

青年博士学术专栏

硬煤冲击倾向性的层理效应研究

郝宪杰^{1,2,3}, 袁亮^{3,4}, 王少华³, 赵毅鑫^{1,3}, 徐全胜³, 李玉麟³, 郭延定³

(1. 中国矿业大学(北京)煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 北京 100083;

2. 辽宁工程技术大学辽宁省煤炭资源安全开采与洁净利用工程研究中心, 辽宁 阜新 123000;

3. 中国矿业大学(北京)资源与安全工程学院, 北京 100083; 4. 安徽理工大学, 安徽 淮南 232000)

摘要:煤作为一种层理异常发育的岩体,其冲击倾向性深受层理影响。基于忻州窑矿 14 号煤大量室内试验数据,通过分析不同层理角度下煤样冲击倾向性指标值的变化,来探讨层理对煤冲击倾向性的影响及内在机理。研究表明:该类硬煤的非线性弹性特征、变形模量、峰值强度、峰后跌落特征等都与层理相关,表明其冲击倾向性也与层理相关;采用冲击能指标判定时,层理角度 0°时为强冲击倾向煤样,45°时部分煤样属于弱冲击倾向煤,90°时全部属于弱冲击倾向性煤;采用动态破坏时间判断的冲击倾向性结果严重偏弱,原因在于该类硬煤峰后出现了不同程度的台阶式跌落;煤样冲击倾向性的层理效应,根本原因在于层理会对煤样的破坏模式存在剧烈影响。研究表明,含层理煤样冲击倾向性测试时应考虑层理效应,否则会有较大偏差。

关键词:硬煤;冲击倾向性;层理效应;冲击能;破坏模式

中图分类号:TD324

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2018)05-0001-07

Study on bedding effect of bump tendency for hard coal

HAO Xianjie^{1,2,3}, YUAN Liang^{3,4}, WANG Shaohua³, ZHAO Yixin^{1,3}, XU Quansheng³, LI Yulin³, GUO Yanding³

(1. State Key laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining and Technology(Beijing), Beijing 100083, China;

2. Research Center of Coal Resources Safe Mining and Clean Utilization, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China;

3. School of Resource and Safety Engineering, China University of Mining and Technology(Beijing), Beijing 100083, China;

4. Anhui University of Science and Technology, Huainan 232000, China)

Abstract: Coal is a kind of rock that with developed bedding, and its tendency of bump is affected by the beddings. In this paper, based on the experimental data of No.14 coal mass in Xinzhouyao Mine, the bump tendency of coal samples with different bedding angle is analyzed according to the effect of bedding on the mechanism of coal. The results show that the nonlinear elastic characteristics, the deformation modulus, peak strength, the drop characteristics after post-peak strength are all related with beddings, which indicated that the bump tendency is also related with beddings; According to the impact energy index, the bedding angle of 0° shows a strong bump tendency. When the bedding angle is 45°, the bump tendency is weak than that of 0°. When the bedding angle is 90°, the bump tendency is the smallest; According to the dynamic destruction time, the coal bump is much smaller, which is caused by the step drop after peak strength; The reason why the bump tendency is influenced by the bedding angle, is that the failure mode of coal with different beddings is different. The results of this study show that the bedding effect should be taken into account when the bump tendency of coal samples is tested.

Key words: hard coal; bump tendency; bedding effect; impact energy; failure mode

收稿日期:2018-01-22; **责任编辑:**赵瑞 **DOI:**10.13199/j.cnki.cst.2018.05.001

基金项目:北京市自然科学基金资助项目(8174072); 辽宁工程技术大学辽宁省煤炭资源安全开采与洁净利用工程研究中心开放基金资助项目(LNTU16KF08); 中国矿业大学(北京)煤炭资源与安全开采国家重点实验室开放基金资助项目(SKLCRSM16KFB07, SKLCRSM16DCB01); 中国科协青年人才托举工程资助项目(2017-2019)

作者简介:郝宪杰(1987—),男,山西孝义人,讲师,硕士生导师,博士。E-mail: haoxianjie@cumt.edu.cn

引用格式:郝宪杰,袁亮,王少华,等.硬煤冲击倾向性的层理效应研究[J].煤炭科学技术,2018,46(5):1-7.

HAO Xianjie, YUAN Liang, WANG Shaohua, et al. Study on bedding effect of bump tendency for hard coal[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(5): 1-7.

0 引言

经过近半个世纪的开采,我国煤炭资源开采已经越来越朝着深部发展,煤炭在进入深部开采后各种灾害相互耦合,成灾机理复杂,防治愈加困难。冲击地压是深部煤矿典型动力灾害之一,由于其发生发展过程的急剧、猛烈,常造成井巷严重破坏和人员重大伤亡^[1]。

煤岩冲击倾向性是评价煤矿冲击地压发生危险的重要依据。很多学者针对煤岩冲击倾向性进行了大量的研究。如齐庆新等^[1]基于大量试验数据,系统分析煤岩冲击倾向性各种指标的相关数据,提出将煤的单轴抗压强度作为评价煤层冲击倾向性的新指标;姜耀东等^[2]总结了我国煤矿冲击地压灾害发生的特点,分析了冲击地压、岩爆和矿震之间存在的联系和区别,建立了煤矿冲击地压的3种力学模型;潘一山等^[3]针对冲击倾向性指标不能完全反映实际煤层冲击危险程度的问题,提出了考虑时间效应的冲击能量速度指标、临界软化区域系数、临界应力系数3项新的指标;窦林名等^[4]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;姜福兴等^[5]研究了巨厚砾岩与逆冲断层控制下特厚煤层工作面冲击地压致灾机理和防治方法;李宏艳^[6]对煤岩物理力学性质与冲击倾向性关系进行了研究;苏承东等^[7-8]进行了饱水时间对千秋煤矿2号煤层冲击倾向性指标的影响相关研究,并指出测定冲击倾向性指数时煤样峰后变形特征与加载控制方式相关;宋晓艳等^[9]研究表明冲击倾向煤内部含有大量的孔隙裂隙,促使大量新裂纹生成和煤样发生破坏;赵毅鑫等^[10]利用红外热像、声发射、应变等监测方式,分析冲击倾向性煤体破坏过程的声、热效应及破坏前的异常信息特征;郭建卿等^[11]对不同煤试样冲击倾向性试验结果进行了分析;李晓璐等^[12]对煤-岩组合体冲击倾向性三维数值进行了试验分析;巩思园等^[13]在实验室单轴条件下对冲击倾向性煤岩样的应力与纵波波速耦合关系进行了研究。徐子杰等^[14]进行了冲击倾向性煤体加载破坏的红外辐射特征研究;牟宗龙等^[15]提出了采用岩-煤-岩组合体破坏过程中顶底板释放和煤体消耗的能量之比参数作为煤岩组合条件下的冲击倾向性评价指标;吕玉凯等^[16]研究单轴压缩过程中冲击倾向性和非冲击倾向性煤样表面变形场和温度场演化特征。赵同彬等^[17]基于颗粒流理论对煤岩冲

击倾向性细观模拟试验进行了研究;宋录生等^[18]对“顶板-煤层”结构体冲击倾向性演化规律及力学特性进行了试验研究。

综上所述,当前针对煤岩冲击倾向性的研究已经取得了极大进展。但是也应该看到,煤作为一种层理和割理异常发育的岩体,当前对于煤层理对冲击倾向性的影响规律研究却很少。但是已有的大量研究结果表明,层理对煤岩全应力应变曲线具有深刻的影响,煤的弹性模量、强度、峰前能量积聚、峰后跌落特征等都与层理相关,由于冲击倾向性与峰前能量积聚和峰后能量释放密切相关,据此可以推测,冲击倾向性也应深受层理的影响。

因此笔者基于大量忻州窑14号煤室内试验数据,通过分析不同层理角度下煤岩冲击倾向性指标值的变化,研究层理对冲击倾向性指标值的影响,进而分析层理对冲击倾向性的影响,并基于煤岩破坏模式解释层理影响冲击倾向性的内在机理。本文的研究结果可为深部硬煤冲击倾向性测试方法及冲击地压的发生发展机理及防治提供参考。

1 试验条件和试验方案

1.1 煤样获取

本次煤样采用忻州窑矿14号煤,埋深350 m,属于高瓦斯矿井,该层煤瓦斯涌出量为32.55 m³/t,且煤层具有爆炸危险性。煤样外观如图1所示,可以看出断口多呈参差不平,且层理异常发育。



图1 忻州窑矿14号煤样宏观层理特征

Fig.1 Macroscopic stratification of No.14 coal in Xinzhouyao Mine

目前该层煤已发生多次动载现象,以往研究结果表明,该层煤具有较高的单轴抗压强度和强烈的脆性特征,属于典型的硬煤。

1.2 煤样层理特征

为进一步分析该煤样层理特征,采用上述煤样碎屑进行电镜扫描以分析其细观层理特征,采用日立高新超高分辨场发射扫描电子显微镜 HITACHI SU8010 扫描煤样的层理特征,可以看出该煤样内部

非均质性极为发育,主要表现在 3 个方面,层理发育密实且呈平行分布,间距约 50 μm ,同时部分层理也为割理所截断或分割,割理几乎垂直于层理的分布,另外,还存在大量无序裂纹。这些层理、割理和无序裂纹的存在,从微观上导致了煤非均质性。

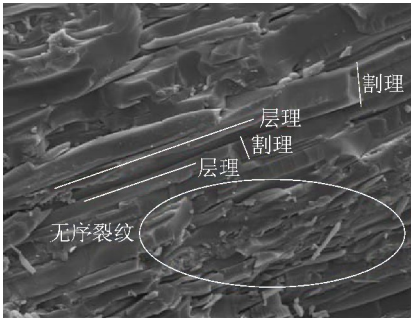


图 2 忻州窑矿 14 号煤样层理细观层理特征

Fig.2 Micro stratification of bedding characteristics of No.14 coal in Xinzhouyao Mine

1.3 不同层理角度煤样制取

采用岩石钻孔机将上述煤块加工为 $\phi 25\text{ mm}\times 50\text{ mm}$ 大小的煤样,加工方法按照国际岩石力学学会建议的方法进行,为获得不同层理角度的煤样,首先将煤块水平放置,而后改变钻孔头方向对煤样进行钻取,以获得 0° 、 45° 、 90° 不同角度的煤样,如图 3 所示。层理角度与煤样轴线垂直,层理角度为 0° ,标记为 Z;层理角度与轴线平行,层理角度为 90° ,标记为 N;同样记层理角度与轴线斜交 45° 为 F。

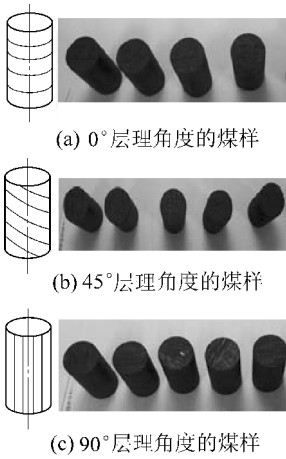


图 3 不同层理角度的煤样

Fig.3 Coal sample with different bedding angles

1.4 声波离散性测试

由于超声波在煤样内传播时如果遇到层理、孔隙等非连续面时,在缺陷界面发生反射和散射,声能被衰减,因此接收信号的波速明显降低,因此可采用超声波波速反映煤样的裂隙发育程度。试件尺寸及

波速和密度见表 1。

表 1 煤样尺寸及波速和密度

Table 1 Size, wave velocity and density of coal specimen

煤样	直径/mm	高度/mm	密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	波速/ ($\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$)
Z1	24.44	48.07	1.56	1.15
Z3	24.42	48.06	1.58	1.16
Z5	24.43	48.07	1.57	1.14
平均	24.430	48.067	1.570	1.150
F2	23.96	47.97	1.562	1.20
F3	23.90	48.00	1.585	1.17
F4	23.91	48.00	1.577	1.19
平均	23.923	47.990	1.575	1.187
N1	24.03	48.08	1.585	1.16
N2	23.93	48.08	1.612	1.18
N4	23.94	48.05	1.577	1.21
平均	23.967	48.070	1.591	1.183

1.5 试验设备

本次单轴压缩试验采用 MTS815.04 岩石力学试验机(图 4)进行,运用轴向位移控制方式(图 4)进行单轴压缩试验。

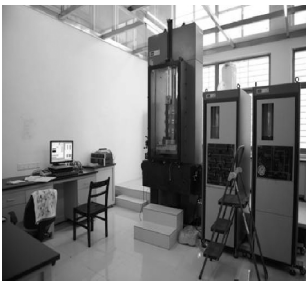


图 4 MTS815.04 岩石力学试验机

Fig.4 MTS815.04 rock mechanics tester

1.6 试验结果

典型的在不同层理角度下的煤样应力应变曲线如图 5 所示。

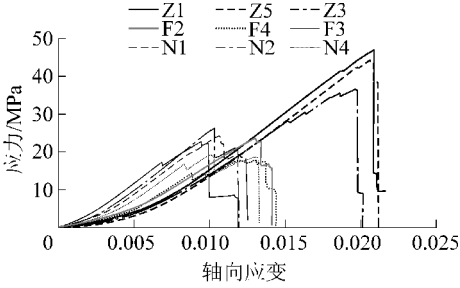


图 5 不同层理角度下典型应力应变曲线特征

Fig.5 Characteristics of typical stress-strain curves under different bedding angles

对上述曲线特征进行初步分析可以得出,该类硬煤的单轴压缩应力应变曲线呈现如下明显的特征:①不管何种层理角度,煤样均具有明显的非线性弹性阶段,尤其以 0°最为明显;②煤样的弹性模量与层理角度具有明显的相关性,其中层理为 0°和 45°时变形模量较小,90°时弹性模量最大;③煤样的峰值特征与层理角度也具有明显的相关性,其中 0°的强度最大,90°次之,45°最小;④煤样的峰后特征也与层理具有明显的相关性,0°时台阶跌落最不明显,基本呈直线跌落,90°次之,45°台阶跌落最明显,呈现多台阶的跌落特征。全部煤样的参数特征见表 2。

表 2 不同层理角度下煤样参数特征

Table 2 Parameters of coal samples under different bedding angles

试件	变形模量/ GPa	峰值强度/ MPa	峰值应变/ 10 ⁻³	峰后跌落强 度应变/10 ⁻³
Z1	2.24	46.70	20.85	21.60
Z3	2.14	44.18	20.62	21.13
Z5	1.85	36.52	19.69	20.17
F2	2.41	22.61	9.39	11.89
F3	1.37	17.91	13.06	14.37
F4	1.81	23.66	13.07	14.11
N1	2.28	24.25	10.67	12.45
N2	2.54	26.21	10.30	11.92
N4	1.90	19.20	10.09	13.30

综上可以看出,层理对煤岩全应力应变曲线具有深刻的影响,煤的非线性弹性特征、线弹性模量、峰值强度、峰后跌落特征等都与层理相关,由于冲击倾向性与峰前能量积聚和峰后能量释放密切相关,据此可以推测,冲击倾向性也应深受层理的影响。因此有必要针对该类硬煤冲击倾向性的层理效应进行分析。

2 煤冲击倾向性指标的层理效应

冲击倾向性,是指煤岩体是否能够发生冲击地压的自然属性,可通过试验室测试鉴定。煤岩冲击倾向性是评价煤矿冲击地压发生危险的重要依据^[1]。冲击倾向性指标包括冲击能指标和动态破坏时间等,此外,文献[7]还提出采用单轴抗压强度作为冲击倾向性指标之一,下面将逐一分析层理对这些指标的影响。

2.1 冲击能指标

冲击能指数指煤试件在单轴压缩状态下,应力应变全过程曲线中,峰值前积蓄的变形能与峰值后

耗损的变形能之比,用 K_E 表示。本文采用峰前曲线面积与峰后曲线面积的比来计算冲击能指数,其中峰后曲线面积只计算到峰后跌落强度为止,根据上述方法计算得到层理角度和冲击能指标关系如图 6 所示。

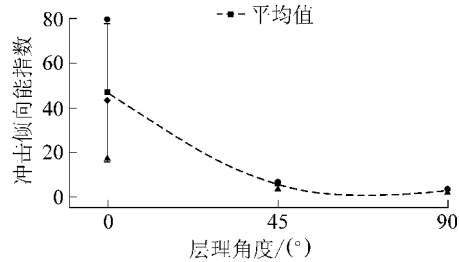


图 6 冲击倾向能指标的层理效应

Fig.6 Stratification effect of shock proneness energy index

对图 6 进行分析,可以看出,当层理角度为 0°时,均属于强冲击倾向煤, K_E 指标远大于规定的冲击倾向性指标值($K_E = 5$);当层理角度为 45°时,F3、F4 属于强冲击倾向煤,但是其 K_E 指标仅略大于 5, F2 则属于弱冲击倾向煤;当层理角度为 90°时,均属于弱冲击倾向煤。因此可以得出,在相同条件下,对于冲击能指数,层理角度为 0°时冲击倾向性最大;层理角度为 90°时,冲击倾向性最小;层理角度为 45°时,冲击倾向性居于两者之间。

2.2 动态破坏时间

动态破坏时间是指煤试件在单轴压缩状态下,从极限强度到完全破坏所经历的时间。经计算得到层理角度和煤样动态破坏时间关系如图 7 所示。

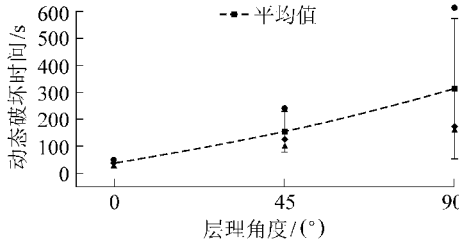


图 7 动态破坏时间的层理效应

Fig.7 Stratification effect of dynamic failure time

对图 6 进行 DT 指标分析,可以看出在相同条件下,对于动态时间,层理角度为 0°时动态时间最小;层理角度为 90°时,动态破坏时间最长;层理角度为 45°时,动态破坏时间居于两者之间。

采用动态破坏时间判断的煤样冲击倾向在硬煤峰后跌落过程中,都出现了不同程度的台阶式跌落,每次台阶跌落包括一段脆性垂直跌落和一段纯塑性变形,纯塑性变形速度是脆性垂直跌落的 1/4,因此

纯塑性跌落时间较长,即使对于动态破坏时间较少的0°层理,由于峰后纯塑性变形的存在,使得动态破坏时间大幅增加,但是需要注意的是该种台阶跌落的脆性垂直跌落过程也非常明显,尤其是在层理角度较小时,很有可能导致发生冲击地压,因此采用动态破坏时间来判断该类存在峰后台阶跌落的煤样冲击倾向性有待商榷。

2.3 单轴抗压强度

文献[1]经过大量的分析认为,单轴抗压强度可以作为煤层冲击倾向性的新指标,从图8可以看出该类硬煤的单轴抗压强度均大于13 MPa,属于强冲击倾向性煤样。同时也可以看到,层理对该指标影响强烈,当层理角度为0°时,单轴抗压强度最大,90°次之,45°单轴抗压强度最小。

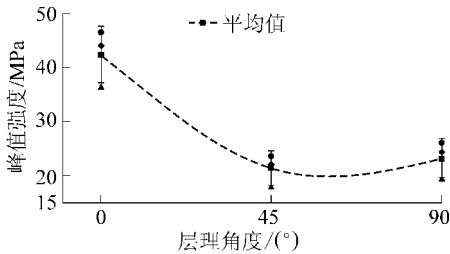


图8 峰值强度的层理效应

Fig.8 Stratification effect of peak intensity

综上所述可以看出,采用冲击能指标和单轴抗压强度来进行判断,该类煤样均有一定程度的冲击倾向性,尤其当层理角度为0°,均为强冲击倾向煤样,而45°和90°冲击倾向性次之(两者相差较小),且与0°相差较大。可见,层理对煤样的冲击倾向性有较大影响,其内在机理值得进行深入探讨。

3 冲击倾向性影响的层理效应机理分析

3.1 全应力应变曲线的层理效应

通过对图5进行分析可以看出,层理角度影响了全应力应变曲线,进而影响了冲击倾向性,尤其是峰值应变和峰后跌落形式,如图9和表2所示。

层理角度对峰值应变和峰后台阶有巨大的影响,层理角度为0°时,强度的增大导致峰值应变更大,对应的峰后脆性跌落却最为剧烈;层理角度为45°时,峰值应变明显减小,对应的峰后台阶式跌落也更明显;层理角度为90°时,峰值应变最小,峰后台阶更加明显。一般来讲,峰值应变越大,峰后脆性跌落越明显,冲击倾向性越大。因此层理为0°时冲击倾向性最大,45°次之,90°最小。

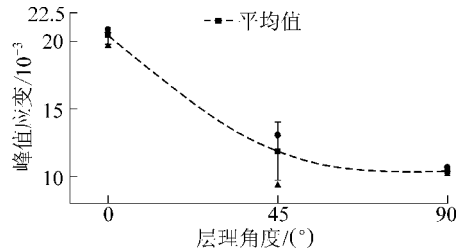


图9 峰值应变的层理效应

Fig.9 Stratification effect of peak strain

表2 煤样峰后台阶跌落特征

Table 2 Characteristics of post peak drop of coal sample

煤样	峰后各台阶的跌落特征/10 ⁻⁵						
	ϵ_{b1}	ϵ_{p1}	ϵ_{b2}	ϵ_{p2}	ϵ_{b3}	ϵ_{p3}	ϵ_{b4}
Z1	2.57	17.8	1.35	—	—	—	—
Z3	2.07	16.3	2.92	—	—	—	—
Z5	2.99	3.82	0.02	—	—	—	—
F2	2.11	41.9	0.99	4.23	1.59	190	1.99
F3	1.49	63.6	0.40	65.5	0.14	—	—
F4	2.61	29.1	0.58	71.3	1.56	—	—
N1	3.77	23.6	0.10	152	0.95	—	—
N2	4.09	148	2.57	5.79	1.08	—	—
N4	1.21	21.7	0.80	289	2.68	—	—

注:煤样峰后每次台阶跌落包含一次脆性跌落和一次塑性变形, ϵ_{bi} 、 ϵ_{pi} 分别为峰后第*i*个台阶中纯塑性变形阶段和中脆性跌落阶段对应的应变变化,煤样单轴峰后曲线通常以脆性跌落结束。

3.2 能量演化的层理效应

如前分析,当层理角度为0°时,峰值应变数值更大,峰值强度更大,这也就意味着其峰前积聚的应变能就越高,峰后脆性跌落却最为剧烈,意味着在较短的时间和应变内释放大量的能量,因此其冲击倾向性最大;而对于层理45°和90°,峰值应变较小,峰前积聚的应变能也较小,而峰后台阶跌落特征更加明显,由于台阶在峰后出现的纯塑性阶段势必使应变和破坏时间增大,冲击倾向性较小,不同层理角度下对应的峰前能量积聚和峰后变形能见表3。

表3 煤样峰前与峰后应变能

Table 3 Strain energy before and after the peak of the coal sample J/m³

煤样	峰前应变能	峰后应变能	平均值	
			峰前应变能	峰后应变能
Z1	0.393 729	0.004 642	0.350 826	0.010 706
Z3	0.35 305	0.020 448		
Z5	0.305 698	0.007 027		
F2	0.101 916	0.029 226	0.114 053	0.02 218
F3	0.115 628	0.018 587		
F4	0.124 614	0.018 726		
N1	0.1 115	0.036 872		
N2	0.114 926	0.032 418	0.104 309	0.043 021
N4	0.086 501	0.053 623		

3.3 破坏模式的层理效应

之所以会存在全应力应变曲线和能量演化过程的层理效应,根本原因是由于层理会对煤样的破坏模式存在剧烈的影响。

煤样在试验破碎过程中,加载所产生的破坏也是不同的,对于层理角度为 0° 的煤样,其破坏大多是瞬间崩落,其冲击特别强,且碎屑破碎度最高,如图10a、图10b所示。

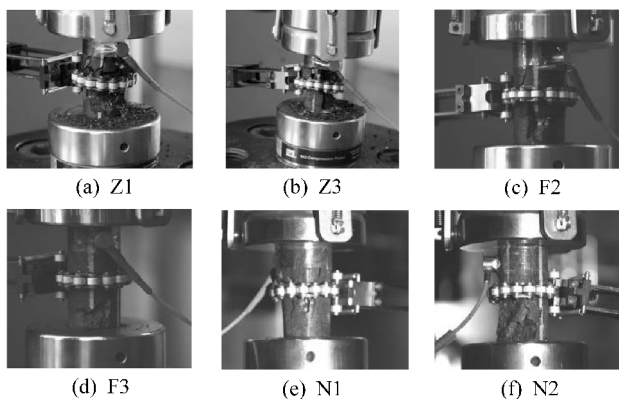


图10 不同层理角度下的煤样破坏模式

Fig.10 Failure modes of coal samples under different bedding angles

对于层理角度为 45° 的煤样,其破坏大多是一条主裂隙的贯通,冲击破坏程度比 0° 时小很多,如图10c、图10d所示。对于层理角度为 90° 的煤样,其破坏大多是多条并生裂隙的贯通,冲击也非常小,如图10e、图10f所示。

当层理角度为 0° 时,层理与主应力方向垂直,根据Jaeger破坏准则,煤样沿着岩块破坏角破裂,层理不会对破坏模式没有影响,所以层理角度为 0° 时,峰值强度很大,对应峰值应变也较大,积蓄应变能更多,尤其是峰后破坏脆性更明显,导致动态破坏时间很短,冲击倾向性很大;当层理角度为 45° 时,根据Jaeger破坏准则,煤样几乎沿着层理方向破坏,由于层理面强度较弱,导致煤样整体峰值强度较弱,对应峰值应变也较小,积蓄应变能较小,同时也由于沿着层理破坏,峰后台阶跌落特征明显,动态破坏时间较长,冲击倾向性较小。

当层理角度为 90° 时,层理与主应力方向平行,在加载过程中极易产生压致张裂破坏,该类破坏是煤样外缘逐渐产生并不断向煤样内部发展的,裂纹不断产生,并逐渐丧失承载力,由于煤样的抗拉强度较小,导致峰值强度较小,但是与 45° 相比,该种渐进破坏导致层理为 90° 时的强度略高于 45° ,但也同时由于该种

渐进破坏模式,其动态破坏时间相对于层理 0° 和 45° 均较长,因此层理为 90° 时其冲击倾向性最小。

4 结 论

1)忻州窑矿14号煤层理发育密实且呈平行分布,层理对该类硬煤的单轴压缩应力应变曲线具有深刻的影响,其非线性弹性特征、线弹性模量、峰值强度、峰后跌落特征等都与层理相关。

2)采用冲击能指标和单轴抗压强度判定该类煤样均有一定程度的冲击倾向性,尤其当层理角度为 0° ,均为强冲击倾向煤样,而 45° 和 90° 冲击倾向性次之。

3)对于动态破坏时间,层理角度为 0° 时动态时间最小, 45° 次之, 90° 最小,但采用该指标判断冲击倾向性结果时,由于该类硬煤峰后跌落过程中出现了不同程度的台阶式跌落,准确性有待商榷。

4)煤样冲击倾向性的层理效应,根本原因是由于层理会对煤样的破坏模式存在剧烈的影响。层理角度为 0° 表现为岩块破坏,峰值强度和应变均很大,积蓄应变能更多,且峰后脆性明显,冲击倾向性很大,而当层理角度为 45° 时,煤样几乎沿着层理方向破坏,冲击倾向性较小。当层理角度为 90° 时,易发生压致张裂渐进破坏,强度略高于 45° ,但动态破坏时间相对较长,因此层理为 90° 时其冲击倾向性最小。

5)由于层理对冲击倾向性的强烈影响,因此在进行冲击倾向测试时必须考虑煤的层理特征,分析现场层理的分布,并分析对应层理角度下的冲击倾向特征,同时结合其他层理角度的冲击倾向性,从而对该类煤样的冲击倾向性有深刻的认识。本文仅是初步探讨了层理对冲击倾向性的影响,对于含层理煤样冲击倾向性的测试方法仍有待于各位学者进行进一步的探索。

参考文献(References):

- [1] 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(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 and Engineering, 2011(S1): 2736-2742.
- [2] 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.
- [3] 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.
PAN Yishan, GENG Lin, LI Zhonghua. Research on evaluation indices for impact tendency and danger of coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(12): 1975-1978.
- [4] 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.
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.
- [5] 姜福兴, 魏全德, 王存文, 等. 巨厚砾岩与逆冲断层控制型特厚煤层冲击地压机理分析[J]. 煤炭学报, 2014, 39(7): 1191-1196.
JIANG Fuxing, WEI Quande, WANG Cunwen, *et al.* Analysis of rock burst mechanism in extra-thick coal seam controlled by huge thick conglomerate and thrust fault[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(7): 1191-1196.
- [6] 李宏艳. 煤岩物理力学性质与冲击倾向性关系[J]. 煤矿开采, 2011, 16(3): 43-46.
LI Hongyan. Physical and mechanical property of coal and rock and its relationship with rock-burst liability[J]. Coal Mining Technology, 2011, 16(3): 43-46.
- [7] 苏承东, 袁瑞甫, 翟新献. 城郊矿煤样冲击倾向性指数的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(S2): 3696-3704.
SU Chengdong, YUAN Ruifu, ZHAI Xinxian. Experimental research on bursting liability index of coal samples of Chengjiao Coal Mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(S2): 3696-3704.
- [8] 苏承东, 翟新献, 魏向志, 等. 饱水时间对千秋煤矿2#煤层冲击倾向性指标的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(2): 235-242.
SU Chengdong, ZHAI Xinxian, WEI Xiangzhi, *et al.* Influence of saturation period on bursting liability indices for coal seam No.2 in Qianqiu Coal Mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(2): 235-242.
- [9] 宋晓艳, 王恩元, 刘贞堂, 等. 冲击倾向煤破坏断口微观特征及其机理研究[J]. 中国矿业大学学报, 2008, 37(6): 775-779.
SONG Xiaoyan, WANG Enyuan, LIU Zhentang, *et al.* Study on microscopic characteristics and mechanism of impact trend coal fracture[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2008, 37(6): 775-779.
- [10] 赵毅鑫, 姜耀东, 韩志茹. 冲击倾向性煤体破坏过程声热效应的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(5): 965-971.
ZHAO Yixin, JIANG Yaodong, HAN Zhiru. Experimental study on acoustic and thermal infrared characteristics of bump-prone coal. [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(5): 965-971.
- [11] 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.
GUO Jianqing, SU Chengdong. Analysis on experimental results of rock burst tendency of different coal samples [J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(7): 897-902.
- [12] 李晓璐, 康立军, 李宏艳, 等. 煤-岩组合体冲击倾向性三维数值试验分析[J]. 煤炭学报, 2011, 36(12): 2064-2067.
LI Xiaolu, KANG Lijun, LI Hongyan, *et al.* Three-dimensional numerical simulation of burst-prone experiments about coal-rock combination [J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(12): 2064-2067.
- [13] 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 Xiaojun, *et al.* Experimental study on the correlation between stress and p-wave velocity for burst tendency coal-rock samples[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2012, 29(1): 67-71.
- [14] 徐子杰, 齐庆新, 李宏艳, 等. 冲击倾向性煤体加载破坏的红外辐射特征研究[J]. 中国安全科学学报, 2013, 23(10): 121-126.
XU Zijie, QI Qingxin, LI Hongyan, *et al.* Research on infrared radiation characteristics of outburst proneness coal's failure by loading [J]. China Safety Science Journal, 2013, 23(10): 121-126.
- [15] 牟宗龙, 王浩, 彭蓬, 等. 岩-煤-岩组合体破坏特征及冲击倾向性试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2013, 30(6): 841-847.
MU Zonglong, WANG Hao, PENG Peng, *et al.* Experimental research on failure characteristics and bursting liability of rock-coal-rock sample [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2013, 30(6): 841-847.
- [16] 吕玉凯, 蒋聪, 成果, 等. 不同冲击倾向煤样表面温度场与变形场演化特征[J]. 煤炭学报, 2014, 39(2): 273-279.
LYU Yukai, JIANG Cong, CHENG Guo, *et al.* Evolution of the surface temperature field and deformation field of different impact proneness coal specimens [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(2): 273-279.
- [17] 赵同彬, 尹延春, 谭云亮, 等. 基于颗粒流理论的煤岩冲击倾向性细观模拟试验研究[J]. 煤炭学报, 2014, 39(2): 280-285.
ZHAO Tongbin, YIN Yanchun, TAN Yunliang, *et al.* Bursting liability of coal research of heterogeneous coal based on particle flow microscopic test [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(2): 280-285.
- [18] 宋录生, 赵善坤, 刘军, 等. “顶板-煤层”结构体冲击倾向性演化规律及力学特性试验研究[J]. 煤炭学报, 2014, 39(S1): 23-30.
SONG Lusheng, ZHAO Shankun, LIU Jun, *et al.* Experimental research on rules of rock burst tendency evolution and mechanical properties of “roof-coal” structure body [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(S1): 23-30.