

DOI: 10.11779/CJGE201510003

高地应力特厚煤层“蠕变型”冲击机理研究

姜福兴^{1,2}, 冯宇^{1,2}, KOUAME K J A^{1,2}, 王建超^{1,2}

(1. 北京科技大学金属矿山高效开采与安全教育部重点实验室, 北京 100083; 2. 北京科技大学土木与环境工程学院, 北京 100083)

摘要: 多起“蠕变型”冲击事故分析表明: 该类冲击属于典型的隐蔽性灾害, 具有自发性和时滞性的特点, 发生机理的不明导致其防治极具挑战, 给深部特厚煤层的安全开采造成了严重威胁。“蠕变型”冲击与不稳定蠕变密切相关, 通过建立蠕变模型和三维蠕变方程, 得到高地应力与特厚煤层为不稳定蠕变的形成提供了有利的孕育条件; 分析了巷道围岩不稳定蠕变破坏的过程, 认为不稳定蠕变通过强度“腐蚀”和应力解除 2 方面实现启动冲击和减小阻抗, 从而在受外部静态应力叠加影响的巷道薄弱区域形成“蠕变型”冲击, 并提出了判别其发生可能性的评估公式。针对这类冲击的发生机理, 提出了针对性的防治措施建议: 合理布置巷道、加强主动支护、优化卸压参数和长期监测。

关键词: 高地应力; 特厚煤层; 不稳定蠕变; 冲击地压; 自发性; 时滞性; 隐蔽性灾害

中图分类号: TD324

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2015)10-1762-07

作者简介: 姜福兴(1962-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事矿山压力与岩层控制、微震监测工程方面的教学与研究工作。E-mail: jiangfuxing1@163.com。

Mechanism of creep-induced rock burst in extra-thick coal seam under high ground stress

JIANG Fu-xing^{1,2}, FENG Yu^{1,2}, KOUAME K J A^{1,2}, WANG Jian-chao^{1,2}

(1. State Key Laboratory of High-Efficient Mining and Safety of Metal Mines, Ministry of Education, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. School of Civil and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: A number of creep-induced rock bursts suggest that this type of rock burst belongs to hidden disasters featuring spontaneity and time delay. Lacking knowledge of its mechanism leads to challenging rock burst prevention and control, posing a severe threat to deep mining safety of extra-thick coal seam. Creep-induced rock burst is closely related to unstable creep. By establishing a creep model and a three-dimensional creep equation, it is found that high ground stress and extra-thick coal seam provide favorable conditions for its formation. The breaking process of roadway surrounding rock due to unstable creep is studied, and it is found that unstable creep activates rock burst and reduces resistance through strength corrosion and stress relief, thus inducing rock burst in weak areas of roadway by the impact of external static stress. An estimation formula for assessing possibility of creep-induced rock bursts is proposed. Based on the mechanism of creep-induced rock bursts, some specific measures of prevention and control are put forward: optimization of roadway layout, strengthening of active support, optimization of pressure relief parameters and long-term stress monitoring.

Key words: high ground stress; extra-thick coal seam; unstable creep; rock burst; spontaneity; time delay; hidden disaster

0 引言

近年来,随着煤矿开采深度的不断增加,冲击地压事故越来越频繁^[1-6],深部一些新的冲击现象不断出现,“蠕变型”冲击便是其中之一。笔者通过对多起“蠕变型”冲击事故的调查研究发现,这类冲击均发生在高地应力特厚煤层中,冲击区域往往为巷道的薄弱区域,即受地质构造、相变带、邻近巷道群、采空区等外部静态应力影响的巷道区域,且具有如下特点:①自发性:在无外力扰动的情況下发生,如采掘活动、

顶板运动、矿震等;②时滞性:在成型巷道已稳定并进行二次支护较长一段时间之后突然发生。可见,“蠕变型”冲击属于典型的隐蔽性灾害,其自发性和时滞性的特点是其区别于常规冲击地压的重要特征,给深部特厚煤层的安全开采造成了严重威胁。

基金项目:国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目(2010CB226803);国家自然科学基金项目(51274022, 51174016)

收稿日期:2014-11-15

*通讯作者

目前, 国内外众多学者在冲击地压机理方面做了大量的研究, 例如 Cook 等^[7]、Wawersik 等^[8]将煤体视为一个受载体, 认为当受载体的刚度大于加载体的刚度时才能发生冲击; 齐庆新等^[9]认为冲击地压的发生过程实质上是煤岩体受力时瞬间滑动失稳过程, 并据此提出了“三因素”理论; 李玉生等^[10-11]提出了“三准则”理论, 认为只有同时满足强度准则、能量准则和冲击倾向性准则时冲击地压才会发生; 章梦涛等^[12]提出了失稳理论, 认为冲击地压是煤岩体高应力区局部位置动力失稳破坏的结果; 潘一山等^[13]认为冲击地压的发生是煤岩体结构失稳后释放其弹性能的结果; 窦林名等^[14]建立了煤岩体冲击破坏的突变模型, 分析了煤岩体材料在应力作用下的脆性破坏特征及时间效应, 较好解释了冲击地压的发生机理; 姜福兴等^[15]提出了复合厚煤层发生冲击地压的“震-冲”机理。上述研究成果对冲击地压的防治提供了有益的理论指导, 但对深部高地应力特厚煤层条件下的“蠕变型”冲击机理的研究尚未见报道。

不同于常规冲击地压的防治, “蠕变型”冲击地压的防治极具挑战, 一方面由于其自发性的特点无法从控制外部动态力源的角度进行冲击地压防治, 另一方面由于其时滞性的特点难以在巷道成型后把握有效的二次卸压时机。因此, 本文在调查研究多起“蠕变型”冲击事故的基础上, 理论分析了“蠕变型”冲击的孕育条件和发生机理, 并提出了判别其发生可能性的评估公式, 为制定针对性的防治措施提供了科学依据。

1 “蠕变型”冲击现象

1.1 山东星村煤矿“蠕变型”冲击

2013 年 8 月 5 日, 星村煤矿 3302 工作面上平巷掘进头后方的已成型巷道内发生了一次严重的冲击事故, 损坏巷长达 150 m, 事故现场照片如图 1 所示。3302 工作面为首采工作面, 周围无采动, 冲击位置距掘进头约 200 m, 已超出掘进扰动的范围, 并且已支护到位, 属于“蠕变型”冲击地压, 冲击位置如图 2 所示。

现场资料显示: 冲击位置埋深达 1260 m, 煤层厚度约 9 m, 处于煤层倾角突变带和三维地震勘探异常带, 属于巷道围岩的薄弱区域。



图 1 星村煤矿“蠕变型”冲击现场

Fig. 1 Site photos of creep-induced rock burst in Xingcun Coal Mine

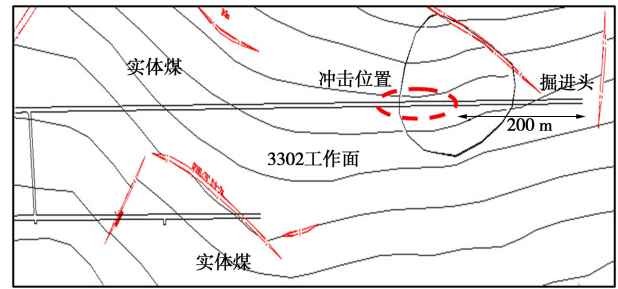


图 2 星村煤矿“蠕变型”冲击位置

Fig. 2 Creep-induced rock burst location in Xingcun Coal Mine

1.2 河南耿村煤矿“蠕变型”冲击

2014 年 4 月 15 日, 耿村煤矿 13 采区西翼的 13180 工作面下平巷发生了一次冲击事故, 如图 3 所示。工作面下平巷从巷口向里 8 m 开始, 共 36 m 范围内的巷道出现严重底臃, 底臃量最大为 1.1 m, 现场 10 架皮带架向下帮倾斜, 两处道夹板打断, 一堆木垛被震倒, 东区二号瓦斯抽放泵站两道风门上部折断, 里道毁坏严重, 微震事件能量达 7 次方。冲击位置距本工作面回采位置约 650 m, 超出了回采扰动的范围, 且其东翼的 13120 工作面已停采两个月, 附近无其他外力扰动, 属于“蠕变型”冲击地压。

现场资料显示: 冲击位置埋深约 650 m, 煤层厚度达 22 m, 为工作面下平巷与下山巷道群的交叉位置, 属于巷道的薄弱区域。



图 3 耿村煤矿“蠕变型”冲击位置

Fig. 3 Creep-induced rock burst location in Gengcun Coal Mine

1.3 “蠕变型”冲击现象分析

通过对上述冲击事故的分析发现, “蠕变型”冲击均发生在高地应力特厚煤层中的巷道薄弱区域, 如相变带、地质构造带、巷道群影响带等, 且具有如下特点: ①自发性: 在无外力扰动的情况下发生; ②时滞性: 在成型巷道已稳定并进行二次支护较长一段时间之后突然发生。下面将结合这些特点对“蠕变型”冲击的发生机理进行探讨。

2 不稳定蠕变的孕育条件

由岩石流变力学^[16-17]可知, 当原岩应力较小时, 巷道围岩产生稳定蠕变, 其变形最终趋于一个稳定的极限值, 完整围岩并不产生塑性破坏; 当原岩应力超过某一临界应力时 (通常为围岩的屈服极限), 巷道围

岩将产生不稳定蠕变，其变形无限增长直至围岩完全破坏。可见，“蠕变型”冲击与不稳定蠕变导致的围岩破坏密切相关，针对所研究问题的蠕变类型，本文采用广泛适用于表征煤岩体蠕变特征的西原正夫模型对不稳定蠕变的孕育条件(地应力和煤层厚度)进行分析。

2.1 地应力与不稳定蠕变的关系

常规蠕变特性研究大都在单轴条件下进行，得到的蠕变方程和规律并不适用于复杂应力条件下的深部围岩。为了表征围岩在三向应力状态下的蠕变特性，引入塑性力学中的等效应力 σ_i 和等效应变 ε_i 。图4为西原正夫模型，在此基础上得到的三维蠕变方程可表示为

$$\varepsilon_i = J_{(t)} \sigma_i = \left[\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \left(1 - e^{-\frac{E_2}{\eta_1} t} \right) + \frac{1 - \sigma_s / \sigma_i}{\eta_2} t \right] \sigma_i \quad (1)$$

式中， σ_s 为巷道围岩的单轴屈服极限， $J_{(t)}$ 为围岩的蠕变柔量， E_1 ， E_2 ， η_1 和 η_2 均为巷道围岩的蠕变参数，可通过蠕变试验测得。

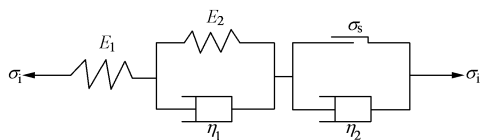


图4 西原正夫模型

Fig. 4 Nishibara rheological model

由式(1)可知围岩的不稳定蠕变速率为

$$v = \frac{d\varepsilon_i}{dt} = \frac{e^{-\frac{E_2}{\eta_1} t}}{\eta_1} \sigma_i - \frac{\sigma_s}{\eta_2} \quad (2)$$

由式(2)可知，只有当围岩的等效应力 σ_i 大于围岩的单轴屈服极限 σ_s 时，不稳定蠕变才能启动，并且随着等效应力 σ_i 的增大，不稳定蠕变速率随之增大，围岩破坏加快。等效应力 σ_i 表示将围岩真实的三向应力等效成单向应力，其值与地应力成正相关。可见，高地应力是巷道围岩产生不稳定蠕变的必要条件，且地应力的升高能够加快围岩蠕变破坏的速率。

2.2 煤层厚度与不稳定蠕变的关系

主动支护能够增加支护范围内巷道围岩的整体强度和屈服极限，由式(2)可知，随着屈服极限 σ_s 的增大，不稳定蠕变的变形速率降低，从而在一定程度上抑制不稳定蠕变的进程。在特厚煤层中，由于巷道空间距顶底板的坚硬岩层较远，常规的主动支护手段难以达到良好的支护效果，因此不稳定蠕变的变形速率在特厚煤层中较薄煤层更大，围岩更容易破坏。

开挖相同尺寸的巷道在厚煤层中形成的塑性区范围较薄煤层更大，主要因为在薄煤层中随着巷道的逐渐成型，塑性区逐层向外扩展，当受到相对坚硬的顶底板切割时，塑性区在垂直方向上停止扩展，因而不能形成完整的塑性区，如图5所示。塑性区煤岩体

强度较低，容易失稳，是形成巷道冲击的主要介质，因此在特厚煤层中巷道围岩的稳定性较差，塑性区煤体更易在不稳定蠕变的影响下形成冲击。可见，特厚煤层为不稳定蠕变的形成提供了有利的孕育环境。

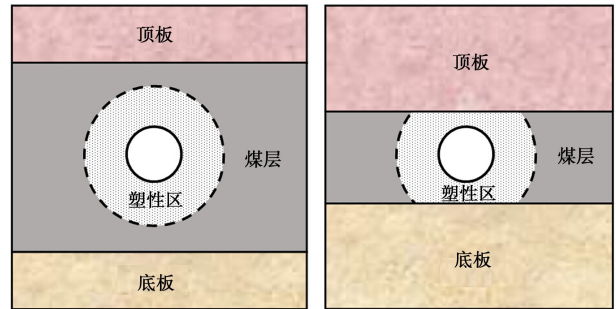


图5 煤层厚度对塑性区的影响

Fig. 5 Influence of coal seam thickness on plastic zone

3 “蠕变型”冲击发生机理

巷道发生冲击地压的一般过程为：处于应力峰值区（极限平衡位置）的煤岩体在外力的扰动下发生动力失稳，然后克服塑性区煤岩体的阻抗作用（塑性阻抗），转化为塑性区煤岩体的动能向巷道空间传播，从而进入冲击地压的显现阶段，即冲击地压的形成需同时满足启动冲击和克服阻抗两个条件。

3.1 不稳定蠕变对塑性阻抗的影响

为研究某一点围岩强度与蠕变变形的关系，引入围岩蠕变的等效弹模 $E_{(t)}$ ，根据式(1)和弹性模量的定义可得

$$E_{(t)} = \frac{1}{J_{(t)}} = \frac{1}{\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \left(1 - e^{-\frac{E_2}{\eta_1} t} \right) + \frac{1 - \sigma_s / \sigma_i}{\eta_2} t} \quad (3)$$

等效弹模 $E_{(t)}$ 可看作是巷道围岩在蠕变过程中 t 时刻的实际弹性模量。由式(3)可知，等效弹模 $E_{(t)}$ 与蠕变时间 t 有关，其值随着蠕变过程的进行而不断变化。可见，围岩蠕变存在着参数的损伤效应，因此引入损伤变量 D ，定义为

$$D = 1 - \frac{E_{(t)}}{E_{(0)}} \quad (4)$$

$E_{(0)}$ 为完整岩体的弹性模量，即初始弹性模量。根据式(4)，令 $t=0$ ，可得 $E_{(0)}=E_1$ 。

基于上述分析，围岩的实际强度 $[\sigma]$ 可表示为

$$[\sigma] = (1 - D)[\sigma_c] \quad (5)$$

式中， $[\sigma_c]$ 为巷道围岩的单轴抗压强度。

将式(3)和式(4)代入式(5)可得

$$[\sigma] = \frac{[\sigma_c]}{1 + \frac{E_1}{E_2} \left(1 - e^{-\frac{E_2}{\eta_1} t} \right) + \frac{1 - \sigma_s / \sigma_i}{\eta_2} E_1 t} \quad (6)$$

由式(6)可知，随着蠕变过程的进行，巷道围岩

某一点的实际强度呈现历时降低的趋势, 直至围岩完全破坏, 降至残余强度。可见, 不稳定蠕变一旦启动, 能够不断“腐蚀”围岩的强度直至完全破坏。

弹性区围岩远离巷道空间, 处于三向应力状态, 其屈服极限应为三轴屈服极限 σ_{3s} , 而不是单轴屈服极限 σ_s , 这也是在许多文献中研究巷道围岩蠕变特性时未考虑的因素。由于三轴屈服极限 σ_{3s} 远远大于单轴屈服极限 σ_s , 在千米深井的条件下, 围岩的等效应力 σ_i 还不足以使处于三向应力状态下的弹性区围岩产生不稳定蠕变, 而塑性区围岩靠近巷道空间, 处于低围压状态, 并已产生部分塑性破坏, 可看作近似单向应力状态。因此, 不稳定蠕变总是从塑性区围岩开始, 如图 6 所示。可见, 不稳定蠕变能够不断“腐蚀”塑性区煤岩体的强度, 从而减小塑性阻抗。

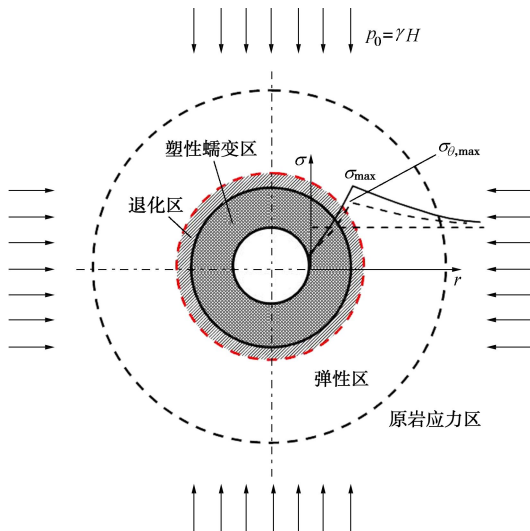


图 6 巷道围岩蠕变破坏示意图

Fig. 6 Schematic of creep rupture of roadway surrounding rock

3.2 不稳定蠕变对启动冲击的影响

当整个塑性区煤体蠕变至完全破坏后, 煤体内产生大量贯通裂缝, 承载力下降至残余强度, 相当于开挖卸荷, 形成伪自由面, 从而导致靠近极限平衡位置(弹塑性区交界处)一定范围内的弹性区煤体从三向应力状态退化到单向应力状态。为方便描述, 将三向应力被解除的弹性区称为“退化区”, 如图 6 所示。在“退化区”煤体应力解除的过程中, 伴随着其弹性能从三向状态向单向状态的流动, 煤体的强度也由三向抗压强度 $[\sigma_{3c}]$ 退化至单向抗压强度 $[\sigma_c]$ 。一般情况下, 三向抗压强度为单向抗压强度的 3~5 倍, 可见“退化区”煤体的强度大幅降低。极限平衡位置的峰值应力 σ_{max} 由原始二次应力场的切向应力峰值 $\sigma_{\theta,max}$ 和外部静态应力 σ_j 构成, σ_j 反映巷道薄弱区域受地质构造、相变带、邻近巷道群、采空区等引起的外部静态应力的叠加影响, 是“蠕变型”冲击高发的区域。

由上述分析可知, 不稳定蠕变导致“退化区”煤体的强度由三向抗压强度退化至单向抗压强度, 煤体

强度的突变导致巷道薄弱区域的应力强度比满足动力失稳的应力强度比临界值 I_0 。

$$\frac{\sigma_{\theta,max} + \sigma_j}{[\sigma_c]} > I_0 \quad (7)$$

可见, 不稳定蠕变通过解除“退化区”煤体的三向应力状态, 使其强度大幅降低, 在峰值应力 σ_{max} 作用下发生动力失稳, 冲击得以启动, 原极限平衡位置被打破, 峰值应力向巷道深部转移, 进入应力重分布阶段。

3.3 “蠕变型”冲击机理分析

通过上述分析可知, “蠕变型”冲击地压的发生机理可归结为 2 方面: ①强度“腐蚀”, 不稳定蠕变不断“腐蚀”塑性区围岩的强度直至残余强度, 导致其对“退化区”煤体动力失稳后的阻抗作用大大减小; ②应力解除, 当塑性区煤体蠕变至完全破坏时, 形成伪自由面, “退化区”的三向应力状态随之解除, 煤体强度从三向抗压强度退化至单向抗压强度, 在巷道薄弱区域的峰值应力作用下发生动力失稳。因此, 不稳定蠕变使得启动冲击和克服阻抗 2 个条件同时满足, 从而在巷道的薄弱区域形成“蠕变型”冲击。

从能量角度解释, 则是“退化区”的高应力和伪自由面的应力释放所形成的应力梯度导致“退化区”煤体的弹性能沿着巷道空间弱面定向释放, 当释放能量大于“退化区”煤体破坏所消耗的能量时, 发生动力失稳, 围岩应力峰值向围岩深部转移, 进入重分布阶段, 当动力失稳后的剩余能量能够继续克服塑性阻抗时, 则进入冲击地压显现阶段。

3.4 “蠕变型”冲击特点解释

(1) 时滞性

巷道成型后, 塑性区围岩开始产生不稳定蠕变破坏至满足冲击条件所需的时间是一个较大的跨度, 短则数月, 长则数年。由式 (2) 分析可知, 蠕变速率与地应力大小呈正相关, 地应力越大, “蠕变型”冲击的时滞性效应越小。

(2) 自发性

当“退化区”煤体的三向应力状态被解除时, 一旦巷道薄弱区域的峰值应力能够使煤体发生动力失稳并克服塑性阻抗, 就能在没有外力扰动的情况下形成冲击。

(3) 冲击范围

在千米深井条件下, 仅在原始二次应力场的峰值应力 $\sigma_{\theta,max}$ 作用下不足以使“退化区”煤体发生动力失稳并克服塑性阻抗, 因此“蠕变型”冲击往往发生在受外部静态应力影响的薄弱区域。巷道发生“蠕变型”冲击的范围取决于其薄弱区域的分布范围, 这也解释了“蠕变型”冲击范围从几十米到上千米不等的现象。

4 “蠕变型”冲击的力学判据

4.1 地应力与“蠕变型”冲击的关系

由 2.1 节分析可知，只有当围岩的等效应力 σ_i 大于围岩的单轴屈服极限 σ_s 时，不稳定蠕变才能启动，而等效应力与地应力呈正相关，可见不稳定蠕变的产生存在某一临界深度 H_0 ，可作为判断巷道是否具有“蠕变型”冲击危险性的基本指标之一。

为简化所研究问题的分析过程，作如下假设：①深埋圆形平巷、无限长；②巷道围岩为连续、均质、各向同性的理想弹塑性体；③忽略巷道影响范围内的围岩自重，则水平应力可简化为均布力；④巷道围岩为不可压缩材料；⑤由于所研究对象属于大埋深条件，且为简化最终推导得到的判别公式，因此可取侧压力系数 $\lambda=1$ 。基于上述假设，深部巷道可简化成载荷与结构都是轴对称的平面应变圆孔，建立巷道围岩的弹塑性分析力学模型，如图 7 所示。

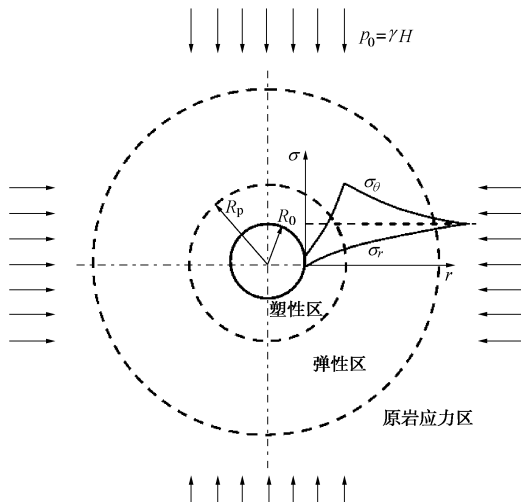


图 7 巷道围岩的弹塑性分析力学模型

Fig. 7 Mechanical model of elastic and plastic analysis of roadway surrounding rock

针对上述力学模型，文献[18]基于 Drucker-Prager 屈服准则和 Levy-Mises 塑性本构关系（增量理论）对上述力学模型所示的原始二次应力场分布进行了求解，得到了如下公式，具体计算过程本文不再赘述。

$$\begin{cases} \sigma_r^p = \frac{k}{3\alpha} \left(\frac{r}{R_0} \right)^{\frac{6\alpha}{1-3\alpha}} - \frac{k}{3\alpha}, \\ \sigma_\theta^p = \frac{1+3\alpha}{1-3\alpha} \frac{k}{3\alpha} \left(\frac{r}{R_0} \right)^{\frac{6\alpha}{1-3\alpha}} - \frac{k}{3\alpha}, \\ R_p = R_0 \left[\frac{(1-3\alpha)(3\alpha\gamma H + k)}{k} \right]^{\frac{6\alpha}{1-3\alpha}}, \\ \sigma_z^p = \frac{\sigma_r^p + \sigma_\theta^p}{2}. \end{cases} \quad (8)$$

式中 σ_r^p ， σ_θ^p ， σ_z^p 分别为塑性区围岩的径向应力、切向应力和轴向应力； H 为煤层埋深； γ 为煤层上覆岩层平均重度； R_0 ， R_p 和 r 分别为巷道半径、塑性区半径和围岩任一点的半径； α 和 k 为 D-P 准则中仅与围岩的内摩擦角 φ 和黏聚力 c 有关的试验常数，可表示为

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= \frac{2 \sin \varphi}{\sqrt{3}(3 - \sin \varphi)}, \\ K &= \frac{6c \cos \varphi}{\sqrt{3}(3 - \sin \varphi)}. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

对于广义平面应变问题，等效应力 σ_i 可表示为

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_\theta^p - \sigma_r^p)^2 + (\sigma_r^p - \sigma_z^p)^2 + (\sigma_z^p - \sigma_\theta^p)^2}. \quad (10)$$

将式 (8) 代入式 (10) 得

$$\sigma_i = \frac{\sqrt{3}}{2} (\sigma_\theta^p - \sigma_r^p) = \frac{\sqrt{3}k}{1-3\alpha} \left(\frac{r}{R_0} \right)^{\frac{6\alpha}{1-3\alpha}}. \quad (11)$$

由式 (11) 可知，塑性区内的等效应力 σ_i 随着围岩与巷道中心距离的增加而增大，因此在 $r = R_p$ 处 σ_i 取最大值，为

$$\sigma_{i,max} = 6\alpha \left(\gamma H + \frac{k}{3\alpha} \right). \quad (12)$$

当等效应力最大值 $\sigma_{i,max}$ 大于围岩的单轴屈服极限 σ_s 时，塑性区煤体开始产生不稳定蠕变，则其临界深度 H_0 可表示为

$$H_0 = \frac{\sigma_s - 2k}{6\alpha\gamma}. \quad (13)$$

当煤层埋深 $H \geq H_0$ 时，塑性区围岩产生不稳定蠕变，煤层开始具有“蠕变型”冲击危险性。

4.2 煤层厚度与“蠕变型”冲击的关系

由 2.2 节分析可知，随着煤层厚度的增大，塑性区逐渐扩展，当煤层厚度足够大时，巷道围岩中能够形成完整的塑性区，而塑性区围岩是主要的不稳定蠕变介质和“蠕变型”冲击介质，且主动支护在厚煤层中难以达到良好的支护效果，可见随着煤层厚度的增大，不稳定蠕变更易产生并转化为“蠕变型”冲击。因此，将巷道围岩能够形成完整塑性区时的煤层厚度 M_0 作为判断巷道是否具有“蠕变型”冲击危险性的基本指标之一。

$$M_0 = 2R_p = 2R_0 \left[\frac{(1-3\alpha)(3\alpha\gamma H + k)}{k} \right]^{\frac{6\alpha}{1-3\alpha}}. \quad (14)$$

当煤层厚度 $M \geq M_0$ 时，煤层作为“蠕变型”冲击孕育环境的作用开始显现，其冲击危险性较薄煤层大大增加。

4.3 “蠕变型”冲击发生的可能性判断

冲击地压的发生是个复杂的过程，是多种影响因

素耦合的结果, 许多学者根据各种冲击机理提出了许多判断理论, 但在实际应用中或多或少存在一定的局限性。在工程中, 通常采用最大主应力与煤体的单向抗压强度的比值 I_c 来判断煤层发生冲击地压的可能性, 对于具有冲击倾向性的煤层, 一般认为 $I_c \geq 1.5$ ^[19] 是发生冲击地压的临界点。对于“蠕变型”冲击, 还应考虑地应力和煤层厚度的影响, 建立半经验半理论的判别公式如下:

$$\left. \begin{aligned} &Wet > 2.0, \\ &I_c = \frac{\sigma_{\theta, \max} + \sigma_J}{[\sigma_c]} = \frac{(1+3\alpha)\left(\gamma H + \frac{k}{3\alpha}\right) + K\gamma H}{[\sigma_c]} \geq 1.5, \\ &H \geq \frac{\sigma_s - 2k}{6\alpha\gamma}, \\ &M \geq 2R_0 \left[\frac{(1-3\alpha)(3\alpha\gamma H + k)}{k} \right]^{\frac{6\alpha}{1-3\alpha}}, \end{aligned} \right\} (15)$$

式中, K 为巷道薄弱区域外部静态应力的集中系数, Wet 为煤体的弹性能指数。

当某一煤层条件满足式 (15) 时, 巷道薄弱区域具有“蠕变型”冲击危险性, 式 (15) 可作为现场判别“蠕变型”危险性和制定相应防治措施的依据。

5 “蠕变型”冲击的防治建议

基于“蠕变型”冲击发生机理的分析可知, 高地应力特厚煤层中的巷道薄弱区域是“蠕变型”冲击的重点防治区域, 结合其自发性和时滞性的特点提出以下技术路径。

(1) 合理布置巷道

为避免巷道围岩产生不稳定蠕变, 应尽量选择全岩巷道或者半煤岩巷道, 提高巷道围岩的整体稳定性。

(2) 加强主动支护

高地应力特厚煤层条件下, 巷道围岩塑性区分布范围大, 常规支护难以达到良好的效果, 因此应加强主动支护, 采取长锚索锚杆注浆等手段, 增加巷道围岩的支护范围, 提高围岩的整体稳定性, 降低不稳定蠕变的变形速率。

(3) 优化卸压参数

由于塑性区范围较大, 应采用大直径深孔卸压, 确保高应力区向巷道深部转移, 同时在巷道薄弱区域除了顶底板的支护卸压之外, 还应对两帮实施卸压, 确保卸压覆盖巷道的整个周边围岩。

(4) 长期监测

由于“蠕变型”冲击具有时滞性特点, 因此应在巷道薄弱区域安装应力监测系统, 对巷道围岩应力进行长期监测, 以掌握合理的二次卸压时机。

6 结 论

(1) 通过对多起“蠕变型”冲击事故的调查研究发现: 这类冲击属于典型的隐蔽性灾害, 均发生在地应力特厚煤层中的巷道薄弱区域, 具有自发性和时滞性的特点。

(2) 高地应力和特厚煤层为不稳定蠕变的形成提供了有利的孕育条件, 不稳定蠕变导致冲击主要通过强度“腐蚀”和应力解除两方面实现, 即: 不稳定蠕变不断“腐蚀”塑性区围岩的强度直至残余强度, 导致其对“退化区”煤体动力失稳后的阻抗作用大大减小; 当塑性区煤体蠕变至完全破坏时, 形成伪自由面, “退化区”的三向应力状态随之解除, 煤体强度从三向抗压强度退化至单向抗压强度, 在巷道薄弱区域的峰值应力作用下发生动力失稳。

(3) 考虑地应力、煤层厚度、应力强度比和冲击倾向性的影响, 提出了判别“蠕变型”冲击发生可能性的评估方法, 该方法可作为实际工程中判断是否需要采取特殊的“蠕变型”冲击防治措施的理论依据。

(4) 高地应力特厚煤层中的巷道薄弱区域是“蠕变型”冲击的重点防治区域, 具体技术路径为合理布置巷道、加强支护支护、优化卸压参数和长期监测。

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] 窦林名, 何学秋. 冲击矿压防治理论与技术[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2001. (DOU Lin-ming, HE Xue-qiu. Prevention theory and technology of rockburst[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2001. (in Chinese))
- [3] 苗小虎, 姜福兴, 王存文, 等. 微地震监测揭示的矿震诱发冲击地压机理研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(6): 971 - 975. (MIAO Xiao-hu, JIANG Fu-xing, WANG Cun-wen, et al. Mechanism of microseism-induced rock burst revealed by microseismic monitoring[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(6): 971 - 975. in Chinese))
- [4] 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))
- [5] 杨光宇, 姜福兴, 王存文. 大采深厚表土复杂空间结构孤岛工作面冲击地压防治技术研究[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(1): 189 - 194. (YANG Guang-yu, JIANG Fu-xing, WANG Cun-wen. Prevention and control technology of mine pressure bumping of coal mining face in seam island based on deep mining and thick topsoil of complex spatial structure of overlying strata[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(1): 189 - 194. (in Chinese))
- [6] 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[J]. 煤炭科学技术, 2011, **39**(1): 11 - 15. (LAN Hang, QI Qing-xin, PAN Jun-feng, et al. Analysis on features as well as prevention and control technology of mine strata pressure bumping in China[J]. Coal Science and Technology, 2011, **39**(1): 11 - 15. (in Chinese))
- [7] COOK N G W. The failure of rock[C]// International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts. Pergamon, 1965: 389 - 403.
- [8] WAWERSIK W R, FAIRHURST C. A study of brittle rock fracture in laboratory compression experiments[C]// International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts. Pergamon, 1970: 561 - 575.
- [9] 齐庆新, 刘天泉. 冲击地压的摩擦滑动失稳机理[J]. 矿山压力与顶板管理, 1995(3): 174 - 177. (QI Qing-xin, LIU Tian-quan. Mechanism of friction sliding instability of rock burst[J]. Ground Pressure and Strata Control, 1995(3): 174 - 177. (in Chinese))
- [10] 李玉生, 张万斌, 王淑坤. 冲击地压机理探讨[J]. 煤炭学报, 1984, **9**(3): 1 - 8. (LI Yu-sheng, ZHANG Wan-bin, WANG Shu-kun. Study on the mechanics of rockburst[J]. Journal of China Coal Society, 1984, **9**(3): 1 - 8. (in Chinese))
- [11] 李玉生. 冲击地压机理及其初步应用[J]. 中国矿业大学学报, 1985(3): 37 - 43. (LI Yu-sheng. Rockburst mechanism and its preliminary application[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 1985(3): 37 - 43. (in Chinese))
- [12] 章梦涛, 徐曾和, 潘一山, 等. 冲击地压和突出的统一失稳理论[J]. 煤炭学报, 1991, **16**(4): 48 - 53. (ZHANG Meng-tao, XU Zeng-he, PAN Yi-shan, et al. A united instability theory on coal(rock) burst and outburst[J]. Journal of China Coal Society, 1991, **16**(4): 48 - 53. (in Chinese))
- [13] 潘一山, 章梦涛. 冲击地压失稳理论的解析分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1996, **15**(1): 504 - 510. (PAN Yi-shan, ZHANG Meng-tao. Analytic solution of rockburst based on instability theory[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1996, **15**(1): 504 - 510 (in Chinese))
- [14] 窦林名, 何学秋. 煤岩混凝土冲击破坏的弹塑脆性模型[C]// 中国岩石力学与工程学会第七次学术大会论文集. 北京: 中国科学技术出版社, 2002: 158 - 160. (DOU Lin-ming, HE Xue-qiu. Elastic-plastic-brittle model of rock and concrete burst failure[C]// Symposium of 7th National Conference of Rock Mechanics and Engineering. Beijing: China Science and Technology Press, 2002: 158 - 160. (in Chinese))
- [15] 姜福兴, 王平, 冯增强, 等. 复合型厚煤层“震-冲”型动力灾害机理、预测与控制[J]. 煤炭学报, 2009, **34**(12): 1605 - 1609. (JIANG Fu-xing, WANG Ping, FENG Zeng-qiang, et al. Mechanism, prediction and control of “rock burst induced by shock bump” kind dynamic accident in composite thickness coal[J]. Journal of China Coal Society, 2009, **34**(12): 1605 - 1609. (in Chinese))
- [16] 孙钧. 岩石流变力学及其工程应用研究的若干进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, **26**(6): 1081 - 1106. (SUN Jun. Rock rheological mechanics and its advance in engineering applications[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, **26**(6): 1081 - 1106. (in Chinese))
- [17] 蔡美峰, 何满潮, 刘东燕. 岩石力学与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2002. (CAI Mei-feng, HE Man-chao, LIU Dong-yan. Rock mechanics and engineering[M]. Beijing: Science Press, 2002. (in Chinese))
- [18] 侯公羽, 牛晓松. 基于 Levy-Mises 本构关系及 D-P 屈服准则的轴对称圆巷理想弹塑性解[J]. 岩土力学, 2009, **30**(6): 1555 - 1562. (HOU Gong-yu, NIU Xiao-song. Perfect elastoplastic solution of axisymmetric circular openings in rock mass based on Levy-Mises constitutive relation and D-P yield criterion[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, **30**(6): 1555 - 1562. (in Chinese))
- [19] 姜福兴, 王存文, 叶根喜, 等. 采煤工作面冲击地压发生的可能性评价方法研究[C]// 2008 全国冲击地压研讨会论文集. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2008: 91 - 96. (JIANG Fu-xing, WANG Cun-wen, YE Gen-xi, et al. Study on possibility evaluation method of coal outburst in longwall face[C]// National Symposium of the 2008 Rock Burst Seminar. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2008: 91 - 96. (in Chinese))