

煤岩物理力学性质与冲击倾向性关系

李宏艳^{1,2}

(1.煤炭科学研究总院,北京 100013; 2.煤炭资源高效开采与洁净利用国家重点实验室(煤炭科学研究总院),北京 100013)

[摘要] 冲击倾向性是煤岩介质的固有属性,是发生冲击矿压的必要条件,物理力学参数表征煤岩介质的性质,基于大量煤岩介质物理力学参数数据及冲击倾向性结果,分析了煤岩物理力学性质中吸水性、强度参数、变形参数与冲击倾向性之间的定量或定性关系。试验研究及理论分析结果表明,随着煤岩介质吸水性增强,其动态破坏时间越长,冲击能量指数越低,冲击倾向性程度越低;煤岩介质随着单轴抗压强度的增强,受载过程中积蓄的弹性应变能增大而耗散的永久变形能减少,冲击倾向性增加;弹性模量大于 9 GPa 时,冲击倾向性类别只为强冲击。

[关键词] 冲击倾向性;物理力学参数;动态破坏时间;冲击能量指数;弹性能量指数

[中图分类号] TU45 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1006-6225(2011)03-0043-04

Physical and Mechanical Property of Coal and Rock and Its Relationship with Rock-burst Liability

LI Hong-yan^{1,2}

(1.China Coal Research Institute Beijing 100013, China;

2.State Key Laboratory of Coal Resources High-efficiency Mining and Clean Utilization, China Coal Research Institute Beijing 100013, China)

Abstract: Rock-burst liability is inner property of coal and rock body and is necessary condition of rock-burst. Physical and mechanical parameters represent coal and rock body's property. Based on amount of experimental data of physical-mechanical parameter and rock-burst liability of coal and rock body, the qualitative and quantitative relationships of water absorbability, strength, deformation module and rock-burst liability were analyzed. Results showed that with absorbability of coal and rock body increasing, its dynamic damage time increased, rock-burst energy index reduced and rock-burst liability decreased. With uniaxial compression strength increased, elastic energy accumulated in loading procedure increased and released permanent deformation energy reduced, so rock-burst liability increased. When elastic module was larger than 9 GPa, rock-burst liability of all samples was strong.

Key words: rock-burst liability; physical and mechanical parameter; dynamic damage time; rock-burst energy index; elastic energy index

煤岩作为典型的脆性岩石赋存于复杂的地质环境中,煤岩介质的物理力学性质更趋于复杂化,尤其是具有积蓄变形能并产生冲击式破坏的性质,即冲击倾向性,冲击倾向性是煤岩介质固有属性。煤岩介质冲击倾向性是引发煤矿冲击矿压等煤岩动力灾害的必要条件。因此,准确把握煤岩介质冲击倾向性的强弱,是控制冲击矿压等煤矿突发性灾害的重要前提。针对煤岩介质冲击倾向性实验、指标、判别,国内外学者作了大量研究工作,从不同角度对冲击倾向性的影响因素进行了分析,从而提出了一系列冲击倾向性评价指标,例如弹性能指标(W_{ET})^[1-3]、能量指标(P_{ES})^[2]、脆性指标修正值(BM)^[4]、能量耗散指标(K)^[5]、动态破坏时间(D_T)^[6]、有效释放率(BER)^[3,7]、脆性指标(B)^[8]、能量释放率(ERR)^[9]、有效冲击能^[10]

等。指标的提出为冲击倾向性评价奠定了基础,同时也为冲击矿压的预测预报提供了依据。而影响煤岩介质冲击倾向性的因素较多,主要分为内在因素与外部因素。内在因素以煤岩属性(矿物成分、碎屑含量、颗粒大小、岩石结构、颗粒接触方式、胶结物成分、胶结类型)为主要影响因素的研究主要包括煤岩介质矿物成分及细观结构对冲击倾向性的影响^[11-12]。外部因素主要体现在对煤岩体生成条件、赋存环境、围岩应力、围岩性质(顶底板条件)以及密度、温度和湿度等的影响,如对组合煤岩结构冲击倾向性的试验研究^[13-14],探讨含水量对煤岩冲击倾向性的影响的研究^[15]。煤岩介质内在属性是决定煤岩介质冲击倾向性的内在因素,通过煤岩介质的物理力学参数加以定量表征,因此以煤岩物理力学参数为媒介,探讨冲击倾向性

[收稿日期] 2011-02-25

[基金项目] 国家重点基础研究发展计划(973计划)课题(2010226801)

[作者简介] 李宏艳(1978—),女,河北唐山人,博士后,高级工程师,主要从事矿山岩石力学与煤岩动力灾害防治相关研究工作。

与物理力学参数（吸水性参数、强度参数、变形参数）之间的定量关系，为煤岩介质冲击倾向性评价指标的制定提供依据。本文利用近十年来积累的山东 36个矿井实验室数据为依托，探讨煤岩物理力学参数与冲击倾向性之间的定性、定量关系，并为煤岩介质冲击倾向性指标确定提供依据。

1 冲击倾向性判别依据

目前国内外从煤岩积蓄的能量、破坏时间、变形和刚度等方面提出了多种冲击倾向性评价指数，并提出了相应的判别指标^[1-2 6]。我国现行行业标准的冲击倾向性指标主要有弹性能量指数 W_{ET} 、冲击能量指数 K_E 和动态破坏时间 D_T 。

弹性能量指数表征煤试件在单轴压缩状态下，受力达到某一值（平均破坏载荷的 75% ~85%）时卸载，其弹性能 Φ_{SE} 与塑性能（耗损变形能） Φ_{SP} 之比^[16]。该指数越大说明积蓄的弹性能越大，其冲击倾向性越强。

冲击能量指数为应力—应变全过程曲线的上升

段面积与下降段面积之比^[16]，表征试件蓄能和耗能之比，比值越大剩余能量越大，冲击倾向性越强。冲击能量指数把变形能的积累和消耗密切联系起来，较好地反映了煤岩破裂过程中煤岩内能量转换关系，对于揭示冲击矿压机理具有重要意义。

动态破坏时间是指煤岩在常规单轴抗压试验条件下，从极限载荷到完全破坏所经历的时间^[16]。该指数说明煤岩破坏所需时间的长短。剩余能量一定，动态破坏时间越短，其冲击倾向性越强烈。

2 物理力学参数与冲击倾向性关系分析

2.1 吸水性与冲击倾向性关系分析

众所周知煤层注水是防治冲击矿压的手段之一，而煤冲击倾向性对其吸水率敏感性是煤层注水法防治冲击矿压的理论基础。因此，深入探讨吸水性与冲击倾向性关系尤为重要。表 1为山东韩庄、汶南、古城、东滩、三河口煤层物理力学参数及冲击倾向性判定指标测定结果，获得含水率、自然吸水率与冲击倾向性之间关系。

表 1 煤层物理力学参数及冲击倾向性判定指标测定结果

矿井	视密度 / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	真密度 / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	含水率 / %	自然吸水率 / %	吸水比例差值	密度差值 / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	动态破坏时间 /ms	冲击能量指数	弹性能量指数
山东韩庄 6号煤层	1286	1350	3.41	4.90	1.49	63	13	5.46	7.05
	1293	1341	3.09	4.60	1.51	49	7	3.78	3.57
	1279	1352	3.26	5.49	2.23	73	68	1.36	7.66
山东古城 3号煤层	1408	1441	2.94	3.88	0.94	33	61	2.09	16.90
	1385	1434	3.08	4.34	1.26	49	54	2.26	9.19
	1416	1437	2.34	3.16	0.82	21	62	7.09	10.99
山东东滩 3号煤层	1337	1364	3.24	4.01	0.77	27	81	3.35	12.70
	1541	1573	3.08	4.09	1.01	32	140	2.27	6.70
	1439	1469	3.16	4.05	0.89	30	78	9.19	6.30
山东三河口 3上煤层	1317	1416	1.68	1.92	0.24	99	24	6.02	9.94
	1304	1434	1.74	2.20	0.46	129	32	1.69	2.62
	1278	1428	1.73	2.45	0.72	149	37	7.95	4.92
山东鲍店煤矿 3上煤层、3煤层、3下煤层	1433	1562	3.33	4.70	1.37	129	48	1.66	5.40
	1422	1550	2.88	3.78	0.90	128	36	5.59	23.41
	1392	1465	2.92	3.88	0.96	73	61	3.86	12.86
	1416	1470	3.30	4.20	0.90	54	48	3.84	3.38
	1433	1620	3.28	4.63	1.35	187	48	3.05	14.60
	1428	1613	3.31	4.62	1.31	185	36	7.64	29.20

从表 1可知，对于同一煤矿的同一煤层含水率差异较小，自然吸水率具有一定的差异性，例如韩庄煤矿 6号煤层含水率在 3.09% ~3.41%之间，但吸水比例差值最大达到了 2.23%，对应于吸水性的冲击倾向性判别指标也存在相应的差异。从表中的结果来看，原始含水率对冲击倾向性指标的影响没有确定的规律性，而煤岩介质自身的吸水性却与动态破坏时间具有一定的定性关系，从表中可知

吸水性越强其动态破坏时间越长，其冲击能量指数越低，冲击倾向性程度越低，吸水性对于弹性能量指数的敏感性不明显。

表 1中视密度与真密度之差产生的密度差值，实际上间接表征了煤岩介质孔隙及微裂隙所占体积，密度差值越大说明煤岩介质孔隙与微裂隙所占比例越大，其吸水性越强，例如 韩庄煤矿 6号煤层 3号煤样最大吸水性为 2.23%，对应于密度最

大差值 73。而原始含水率与密度差值没有对应关系，可说明原含水率与孔隙及微裂隙所占空间无关，自然吸水率与孔隙及微裂隙所占空间正相关，因此，煤岩介质的吸水性是影响其冲击倾向性的重要指标，同时也是注水防治冲击矿压的技术机理。

以上结论可通过煤岩浸水软化试验来验证，山东鲍店煤矿 3 号煤层煤岩浸水软化试验结果见表 2。从表中可看出由于煤岩介质的非均匀性，煤岩介质的软化率并不是完全的呈线性变化，但随着浸水时间的增加，煤岩介质的抗压强度降低，说明煤岩介质饱水后其强度性能有所降低，甚至软化率达到 57%。

表 2 山东鲍店煤矿煤岩浸水试验结果

样别	煤层原有抗压强度 /MPa	项目	浸水时间 /d			
			7	14	21	28
3 上煤	29.04	抗压强度 /MPa	27.44	30.86	32.95	21.19
		软化率 /%	94	106	113	73
3 煤	25.91	抗压强度 /MPa	21.72	24.17	30.93	20.96
		软化率 /%	84	93	119	81
3 下煤	26.63	抗压强度 /MPa	17.47	22.54	19.23	15.07
		软化率 /%	66	85	72	57

2.2 强度参数与冲击倾向性关系分析

在常规煤岩介质物理力学参数之中表征强度的参数主要包含单轴抗压强度、单轴抗拉强度。因此在探讨强度参数与冲击倾向性关系时，主要包括单轴抗压强度、单轴抗拉强度以及拉压比。

通过大量实验数据的分析，单轴抗压强度与动态破坏时间判定冲击倾向性类别以及冲击能量指数判定的冲击倾向性类别具有相似的统计规律（图 1，图 2）：当单轴抗压强度低于 7MPa 时，该类煤岩介质的冲击倾向性类别为无；当单轴抗压强度在 7~14MPa 时，煤岩介质的冲击倾向性类别为弱；当单轴抗压强度大于 14MPa 时，煤岩介质的冲击倾向性类别为强。弹性能量指标的单轴抗压强度敏感性不强，没有明确的定量关系，但从图 1（c），也可发现单轴抗压强度越大，其弹性能量指标集中于强冲击。这说明，煤岩介质强度增强，卸载过程中积蓄的弹性应变能增大而耗散的永久变形能减少，冲击倾向性增加。

单轴抗拉强度与动态破坏时间及弹性能量指数判定冲击倾向性类型具有相似规律：当单轴抗拉强

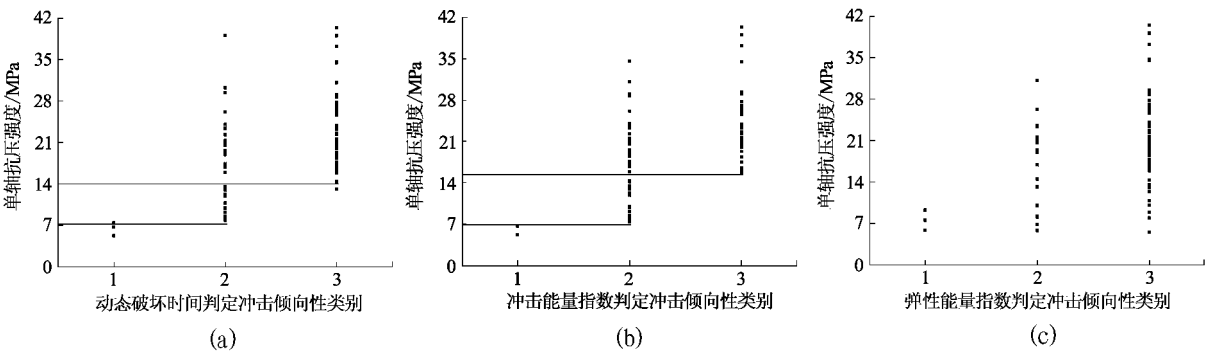


图 1 单轴抗压强度参数与冲击倾向性关系

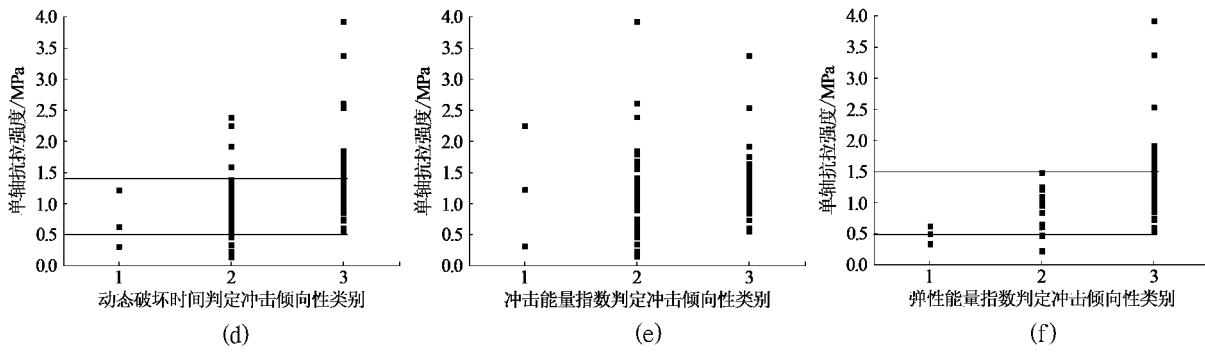


图 2 单轴抗拉强度参数与冲击倾向性关系

度低于 0.5MPa 时，冲击倾向性类别表现为无或弱，当单轴抗拉强度处于 0.5~1.5MPa 时，冲击倾向性类别表现为弱和强，当单轴抗拉强度大于

1.5MPa 时，冲击倾向性类别基本上表现为强冲击。

由于煤岩介质中微裂隙、孔隙等缺陷的存在，致使煤岩等脆性介质具有抗压不抗拉的特性。有学

者认为也许抗压不抗拉是脆性岩石的固有属性^[17]，因此，提出拉压比来表征岩石这一属性。但通过现有数据的统计分析，拉压比对于煤岩介质冲击倾向性的影响并没有呈现出某种规律，见图 3。

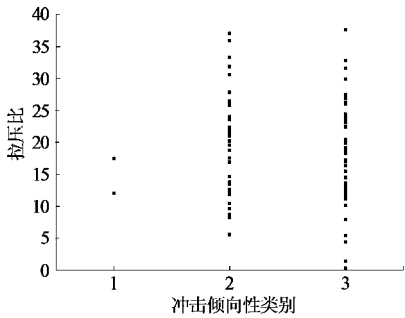


图 3 拉压比与冲击倾向性关系

2.3 变形参数与冲击倾向性关系分析

常规煤岩介质物理力学参数中表征介质变形参数包括弹性模量及泊松比，弹性模量是介质弹性变形难易程度的表征参数。大量实验的统计分析结果表明弹性模量与弹性能量指数之间具有一定的统计规律，当弹性模量小于 4GPa 时，由弹性能量指标判定的冲击倾向性类别从无冲击到强冲击都有分布，当弹性模量大于 9GPa 时，冲击倾向性类别只为强冲击，见图 4。弹性模量与冲击能量指标以及动态破坏时间通过统计分析，并不存在定性或定量规律。

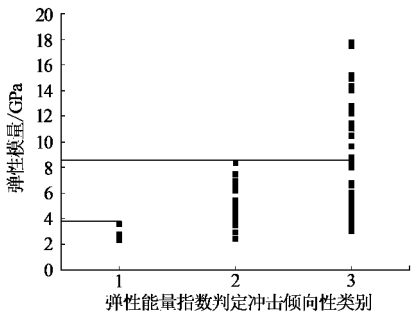


图 4 弹性模量与冲击倾向性关系

弹性体的变形势能可用下式表示：

$$U = \frac{E}{2(1+\mu)} \left[\frac{\mu}{1-2\mu} e^2 + (e_x^2 + e_y^2 + e_z^2) + \frac{1}{2} (\gamma_{yz}^2 + \gamma_{zx}^2 + \gamma_{xy}^2) \right]$$

在变形一定的条件下，弹性模量越大，介质的变形势能越大，说明介质积聚的弹性能量越大，从而揭示了弹性模量与弹性能量指数间的关系。

泊松比表征的是横向应变与纵向应变之比，从实验数据统计来看，泊松比的分布与冲击倾向性判别指标间的规律性不明显，如图 5 所示。

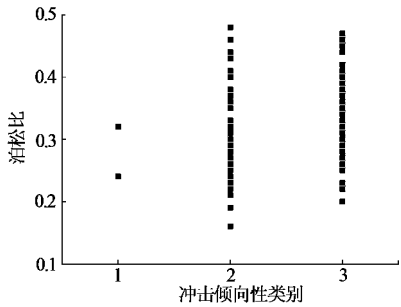


图 5 泊松比与冲击倾向性之间关系

3 结论

基于大量煤岩介质物理力学参数数据及冲击倾向性测定结果，分析了煤岩介质吸水性、强度参数、变形参数与冲击倾向性之间的关系，通过统计分析得到以下结论：

(1) 煤岩介质孔隙率对冲击倾向性无规律性影响，吸水性对动态破坏时间及冲击能量指数具有一定影响，随着吸水性增强煤岩介质动态破坏时间增加，冲击能量指数降低，煤岩介质的冲击倾向性减弱，吸水性对于弹性能量指标无规律性影响。

(2) 强度参数中的单轴抗压强度与动态破坏时间以及冲击能量指数判定的冲击倾向性类别具有相似的统计规律：当单轴抗压强度低于 7MPa 时，该类煤岩介质的冲击倾向性类别为无，当单轴抗压强度在 7~14MPa 时，煤岩介质的冲击倾向性类别为弱，当单轴抗压强度大于 14MPa 时，煤岩介质的冲击倾向性类别为强。而弹性能量指标的单轴抗压强度敏感性不强。当单轴抗拉强度低于 0.5MPa 时，冲击倾向性类别表现为无或弱，当单轴抗拉强度处于 0.5~1.5MPa 时，冲击倾向性类别表现为弱和强，当单轴抗拉强度大于 1.5MPa 时，冲击倾向性类别基本上表现为强冲击。拉压比对于煤岩介质冲击倾向性的影响并没有呈现出某种规律。

(3) 弹性模量只与弹性能量指数间具有一定的统计规律，当弹性模量小于 4GPa 时，由弹性能量指标判定的冲击倾向性类别从无冲击到强冲击都有分布，当大于 9GPa 时，冲击倾向性类别只为强冲击。弹性模量与冲击能量指标及动态破坏时间通过统计分析，并不存在定性或定量规律。泊松比的分布与冲击倾向性判别指标间的规律性不明显。

[参考文献]

[1] Singh S P · Technical note burst energy release index [J] · Rock

(下转 55 页)

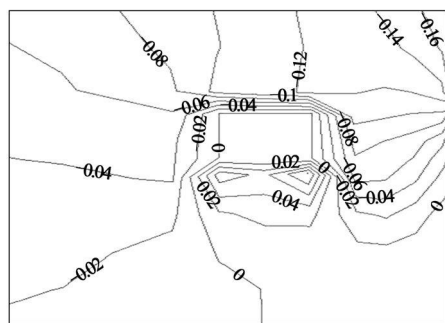


图 11 工作面推进 40m 垂直位移等值线

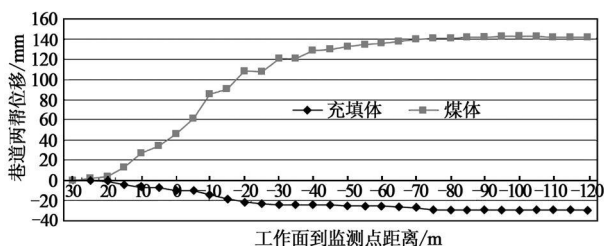


图 12 巷道两帮位移曲线

5 结论

(1) 通过数值模拟计算得出工作面超前支承应力范围在工作面前方 35m 左右, 超前支承压力峰值在工作面前方 5~10m, 工作面侧向支承力峰值在巷道上帮煤体内 5m 左右。

(2) 工作面前方 5m 开始两帮变形加剧; 工作面推进 10m 时, 顶底板变形加剧; 工作面推进

75m 时, 巷道围岩变形趋于缓和。

(3) 利用工作面回采产生的矸石, 在采空区侧叠加宽度为 1.5m 矸石带, 与巷旁充填体组合形成不等强承载巷旁充填体, 较单纯使用膏体胶结料充填体, 明显降低原巷旁充填体承担压力, 减小顶板沉降和底板鼓起, 更好地适应巷道围岩运动。

[参考文献]

- [1] 宋振骐. 实用矿山压力与控制 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1988.
- [2] 卫秋来, 任雷胜, 等. 薄煤层采面矿压规律研究 [J]. 矿山压力与顶板管理, 1999 (3): 63—65.
- [3] 马庆云, 赵晓东, 宋振骐. 采场老顶岩梁的超前破断与矿山压力 [J]. 煤炭学报, 2001, 26 (5): 474—477.
- [4] 孙益成. 沿空留巷支护的矿压规律 [J]. 矿山压力与顶板管理, 1999 (3): 139—140.
- [5] 涂敏. 沿空留巷顶板运动与巷旁支护阻力研究 [J]. 辽宁工程技术大学学报 (自然科学版), 1999, 18 (4).
- [6] 苏清政, 郝海金. 沿空留巷巷旁支护阻力计算模型 [J]. 煤矿开采, 2002, 7 (3): 32—36.
- [7] 王悦汉, 王彩根, 周华强. 巷道支架壁后充填技术 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1994.
- [8] 柏建彪, 周华强, 侯朝炯, 等. 沿空留巷巷旁支护技术发展 [J]. 中国矿业大学学报, 2004, 33 (2): 183—186.
- [9] 漆泰岳, 郭育光, 侯朝炯. 沿空留巷整体浇注护巷带适应性研究 [J]. 煤炭学报, 1999, 24 (3): 256—260.

[责任编辑: 林健]

(上接 46 页)

Mechanics and Rock Engineering 1988, 21 (2): 149—155.

- [2] Wang J A Park H D. Comprehensive prediction of rockburst based on analysis of strain energy in rocks [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2001 (16): 49—57.
- [3] Kidybinski A. Bursting liability indices of coal [J]. Int. J. Rock Mech. and Min. Sci. and Geomech. Abstr. 1981, 18 (6).
- [4] Aubertin M Gill D E Simon R. On the use of the brittleness index modified (BM) to estimate the post-peak behavior of rocks [A]. In The First North American Rock Mech. Symposium [C]. Rotterdam A. A. Balkema 1994.
- [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] Wu Y Zhang W. Evaluation of the bursting proneness of coal by means of its failure duration [A]. In Rockburst and Seismicity in Mines [C]. Rotterdam A. A. Balkema 1997.
- [7] Mitr H S. Numerical modeling of mining-induced energy in rock-burst problems [A]. In Proceedings of the 2nd North American Rock Mechanics Symposium NARMS '96 [C]. Rotterdam A. A. Balkema 1996.
- [8] Hukka V Das B. Brittleness determination of rock masses by different methods [J]. Int. J. Rock Mech. and Min. Sci. and Geomech. Abstr. 1974 (11): 389—392.

- [9] Spottiswoode S M. Volume excess shear stress and cumulative seismic moments [A]. In Rockbursts and Seismicity in Mines [C]. Rotterdam A. A. Balkema 1990.
- [10] 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.
- [11] 潘结南, 孟召平, 刘保民. 煤系岩石的成分、结构与其冲击倾向性关系 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24 (24).
- [12] 姜耀东, 赵毅鑫, 何满潮, 等. 冲击地压机制的细观实验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26 (5): 901—907.
- [13] 陆莱平, 窦林名, 吴兴荣. 组合煤岩冲击倾向性演化及声电效应的试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26 (12): 2549—2555.
- [14] 李纪青, 齐庆新, 毛德兵, 等. 应用煤岩组合模型方法评价煤岩冲击倾向性探讨 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24 (S1): 4805—4810.
- [15] 茅献彪, 陈占清, 徐思朋, 等. 煤层冲击倾向性与含水率关系的试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20 (1).
- [16] MT/T 174 - 2000, 煤层冲击倾向性分类及指数的测定方法 [S].
- [17] 梁正召, 唐春安, 李连崇, 等. 细观介质拉压比对岩石破坏过程的影响 [J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23 (1).

[责任编辑: 邹正立]