

高瓦斯煤层冲击地压发生条件与影响因素¹⁾尹万蕾^{*,2)} 潘一山^{*,†,3)} 李忠华^{*}^{*}(辽宁工程技术大学力学与工程学院冲击地压研究院, 辽宁阜新 123000)[†](辽宁大学物理学院, 沈阳 110036)

摘要 针对高瓦斯煤层冲击地压问题, 用解析方法得到冲击地压发生条件, 分析了主要影响因素对满足冲击地压发生条件的临界塑性区半径和临界应力的影响规律. 结合五龙矿开采实际情况对影响高瓦斯煤层冲击地压的煤的模量比、煤层瓦斯孔隙压力、支护应力和内摩擦角 4 个因素做了对比分析. 研究发现: 高瓦斯煤层在巷道掘进面附近由于存在开挖面空间效应, 掘进面前方尚未开挖的煤体对巷道变形起到了限制作用, 减少了冲击地压的发生, 随着掘进面向前推进, 后方一定距离范围内的巷道支护应力增大. 随着瓦斯解吸渗流的进行, 巷道壁处孔隙压力降低, 巷道冲击地压危险性明显提高, 此时提高支护应力, 冲击危险性有所降低. 高瓦斯煤层巷道发生冲击地压的临界塑性区半径和临界应力随模量比、瓦斯孔隙压力的增大而快速减小, 随支护应力的增大而增大, 临界塑性区半径随内摩擦角的增大而增大, 临界应力与内摩擦角不是单调函数关系, 存在一个极小值点, 当内摩擦角小于此极小值时, 临界应力随内摩擦角增大而减小; 当内摩擦角大于此极小值时, 临界应力随内摩擦角增大而增大.

关键词 冲击地压, 高瓦斯煤层, 模量比, 孔隙压力, 支护应力, 内摩擦角

中图分类号: TD324 文献标识码: A doi: 10.6052/0459-1879-16-302

CONDITION AND INFLUENCE FACTOR OF ROCK BURST IN HIGH GASSY COAL SEAM¹⁾Yin Wanlei^{*,2)} Pan Yishan^{*,†,3)} Li Zhonghua^{*}^{*}(Research Institute of Rockburst, School of Mechanics and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, Liaoning, China)[†](School of Physics, Liaoning University, Shenyang 110036, China)

Abstract Aiming at the problem of rock burst in high gassy coal seam, the occurrence conditions of rock burst are obtained by analytical analysis, the influence rule of main factors on the radius and the critical stress of the critical plastic zone are analyzed. In connection with Wulong mining practice, the effects of the coal modulus ratio, gas pore pressure, support stress, and internal friction angle on rock burst of in high gassy coal seam are analyzed in comparison. The results show that, non excavated solid coal plays a limiting role in the deformation of the roadway because of the spatial effect with excavation face nearby roadway heading face about high gassy coal seam. It reduces the danger of rock burst, the support stress of the roadway is increased in a certain distance from the rear along with the excavating face ahead. At the same time, along with the gas desorption seepage, the pore pressure of the tunnel wall is decreased, and the risk of rock

2016-10-28 收稿, 2017-03-12 录用, 2017-03-16 网络版发表.

1) 国家重点研发计划 (2016YFC0801401), 国家自然科学基金 (51174107, 51374119), 国家青年自然科学基金 (51404131) 资助项目.

2) 尹万蕾, 博士研究生, 主要从事冲击地压预测防治研究. E-mail: ywl696@126.com

3) 潘一山, 教授, 主要从事固体力学和岩石力学方面的教学与研究工作. E-mail: panyish.cn@sina.com

引用格式: 尹万蕾, 潘一山, 李忠华. 高瓦斯煤层冲击地压发生条件与影响因素. 力学学报, 2017, 49(3): 716-725

Yin Wanlei, Pan Yishan, Li Zhonghua. Condition and influence factor of rock burst in high gassy coal seam. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2017, 49(3): 716-725

burst is increased, at this point to improve the support stress, the impact of risk is reduced. The critical plastic zone radius and the critical stress of the high gassy coal seam tunnel decrease rapidly with the increase of the modulus ratio λ/E and the pore pressure, and they increase with the increase of the support stress, the radius of the critical plastic zone increases with the increase of the internal friction angle, the relationship between the critical stress and the internal friction angle is not monotone, there exists a minimum value, when the internal friction angle is less than the minimum value, the critical stress decreases with the increase of the internal friction angle; when the internal friction angle is larger, the results are opposite.

Key words rock burst, high gassy coal seam, modulus ratio, pore pressure, support stress, internal friction angle

引 言

对冲击地压发生理论的研究已有近百年历史,产生了强度理论、刚度理论、能量理论、冲击倾向性理论、失稳理论和组合理论.业内学者对冲击地压的发生机理与类型划分^[1-4]进行了大量研究,但这些理论研究很少涉及煤层瓦斯对冲击地压发生的影响作用.目前,中国高瓦斯煤层发生冲击地压的矿井已不在少数,如抚顺老虎台矿、阜新五龙矿和王营矿、邯鄲陶二矿、丰城建新矿、平顶山十矿和十二矿等.但对高瓦斯煤层冲击地压的专门研究却较少.潘一山等^[5-8]最先系统地分析了瓦斯对煤体失稳破坏的影响,建立了瓦斯煤层冲击地压数学模型;李铁等^[9-10]通过大量微震、瓦斯监测和现场调查,发现冲击地压震前、震后和同震都伴随瓦斯异常涌出的现象,对以往“冲击地压只是忽略或没有瓦斯作用的煤体突出”观点提出质疑,认为煤炭深部开采条件下冲击地压与瓦斯密切相关,高压瓦斯气体极有可能参与了冲击地压的孕育,存在一种含气多孔介质和储气构造在开挖卸荷和高压吸附瓦斯解吸膨胀耦合作用下诱发的冲击地压.王振^[11]分析了瓦斯对煤体力学性质的影响以及瓦斯渗流和裂隙扩展的规律,并研究了冲击地压与瓦斯突出在不同阶段相互诱发生转化的条件.马海峰^[12]研究了应力场对瓦斯场的影响,并建立了气固耦合模型.董飞亚^[13]研究了高瓦斯煤层冲击地压发生机理.王磊^[14]研究了应力场和瓦斯场的耦合效应.徐晨阳^[15]总结了高瓦斯煤层冲击地压的特征和机理,并分析了研究中存在的问题.王涛等^[16]从多角度、多因素方面分析冲击地压的发生引起矿体震动对瓦斯的吸附影响,并分析了涌出的原因与条件.梁冰等^[17-18]根据煤岩变形与瓦斯渗流的作用机理,提出了煤体与瓦斯突出的固流耦合失稳理论,建立了含瓦斯煤体的本构关系,同时给出了材料参数的确定方法.俞善炳^[19-20]建立了煤与

瓦斯突出的一维流动模型,给出了破碎启动准则,并讨论了突出启动过程,研究了大型突出相应于恒稳推进的情况,分析了煤与瓦斯突出的重要无量纲参数以及判据.赵阳升^[21]研究了冲击地压与突出的统一机制,煤体冲击倾向、孔隙瓦斯压力及围岩应力对突出的影响,提出了突出的数学模型.蓝航等^[22]统计了近年来我国冲击地压发生的区域、条件、特点以及防治手段和效果,分析了地质因素与开采技术因素的影响.崔乃鑫等^[23]研究了含瓦斯煤层实施钻屑法过程中瓦斯的影响,采用经典理论推得了检测含瓦斯煤层冲击地压的钻屑量指标.彭苏萍等^[24]根据煤层瓦斯与常规砂岩赋存天然气机理对比结果,提出了以煤层裂隙为探测目标的煤层瓦斯富集 AVO 技术预测理论.梁盛开等^[25]针对煤与瓦斯突出的预测问题提出了多因素综合评价的新途径.宋真龙等^[26]分析了不同瓦斯压力环境中煤样单轴压缩与循环加载过程中能量集聚与耗散关系,得出高瓦斯矿井深部开采进行冲击倾向性评价需考虑瓦斯因素的结论.刘保县等^[27]采用非线性理论——突变理论,研究煤与瓦斯突出机理,得到延期突出的滞后现象是由地应力、煤体中的瓦斯、煤的物理力学特性及外力作用(爆破)等因素共同作用的结果.张志刚等^[28]建立了瓦斯气体渗流的非线性渗流方程,结合试验验证得到含瓦斯煤体内非线性附加阻力来源于基质膨胀、边界层影响、吸附的动态传质过程的结论.郭为等^[29]通过页岩基质解吸-扩散-渗流耦合实验,利用有限差分法求解解吸-扩散-渗流耦合数学模型,对基岩气体流动影响因素进行了分析,得到了页岩基质的渗透率、扩散系数、解吸附加常数等影响因素对基质气体的流量和压力传播规律.刘文超等^[30]利用相似变量变换方法和基于空间坐标变换的有限差分法研究启动压力梯度的低渗透多孔介质非达西渗流模型边界问题,对考虑内边界变压力情况下启动压

力梯度一维低渗透多孔介质非达西渗流动边界模型进行求解,得到研究低渗透多孔介质非稳态渗流问题需考虑动边界的影响,并分析了模型求解的正确性.研究表明,游离瓦斯产生孔隙压力,以体积力作用于煤体;吸附瓦斯影响煤体的力学性质,宏观上表现为弹性模量降低,煤体强度减弱.在高瓦斯煤层中,应力场与瓦斯场共同作用于煤体,弹性势能与瓦斯内能大量积聚,瓦斯煤体变形系统处于非稳定平衡状态,遇外部扰动失稳而发生冲击地压,称为高瓦斯煤层冲击地压.

本文在以上研究的基础上,以高瓦斯厚煤层中圆形断面巷道为分析对象,研究高瓦斯煤层冲击地压发生条件及其影响因素,为进一步研发高瓦斯煤层冲击地压预测与防治技术提供理论依据.

1 基本方程及其解析解

根据文献[31],冲击地压是采矿活动形成的地下煤岩变形系统在外围扰动下失稳而发生的动力现象.煤岩变形系统的组成材料为煤和岩石,由于煤岩材料具有应变软化性质,在外围载荷作用下,煤岩变形系统中部分区域(塑性变形区)的煤岩材料变成了应变软化的非稳定材料,整个煤岩变形系统处于非稳定平衡状态,在外围扰动下系统失稳而发生冲击地压.系统失稳时满足的条件称为冲击地压发生条件,根据扰动响应判别准则得到冲击地压发生条件.由扰动响应判别准则,煤岩变形系统在外围载荷 P 作用下产生的塑性变形区特征深度为 ρ ,对于外载荷的一个微小扰动 ΔP ,塑性变形区特征深度产生增量 $\Delta\rho$,如果 $\Delta\rho \rightarrow \infty$,则系统将失稳而发生冲击地压,即冲击地压发生条件为

$$\frac{dP}{d\rho} = 0 \quad (1)$$

巷道为典型的地下开挖形成的煤岩变形系统.巷道断面形状根据煤矿井下地质条件和生产的要求而选择,如矩形、直墙拱形等.虽然一般很少采用圆形,但由于圆形断面巷道结构简单,便于分析,且其围岩塑性变形区特征深度与其他断面巷道偏差不大[32],因此本文以高瓦斯厚煤层中圆形断面巷道为分析对象,研究高瓦斯煤层冲击地压发生条件及其影响因素.相应地将满足冲击地压发生条件的塑性区半径定义为“临界塑性区半径”,将满足冲击地压发生条件的煤体应力定义为“临界应力”.临界塑性区半径和临界应力是冲击地压发生条件的具体体现.

在原岩应力为 P 、瓦斯孔隙压力为 P_g 的煤层中开挖半径为 a 的圆形断面巷道.在巷道壁处作用的支护应力为 P_s 、瓦斯孔隙压力为 P_a .沿巷道轴线方向取单位长度计算,在不计体力的条件下,为轴对称平面应变问题,建立极坐标系,如图1所示.

假设原岩应力较大,在巷道周边已经出现外半径为 ρ 的塑性变形区.假设 b 为巷道开挖的影响区域, $r=b$ 处的煤体应力为 P ,瓦斯孔隙压力为 P_g .

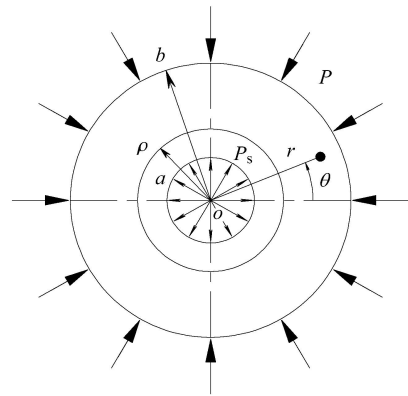


图1 圆形断面巷道分析模型

Fig. 1 Analysis model of circular section roadway

1.1 瓦斯压力分布规律

由文献[6]知,巷道开挖后,巷道围岩中瓦斯流动为轴对称径向渗流,单位时间流过单位长度半径为 r 的柱面的瓦斯流量 Q 为

$$Q = -2\pi r K \frac{dp}{dr} \quad (2)$$

式中, p 为 r 处的瓦斯孔隙压力, K 为渗透系数.

由式(2)得

$$p(r) = c_1 - \frac{Q}{2\pi K} \ln r \quad (3)$$

式中, c_1 为积分常数.

由式(3)和边界条件 $p(a) = P_a$, $p(b) = P_g$,得

$$c_1 = P_a + \frac{Q}{2\pi K} \ln a \quad (4a)$$

$$\frac{Q}{2\pi K} = \frac{P_g - P_a}{\ln(a/b)} \quad (4b)$$

将式(4a)和式(4b)代入式(3)得瓦斯压力分布规律为

$$p(r) = P_a + \frac{P_g - P_a}{\ln(a/b)} \ln \frac{a}{r} \quad (5a)$$

$$\frac{dp}{dr} = -\frac{P_g - P_a}{r \ln(a/b)} \quad (5b)$$

1.2 煤体骨架平衡方程

对于岩石类材料, 由修正的太沙基有效应力原理, 作用于煤体骨架上的有效应力 σ'_{ij} 与孔隙压力 p 的关系为

$$\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} - \alpha p \delta_{ij} \quad (6)$$

式中, σ'_{ij} 为有效应力张量, σ_{ij} 为外载荷作用下产生的应力张量, p 为孔隙压力, α 为有效应力系数。

圆形断面巷道围岩外载荷作用下产生的径向应力分量为 σ_r 、环向应力分量为 σ_θ 、轴向应力分量为 σ_z , 径向有效应力分量为 σ'_r 、环向有效应力分量为 σ'_θ 、轴向有效应力分量为 σ'_z , 则由式 (6) 得

$$\sigma'_r = \sigma_r - \alpha p \quad (6a)$$

$$\sigma'_\theta = \sigma_\theta - \alpha p \quad (6b)$$

$$\sigma'_z = \sigma_z - \alpha p \quad (6c)$$

忽略体力情况下的轴对称平面应变问题的平衡方程为

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \quad (7)$$

将式 (5b), 式 (6a), 式 (6b) 代入式 (7) 得

$$\frac{d\sigma'_r}{dr} = \frac{\alpha(P_g - P_a)}{r \ln(a/b)} + \frac{\sigma'_\theta - \sigma'_r}{r} = 0 \quad (8)$$

1.3 几何方程与位移分布规律

令径向应变分量为 ε_r 、环向应变分量为 ε_θ 、径向位移为 μ , 则几何方程

$$\varepsilon_r = \frac{du}{dr}, \quad \varepsilon_\theta = \frac{u}{r} \quad (9)$$

假设巷道围岩不可压缩, u_a 为巷道壁处的径向位移, $\bar{\sigma}'$ 为有效应力强度, $\bar{\varepsilon}$ 为应变强度, 则

$$\sigma'_z = \frac{\sigma'_r + \sigma'_\theta}{2} \quad (10a)$$

$$\bar{\sigma}' = \frac{\sqrt{3}}{2} (\sigma'_\theta - \sigma'_r) \quad (10b)$$

$$u = \frac{au_a}{r} \quad (10c)$$

$$\varepsilon_\theta = -\varepsilon_r = \frac{au_a}{r^2} \quad (10d)$$

$$\bar{\varepsilon} = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{au_a}{r^2} \quad (10e)$$

在 $r = \rho$ 处, $\bar{\varepsilon} = \varepsilon_c$ (ε_c 为单轴压缩应力应变曲线上峰值强度 σ_c 对应的应变), 得

$$u_a = \frac{\sqrt{3}\rho^2\varepsilon_c}{2a} \quad (10f)$$

$$u = \frac{\sqrt{3}\rho^2\varepsilon_c}{2r} \quad (10g)$$

$$\varepsilon_\theta = -\varepsilon_r = \frac{\sqrt{3}\rho^2\varepsilon_c}{2r^2} \quad (10h)$$

$$\bar{\varepsilon} = \varepsilon_c \frac{\rho^2}{r^2} \quad (10i)$$

1.4 本构方程与损伤变量

假设弹性区无损伤, 损伤变量 $D = 0$, 则弹性区本构方程为

$$\bar{\sigma}' = \bar{E}\bar{\varepsilon} \quad (11)$$

式中, $\bar{E}$ 称为等效弹性模量。

在体积不可压缩条件下等效弹性模量 $\bar{E}$ 与弹性模量 E 相等, 即 $\bar{E} = E$ 。将式 (10b)、式 (10i) 代入式 (11), 且 $\sigma_c = E\varepsilon_c$, 则弹性区本构方程变为

$$\sigma'_\theta - \sigma'_r = \frac{2\sigma_c\rho^2}{\sqrt{3}r^2} \quad (12)$$

在弹性区与塑性区交界 $r = \rho$ 处, 满足 Mohr-Coulomb 屈服条件

$$\sigma'_\theta(\rho) = m\sigma'_r(\rho) + \sigma_c \quad (13)$$

式中, $m = \frac{1 + \sin\phi}{1 - \sin\phi}$, $\sigma_c = \frac{2C \cos\phi}{1 - \sin\phi}$, C 为黏聚力, ϕ 为内摩擦角。

在 $r = \rho$ 处, 式 (12) 变为 $\sigma'_\theta(\rho) - \sigma'_r(\rho) = \frac{2\sigma_c}{\sqrt{3}}$, 与式 (13) 联合, 得

$$\sigma'_r(\rho) = \frac{(2 - \sqrt{3})\sigma_c}{\sqrt{3}(m - 1)} \quad (14a)$$

$$\sigma'_\theta(\rho) = \frac{(2m - \sqrt{3})\sigma_c}{\sqrt{3}(m - 1)} \quad (14b)$$

假设塑性区损伤线性演化, 且 $D(\varepsilon_c) = 0$, $D(\varepsilon_u) = 1$, $\varepsilon_u = \varepsilon_c \left(1 + \frac{E}{\lambda}\right)$ (λ 为单轴压缩应力应变曲线峰后降模量, ε_u 为峰后应力降低至 0 时对应的应变), 则损伤演化方程为

$$D = \frac{\lambda}{E} \left(\frac{\bar{\varepsilon}}{\varepsilon_c} - 1 \right) = \frac{\lambda}{E} \left(\frac{\rho^2}{r^2} - 1 \right) \quad (15)$$

由于损伤, 有效应力分量分别变为 $\tilde{\sigma}'_\theta = \frac{\sigma'_\theta}{1 - D}$, $\tilde{\sigma}'_r = \frac{\sigma'_r}{1 - D}$, 则塑性区本构方程变为

$$\sigma'_\theta = m\sigma'_r + (1 - D)\sigma_c \quad (16)$$

将式 (15) 代入式 (16), 得

$$\sigma'_\theta = m\sigma'_r + \left(1 + \frac{\lambda}{E} - \frac{\lambda\rho^2}{Er^2}\right)\sigma_c \quad (17)$$

1.5 弹性区应力分布规律

弹性区 $\rho \leq r \leq b$, 将式 (12) 代入式 (8) 得

$$\frac{d\sigma'_r}{dr} = \frac{\alpha(P_g - P_a)}{r \ln(a/b)} + \frac{2\sigma_c \rho^2}{\sqrt{3} r^3} \quad (18)$$

由应力边界条件 $\sigma'_r(b) = P - \alpha P_g$, 得式 (18) 的解为

$$\sigma'_r = P - \alpha P_g + \frac{\alpha(P_g - P_a)}{\ln(a/b)} \ln \frac{r}{b} - \frac{\sigma_c}{\sqrt{3}} \left(\frac{\rho^2}{r^2} - \frac{\rho^2}{b^2} \right) \quad (19a)$$

代入式 (12) 和式 (10a), 得

$$\sigma'_\theta = P - \alpha P_g + \frac{\alpha(P_g - P_a)}{\ln(a/b)} \ln \frac{r}{b} + \frac{\sigma_c}{\sqrt{3}} \left(\frac{\rho^2}{r^2} + \frac{\rho^2}{b^2} \right) \quad (19b)$$

$$\sigma'_z = P - \alpha P_g + \frac{\alpha(P_g - P_a)}{\ln(a/b)} \ln \frac{r}{b} + \frac{\sigma_c \rho^2}{\sqrt{3} b^2} \quad (19c)$$

1.6 塑性区应力分布规律

塑性区 $a \leq r < \rho$, 将式 (17) 代入式 (8) 得

$$\frac{d\sigma'_r}{dr} = \frac{\alpha(P_g - P_a)}{r \ln(a/b)} + (m-1) \frac{\sigma'_r}{r} + \sigma_c \left(1 + \frac{\lambda}{E} \right) \frac{1}{r} - \sigma_c \frac{\lambda \rho^2}{E r^3} \quad (20)$$

由应力边界条件 $\sigma'_r(a) = P_s - \alpha P_a$, 得式 (20) 的解为

$$\sigma'_r = (P_s - \alpha P_a) \frac{r^{m-1}}{a^{m-1}} - \frac{\sigma_c}{m+1} \frac{\lambda \rho^2}{E a^2} \left(\frac{r^{m-1}}{a^{m-1}} - \frac{a^2}{r^2} \right) + \frac{\sigma_c}{m-1} \left[\frac{\alpha(P_g - P_a)}{\sigma_c \ln(a/b)} + 1 + \frac{\lambda}{E} \right] \left(\frac{r^{m-1}}{a^{m-1}} - 1 \right) \quad (21a)$$

代入式 (17) 和式 (10a), 得

$$\sigma'_\theta = \left(1 + \frac{\lambda}{E} \right) \sigma_c + m(P_s - \alpha P_a) \frac{r^{m-1}}{a^{m-1}} - \frac{\sigma_c}{m+1} \frac{\lambda \rho^2}{E a^2} \left(m \frac{r^{m-1}}{a^{m-1}} + \frac{a^2}{r^2} \right) + \frac{m\sigma_c}{m-1} \left[\frac{\alpha(P_g - P_a)}{\sigma_c \ln(a/b)} + 1 + \frac{\lambda}{E} \right] \left(\frac{r^{m-1}}{a^{m-1}} - 1 \right) \quad (21b)$$

$$\sigma'_z = \left(1 + \frac{\lambda}{E} \right) \frac{\sigma_c}{2} + \frac{m+1}{2} (P_s - \alpha P_a) \frac{r^{m-1}}{a^{m-1}} - \sigma_c \frac{\lambda \rho^2}{E a^2} \frac{r^{m-1}}{a^{m-1}} + \frac{(m+1)\sigma_c}{2(m-1)} \left[\frac{\alpha(P_g - P_a)}{\sigma_c \ln(a/b)} + 1 + \frac{\lambda}{E} \right] \left(\frac{r^{m-1}}{a^{m-1}} - 1 \right) \quad (21c)$$

1.7 冲击地压发生条件

由 $r = \rho$ 径向应力连续条件, 令 $b \rightarrow \infty$, 得煤体应力 P 与塑性区半径 ρ 的关系式

$$P = \alpha P_a + \frac{\sigma_c}{\sqrt{3}} - \frac{\sigma_c}{m-1} \left(\frac{2}{m+1} \frac{\lambda}{E} - 1 \right) - \frac{\sigma_c}{m+1} \frac{\lambda \rho^{m+1}}{E a^{m+1}} + \frac{\sigma_c}{m-1} \left[1 + \frac{\lambda}{E} + (m-1) \frac{P_s - \alpha P_a}{\sigma_c} \right] \frac{\rho^{m-1}}{a^{m-1}} \quad (22)$$

由于临界塑性区半径和临界应力是冲击地压发生条件的具体体现, 首先推导临界塑性区半径和临界应力的表达式. 根据冲击地压发生的扰动响应判别准则^[13], 由式 (1) 和式 (22) 得临界塑性区半径

$$\rho_{cr} = a \sqrt{1 + \frac{E}{\lambda} + (m-1) \frac{E}{\lambda} \frac{P_s - \alpha P_a}{\sigma_c}} \quad (23)$$

代入式 (22), 得临界应力

$$P_{cr} = \alpha P_a + \frac{\sigma_c}{\sqrt{3}} + \frac{2\sigma_c}{m^2 - 1} \frac{\lambda}{E} \left\{ \left[1 + \frac{E}{\lambda} + (m-1) \frac{E}{\lambda} \frac{P_s - \alpha P_a}{\sigma_c} \right]^{\frac{m+1}{2}} - 1 + \frac{m+1}{2} \frac{E}{\lambda} \right\} \quad (24)$$

2 高瓦斯煤层冲击地压发生的影响因素分析

高瓦斯煤层巷道开挖前, 瓦斯孔隙压力处处相等, 等于初始孔隙压力 P_g . 巷道开挖后在巷道壁处形成自由面, 煤层瓦斯逐渐解吸, 沿径向巷道方向流动. 巷道形成的时刻巷道壁处孔隙压力等于初始孔隙压力, 即 $P_{a0} = P_g$; 随着瓦斯不断解吸, 向巷道壁方向不断流动, 巷道壁周围孔隙压力逐渐降低, 即 $P_a < P_g$; 直到最终时刻 $P_a = P_{a\min}$ 为止, 巷道围岩处处达到动态平衡.

以阜新五龙矿高瓦斯厚煤层掘进的运输平巷为例, 分析高瓦斯煤层冲击地压发生的影响因素. 该巷道为矩形断面, 横截面积为 24 m^2 . 根据文献 [32], 矩形断面巷道围岩塑性区深度比相同横截面积的圆形断面略大, 当圆形断面巷道半径取 $a = 3 \text{ m}$ 时, 两种不同断面巷道的塑性区深度相等. 按圆形断面计算所得结论与实际情况之间的偏差可以忽略.

实测数据为: $E = 2.5 \text{ GPa}$, $\lambda/E = 1.5$, $\alpha = 0.5$, $C = 2.5 \text{ MPa}$, $\phi = 35^\circ$; 巷道埋深 $H_0 = 880 \text{ m}$, 上覆岩

层平均容重 27 kN/m^3 , 则煤体应力 $P = 23.76 \text{ MPa}$; 采用的支护方式近似为弹性支护, 支护应力初始值为 $P_{s0} = 0$, 最终值为 $P_{s\max} = 1.2 \text{ MPa}$; 初始瓦斯孔隙压力 $P_g = 5 \text{ MPa}$, 巷道壁处孔隙压力最终降至 $P_{a\min} = 0.5 \text{ MPa}$ 后保持基本稳定, 此时支护应力也近似达到最终值。

在巷道形成的初始时刻, $P_s = P_{s0} = 0$, $P_a = P_{a0} = P_g = 5 \text{ MPa}$. 由式 (23) 和式 (24) 计算得到临界塑性区半径 $\rho_{cr} = 1.1a = 3.3 \text{ m}$, 临界煤体应力 $P_{cr} = 1.34\sigma_c = 12.8 \text{ MPa}$. 因为 $P = 23.76 \text{ MPa} > P_{cr}$, 所以该巷道存在冲击地压危险. 但是, 实际上巷道在掘进初期并没有发生冲击地压, 原因在于在掘进面附近存在开挖面空间效应^[33], 掘进面前方尚未开挖的煤体对巷道变形起到了限制作用, 使得掘进面附近不具备发生冲击地压条件。

随着掘进面向前推进, 后方一定距离范围内的巷道支护应力达到最大值 $P_s = P_{s\max} = 1.2 \text{ MPa}$, 同时随着瓦斯解吸渗流的进行, 巷道壁处孔隙压力降低到最小值 $P_a = P_{a\min} = 0.5 \text{ MPa}$. 由式 (23) 和式 (24) 计算得到临界塑性区半径 $\rho_{cr} = 1.36a = 4.07 \text{ m}$, 临界煤体应力 $P_{cr} = 1.74\sigma_c = 16.67 \text{ MPa}$. $P = 23.76 \text{ MPa} > P_{cr}$, 所以该巷道仍然存在冲击地压危险. 原因在于支护应力较小. 如果提高支护应力, 当达到 $P_s = 3.83 \text{ MPa}$, 临界应力 $P_{cr} = 23.77 \text{ MPa} > P$, 则不会发生冲击地压。

2.1 临界塑性区半径的影响因素分析

由式 (23) 可知, 临界塑性区半径的主要影响因素为模量比、瓦斯孔隙压力、支护应力和内摩擦角. 采用控制变量法, 分别对各个因素对临界塑性区半径的影响程度进行分析. 在其他因素数值不变 (实测值) 的条件下, 由式 (23) 可以得到单个因素对临界塑性区半径的影响规律, 如图 2~图 5 所示。

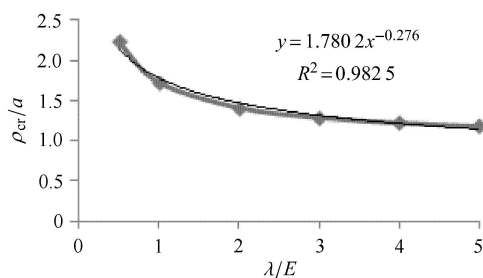


图 2 模量比对临界塑性区半径的影响

Fig. 2 Influence of modulus ratio on the critical plastic zone radius

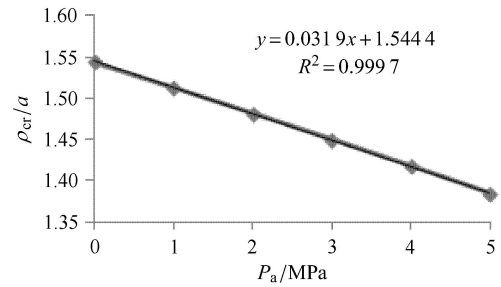


图 3 瓦斯孔隙压力对临界塑性区半径的影响

Fig. 3 Influence of gas pore pressure on the critical plastic zone radius

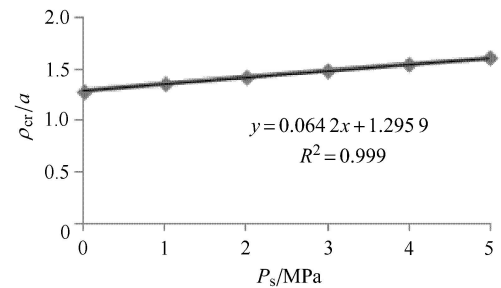


图 4 支护应力对临界塑性区半径的影响

Fig. 4 Effect of supporting stress on the critical plastic zone radius

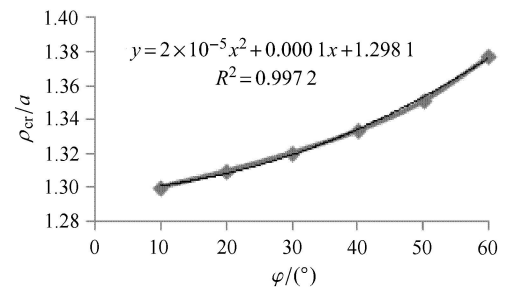


图 5 内摩擦角对临界塑性区半径的影响

Fig. 5 Influence of angle of internal friction on the critical plastic zone radius

由图 2 可见, 临界塑性区半径随模量比 λ/E 的增大而快速减小. 当 $\lambda/E = 0$ 时, 为理想弹塑性情况, $\rho_{cr}/a \rightarrow \infty$, 表明理想弹塑性煤岩应力应变曲线峰后没有出现软化现象, 不可能发生冲击地压; 当 $\lambda/E \rightarrow \infty$ 时, 为脆性煤岩情况, $\rho_{cr}/a \rightarrow 1$, 表明脆性煤岩应力应变曲线峰后快速跌落, 巷道壁处刚进入塑性变形即发生冲击地压; 当 $0 < \lambda/E < \infty$ 时, 为具有塑性软化的情况, $\infty > \rho_{cr}/a > 1$, 煤岩越脆硬冲击倾向性越大, 越容易发生冲击地压. 采用幂函数进行曲线拟合, 得 $\frac{\rho_{cr}}{a} = 1.7802 \left(\frac{\lambda}{E} \right)^{-0.276}$.

由图 3 可见, 临界塑性区半径随瓦斯孔隙压力的增大而减小, 但降低的幅度不大, 孔隙压力越大越

容易发生冲击地压. 采用线性函数进行曲线拟合, 得 $\frac{\rho_{cr}}{a} = -0.0319P_a + 1.5444$. 一般情况下 $p_a < 5$, 则第 2 项比第 1 项大两个数量级, 因此可以近似认为瓦斯孔隙压力对临界塑性区半径几乎没有影响, 可以忽略, 则 $\frac{\rho_{cr}}{a} = \text{常数}$, 能够满足现场实际要求.

由图 4 可见, 临界塑性区半径随支护应力的增大而增大, 支护应力越大越不容易发生冲击地压, 加强支护可有效降低冲击地压的发生. 采用线性函数进行曲线拟合, 得 $\frac{\rho_{cr}}{a} = 0.0642P_s + 1.2959$. 一般情况下 $P_s < 2$, 则第 2 项比第 1 项大一个数量级, 因此支护应力对临界塑性区半径的影响不可忽略. 提高支护应力可以使临界塑性区半径增大, 有效降低冲击地压发生的可能性, 所以加强支护是防治冲击地压的一项重要措施.

由图 5 可见, 临界塑性区半径随内摩擦角的增大而增大. 表明内摩擦角越大越不容易发生冲击地压. 当 $\varphi \rightarrow 0$ 时, $m \rightarrow 1$, $\rho_{cr}/a = \sqrt{1 + \frac{E}{\lambda}}$. 采用二次函数进行曲线拟合, 得 $\frac{\rho_{cr}}{a} = 0.00005\varphi^2 + 0.0001\varphi + 1.5444$. 当 φ 的单位取为弧度时, $\frac{\rho_{cr}}{a} = 0.164\varphi^2 + 0.0057\varphi + 1.2981$.

2.2 临界应力的影响因素分析

由式 (24) 可知, 临界应力的主要影响因素为模量比、瓦斯孔隙压力、支护应力和内摩擦角. 采用控制变量法, 分别对各个因素对临界应力的影响程度进行分析. 在其他因素数值不变 (实测值) 的条件下, 由式 (24) 可以得到单个因素对临界应力的影响规律, 如图 6~图 9 所示.

由图 6 可见, 临界应力随模量比 λ/E 的增大而快速减小. 当 $\lambda/E = 0$ 时, $P_{cr}/\sigma_c \rightarrow \infty$, 表明理想弹塑性煤岩应力应变曲线没有峰后软化现象, 不可能

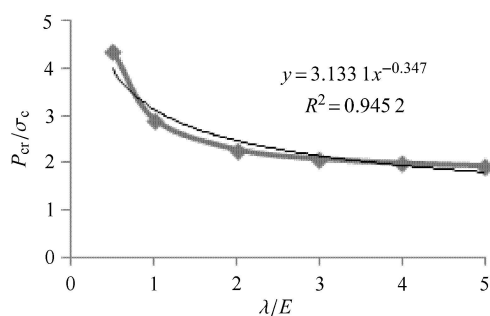


图 6 模量比对临界应力的影响

Fig. 6 Influence of modulus ratio on critical stress

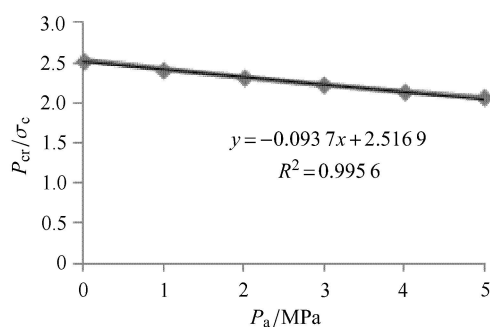


图 7 瓦斯孔隙压力对临界应力的影响

Fig. 7 Influence of gas pore pressure on critical stress

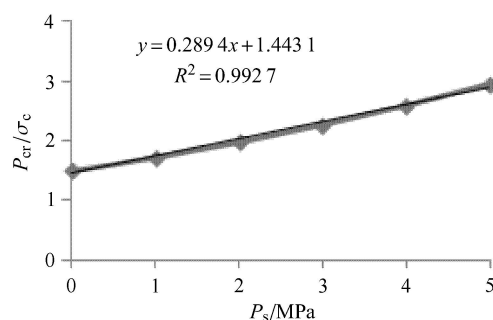


图 8 支护应力对临界应力的影响

Fig. 8 Effect of supporting stress on critical stress

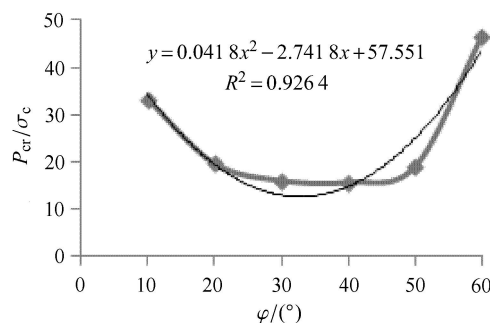


图 9 内摩擦角对临界应力的影响

Fig. 9 Influence of angle of internal friction on critical stress

发生冲击地压; 当 $\lambda/E \rightarrow \infty$ 时, $\frac{P_{cr}}{\sigma_c} \rightarrow \frac{P_s}{\sigma_c} + \frac{1}{\sqrt{3}} + \frac{2}{m-1}$, 表明脆性煤岩应力应变曲线峰后快速跌落, 巷道壁处刚进入塑性变形即发生冲击地压; 当 $0 < \lambda/E < \infty$ 时, $\infty > \frac{P_{cr}}{\sigma_c} > \frac{P_s}{\sigma_c} + \frac{1}{\sqrt{3}} + \frac{2}{m-1}$, 表明煤岩越脆硬冲击倾向性越大, 越容易发生冲击地压. 采用幂函数进行曲线拟合, 得 $\frac{P_{cr}}{\sigma_c} = 3.1331\left(\frac{\lambda}{E}\right)^{-0.347}$.

由图 7 可见, 临界应力随瓦斯孔隙压力的增大而减小, 但降低的幅度不大. 表明孔隙压力越大越容易发生冲击地压. 采用线性函数进行曲线拟合, 得 $\frac{P_{cr}}{\sigma_c} = -0.0937P_a + 2.5169$. 一般情况下 $P_a < 5$, 则

第 2 项比第 1 项大约一个数量级, 因此可以近似认为瓦斯孔隙压力对临界载荷影响较小, 但不可忽略。

由图 8 可见, 临界应力随支护应力的增大而增大。表明支护应力越大越不容易发生冲击地压, 加强支护可有效降低冲击地压的发生。采用线性函数进行曲线拟合, 得 $\frac{P_{cr}}{\sigma_c} = 0.2894P_s + 1.4431$ 。一般情况下 $P_s < 2$, 因此支护应力对临界载荷的影响不可忽略。

当 $P = P_{cr}$ 时, 由式 (24) 得

$$P_{smax} = \frac{\sigma_c}{m-1} \frac{\lambda}{E} \left[\frac{m^2-1}{2\sigma_c} \frac{E}{\lambda} \left(P - \alpha P_a - \frac{\sigma_c}{\sqrt{3}} \right) - \frac{m+1}{2} \frac{E}{\lambda} + 1 \right]^{\frac{2}{m+1}} - \frac{\sigma_c}{m-1} \left(1 + \frac{\lambda}{E} \right) + \alpha P_a \quad (25)$$

加强支护提高支护应力, 使 $P_s \geq P_{smax}$ 时, 不会发生冲击地压。

由图 9 可见, 临界应力与内摩擦角不是单调函数关系, 存在一个极小值点 φ_m 。此点可由式 (24) 通过 $\frac{dP_{cr}}{d\varphi} = 0$ 得到。按本文数据, $\varphi_m \approx 35^\circ$ 。当 $\varphi < \varphi_m$ 时, 临界应力随内摩擦角增大而减小; 当 $\varphi > \varphi_m$ 时, 临界应力随内摩擦角增大而增大。采用二次函数进行曲线拟合, 得 $\frac{P_{cr}}{\sigma_c} = 0.0418\varphi^2 - 2.7418\varphi + 57.551$ 。当 φ 的单位取为弧度时, $\frac{P_{cr}}{\sigma_c} = 137.22\varphi^2 - 157.09\varphi + 57.551$ 。

3 结 论

(1) 煤的模量比、煤层瓦斯孔隙压力、支护应力和内摩擦角等对高瓦斯煤层冲击地压是否发生具有重要影响。其中煤的模量比、支护应力和内摩擦角影响较大。煤层瓦斯孔隙压力虽然影响较小, 但不可忽略。

(2) 高瓦斯煤层掘进巷道, 在掘进面附近由于存在开挖面空间效应, 掘进面前方尚未开挖的煤体对巷道变形起到了限制作用, 使得掘进面附近不具备发生冲击地压条件。随着掘进面向前推进, 后方一定距离范围内的巷道支护应力增大, 同时随着瓦斯解吸渗流的进行, 巷道壁处孔隙压力降低, 巷道存在冲击地压危险。如果提高支护应力, 则冲击危险性降低。

(3) 高瓦斯煤层巷道发生冲击地压的临界塑性区半径、临界应力随模量比 λ/E 的增大而快速减小, 表明煤岩越脆硬冲击倾向性越大, 越容易发生冲击地压。

(4) 临界塑性区半径、临界应力随瓦斯孔隙压力

的增大而减小, 但降低的幅度不大, 孔隙压力越大越容易发生冲击地压。

(5) 临界塑性区半径、临界应力随支护应力的增大而增大, 支护应力越大越不容易发生冲击地压, 加强支护可有效降低冲击地压的发生。

(6) 临界塑性区半径随内摩擦角的增大而增大, 内摩擦角越大越不容易发生冲击地压。临界应力与内摩擦角不是单调函数关系, 存在一个极小值点。当内摩擦角小于此极小值时, 临界应力随内摩擦角增大而减小; 当内摩擦角大于此极小值时, 临界应力随内摩擦角增大而增大。

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. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(11): 1844-1851(Pan Yishan, Li Zhonghua, Zhang Mengtao. Distribution, type, mechanism and prevention of rockburst in China. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(11): 1844-1851 (in Chinese))
- 2 郭德勇, 韩德馨. 煤与瓦斯突出黏滑机理研究. 煤炭学报, 2003, 28(6): 598-602(Guo Deyong, Han Dexin. The stick-slip mechanism of coal and gas outburst. *Journal of China Coal Society*, 2003, 28(6): 598-602 (in Chinese))
- 3 李新元. “围岩-煤体”系统失稳破坏及冲击地压预测的探讨. 中国矿业大学学报, 2000, 29(6): 633-636(Li Xinyuan. Discussion on instability and damage of surrounding rock-coal mass system and prediction of rockburst. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2000, 29(6): 633-636 (in Chinese))
- 4 窦林名, 何学秋. 煤矿冲击矿压的分级预测研究. 中国矿业大学学报. 2007, 36(6): 717-722(Dou Linming, He Xueqiu. Technique of classification forecasting rock burst in coal mines. *Journal of China University of Mining & Technology*. 2007, 36(6): 717-722 (in Chinese))
- 5 潘一山, 李忠华, 唐鑫. 阜新矿区深部高瓦斯矿井冲击地压研究. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(s1): 5202-5205 (Pan Yishan, Li Zhonghua, Tang Xin. Research on rockburst for highly gassy deep mine in Fuxin Coal mining area. *Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(s1): 5202-5205 (in Chinese))
- 6 李忠华. 高瓦斯煤层冲击地压发生理论研究及应用. [博士论文]. 阜新: 辽宁工程技术大学力学与工程学院, 2007(Li Zhonghua. Study on theory and application of high gassy seam rockburst. [PhD Thesis]. Fuxin: Liaoning Technical University Liaoning Technical University, 2007 (in Chinese))
- 7 潘一山. 煤与瓦斯突出、冲击地压复合动力灾害一体化研究. 煤炭学报, 2016, 41(1): 105-112 (Pan Yishan. Integrated study on compound dynamic disaster of coal-gas outburst and rockburst. *Journal of China Coal Society*, 2011, 41(1): 105-112 (in Chinese))
- 8 Pan YS, Li ZH. Analysis of rock structure stability in coal mines. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2010, 29(10): 1045-1063
- 9 李铁, 蔡美峰, 王金安等. 深部开采冲击地压与瓦斯的相关性探

- 讨. 煤炭学报, 2005, 30(5): 562-567 (Li Tie, Cai Meifeng, Wang Jin'an, et al. Discussion on relativity between rockburst and gas in deep exploitation. *Journal of China Coal Society*, 2005, 30(5): 562-567 (in Chinese))
- 10 李铁, 梅婷婷, 李国旗等. “三软”煤层冲击地压诱导煤与瓦斯突出力学机制研究. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(6): 1283-1288 (Li Tie, Mei Tingting, Li Guoqi, et al. Mechanism study of coal and gas outburst induced by rockburst in “three-soft” coal seam. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, 30(6): 1283-1288 (in Chinese))
 - 11 王振, 尹光志, 胡千庭等. 高瓦斯煤层冲击地压与突出的诱发转化条件研究. 采矿与安全工程学报, 2010, 27(4): 572-575 (Wang Zhen, Yin Guangzhi, Hu Qianting, et al. Inducing and transforming conditions from rockburst to coal gas outburst in a high gassy coal seam. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2010, 27(4): 572-575 (in Chinese))
 - 12 马海峰. 高瓦斯煤层采动应力对采场瓦斯压力的影响研究. [硕士论文]. 淮南: 安徽理工大学能源安全学院, 2011 (Ma Haifeng. The research on the effect of mining stress on gas pressure in stop in high gassy seam. [Master Thesis]. Huainan: School of Energy and Safety Anhui University of Science and Technology, 2011 (in Chinese))
 - 13 董飞亚. 深部高瓦斯煤层冲击地压预测防治技术研究. [硕士论文]. 焦作: 河南理工大学能源科学与工程学院, 2012 (Dong Feiya. Research on rockburst prediction and prevention and control technology in deep coal seam with high gas. [Master Thesis]. Jiaozuo: Energy Science and Engineering Henan Polytechnic University, 2012 (in Chinese))
 - 14 王磊. 应力场和瓦斯场采动耦合效应研究. [博士论文]. 淮南: 安徽理工大学能源与安全学院, 2010 (Wang Lei. Research of caving coupling effects of stress field and gas field. [PhD Thesis]. Huainan: School of Energy and Safety Anhui University of Science and Technology, 2010 (in Chinese))
 - 15 徐晨阳. 高瓦斯煤层冲击地压特征机理研究现状. 山西大同大学学报 (自然科学版), 2014, 30(1): 69-72 (Xu Chenyang. The mechanism of rock bursts characteristics of gas coal seam. *Journal of Shanxi Datong University (JCR Science Edition)*, 2014, 30(1): 69-72 (in Chinese))
 - 16 王涛, 王翌华, 刘华博等. 冲击地压后瓦斯异常涌出条件及致灾原因分析. 煤炭学报, 2014, 39(2): 371-376 (Wang Tao, Wang Zhao-hua, Liu Huabo, et al. Discussion about the mechanism of gas disaster induced by coal bump. *Journal of China Coal Society*, 2014, 39(2): 371-376 (in Chinese))
 - 17 梁冰, 章梦涛, 潘一山. 煤和瓦斯突出的固流耦合失稳理论. 煤炭学报, 1995, 20(5): 492-496 (Liang Bing, Zhang Mengtao, Pan Yishan. et al. Theory of instability of flow fixation coupling for coal and gas outburst. *Journal of China Coal Society*, 1995, 20(5): 492-496 (in Chinese))
 - 18 梁冰, 王泳嘉, 章梦涛. 含瓦斯煤的内时本构关系及其参数的实验研究. 固体力学学报, 1996, 17(3): 229-234 (Liang Bing, Wang Yongjia, Zhang Mengtao. The study of endochronic constitutive equations of coal effected by gas and the determining of parameters by experiment. *Chinese Journal of Solid Mechanics*, 1996, 17(3): 229-234 (in Chinese))
 - 19 俞善炳. 煤与瓦斯突出的一维流动模型和启动判据. 力学学报, 1992, 24(4): 418-431 (Yu Shanbing. One-dimensional flow model for coal-gas out bursts and initiation criterion. *Acta Mechanica Sinica*, 1992, 24(4): 418-431 (in Chinese))
 - 20 俞善炳. 恒稳推进的煤与瓦斯突出. 力学学报, 1988, 20(2): 97-106 (Yu Shanbing. Steady advance of coal and gas bursts. *Acta Mechanica Sinica*, 1988, 20(2): 97-106 (in Chinese))
 - 21 赵阳升. 瓦斯压力在突出中作用的数值模拟研究. 岩石力学与工程学报, 1993, 12(4): 328-337 (Zhao Yangsheng. The numerical simulation on effect of methane pressure to outburst. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1993, 12(4): 328-337 (in Chinese))
 - 22 蓝航, 齐庆新, 潘俊锋等. 我国煤矿冲击地压特点及防治技术分析. 煤炭科学技术, 2011, 39(1): 11-36 (Lan Hang, Qi Qingxin, Pan Junfeng, et al. Analysis on features as well as prevention and control technology of mine strata pressure bumping in China. *Coal Science and Technology*, 2011, 39(1): 11-36 (in Chinese))
 - 23 崔乃鑫, 李忠华, 潘一山. 考虑瓦斯影响的煤层冲击地压钻屑量指标研究. 辽宁工程技术大学学报, 2006, 25(2): 192-193 (Cui Naixin, Li Zhonghua, Pan Yishan. Study on index of drilling bits for coalbed rockburst influenced by gas. *Journal of Liaoning Technical University*, 2006, 25(2): 192-193 (in Chinese))
 - 24 彭苏萍, 高云峰, 杨瑞召等. AVO 探测煤层瓦斯富集的理论探讨和初步实践 —— 以淮南煤田为例. 地球物理学报, 2005, 48(6): 1475-1486 (Peng Suping, Gao Yunfeng, Yang Ruizhao, et al. Theory and application of AVO for detection of coalbed methane——A case from the Huainan coalfield. *Chinese Journal of Geophysics*, 2005, 48(6): 1475-1486 (in Chinese))
 - 25 梁盛开, 罗杨阳, 曹琼. 煤矿瓦斯突出的多因素综合预测. 固体力学学报, 2010, 31(S1): 177-179 (Liang Shengkai, Luo Yangyang, Cao Qiong. Prediction of coal mine's coal and gas outburst based on multi-factors probability. *Chinese Journal of Solid Mechanics*, 2010, 31(S1): 177-179 (in Chinese))
 - 26 宋真龙, 韩佩博, 李文璞等. 瓦斯对冲击性煤样能量耗散的影响. 煤炭学报, 2015, 40(4): 843-849 (Song Zhenlong, Han Peibo, Li Wenpu, et al. Impact of energy dissipation of coal samples with rockburst tendency from gas in its failure process. *Journal of China Coal Society*, 2015, 40(4): 843-849 (in Chinese))
 - 27 刘保县, 鲜学福, 姜德义. 煤与瓦斯延期突出机理及其预测预报的研究. 岩石力学与工程学报, 2001, 21(5): 647-650 (Liu Bao-xian, Xian Xuefu, Jiang Deyi. Research on the mechanism and prediction of delay outburst of coal and gas. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2001, 21(5): 647-650 (in Chinese))
 - 28 张志刚, 程波. 含瓦斯煤体非线性渗流模型. 中国矿业大学学报, 2015, 44(3): 453-459 (Zhang Zhigang, Cheng Bo. Study of a non-linear seepage model of coal containing gas. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2015, 44(3): 453-459 (in Chinese))
 - 29 郭为, 胡志明, 左罗等. 页岩基质解吸-扩散-渗流耦合实验及数学模型. 力学学报, 2015, 47(6): 916-922 (Guo Wei, Hu Zhiming, Zuo Luo, et al. Gas desorption-diffusion-seepage coupled experiment of shale matrix and mathematic model. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2015, 47(6): 916-922 (in Chinese))

- nese))
- 30 刘文超, 姚军, 陈掌星等. 低渗透多孔介质渗流动边界模型的解析与数值解. 力学学报, 2015, 47(6): 605-612 (Liu Wenchao, Yao Jun, Chen Zhangxin, et al. Research on analytical and numerical solutions of a moving boundary model of seepage flow in low-permeable porous media. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2015, 47(6): 605-612 (in Chinese))
- 31 潘一山. 冲击地压发生和破坏过程研究. [博士学位]. 北京: 清华大学, 1999 (Pan Yishan. Study on rockburst Initiation and failure propagation. [PhD Thesis]. Beijing: Tsinghua University, 1999 (in Chinese))
- 32 蔡光华, 陆海军, 陈宝银等. 矩形和直墙拱形断面围岩巷道破坏的数值模拟研究. 武汉工业学院学报, 2011, 30(1): 74-78 (Cai Guanghua, Lu Haijun, Chen Baoyin, et al. Research on numerical simulation of surrounding rock laneway failure under rectangular and straight wall arch. *Journal of Wuhan Polytechnic University*, 2011, 30(1): 74-78 (in Chinese))
- 33 侯公羽. 基于开挖面空间效应的围岩-支护相互作用机制. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(1): 2871-2877 (Hou Gongyu. Interaction mechanism between surrounding rock and support based on spatial effect of excavation face. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, 30(1): 2871-2877 (in Chinese))