和软化模量减小,冲击倾向性降低,弹性和屈服强化阶段持续时间缩短。

(2)煤与瓦斯复合体变形破坏过程中有微震信号和电荷感应信号产生,且两种信号的峰值振幅均出现在煤与瓦斯复合体的破坏阶段。随着瓦斯压力增大,微震信号和电荷感应信号数量增加且越来越分散,振幅增大,峰值振幅对应的应力降速率增大,同时,微震信号的峰值振幅所在波形起始振幅增大,且峰值振幅前移,越来越接近起始振幅。

(3)瓦斯压力对煤与瓦斯复合体的变形破坏特征以及微震信号和电荷感应信号具有明显影响,瓦斯压力越大,冲击倾向性越低,越容易发生冲击地压-煤与瓦斯突出复合动力灾害,通过微震信号和电荷感应信号的监测能够在一定程度上判断复合体所处的变形破坏阶段,结合瓦斯压力大小可预判复合动力灾害的类型和危险性。

参考文献(References):

- [1] 齐庆新,潘一山,舒龙勇,等.煤矿深部开采煤岩动力灾害多尺度分源防控理论与技术架构[J].煤炭学报,2018,43(7):1801-1810.
QI Qingxin,PAN Yishan,SHU Longyong,et al.Theory and technical framework of prevention and control with different sources in multi-scales for coal and rock dynamic disasters in deep mining of coal mines[J].Journal of China Coal Society,2018,43(7):1801-1810.
- [2] 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 Yishan. Integrated study on compound dynamic disaster of coal-gas outburst and rockburst[J]. Journal of China Coal Society,2016,41(1):105-112.
- [3] BRADY B H G, BROWN E T. Rock mechanics for underground mining[M]. Dordrecht:Kluwer Academic Publishers,2004.
- [4] 姜福兴,杨光宇,魏全德,等.煤矿复合动力灾害危险性实时预警平台研究与展望[J].煤炭学报,2018,43(2):333-339.
JIANG Fuxing,YANG Guangyu,WEI Quande,et al.Study and prospect on coal mine composite dynamic disaster real-time prewarning platform[J]. Journal of China Coal Society,2018,43(2):333-339.
- [5] LITWINISZYN J. The phenomenon of rock bursts and resulting shock waves[J]. Mining Science & Technology,1984,1(4):243-251.
- [6] 王岗,潘一山,肖晓春.单轴加载煤体破坏特征与电荷规律研究及应用[J].岩土力学,2019,40(5):1823-1831.
WANG Gang,PAN Yishan,XIAO Xiaochun. Study and application of failure characteristics and charge law of coal body under uniaxial loading[J]. Rock and Soil Mechanics,2019,40(5):1823-1831.
- [7] 陆莱平,窦林名,吴兴荣,等.煤岩冲击前兆微震频谱演变规律的试验与实证研究[J].岩石力学与工程学报,2008,27(3):519-525.
LU Caiping,DOU Linming,WU Xingrong,et al.Experimental and empirical research on frequency-spectrum evolvement rule of rock-burst precursory microseismic signals of coal-rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2008,27(3):519-525.
- [8] 王晓南,陆莱平,薛俊华,等.煤岩组合体冲击破坏的声发射及微震效应规律试验研究[J].岩土力学,2013,34(9):2569-2575.
WANG Xiaonan,LU Caiping,XUE Junhua,et al.Experimental research on rules of acoustic emission and microseismic effects of burst failure of compound coal-rock samples[J]. Rock and Soil Mechanics,2013,34(9):2569-2575.
- [9] 杨永杰.煤岩强度、变形及微震特征的基础试验研究[D].青岛:山东科技大学,2006.
YANG Yongjie. Basic experimental study on characteristics of strength, deformation and microseismic under compression of coal [D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2006.
- [10] 刘玉春,赵扬锋,张超,等.含水煤岩单轴压缩微震信号特征试验研究[J].中国安全生产科学技术,2017,13(2):69-73.
LIU Yuchun,ZHAO Yangfeng,ZHANG Chao,et al.Experimental research on microseismic signals characteristics of moisture-contain-
- ning coals in uniaxial compression[J]. Journal of Safety Science and Technology,2017,13(2):69-73.
- [11] 赵扬锋,李兵,张超,等.不同组合比例煤岩的电荷感应与微震规律试验研究[J].中国安全生产科学技术,2019,15(1):107-112.
ZHAO Yangfeng,LI Bing,ZHANG Chao,et al.Experimental study on charge induction and microseismic laws of coal and rock with different combination ratios[J]. Journal of Safety Science and Technology,2019,15(1):107-112.
- [12] 潘一山,罗浩,李忠华,等.含瓦斯煤岩围压卸荷瓦斯渗流及电荷感应试验研究[J].岩石力学与工程学报,2015,34(4):713-719.
PAN Yishan,LUO Hao,LI Zhonghua,et al.Experiment study on gas permeability and charge induction of gaseous coal rock under confining pressure unloading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2015,34(4):713-719.
- [13] 潘一山,罗浩,肖晓春,等.三轴条件下含瓦斯煤电感应规律的试验研究[J].煤炭学报,2012,23(6):918-922.
PAN Yishan,LUO Hao,XIAO Xiaochun,et al.Experiment study on mechanical-charge induction law of coal containing gas under triaxial compression[J]. Journal of China Coal Society,2012,23(6):918-922.
- [14] 罗浩,潘一山,赵扬锋,等.含瓦斯煤体加载破坏声-电前兆信息试验研究[J].煤炭学报,2015,40(3):548-554.
LUO Hao,PAN Yishan,ZHAO Yangfeng,et al.Experiment study on asousto-charge precursory information of coal containing gas during loading failure process [J]. Journal of China Coal Society, 2015,40(3):548-554.
- [15] 罗浩,于靖康,潘一山,等.含瓦斯冲击倾向性煤体加载破坏电荷感应规律[J].煤炭学报,2020,45(2):684-694.
LUO Hao,YU Jingkang,PAN Yishan,et al.Electric charge induction law of coal rock containing gas with bursting tendency during loading failure process [J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(2):684-694.
- [16] 肖晓春,金晨,吴迪,等.含水煤体冲击倾向及声-电荷时频特征试验[J].中国安全科学学报,2017,27(11):103-108.
XIAO Xiaochun,JIN Chen,WU Di,et al.Experiment study on burst tendency of water-bearing coal and its acoustic emission-charge time frequency domain signal characteristics [J]. China Safety Science Journal,2017,27(11):103-108.
- [17] BORISENKO A A. Effect of gas pressure on stress in coal strata [J]. Soviet Mining Science,1985,(1):88-91.
- [18] 彭永伟,齐庆新,李宏艳,等.煤体采动裂隙场演化与瓦斯渗流耦合数值模拟[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2009,28(S1):229-231.
PENG Yongwei,QI Qingxin,LI Hongyan,et al.Numerical simulation study on evolution of mining-induced fractures field and gas seepage[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science),2009,28(S1):229-231.
- [19] 李忠华.高瓦斯煤层冲击地压发生理论研究及应用[D].阜新:辽宁工程技术大学,2006.
LI Zhonghua. Study on theory and application of high gassy seam rockburst [D]. Fuxin:Liaoning Technical University,2006.
- [20] 潘一山.煤矿冲击地压[M].北京:科学出版社,2018.