

引用格式:秦忠诚,陈光波,李谭,等. 冲击地压“能量关键层”确定实验研究[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2018, 37(6):1-10.

QIN Zhongcheng, CHEN Guangbo, LI Tan, et al. Experimental study on determining “key strata of energy” of rock burst[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2018, 37(6):1-10.

冲击地压“能量关键层”确定实验研究

秦忠诚,陈光波,李谭,孙伟,付彪

(山东科技大学 矿业与安全工程学院,山东 青岛 266590)

摘要:以煤、粗砂岩和细砂岩3种岩石试件单轴压缩实验为基础,对自主构建的组合试件进行单轴压缩实验,探讨组合试件破坏前能量积聚情况,研究能量积聚规律,确定“能量关键层”。结果表明:二元组合中,FCF、CFC、GCG、CGC试件中煤层积聚能量分别占总能量的88.5%、79.0%、71.4%和79.6%,FGF、GFG试件中粗砂岩的能量占总能量的61.2%和76.5%;三元组合体中,FGCF、GCFG、CFGC试件中煤层积聚能量分别占总能量的79.8%、74.0%和76.3%,粗砂岩占12.1%、22.0%、18.8%,细砂岩占8.1%、4.0%、4.9%;组分间硬度差别越大,软弱岩层上的能量耗散也越多。软弱岩层是引发冲击地压能量的主要载体,是冲击地压防治的“能量关键层”;各组分硬度差别越大,冲击效应越强;据此提出了直接释能和间接释能两种防冲思路。

关键词:冲击地压;组合试件;能量积聚;能量关键层;单轴压缩实验

中图分类号:TD324

文献标志码:A

文章编号:1672-3767(2018)06-0001-10

DOI: 10.16452/j.cnki.sdkjzk.2018.06.001

Experimental Study on Determining “Key Strata of Energy” of Rock Burst

QIN Zhongcheng, CHEN Guangbo, LI Tan, SUN Wei, FU Biao

(College of Mining and Safety Engineering, Shandong University of Science and Technology,
Qingdao, Shandong 266590, China)

Abstract: Based on the uniaxial compression experiments on rock specimens of coal, gritstone and fine sandstone, the combined specimens of independent construction were subjected to uniaxial compression experiment. Then, the situation of energy accumulation before the failure of specimen was explored, the law of energy accumulation was discovered, and the “key strata of energy” was determined. According to the results, before the failure of binary composites of FCF, CFC, GCG and CGC, the accumulated energy of coal amounted to 88.5%, 79.0%, 71.4% and 79.6% of the total energy accumulated in the specimens respectively. Before the failure of binary composites of FGF and GFG, the accumulated energy of gritstone took up 61.2% and 76.5% of the total energy accumulated in the specimens respectively. In the ternary composites of FGCF, GCFG and CFGC, the accumulated energy of coal occupied 79.8%, 74.0% and 76.3% of the total energy accumulated in the specimens respectively while the accumulated energy of gritstone was 12.1%, 22.0% and 18.8% respectively and the accumulated energy of fine sandstone was 8.1%, 4.0% and 4.9%. The greater the difference in the component's hardness was, the more energy in the soft rock dissipated. Thus, the soft rock, as the main carrier of energy leading to rock burst, is the “key strata of

收稿日期:2018-03-19

基金项目:国家自然科学基金项目(51379119);国家自然科学基金青年基金项目(51604164)

作者简介:秦忠诚(1965—),男,山东潍坊人,教授,博士生导师,主要从事煤矿开采方面的教学与研究工作。

陈光波(1990—),男,山东淄博人,博士研究生,研究方向为矿山压力与岩层控制,本文通信作者。

E-mail:1295458017@qq.com

energy” of rock burst prevention and control and the impact of rock burst increases with the increase of the difference in the component's hardness. Accordingly, the ideas of direct and indirect release of energy were proposed to prevent and control rockburst.

Key words: rock burst; composite specimen; energy accumulation; key strata of energy; uniaxial compression experiment

近年来,我国煤炭开采工作已逐渐进入深部开采阶段,开采深度达到千米的矿井越来越多。开采深度不断增加,开采广度不断加大,开采速度逐渐加快,地下开采条件愈加复杂,开采环境愈加恶劣,应力环境极不稳定,巷道支护困难,矿井灾害发生的频次和烈度显著增加^[1-3]。这些动力灾害中,冲击地压最为严重,由于冲击地压具有突发性、瞬时震动性、巨大破坏性、复杂性等特点,治理困难,治理效果差^[4-6]。因此,从根本上防治冲击地压成为亟待解决的关键问题。

针对冲击地压机理,已形成多种冲击理论,如强度理论、刚度理论、能量理论、冲击倾向理论、变形失稳理论、三准则理论等^[7-10]。其中,能量理论^[11-13]以传统理论为基础,从能量角度揭示了冲击机理,受到普遍认可。能量理论认为,矿体与围岩构成了力学平衡系统,在矿山压力作用下积聚大量弹性能,当地下工程造成矿体-围岩平衡系统达到其破坏极限时,即该系统积聚的能量大于破坏消耗的能量时,盈余能量会以动能等形式对外释放,使得破碎的煤岩体向采掘空间喷出,形成冲击地压。能量理论虽然从能量积聚的角度阐述了冲击机理,但并未说明能量的积聚位置。而矿体-围岩系统是由多种软硬不一的岩层相间互层构成的^[14-17],不同性质的岩层能量积聚能力也各不相同,因此能量在矿体-围岩系统中分布不均。能量理论仅仅把围岩系统看作一个整体来研究^[18],没有考虑围岩系统的分层结构,对能量在不同层位积聚情况,缺乏必要认识和论证。因此,探讨能量在不同硬度岩层上的积聚情况,有助于发现能量在纵向层位上的积聚规律,确定能量积聚的关键岩层(“能量关键层”),进一步揭示冲击机理,从而缩小防冲区域,使防冲工作更具针对性。

国内外许多学者针对煤岩组合体开展了大量研究。Tan等^[19]研究了非均质组合体冲击倾向性和声发射特征;Zuo等^[20]认为煤岩组合体的破坏主要发生在煤上,同时围压、组合方式、加载条件对组合体失稳破坏也起着重要的作用;刘少虹^[21]研究了动静加载下的煤岩组合体冲击效应;姜耀东等^[22]对不同轴向载荷下煤岩组合体失稳特性做了研究;王晓南等^[23]针对煤层和顶底板构成的煤岩组合体的声发射、微震规律做了研究;付斌等^[24]运用RFA模拟软件模拟了不同倾角下的煤岩组合体的冲击情况。牟宗龙等^[25]通过分析煤岩组合体受载过程中参数变化规律,提出了煤岩组合体失稳破坏判据。秦忠诚等^[26]研究了组合方式对煤岩组合体的力学特性和冲击效应的影响;Petukhov等^[27]分析了二元系统和顶板-煤层系统峰值后的稳定性行为;Vakili等^[28]针对顶煤嵌入煤岩组合系统开发了一种新的破坏评价标准;Mohtarami等^[29]用稳定性分析的理论模型研究了土体与岩石之间的相互作用。以上专家学者针对组合体力学特性、冲击效应、失稳评价等方面做了大量研究,但针对煤岩组合体失稳破坏前的能量积聚情况却鲜有涉及。

据此,笔者对黑龙江峻德煤矿煤岩单体试件进行了单轴压缩破坏实验,探究了煤岩单体试件破坏前的能量积聚和耗散情况,并以此为基础,自主设计了煤岩组合体实验方案,探究了组合体破坏前能量在各组分的积聚和耗散释放情况,发现能量积聚、耗散规律,从而确定冲击地压“能量关键层”,并提出直接释能和间接释能两种防冲思路,以期冲击地压防治提供理论支撑。

1 煤岩单体实验

1.1 试件加工

实验以黑龙江峻德煤矿17煤层及顶底板为研究对象,17煤层平均煤厚为9.04 m,煤层平均倾角为6°,老顶为坚硬的细砂岩,直接顶为粗砂岩,底板以粉砂岩为主。试件从现场取样到加工成型尽可能保持试件原始状态。试件加工严格按照国家标准《煤和岩石物理力学性质测定方法(GB/T 23561—2009)》执行。

1) 所用试样均取自巷道的同一地点,保证了试样在实验时具有可比性,试样取出后迅速用薄膜包住,放入封闭的木箱中,保证试样不受外部干扰。同时记录采样时间、样品名称、采集地点等。

2) 用取芯机取出直径 50 mm 的试样,取样时钻头应垂直于试样的纹理。

3) 用切割机切割出长 100 mm、直径 50 mm 的标准试件。

4) 使用磨平机将试件的两端面磨平,防止出现断面不平应力集中。对煤、粗砂岩、细砂岩三种不同硬度的试件加工 6 个试件,如图 1 所示。

1.2 实验设备

采用 TAW-2000 KN 微机控制电液伺服岩石实验系统(图 2)对煤岩样进行全过程破坏实验,用引伸计测试件应变。实验系统输出试件的应力应变曲线,以及抗压强度、弹性模量等参数,由应力应变曲线积分可得试件峰前积聚的弹性能、峰后损耗的变形能,计算得到冲击能量指数。

1.3 实验过程与实验数据

实验采用位移加载,加载速率 0.005 mm/s。实验得出煤岩样应力应变曲线(图 3),试件破坏形态如图 4。

为减小实验误差,对煤(coal,C)、细砂岩(fine sandstone,F)、粗砂岩(gritstone,G)6 组参数数据求平均值,如表 1 所示。由表可知,抗压强度: $F > G > C$;弹性模量: $F > G > C$;峰前能量: $F > G > C$;煤为强冲击,细砂岩和粗砂岩为弱冲击;三种岩石在相同应力的条件下,能量积聚顺序: $C > G > F$ 。

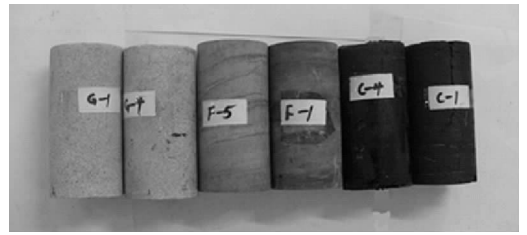


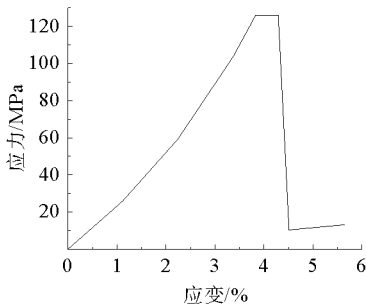
图 1 部分岩样照片

Fig. 1 A picture of some prepared rock specimens

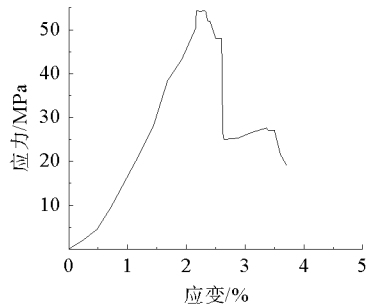


图 2 岩石试验系统图

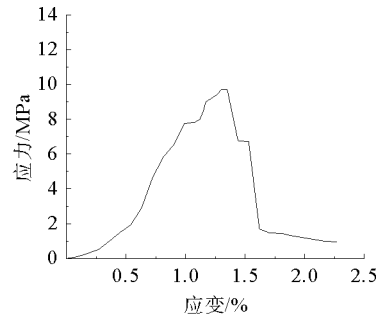
Fig. 2 A picture of the rock tester



(a) 细砂岩



(b) 粗砂岩



(c) 煤

图 3 试件应力应变曲线

Fig. 3 Some representative stress-strain curves of different types of specimens



(a) 细砂岩试件破坏形态



(b) 粗砂岩试件的破坏形态



(c) 煤试件破坏形态

图 4 煤岩样破坏形态

Fig. 4 The failure forms of different types of coal-rock specimens

表 1 煤岩试件参数的均值数据

Tab.1 The mean data of the parameters of the coal-rock specimens

试件	R_c /MPa	E /MPa	E_s /kJ	E_x /kJ	K_E
C	12.45	968.03	0.102	0.013	7.615
F	125.97	3 522.45	18.282	7.800	2.344
G	55.46	2 384.58	2.598	0.919	2.827

注:C—煤;F—细砂岩;G—粗砂岩; R_c —抗压强度; E —弹性模量; E_s —峰前能量; E_x —峰后能量; K_E —冲击能量指数,下同。

2 煤岩组合体实验研究

2.1 实验方案

工程实际中,煤与围岩组成的系统在高地应力条件下积聚大量能量,当这些能量迅速释放时,系统瞬间失稳,发生冲击。为简要模拟矿井冲击情况,自主设计了组合方案(图 5),部分组合试件如图 6。组合实验要求:

- 1) 上下岩块为同一种岩层的岩块,中间试件尺寸为标准试件($d=50\text{ mm}, l=100\text{ mm}$);
- 2) 为保证轴向压缩时,中间试件首先破坏,面积符合 $S_{上/下} > (R_{c中}/R_{c上/下}) \cdot S_{中}$ 条件。因 $R_{c中}$ 、 $R_{c上/下}$ 由上述实验已测得,又因中间试件为标准试件, $S_{中} = \pi \times 25^2 = 1\ 962.5\text{ mm}^2$,可计算 $S_{上/下}$,便于上下试件尺寸切割;
- 3) 当上下岩块接触面积不同时,为保证岩块之间受力均匀,不出现应力集中,在试件之间架设钢板。

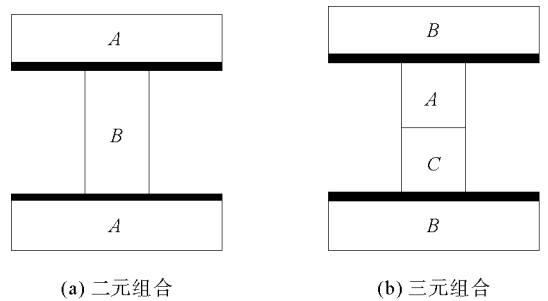


图 5 不同组合体组合模型

Fig.5 The combination modes of the different composite specimens

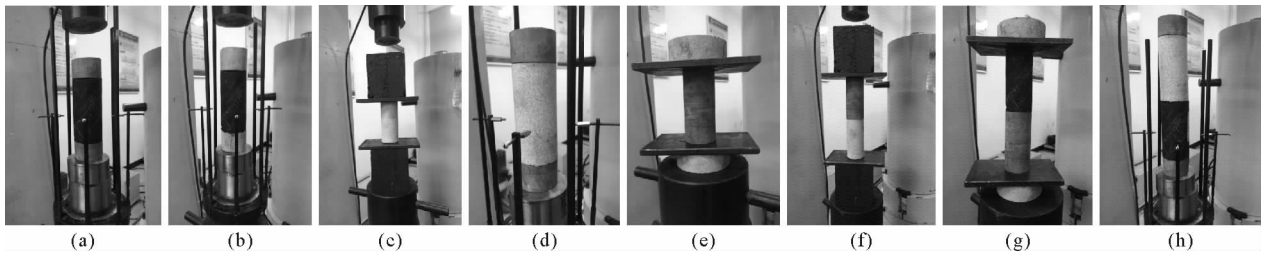


图 6 部分组合体试件

Fig.6 Pictures of certain composite specimens

2.2 实验结果及分析

实验结果如图 7、图 8 和表 2 所示。由应力应变曲线(图 7)得知,在压密阶段:GCG 组合体、FCF 组合体、FGCF 组合体、GCFG 组合体压密阶段比较明显,应力增值较少,但应变较大;其次为 CGC 组合体、FGF 组合体、CFGC 组合体;最不明显的为 CFC 组合体与 GFG 组合体,这是由煤、粗砂岩、细砂岩的结构特点所导致的,即煤孔隙裂隙最多,细砂岩最少。弹性阶段:CFC 组合体与 GFG 组合体呈现明显的弹性阶段,在该阶段比较稳定,GCG 组合体、FCF 组合体、FGCF 组合体、GCFG 组合体在该阶段也相对比较明显。塑性阶段:GCG 组合体、FCF 组合体、FGCF 组合体、GCFG 组合体塑性阶段明显,这是煤中裂纹裂隙不断闭合,扩展的结果。

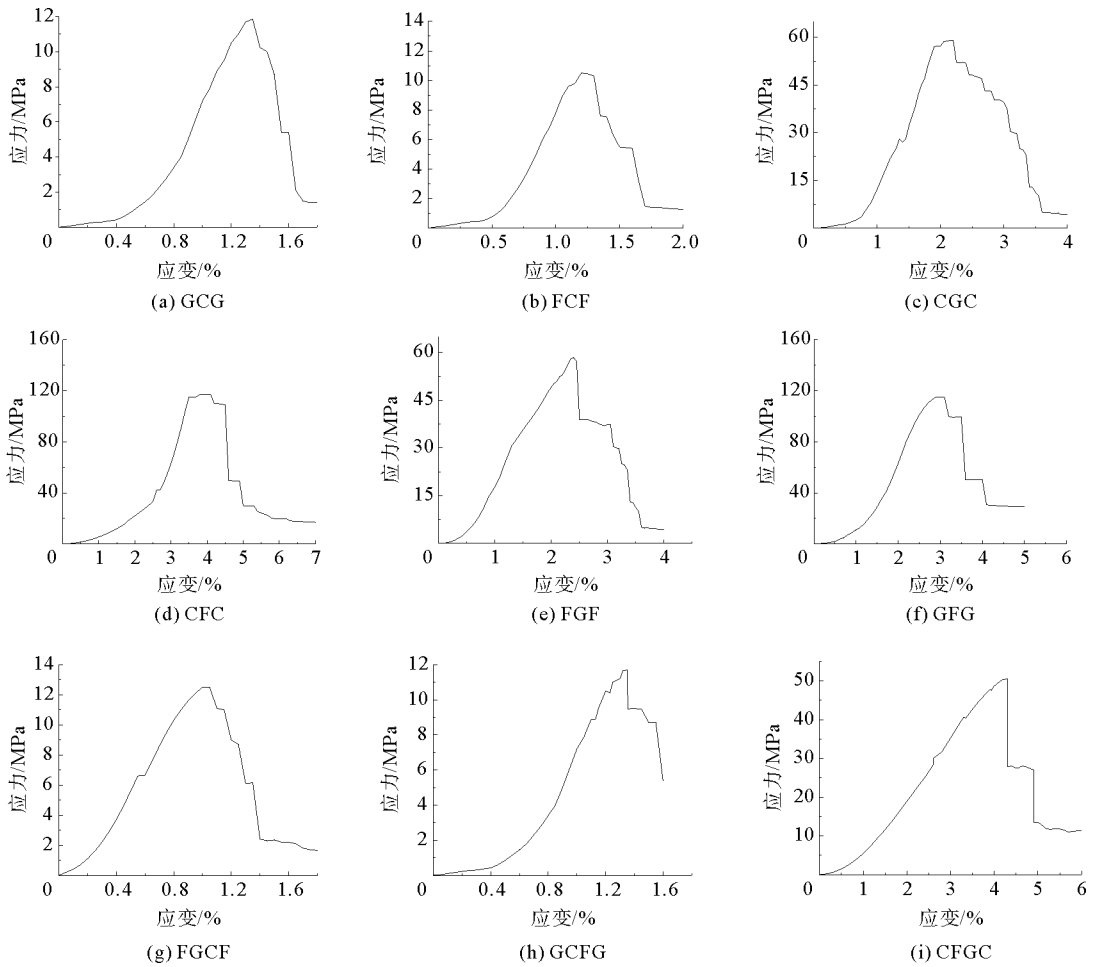


图 7 组合试件应力应变曲线

Fig. 7 The stress-strain curves of combined specimens

由组合体破坏形态(图 8)可知:GCG 组合体、FCF 组合体、FGCF 组合体、GCFG 组合体中均有煤试件参与,且煤发生破坏,煤呈“碎状”破坏形态,粒度小,且破坏极不规则,属于完全破碎状态。这是由于煤试件结构特点所致,煤试件中抗压强度小,致密度低,孔隙、裂隙较多,甚至出现隐藏的软弱面,在加载时裂纹裂隙贯通,极易破碎。CGC 组合体、FGF 组合体、CFGC 组合体中均有粗砂岩试件参与,且粗砂岩发生破坏,粗砂岩呈“Y 型”破坏形态,破坏不完全,没有表现出碎状破坏形态,这与粗砂岩本身结构特点相一致,结构相对致密,无明显孔隙裂隙出现,但一旦形成破裂面后,孔隙裂隙会沿着破裂面迅速扩展,直至失稳。粗砂岩破坏时剪切特征明显,破碎粒度较大,破碎不完全。CFC 组合体与 GFG 组合体中的细砂岩破坏极不完全,且破坏时间迅速,具有明显的瞬时破坏特征,实验过程中会有岩石向周围弹射,其破坏力度最大,破坏效应最强烈。

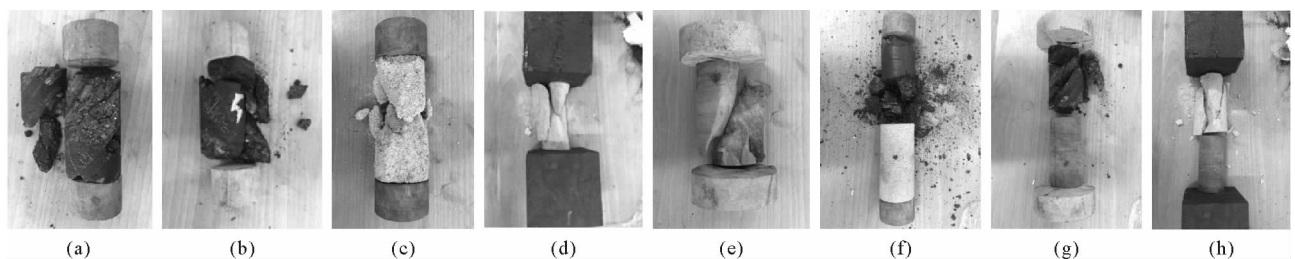


图 8 部分组合体的破坏形态

Fig. 8 The failure forms of certain composite specimens

为减小实验误差,对各参数取平均值(表 2)。由组合体抗压强度可知,GCG 组合体、FCF 组合体、FGCF 组合体、GCFG 组合体抗压强度分别为 11.11、11.36、10.83 和 11.27 MPa,比较接近煤试件的抗压强度;CGC 组合体、FGF 组合体、CFGC 组合体抗压强度分别为 54.47、53.57 和 54.95 MPa,比较接近粗砂岩的抗压强度;CFC 组合体与 GFG 组合体的抗压强度分别为 128.15 和 123.07 MPa,比较接近细砂岩的抗压强度。由此可以看出,组合试件的抗压强度接近中间破坏试件的抗压强度,上下试件仅仅起到垫层作用。由组合体冲击能量指数来看:FCF 组合体与 CFC 组合体冲击能量指数较大,为 6.020 和 8.510,属于强冲击等级,FGF 组合体、GFG 组合体冲击能量指教较小,为 2.199 和 2.798,属于弱冲击等级。由此表明:组合体各组间硬度差别越大,组合体的冲击效应越强,反之则越弱。

表 2 组合试件数据均值

Tab. 2 The average data of combined specimens

组合试件	R_c /MPa	E_s /kJ	E_x /kJ	K_E
CFC	128.15	86.773	10.197	8.510
FCF	11.36	0.104	0.017	6.020
GFG	123.07	68.325	24.419	2.798
FGF	53.57	3.146	1.431	2.199
GCG	11.11	0.126	0.024	5.208
CGC	54.47	12.877	2.998	4.295
CFGC	54.95	13.947	2.058	6.788
GCFG	11.27	0.127	0.018	7.039
FGCF	10.83	0.099	0.015	6.503

3 冲击防治关键岩层的判定

组合体受力分析如图 9,物体间作用力和反作用力大小相等: $F_1 = F_2, \sigma_1 \times S_1 = \sigma_2 \times S_2$ 。根据组合体的抗压强度(σ_2)可以求得中间试件的应力(σ_1), $\sigma_1 = (\sigma_2 \times S_2) / S_1$,如图 10 所示。利用 Origin 数据处理软件求得中间试件在 σ_1 作用下积聚的能量,记为 $S(OA\epsilon_1)$,则组合体上下试件积聚的能量 E 等于组合体总能量 $S(OB\epsilon_2)$ 减去中间试件积聚的能量 $S(OA\epsilon_1)$,如图 11,即

$$E = S(OB\epsilon_2) - S(OA\epsilon_1) \tag{1}$$

以 GCG 组合体为例,计算能量积聚百分比。GCG 组合体破坏前积聚的能量为 0.126 kJ,GCG 组合体的峰值应力为 11.11MPa,由 $\sigma_1 \times S_1 = \sigma_2 \times S_2$ 可得中间标准试件(C)所受的应力为 11.11 MPa(因为 $S_1 = S_2$,所以 $\sigma_1 = \sigma_2$)。根据中间标准试件(C)的应力应变曲线,对 11.11 MPa 应力曲线与应变围成的面积积分即为 C 在该应力下积聚的能量(0.090 kJ);又因为 GCG 组合体破坏前积聚的能量为 0.126 kJ,所以积聚在 G 上的能量为 0.126 kJ - 0.090 kJ = 0.036 kJ。因此,积聚在 C 中的能量百分比为 0.090 kJ ÷ 0.126 kJ = 71.4%,积聚在 G 上的能量百分比为 0.036 kJ ÷ 0.126 kJ = 28.6%。图 12 为组合体各组分积聚能量分布柱状图。

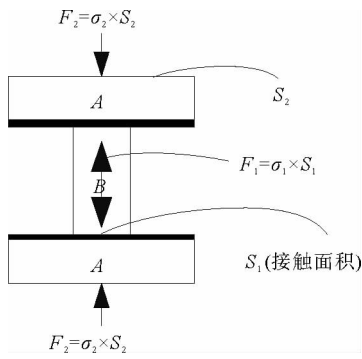


图 9 组合体受力分析

Fig. 9 Force analysis of combined specimen

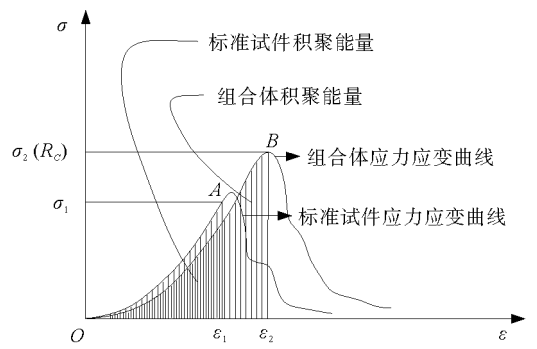


图 10 组合体能量分析

Fig. 10 Energy calculation of combined specimen

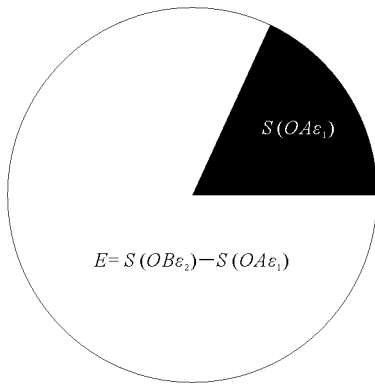


图 11 能量计算示意图

Fig. 11 Schematic diagram of energy calculation

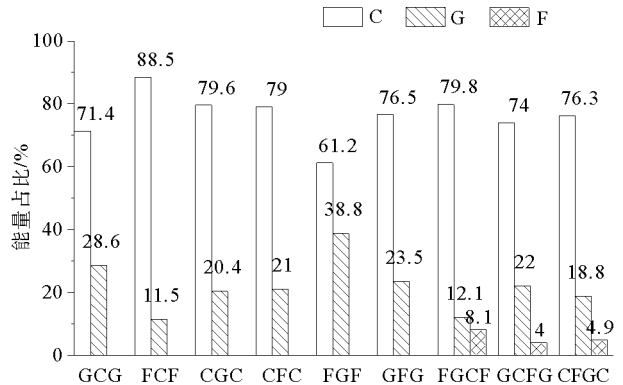


图 12 组合体各组分积聚能量柱状图

Fig. 12 The accumulating energy histogram of components in a combination

1) 二元组合体能量积聚分析:GCG、CGC 组合体中,积聚在煤层上的能量分别为 0.090 和 10.250 kJ, 占总能量的 71.4%和 79.6%,粗砂岩占 28.6%和 20.4%。FCF、CFC 组合体中,积聚在煤试件上的能量分别为 0.092 和 68.560 kJ,占总能量的 88.5%和 79.0%,粗砂岩占 11.5%和 21.0%。FGF、GFG 组合体中,积聚在粗砂岩试件上的能量分别为 1.926 和 52.250 kJ,占总能量的 61.2%和 76.5%,细砂岩占 38.8%和 23.5%。煤和粗砂岩上的能量积聚的越多。则耗散或者破坏时释放的越多,因此,从能量耗散角度分析,煤和粗砂岩也是能量耗散的关键试件。

2) 三元组合体能量积聚分析:FGCF、GCFG、CFGC 组合体中,积聚在煤层上的能量分别为 0.094、0.094 和 10.640 kJ,占总能量的 79.8%、74.0%和 76.3%,粗砂岩占 12.1%、22.0%和 18.8%,细砂岩占 8.1%、4.0%和 4.9%。由三元组合试件能量分布情况,煤耗散和释放的能量较多,细砂岩中能量的耗散和释放强度较小。

组合试件破坏前,积聚在煤组分上的能量最多,积聚在细砂岩组分上的能量最少。这表明纵向上软弱岩层或层区是引发冲击地压能量的主要载体,主导着冲击地压的发生,而坚硬岩层或层区仅仅起承载和夹持作用,储存能量较少。因此,软弱岩层或由多层软弱岩层构成的层区是冲击地压防治的关键岩层。

利用软弱岩层是引发冲击地压能量的主要载体这一结论,从能量角度防治冲击地压有两种思路:一是直

接释能,如把无冲击危险或冲击危险小的软弱煤层作为解放层开采,振动卸压爆破形成的卸载带波及到能量积聚的软弱岩层,煤体钻孔卸压和煤层的注水软化等;二是间接释能,即对承载软弱岩层的坚硬顶板进行定向裂缝、顶板爆破、顶板切割等。这一结论,不仅填补了能量理论在能量具体积聚层位研究上的不足,而且对从能量角度防治冲击地压提供了理论指导。

4 结论

1) 当多种软硬不同的岩层相间互层时,软弱岩层是引发冲击地压能量的主要载体,是冲击地压防治关键层。这一结论弥补了能量理论在能量积聚和耗散方面研究的不足,扩充了能量理论,进一步阐述了冲击地压的发生机理。

2) 组合体的冲击效应受各组分硬度的影响。组合体内单一组分的硬度不能决定组合体的冲击特性,组分间硬度的差异程度才是组合体冲击效应的决定性因素。组分间硬度差别越大,组合体冲击效应越强,反之则越弱。

3) 软弱岩层比坚硬岩层更容易耗散和释放能量,利用这一结论,从能量积聚和耗散的角度,可采用直接释能和间接释能两种防冲思路。

参考文献:

- [1]陈绍杰,郭宇航,黄万朋,等.粒度对红砂岩力学性质影响规律与机制试验研究[J].山东科技大学学报(自然科学版),2017,36(6):8-14.
CHEN Shaojie, GUO Yuhang, HUANG Wanpeng, et al. Experimental study of influence regularity and mechanism of particle size on mechanical properties of red sandstone[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2017, 36(6): 8-14.
- [2]YUAN S C, HARRISON J P. A review of the state of the art in modeling progressive mechanical breakdown and associated fluid flow in intact heterogeneous rocks[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2006, 43(7): 1001-1022.
- [3]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 thick-ness[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(7): 1659-1666.
- [4]TAN Y L, YIN Y C, HUANG D. Inhomogeneous micro-structure influence on macro-crack of sandstone[J]. Journal of Testing and Evaluation, 2013, 41(6): 1024-1031.
- [5]陈光波.基于云模型和 D-S 理论的冲击地压危险性综合评价[J].矿业研究与开发,2017,37(6):26-30.
CHEN Guangbo. Comprehensive evaluation of rock burst risk based on cloud model and D-S theory[J]. Mining Research and Development, 2017, 37(6): 26-30.
- [6]来兴平,李云鹏,王宁波,等.基于梁结构的急斜煤层综放工作面顶板变形特征[J].采矿与安全工程学报,2015,32(6):871-876.
LAI Xingping, LI Yunpeng, WANG Ningbo, et al. Roof deformation characteristics with full-mechanized caving face based on beam structure in extremely inclined coal seam[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2015, 32(6): 871-876.
- [7]HASHIBA K, FUKUI K. Effect of water on the deformation and failure of rock in uniaxial tension[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2014, 48(4): 1751-1761.
- [8]来兴平,孙欢,单鹏飞,等.急倾斜坚硬岩柱动态破裂“声-热”演化特征试验[J].岩石力学与工程学报,2015,34(11):2285-2292.
LAI Xingping, SUN Huan, SHAN Pengfei, et al. Acoustic emission and temperature variation in failure process of hard rock

- pillars sandwiched between thick coal seams of extremely steep[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(11): 2285-2292.
- [9] 刘晓辉, 张茹, 刘建锋. 不同应变率下煤岩冲击动力试验研究[J]. 煤炭学报, 2012, 37(9): 1528-1534.
LIU Xiaohui, ZHANG Ru, LIU Jianfeng. Dynamic test study of coal rock under different strain rates[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(9): 1528-1534.
- [10] 黄达, 谭清, 黄润秋. 高围压卸荷条件下大理岩破碎块度分形特征及其与能量相关性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(7): 1379-1389.
HUANG Da, TAN Qing, HUANG Runqiu. Fractal characteristics of fragmentation and correlation with energy of marble under unloading with high confining pressure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(7): 1379-1389.
- [11] 张志镇, 高峰. 单轴压缩下红砂岩能量演化试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(5): 953-962.
ZHANG Zhizhen, GAO Feng. Experimental research on energy evolution of red sandstone samples under uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(5): 953-962.
- [12] 黄达, 黄润秋, 张永兴. 粗晶大理岩单轴压缩力学特性的静态加载速率效应及能量机制试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(2): 245-255.
HUANG Da, HUANG Runqiu, ZHANG Yongxing. Experimental investigations on static loading rate effects on mechanical properties and energy mechanism of coarse crystal grain marble under uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(2): 245-255.
- [13] 徐文彬, 宋卫东, 王东旭, 等. 三轴压缩条件下胶结充填体能量耗散特征分析[J]. 中国矿业大学学报, 2014, 43(5): 808-814.
XU Wenbin, SONG Weidong, WANG Dongxu, et al. Energy dissipation properties of cement backfill body under triaxial compression conditions[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2014, 43(5): 808-814.
- [14] 王妍丹. 非常温下煤岩样声发射及电磁辐射研究[J]. 矿业安全与环保, 2017, 44(3): 6-9.
WANG Yandan. Study on acoustic emission and electromagnetic radiation of coal and rock samples under extraordinary temperature[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2017, 44(3): 6-9.
- [15] 陈光波. 煤岩组合体动力破坏规律实验研究[D]. 哈尔滨: 黑龙江科技大学, 2016.
- [16] 潘俊锋, 毛德兵, 蓝航, 等. 我国煤矿冲击地压防治技术研究现状及展望[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(6): 21-25.
PAN Junfeng, MAO Debing, LAN Hang, et al. Study status and prospects of mine pressure bumping control technology in china[J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(6): 21-25.
- [17] 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.
- [18] 蓝航. 浅埋煤层冲击地压发生类型及防治对策[J]. 煤炭科学技术, 2014, 42(1): 9-13.
LAN Hang. Prevention measures and types of mine strata pressure bump occurred in shallow depth seam[J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(1): 9-13.
- [19] TAN Y L, GUO W Y, GU Q H, et al. Research on the rockburst tendency and AE characteristics of inhomogeneous coal-rock combination bodies[J]. Shock and Vibration, 2016(2): 1-11.
- [20] ZUO J P, WANG Z F, ZHOU H W, et al. Failure behavior of a rock-coal-rock combined body with a weak coal interlayer[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2013, 23(6): 907-912.
- [21] 刘少虹. 动静加载下组合煤岩破坏失稳的突变模型和混沌机制[J]. 煤炭学报, 2014, 39(2): 292-300.
LIU Shaohong. Nonlinear catastrophe model and chaotic dynamic mechanism of compound coal-rock unstable failure under

coupled static-dynamic loading[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(2): 292-300.

- [22] 姜耀东, 王涛, 宋义敏, 等. 煤岩组合结构失稳滑动过程的实验研究[J]. 煤炭学报, 2013, 38(2): 177-182.
JIANG Yaodong, WANG Tao, SONG Yimin, et al. Experimental study on the stick-slip process of coal-rock composite samples[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(2): 177-182.
- [23] 王晓南, 陆菜平, 薛俊华, 等. 煤岩组合体冲击破坏的声发射及微震效应规律试验研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(9): 2569-2575.
WANG Xiaonan, LU Caiping, XUE Junhua, et al. Experimental research on rules of acoustic emission and microseismic effects of burst failure of compound coal-rock samples[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(9): 2569-2575.
- [24] 付斌, 周宗红, 王友新, 等. 不同煤岩组合体力学特性的数值模拟研究[J]. 南京理工大学学报, 2016, 40(4): 485-492.
FU Bin, ZHOU Zonghong, WANG Youxin, et al. Numerical simulation of different combination of coal and rock sample mechanics and acoustic emission characteristics[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2016, 40(4): 485-492.
- [25] 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.
- [26] 秦忠诚, 陈光波, 秦琼杰. 组合方式对煤岩组合体力学特性和冲击倾向性影响实验研究[J]. 西安科技大学学报, 2017, 37(5): 655-661.
QIN Zhongcheng, CHEN Guangbo, QIN Qiongjie. Effects of combination mode on mechanical properties and rock burst tendency of the coal-rock combinations[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2017, 37(5): 655-661.
- [27] PETUKHOV I M, LINKOV A M. The theory of post-failure deformations and the problem of stability in rock mechanics [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1979, 16(2): 57-76.
- [28] VAKILI A, HEBBLEWHITE B K. A new cavability assessment criterion for longwall top coal caving[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2010, 47(8): 1317-1329.
- [29] MOHTARAMI E, JAFARI A, AMINI M. Stability analysis of slopes against combined circular-toppling failure[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2014, 67(3): 43-56.

(责任编辑: 吕海亮)