中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

工作面回采速度影响下煤层顶板能量积聚释放分析

赵同彬[1,2],郭伟耀[1,2],韩 飞[3],顾士坦[1,2]

(1.山东科技大学 矿山灾害预防控制省部共建国家重点实验室培育基地,山东 青岛 266590;
2.山东科技大学 矿业工程国家级实验教学示范中心,山东 青岛 266590;
3.兖州煤业股份有限公司 东滩煤矿,山东 邹城 273500)



摘 要:为了揭示工作面回采速度与顶板弯曲变形能相关性,采用理论分析、数值模拟和现场实测方法,首先研究了回采速度效应下顶板能量积聚规律,然后分析了顶板能量释放特征,最后探讨了回采速度影响下顶板能量积聚释放机制。结果表明:随着加载速率增大,岩梁的抗拉强度呈线性增大趋势,而积聚能量呈指数型增加趋势;随着回采速度增加,顶板释放能量也呈指数型增加趋势;工作面回采速度为 5.0~6.0 m/d 时,微震活动为高能量低频次,而保持在 4.0 m/d 左右时,微震活动为低能量高频次;回采速度由慢变快时,顶板积聚能量增加的本质是受到的加载速率增大,而能量释放的本质是增加的弹性能致使煤岩系统的非稳定动态平衡被打破,从而诱发冲击地压。

关键词:回采速度;顶板;能量积聚;能量释放;微震

中图分类号:TD324 **文献标志码**:A **文章编号**:0253-2336(2018)10-0037-08

Analysis on energy accumulation and release of roof under influence of mining speed

ZHAO Tongbin[1,2], GUO Weiyao[1,2], HAN Fei[3], GU Shitan[1,2]

(1. *State Key Laboratory of Mining Disaster Prevention and Control Co-founded by Shandong Province and the Ministry of Science and Technology, Shandong University of Science and Technology, Qingdao* 266590, *China*; 2. *National Demonstration Center for Experimental Mining Engineering Education, Shandong University of Science and Technology, Qingdao* 266590, *China*; 3. *Dongtan Coal Mine, Yanzhou Coal Mining Company Limited, Zoucheng* 273500, *China*)

Abstract: In order to reveal the relation characteristics between the stoping speed and the roof deformation energy, this paper first studied the energy accumulation law of roof under the stoping speed effect by theoretical analysis and numerical simulation, and then analyzed the energy release characteristic of roof by field monitoring. At last, the energy accumulation and release mechanism of roof is discussed. Results show: when the loading rate increases, the tensile strength of roof beam increase linearly, and the accumulated energy of roof shows an exponential growth trend; the increase of released energy of roof shows an exponential trend as increasing the stoping speed; when the stoping speed is 5.0~6.0 m/d, the microseismic activity is high energy and low frequency, but when the stoping speed is about 4.0 m/d, it is low energy and high frequency; when the stoping speed increases, the essence of accumulated energy increase of roof is the increase of loading rate, and the essence of energy release is that the increased elastic energy destroys the unstable dynamic balance of coal-rock system, which might induce rock burst.

Key words: stoping speed; roof; energy accumulation; energy release; microseismic

0 引 言

近年来,随着煤炭开采机械装备制造水平不断提高,出现了越来越多的单面高产能生产矿井,其采用的技术方法途径有提高回采速度、加大工作面长度、增加采高等,而调整工作面回采速度这一方法有

收稿日期:2018-06-13;**责任编辑**:杨正凯 **DOI**:10.13199/j.cnki.cst.2018.10.006

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2016YFC0801401);国家自然科学基金资助项目(51674160);泰山学者优势特色学科人才团队支持计划资助项目

作者简介:赵同彬(1975—),男,黑龙江齐齐哈尔人,教授,博士生导师,博士。通讯作者:郭伟耀,讲师,博士,E-mail:363216782@qq.com

引用格式:赵同彬,郭伟耀,韩 飞,等. 工作面回采速度影响下煤层顶板能量积聚释放分析[J]. 煤炭科学技术,2018,46(10):37-44.

ZHAO Tongbin, GUO Weiyao, HAN Fei, *et al*. Analysis on energy accumulation and release of roof under influence of mining speed[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(10): 37-44.

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

较强的可控性和灵活性,可根据工作面条件实时调整[1-2]。工程实践表明[3-5],工作面回采速度大小与矿压显现强度密切相关,回采速度过快会导致围岩单位时间内加卸载活动和顶板运动更加剧烈,容易诱发冲击地压,但是回采速度过慢,又会影响工作面的高效回采。

目前,针对工作面回采速度对采场矿压、围岩应力、微震等演化规律,我国学者从数值模拟、理论分析、现场实践等方面开展了大量研究。在数值模拟方面,文献[6-8]以谢桥煤矿为工程背景,模拟分析了开采速率对综放工作面围岩应力影响,认为随着回采速度增加,围岩应力降低区及破坏区面积减小、峰值应力变大且向煤壁靠近;刘全明[9]模拟研究了不同回采速度下矿压显现规律,发现随着回采速度增大,超前支承压力峰值距离及影响范围呈减小趋势;刘洪永等[10]以淮北祁南矿 $34_{下}$ 采区为原型,开展了上覆岩采动瓦斯通道扩展数值仿真研究,发现围岩塑性区发育高度、宽度和范围随回采速度增加而降低。在理论分析方面,王家臣等[11]建立了基本顶动力断裂失稳折迭突变模型,分析认为工作面回采速度加快等效于基本顶悬臂梁加载速率提高,基本顶岩层抗拉强度的伪增强导致基本顶断前储存于悬臂梁中的弹性应变能增多、破断岩块初始动能占总应变能的比例升高;杨敬虎等[12]运用薄板理论并结合岩石力学试验结果,推导出了不同面长和不同回采速度下顶板断裂步距的计算公式,分析表明面长越短、回采速度越快,顶板初次断裂步距越大。在现场实践方面,崔廷锋等[13]对酸刺沟煤矿首采浅埋工作面进行的实测分析表明,周期来压步距随工作面回采速度增大而增大,回采速度为 4、13 m/d 时,来压步距分别为 12.8、21.8 m;王晓振等[1]以活鸡兔井为工程背景,实测分析了浅埋综采面高速回采对周期来压特征的影响规律,发现在快速回采情况下工作面周期来压持续长度显著增加,而周期来压步距、支架载荷和动载系数的变化相对较小;李浩荡等[14]分析某矿坚硬厚层顶板条件下冲击地压危险时期的微震监测结果表明,围岩震动呈现出高能量和低频次的特征,工作面回采速度宜控制在 3.2 m/d 以内;尹万蕾等[15]通过从回采速度稳定性角度分析矿震发生机制发现,回采速度突然增加会使微震震级与频次出现较为强烈的波动。

以上研究虽然就回采速度对工作面矿压及围岩应力影响进行了有益研究,对现场实践具有一定指导意义,但涉及工作面回采速度与煤层顶板弯曲变形能相关性研究较少。因此,笔者针对这一问题,采用理论分析、数值模拟和现场实测等方法,研究回采速度效应下顶板的能量积聚与释放特征,为类似工程条件下的冲击地压灾害防治工作提供理论基础。

1　回采速度影响下顶板能量积聚分析

基于材料力学及结构力学理论建立的“砌体梁”和“传递岩梁”顶板结构模型得到国内外学者广泛认可,大量研究证明顶板断裂一般发生在工作面前方[16]。据此,可给出如图 1 所示的工作面回采过程中的顶板结构演化特征,沿工作面回采方向,岩块 A、B 和 C 组成铰接结构。近年来,学者提出进行煤层顶板冲击倾向性测试时,以简支梁模型进行计算更为合理[17]。鉴于此,本节将以简支梁模型对回采速度影响下顶板能量积聚进行理论分析。

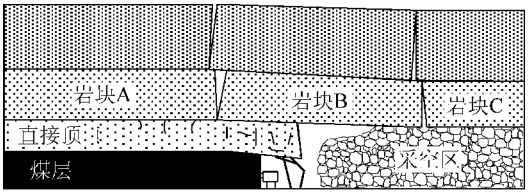


图 1　工作面回采过程中的顶板结构特征[18]

Fig. 1　Sketch of the main roof structure during the stoping process[18]

1.1　顶板简支梁模型

首先建立如图 2 所示的顶板岩层简支梁模型,其弯矩 $M(x)$ 为

$$M(x)=\frac{qbx}{2}(L-x) \tag{1}$$

式中:q 为上覆均布荷载,MPa;x 为截面到支点的距离,m;L 为极限岩梁长度,m;b 为岩梁宽度,取 1 m。

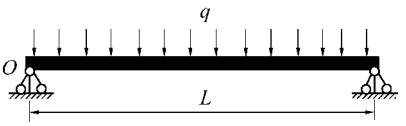


图 2　顶板岩层简支梁模型

Fig. 2　Simply-supported beam model of roof

进一步,通过积分可得到该简支梁积聚的弯曲能 U 为

$$U=\int_0^L\frac{M^2(X)}{2EI}\mathrm{d}x=\frac{q^2L^5b^2}{240EI} \tag{2}$$

式中:E 为岩层的弹性模量,GPa;I 为转动惯量,kg·m^2。

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

式(2)中的极限岩梁长度 L 为工程中的可变量,与岩层的抗拉强度和受到的均布荷载相关,可表示为:

$$L = 2h\sqrt{R_t/3q} \tag{3}$$

式中:R_t为岩层的抗拉强度,MPa。

将式(3)代入式(2),可得到岩梁弯曲能计算:

$$U_W = 102.6\frac{R_t^{5/2}h^2}{q^{1/2}E} \tag{4}$$

从式(4)中可知,随着岩层抗拉强度或顶板厚度的增加,岩梁积聚的弯曲能显著增加。但岩层的抗拉强度与加载速率密切相关,而工作面回采速度增大又等效于岩层受到的加载速率增大[11]。工程中工作面回采速度往往是变化的,因此对岩层积聚能量进行计算时,还需考虑回采速度影响。

1.2　基于加载速率效应的顶板能量积聚分析

工作面回采过程中,顶板受力有两种类型[19]:一是煤层顶板受上覆岩层力的作用,即力加载速率 v;二是煤层顶板自身受采动作用不断下沉,即位移加载速率。大量研究已得加载速率影响岩石抗拉强度的基本规律[20-21],即岩石的抗拉强度随加载速率的增大而增大。考虑到煤矿顶板一般以砂岩为主,统计了文献[22-23]两种类型加载下不同加载速率时砂岩抗拉强度的试验数据,并进行了拟合,如图 3 所示,2 种类型加载下砂岩的抗拉强度均随加载速率的增大而呈线性增大趋势。

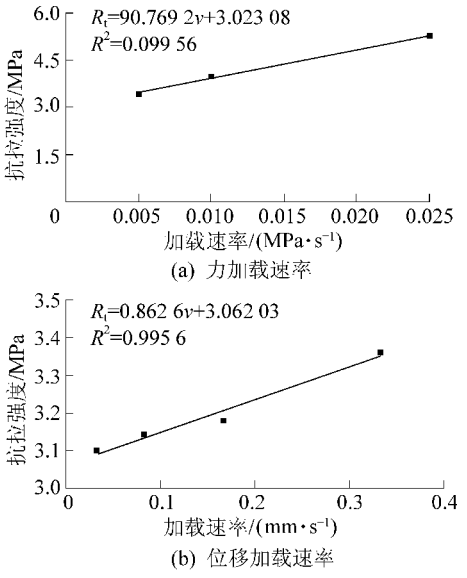


图 3　不同加载速率下砂岩抗拉强度的演化规律

Fig. 3　Evolution law of tensile strength of sandstone under different loading rates

砂岩的抗拉强度与加载速率关系为

$$R_t = mv + n \tag{5}$$

式中:m、n 为与岩性相关的常数,通过试验得出。v 为加载速率。

将式(5)代入式(4),可得到考虑加载速率的弯曲能量计算公式:

$$U_W = \varphi\frac{v^{5/2}h^2}{q^{1/2}E} + \eta \tag{6}$$

现场工程条件一定时,h、q 均为定值,而且岩石弹性模量受加载速率影响较弱[24],E 也可简化为定值。此时,又可将式(6)简化为

$$U_W = \varphi v^{5/2} + \eta \tag{7}$$

式中:φ、η 为与岩性相关的常数,通过拟合得到。

式(7)给出了基于加载速率效应的弯曲能量计算方法。该公式表明,随着岩层受到的加载速率增大,顶板积聚能量将呈指数型增加趋势。

2　加载速率影响下顶板能量积聚分析

采用 FLAC^{3D}数值模拟软件建立简支梁顶板结构模型,研究不同加载速率下岩梁的拉应力及其能量积聚特征。

2.1　模型建立及模拟方案

本次模拟选取岩梁尺寸为长×宽×高 = 30 m×1 m×2 m,选 Mohr-Column 模型进行模拟,所取参数与文献[25]相同,如图 4 所示。为模拟简支梁两端支点,在模型水平两端限制 z 方向位移。模型 z 方向上自由面施加均布载荷,加载速率取 0.005、0.05、0.5、1.0 mm/step 四种情况。模型中间水平布置一条监测线,监测拉应力及积聚能量随加载速率的变化特征。顶板能量计算公式如下:

$$U_R = \frac{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\nu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_1\sigma_3 + \sigma_2\sigma_3)}{2E} \tag{8}$$

式中:σ_1、σ_2、σ_3为 3 个主应力;ν 为泊松比;E 为弹性模量。

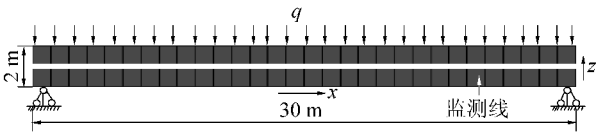


图 4　岩梁数值模型

Fig. 4　Numerical model of rock beam

2.2　拉应力分布规律

不同加载速率下岩梁沿水平方向上的拉应力分

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

布特征如图 5 所示。岩梁所受的拉应力沿水平方向呈 U 型对称分布,在中部位置区域达最大;在相同坐标位置处,拉应力随加载速率增大而增大。

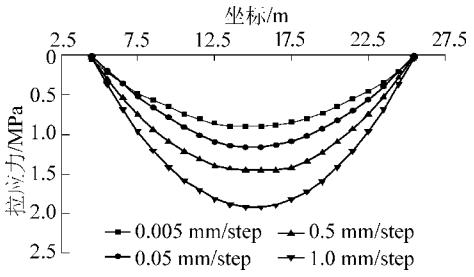


图 5　不同加载速率下拉应力分布特征

Fig. 5　Distribution law of tensile strength under different loading rates

岩梁所受的最大拉应力与加载速率关系如图 6 所示。当加载速率从 0.005 mm/step 增大到 1.0 mm/step 时,岩梁所受的最大拉应力从 0.9 MPa 增大到 1.92 MPa,增大了 113.33%。通过对最大拉应力与加载速率关系进行拟合,发现二者呈线性关系(R'_t=0.920 63v+0.999 6,R^2=0.937 11),规律与文献[22-23]的室内试验结果相似。

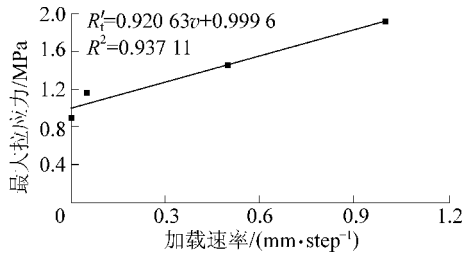


图 6　最大拉应力与加载速率的关系

Fig. 6　Relationship between maximum tensile strength and loading rate

2.3　能量积聚分布规律

不同加载速率下岩梁的能量分布特征如图 7 所示,与拉应力分布特征类似,岩梁存储的弹性能沿水平方向呈“U”型对称分布,在中部位置区域达最大;在相同坐标位置,弹性能随加载速率增大而增大。

岩梁存储的总能量与加载速率关系,如图 8 所示,随着加载速率增大,岩梁存储的能量呈非线性快速增大。当加载速率从 0.005 mm/step 增大到 1.0 mm/step 时,总能量由 1.46×10^3 J 增大到 7.23×10^3 J,增加了 395.20%。采用式(7)对岩梁存储能量与加载速率关系进行拟合,拟合度 R^2 达 0.9345,验证了“随着加载速率增大,顶板积聚能量将呈指数型快速增加趋势”这一结论。也就是说,工作面回采速度存在一个临界值,小于该临界值时,随着回采速度增大,顶板积聚的能量缓慢增加;但大于该临界值时,随着回采速度增大,顶板积聚的能量快速增加。

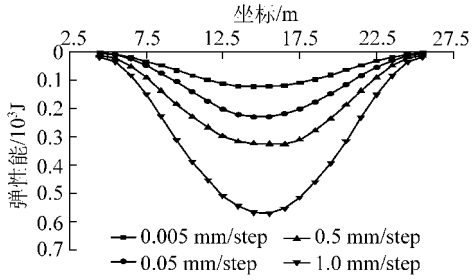


图 7　不同加载速率下能量分布特征

Fig. 7　Distribution law of energy under different loading rates

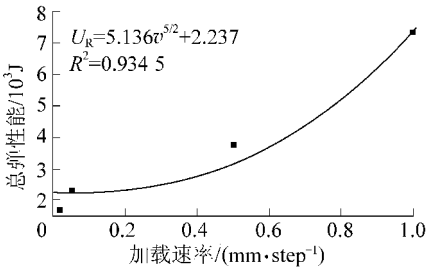


图 8　岩梁积聚能量与加载速率的关系

Fig. 8　Relationship between energy accumulation and loading rate

3　工程实测顶板能量释放规律

以东滩煤矿 6305 工作面为工程背景,在 2018 年 1~2 月调整了工作面的回采速度(1 月期间为 5.0~6.0 m/d、2 月期间为 4.0 m/d 左右),通过监测该期间的微震活动,分析回采速度对顶板能量释放规律的影响。

3.1　工程地质条件

东滩煤矿位于山东省邹城、兖州、曲阜三市接壤地区。6305 工作面位于矿区南翼六采区中部,回采 3$_上$煤层。6305 工作面为该采区的第 2 个回采工作面,仅北邻 6304 工作面采空区,具体如图 9 所示。工作面走向长度 1 571.5 m,倾向长度 252.96 m,平均标高-658.4 m,采用走向长壁顶板垮落综采一次采全高采煤法。工作面自 2017 年 8 月 2 日开始回采,截止 2018 年 3 月 1 日已回采 915 m。

工作面煤厚为 4.30~5.50 m,平均 5.06 m,普氏系数 f=2~3;煤层倾角为 0°~12°,平均 5°。距煤层上方 7.5~63 m 赋存厚度为 512.3~525.4 m 的“红层”,东厚西薄、总体稳定,主要由砾岩、砂岩、砂质泥岩、泥岩等组成。

3.2　微震监测结果分析

6305 工作面回采期间采用波兰 SOS 微震监系

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

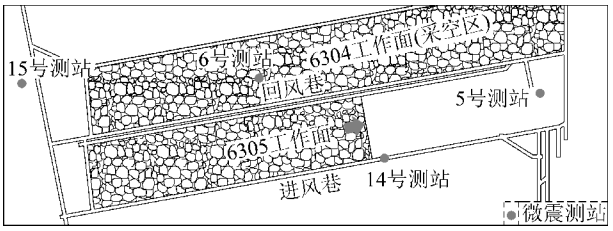


图 9　6305 工作面布置示意

Fig. 9　Layout of No.6305 mining face

统对顶板能量释放进行了监测,每日微震总能量及微震次数与回采速度之间的关系如图 10 所示。1 月份,回采速度为 5.0~6.0 m/d 时,微震总能量相对较高且变化剧烈,最大可达 6.85×10^6 J,微震事件数小于 20 次;2 月份期间,回采速度较慢时,保持在4.0 m/d 左右时,微震总能量大幅降低且较为均衡,每日微震总能量小于 1.60×10^6 J,微震事件数可达 30~40 次。该现象表明,回采速度较快时,微震活动以高能量低频次为主,易使顶板中的弹性能快速释放,使煤层中弹性能密度迅速升高,从而促使煤壁产生动力破坏概率增大;但回采速度较慢时,微震活动以低能量高频次为主,利于顶板中积聚的弹性能缓慢释放。

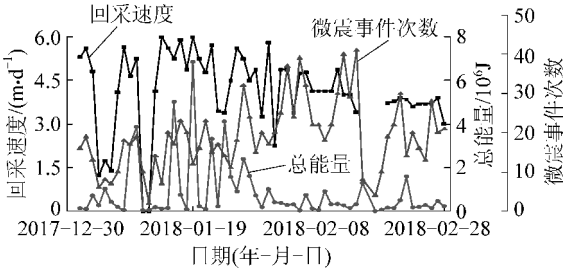


图 10　微震总能量、微震事件次数与工作面回采速度之间的关系

Fig. 10　Relationship between the total microseismic energy, number of microseismic events and the stoping speed

3.3　回采速度与释放能量关系

为了探究工作面回采速度与能量之间的关系,统计了不同回采速度期间的微震能量,具体见表 1,考虑到矿震产生随机性强及微震能量大,难以准确反映回采速度影响下顶板能量释放的一般特征,为了更好获取日常开采活动中的顶板能量释放特征,仅统计了没有发生矿震时顶板每天释放的总能量,统计时间均为 9d。微震总能量随工作面回采速度增加呈非线性增加趋势,平均回采速度为3.67 m/d 时,微震总能量为 2.255×10^6 J,而平均回采速度增大到4.32、5.48 m/d 时,微震总能量可达 2.884×10^6、7.549×10^6 J,增加率为 27.89%、234.77%。

表 1　不同回采速度时 6305 工作面微震能量统计

Table 1　Microseismic energy statistics of No.6305 mining face

回采速度/(m·d⁻¹)	平均值/(m·d⁻¹)	能量/10⁶J	总能量/10⁶J
6.00		0.114	
5.63		0.147	
5.90		0.750	
4.88		0.088	
5.23	5.48	0.218	7.549
4.96		1.930	
5.63		0.902	
5.25		2.390	
5.80		1.010	
4.73		0.033	
4.77		0.739	
4.13		0.116	
4.13		0.424	
4.13	4.32	0.905	2.884
4.13		0.307	
4.88		0.329	
4.00		0.267	
4.00		0.146	
3.73		0.155	
3.77		0.141	
3.90		0.501	
3.60		0.172	
3.70	3.67	0.186	2.255
3.70		0.273	
3.70		0.141	
3.90		0.460	
3.00		0.226	

采用式(7)对回采速度与微震总能量关系进行拟合($U_{RE}=0.06v^{5/2}+3.33$,$R^2=0.996\ 1$)(图 11)。

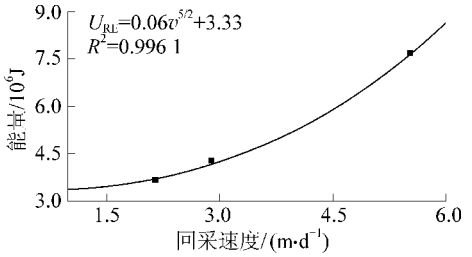


图 11　工作面回采速度与能量释放之间的关系

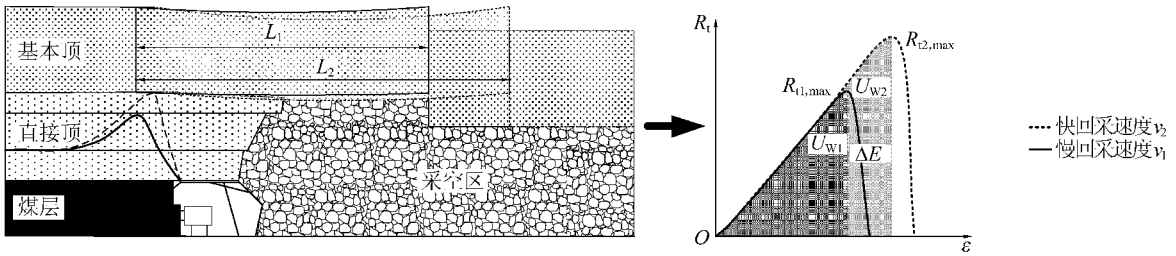
Fig. 11　Relationship between the released energy and the mining speed

随着回采速度增加,微震能量呈指数型快速增加趋势。虽然微震监测结果是岩层破裂时释放的能量,但释放能量多少是与积聚能量密切相关,积聚能量越多,释放能量也就越多。因此,回采速度与微震能量的拟合结果可以佐证该结论:随着回采速度加快,顶板积聚能量呈指数型增加趋势。

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

4　回采速度效应下顶板能量积聚释放机制

随着回采速度加快,工作面来压步距增大、超前支承压力峰值向煤壁靠近。回采速度较慢时,取基本顶悬顶长度为 L_1;回采速度较快时,取基本顶悬顶长度为 L_2,则有:$L_1<L_2$,首先可给出如图 12a 所示的回采速度影响下顶板结构示意,结合前述的理论分析可知,工程条件一定时,基本顶悬顶长度增加是由岩层抗拉强度增大造成,而岩层抗拉强度增大又是由加载速率增大造成,由此又可给出如图 12b 所示的回采速度影响下顶板能量积聚示意。



(a) 顶板结构示意　　(b) 能量积聚示意

图 12　回采速度影响下顶板能量积聚示意

Fig. 12　Energy accumulation mechanism of roof under the stoping speed effect

当工作面回采速度较慢时,等效于顶板受到的加载速率为 v_1,顶板积聚的能量为 U_{W1},而当回采速度加快时,等效于顶板受到的加载速率为 v_2,顶板积聚的能量为 U_{W2},则回采速度由慢变快时,顶板积聚的能量将增加 $\triangle E$,即:

$$\triangle E = U_{W2} - U_{W1} = (\varphi_2 v_2^{5/2} + \eta_2) - (\varphi_1 v_1^{5/2} + \eta_1) \quad (9)$$

由上式可知,回采速度效应下顶板积聚能量增加的本质就是岩层受到的加载速率增大。进一步,根据岩体破坏的最小能量原理可知,无论岩体处于何种应力状态,一旦失稳,破坏启动,其破坏真正需要消耗的能量总是单向应力状态的破坏能量[26]。也就是说,慢回采速度条件下,煤岩系统自身处于非稳定动态平衡状态,存储的弹性能能够缓慢有效释放,但随着回采速度加快,系统中积聚的弹性能将增加 ΔE,且 ΔE 将主要转换为破断岩块的初始动能向煤层传递,致使煤岩系统的非稳定动态平衡被打破,从而造成煤岩体产生动力破坏,即诱发冲击地压。

5　结　　论

1)随着加载速率增大,岩梁抗拉强度呈线性增大趋势,而积聚能量呈指数型增加趋势,即工作面回采速度存在一个临界值,小于该临界值时,顶板积聚能量随回采速度增大而缓慢增加;但大于该临界值时,顶板积聚能量随回采速度增大而快速增加。

2)工作面回采速度为 5.0~6.0 m/d 时,微震活动为高能量低频次,不利于顶板中的弹性能缓慢有效释放,而回采速度保持在 4.0 m/d 左右时,微震活动为低能量高频次,利于顶板中的弹性能缓慢释放。随着回采速度加快,顶板释放总能量将呈指数型增加趋势,如工作面平均回采速度由 3.67 m/d 增大到 5.48 m/d 时,微震总能量增加率可达 234.77%。

3)回采速度效应下顶板积聚能量增加的本质是受到的加载速率增大,而能量释放的本质是随着回采速度由慢变快,煤岩系统中积聚的弹性能突然增加,致使其非稳定动态平衡被打破,从而诱发冲击地压。

参考文献(References):

[1] 王晓振,许家林,朱卫兵,等.浅埋综采面高速推进对周期来压特征的影响[J].中国矿业大学学报,2012,41(3):349-354.
WANG Xiaozhen,XU Jialin,ZHU Weibing,*et al*.Influence of high mining velocity on periodic weighting during fully-mechanized mining in a shallow seam[J].Journal of China University of Mining & Technology,2012,41(3):349-354.

[2] 赵同彬,郭伟耀,谭云亮,等.煤厚变异区开采冲击地压发生的力学机制[J].煤炭学报,2016,41(7):1659-1666.
ZHAO Tongbin,GUO Weiyao,TAN Yunliang,*et al*. Mechanics mechanism of rock burst caused by mining in the variable region of coal thickness[J].Journal of China Coal Society,2016,41(7):1659-1666.

[3] 杨胜利,王兆会,蒋　威,等.高强度开采工作面煤岩灾变的推进速度效应分析[J].煤炭学报,2016,41(3):586-594.
YANG Shengli,WANG Zhaohui,JIANG Wei,*et al*.Advancing rate effect on rock and coal failure format in high-intensity mining face[J].Journal of China Coal Society,2016,41(3):586-594.

[4] 张宏伟,李云鹏,陈　莹,等.三硬条件下孤岛工作面安全推进速度研究[J].煤炭科学技术,2017,45(2):6-11.
ZHANG Hongwei,LI Yunpeng,CHEN Ying,*et al*.Study on safety

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

pushing forward speed of island coal mining face under hard roof and hard seam and hard floor conditions[J].Coal Science & Technology,2017,45(2):6-11.

[5] 李海涛,宋 力,周宏伟,等.率效应影响下煤的冲击特性评价方法及应用[J].煤炭学报,2015,40(12):2763-2771.
LI Haitao,SONG Li,ZHOU Hongwei,*et al*.Evaluation method and application of coal burst performance under the effect of loading rate[J].Journal of China Coal Society,2015,40(12):2763-2771.

[6] 王金安,焦申华,谢广祥.综放工作面开采速率对围岩应力环境影响的研究[J].岩石力学与工程学报,2006,25(6):1118-1124.
WANG Jinan,JIAO Shenhua,XIE Guangxiang.Study on influence of mining rate on stress environment in surrounding rock of mechanized top caving mining face[J].Chinese Journal of Rock Mechanics & Engineering,2006,25(6):1118-1124.

[7] 谢广祥,常聚才,华心祝.开采速度对综放面围岩力学特征影响研究[J].岩土工程学报,2007,29(7):963-967.
XIE Guangxiang,CHANG Jucai,HUA Xinzhu.Influence of mining velocity on mechanical characteristics of surrounding rock in fully mechanized top-coal caving face[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2007,29(7):963-967.

[8] 王 磊,谢广祥.综采面推进速度对煤岩动力灾害的影响研究[J].中国矿业大学学报,2010,39(1):70-74.
WANG Lei,XIE Guangxiang.Influence of mining velocity on dynamic disasters in the coal and rock mass at a fully mechanized mining face[J].Journal of China University of Mining & Technology,2010,39(1):70-74.

[9] 刘全明.浅埋综采工作面矿压显现的推进速度效应分析[J].煤炭科学技术,2010,38(7):24-26.
LIU Quanming.Analysis on mining velocity effect of mine pressure behavior of fully mechanized longwall coal mining face with shallow mining depth[J].Coal Science & Technology,2010,38(7):24-26.

[10] 刘洪永,程远平,周红星,等.综采长壁工作面推进速度对优势瓦斯通道的诱导与控制作用[J].煤炭学报,2015,40(4):809-815.
LIU Hongyong,CHENG Yuanping,ZHOU Hongxing,*et al*.Guidance and control effect of drawing speed on excellent gas channel at fully mechanized longwall face[J].Journal of China Coal Society,2015,40(4):809-815.

[11] 王家臣,王兆会.高强度开采工作面顶板动载冲击效应分析[J].岩石力学与工程学报,2015(S2):3987-3997.
WANG Jiachen,WANG Zhaohui.Impact effect of dynamic load induced by roof in high-intensity mining face[J].Chinese Journal of Rock Mechanics & Engineering,2015(S2):3987-3997.

[12] 杨敬虎,孙少龙,孔德中.高强度开采工作面矿压显现的面长和推进速度效应[J].岩土力学,2015(S2):333-350.
YANG Jinghu,SUN Shaolong,KONG Dezhong.Effect of working face length and advancing speed on strata behaviors in high-intensity mining[J].Rock & Soil Mechanics,2015(S2):333-350.

[13] 崔廷锋,张东升,范钢伟,等.浅埋煤层大采高工作面矿压显现规律及支架适应性[J].煤炭科学技术,2011,39(1):25-28.
CUI Tingfeng,ZHANG Dongsheng,FAN Gangwei,*et al*.Pressure behavior law and powered support suitability of high cutting coal mining face in shallow depth seam[J].Coal Science & Technology,2011,39(1):25-28.

[14] 李浩荡,蓝 航,杜涛涛,等.宽沟煤矿坚硬厚层顶板下冲击地压危险时期的微震特征及解危措施[J].煤炭学报,2013,38(S1):6-11.
LI Haodang,LAN Hang,DU Taotao,*et al*.Micro-seismic characteristic and danger-relief method in rock-burst danger period of mining face under hard and thick roof of Kuangou Mine[J].Journal of China Coal Society,2013,38(S1):6-11.

[15] 尹万蕾,潘一山,李忠华,等.冲击地压与微震影响因素的关系研究[J].中国安全科学学报,2017,27(2):109-114.
YIN Wanlei,PAN Yishan,LI Zhonghua,*et al*.Study on relationship between rock burst and microquake influence factor[J].China Safety Science Journal,2017,27(2):109-114.

[16] 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 Yaodong,ZHAO Yixin.State of the art:Investigation on mechanism,forecast and control of coal bumps in China[J].Chinese Journal of Rock Mechanics & Engineering,2015,34(11):2188-2204.

[17] 齐庆新,彭永伟,李宏艳,等.煤岩冲击倾向性研究[J].岩石力学与工程学报,2011,30(S1):2736-2742.
QI Qingxin,PENG Yongwei,LI Hongyan,*et al*.Study of bursting liability of coal and rock[J].Chinese Journal of Rock Mechanics & Engineering,2011,30(S1):2736-2742.

[18] DOU Linming,MU Zonglong,LI Zhenlei,*et al*.Research progress of monitoring,forecasting,and prevention of rockburst in underground coal mining in China[J].International Journal of Coal Science & Technology,2014,1(3):278-288.

[19] 杨敬虎,于 翔.加载速率影响抗拉强度的机理及其数值验证[J].煤炭学报,2017,42(S1):51-59.
YANG Jinghu,YU Xiang.Mechanical explanation of loading rate impact on tensile strength and its numerical simulation analysis[J].Journal of China Coal Society,2017,42(S1):51-59.

[20] 吴绵拔.加载速率对岩石抗压和抗拉强度的影响[J].岩土工程学报,1982,4(2):97-106.
WU Mianba.The effect of loading rate on the compressive and tensile strength of rocks[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering,1982,4(2):97-106.

[21] 周 辉,杨艳霜,肖海斌,等.硬脆性大理岩单轴抗拉强度特性的加载速率效应研究-试验特征与机制[J].岩石力学与工程学报,2013,32(9):1868-1875.
ZHOU Hui,YANG Yanshuang,XIAO Haibin,*et al*.Research on loading rate effect of tensile strength property of hard brittle marble-test characteristics and mechanism[J].Chinese Journal of Rock Mechanics & Engineering,2013,32(9):1868-1875.

[22] 陈 珂,赵伏军,张 柏,等.不同加载速率下砂岩巴西劈裂声发射试验研究[J].矿业工程研究,2015(2):37-42.

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

CHEN Ke, ZHAO Fujun, ZHANG Bai, *et al*. Experimental research on acoustic emission of Brazilian split sandstone under different loading rate [J]. Mineral Engineering Research, 2015 (2):37-42.

[23] YANG Jinghu. Effect of displacement loading rate on mechanical properties of sandstone[J]. Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 20(2):591-602.

[24] 张学朋,蒋宇静,王 刚,等.基于颗粒离散元模型的不同加载速率下花岗岩数值试验研究[J].岩土力学,2016,37(9):2679-2686.
ZHANG Xuepeng, JIANG Yujing, WANG Gang, *et al*. Numerical experiments on rate-dependent behaviors of granite based on particle discrete element model[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(9):2679-2686.

[25] NING Jianguo, GU Qingheng, WANG Jun, *et al*. Strain-softening model for marble considering the degradation of elastic modulus [J]. Arabian Journal for Science & Engineering, 2018(2):1-9.

[26] 赵阳升,冯增朝,万志军.岩体动力破坏的最小能量原理[J].岩石力学与工程学报,2003,22(11):1781-1783.
ZHAO Yangsheng, FENG Zengchao, WAN Zhijun. Least energy principle of dynamical failure of rock mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics & Engineering, 2003, 22(11):1781-1783.