

范志忠,潘黎明. 大采高综采煤壁动静载稳定性及采高的尺度效应研究[J]. 矿业科学学报, 2020, 5(5): 528-535. DOI: 10.19606/j.cnki.jmst.2020.05.007

Fan Zhizhong, Pan Liming. Study on dynamic and static load stability of coal wall and scale effect of mining height in large cutting height working face [J]. Journal of Mining Science and Technology, 2020, 5(5): 528-535. DOI: 10.19606/j.cnki.jmst.2020.05.007

大采高综采煤壁动静载稳定性及采高的尺度效应研究

范志忠^{1,2}, 潘黎明²

1. 中国矿业大学(北京)能源与矿业学院, 北京 100083;
2. 天地科技股份有限公司 开采设计事业部, 北京 100013

摘要:针对大采高工作面动静荷载引发的片帮冒顶等围岩失稳问题,通过理论分析、数值模拟和实验室试验,对动载作用下大采高工作面煤壁失稳机理及特征进行了研究;建立了PFC^{2D}双轴压缩数值试验模型,将裂隙植于模型内,研究了煤体和煤样在静载作用下的尺度效应规律,认为煤层中天然缺陷的数量、贯通性及其分布规律对尺寸效应有明显影响,试样越大,其强度越低,其变化呈对数曲线变动趋势;进一步采用霍普金森试验研究了煤样动静载条件下的力学特性,得出峰值强度与煤壁稳定性存在较好的一致性关系,一定程度上反映采动影响下细微节理构造和缺陷对煤壁稳定性的影响程度。以阳泉矿区为例,分别将一矿、二矿、五矿和新景矿15号煤样动、静峰值强度与现场实际的煤壁稳定性进行对比,认为煤样动态峰值强度能较好地反映采动应力对煤壁稳定性的影响,为强扰动下科学采高的界定提供了理论依据。

关键词:大采高综采;动静载作用;煤壁稳定性;片帮;割煤高度

中图分类号:TD 32

文献标志码:A

文章编号:2096-2193(2020)05-0528-08

Study on dynamic and static load stability of coal wall and scale effect of mining height in large cutting height working face

Fan Zhizhong^{1,2}, Pan Liming²

1. School of Energy and Mining Engineering, China University of Mining & Technology-Beijing, Beijing 100083, China;
2. Coal Mining & Designing Department, Tiandi Science & Technology Co., Ltd., Beijing 100013, China

Abstract: Based on the theoretical analysis, numerical simulation and laboratory test, the instability mechanism and characteristics of the coal wall under the action of dynamic load are studied. A PFC^{2D} biaxial compression numerical test model is established, and the fracture is planted in the model to study the scale effect of coal body and coal sample under static load. It is concluded that the number, continuity and distribution of natural defects in coal seam have obvious influence on size effect. The larger the sample is, the lower the strength is, and the change trend is logarithmic curve. Further, the mechanical properties of coal samples under static and dynamic loads are studied by Hopkinson test. It is considered that there is a good consistency between the peak strength obtained from dynamic load test and the stability of coal wall, which reflects the influence of fine joint structure and defects on coal wall stability

收稿日期:2019-09-02 修回日期:2019-10-14

基金项目:国家自然科学基金(51474128, 51304115);国家重点研发计划(2017YFC0804301)

作者简介:范志忠(1979—),男,河南洛阳人,副研究员,博士,主要从事矿山压力与岩层控制的研究工作。Tel: 13910114607, E-mail: fanzhizhong@tdkcsj.com

under the influence of mining. Taking Yangquan mining area as an example, the dynamic and static peak strength of coal samples No. 15 from mine No. 1, mine No. 2, mine No. 5 and Xinjing mine are compared with the actual height of coal wall stability. It is concluded that the dynamic peak strength of coal sample can better reflect the influence degree of mining stress on the stability of coal wall, which provides a theoretical basis for the definition of scientific mining height under strong disturbance.

Key words: large mining height; dynamic and static load action; coal wall stability; chip gang; cutting height

节理裂隙的存在破坏了煤岩体的连续性和完整性,更重要的是其弱化了煤岩体的强度,使得煤岩体具有了尺寸效应。研究发现,煤岩体尺寸越大,其强度越低。工作面煤壁稳定性也符合尺度效应规律,其破坏是能量释放和耗散的综合结果^[1]。采高加大后,若工作面弹性应变能峰值区域至煤壁下降梯度过大,易造成煤壁卸荷破坏^[2-3]。煤岩体的力学特性不仅与其物理力学性质有关,还与外部加载条件(加载速率、荷载)有关^[4-6]。已有的研究成果表明,尽管煤岩样动载强度高于静载强度,但煤岩样动载作用下破坏时所需消耗的能量,有可能远低于静态条件^[7-8]。在达到相同损伤或破碎程度条件下,静态压缩破坏比动态冲击压缩破坏要消耗更多的能量。尤其是在深部开采条件下,大采高综采煤壁前方聚集了大量弹性应变能,采煤机割煤时的截割扰动以及顶板的周期来压等动载作用对煤壁稳定性有重要影响^[9-10]。动载作用下煤体内部任何一处细微的节理构造缺陷都可能充分表露出来,工作面煤壁破坏的范围将是全局性的,对生产影响非常大。目前,我国实践的综采工作面最大支撑高度已达8.8 m,采煤机割煤后,由于应力卸荷和动载作用下能量释放效应的影响,煤壁浅层裂隙易沿垂直方向发育并快速贯通,频繁出现倒墙式炸帮炸顶现象^[11-12]。根据相关研究,煤壁片帮从机理上可分为三种,即原生裂隙型、动态扰动型和应力环境驱动型。原生裂隙型片帮主要是指软煤或裂隙发育煤层受采动影响产生的拉裂或剪切破坏;动态扰动型片帮主要是指顶板垮落、采煤机割煤等产生的动载扰动对煤壁造成的损伤;应力环境驱动型片帮主要是指高应力煤层由于最大水平主应力卸荷导致的破坏。

本文对动静载作用下大采高工作面煤壁的稳定进行试验研究,探讨不同赋存条件煤层采高的尺度效应。

1 煤体强度的尺寸效应

围岩控制的“尺度效应”是一个宏观概念,指工作面长度、采高、煤层倾角、推进速度等指标产生

一个增量后对围岩控制难度增加的影响程度。这里采高的尺度效应,指的是割煤高度增加后对煤体强度、煤壁稳定性及矿压显现特征的影响程度。宏观煤岩体由于存在各种各样的节理、裂隙及微空隙结构,这直接造成了煤岩体物理性质的非均质性和力学性质的极大差异性^[13]。因此,实验室加工的煤岩试样尺寸若不同,在力学性质上往往也会表现出一定的差异性。

众多的煤岩样物理力学测试研究表明,煤岩试样的强度存在一些共性的尺寸效应,主要体现在相同类型和形状的煤岩试样,其单轴抗压强度随试样尺寸增大而呈减小趋势;煤岩试样尺寸增加到一定程度,其强度下降趋于平缓,试样尺寸若继续增加,其强度保持稳定或仅小幅波动,接近于岩体强度;煤岩试样中节理裂隙的长度、产状、分布密度等参数对尺寸效应有显著影响。文献[14]提出一种指数函数形式的经验公式,即

$$\sigma_c = \gamma_c + a_c \exp(-\beta_c D) \quad (1)$$

式中, D 为岩试样断面直径,m; σ_c 为煤岩试样单轴抗压强度,MPa; a_c 为原岩强度与岩体强度之差值,MPa; γ_c 为试样物理力学参数,MPa; β_c 为岩样强度随尺寸的增大而减小的程度,即强度衰减系数。

当 $D \rightarrow \infty$ 时, a_c 趋近与天然煤岩体强度 σ_m ,即

$$\sigma_m = \lim_{D \rightarrow \infty} [\gamma_c + a_c \exp(-\beta_c D)] = \gamma_c \quad (2)$$

式(1)中, γ_c 接近于煤或岩体的单向抗压强度。进一步计算可得

$$\sigma_c = \sigma_m + a_c \exp(-\beta_c D) \quad (3)$$

当煤岩样尺寸极小,即 $D \rightarrow 0$ 时,假设其内不包含任何天然缺陷,则此时的煤岩样强度应趋于煤或原岩强度 σ_0 ,即

$$\sigma_0 = \lim_{D \rightarrow 0} [\sigma_m + a_c \exp(-\beta_c D)] = \sigma_m + a_c \quad (4)$$

建立单轴压缩数值分析模型,图1为不同宽高比试样单轴破坏特征,图2为不同高径比试样单轴抗压强度变化规律。从图1(b)中可以看出,在直径不变的情况下,试样越高,其强度越低,呈对数曲线变动趋势,在试样达到一定尺寸后,其强度降低幅度有限。

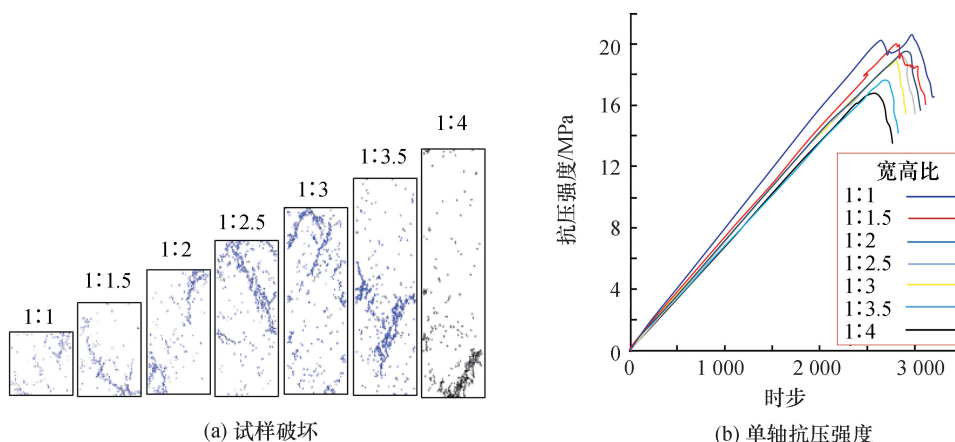


图1 不同宽高比试样单轴破坏特征

Fig. 1 Schematic diagram of uniaxial failure of specimens with different aspect ratios

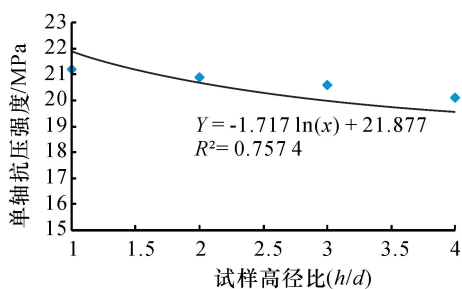


图2 试样尺寸与单轴抗压强度关系

Fig. 2 Relationship between specimen size and uniaxial compressive strength

2 煤样静载作用下的强度特征

2.1 煤样裂隙分布特征

采用阳泉矿区的15号煤层进行静载作用下煤样的尺度效应研究。该煤层是阳煤集团的主采煤层,厚4.7~9 m。受后期构造运动、埋深等影响,

15号煤层在阳煤集团下属一矿、二矿、五矿和新景矿开采区域煤岩物理力学性质差异性较大。对比差异化,对阳煤一矿、二矿、五矿及新景矿的煤岩开展了基础物理力学试验、围岩裂隙发育情况窥视、煤岩微结构及组分测定、煤样动载稳定性试验及底板比压测试等一系列基础试验,掌握了4个矿井煤层赋存条件,横向对比了不同矿井间煤岩基础参数,为精细化研究奠定基础。

图3为阳泉矿区15号煤层煤岩微结构分析测定的裂隙分布特征示意图。从图中可以看出,一矿15号煤微裂隙发育较弱,且多呈雁形分布[图3(a)];二矿15号煤微裂隙则多呈丁字形分布,贯通性较差,裂隙充填物较多且周边区域分布有较多矿物结核[图3(b)];新景矿15号煤裂隙呈现交叉状分布,裂隙以张裂缝为主[图3(c)];五矿15号煤以斜交状的贯穿裂隙为主,次生节理较发育[图3(d)]。

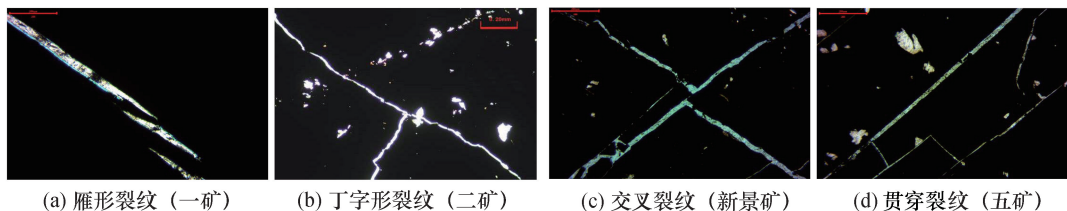


图3 阳泉矿区15号煤层裂隙分布特征

Fig. 3 Fracture distribution characteristics of coal seam No. 15 in Yangquan mining area

2.2 煤样静载力学数值模拟分析

在PFC^{2D}数值软件中,接触刚度模型、滑动模型和链接模型可用来描述颗粒间的力学响应,一般采用链接模型来模拟煤岩试样的破裂或损伤。由于4个矿井15号煤层赋存条件差异性较大,通过建立PFC^{2D}双轴压缩数值试验

模型,将裂隙植于模型内,通过离散颗粒间的接触关系来研究宏观复杂条件下的煤岩体断裂问题。

设定围压 $p_0 = 5.0$ MPa,在试样内部分别预植雁形、丁字形、交叉和交错裂隙,其试验模型如图4所示。

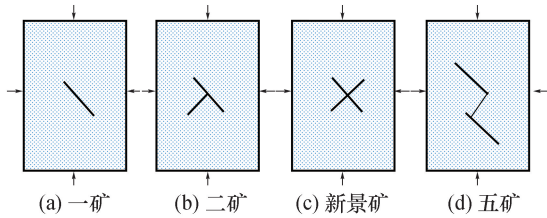


图4 阳煤15号煤层试样双轴试验模型
Fig. 4 Biaxial test model for sample coal seam No. 15 of Yangquan coal

图5为阳煤15号煤层试样双轴破坏特征。对于单一裂隙的一矿煤样,煤样的预植裂隙两端首先产生翼裂隙,然后次生裂隙在两个相邻端开始延展,并且相向生长,最终产生破坏,如图5(a)所示。对于二矿、新景矿和五矿煤样,由于预植裂隙较多,模型首先在初始裂隙端部产生较多的翼裂隙,然后预植裂隙内部产生数个张拉次生裂隙,这些次生裂隙与翼裂隙贯通造成煤样破坏,如图5(b)(c)(d)所示。

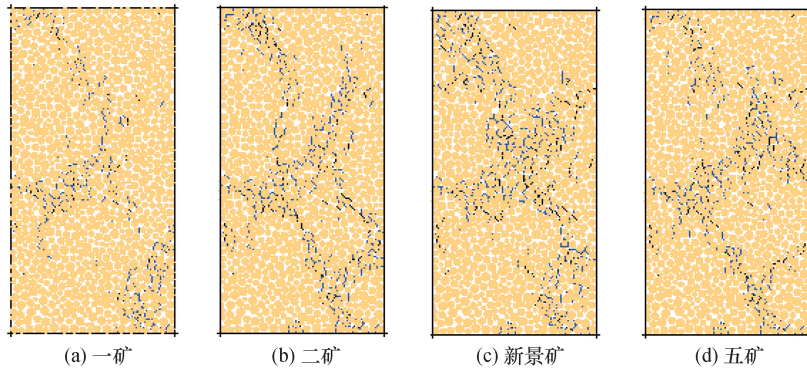


图5 阳煤15号煤层试样双轴破坏特征

Fig. 5 Uniaxial failure characteristics of sample coal seam No. 15

裂隙分布和煤样强度密切相关,裂隙越密,说明岩桥间距越小,越容易贯通,并且产生翼裂隙的概率越大,损伤破坏的路径则更多,如图6所示。裂隙分布和煤样破坏消耗的能量呈现反向关系,裂隙越密,无论是边界能、应变能、键能还是摩擦能,均呈减少趋势。

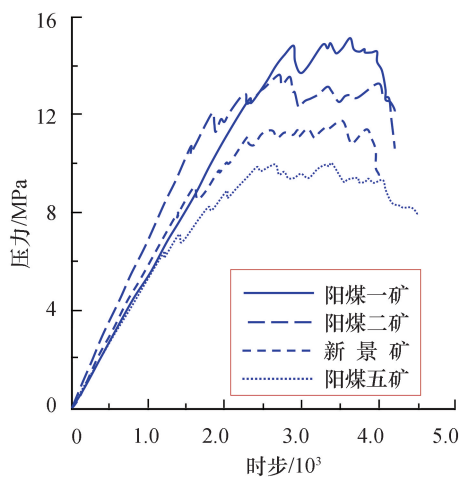


图6 阳煤15号煤层试样单轴破坏曲线
Fig. 6 Uniaxial failure curves of sample coal seam No. 15

3 煤样动载作用下的力学响应

3.1 煤样动载稳定性分析

采用霍普金森试验装置来分析煤样的动载稳定性。该试验台由能量供给系统、输入装置、撞击

装置、输出装置、能量吸收装置和辅助测量记录系统组成,测试前需将试样置于输入装置和输出装置之间。SHPB实验系统如图7所示。

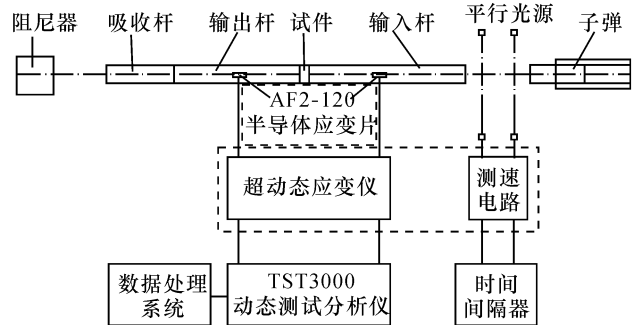


图7 SHPB实验系统示意图

Fig. 7 Schematic diagram of SHPB experimental system

实验时,将撞击装置以一定的速度射向能量输入装置,此时在输入装置中立刻会产生1个压缩应力波。由于能量的输入装置和输出装置均为刚性体,相互间只发生弹性力学作用,可视该应力波为一维传播;按照一维应力波假设,在撞击试验中,应力波往往以无能量耗散的方式传递。在实验前,需进行波形的动态检验,要求该装置应满足一维应力波假设,即入射波和透射波的波形与波幅既要保持一致,还要求没有反射波出现。

在霍普金森试验中,输入装置、输出装置与撞击装置的杆体材料属性与截面积均相同。基于一维应力波理论和撞击平面力的平衡条件,经计算可得到杆体的最大应变 ε_{\max} 以及撞击速度 v_0 等,然后进一步进行换算可得到煤样动载作用下应力应变曲线等动力学指标。图8为试验撞击前的部分试件,图9为撞击后的碎屑分布特征。

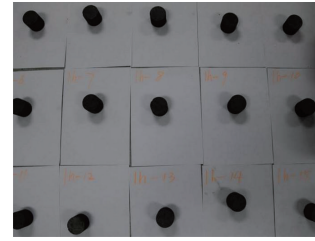


图8 试验撞击前试件(部分)

Fig. 8 Pre-impact test specimens (part)

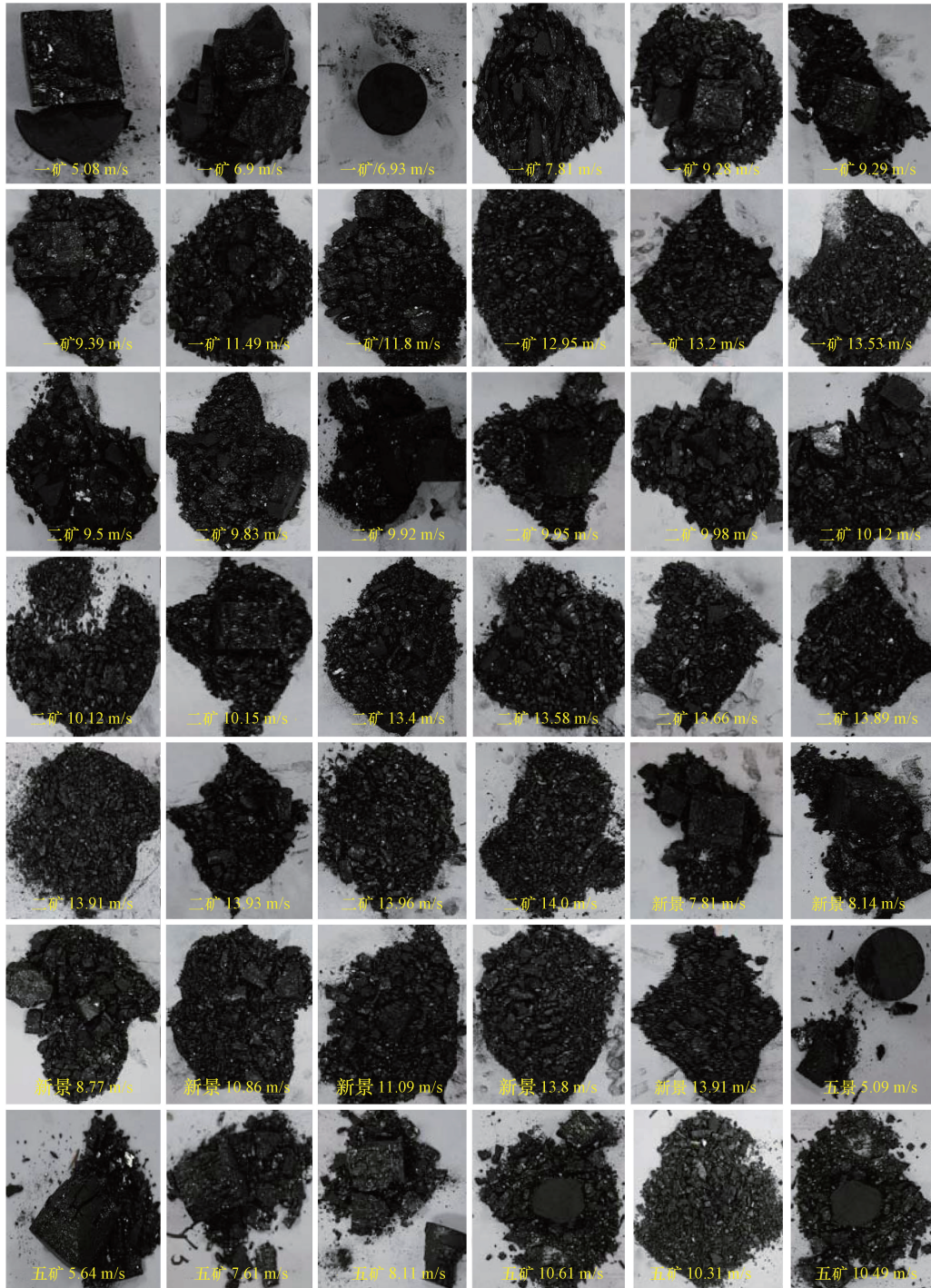


图9 试验撞击后碎屑分布特征(部分)

Fig. 9 Distribution characteristics of debris after impact (part)

3.2 动载应力应变曲线

将采集的4个矿的试验数据分别生成煤样动

载作用下的应力应变曲线,并将其在同一坐标系中

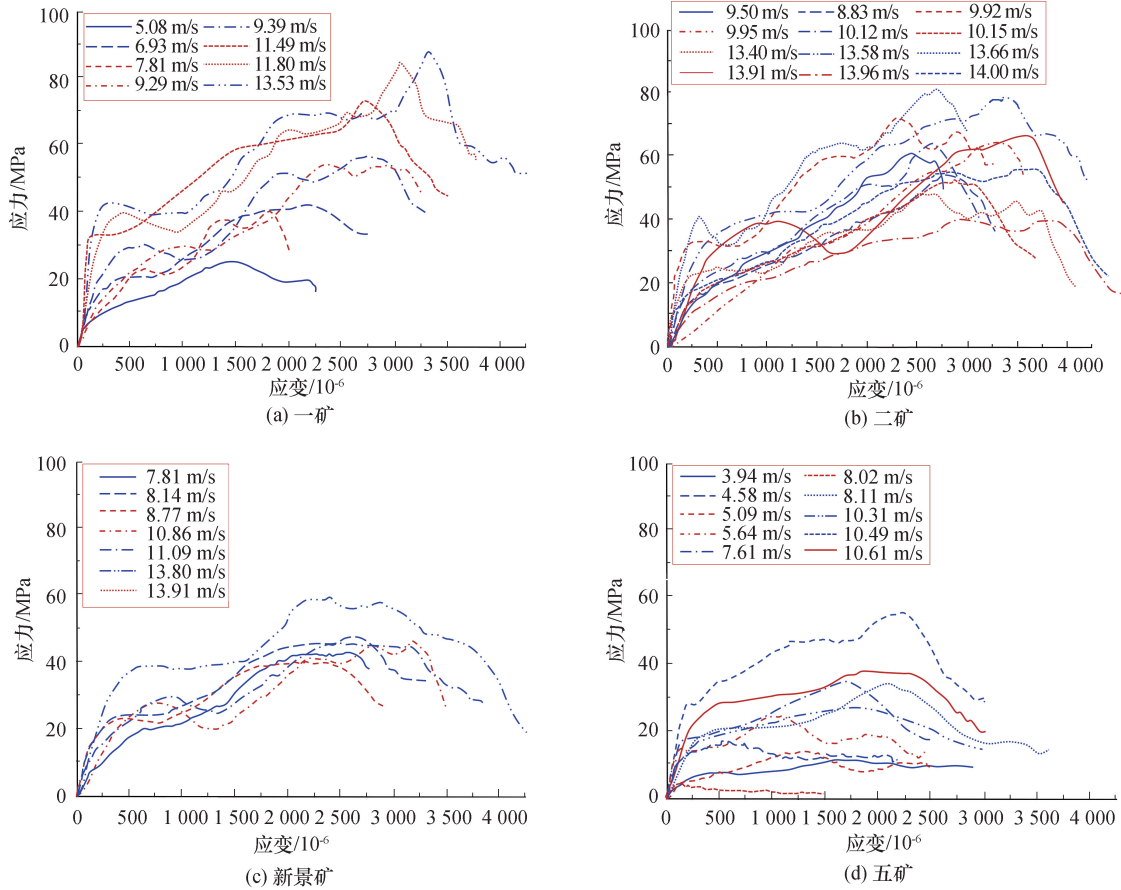


图10 煤样动载作用下应力应变曲线

Fig. 10 Stress-strain curve of coal samples under dynamic loading

在加载速率进一步增加的情况下,煤样的动态抗压强度均明显提高,当应变率较低时,增长明显而且较为稳定;而当达到较高的应变率时,抗压强度数据呈现一定离散性,说明煤样在较高速率加载时其力学性能具有一定的不稳定性,这与煤样的松散构造密切相关。新景矿煤样均质性最高,动载曲线离散性最小,而五矿煤样节理裂隙发育,离散性最大,这也与常规物理力学测试结果相吻合。

图11为煤样峰值应力和峰值应变随应变率变化趋势图。随着应变率的增大,4个矿的15号煤样峰值应力和峰值应变均呈对数递增关系。但在任一应变率下,无论是峰值应变还是峰值应力,一矿煤样>二矿煤样>新景煤样>五矿煤样。在工作面回采过程中,一矿工作面煤壁稳定性要优于其他矿井,五矿工作面煤壁稳定性最差,这在实际开采实践中得到了验证。

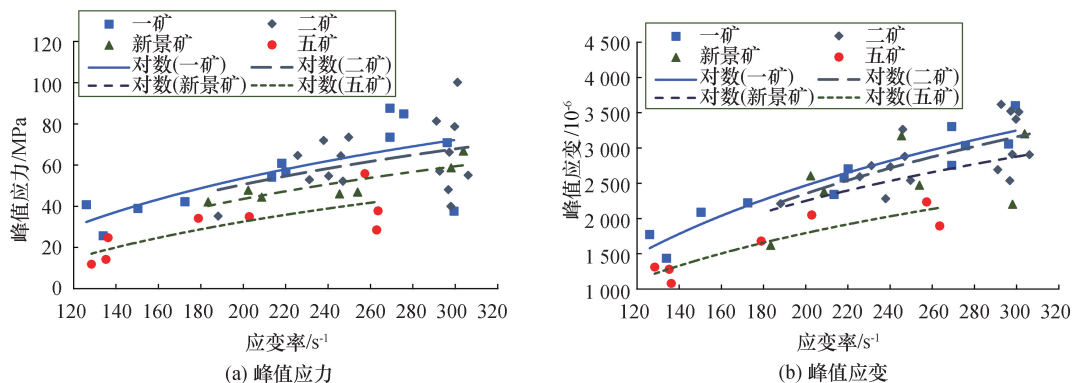


图11 煤样峰值应力和峰值应变分别随应变率变化趋势

Fig. 11 Trend chart of peak stress or peak strain of coal samples with strain rates

3.3 峰值应力与煤壁稳定性的关系

通过对一矿、二矿、新景矿和五矿等20多个工作面长周期的煤壁片帮观测,得出其煤壁保持稳定性的合理采高分别为5.5 m、5.2 m、4.5 m和3 m。根据对4个矿井煤样的静、动载试验结果得出的动、静荷载与煤壁稳定性的关系如图12所示。从

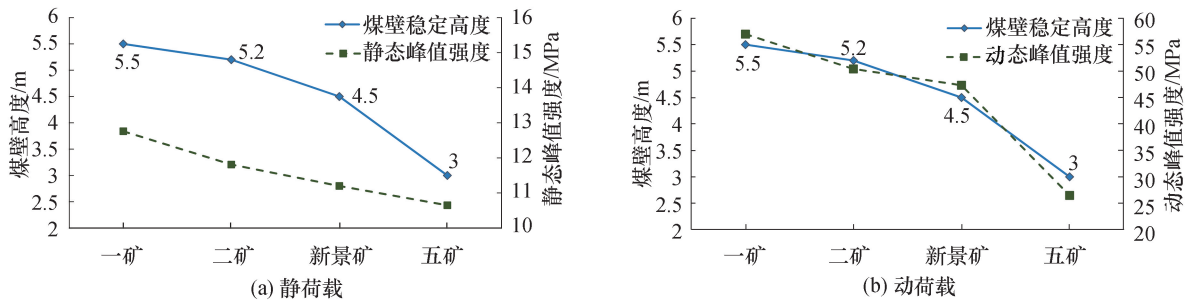


图12 动、静荷载与煤壁稳定性的关系

Fig. 12 Relation between dynamic and static load and coal wall stability

煤岩体力学性能不同于常规人造工程材料,它具有非均质、天然节理的特点。在分析其损伤或破碎特征时,一定要考虑其动态力学响应性能,而非单纯依靠静态加载试验数据。

4 结论

通过理论分析、数值模拟、实验室测试及现场验证,分析了煤体强度的尺度效应机理及动载作用下工作面煤壁稳定性,结论如下:

(1) 煤层中天然缺陷的数量、贯通性及其分布规律对尺寸效应有明显影响,试样越大,其强度越低,其变化呈对数曲线变动趋势。

(2) 裂隙分布和煤样破坏消耗的能量呈现反向关系,裂隙越密,产生翼裂隙的概率越大,损伤破坏的路径更多,无论是边界能、应变能、键能还是摩擦能,均呈减少趋势。

(3) 动载试验得出的峰值强度与煤壁稳定性存在一致性关系,一定程度上反映采动影响下细微节理构造和缺陷对煤壁稳定性的影响程度。

参考文献

- [1] 赵毅鑫,龚爽,黄亚琼. 冲击荷载下煤样动态拉伸劈裂能量耗散特征实验[J]. 煤炭学报,2015,40(10): 2320-2326.
Zhao Yixin, Gong Shuang, Huang Yaqiong. Experimental study on energy dissipation characteristics of coal samples under impact loading [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(10): 2320-2326.

图中可以看出,煤样强度与煤壁稳定性密切相关,煤样强度越高,工作面煤壁保持稳定的采高就越大。根据动静载作用分析认为,动载试验得出的峰值强度与煤壁稳定性存在一致性关系,更能精确地反映煤壁稳定性状况^[14-16]。

- [2] 赵光明,许文松,孟祥瑞,等. 扰动诱发高应力岩体开挖卸荷围岩失稳机制[J]. 煤炭学报,2020,45(3):936-948.
Zhao Guangming, Xu Wensong, Meng Xiangrui, et al. Instability mechanism of high stress rock mass under excavation and unloading induced by disturbance [J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(3): 936-948.
- [3] 孙广忠,张文彬. 一种常见的岩体结构:板裂结构及其力学模型[J]. 地质科学,1985,20(3):275-282.
Sun Guangzhong, Zhang Wenbin. A commonly-sighted rock mass structure: slab-rupture structure and its mechanical model [J]. Chinese Journal of Geology, 1985, 20(3): 275-282.
- [4] 钱鸣高,石平五,许家林. 矿山压力与岩层控制[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,2010.
- [5] 钱鸣高,缪协兴. 采场上覆岩层结构的形态与受力分析[J]. 岩石力学与工程学报,1995,14(2): 97-106.
Qian Minggao, Miao Xiexing. Theoretical analysis on the structural form and stability of overlying strata in longwall mining [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1995, 14(2): 97-106.
- [6] 侯运炳,何尚森,周殿奇,等. 特厚煤层大采高综放工作面覆岩结构及支架工作阻力研究[J]. 矿业科学学报,2017,2(1):42-48.
Hou Yunbing, He Shangsen, Zhou Dianqi, et al. Analysis of overburden structure and support working resistance of working face in fully-mechanized top coal caving with large mining height in ultra thick coal seam [J]. Journal of Mining Science and Technology, 2017, 2(1): 42-48.
- [7] 黎立云,徐志强,谢和平,等. 不同冲击速度下岩石

- 破坏能量规律的实验研究[J]. 煤炭学报, 2011, 36(12): 2007-2011.
- Li Liyun, Xu Zhiqiang, Xie Heping, et al. Failure experimental study on energy laws of rock under differential dynamic impact velocities [J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(12): 2007-2011.
- [8] 黄琪嵩, 程久龙. 层状底板采动应力场的解析计算模型研究[J]. 矿业科学学报, 2017, 2(6): 559-565.
- Huang Qisong, Cheng Jiulong. Research on analytic calculation model for mining induced stress in multi-layered floor rock [J]. Journal of Mining Science and Technology, 2017, 2(6): 559-565.
- [9] 王家臣. 极软厚煤层煤壁片帮与防治机制[J]. 煤炭学报, 2007, 32(8): 785-788.
- Wang Jiachen. Mechanism of the rib spalling and the controlling in the very soft coal seam [J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(8): 785-788.
- [10] 宁宇. 大采高综采煤壁片帮冒顶机理与控制技术[J]. 煤炭学报, 2009, 34(1): 50-52.
- Ning Yu. Mechanism and control technique of the rib spalling in fully mechanized mining face with great mining height [J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(1): 50-52.
- [11] 杨培举, 刘长友, 吴锋锋. 厚煤层大采高采场煤壁的破坏规律与失稳机理[J]. 中国矿业大学学报, 2012, 41(3): 371-377.
- Yang Peiju, Liu Changyou, Wu Fengfeng. Breakage and falling of a high coal wall in a thick mined seam [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2012, 41(3): 371-377.
- [12] 朱涛. 软煤层大采高综采采场围岩控制理论及技术研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2010.
- [13] 尤明庆, 邹友峰. 关于岩石非均质性与强度尺寸效应的讨论[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(3): 391-395.
- You Mingqing, Zou Youfeng. Discussion on heterogeneity of rock material and size effect on specimen strength [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(3): 391-395.
- [14] 刘宝琛, 张家生, 杜奇中, 等. 岩石抗压强度的尺寸效应[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(6): 611-614.
- Liu Baochen, Zhang Jiasheng, Du Qizhong, et al. A study of size effect for compression strength of rock [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, 17(6): 611-614.
- [15] 郭东明, 闫鹏洋, 薛磊, 等. 动静载荷下巷道围岩裂纹扩展规律的试验研究[J]. 矿业科学学报, 2016, 1(2): 146-154.
- Guo Dongming, Yan Pengyang, Xue Lei, et al. The experimental research on the propagation laws of cracks in roadway surrounding rock subjected to static dynamic load [J]. Journal of Mining Science and Technology, 2016, 1(2): 146-154.
- [16] 黄庆享. 浅埋采场初次来压顶板砂土层载荷传递研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(6): 881-883.
- Huang Qingxiang. Study on load transmitting factor of thick sandy soil on key roof stratum during first weighting in shallow seam [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(6): 881-883.

(责任编辑: 王晓玲)