

窦林名,何江,曹安业等.煤矿冲击矿压动静载叠加原理及其防治[J].煤炭学报,2015,40(7):1469-1476. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2014.1815

Dou Linming, He Jiang, Cao Anye, et al. Rock burst prevention methods based on theory of dynamic and static combined load induced in coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(7): 1469 - 1476. doi: 10. 13225 /j. cnki. jccs. 2014. 1815

煤矿冲击矿压动静载叠加原理及其防治

窦林名^{1,2,3}, 何江^{1,2,3}, 曹安业^{1,2,3}, 巩思园^{1,2,3}, 蔡武^{1,2,3}

(1. 中国矿业大学 煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 江苏 徐州 221116; 2. 中国矿业大学 矿业工程学院, 江苏 徐州 221116; 3. 中国矿业大学 深部煤炭资源开采教育部重点实验室, 江苏 徐州 221116)

摘要: 煤矿冲击矿压动力灾害日趋严重,且浅部也出现了该现象。理论研究了动载与静载叠加诱发冲击矿压的能量和应力条件,系统地提出了动静载叠加诱发冲击矿压的原理,并分析了煤矿动静载特征。根据应变率对煤矿载荷状态进行了界定,试验研究了煤岩力学特性与应变率的关系以及动静叠加作用下煤的破坏形态。结果表明:随着应变率增大,煤岩强度、弹性模量呈指数关系增大,当静载占比较大时,煤岩呈剪切破坏;当动载占比较大时,煤岩呈现劈裂甚至爆裂破坏。当动静叠加接近煤岩强度时,单轮或多轮动载作用可诱发煤岩冲击破坏;当动静叠加远小于煤岩强度时,多轮动载虽然能使煤岩产生损伤但难以诱发冲击破坏。动静叠加诱发冲击矿压表现为2种类型:①高静载型,深部开采时,围岩静载较高,矿震产生的微小动载增量可使叠加载荷超过煤岩冲击破坏临界而诱发煤岩冲击破坏;②强动载型,浅部开采时,围岩静载较小,强矿震的冲击动载较大,叠加载荷超过煤岩冲击破坏临界导致煤岩冲击破坏。基于冲击矿压的动静载叠加诱发原理,讨论了冲击矿压监测及防治思路和方法。

关键词: 冲击矿压; 动载; 静载; 动静载叠加; 监测; 防治

中图分类号: TD324 文献标志码: A 文章编号: 0253-9993(2015)07-1469-08

Rock burst prevention methods based on theory of dynamic and static combined load induced in coal mine

DOU Lin-ming^{1,2,3}, HE Jiang^{1,2,3}, CAO An-ye^{1,2,3}, GONG Si-yuan^{1,2,3}, CAI Wu^{1,2,3}

(1. State Key Laboratory of Coal Resource and Safe Mining, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. School of Mines, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 3. Key Laboratory of Deep Coal Resource Mining, Ministry of Education of China, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: Rock burst is becoming more and more serious in coal mine, and the scene of action of which is becoming much shallower. Theoretically studied rock burst energy and stress conditions under dynamic and static combined load, and the theory of dynamic and static combined load inducing rock burst was systematically put forward, and the dynamic and static load characteristics of coal mine were analyzed. According to the loading strain rate, the loading state was defined of coal mine. The experimental research on the mechanical characteristics of coal and rock samples under different strain rate and destruction shape of coal and rock under dynamic and static combined load was carried out. The results show that, with strain rate increasing, the coal and rock strength and elastic modulus exponentially increa-

收稿日期: 2015-01-07 责任编辑: 常琛

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)资助项目(2010CB226805); 国家自然科学基金资助项目(51404243); 江苏高校优势学科建设工程资助项目(SZBF2011-6-B35)

作者简介: 窦林名(1963—),男,青海平安人,教授,博士生导师。Tel: 0516-83995904, E-mail: lmdou@cumt.edu.cn。通讯作者: 何江(1984—),男,重庆合川人,讲师,博士。Tel: 0516-83885206, E-mail: hejiang76@163.com

ses and when the static load is predominant ,coal rock shows shear failure ,and when the dynamic load is predominant ,the coal rock shows splitting or even bursting damage ,and when the combined load closes to coal strength ,during the single or multi wheel dynamic loading the coal can be induced dynamic failure ,and when the combined load is far less than the coal strength ,multi wheel dynamic loading can make the coal damage but cannot induce it to dynamic failure. Combined dynamic and static load induced rock burst can be divided into two types. The first is high static loading type. When it is deep mining ,the static load is very high originally ,although the load has not yet reached the critical value of rock burst ,the micro dynamic load increment generated by mine micro seismicity can make the combined load exceeds the critical value and resulting in rock burst; The second is strong dynamic loading type. When it is shallow mining ,although the static load is small ,the strong mining earthquake caused fierce dynamic load ,and the combined load exceeds the rock burst critical value ,the rock burst can be induced. Finally ,based on the dynamic and static combined load inducing rock burst principle ,the ideas and methods of monitoring and prevention of rock burst was proposed.

Key words: rock burst; dynamic load; static load; dynamic and static combined load; monitoring; prevention

随着煤矿开采深度和开采强度的增大 ,冲击矿压动力灾害越来越频繁 ,越来越严重^[1]。据统计 ,到 2012 年底 ,我国已有 142 对矿井发生过造成多人伤亡或大量巷道破坏的冲击矿压动力灾害 ,严重威胁着煤矿的安全高效生产。

研究表明 ,冲击矿压与煤岩的物理力学性质、煤岩所受的静载荷与动载荷等有关^[2]。一般来说 ,煤岩的冲击倾向性越强 ,越容易发生冲击矿压 ,但也存在弱或无冲击倾向的煤岩发生冲击矿压动力灾害。开采深度越大 ,静载荷越高 ,越容易发生冲击矿压 ,但在浅部原岩应力较小的煤层中也有冲击矿压发生。如 2010 - 10 - 08 造成多人伤亡的宽沟煤矿冲击矿压动力灾害事故 ,采深仅为 317 m^[3]。经研究 ,浅部冲击矿压多与坚硬顶板等因素产生的动载扰动密切相关。

近年来 ,煤矿井下动载与采掘围岩静载叠加作用诱发冲击显现逐渐受到重视。奚林名、何江等^[2,4]初步探讨了动静叠加诱发冲击矿压原理并对薄煤层动静叠加诱发机制进行了研究;刘少虹、李凤鸣等^[5]试验研究了动静加载下煤的破坏特性及机制。

总的来说 ,煤矿动静叠加诱发冲击矿压研究还不深入。本文系统的提出了煤岩动静载叠加诱发冲击矿压的原理 ,针对动静载冲击力源 ,分析了监测预警和治理的对象 ,提出了监测预警的方法和针对性的治理手段。

1 动静载叠加诱发冲击矿压原理

1.1 动静载叠加诱发原理的提出

根据能量准则^[6] ,以单位体积煤岩体为研究对象(下同) ,冲击矿压是煤体 - 围岩系统在力学平衡状态被打破时 ,释放的能量大于破坏过程消耗的能量

的状态下产生的动力现象 ,可用下式表示:

$$\frac{dU}{dt} = \frac{dU_R}{dt} + \frac{dU_C}{dt} + \frac{dU_S}{dt} > \frac{dU_b}{dt} \quad (1)$$

其中 U_R 为围岩中储存的能量; U_C 为煤体中储存的能量; U_S 为矿震输入的能量; U_b 为冲击矿压发生时煤岩体消耗的能量。煤岩体中储存的能量和矿震输入的能量之和可用下式表示:

$$U = \frac{(\sigma_j + \sigma_d)^2}{2E} \quad (2)$$

其中 σ_j 为煤岩体中的静载荷; σ_d 为矿震在煤岩体中诱发的动载荷。冲击矿压发生时消耗的最小能量可用下式表示 ,其中 σ_{bmin} 为发生冲击矿压时的临界应力^[4]。

$$U_{bmin} = \frac{\sigma_{bmin}^2}{2E} \quad (3)$$

因此 ,冲击矿压的发生需要满足如下条件 ,即

$$\sigma_j + \sigma_d \geq \sigma_{bmin} \quad (4)$$

也即 ,采掘围岩静载荷与矿震诱发的动载荷叠加 ,超过了煤岩体冲击破坏的临界载荷时 ,动力破坏煤岩体 ,造成冲击矿压动力灾害显现 ,如图 1 所示。

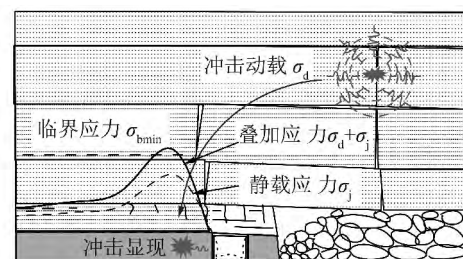


图 1 煤矿动静载叠加诱发冲击矿压原理
Fig. 1 Principle of dynamic and static combined load inducing rock burst in coal mine

1.2 煤岩冲击破坏的临界载荷

试验研究表明^[7],煤的单轴抗压强度 $R_c > 20$ MPa 时,煤体发生冲击动力破坏的临界载荷约为 50 MPa;煤的单轴抗压强度 $R_c < 16$ MPa 时,煤体发生冲击动力破坏的临界应力约为 70 MPa;当煤的单轴抗压强度 R_c 为 16~20 MPa 时,发生冲击动力破坏的临界应力约为 50~70 MPa。

煤的冲击倾向性指标中,强冲击倾向煤层的单轴抗压强度大于 14 MPa,弱冲击倾向煤层的单轴抗压强度为 7~14 MPa。

这说明煤的强度越高、冲击倾向越强,发生冲击的临界载荷越低,而弱冲击倾向性煤层发生冲击的临界载荷较高。

1.3 采掘围岩动静载分析

一般情况下,采掘围岩静载由原岩应力和支承压力组成,即

$$\sigma_j = \sigma_{j1} + \sigma_{j2} = (k + \lambda) \gamma H \quad (5)$$

式中, γ 为上覆岩层的容重; H 为上覆岩层厚度; λ 为构造应力集中系数; k 为支承压力集中系数。

矿井开采中动载来源主要为开采活动、煤岩体对开采活动的应力响应等引起的强烈应力改变,表现为矿震活动。

假设煤岩体为弹性各向同性连续介质,则矿震产生的应力波在煤岩体中引起的动载^[8-9]可表示为

$$\begin{cases} \sigma_{dp} = \rho v_p (v_{pp})_p \\ \tau_{ds} = \rho v_s (v_{pp})_s \end{cases} \quad (6)$$

式中, σ_{dp} 、 τ_{ds} 分别为 P 波、S 波产生的动载; ρ 为煤岩介质密度; v_p 、 v_s 分别为 P 波、S 波传播的速度; $(v_{pp})_p$ 、 $(v_{pp})_s$ 分别为质点由 P 波、S 波传播引起的质点峰值振动速度。

2 煤矿载荷动静态的确定

2.1 矿震动载应变率原位测试

煤岩所承载荷状态一般通过应变率 $\dot{\varepsilon}$ 来确定。根据波动理论,震动波形成的动载最大应变率可用下式确定^[10]:

$$\dot{\varepsilon}'_{\max} = \frac{2\pi f v_{pp}}{C} \quad (7)$$

其中, $\dot{\varepsilon}'_{\max}$ 为震动波形成的动载最大应变率; f 为震动波频率; v_{pp} 为介质振动峰值速度; C 为波速。由于波速相对稳定,故动载应变率主要与频率和质点峰值速度相关。也即,动载应变率与震动波频率、质点峰值速度成正比,与波速成反比。

根据井下原位测试可知,震动波质点峰值速度与

传播距离呈幂函数关系,如下式所示:

$$v_0(L) = v_{0,\max} L^{-\lambda} \quad (8)$$

以七台河桃山煤矿为例,井下震动波峰值速度衰减规律为

$$v_0(L) = v_{0,\max} L^{-1.526} \quad (9)$$

某矿一次卸压爆破诱发的冲击矿压显现,导致工作面 2 m 范围破坏,冲出煤量 2 t,震动能量 20 119 J。根据剪切、拉伸破坏两种模型煤岩体释放能量大小以及应力降与震源半径的关系,如式(10)所示^[11],应力降近似等于震源动载,由式(6)、(9)、(10)可求出震动的震源半径为 1.5 m。

$$r_1 = \sqrt[3]{\frac{2W_1 G}{\pi \Delta \tau^2}} \quad r_2 = \sqrt[3]{\frac{W_2 E}{\pi \Delta \sigma_1^2}} \quad (10)$$

式中, W_1 、 W_2 分别为剪切和拉伸破坏以震动波释放的能量; G 、 E 分别为震源介质剪切模量和弹性模量; $\Delta \tau$ 、 $\Delta \sigma_1$ 分别为剪切应力降和正应力降。

由式(9)反求距震源 1.5 m 处质点峰值速度 $v_{0,\max}$ 取值范围,可得该冲击震动的最大峰值速度取值范围为 0.52~4.38 m/s。另外,由震动波傅里叶变换可得速度峰值段频率范围为 2~15 Hz。

根据该矿爆破试验及波速最优解算,该矿井下纵波速度平均为 4 300 m/s,横波速度为 2 480 m/s。由此可得到冲击震动动载应变率范围见表 1,可见冲击震动产生的应变率最大为 $10^{-3} \sim 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ 级。

表 1 冲击震动动载应变率取值范围

Table 1 Range of rock burst induced dynamic load strain rate

震动波类型	频率/Hz	最大峰值速度/(m·s ⁻¹)	波速/(m·s ⁻¹)	应变率/s ⁻¹
纵波	2~15	0.52~4.38	4 300	$1.5 \times 10^{-3} \sim 9.6 \times 10^{-2}$
横波	2~15	0.52~4.38	2 480	$2.6 \times 10^{-3} \sim 1.7 \times 10^{-1}$

2.2 动载荷对煤岩作用的试验

对煤岩样在实验室进行单轴加载试验。试验过程中,随着应变率提高,煤岩样破坏声响增大,岩样破坏变得剧烈。煤岩样由剪切破坏逐渐转变为劈裂破坏,乃至爆裂破坏,破碎块体逐渐变得碎小。加载应变率低时,破碎块体不脱离岩样母体,应变率提高时,碎块开始脱离母体,且飞出速度逐渐增大。可见随着加载应变率提高,煤岩样破裂猛烈程度增大,冲击倾向性增强。

试验表明,煤岩强度、弹性模量与加载应变率之间成指数函数关系,加载应变率越大则强度、弹性模量越大,即随着应变率提高,应力由静载过渡到动载

的过程中,煤岩样的强度、弹性模量急剧增大,图2、3为煤岩样强度及弹性模量与应变率的关系。

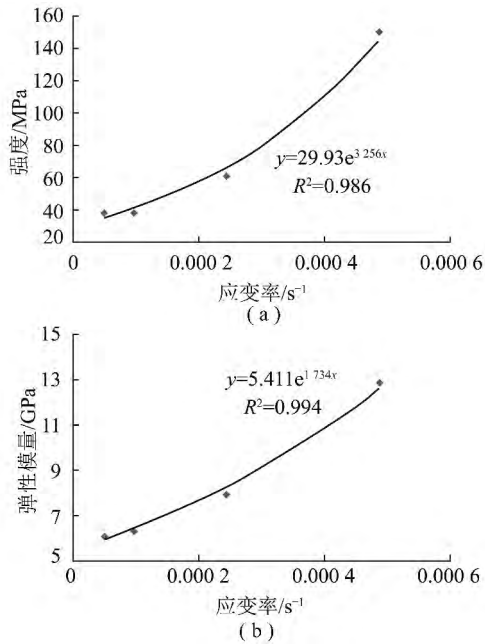


图2 顶板岩样力学参数与应变率的关系

Fig. 2 Relations between rock samples mechanical parameters and strain rate

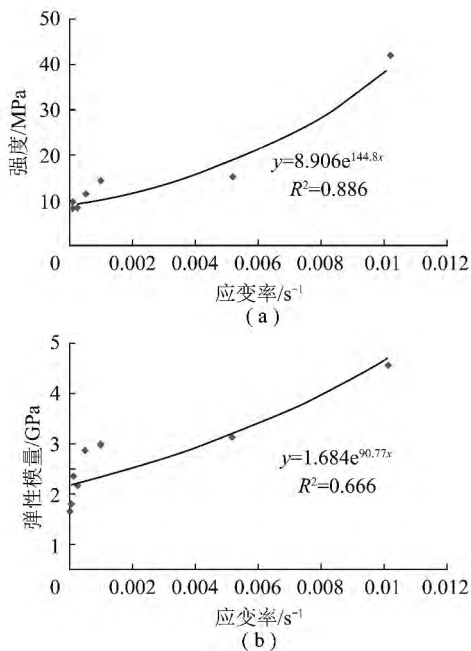


图3 煤样力学参数与应变率的关系

Fig. 3 Relations between coal samples mechanical parameters and strain rate

2.3 围岩载荷状态的确定

现场原位测试表明,矿震近震源动载应变率最大值处于 $10^{-3} \sim 10^{-1} \text{ s}^{-1}$,同时,根据动载对煤岩作用的试验结果,煤岩在应变率大于 $5.0 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 时表现出较强的应变率相关性,因此,可将应变率大于

10^{-3} s^{-1} 的载荷划分为煤矿动载。煤矿载荷状态可依据应变率按表2进行分类。

表2 煤矿载荷状态与应变率的关系
Table 2 Coal mine loading state with strain rate

应变率/ s^{-1}	载荷状态	载荷变化率/ ($\text{MPa} \cdot \text{s}^{-1}$)	应力变化规律
$< 10^{-5}$	静态	< 0.1	静载荷
$10^{-5} \sim 10^{-3}$	准动态	$0.1 \sim 10$	应力扰动
$> 10^{-3}$	动态	> 10	动载荷

对具体情况而言,矿震应力波未传播到质点处,质点所受相对稳定的载荷称为静载荷,应力波引起质点产生振动形成的附加应力,则需要根据应变率大小判断质点受到的附加载荷是静载荷、应力扰动还是动载荷。

3 动静载叠加作用的试验

静载相同,当应变率达到 10^{-3} s^{-1} 时,煤的强度显著增大,说明动静叠加作用下,应变率越大煤体可达到的强度越高,动载对煤体的能量输入越大。动载作用时,首次动载作用煤样产生的塑性应变较高,损伤最大,随着作用次数增加,单次动载作用煤的损伤减小;当煤样强度较高时,动载50次循环作用亦未引起煤样破坏,如图4(a)所示;当煤样强度较低,静载接近强度时,冲击动载引起的损伤较大,如图4(b)所示;当煤样强度较低时,首次动载作用即引起煤样破坏,如图4(c)所示。因此,当动载一定时,静载与煤体强度决定了冲击破坏是否发生。若静载较强度远远偏小,较小强度动载很难诱发煤样冲击破坏,需要更大幅度动载才能诱发破坏。静载是动静叠加诱冲的基础应力条件。

如图5所示,动静叠加作用,当静载一定时,煤样破坏过程动载占主导。应变率较低时,煤样表现为剪切破坏(煤样3-14);应变率较高时,表现为劈裂剪切破坏(煤样3-11);应变率进一步增高,煤样表现为劈裂破坏(煤样3-13)、甚至爆裂破坏(煤样3-15)。声发射空间分布与煤样破裂带基本吻合。

如图6所示,随静载增大,煤样破坏所需动载逐渐减小,静载越接近煤样强度,动静叠加时,煤样破坏所需应力越小。如煤样3-9、3-10所示,静载较小时,一定动载反复作用下,煤样虽然产生了损伤,但难于产生冲击破坏;静载较高时,较小动载即可促使煤样破坏,如煤样3-12所示。

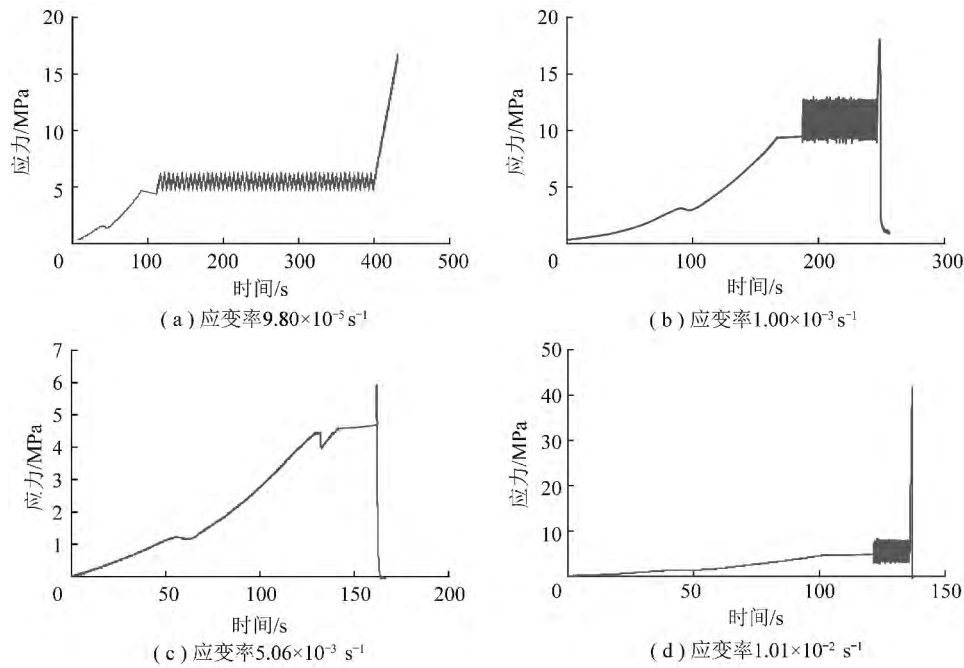


图 4 相同静载与不同动载叠加加载应力时程曲线

Fig. 4 Stress time-history curves of coal under the same static and different dynamic load

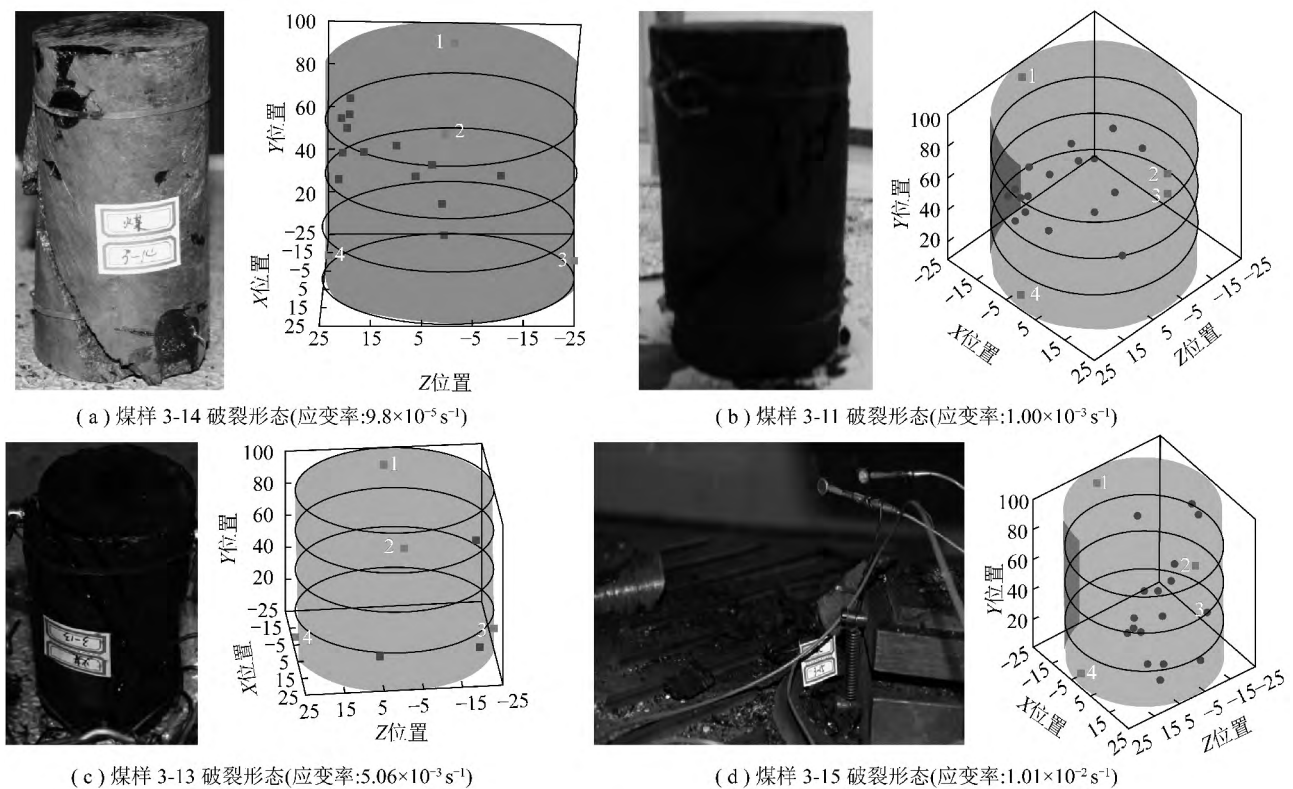


图 5 煤样破坏形态及声发射事件分布与不同应变率动静叠加的关系

Fig. 5 Fracturing mode and acoustic events distribution of coal samples under different loading rate

因此,静载是冲击矿压发生的应力基础,动载是冲击破坏的诱因。动静叠加作用下,静载较低时,需要较强动载才能使煤岩破坏,如果动静载叠加小于煤岩强度,当差值较大时,动载多轮作用虽然能使煤岩

产生部分损伤,但很难导致煤岩破坏;当差值较小时,多轮动载反复作用,随着煤岩内部损伤累积,也可导致煤岩破坏;当动静叠加载荷大于煤岩强度时,动载首次作用即可导致煤岩破坏。静载较大时,煤岩破坏

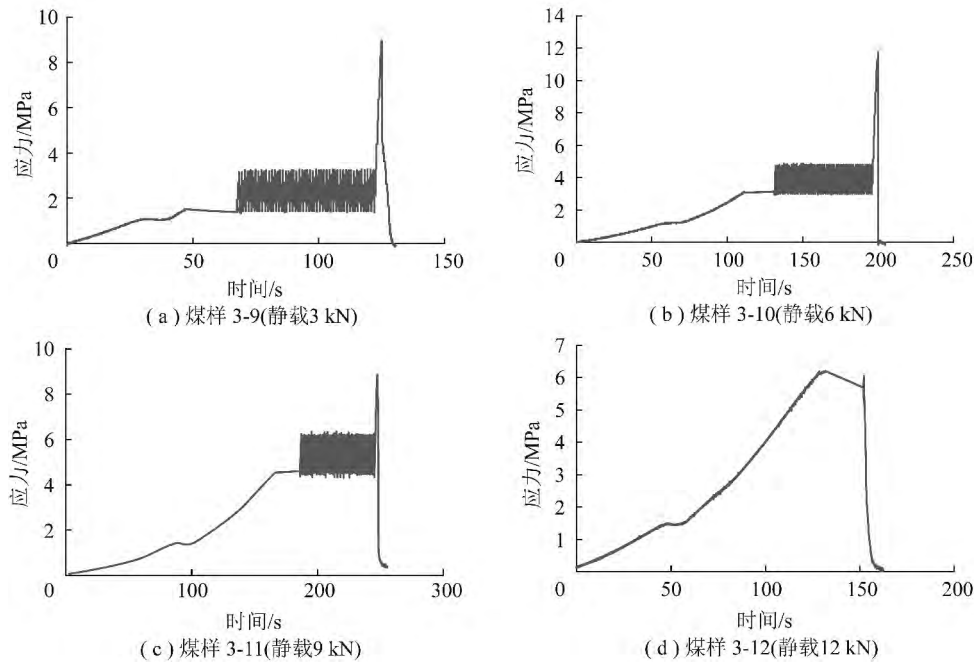


图 6 不同静载与相同动载叠加加载应力时程曲线

Fig. 6 Stress time-history curves of coal under the same dynamic and different static load

表现为静态破坏形态,动载较大时,煤岩表现为动态破坏特性。

以上研究表明,煤矿动静叠加诱发冲击矿压表现为以下 2 种类型:

(1) 高静载型。煤矿深部开采,采掘围岩原岩应力较高,采掘活动导致围岩高应力集中,此时静载虽未达到冲击破坏的临界载荷,但远场矿震产生的微小动载荷增量即可使动静载叠加载荷超过煤岩体冲击破坏的临界载荷,导致冲击破坏。此时,矿震动载荷在煤岩冲击破坏中主要起触发作用。这是目前煤矿深部开采冲击矿压孕育最为普遍的一种形式。

(2) 强动载型。煤矿浅部开采,围岩原岩应力不高,但矿震强度较大,应力波引起的动载强度高,围岩静载与动载叠加载荷达到冲击破坏的临界载荷,导致煤岩体瞬间冲击破坏。另外,研究表明^[5],在较大的加载速率下,煤岩试样的冲击倾向性比标准状态冲击倾向性更强,原本鉴定为无冲击倾向的煤岩体,在高加载速率动载作用下,也可发生冲击破坏。此时,矿震的动载扰动在冲击破坏过程中起主导作用。这给出了浅部开采及原本鉴定为无冲击倾向煤岩体发生冲击矿压的一个可能原因。

以上 2 种冲击矿压类型解释了煤矿浅部和深部开采均会发生冲击矿压的原因。深部开采由于静载荷高,而浅部发生的冲击矿压多与煤层的冲击倾向性,上覆坚硬厚层顶板的大范围破断运动产生的强烈动载紧密相关。

4 基于动静载的冲击矿压监测与防治

对于采掘围岩的静载荷,主要监测煤岩体的应力状态,可采用钻屑法、煤层应力监测法及弹性波 CT 透视法等进行监测预警。弹性波 CT 透视法的基本原理是波速与煤岩应力的正相关关系,通过煤岩波速反演,得到高波速区及波速变化剧烈区,从而推断煤岩高应力区和应力异常区,进而对冲击危险区域进行预测^[12-14]。图 7 为采用弹性波 CT 技术确定的应力分布状态。图中高波速分布区和波速梯度变化剧烈区对应于强冲击危险区^[15-17]。弹性波 CT 技术是一种预测范围广、较为准确可靠的一种新的静载荷评估和预测技术。

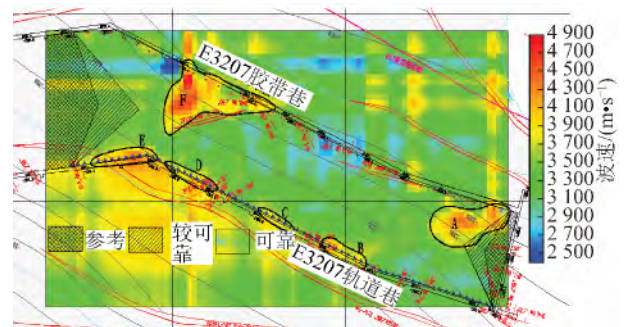


图 7 弹性波 CT 技术确定的工作面周围应力分布状态

Fig. 7 Stress distribution determined by velocity tomography around mining face

对于动载荷的监测,主要是监测煤岩体的破坏、顶板岩层的破断运动、断层的活化等。可采用监测范

围达 60 ~ 80 km²、定位误差约为 ±20 m 的矿井区域及局部区域监测的微震监测系统^[18], 监测范围达 50 ~ 100 m 的地音(声发射)监测系统^[19], 监测范围约为 20 m 的电磁辐射监测系统^[20]。

对于采掘围岩支承压力等静载荷, 将其消除是不可能的。甚至将其降低到原岩应力水平也是非常困难的。只能采取降低应力集中程度, 将应力高峰区向煤体深部转移等卸压措施。如煤体大直径钻孔卸压、煤体爆破卸压、深孔断顶、坚硬顶板的高压定向水力致裂等^[21-22]。

采动载荷的治理主要是控制和破坏煤岩体的结构, 减小煤岩体的运动程度。由于矿震的震动波在传播过程中, 其能量按照乘幂关系衰减^[2], 即

$$E = E_0 l^{-\eta} \quad (11)$$

其中 E 为传播到采掘空间周围的能量; E_0 为矿震震源释放的能量; l 为震源距采掘空间的距离; η 为震动波的衰减系数。

因此, 控制矿震动载荷就需要降低震源的震动能量, 加大震源距采掘空间的距离, 增加震动波的衰减程度等。采取的措施主要有深孔断顶、坚硬顶板高压定向水力致裂等技术。

5 结 论

(1) 采掘围岩静载荷与矿震动载荷的叠加载荷超过煤岩体冲击破坏的临界载荷时, 将诱发冲击矿压显现。煤的强度越大、冲击倾向性越强, 发生冲击破坏的临界载荷越小, 弱冲击倾向煤层发生冲击破坏的临界载荷较高。

(2) 煤矿矿震动载应变率最大为 $10^{-3} \sim 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ 级。煤岩强度、弹性模量与应变率之间成指数函数关系。随着应变率提高, 载荷由静态过渡到动态的过程中, 煤岩样的强度、弹性模量呈指数关系增大。据此可将煤矿矿震动载划分为静载荷、应力扰动、动载荷。

(3) 煤矿动静载叠加诱发冲击矿压表现为 2 种类型: ① 高静载型, 深部开采围岩原岩应力高, 矿震产生的微小动载荷即可使动静叠加载荷超过煤岩冲击破坏的临界载荷, 从而导致煤岩体冲击破坏; ② 强动载型, 浅部开采围岩原岩应力不高, 强矿震动载较强, 叠加载荷亦可超过临界载荷而导致煤岩体冲击破坏。

(4) 冲击矿压监测防治应从静载与动载 2 个方面进行。静载可采用钻屑法、应力监测法及弹性波 CT 透视法等进行监测预警, 动载可采用微震法、地音法、电磁辐射法联合监测; 静载防治主要从降低应力集中程度以及将应力峰值向煤体深部转移, 而动载则

可从控制和破坏煤岩体的结构, 减小煤岩体的运动程度等方面进行考虑。

参考文献:

- [1] 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 Yaodong, Pan Yishan, Jiang Fuxing, 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.
- [2] 何江, 窦林名, 蔡武, 等. 薄煤层动静组合诱发冲击地压的机制[J]. 煤炭学报, 2014, 39(11): 2177-2182.
He Jiang, Dou Linming, Cai Wu, et al. Mechanism of dynamic and static combined load inducing rockburst in thin coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(11): 2177-2182.
- [3] 蓝航, 杜涛涛, 彭永伟, 等. 浅埋深回采工作面冲击地压发生机理及防治[J]. 煤炭学报, 2012, 37(10): 1618-1623.
Lan Hang, Du Taotao, Peng Yongwei, et al. Rock-burst mechanism and prevention in working face of shallow buried coal-seam[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(10): 1618-1623.
- [4] 窦林名, 何江, 曹安业, 等. 动载诱发冲击机理及其控制对策探讨[A]. 2012“中国煤炭学会成立五十周年高层”学术论坛[C]. 北京, 2012.
Dou Linming, He Jiang, Cao Anye, et al. Mechanism and prevention methods discussion on coal mine rock burst induced by dynamic load [A]. 2012 High Level Academic Forum of Fifty Anniversary of China National Coal Association [C]. Beijing, 2012.
- [5] 刘少虹, 李凤明, 蓝航, 等. 动静加载下煤的破坏特性及机制的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(S2): 3749-3759.
Liu Shaohong, Li Fengming, Lan Hang, et al. Experimental study of failure characteristics and mechanism of coal under coupled static and dynamic loads[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(S2): 3749-3759.
- [6] 李玉生. 冲击地压机理及其初步应用[J]. 中国矿业学院学报, 1985(3): 42-48.
Li Yusheng. Rockburst mechanism and its preliminary application [J]. China College of Mining and Technology, 1985(3): 42-48.
- [7] 齐庆新, 窦林名. 冲击矿压理论与技术[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2008.
- [8] 布雷迪, 布朗. 地下采矿岩石力学[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1990.
- [9] 曹安业, 范军, 牟宗龙, 等. 矿震动载对围岩的冲击破坏[J]. 煤炭学报, 2010, 35(12): 2006-2010.
Cao Anye, Fan Jun, Mu Zonglong, et al. Burst failure effect of mining-induced tremor on roadway surrounding rock[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(12): 2006-2010.
- [10] 何江. 煤矿采动载荷对煤岩体的作用及诱冲机理研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2013.
He Jiang. Research of mining dynamic loading effect and its induced rock burst in coal mine [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2013.
- [11] Hatherly P, Galel M, Medhurst T. 3D Stress effects, rock damage and longwall caving as revealed by microseismic monitoring [A].

- Acarp Project C9021 [C]. 2003.
- [12] 王文德, 赵炯, 胡继武. 弹性波 CT 技术及应用[J]. 煤田地质与勘探, 1996, 24(5): 59-63.
Wang Wende, Zhao Jiong, Hu Jiwu. Elastic wave CT technique and its application [J]. Coal Geology and Exploration, 1996, 24(5): 59-63.
- [13] 巩思园. 矿震震动波波速层析成像原理及其预测煤矿冲击危险应用实践[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2010.
Gong Siyuan. Research and its application of using mine tremor velocity tomography to forecast rockburst danger in coal mine [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2010.
- [14] 巩思园, 窦林名, 徐晓菊, 等. 冲击倾向煤岩纵波波速与应力关系试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2012, 29(1): 67-71.
Gong Siyuan, Dou Linming, Xu Xiaojie, et al. Experimental study on the correlation between stress and P-wave velocity for burst tendency coal-rock samples [J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2012, 29(1): 67-71.
- [15] Dou L M, Chen T J, Gong S Y, et al. Rockburst hazard determination by using computed tomography technology in deep workplace [J]. Safety Science, 2012, 50(4): 736-740.
- [16] He Hu, Dou Linming, Li Xuwei, et al. Active velocity tomography for assessing rock burst hazards in a kilometer deep mine [J]. Mining Science and Technology, 2011, 21(5): 673-676.
- [17] Lurka A. Location of high seismic activity zones and seismic hazard assessment in Zabrze Bielszowice coal mine using passive tomography [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2008, 18(2): 177-181.
- [18] Dou Linming, Lu Caiping, Mu Zonglong, et al. Prevention and forecasting of rock burst hazards in coal mines [J]. Mining Science and Technology, 2009, 19(5): 585-591.
- [19] 贺虎, 窦林名, 巩思园, 等. 冲击矿压的声发射监测技术研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(4): 1262-1268.
He Hu, Dou Linming, Gong Siyuan, et al. Study of acoustic emission monitoring technology for rockburst [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(4): 1262-1268.
- [20] 窦林名, 何学秋, 王恩元. 冲击矿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.
- [21] 窦林名, 陆菜平, 牟宗龙, 等. 冲击矿压的强度弱化减冲理论及其应用[J]. 煤炭学报, 2005, 30(6): 690-694.
Dou Linming, Lu Caiping, Mu Zonglong, et al. The theory of intensity weakening for rockburst and its application [J]. Journal of China Coal Society, 2005, 30(6): 690-694.
- [22] He H, Dou L M, Fan J, et al. Deep-hole directional fracturing of thick hard roof for rockburst prevention [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2012, 32: 34-43.