

张天军,包若羽,王乾,等. 煤层冲击倾向性指标体系研究及实验验证 [J]. 湖南科技大学学报(自然科学版),2019,34(3): 1-10. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2019.03.001

Zhang T J, Bao R Y, Wang Q, et al. A Research on the Index System and Its Experimental Verification of the Coal Seam Impact Tendency [J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2019,34(3): 1-10. doi: 10.13582/j.cnki.1672-9102.2019.03.001

煤层冲击倾向性指标体系研究及实验验证

张天军^{1*},包若羽²,王乾¹,羽玥¹

(1.西安科技大学理学院,陕西西安710054;2.西安科技大学安全科学与工程学院,陕西西安710054)

摘要:针对传统煤层冲击倾向性指标存在的局限性,基于考虑残余强度的损伤统计本构模型,从损伤因子、损伤速率和损伤速率加速度3个角度分别研究峰值强度点、损伤速率最大值点、损伤速率加速度最大值点处的损伤规律,对残余强度和动态损伤应变进行了修正,提出了新的煤层冲击倾向性指标—盈余能指数变化率,建立冲击倾向性指标体系,并开展冲击倾向性实验对新指标体系合理性进行验证.结果表明:考虑残余强度的损伤统计本构模型能较好地反映煤岩体峰值强度后应力—应变曲线变化趋势及残余强度特点,得到峰值强度点、损伤速率最大值点和损伤速率加速度最大值点处的损伤规律及损伤速率最大值表达式;根据修正后动态损伤应变的力学意义得到动态损伤应变与动态破坏时间关系式,采用动态损伤应变来表征动态破坏时间,从而使冲击倾向性实验不再受加载方式的限制;采用盈余能指数变化率指标可综合衡量盈余能、峰后破坏过程损耗应变能、动态破坏时间的变化情况;由最大损伤速率、动态损伤应变、盈余能指数变化率构成的新冲击倾向性指标体系更为有效和全面,为准确评价煤层冲击倾向性工作提供新方法.

关键词:冲击倾向性;损伤统计本构模型;最大损伤速率;动态损伤应变;盈余能指数变化率

中图分类号:TD324.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2019)03-0001-10

A Research on the Index System and Its Experimental Verification of the Coal Seam Impact Tendency

Zhang Tianjun¹, Bao Ruoyu², Wang Qian¹, Yu Yue¹

(1. College of Sciences, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;

2. College of Safety Science and Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: The damage law of the peak intensity point, the maximum value of the damage rate and the maximum value of the damage rate acceleration were studied respectively from the three angles of damage factor, damage rate and damage rate acceleration on the basis of the constitutive model of damage statistics of the residual strength for the limitation of the traditional impact tendency index of coal and rock mass; the residual strength and dynamic strain were corrected; the change trend of the surplus energy index, which was the new coal seam impact tendency, was put forward; the index system of the impact tendency was established; the impact tendency experiments were verified the rationality of the new index system. The results show that the constitutive model of the residual strength of the damage statistics can truly reflect the post-stress, the trend of stress-strain curve and the residual strength; the damage law and the maximum expressions of damage rate at the peak intensity point,

收稿日期:2017-10-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51374168; 51374236; 51604214)

*通信作者, E-mail: tianjun_zhang@126.com

the maximum value of the damage rate and the maximum value of the damage rate acceleration are obtained; the relationship between the dynamic damage strain and the dynamic damage time is obtained according to the mechanical significance of the corrected dynamic damage strain; the dynamic damage time is used to characterize the dynamic failure time so that the impact tendency experiment is no longer limited by the loading methods; the change rate of the surplus energy index can comprehensively measure the variation of the surplus energy, the plastic deformation energy, and the dynamic damage time; the new impact tendency index system consisting of the maximum value of the damage rate, dynamic damage strain, and the change rate index of the surplus energy, is more effective and comprehensive and will provide a new approach to evaluate the coal seam impact tendency.

Keywords: impact tendency; constitutive model of damage statistics; maximum damage rate; dynamic strain; change rate of surplus energy index

冲击倾向性是煤层具有积聚变形能并产生冲击式破坏的固有属性,它是关于能量和时间的函数.基于损伤统计本构模型的冲击倾向性分析是当前冲击矿压机理研究的重要发展趋势之一,是冲击矿压评价、预测及防治的理论基础^[1].

我国现行《煤层冲击倾向性分类及指数的测定方法》中规定煤层冲击倾向性指标包括弹性能指数、冲击能指数、动态破坏时间、单轴抗压强度等^[2],这些指标分别从能量、时间和承载能力的角度对煤层冲击倾向性进行了有效评价.苏承东^[3]、蔡武^[4]等根据现场实践和室内实验分析了上述指标间的相关性,并指出了当同时运用上述指标时存在评价结果彼此冲突的矛盾.多年来,相关学者就此展开了众多探索,郭建卿、唐礼忠提出有效冲击能指数、单轴抗压强度与单轴抗拉强度之比、峰值前后应变量之比等指标^[5-6],潘一山提出用冲击能量指数除以动态破坏时间得到冲击能量速度指标^[7]、唐礼忠提出剩余能量的概念及以剩余能与峰后破坏耗散应变能的比值作为剩余能量指数指标^[8]、张绪言等提出以剩余能与动态破坏时间的比值作为剩余能量释放速度指数^[9]、姚精明从宏细观能量耗散的角度出发提出弹性应变能衰减度和塑性变化率指标等^[10].以上研究极大地丰富了冲击倾向性指标体系,但均是从实验曲线出发来直接制定评价指标的,所以受实验加载方式的限制,存在评价指标计算不便,评价结果误差较大等问题.因此以损伤统计本构模型为基础,从理论分析角度研究冲击倾向性评价指标是当前的重要发展趋势之一.吴政^[11]提出的损伤统计本构模型对未考虑残余强度的应力-应变曲线拟合度较高,且曲线上不同特征点处的损伤规律简洁、明了,但该模型并未体现出煤岩体存在残余强度的这一事实.据此,杨圣奇^[12]利用损伤比例系数得到了可反映残余强度的损伤统计本构模型;蔡武等^[4]由此引进动态损伤应变和最大损伤速率指标来评价冲击倾向性;但文中存在动态损伤应变力学意义不明确,最大损伤速率理论解未知等问题.

针对上述问题,本文基于考虑残余强度的煤岩体损伤统计本构模型,从损伤因子、损伤速率、损伤速率加速度的角度分别研究峰值点、损伤速率最大值点、损伤速率加速度最值点处的损伤规律,得到损伤速率最大值表达式,并对模型中各参数的物理意义进行讨论.对残余强度和动态损伤应变进行修正,并提出新的冲击倾向性指标—盈余能指数变化率,以构建新的冲击倾向性指标体系.最后利用冲击倾向性实验对上述指标体系的合理性进行验证.

1 损伤统计本构模型研究

1.1 本构模型介绍

根据煤岩微元强度服从韦伯分布的假设和连续介质损伤力学理论,采用能够反映煤岩材料弹性、塑性和残余强度的单轴压缩条件下煤岩损伤统计本构模型^[13].

$$\sigma = E\varepsilon(1 - c_n D). \quad (1)$$

式中: σ 为应力; ε 为应变; E 为无损材料的弹性模量; c_n 为损伤比例系数,专门针对煤岩体在峰值强度后仍然具有一定残余强度的事实而提出,取值范围为 $(0, 1)$,无量纲常量; D 为损伤因子,代表破坏单元占总单元数的比例.根据煤岩微元强度服从韦伯分布的假设, D 可表示为

$$D = 1 - \exp\left[-\left(\frac{\varepsilon}{F}\right)^m\right]. \quad (2)$$

式中: m , F 为韦伯分布的分布标度和以应变形式表征的形态参数,均为无量纲参量. $D=0$,这是一种参考状态,代表无损伤的完整材料; $D=1$,相当于材料完全破坏,应注意残余强度点并不代表材料完全损伤.将 D 代入本构模型得

$$\sigma = E\varepsilon(1 - c_n) + E\varepsilon c_n \exp\left[-\left(\frac{\varepsilon}{F}\right)^m\right]. \quad (3)$$

式(3)即为单轴压缩条件下考虑残余强度的煤岩体损伤统计本构模型;其中,弹性模量 E 由单轴压缩实验测定, F , m 通过应力-应变曲线的几何条件确定,即:

$$\begin{cases} \varepsilon = 0, \sigma = 0; \\ \varepsilon = 0, \frac{d\sigma}{d\varepsilon} = E; \\ \varepsilon = \varepsilon_{\max}, \sigma = \sigma_{\max}; \\ \varepsilon = \varepsilon_{\max}, \frac{d\sigma}{d\varepsilon} = 0. \end{cases} \quad (4)$$

进而得到:

$$m = \frac{-\sigma_{\max}}{[\sigma_{\max} + (c_n - 1)E\varepsilon_{\max}] \times \ln\left[\frac{1}{c_n} \left(\frac{\sigma_{\max}}{E\varepsilon_{\max}} + c_n - 1\right)\right]}; F = \varepsilon_{\max} \left(\frac{1}{m} \times \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\max} + (c_n - 1)E\varepsilon_{\max}}\right)^{-m^{-1}}. \quad (5)$$

模型中 c_n 主要用于描述应力应变曲线残余强度特点而引进,因此需预先设定.

除此之外,上述参数还可以利用最小二乘法对实验数据进行参数拟合来得到^[14],进而与上述理论结果进行对比验证.

1.2 特征点分析

首先介绍损伤速率和损伤速率加速度概念.

损伤速率:描述煤层损伤积累快慢的物理量,通常由损伤因子对应变求一阶导得到,即:

$$\frac{dD}{d\varepsilon} = \frac{m\left(\frac{\varepsilon}{F}\right)^{m-1} \exp\left[-\left(\frac{\varepsilon}{F}\right)^m\right]}{\varepsilon} = \frac{dD/dt}{d\varepsilon/dt}. \quad (6)$$

因实验过程中采用按位移加载的方式,故应变对时间的导数 $d\varepsilon/dt$ 为定值,则式(6)即可描述损伤随时间积累快慢.

为了更加方便的研究损伤速率的变化规律及损伤速率的最大值,提出损伤速率加速度概念.损伤速率加速度:描述损伤速率变化快慢的物理量,可由损伤因子对应变求二阶导得到,即:

$$\frac{d^2D}{d\varepsilon^2} = \frac{m\left(\frac{\varepsilon}{F}\right)^{m-2} [m(1 - \left(\frac{\varepsilon}{F}\right)^m) - 1] \exp\left[-\left(\frac{\varepsilon}{F}\right)^m\right]}{\varepsilon^2}. \quad (7)$$

以 $c_n=0.98$, $m=4$, $F=0.02$, $E=3\ 000$ 参数组合为例,研究峰值强度点 A , 损伤速率最大值点 B , 损伤速率加速度最大值点 C , 损伤速率加速度最小点 D 的应力应变及损伤情况.

应力-应变曲线及损伤因子曲线如图 1 所示.

损伤速率及损伤速率加速度曲线如图 2 所示.

峰值强度 A 点是指应力-应变曲线的峰值强度点,此处应力达到最大值,其坐标为 $A(\varepsilon_{\max}, \sigma_{\max})$,如图 1 所示.

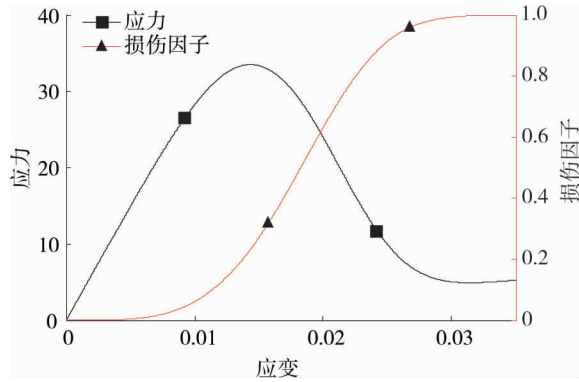


图1 应力—应变、损伤因子曲线

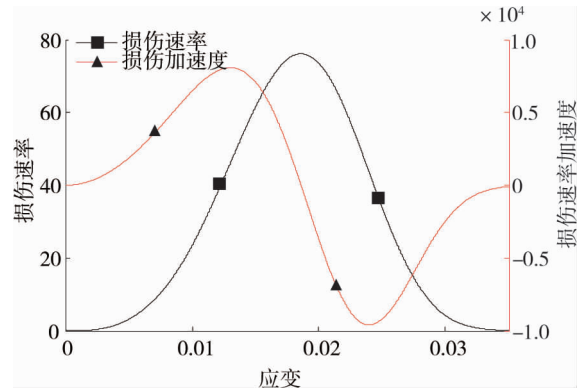


图2 损伤速率、损伤速率加速度曲线

已知峰前弹性应变与峰值强度点应变关系为

$$\varepsilon_{th} = \frac{\varepsilon_{max}}{E}. \quad (8)$$

式中: ε_{th} 为峰前弹性应变; ε_{max} 为峰值点处的应变; E 为材料无损弹性模量.如图1所示,此时的损伤因子约为20%,即当材料处于峰值强度时的损伤比例维持在较低水平.

损伤速率最大值 B 点是指损伤速率曲线的峰值点,其坐标为 (ε_B, D_B) ,对应的损伤速率加速度为0,如图2所示.令损伤速率加速度表达式(7)等于0,可得

$$\varepsilon_B = F \times \left(\frac{m-1}{m}\right)^{\frac{1}{m}}. \quad (9)$$

将 ε_B 代入损伤因子表达式(2)中可得对应损伤因子为

$$D_B = 1 - \exp\left(-\frac{1-m}{m}\right). \quad (10)$$

由式(10)可得,最大损伤速率点对应的损伤因子只由 m 决定,与 F 无关;将 ε_B 代入损伤速率表达式(6)中可得最大损伤速率为

$$\left(\frac{dD}{d\varepsilon}\right)_{max} = \left(\frac{dD}{d\varepsilon}\right)_B = \frac{m^{m-1}}{F} \left(\frac{m-1}{e}\right)^{\frac{m-1}{m}}. \quad (11)$$

由此可见最大损伤率与 F 成反比例关系,损伤速率最大值由 m 和 F 共同决定与材料弹性模量无关.此时,损伤因子约为50%,损伤速率加速度为0.

通过对损伤速率加速度公式(10)求导后令其等于0,可得到损伤速率加速度最大值点 C , D 对应的应变值,如图2所示.其中损伤速率加速度最大值 C 点应变为

$$\varepsilon_C = \varepsilon_A = F \times \left(\frac{3m-3-\sqrt{\Delta}}{2m}\right)^{\frac{1}{m}}. \quad (12)$$

将图2中 C 点应变值与图1中 A 点应变值对比后发现,损伤速率加速度最大值 C 点横坐标与峰值强度点 A 的应变值相同,即 $\varepsilon_A = \varepsilon_C$.因此,当试样处于峰值强度点时,其损伤速率加速度达到最大值,由图1可知此时损伤速率并不为0,对应的损伤因子为

$$D_A = D_C = 1 - \exp\left(-\frac{3m-3-\sqrt{\Delta}}{2m}\right). \quad (13)$$

此时对应的损伤因子仅由 m 决定,与 F 无关.

损伤速率加速度最小值 D 点代表损伤速率加速度达到最小值,可将此应变值作为材料残余强度点对应的应变,即:

$$\varepsilon_D = F \times \left(\frac{3m-3+\sqrt{\Delta}}{2m}\right)^{\frac{1}{m}} = \varepsilon_e. \quad (14)$$

式中: ε_e 为残余强度,可见残余强度由参数 F , m 共同决定.将 D 点应变代入损伤因子表达式得

$$D_D = 1 - \exp\left(-\frac{3m - 3 + \sqrt{\Delta}}{2m}\right). \quad (15)$$

将 ε_D , D_D 代入本构方程,可得残余强度 σ_D 为

$$\sigma_D = E(1 - c_n D_D) \times F \times \left(\frac{3m - 3 + \sqrt{\Delta}}{2m}\right)^{\frac{1}{m}}. \quad (16)$$

经分析,此例中 D 点处损伤因子约为84%,间接证明了文献[9]中“以损伤因子约等于84%时对应应变值作为残余应变”推断的正确性,因此本文将损伤速率加速度最小值 D 点作为残余强度点,即 $\varepsilon_D = \varepsilon_e$,具有明确的力学意义.需要指出的是:通常认为煤岩体达到残余强度时的损伤因子为1,即所有微元单元破坏^[4],这与实际情况并不符合.因为既然煤岩体存在残余强度,就代表煤岩体仍未完全破坏,这与所有微元单元破坏描述相矛盾.

其中 $\Delta = 5m^2 - 6m + 5$,要使得 $\sqrt{\Delta}$ 有意义, m 的取值范围为:(0,0.2),(1, +∞).

同时可以证明得到 C 和 D 点关于 B 点对称,即:

$$\varepsilon_B = \frac{\varepsilon_C + \varepsilon_D}{2}. \quad (17)$$

即损伤速率加速度最大值点和损伤速率最小值点处的应变值关于损伤速率最大值点处的应变值对称.

现行冲击倾向性测定实验的加载方式分为按位移和应力2种:其中按位移加载的方式适合于弹性应变能和盈余能指数的测定,而按应力加载的方式适合测定动态破坏时间;因此传统评价指标测定实验需要使用2种加载方式,进而增加了实验工作量.

本文将峰值强度点(损伤速率加速度最大值点 C 点)作为动态损伤应变起始点,将残余强度初始应变点(损伤速率加速度最小值点)作为动态损伤破坏的结束点,即动态损伤应变为

$$\varepsilon_{DT} = \varepsilon_e - \varepsilon_{\max}. \quad (18)$$

根据上述对动态损伤应变的修正,可得到按位移加载实验中动态损伤应变与动态破坏时间的关系如式(18)所示.从而利用动态损伤应变间接反映动态破坏时间,只需在试样达到峰值强度以后,增大数据采集频率即可提高数据精确度.动态损伤应变与动态破坏时间的关系如式(19):

$$\Delta T = \frac{\varepsilon_{DT} \times H}{V_{\text{下}}} = \frac{(\varepsilon_e - \varepsilon_{\max}) \times H}{V_{\text{下}}}. \quad (19)$$

式中: H 为试样高度; $V_{\text{下}}$ 为压头下压速度.根据式(19)即可由动态破坏损伤应变求得动态破坏时间.

2 模型参数物理意义

参数 c_n 反映煤岩的残余强度; m 反映煤岩材料内部微元强度的分布集中程度;参数 F 反映煤岩宏观统计平均强度的大小.

2.1 损伤比例系数对应力应变曲线的影响

保持参数 E , F , m 不变,研究损伤比例系数 c_n 对应力-应变曲线的影响,如图3所示.

因为在峰值强度前煤岩体损伤因子处于较低水平(一般小于0.3),所以 c_n 对峰值强度前的应力-应变曲线走势影响有限,可以忽略.损伤比例系数的作用主要体现在对峰值强度点及峰后破坏阶段的影响,如图3所示.峰值点后曲线最终趋于平缓的这种趋势即是煤岩体材料存在残余强度的体现.损伤比例系数的取值范围是(0,1),随着 c_n 的减小,峰值强度略微增强,但增幅有限;同时残余强度增大、延性明显增加、残余应变降低.

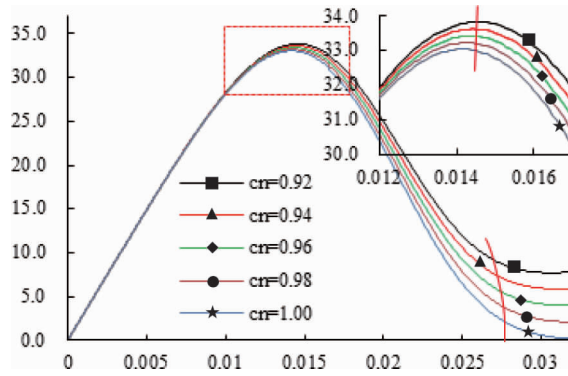


图3 损伤比例系数 c_n 对全程应力—应变曲线的影响

2.2 参数 m, F 对损伤因子的影响

参数 m, F 分别对损伤因子 D 的影响如图4所示.

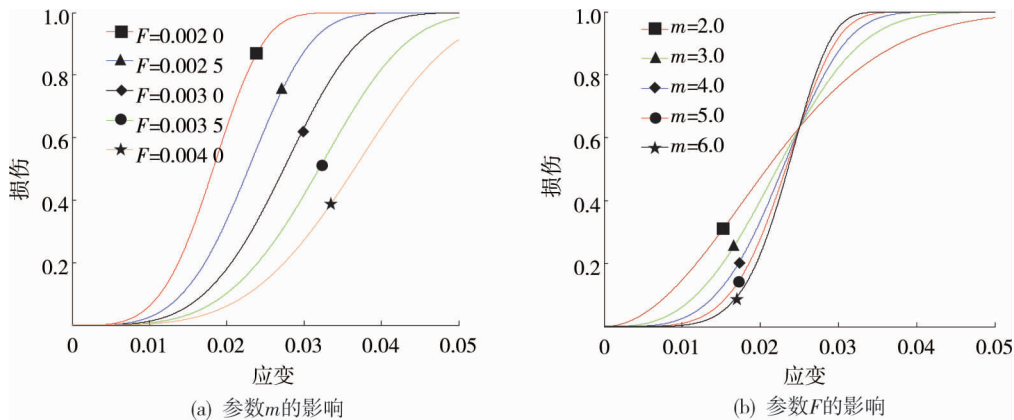


图4 参数 m, F 对损伤因子的影响

由图4a可知:保持参数 m 不变,随着参数 F 增大,损伤参量曲线变得平缓,损伤持续过程增大,材料延性增大,残余应变增大.

由图4b可知:保持参数 F 不变,随着参数 m 越大,损伤参量曲线越陡峭,损伤持续过程减短,材料脆性增强,残余应变越小,且所有损伤因子曲线过定点

$$\left(F, 1 - \frac{1}{e} \right). \tag{20}$$

2.3 参数 m, F 对损伤速率的影响

分析参数 m, F 对损伤速率的影响如图5所示.

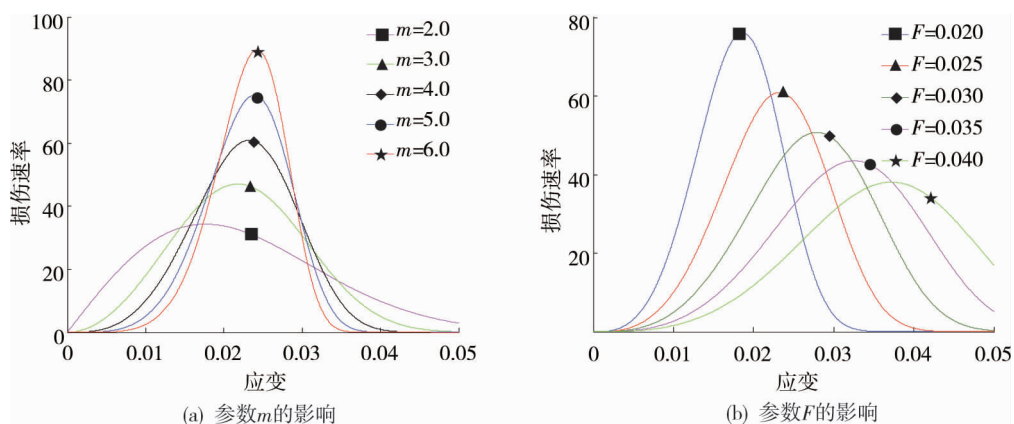


图5 参数 m, F 对损伤速率的影响

如图5a所示,参数 F 不变,随着 m 逐渐增大,损伤速率曲线偏态减小,最大损伤速率显著增大,对应的应变值逐渐增大,最后趋于稳定;随着 m 逐渐增大,损伤速率越来越陡峭。

如图5b所示,参数 m 不变,随着 F 逐渐增大,损伤速率曲线偏态增大,最大损伤速率显著减小,对应应变逐渐增大;随着 F 增大,曲线趋于平缓,有效应变增大,煤样脆性逐渐减弱。

3 能量角度分析冲击倾向性指标

3.1 传统冲击倾向性指标

冲击地压是聚集在煤岩体内的弹性应变能忽然释放的一种动力现象,其发生在受载煤岩体残余变形阶段.根据冲击倾向性指标可以把煤层冲击倾向性划分为强、弱、无3类。

冲击倾向性指标:我国煤炭行业标准中规定采用如下4个指标值作为冲击倾向性评价指标:

- 1) 动态破坏时间(D_T):是指煤样在单轴压缩实验条件下,从极限载荷到完全破坏所经历的时间。
- 2) 单轴抗压强度(R_C):指煤样在单轴压缩条件下能承受的最大应力。
- 3) 冲击能指数(K_E):指煤样在单轴压缩条件下的全应力—应变曲线峰值前所积蓄的变形能(A_S)与峰值后损耗变形能(A_X)的比值。

$$K_E = \frac{A_S}{A_X} = \frac{\int_0^{\varepsilon_{\max}} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon}{\int_{\varepsilon_{\max}}^{\varepsilon_n} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon}. \quad (21)$$

- 4) 弹性能指数(W_{ET}):是指煤样在单轴压缩条件下,破坏前所积蓄的弹性变形能(U_e)与产生塑性变形所消耗的能量(U_S)的比值。

在煤岩体单轴压缩实验过程中,根据热力学第一定律,峰值强度前外力做功所产生的能量被煤岩体弹性变形和塑性变形所消耗,则有

$$U_W = U_e + U_S = \int_0^{\varepsilon_{\max}} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon; \quad (22)$$

$$U_e = \frac{1}{2} \sigma \times \varepsilon = \frac{1}{2} E \varepsilon_e^2. \quad (23)$$

式中: U_e 为弹性应变能; U_S 为塑性应变能.则弹性能指数计算公式为

$$W_{ET} = \frac{U_e}{U_S} = \frac{\frac{1}{2} E \varepsilon_e^2}{\left[\int_0^{\varepsilon_{\max}} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon \right] - \frac{1}{2} E \varepsilon_e^2}. \quad (24)$$

3.2 盈余能指数变化率指标

因煤岩体冲击倾向性是指煤岩具有突然破坏并瞬间释放出大量弹性变形能的能力,是关于能量与时间的函数.因而首先介绍盈余能(剩余能)概念和盈余能释放速度、盈余能量指数指标。

盈余能(剩余能):是指峰值强度之前存储的弹性应变能与峰值后破坏过程中消耗的能量之差值,它是冲击地压的能量来源.它可描述峰值前弹性能积累与峰值后破坏过程耗散能的关系。

盈余能释放速度指标:是指盈余能除以动态破坏时间,其物理意义是煤岩体在破坏过程中单位时间内释放的剩余能量数.它将盈余能与时间结合起来,体现了冲击倾向性是关于能量和时间函数的特性。

盈余能指数指标:煤样盈余能与峰后破坏耗散能的比值,其物理意义是在峰后破坏过程中,煤体每耗散单位数量的变形能,伴随着释放的盈余能的数值.它将盈余能和峰后耗散能结合起来,描述了峰值强度后煤岩体破坏过程中能量的变化关系。

基于上此,有必要提出一种可将盈余能、峰后破坏耗散能、动态破坏时间三者结合起来的综合性冲击倾向性评价指标—盈余能指数变化率。

盈余能指数变化率 K :盈余能除以弹性应变能和动态破坏时间所得的比值,其物理意义是:在单位时间内煤体剩余能量释放量(W_S)与峰后破坏消耗的变形能(A_X)的比值。

$$K = \frac{W_s}{A_x D_T} \quad (25)$$

式中: W_s 为盈余能; D_T 为动态破坏时间; A_x 为峰后破坏过程消耗的变形能. 盈余能指数变化率既能表征煤体的剩余能量与破坏耗散能之间的相对大小, 又能表征动态破坏时间. 从而克服弹性能量指数、冲击能量指标和动态破坏时间指标、剩余能量释放速度指数、剩余能量指数等指标的片面性, 将盈余能、破坏过程损耗变形能和动态破坏时间综合起来以衡量煤层冲击性.

综上所述, 本文以可描述残余强度特征的损伤统计本构模型为基础, 利用修正后的动态损伤应变 (Σ_D) 来表征动态破坏时间 (D_T), 确定出损伤速率最大值表达式, 提出更具综合性的盈余能指数变化率指标, 从而形成了新的冲击倾向性评价体系.

4 实验验证

4.1 冲击倾向性指标测定实验

实验设备: 实验主要采用 DNS200 电子万能实验系统(它可自动记录轴向应力、应变), 实验过程参照《煤层冲击倾向性分类及指数的测定方法》具体要求^[2]. 实验选取的 3 组煤样分别采自井下不同区域, 将其制成 $\Phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的圆柱形标准试样待用, 每组 3~4 个煤样.

实验方法: (1) 应变能测定实验的采用按位移控制的加载方式, 加载速率为 0.002 mm/s , 采样间隔为 200 ms . (2) 测定动态破坏时间实验采用按应力控制的加载方式, 加载速率为 0.1 kN/s , 采样间隔为 5 ms .

根据现有煤的冲击倾向性测定标准和研究成果^[15], 得到公认的煤的冲击倾向性分类标准及应用方法如表 1 所示.

4.2 实验结果

各组煤样的弹性模量 (E) 和单轴抗压强度 (R_C) 可由实验数据直接获取. 根据各组实验数据利用最小二乘法反演得到模型参数 F , m , c_n , 从而得到能反映实验曲线的本构方程. 进而分别利用式 (21)~式 (25)

求解冲击能指标、弹性能指标、峰值损伤速率指标、盈余能指数变化率指标. 根据第一、二组实验数据直接获取动态破坏应变, 进而利用式 (19) 来求解动态破坏应变; 根据第三组实验数据直接获取动态破坏时间, 进而由式 (19) 求解动态损伤应变.

根据上述实验测定结果得到各组煤样的模型拟合参数、传统评价指标、并根据表 1 中煤的冲击倾向性分类标准得到各组煤样的冲击倾向性评价结果、本文新增指标体系, 如表 2 所示.

表 2 冲击倾向性实验测定结果及模型计算结果

组别	编号	模型拟合参数				传统评价指标及评价结果					本文新增指标		
		c_n	m	F	E_T/GPa	R_C/MPa	W_{ET}	K_E	D_T	评价结果	Σ_D	D_{\max}	K
按位移	M1	0.75	148.0	0.012 4	2.50	31.00	6.03	30.10	0.005 18	强	0.000 000 1	4 392.0	4 791.190
	M2	1.00	189.4	0.012 6	1.36	16.50	7.26	14.72	34.010 00	弱	0.000 664 0	5 547.0	0.090
	M3	0.96	165.0	0.008 0	1.61	14.50	5.65	4.65	2.630 00	弱	0.000 051 0	7 563.0	1.120
	M4	0.46	209.1	0.012 7	0.78	16.00	3.61	5.60	30.500 00	无	0.000 596 0	4 019.0	0.110
第二组	M5	0.92	65.0	0.015 4	0.65	8.21	9.22	5.62	35.510 00	无	0.000 691 0	1 557.6	0.117
	M6	0.95	25.0	0.009 5	1.00	9.50	2.61	4.93	80.100 00	无	0.001 549 0	971.7	0.030
按应力	M7	0.96	41.0	0.026 8	1.00	13.57	5.68	4.10	0.580 00	弱	0.004 281 0	564.6	4.300
	M8	1.00	11.1	0.023 3	0.78	12.59	5.07	9.57	2.710 00	弱	0.002 795 0	176.8	2.570
	M9	0.70	45.0	0.029 4	1.21	31.80	16.35	4.07	4.050 00	弱	0.002 605 0	564.9	0.700

注: c_n , m , F 分别为模型对应参数; E_T 为材料弹性模量; R_C 为单轴抗压强度; W_{ET} 为弹性能量指数; K_E 为冲击能量指数; D_T 为动态破坏时间; Σ_D 为修正后的动态破坏应变; D_{\max} 为损伤速率最大值; K 盈余能指数变化率

部分实验数据与理论对比图如图6所示。

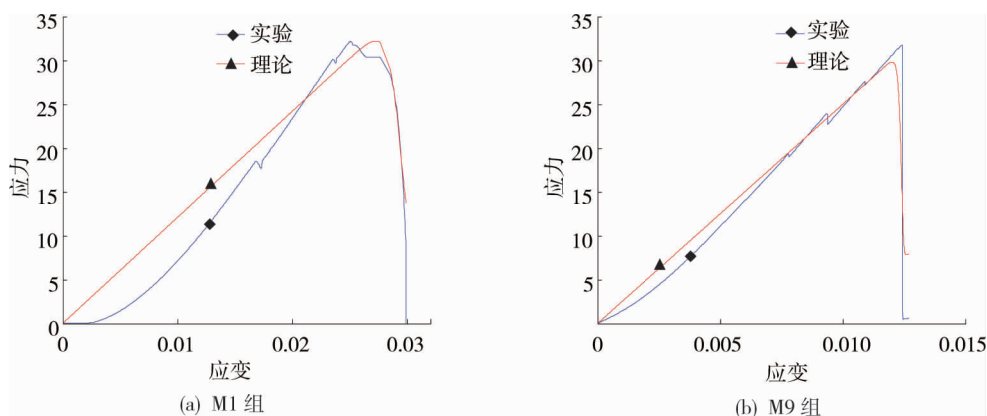


图6 实验曲线与损伤本构模型理论曲线对比

由表2可知:

1) 根据上述3组实验数据,利用Matlab软件提供的最小二乘法函数Lsqcurvefit即可反演出各组煤样的模型参数.反演结果表明理论分析与实验曲线吻合度较好,图6展示了M₁组和M₉组煤样的理论拟合曲线与实验曲线吻合情况,从而验证了理论模型的合理性.需要指出的是在实验加载初期煤样要经过原生裂隙闭合的过程,即实验曲线在线弹性阶段前会有明显的上凹阶段,但本文所述的本构模型对此并不涉及,从而导致理论和实验结果存在一定的误差,如图6a所示;但是,当煤体原生裂隙越少、脆性越强,则误差越小,如图6b所示;显然理论分析是偏向于将冲击倾向性判定为危险程度更高的方面的,因此只要将上述误差控制在一定范围之内,则该模型仍是可接受的。

2) 修正后的动态损伤应变和动态破坏时间具有明显的相关性,因此,利用动态损伤应变表征动态破坏时间是切实可行的.直接根据实验曲线来求解冲击倾向性指标值的传统方法误差较大,而本文所述根据实验数据反演损伤统计本构模型的参数,再据此求解冲击倾向性指标的思路是可取且准确的.根据动态损伤应变与动态破坏时间的关系式(19),二者即可相互转化,从而避免了传统冲击倾向性实验受加载方式限制的问题,减少实验工作量。

3) 新提出的盈余能指数变化率 K ,它从能量和时间角度综合反映煤样峰值前后弹性应变能、塑性能、破坏过程损耗变形能和动态破坏时间的影响作用.根据盈余能指数变化率的定义可知:煤体脆性越强,在峰值强度前积累的弹性应变能越多、则峰值强度后盈余能释放形式越猛烈、动态损伤应变和动态破坏时间数值越小、盈余能指数变化率指标越大,煤体在破坏过程中伴随的碎块弹射现象越明显,最终煤体冲击倾向性越强,这与之前研究结果相吻合。

4) 本实验得到的各煤样的冲击倾向性危险等级是根据传统评价指标来确定的,结果显示:第一组和第三组冲击倾向性危险等级为“弱”,第二组冲击倾向性为“无”.新提出的冲击倾向性指标体系可由模型参数直接求解,其灵敏度较高,与传统指标体系吻合度较好,因此作为冲击新的冲击倾向性指标是切实可行的.如图1和图2所示,损伤速率最大值点(B点)在单轴压缩应力-应变曲线峰值点(A点)之后.因受本实验室中单轴压缩实验机自身强度所限,在煤岩体试样所承受的荷载达到其单轴压缩强度之后,实验机存在回弹的过程,即实验机将在压缩过程中自身积聚的部分能量输入给煤岩体.因此,如表2所示,根据实验曲线得到的损伤速率最大值可能存在一定的误差,在后续研究中可通过选用更高强度实验机的方式来降低此类误差.本文只是对表2结果做初步探讨,若要确定各指标的合理临界值则仍需要大量的工程实践和室内实验来验证。

5 结论

1) 考虑残余强度的损伤统计本构模型能较好地反映煤岩体材料峰值强度后应力应变曲线变化趋势

及残余强度特点,在损伤速率的基础上引进新的损伤速率加速度概念,进而得到峰值强度点、损伤速率最大值点、损伤速率加速度最大值点处的应力、应变、损伤表达式.其中损伤速率最大值可由模型参数直接求解得到: $[m(\frac{m-1}{e})^{m-1}]^{m^{-1}}/F$,可将其作为新的冲击倾向性评价指标.修正后的残余强度和动态损伤应变物理学意义更加明确,可由模型参数直接求解;修正后的动态损伤应变可间接表征动态破坏时间,使冲击倾向性实验不受加载方式的限制.

2)随着损伤比例系数增大,峰后应力应变曲线越平缓,峰值强度和残余强度均增大、对应的残余应变减小.随着参数 m 增大,损伤因子曲线越陡峭,材料脆性增强、残余强度越小、损伤持续过程缩短;同时,损伤速率曲线偏态减小,最大损伤速率明显增大及其对应的应变值逐渐增大.随着参数 F 增大,损伤因子曲线趋于平缓,材料损伤持续过程延长,材料延性增强,残余应变显著增大;同时,损伤速率曲线偏态增大,最大损伤速率显著减小,材料脆性减弱.

3)在现有冲击倾向性研究基础上引进新的盈余能指数变化率指标 $K = W_s / (U_h \times \Delta T)$,它是关于盈余能、损耗应变能、动态破坏时间的综合性冲击倾向性评价指标.盈余能指数变化率、损伤速率最大值和修正后动态损伤应变构成新的冲击倾向性指标体系.冲击倾向性实验表明,用本文所述的理论分析方法来确定煤样冲击倾向性指标的思路的切实可行,新提出的冲击倾向性指标体系评价结果稳定可靠,且可有效减小评价误差和降低实验要求工作量.

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 中华人民共和国行业标准编写组.GT/T 25217.2-2010 煤层冲击倾向性分类及指数的测定方法[S]. 2010.
- [3] 苏承东,袁瑞甫,翟新献. 城郊矿煤样冲击倾向性指数的实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(2): 3696-3704.
- [4] 蔡武,窦林名,韩荣军,等. 基于损伤统计本构模型的煤层冲击倾向性研究[J]. 煤炭学报, 2011, 36(2): 346-351.
- [5] 唐礼忠,王文星. 一种新的岩爆倾向性指标[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(6): 874-878.
- [6] 郭建卿,苏承东. 不同煤试样冲击倾向性试验结果分析[J]. 煤炭学报, 2009, 34(7): 897-902.
- [7] 潘一山,耿琳,李忠华. 煤层冲击倾向性与危险性评价指标研究[J]. 煤炭学报, 2010, 35(12): 1975-1978.
- [8] 唐礼忠,潘长良,王文星. 用于分析岩爆倾向性的剩余能量指数[J]. 中南工业大学学报, 2002, 33(2): 129-132.
- [9] 张绪言,冯国瑞,康立勋,等. 用剩余能量释放速度判定煤岩冲击倾向性[J]. 煤炭学报, 2009, 34(9): 1165-1168.
- [10] 姚精明,何福连,徐军,等. 冲击地压的能量机理及其应用[J]. 中南大学学报, 2009, 40(3): 0808-0813.
- [11] 吴政,张承娟. 单向荷载作用下岩石损伤模型及其力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1996, 15(1): 55-61.
- [12] 杨圣奇,徐卫亚,韦立德,等. 单轴压缩下岩石损伤统计本构模型与试验研究[J]. 河海大学学报, 2004, 32(2): 200-203.
- [13] 姚精明,闫永业,李生舟,等. 煤层冲击倾向性评价损伤指标[J]. 煤炭学报, 2011, 36(2): 0353-0357.
- [14] 刘志平,石林英. 最小二乘法原理及其 MATLAB 实现[J]. 中国西部科技, 2008, (17): 33-34.
- [15] 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.