



您可能感兴趣的文章、专题：

“煤矿智能化综述及关键技术”专题

“我国煤矿瓦斯防治理论技术研究进展”专题

“煤地质与煤结构”专题

“煤矿安全+智能化”专题

“深部煤层瓦斯精准抽采”专题

“中国煤科首席科学家”专题

“矿井冲击地压灾害防治技术及工程实践”专题

2020 年度《煤炭科学技术》“领跑者 5000”论文

2021《煤炭科学技术》封面文章

煤炭行业青年科学家论坛(2021 年)



移动扫码阅读

魏 辉.复合弱结构失稳变形及冲击倾向性变化特征分析[J].煤炭科学技术,2021,49(9):32-37.doi:10.13199/j.cnki.cst.2021.09.005

WEI Hui. Analysis on instability deformation and burst liability of composite weak structures [J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(9): 32-37. doi: 10.13199/j.cnki.cst.2021.09.005

# 复合弱结构失稳变形及冲击倾向性变化特征分析

魏 辉<sup>1,2</sup>

(1.山西工程技术学院 采矿工程系,山西 阳泉 045000;2.江苏海洋大学 土木与港海工程学院,江苏 连云港 222005)

**摘要:**为了解决矿井开采过程中冲击煤岩体应力集中及能量积聚的问题,提出了人为改变煤岩体强度形成复合弱结构的概念,并根据软硬岩层强度比例、体积大小等因素引入了复合度 $K_C$ ,可以对复合弱结构应力集中大小及能量耗散程度进行判定。在此基础上运用RFPA数值模拟方法对比分析了具有不同复合度煤岩体的变形失稳特征及应力-应变曲线变化形式,并从煤岩体冲击倾向性判定角度对复合弱结构改变煤岩体冲击倾向性进行了相关探讨。结果表明:强度比例和体积大小是复合弱结构控制冲击能量的主要影响因素;复合弱结构破坏失稳过程中的弱化阶段是其耗散冲击能量的特有阶段,且耗散程度与复合度 $K_C$ 的大小密切相关;复合度 $K_C$ 不仅能够改变整体结构的裂缝发育程度、破坏形式及应力-应变曲线形态,而且与煤岩结构的最大集中应力、应力峰值位置及能量耗散程度成反比例关系;利用冲击倾向性判定准则中弹性能指数 $W_{ET}$ 和冲击能指数 $K_E$ 的曲线及面积变化特征验证了复合弱结构对冲击能量的耗散过程及控制作用,复合弱结构可以通过减小冲击煤岩体中储存弹性性能比例,增加损失耗散能比例的方式对冲击能量的积聚与耗散程度进行控制,从而减弱煤岩体冲击倾向性,降低冲击能量释放程度及危险等级,达到防治冲击地压的目的。

**关键词:**冲击煤岩体;复合弱结构;应力-应变曲线;冲击倾向性

**中图分类号:**TD324      **文献标志码:**A      **文章编号:**0253-2336(2021)09-0032-06

## Analysis on instability deformation and burst liability of composite weak structures

WEI Hui<sup>1,2</sup>

(1. Department of Mining Engineering, Shanxi Institute of Technology, Yangquan 045000, China;

2. School of Civil Engineering, Jiangsu Ocean University, Lianyungang 222005, China)

**Abstract:** In order to control the stress concentration and energy accumulation in impact coal-rock mass, the concept of composite weak structure is proposed. Based on the strength ratio and volume of the soft-hard strata, the composite degree  $K_C$ , which can pinpoint the stress concentration and energy dissipation degree of composite weak structure, is introduced. On this basis, the RFPA numerical simulation method is used to compare and analyze the instability characteristics and stress-strain curve changes in various composite weak structures. Weakening the impact tendency by composite weak structure from the point of view of burst liability is studied. The results show that strength ratio and volume size are the main factors for composite weak structure to control impact energy, the weakening stage in the process of failure and instability of composite weak structure is the unique stage of dissipating impact energy, and the dissipation degree is closely related to the  $K_C$ . The  $K_C$  not only change the fracture development degree, failure form and stress-strain curve of the whole structure, but  $K_C$  is also inversely proportional to the maximum concentration stress, stress peak location and energy dissipation degree; the dissipative effect by the composite weak structure is verified by the elastic energy index  $W_{ET}$  and the impact energy index  $K_E$ . Composite weak structure can reduce the elastic energy stored in coal-rock mass and increase the loss of dissipative energy, which can weaken the burst liability of coal-rock, reduce impact energy release and risk level, and achieve the purpose to prevent and control the rockburst.

**Key words:** impact coal-rock mass; composite weak structure; stress-strain curve; burst liability

收稿日期:2020-10-25;责任编辑:朱恩光

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51674519);江苏省高等学校自然科学研究资助项目(19KJB560010)

作者简介:魏 辉(1989—),男,江苏连云港人,讲师,博士。E-mail:wei632986698@163.com

## 0 引言

现如今煤矿开采深度不断增加,煤岩体受到较大地应力作用,导致煤层及顶底板积聚大量弹性能量,尤其在强度较高的冲击煤岩体中,极易引发冲击地压事故<sup>[1-4]</sup>。冲击能量的积聚与释放都是以煤岩结构作为载体,不同的煤岩组合结构具有不同的应力分布形式及能量耗散特征<sup>[5-6]</sup>。因此,可以通过人为方式改变冲击煤岩体结构,对其进行分区弱化处理,破坏原始煤岩组成形态,形成具有强弱差异的复合结构。复合弱结构能够定向改变煤岩体失稳破坏形式及采掘空间的应力分布,吸收并耗散冲击能量及减缓能量释放速度,降低冲击危险等级,达到防治冲击地压的效果。

目前,已有许多学者对不同煤岩结构的失稳变形及能量耗散进行了多方面研究。左建平等<sup>[7]</sup>分析了不同组合方式对煤岩试样的变形破坏特征及冲击倾向性的影响,通过试验验证了煤岩组合体的峰前积聚能量与峰后耗散能量随着单轴抗压强度的增大而增大;单鹏飞等<sup>[8]</sup>分析了单轴压缩荷载作用下裂缝煤岩体变形破坏过程中的能量释放规律,结果表明裂缝煤岩破裂所耗散的能量随着声发射能量的增加而减少;蒋军军等<sup>[9]</sup>借助实验室方法进行了不同尺寸强冲击煤岩体的单轴压缩声发射测试试验,得出可以将煤岩体破坏过程中塑性阶段声发射b值作为煤岩失稳破坏的前兆信息;陈光波等<sup>[10]</sup>开展了不同煤岩比例组合体的轴向加载试验,试验结果表明,煤岩系统中的能量主要分布在软弱岩层中,且弹性模量越大,积聚的能量越少;杨磊等<sup>[11]</sup>对煤岩组合体进行了单轴压缩与循环加卸载试验,对比分析了不同煤岩组合体输入能密度、弹性能密度、耗散能密度与抗压强度的演化规律;肖晓春等<sup>[12]</sup>利用单轴压缩试验对组合煤岩结构的失稳特征进行了分析,得出了不同组合结构对煤岩破坏过程中能量耗散的影响规律;卢志国等<sup>[13]</sup>按不同层理角度建立了3组标准煤样,对其破坏断口进行了细观分析,分别从能量积聚、释放量级与速度角度等方面分析了层理角度对煤岩冲击倾向性的影响。

笔者则是在不同煤岩组合结构破坏失稳特征的基础上,利用人为方法建立了具有不同强弱比例的煤岩复合弱结构。通过分析不同强弱组合形式煤岩结构的弱化程度,对比结构体的失稳破坏特征及应力-应变曲线变化形式,从冲击倾向性角度对复合弱结构耗散冲击能量展开研究,为复合弱结构防控冲击地压提供一定的研究思路及理论基础。

## 1 复合弱结构及其复合度判定

### 1.1 复合弱结构概念

在煤岩地质形成过程中,由于自然影响及人为因素会形成不同的煤岩成分及结构组合形式,导致煤岩层有软硬强弱之分,不同的煤岩结构形成的应力分布状态及能量储存形式截然不同。因此根据煤岩结构基本性质,提出复合弱结构的概念,即利用人为制造方法,在保持整体结构稳定的前提下对冲击煤岩体进行分区弱化,通过改变煤岩体强弱比例关系控制应力集中程度及能量变化趋势的一种复合煤岩结构。

复合弱结构具有强弱结构的共同性质,其中强结构(坚硬岩层)可以保持整体结构完整性,是控制能量的基本条件;弱结构(软弱岩层)可以改变整体结构的变形破坏形式及能量耗散程度,对防控冲击能量起到主导作用。

### 1.2 复合弱结构控制冲击能量影响因素

1)强度比例。强度比例主要是指复合弱结构中软硬岩层的强度关系。一般认为,普氏系数 $f \leq 2.5$ (单轴抗压强度 $\leq 25$  MPa)的岩层称为软弱岩层,且强弱比值 $\sigma_h/\sigma_s \geq 2$ ( $\sigma_h$ 为坚硬岩层单轴抗压强度; $\sigma_s$ 为软弱岩层单轴抗压强度)<sup>[14-16]</sup>。复合弱结构中强弱比值越大,说明强层所占比例大,抵抗破坏的能力强,能够积聚较大的弹性变形能,结构发生冲击破坏时释放的能量就越大;反之强弱比值越小,说明弱层所占比例较大,弱层对整体结构的强度和破坏方式起着决定作用,能够减弱整体结构的能量积聚程度,降低能量释放速度及强度等。

2)体积大小。在强弱比例一定的条件下,强弱层所占体积直接影响着复合弱结构对能量的耗散程度。坚硬岩层体积越大,整个结构所表现的强度就越大,完整性和稳定性越好,对能量的耗散作用就会减小;反之,软弱岩层厚度越大,即所占的比例越多,结构整体强度越弱,破坏时塑性变形阶段越长,对能量的耗散程度会加大。

3)岩层其他性质。除强度比例和体积大小2个主要因素外,复合弱结构还受强弱层之间相互接触面、边界条件的受力状态及煤岩层自身物理力学性质的影响。

### 1.3 复合度的判定

复合弱结构的变形破坏主要是由强度和体积两者决定的。但在实际工程中,增加煤岩层强度较为困难,所以要通过人为方法减小坚硬岩层所占比例来形成复合弱结构。因此,以软弱部分为研究对象,

根据上述因素对整体结构的影响特性,引入复合度  $K_c$ (软弱部分在复合弱结构中所占的比例大小)对整体结构稳定性及耗散能量程度进行判定。假设复合弱结构为层状结构,其中复合弱结构总体积为  $V$ ,弱结构部分各层的体积和单轴抗压强度分别为  $V_1$ 、 $V_2, \dots, V_n, R_1, R_2, \dots, R_n, n$  为弱结构层数量,如图 1 所示。

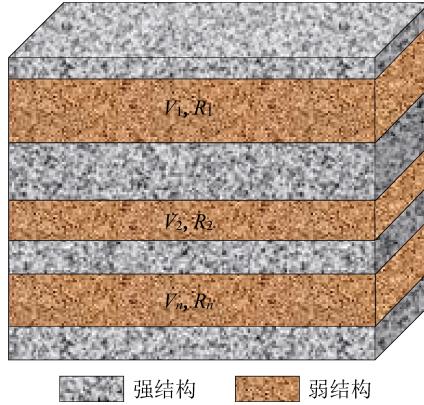


图 1 复合度示意

Fig.1 Schematic of composite degree

复合弱结构复合度可表示为

$$K_c = \left( \frac{V_1 R_1 + V_2 R_2 + \dots + V_n R_n}{VR} \right) \times 100\% \quad (1)$$

其中: $K_c$ 为复合弱结构复合度; $V$ 为复合弱结构总体积, $m^3$ ; $R$ 为复合弱结构原始强度,MPa。由式(1)可知,在复合弱结构总体积不变的情况下,强结构体积越大,强度越高,其复合度  $K_c$ 越小,整体结构耗散冲击能量的程度就大幅减弱;相反,若将更多的强结构转化为弱结构,相当于加大了软弱岩层的体积,会导致复合度  $K_c$ 增大,从而加大对冲击能量的耗散程度。因此,可以用复合度  $K_c$ 对复合弱结构的整体强度和耗散能量程度进行判定。

## 2 复合弱结构变形失稳模拟

通过 RFPA 数值模拟软件对具有不同复合度的复合弱结构进行单轴抗压强度模拟试验,分析复合度  $K_c$ 对整体结构应力应变及能量耗散的影响。

### 2.1 模型建立

以唐山煤矿 Y484 工作面煤岩参数为基准,建立  $100 \times 200$  数值模拟网格,表示尺寸  $50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$  的标准试件。为简化结果比较,设定坚硬部分强度为  $60 \text{ MPa}$ ,软弱部分强度为  $20 \text{ MPa}$ ,分别增减软弱部分体积大小来改变复合度。

### 2.2 模拟方案

共建立 6 个复合弱结构模型,弱结构部分宽度和长度不变,令弱结构高度分别为  $0, 20, 40, 60, 80, 100$  mm, 得出其复合度  $K_c$  分别为  $0, 20\%, 40\%, 60\%, 80\%$  和  $100\%$ , 其中  $K_c=0$  和  $K_c=100\%$  作为 2 个对比模型,  $K_c=0$  表示原始冲击煤岩体,  $K_c=100\%$  表示完全软弱煤岩体, 具体方案如图 2 所示。

由图 2 可知,随着复合度逐渐增大,复合弱结构的体积逐渐减小,且弱结构部分高度也逐渐减小。

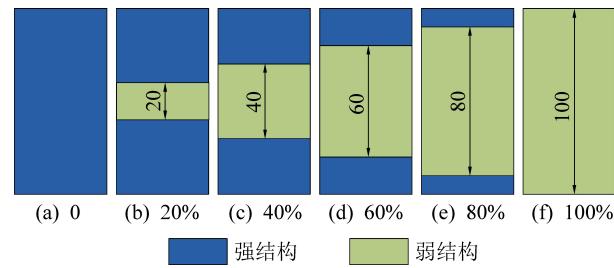


图 2 复合弱结构对比方案

Fig.2 Comparison scheme of composite weak structure

### 2.3 模拟结果分析

通过对不同复合度的复合弱结构进行试验模拟,得到主应力分布(图 3)和应力-应变曲线(图 4)。由图 3 可得,随着复合弱结构软弱部分比例逐渐增加,即复合度增大(由  $K_c=0$  到  $K_c=100\%$ ),试件的变形破坏区域逐渐扩大,且都集中在软弱部分,破裂形式由单个闭合裂缝逐渐扩展为贯穿整个试件的裂缝;当复合度  $K_c$  达到  $80\% \sim 100\%$  时,试件出现了整体失稳破坏,说明结构的整体性和稳定性已经大幅度降低。

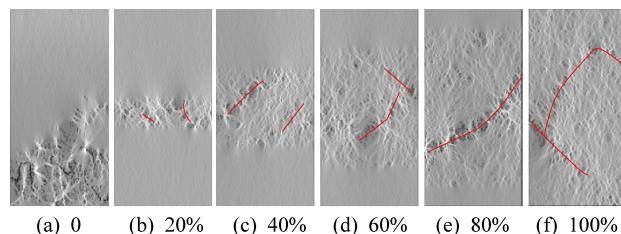


图 3 不同复合度主应力模拟结果

Fig.3 Simulation results of principal stress with different composite degree

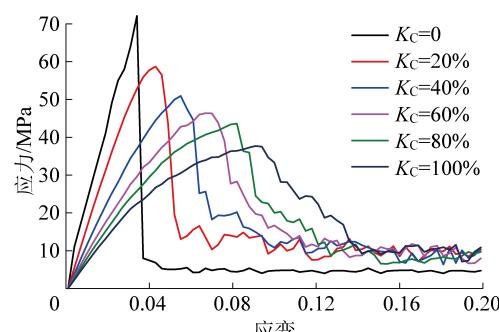


图 4 不同复合度应力-应变曲线

Fig.4 Stress-strain curves with different composite degree

由图 4 可知,随着复合度逐渐增大,复合弱结构的应力-应变曲线峰值不断下降,软弱部分比例越大,试件的应力峰值降低越大。如  $K_c=20\%$  时,复合

弱结构的最大应力为 58 MPa, 当  $K_c = 80\%$  时, 复合弱结构的最大应力降为 44 MPa。由此可以看出, 复合弱结构中的强弱比例和体积大小对整体结构的失稳变形有很大的相关性, 且软弱部分比例可以降低煤岩整体强度, 并改变整体结构的应力-应变形式。

### 3 复合弱结构的冲击倾向性变化特征

复合弱结构主要依靠自身强度差异和软弱比例控制应力集中范围和能量积聚程度。通过上节对复合弱结构应力-应变曲线的分析, 可以清楚看到不同复合度会导致不同的破坏形式。以复合弱结构应力-应变曲线为基础, 分析其对煤岩体冲击倾向性变化特征的影响。

#### 3.1 复合弱结构应力-应变曲线分析

冲击煤岩体一般为脆性材料, 破坏时具有较高的集中应力和冲击能量。而复合弱结构是将冲击煤岩体进行部分弱化, 可以降低煤岩体能量的积聚和释放程度。以图 4 中  $K_c = 0$  和  $K_c = 80\%$  两条应力-应变曲线为例进行分析, 图 5 中黑线为  $K_c = 0$  的复合弱结构, 相当于原始冲击煤岩体, 破坏基本可分为弹性阶段、突变阶段和残余变形阶段, 符合脆性煤岩体的破坏过程; 红线为  $K_c = 80\%$  的复合弱结构, 相当于破坏了原始冲击煤岩体结构, 对其进行了部分弱化, 其破坏过程缩短了弹性阶段, 延长了煤岩体的塑性变形阶段, 在塑性阶段中由于弱结构的存在增加了弱化阶段, 经弱结构弱化后, 应力峰值降低了 28 MPa, 峰值应变延长了 0.05。

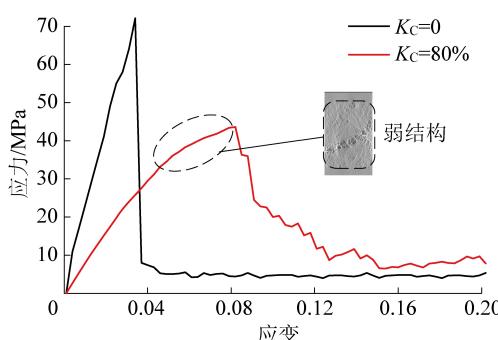


图 5 复合弱结构变形失稳应力-应变曲线

Fig.5 Stress-strain curves of deformation instability of composite weak structure

通过对比可知, 弱结构降低了煤岩体应力峰值, 并耗散了部分积聚的冲击能量, 从而降低了冲击煤岩体的冲击倾向性。出现弱化阶段是复合弱结构和原始冲击煤岩体变形失稳的本质区别, 是复合弱结构特有的表现形式。

#### 3.2 复合弱结构对弹性能指数的控制

弹性能指数  $W_{ET}$  是指单位体积煤岩体在变形破坏峰值前所储存的弹性变形能  $\phi_{SP}$  与损失的耗散能  $\phi_{ST}$  的比值<sup>[17-18]</sup>, 呈现在应力-应变曲线上是卸载曲线下面积与加卸载曲线间面积的比值, 用公式可以表示为

$$W_{ET} = \phi_{SP}/\phi_{ST} \quad (2)$$

若要降低煤岩体弹性能指数, 需减小煤岩体内储存的弹性变形能, 或加大耗散能的损失。以不同复合度模拟结果进行分析, 如图 6 中曲线 1、2、3、4 分别为复合度  $K_{C1} = 20\%$ 、 $K_{C2} = 40\%$ 、 $K_{C3} = 60\%$  和  $K_{C4} = 80\%$  的应力-应变曲线, 用加卸载曲线围成的面积可表示为

$$\begin{cases} W_{ET1} = S(A_1B_1C_1)/S(A_1OB_1) \\ W_{ET2} = S(A_2B_2C_2)/S(A_2OB_2) \\ W_{ET3} = S(A_3B_3C_3)/S(A_3OB_3) \\ W_{ET4} = S(A_4B_4C_4)/S(A_4OB_4) \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $S(A_iB_iC_i)$  为第  $i$  条应力-应变曲线峰值前卸载曲线与坐标轴围成的面积;  $S(A_iOB_i)$  为相对应的加卸载曲线间面积。

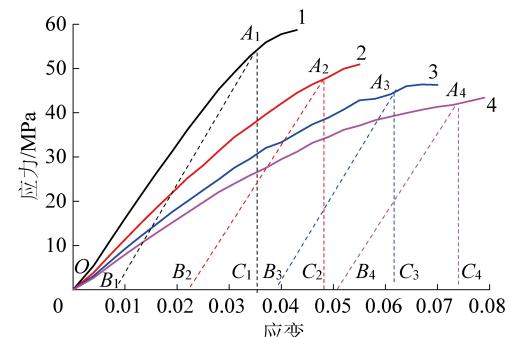


图 6 复合度与弹性能指数关系

Fig.6 Relationship between composite degree and elastic energy index

由图 6 可得, 随着复合度  $K_c$  的不断加大, 复合弱结构的应力峰值逐渐降低, 破坏前的应变增加, 在加载过程中所储存的弹性能面面积越来越小, 而卸载过程中损失的耗散能面面积越来越大。综合上述分析, 可以得出如式(4)的关系:

$$\begin{cases} K_{C1} < K_{C2} < K_{C3} < K_{C4} \\ S(A_1B_1C_1) > S(A_2B_2C_2) > S(A_3B_3C_3) > S(A_4B_4C_4) \\ S(A_1OB_1) < S(A_2OB_2) < S(A_3OB_3) < S(A_4OB_4) \\ W_{ET1} > W_{ET2} > W_{ET3} > W_{ET4} \end{cases} \quad (4)$$

根据式(4)关系可得出: 复合弱结构阻止了应力和能量的积聚, 降低了煤岩体破坏峰值大小, 延长了塑性变形。冲击煤岩体中含有的弱结构越多, 即

复合弱结构的复合度  $K_c$  越大时,其加载时储存的弹性变形能  $\phi_{sp}$  越小,卸载时损失的耗散能  $\phi_{st}$  越大,致使冲击煤岩体的弹性能指数降低,减弱了煤岩体的冲击倾向性。

### 3.3 复合弱结构对冲击能指数的控制

冲击能指数  $K_E$  是在单轴压缩状态下,煤岩体全应力-应变曲线峰值前所储存的弹性变形能  $E_s$  与峰值后所损失的耗散能  $E_x$  的比值<sup>[19-20]</sup>。可以用破坏峰值前曲线围成面积与峰值后曲线围成面积的比值来表示冲击能指数的大小,即

$$K_E = E_s/E_x \quad (5)$$

根据冲击能指数定义可知,煤岩体破坏前积聚的能量越大(峰值前上升段的面积越大),或者煤岩体破坏后损失的能量越小(峰值后下降段的面积越小),都会导致冲击能指数的增加。若要降低煤岩体的冲击能指数  $K_E$ ,必须减小煤岩体峰值前的面积或增加峰值后的面积。以不同复合度模拟结果进行对比(图 7),曲线 1、2、3、4 分别为复合度  $K_{c1} = 20\%$ 、 $K_{c2} = 40\%$ 、 $K_{c3} = 60\%$  和  $K_{c4} = 80\%$  的应力-应变曲线,用加卸载曲线围成的面积可表示为

$$\begin{cases} K_{E1} = S(D_1OE_1)/S(D_1E_1F_1G_1) \\ K_{E2} = S(D_2OE_2)/S(D_2E_2F_2G_2) \\ K_{E3} = S(D_3OE_3)/S(D_3E_3F_3G_3) \\ K_{E4} = S(D_4OE_4)/S(D_4E_4F_4G_4) \end{cases} \quad (6)$$

式中: $S(D_iOE_i)$  为第  $i$  条应力应变曲线峰值前上升段面积; $S(D_iE_iF_iG_i)$  为相对应峰值后下降段面积。

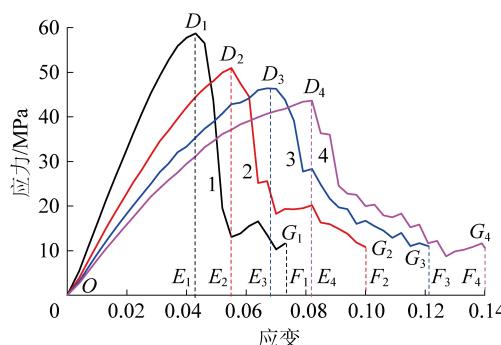


图 7 复合度与冲击能指数关系

Fig.7 Relationship between composite degree and impact energy index

由图 7 可知,随着软弱部分厚度不断增加,其应力-应变曲线在峰值破坏前所储存的弹性能逐渐降低,与坐标轴围成的面积缩小,而峰值破坏后所损失的耗散能逐渐升高,与坐标轴围成的面积逐渐扩大,可以得出式(7)的关系。

根据以上分析可知,复合弱结构中软弱部分的比例差异能使煤岩体破坏时的峰值应力发生不同程

$$\begin{cases} K_{c1} < K_{c2} < K_{c3} < K_{c4} \\ S(D_1OE_1) > S(D_2OE_2) > S(D_3OE_3) > S(D_4OE_4) \\ S(D_1E_1F_1G_1) < S(D_2E_2F_2G_2) < S(D_3E_3F_3G_3) < S(D_4E_4F_4G_4) \\ K_{E1} > K_{E2} > K_{E3} > K_{E4} \end{cases} \quad (7)$$

度的降低,软弱部分比例越大,可以延长煤岩体峰值前的塑性变形,并增加煤岩体峰值后损失的耗散能。煤岩体内所含弱结构的比重越大,即复合度越大,煤岩体在峰值前所储存的弹性变形能就越少,峰值后损失的耗散能就越多,使得煤岩体的冲击能指数变小,减弱了煤岩体的冲击倾向性。

## 4 结 论

1) 根据不同煤岩组合结构提出了复合弱结构的概念,并分析了强度比例、体积大小和其他岩层性质等因素对复合弱结构控制冲击能量的影响;在此基础上引入了复合度的判定公式,利用复合度对复合弱结构的应力情况及能量耗散程度进行初步判定。

2) 通过 FRPA 数值模拟方法对具有不同复合度的复合弱结构进行了单轴压缩试验分析,根据试件破坏失稳特征及应力-应变曲线形式得出了复合度与整体结构的相关性,即复合度与最大集中应力、能量耗散程度成反比关系。

3) 复合弱结构应力应变过程中的弱化阶段是耗散能量的特有阶段,可以大幅度降低集中应力及能量积聚程度;通过煤岩冲击倾向性指数验证了复合弱结构对冲击能量的耗散作用,复合度与煤岩体的弹性能指数和冲击能指数密切相关,直接影响着煤岩体储存能量和耗散能量的程度,复合弱结构不但可以降低煤岩体储存的弹性变形能,而且可以增加其损失的耗散能,控制冲击地压能量的积聚和释放,达到防治冲击地压的目的。

## 参考文献(References) :

- [1] 齐庆新,李一哲,赵善坤,等. 我国煤矿冲击地压发展 70 年:理论与技术体系的建立与思考[J]. 煤炭科学技术,2019,47(9):1-40.
- QI Qingxin, LI Yizhe, ZHAO Shunkun, et al. Seventy years development of coal mine rockburst in China: establishment and consideration of theory system[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(9):1-40.
- [2] 潘一山. 煤矿冲击地压扰动响应失稳理论及应用[J]. 煤炭学报,2018,43(8):2091-2098.
- PAN Yishan. Disturbance response instability theory of rockburst

- in coal mine [J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43 (8) : 2091–2098.
- [3] 谭云亮,张 明,徐 强,等.坚硬顶板型冲击地压发生机理及监测预警研究[J].煤炭科学技术,2019,47(1):166–172.  
TAN Yunliang, ZHANG Ming, XU Qiang, et al. Disturbance response instability theory of rockburst in coal mine [J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(1):166–172.
- [4] 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.
- [5] 周光文,刘文岗,姜耀东,等.采场冲击地压的能量积聚释放特征分析[J].采矿与安全工程学报,2008,25(1):73–77.  
ZHOU Guangwen, LIU Wengang, JIANG Yaodong, et al. Characteristics of energy accumulation and release of rock outburst in mining face [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2008, 25 (1) : 73–77.
- [6] 王 宁.坚硬煤岩组合条件下冲击地压致灾机理及防治研究[D].北京:中国矿业大学(北京),2015.
- [7] 左建平,陈 岩,崔 凡.不同煤岩组合体力学特性差异及冲击倾向性分析[J].中国矿业大学学报,2018,47(1):81–87.  
ZUO Jianping, CHEN Yan, CUI Fan. Investigation on mechanical properties and rock burst tendency of different coal–rock combined bodies [J]. Journal of china university of mining & technology, 2018, 47(1):81–87.
- [8] 单鹏飞,来兴平,崔 峰,等.采动裂缝煤岩破裂能量耗散特性及机理[J].采矿与安全工程学报,2018,35(4):834–842.  
SHAN Pengfei, LAI Xingping, CUI Feng, et al. Energy dissipation properties and mechanisms of fractured coal – rock mass failure under mining condition [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2018, 35(4):834–842.
- [9] 蒋军军,邓志刚,欧阳振华,等.不同尺寸冲击倾向性煤样声发射b值特征研究[J].煤炭科学技术,2019,47(3):120–124.  
JIANG Junjun, DENG Zhigang, OUYANG Zhenhua, et al. Study on acoustic emission b-value characteristics of bump-prone coal sample with different sizes [J]. Coal Science and Technology, 2019, 47 (3) : 120–124.
- [10] 陈光波,秦忠诚,张国华,等.受载煤岩组合体破坏前能量分布规律[J].岩土力学,2020,41(6):2021–2033.  
CHEN Guangbo, QIN Zhongcheng, ZHAN Guohua, et al. Law of energy distribution before failure of loaded coal – rock combined body [J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(6):2021–2033.
- [11] 杨 磊,高富强,王晓卿,等.煤岩组合体的能量演化规律与破坏机制研究[J].煤炭学报,2019,44(12):3894–3902.  
YANG Lei, GAOFuqiang, WANG Xiaqing, et al. Study on energy evolution law and failure mechanism of coal–rock combined specimen [J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44 (12) : 3894–3902.
- [12] 肖晓春,樊玉峰,吴 迪,等.组合煤岩破坏过程能量耗散特征及冲击危险评价[J].岩土力学,2019,40(11):4203–4212,4219.  
XIAO Xiaochun, FAN Yufeng, WU Di, et al. Energy dissipation feature and rock burst risk assessment in coal–rock combinations [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40 (11) : 4203 – 4212,4219.
- [13] 卢志国,鞠文君,王 浩,等.硬煤冲击倾向各向异性特征及破坏模式试验研究[J].岩石力学与工程学报,2019,38(4):757–768.  
LU Zhiguo, JU Wenjun, WANG Hao, et al. Experimental study on anisotropic characteristics of impact tendency and failure model of hard coal [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38 (4) : 757–768.
- [14] 周逸群.复合岩层锚杆支护预应力场分布规律模拟研究[D].北京:煤炭科学研究院,2018.
- [15] 张明义,白晓宇,王永洪.由桩的嵌岩深度取值引发的岩石软硬程度分类思考[J].工程勘察,2016,44(7):1–4,36.  
ZHANG Mingyi, BAI Xiaoyu, WANG Yonghong. Reflection of the rock stiffness classification from the determination of rock – socketed depth of piles [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2016, 44 (7) : 1–4, 36.
- [16] 窦林名,陆采平,牟宗龙,等.组合煤岩体冲击倾向性特性试验研究[J].采矿与安全工程学报,2006,23(1):43–46.  
DOU Linming, LU Caiping, MOU Zongling, et al. Rock burst tendency of coal rock combinations sample [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2006, 23(1):43–46.
- [17] 兰天伟,张宏伟,李 胜,等.矿井冲击地压危险性预测的多因素模式识别[J].中国安全科学学报,2013,23(3):33–38.  
LAN Tianwei, ZHANG Hongwei, LI Sheng, et al. Multi – factor pattern recognition method for predicting mine rock burst risk [J]. China Safety Science Journal, 2013, 23 (3) ;33–38.
- [18] 杨 杰,黄声树,孙海涛,等.不同冲击倾向性型煤的制取及其力学指标测定[J].煤炭技术,2019,38(4):148–151.  
YANG Jie, HUANG Shengshu, SUN Haitao, et al. Preparation of briquette with different impact predominant and determination of its mechanical indexes [J]. Coal Technology, 2019, 38 (4) : 148–151.
- [19] 杨光宇,姜福兴,李 琳,等.煤矿冲击地压危险性的工程判据研究[J].采矿与安全工程学报,2018,35(6):1200–1207,1216.  
YANG Guangyu, JIANG Fuxing, LI Lin, et al. Engineering criterion study on coal mining rock burst hazard [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2018, 35(6) :1200–1207,1216.
- [20] 付玉凯.基于剩余能量释放率指标的组合煤岩体冲击倾向性研究[J].煤矿安全,2018,49(9):63–67.  
FU Yukai. Study on impact tendency of combined coal and rock mass based on residual energy release rate index [J]. Safety in Coal Mines, 2018, 49(9) :63–67.