

# 不同倾角煤岩组合岩石力学试验及破坏特征

沈文兵<sup>1</sup>, 余伟健<sup>1,2\*</sup>, 潘豹<sup>1</sup>

(1. 湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201; 2. 湖南科技大学 煤矿安全开采技术湖南省重点实验室, 湖南 湘潭 411201)

**摘要:**薄煤层开采条件下多为煤层与岩层复合结构, 为提供可靠的开采环境与支护稳定, 深入研究煤岩体的岩石力学特征具有重要的意义. 通过 RMT-150C 岩石力学试验机分别对煤岩接触面倾角  $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  进行一次单轴压缩试验, 分析倾角不同的煤岩组合体强度和变形破坏特征. 研究表明: 煤岩组合体的破坏强度接近煤单体的抗压强度, 破坏主要集中于煤体部位. 对于倾角  $30^\circ$  以下裂纹主要分布于煤体, 岩体完整性较好. 倾角  $45^\circ$  以上出现拉剪破坏, 裂纹贯穿煤岩体, 煤体裂纹多而密集, 而岩体出现深部裂纹. 在煤体部分与岩体部分峰后破坏后发生明显的滑移现象, 主要发生滑移破坏并伴随着拉剪破坏. 此外煤体的累计环向应变高于岩体的累计环向应变, 煤体的环向应变片破坏 30 s 左右后岩体开始发生破坏, 因此岩体的破坏滞后于煤体. 两者破坏整体不一致, 具有不均匀性的特征.

**关键词:** 岩石力学; 煤岩组合体; 倾角; 煤-岩结构面

中图分类号: TD315

文献标志码: A

文章编号: 1672-9102(2021)01-0001-08

## Rock Mechanics Test and Failure Characteristics of Coal-Rock Combination with Different Dip Angles

SHEN Wenbing<sup>1</sup>, YU Weijian<sup>1,2</sup>, PAN Bao<sup>1</sup>

(1. School of Resources, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2. Hunan Provincial Key Laboratory of Safe Mining Techniques of Coal Mines, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

**Abstract:** Under the mining conditions of thin coal seams, there is mostly a composite structure of coal seams and rock layers. In order to provide a reliable mining environment and support stability, it is of great significance to study the rock mechanics characteristics of coal and rock masses. A series of uniaxial compression experiment were carried out with the RMT-150C rock mechanics testing machine on the dip angle of the coal-rock face at  $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  and  $60^\circ$ . Analyze the strength and failure characteristics of coal-rock combination with different dip angles. The research results show that the failure strength of coal-rock combination is close to the compressive strength of coal, and the failure is mainly concentrated in the coal body. For the dip angle below  $30^\circ$ , the cracks are mainly distributed in the coal, and the rock integrity is good. Tensile-shear failure occurs when the dip angle is above  $45^\circ$ , the cracks run through the coal and rock mass. There are many and dense coal mass cracks, while deep cracks appear in the rock mass. Obvious slip phenomenon occurs after the failure of the coal body part and the rock body part after the peak. In addition, the cumulative hoop strain of the coal mass is higher than that of the rock mass, and the rock mass starts to fail about 30 s after the coal mass is damaged. Therefore, the of the rock mass lags behind that of. The damage of the two is inconsistent overall and has the characteristics of unevenness.

**Keywords:** rock mechanics; rock-coal-rock combination; dipangle; coal-rock interface

收稿日期: 2020-11-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51974117); 湖南省自然科学基金资助项目(2020JJ4027)

\* 通信作者, E-mail: ywjlah@163.com

由于煤体和岩体的力学性质的差异性,会出现不一致的变形特性.于是,国内外学者为了研究带倾角煤岩组合体在不同条件下的破坏特性以及力学模型分析,在实验室内大多采用煤岩组合体试样进行岩石力学试验.目前,研究不同倾角组合形式如 $0^{\circ}$ 、 $15^{\circ}$ 、 $30^{\circ}$ 、 $45^{\circ}$ 、 $60^{\circ}$ 组合体的力学性质与破坏形式能为薄煤层的开采提供理论依据,进而根据现场地质条件改善矿区的开采方案<sup>[1]</sup>.郭东明等<sup>[2]</sup>通过实验室进行单轴和三轴压缩试验来研究煤岩接触面倾角不同的组合体试件破坏机制;张泽天等<sup>[3]</sup>对不同组合体在单轴和三轴压缩作用下的力学特性和破坏特征的差异性进行了室内试验分析;齐庆新等<sup>[4]</sup>通过组合煤岩试验研究指出组合煤岩试件与单体煤岩试件的应力-应变关系存在着明显的差异,例如变形的程度在减小、被破坏的程度更加猛烈和弹塑性变形特征更加显著等.

左建平<sup>[5-8]</sup>对煤-岩组合体在不同围压条件下的抗压强度、变形特征、裂纹演化、峰后强度等以及在单轴和三轴荷载作用下煤、岩石及 $0^{\circ}$ 倾角煤岩组合体的整体强度及破坏机制进行了较全面的分析;余伟健等<sup>[9-10]</sup>对煤岩接触面不同倾角的组合体进行了较为完整细致的分析,探究了不同倾角的煤岩组合体破坏特征及变形特性,并总结了煤-岩-锚组合锚固件中锚杆的作用及其机理;刘杰等<sup>[11]</sup>研究了不同煤岩体在单轴压缩条件下所发生的破坏过程、破坏特征、应力应变特征,分析了力学强度对于组合试件的力学行为影响;兰永伟等<sup>[12]</sup>研究了不同组合条件下煤岩组合体的力学强度、弹性模量、冲击倾向性等力学特性.李纪青等<sup>[13]</sup>研究了单体煤模型及煤岩组合体模型的冲击倾向性,得出了煤岩组合模型的冲击倾向性指标均高于单体煤模型,并建议采用组合模型来评价煤岩冲击倾向性.左键平、陈岩等<sup>[14]</sup>研究了组合体强度受煤的影响较大,其峰前积蓄能量及峰后耗散能量与单轴抗压强度基本呈正比关系,煤、岩-煤、煤-岩及岩-煤-岩依次增大;与煤样单体相比,组合体的冲击能量指数增大,煤岩组合体提高了煤的冲击倾向性,因此对冲击地压矿井的煤岩组合体进行冲击倾向性鉴定,对预测及防止冲击地压的发生产生了深远影响.

有关不同倾角煤岩组合体的变形特性以及力学破坏特征还没有研究足够充分,因此本文选用南方薄煤层中的砂岩与煤岩结合成不同倾角的煤岩体进行岩石力学分析以及应力-应变分析来探究其力学破坏机制.

## 1 实验概述

### 1.1 试件的加工制作

本试验所使用的单体以及组合体的煤岩、砂岩均来自湖南某矿区,将取得的砂岩与煤岩通过专业机构加工制备成单体试件即煤单体与砂岩单体如图1(b).试件严格按照国际岩石力学学会(ISRM)标准制成高径比 $2:1$ ,直径 $50\text{ mm}$ ,高度 $100\text{ mm}$ .本实验的倾斜煤岩组合体是由砂岩与煤岩通过云石胶相接触粘合成不同角度的组合体试件,此组合体以砂岩与煤岩的径向线为轴心,按 $1:1$ 的比例组合成为 $0^{\circ}$ 、 $15^{\circ}$ 、 $30^{\circ}$ 、 $45^{\circ}$ 、 $60^{\circ}$ 这5种不同倾角的煤岩组合体,其高径比也为 $2:1$ (直径 $50\text{ mm}$ ,高度 $100\text{ mm}$ ),部分试件如图1(a)所示,要求各圆柱体两端平行度必须小于 $0.02\text{ mm}$ .砂岩与煤岩单体试件作为本实验的参考对照试件.为了减小实验结果的误差和离散型,每种组合体各取5个试件且从5组数据中选取2组较为接近的数值为本次实验结果.

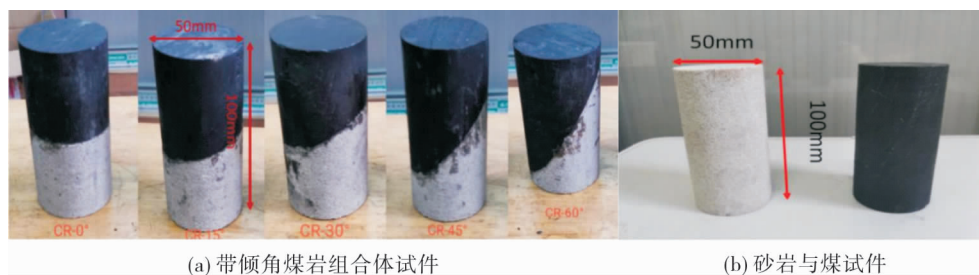


图1 组合体与煤岩单体部分标准试件

### 1.2 单轴压缩试验方案与设备

如图2(a)所示,采用中国科学院武汉岩石力学研究所制的RMT-150C岩石力学试验系统对试件施加轴向压力并自动采集试件的轴向应变.由于此试验设备仅有一套轴向传感器而无法对组合体的煤体与岩体同时

进行环向应变的测定,因此分别对煤体与岩体在相同高度处分别粘贴 2 个 120-10AA 电阻应变片分别为轴向应变片和环向应变片,此测定数值由 D3816N 应变采集系统自动采集,如图 2(b)所示。

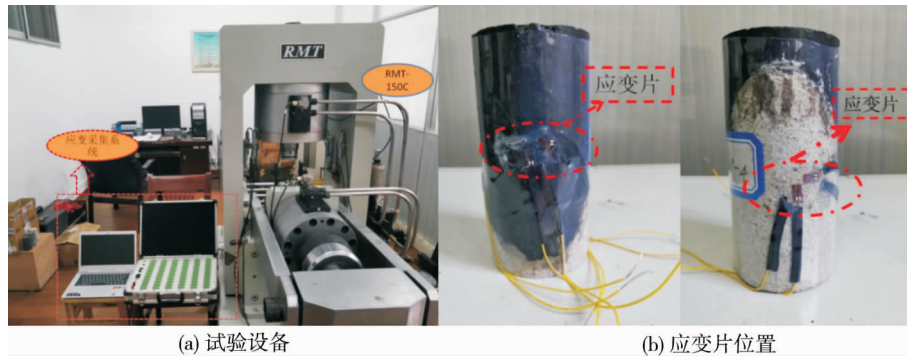


图 2 试验设备及应变片

其次,对煤岩组合体进行单轴加载试验,通过试验机对试件预加载,预加载完成后同时开启应变测试系统测试与 RMT 试验系统加载.加载方式采用控制位移的形式,考虑到应变仪数据记录频率为 2 Hz,为避免测得数据点过少,加载速度设为 0.1 kN/s,直至试件破坏。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 煤与砂岩

图 3 是煤单体与砂岩单体的应力-应变曲线(其中 C 代表煤单体,R 代表岩体,从 5 组实验中分别选取 3 组相近的实验数值在图中予以表示).从图 3 中的曲线可以看出煤体与岩体的极限抗压强度有差异,其中岩体的差异较小,而煤体试件差异较大,最大的抗压强度为 26.56 MPa,最小的为 14.97 MPa.因此提取 3 种试样的抗压强度的平均值来减小试件材料带来的数值上的误差.其岩体平均抗压强度是 31.67 MPa,而煤单体的平均抗压强度是 20.76 MPa.煤单体与砂岩相比,其抗压强度要低于砂岩,这是因为煤体内部的缺陷以及松散导致其抗压强度较低。

如图 4 所示,煤体与砂岩均为脆性破坏,为了更好地观察其破坏特征,在试验前用热塑袋将其包裹,使其破坏后不易飞溅伤人又能很好地观察.由于煤体冲击性较大,表面形成不规则的裂纹且周围存在压碎的碎块,而砂岩在达到抗压极限时则清楚地听到噼里啪啦的响声,也能很清楚地观察到其裂纹分布及贯通裂缝,从而判断出主要是剪切破坏。

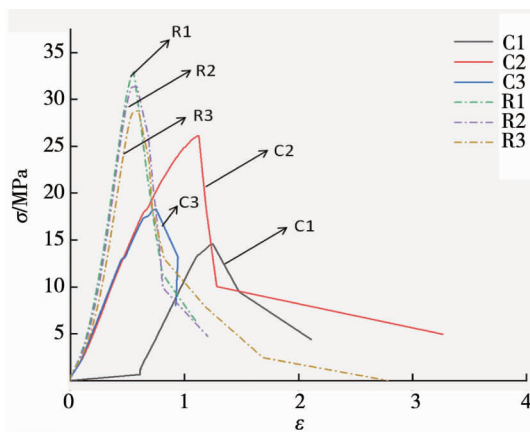


图 3 煤体与砂岩的应力应变曲线

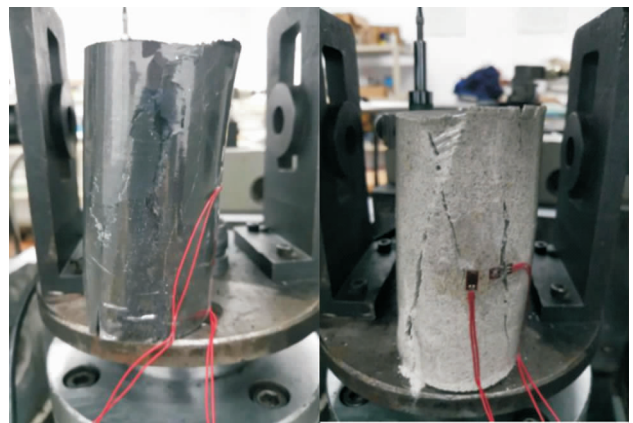


图 4 煤体与砂岩的破坏特征

### 2.2 不同倾角煤岩组合体

#### 2.2.1 组合体的轴向变形

选取试验中典型破坏的 4 种不同倾角试件的应力-应变曲线,如图 5 所示,从图 5 可以看出,煤岩组合体受载后变形破坏经历了 4 个阶段:压密阶段、弹性阶段、塑性变形阶段以及峰后破坏阶段,这与煤单体与砂岩单体试件的破坏过程类似.0° 倾角的煤岩组合体极限抗压强度高于其他倾角的组合体,倾角 30° 以下

的煤岩组合体破坏得更快,这说明主要受到剪切破坏,同时还受到煤岩交界面的约束影响.45°以上的煤岩组合体抗压强度降低,其煤体破坏得更严重,这说明45°倾角的煤岩组合体不仅仅受到压剪破坏还受到滑移破坏,且以滑移破坏为主,其峰后变形量增大.

由于倾角45°以上的界面对煤岩体的破坏影响较大,该组合体中煤岩破坏主要是由于滑移导致了组合体体系的失效,从而承载力下降,如果要防止该条件下发生失稳现象,应首先考虑防止该类型的滑移破坏的发生.

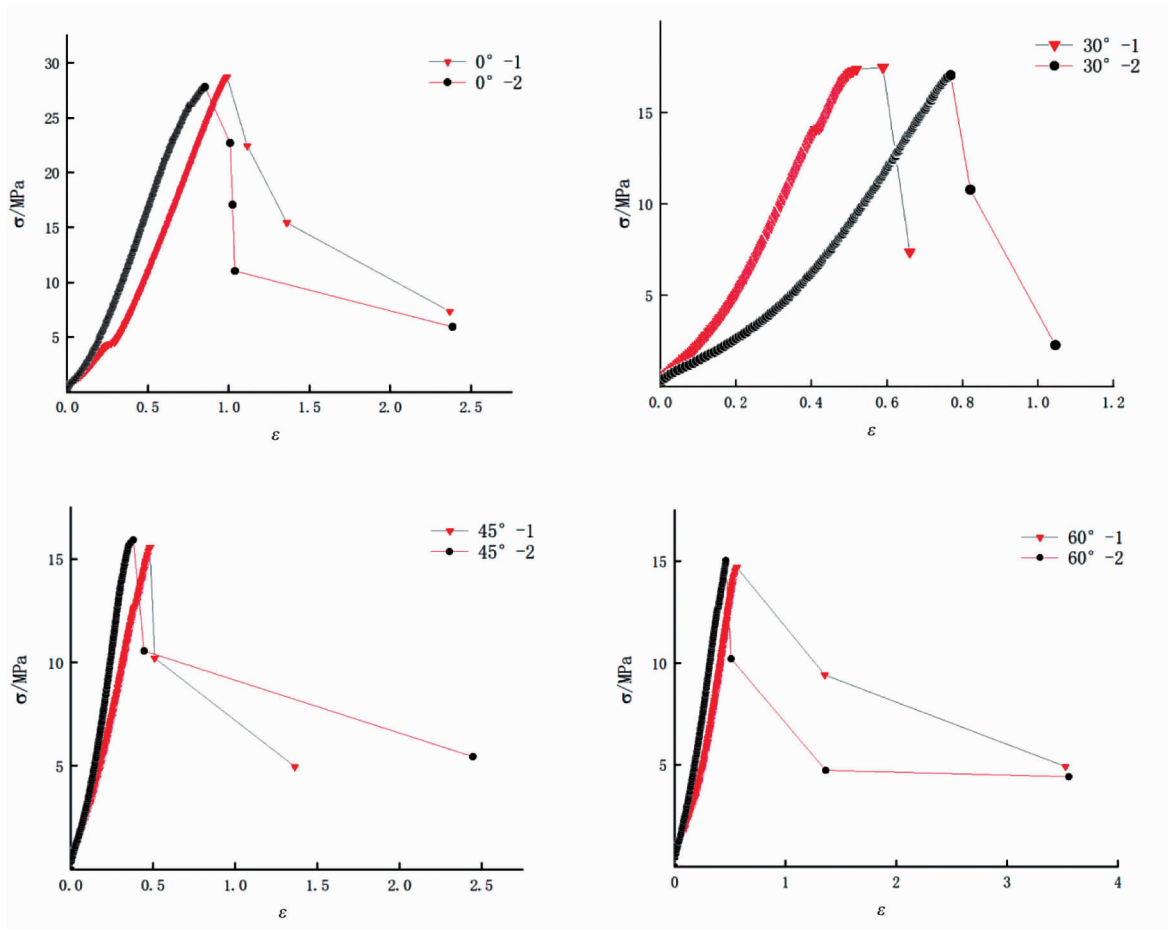


图5 不同倾角煤岩组合体的典型应力-应变曲线

### 2.2.2 组合体的环向应变

由图3中煤与砂岩的单体应力-应变曲线可以看出,煤与砂岩的抗压强度与变形存在很大的差异,相对于砂岩来说,煤单体的强度远远低于岩单体,而且其变形相对于砂岩要大.由这两者组合而成的煤岩组合体就存在着物理力学性质上的差异,对于较为脆弱的煤单体来说,其首先会发生破碎以及破坏,若是煤内部极不规整且比较松散则破坏更为明显,且冲击倾向性会很大.而对于组合体中的砂岩来说,煤破坏后将使砂岩破坏在受载后,砂岩的破坏滞后于煤.图6是倾角为30°的煤岩组合体的应变时间曲线,从图6可以看出这种滞后效应,煤达到破坏的时间是255s左右,而煤破坏后紧跟着砂岩达到285s左右应变片才失效,其两者之间相差30s的时间,煤提前30s左右处于不稳定的状态,砂岩则滞后于煤.从而可以得出煤岩组合体之间存在着差异性且破坏不具有同步性,试件的破坏具有非均匀性的特点.

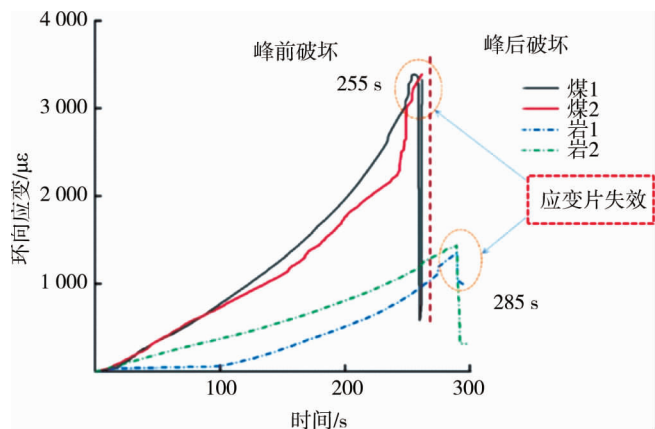


图6 倾角30°煤岩组合体环向应变与时间曲线

由于应变采集器测得煤体与岩体在破坏后的环向应变存在不规律性,误差很大,这对于测定煤岩体之间的应变带来不便,因此取各煤岩组合体在峰前破坏之前的数值来观察其规律性,如表 1 所示.煤体的环向应变明显高于砂岩的环向应变,且煤体的最大环向应变为 3 388.99  $\mu\epsilon$ ,而砂岩的最大环向应变为 2 288.12  $\mu\epsilon$ ,由此可知煤体的环向应变高于砂岩的环向应变.

表 1 不同倾角煤岩组合体环向应变与时间

时间/s	煤体环向应变/ $\mu\epsilon$					岩体环向应变/ $\mu\epsilon$				
	0°	15°	30°	45°	60°	0°	15°	30°	45°	60°
10	49.774	42.264	16.849	50.341	10.789	26.640	9.982	5.193	13.797	2.310
20	154.145	142.699	82.548	107.350	23.929	93.213	30.506	37.773	70.139	7.077
30	290.253	218.950	129.451	214.285	36.955	159.880	105.372	61.502	115.770	25.354
40	422.635	419.345	167.461	312.393	49.743	260.684	172.940	104.468	208.723	44.669
50	561.852	572.781	245.199	406.703	72.231	372.526	254.216	147.532	297.696	52.846
60	713.000	655.743	353.337	501.913	112.391	457.963	310.752	212.638	396.517	70.025
70	864.731	737.796	527.564	654.081	138.628	554.104	349.302	302.143	459.968	82.565
80	953.474	941.733	606.940	895.027	185.827	633.548	414.082	341.494	556.719	103.497
90	1 114.759	1 078.006	722.118	967.743	219.298	707.803	495.765	402.402	685.934	117.924
100	1 265.708	1 270.472	842.403	1 056.618	312.919	816.509	541.218	496.018	741.778	145.265
110	1 338.297	1 404.443	934.147	1 167.551	394.434	904.182	609.590	540.179	943.097	170.918
120	1 427.737	1 572.986	1 131.424	1 296.981	457.075	1 021.852	682.416	656.551	1 038.486	191.497
130	1 581.032	1 746.405	1 244.440	1 379.680	520.104	1 125.990	696.298	819.968	1 208.530	215.543
140	1 765.687	1 971.788	1 427.693	1 509.995	583.208	1 195.324	716.012	1 016.754	1 434.498	240.574
150	1 996.959	2 353.557	1 871.615	1 621.337	711.482	1 325.768	800.847	1 160.016	1 529.666	281.358
160	2 125.376	2 502.515	2 086.834	1 795.075	785.364	1 372.240	858.738	1 293.329	1 711.542	297.460
170	2 242.311	2 713.934	2 199.808	2 033.641	936.435	1 444.817	907.911	1 351.558	1 878.367	325.015
180	2 365.871	3 049.951	3 038.394	2 223.117	1 037.129	1 510.218	967.643	1 429.089	1 977.396	352.328
190	2 435.536	3 146.185	3 247.964	2 377.618	1 123.117	1 610.867	990.066	1 564.584	2 072.386	379.069
200	2 492.162	3 319.753	3 388.993	2 512.227	1 476.497	1 710.965	1 002.703	1 726.165	2 288.127	473.646

将表 1 的峰前破坏前 200 s 的应变数据进行数据拟合,如图 7 所示.煤体各角度的相关系数  $R^2$  在 0.996 7 左右,岩体拟合的相关系数  $R^2$  在 0.997 8 左右.从图 7 的拟合曲线可以看出,煤岩组合体在受压时随着时间的增长应变也在增长,但是不同倾角的煤岩体环向应变增长的速度有所不同,煤体的应变增长速度较岩体增长得快.因此在荷载作用下不同倾角煤岩体的整体破坏不同.图 7 中曲线始终保持一定的稳定状态,曲线成非线性演化特征.

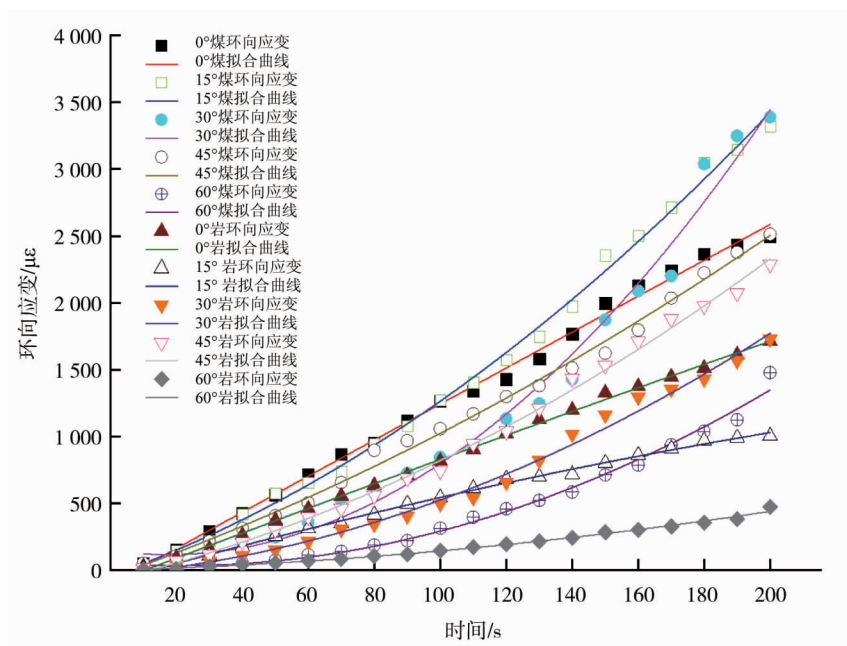


图 7 不同倾角煤岩组合体数据拟合曲线

### 3 讨论

#### 3.1 煤岩组合体力学分析

由于砂岩和煤岩本身的力学性质差异较大,煤岩组合系统受载时会产生不同的变形.相同荷载下,组合体两端砂岩部分的轴向应变和环向应变皆要小于煤体部分的轴向应变和环向应变,且岩体与煤体接触面处由高强度云石胶粘结使组合体在煤岩接触面不会发生错动.组合体试件受压力学模型如图8所示,由图8a可知,在煤岩交界面处的上下边缘(煤体挤压易碎区)发生破坏的可能性最大<sup>[10]</sup>,其次是煤岩体的次应力叠加区,当垂直力不断增大使得应力叠加逐渐增大,直至破坏,形成从煤体到岩体的贯穿裂缝,随着倾角越来越大破坏也越来越大.在这里假设(1)煤岩组合体的强度服从莫尔-库伦准则;(2)倾斜煤岩体结构面服从莫尔-库伦准则;(3)带倾角煤岩组合体各项同性.

如图8b所示,由莫尔应力圆理论可知,带倾角的煤岩组合体接触面的法向应力 $\sigma$ 和切应力 $\tau$ 可以由第一和第三主应力进行计算<sup>[15]</sup>:

$$\begin{cases} \sigma = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) + \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \cos(2\beta); \\ \tau = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \sin(2\beta). \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\sigma_1$ 为煤岩组合体受到的最大主应力即为轴向应力; $\sigma_3$ 为最小主应力即围压应力; $\beta$ 为煤岩交界面与水平面的角度,随着倾角的增大 $\sigma$ 与 $\tau$ 将增大.

假设煤岩组合体间结构面的剪切强度服从库伦准则,则有

$$\tau = c + \sigma \tan \varphi. \quad (2)$$

式中: $c=c_0, c_w$ ;  $\varphi=\varphi_0, \varphi_w$ ; 其中 $c_0, c_w$ 分别为煤岩组合系统和煤岩结构面的黏聚力(MPa); $\varphi_0, \varphi_w$ 为煤岩组合系统和煤岩结构面的内摩擦角( $^\circ$ ),将(1)与(2)联立可得出:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \frac{2(c_w + \sigma_3 \tan \varphi_w)}{(1 - \tan \varphi_w \cot \beta) \sin(2\beta)}. \quad (3)$$

即式(3)为煤岩组合体结构面的破坏强度条件.由于本实验中采用煤体与岩体两种材料,因此本文中的黏聚力和摩擦角只是为了沿用传统的概念,用于描述煤岩体整体性质,此性质更多表现的是煤体与岩体接触面的性质.对于式(3)中 $\varphi_w$ 为煤岩结构面的内摩擦角,根据莫尔圆及包络线可以得出,而 $\beta$ 为煤岩结构面与水平面的交角.该推导的公式仅仅用于带倾角的煤岩组合体,在围压的作用下煤岩接触面产生剪切滑移破坏的条件.

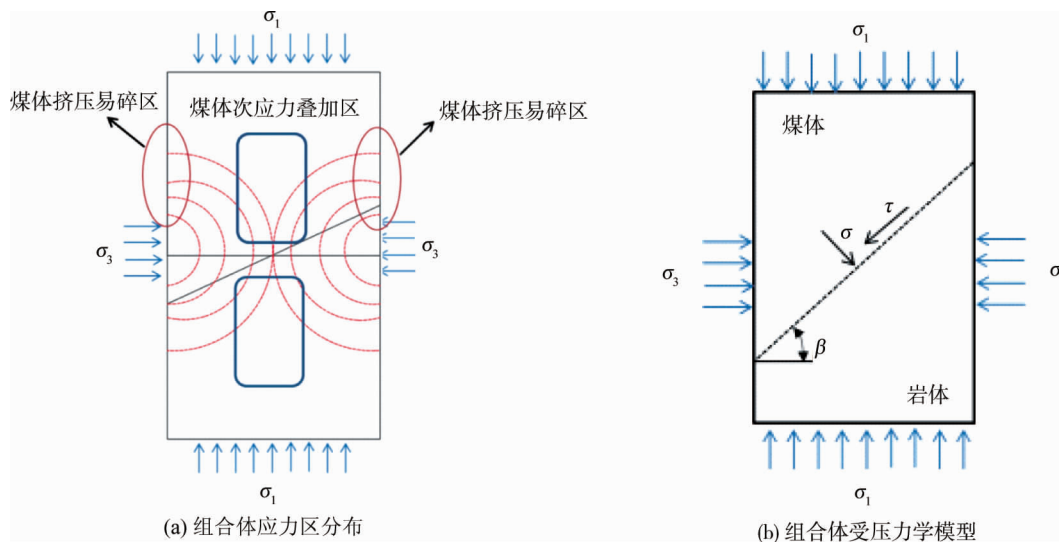


图8 组合体试件受压力学模型

#### 3.2 组合体试件破坏特征

不同倾角煤岩组合体的经典破坏形式如图9所示,从图9可看出组合体的破坏集中于煤体部位.由此

可知,不同倾角试件破坏后的完整性差别较大.其中, $0^\circ$ 与 $15^\circ$ 的试件完整性最好,这也更好地解释了组合体的强度与煤单体的强度接近的原因.从图9中可以看出,主要裂纹分布于煤体部分,角度多为一条竖直线,煤体表面的裂纹分布密集且均匀,局部出现环形的膨胀; $0^\circ$ 试件完整性较好,主要裂纹分布于煤体部分,裂纹的角度有所偏斜.对于倾角 $30^\circ$ 试件煤体表面的裂纹分布较密,且在主裂纹拐点处裂纹分布要多于岩体;倾角 $45^\circ$ 的试件的裂纹贯穿了煤体与岩体,这主要是剪切破坏.而倾角 $45^\circ$ 的试件在煤体与岩体处有微小的滑移现象,在这里需要注意的是煤岩体接触面是由云石胶粘接而成的组合体,组合体达到极限抗压强度下,煤岩体并没有直接在接触面滑移,而是在煤体与岩体上发生滑移,接触面处有完整的粘接.但是由于受力较大, $45^\circ$ 试件的岩体底部明显受到挤压破坏.相较于 $45^\circ$ 试件,倾角 $60^\circ$ 的试件就有一条明显的贯穿于煤体与岩体的裂缝,且在岩体部分更为明显,对于 $45^\circ$ 试件滑移现象微小来说,倾角 $60^\circ$ 的试件具有较大的滑移现象,其滑移裂纹贯穿煤岩体,以滑移破坏为主,伴随着压剪破坏.主裂纹分布在煤体部分且倾角较大,煤体表面裂纹分布不均,多集中在主裂纹拐点处,煤体中部有很明显的向外鼓起,滑移破坏与剪切破坏产生的裂缝共同发展和贯通,形成宏观的破裂带<sup>[16]</sup>.

由此可知,随着煤岩组合体倾角的增加,组合体单轴抗压强度逐渐接近岩体强度,破坏时倾角大的试件岩体破坏程度大,且倾角 $\geq 45^\circ$ 后会产生滑移破坏.随着试件荷载增加,煤体进入塑性阶段,内部裂隙开始发育,煤岩组合体倾角小的试件应力分布均匀,煤体截面裂隙发育程度一致,破坏时裂纹贯通煤体侧面,裂纹密集,局部出现煤岩交界面的膨胀效应;而煤岩组合体倾角大的试件由于应力的叠加效应使得贯穿裂缝更为明显,尤其岩体部位,且试件破坏主要为煤岩接触面的滑移破坏为主.

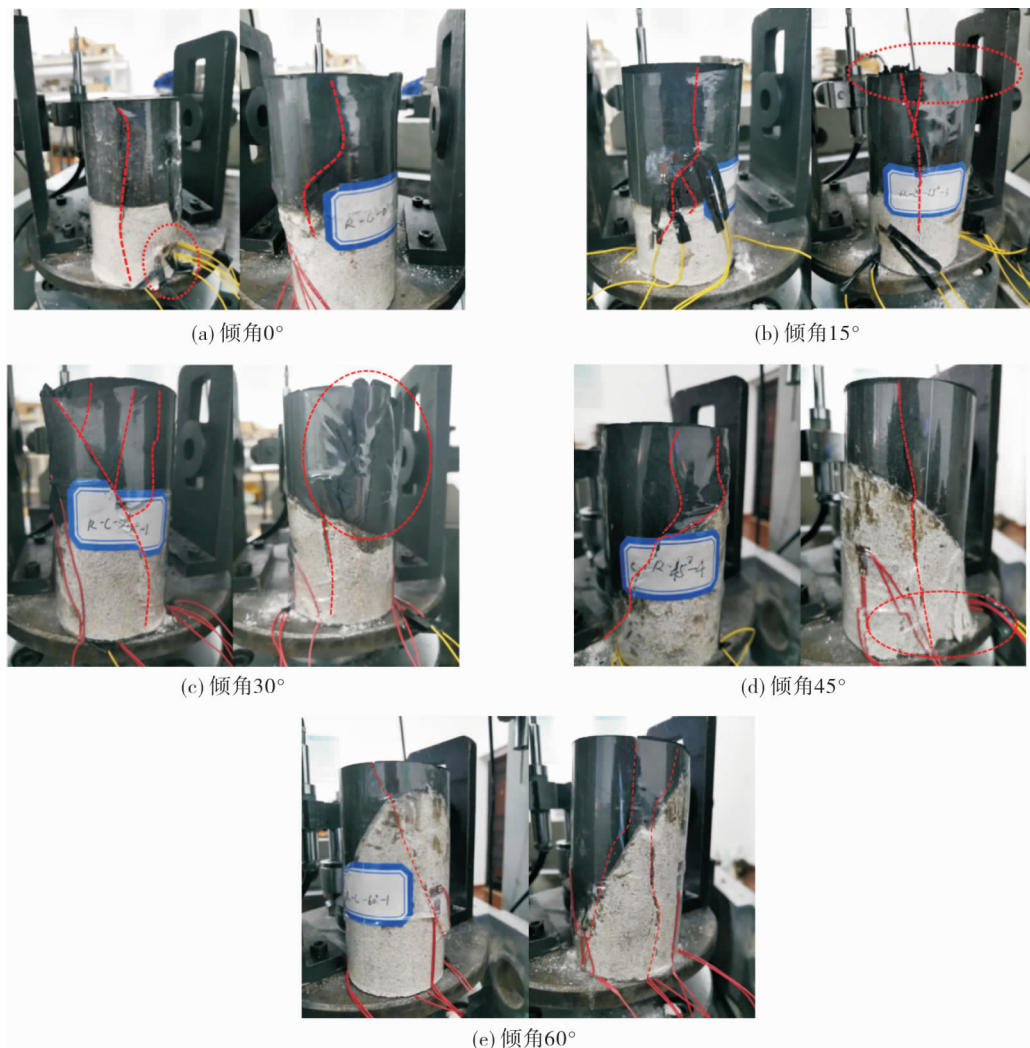


图9 不同倾角煤岩组合体的经典破坏形式

## 4 结论

1) 煤岩组合体的破坏方式主要呈现一种倾斜的剪切裂纹,其破坏主要集中于煤体部分,破坏的强度更接近于煤单体的破坏强度,且沿煤体部位的主裂纹处分散着细而密集的次裂纹。

2) 煤体在应变片失效之前的环向应变明显大于岩体在破坏前的环向应变,且煤体与岩体的环向应变值随着煤岩接触面倾角的增大而增大.煤体破坏 30 s 左右之后岩体才开始破坏,这反映岩体的破坏滞后于煤体,煤体与岩体整体破坏不一致,破坏具有异性不同步、非均匀特征。

3) 对于倾角 $\leq 30^\circ$ 的煤岩组合体来说裂纹分布较少,岩体的整体性比较好,没有太大的破坏特征,抗压强度比较接近,且裂纹主要分布在煤体部位.当倾角 $\geq 45^\circ$ 煤岩组合体受压变形时,煤岩接触面附近有明显的破坏特征且有滑移现象,此时的煤体发生了压剪破坏,在煤岩接触面具有应力集中,出现了从煤体贯穿岩体的剪切裂纹,同时出现压剪复合破坏。

### 参考文献:

- [1] 余伟健,吴根水,刘海,等.薄煤层开采软弱煤岩体巷道变形特征与稳定控制[J].煤炭学报,2018,43(10):2668-2678.
- [2] 郭东明,左建平,张毅,等.不同倾角组合煤岩体的强度与破坏机制研究[J].岩土力学,2011,32(5):1333.
- [3] 张泽天,刘建锋,王璐,等.组合方式对煤岩组合体力学特性和破坏特征影响的试验研究[J].煤炭学报,2012,37(10):1677-1681.
- [4] 齐庆新.层状煤岩体结构破坏的冲击矿压理论与实践研究[D].北京:煤炭科学研究总院北京开采研究所,1996.
- [5] 左建平,陈岩,张俊文,等.不同围压作用下煤-岩组合体破坏行为及强度特征[J].煤炭学报,2016,41(11):2706-2713.
- [6] 陈岩,左建平,宋洪强,等.煤岩组合体循环加卸载变形及裂纹演化规律研究[J].采矿与安全工程学报,2018,35(4):826-833.
- [7] 宋洪强,左建平,陈岩,等.煤岩组合体峰后应力-应变关系模型及脆性特征[J].采矿与安全工程学报,2018,35(5):1063-1070.
- [8] 左建平,谢和平,吴爱民,等.深部煤岩单体及组合体的破坏机制及力学特性研究[J].岩石力学与工程学报,2011,30(1):84-92.
- [9] 余伟健,吴根水,刘泽,等.松散煤岩组合体不均匀破坏试验研究[J].煤炭科学技术,2019,47(1):85-90.
- [10] 余伟健,吴根水,刘泽,等.煤-岩-锚组合锚固体单轴压缩试验及锚杆力学机制[J].岩石力学与工程学报,2020,39(1):57-68.
- [11] 刘杰,王恩元,宋大钊,等.岩石强度对于组合试样力学行为及声发射[J].煤炭学报,2014,39(4):685-691.
- [12] 兰永伟,张国华,刘洪磊,等.不同组合条件下煤岩组合体的力学特性[J].黑龙江科技大学学报,2018,28(2):136-141.
- [13] 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(1):4805-4810.
- [14] 左建平,陈岩,等.不同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.
- [15] 蔡美峰.岩石力学与工程[M].2版.北京:科学出版社,2013:210-216.
- [16] 焦雪峰,张文杰,康天合.岩石剪切带形成与发展细观模拟及破坏机制研究[J].煤炭工程,2012,2:104-107.