

第3章

岩煤岩组合结构滑移特性及启动条件研究

“岩层-煤层-岩层”构成的岩煤岩组合结构体是巷道近场围岩吸能区的主要结构,属于冲击地压发生三因素理论中的结构因素。软弱夹层的存在对巷道近场围岩煤岩组合结构体的吸能特性具有重要影响,厘清这种含夹层岩煤岩组合结构体在水平动力扰动下的力学响应和前兆信号,对明确围岩煤层滑移失稳启动条件具有重要意义。因此,开展考虑含夹层的“岩石-夹层-煤岩-夹层-岩石”的组合结构体实验室试验,探究静载条件下含夹层岩煤岩组合结构滑移失稳力学特性和动载冲击条件下的力学响应,有助于明确夹层作为结构属性在滑移型冲击地压孕育、启动、发生、衰减和终止时的影响。

本章拟利用物理实验方法,以原煤试样、砂岩试样和软弱夹层相似材料试样制备成“岩石-夹层-煤岩-夹层-岩石”结构的煤岩组合结构试样为试验样本,开展静载和静动组合荷载煤层滑移试验,探究夹层力学性质、夹层厚度、荷载条件对岩煤岩组合结构滑移条件的影响规律。利用自主研发的岩煤岩组合结构静动组合加载试验系统对岩煤岩组合结构开展静动组合加载试验,监测试验过程声发射关键参量演化规律,探究煤岩组合结构滑移启动条件。

3.1 煤岩结构静动组合加载多参量试验系统研制

1. 主要功能及技术参数

煤岩结构静动组合加载多参量试验系统可以开展不同荷载条件的煤岩组合体冲击滑移试验,以实现煤层应力集中、顶板断裂动载扰动、断层滑移应力波扰动等多种诱发巷道冲击地压的矿井工况模拟,为开展滑移型岩爆的灾害孕育机制研究奠定试验基础。

1) 两向刚性压头加载

开展静动组合荷载煤岩结构冲击滑移试验,旨在模拟深部高地应力、动载扰动和复杂地质构造影响的巷道围岩滑移突出启动条件、破坏特征及物理信号前兆信息演化规律。考虑到深部高应力环境、大变形和动载作用形式复杂的工程特点,选择两向刚性压头的加载方式。

2) 静动荷载组合施加方式

该试验系统包括轴向和侧向两个方向的液压-气压协同加载系统,可以实现两个方向的静载、动载的施加,且静载与动载控制相互独立,两向动载施加间隔为1~2000ms,能够精准模拟巷道近场围岩受应力波扰动诱发冲击的场景。

3) 多参量监测

试验系统搭配高精度位移传感器、应力传感器、电荷监测系统、声发射监测系统和岩石动态破坏监测系统,实现对岩煤岩组合结构体裂纹起裂-扩展的声发射信号定位、声-电信号前兆信息预警、试样块体振动过程采集、试样表面应力场-裂隙场演化过程监测以及碎块抛出动能估算等多参量监测功能。

煤岩结构静动组合加载多参量试验系统^[245]的加载主体部分为静动组合加载试验机,包括压力室,轴向液压油缸、蓄能气缸和水平向液压油缸。压力室为 40Cr 钢材锻造而成的方形腔体,内腔长度为 370mm,宽度为 350mm,高度为 425mm。整个压力室经过淬火等工艺加工处理充分保证腔体的强度和刚度,安全系数为 2.4,腔体 2 个方向的静载和动载施加液压油缸相互垂直,通过圆筒形连接件与腔体高强度连接,试验机主要技术参数见表 3-1。

表 3-1 试验机主要技术参数

参 数	量 值	参 数	量 值
轴向静载(F_y)/kN	600	荷载精度测量/ $\%$	5
轴向动载(P_y)/kN	600	位移测量精度/ μm	1
侧向静载(F_x)/kN	600	轴向加载方式	力加载
侧向动载(P_x)/kN	600	侧向加载方式	力加载
最大轴向位移(r_y)/mm	100	采样频率/Hz	1~5000
最大侧向位移(r_x)/mm	100	试样尺寸/(mm×mm×mm)	250×100×300
荷载控制精度/ $\%$	5	动载间隔时间/ms	0~2000

2. 煤岩结构静动组合加载多参量试验系统

图 3-1 为煤岩结构静动组合加载多参量试验系统,试验系统由静载加/卸荷系统、动载

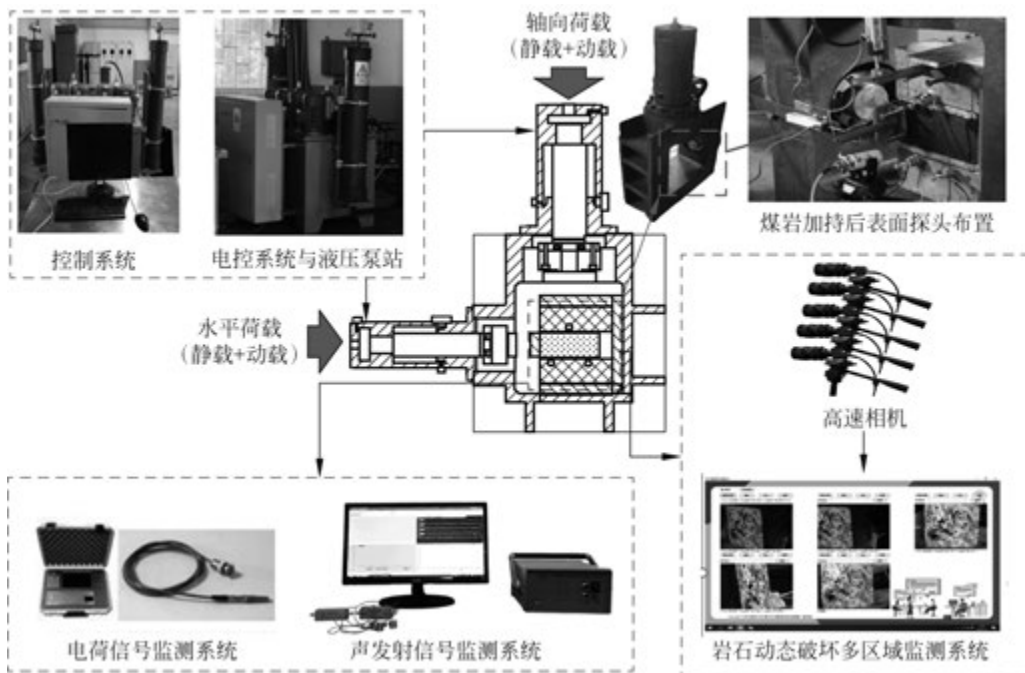


图 3-1 煤岩结构静动组合加载多参量试验系统

施加系统、电控系统、岩石动态破坏多区域监测系统、声发射信号监测系统和电荷信号监测系统组成。系统中控制、监测元件布置简图如图 3-2 所示。

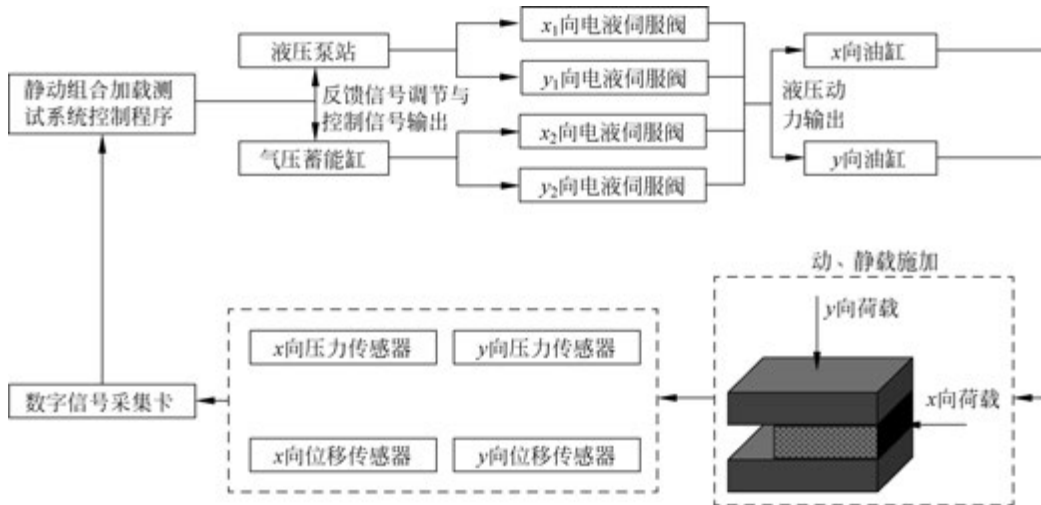


图 3-2 试验系统中控制和监测布置

1) 静载加/卸荷系统与动载施加系统

静载加/卸荷系统和动载施加系统主要包括轴向(y 向)子系统和侧向(x 向)子系统,分别由 x_1 和 y_1 向液压泵站电液伺服阀、 x_2 和 y_2 向气压蓄能缸电液伺服阀、液压油缸、蓄能气缸、液压力系统组成,试验中荷载施加稳定、精确度高,满足试验要求。可根据试验方案设定,开展单向静载、双向静载、静动组合荷载和动载连续冲击等多种荷载路径下的岩煤岩组合结构体滑移冲击测试试验,试验加载路径如图 3-3 所示。

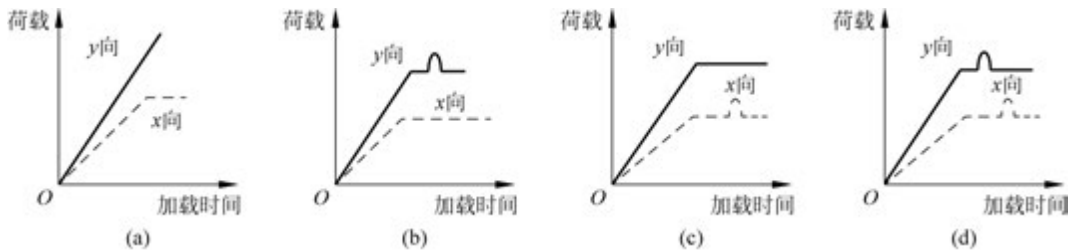


图 3-3 加载路径示意

(a) 静载施加; (b) 轴向动载; (c) 侧向动载; (d) 两向动载

2) 电控系统

整个试验系统实现了全程序控制,利用 PC 机基于 Labview 程序控制平台,自主设计了含瓦斯煤岩真三轴控制软件与相应的控制电路,实现了包括启动、停止液压泵站和蓄能气缸,加、卸各向荷载在内的全部程序化自动控制,并可根据试验需要设定轴向和侧向动载施加时间间隔(0~2000ms)、荷载当量等相关试验参数,操作界面如图 3-4 所示。

3) 岩石动态破坏多区域监测系统

肖晓春团队自主开发了岩石动态破坏多区域监测系统,包括高速相机 5 个,控制主机和集成采集软件,可以实现对试样动态破坏的实时监测、采集和保存,采样频率为 30~

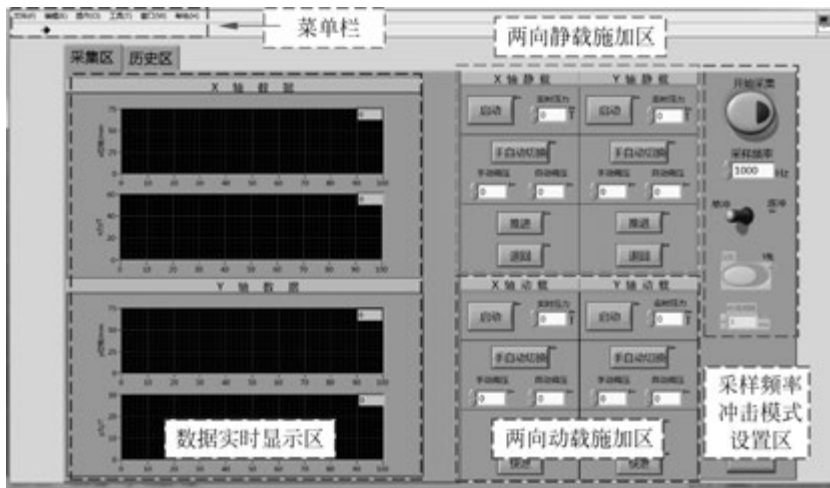
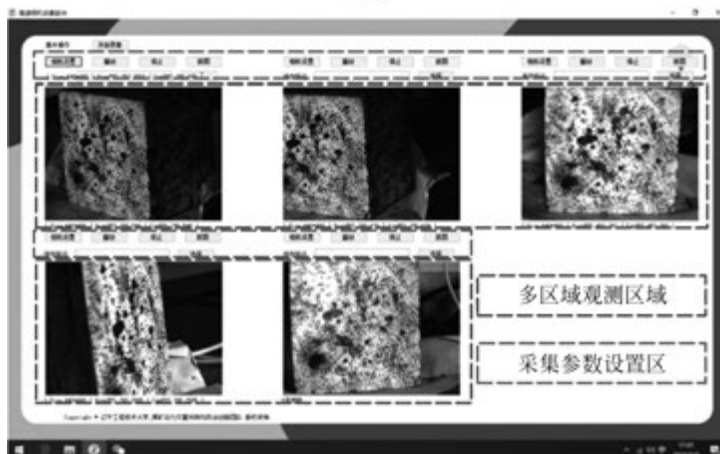


图 3-4 试验系统操作界面

1200Hz,可根据试验荷载施加方式设定。对采集的视频文件可进一步通过数字散斑技术处理,获得试样表面应力场、应变场及裂隙场,如图 3-5 所示。



(a)



(b)

图 3-5 岩石动态破坏多区域监测系统

(a) 高速相机; (b) 岩石动态破坏多区域采集软件

4) 声发射信号监测系统

声发射信号监测系统采用 SAEUR-2S 声发射系统,根据试验需要选择相应数量的探头,在试样表面用耦合剂连接布设成三维空间排列,并将数据线与外部采集仪相连,利用声发射信号对试样受载特征和损伤发育特征进行反演。

5) 电荷信号监测系统

电荷信号监测系统主要包括镍合金电荷感应探头、国内自主研发的第二代实验室用电荷放大器和多通道信号采集仪。通过在试样表面架设非接触式电荷感应探头,分别监测煤岩组合试样各位置的微电位异常现象,电荷感应探头监测到的电荷信号利用屏蔽线通过电荷放大器与采集仪相连,根据采集到的电荷信号随煤岩组合结构体受载情况变化规律开展研究。

3.2 试验方案及力学参数标定

3.2.1 试验方案

为探究岩煤岩组合结构滑移启动条件,首先开展红砂岩、煤岩、夹层单轴压缩试验,获得基本力学参数;其次开展夹层试样的压剪试验和巴西劈裂试验获得其黏聚力、内摩擦角和抗拉强度参数,优化夹层配比以获得最接近实际的夹层相似材料;最后开展静动组合荷载下含夹层岩煤岩组合结构滑移失稳试验。试验方案如表 3-2 所示。

表 3-2 煤岩力学参数测试试验方案

材料属性	编号	试验方式	加载参数
红砂岩	RS-1~3	单轴压缩	0.01mm/s
煤岩	C-1~3	单轴压缩	0.01mm/s
I 类夹层	WL I -1~3	单轴压缩	0.01mm/s
II 类夹层	WL II -1~3	单轴压缩	0.01mm/s
I 类夹层	SS I -1~6	压剪	0.01mm/s
II 类夹层	SS II -1~6	压剪	0.01mm/s
I 类夹层	TS I -1~6	劈裂	1.25kN/s
II 类夹层	TS II -1~6	劈裂	1.25kN/s
岩煤岩组合结构 I	CCRS- I -5~15-S1~6	静载	Y7kN
岩煤岩组合结构 I	CCRS- I -5~15-S1~6	静动组合加载	Y7kN+X5kN+D10kN
岩煤岩组合结构 II	CCRS- II -5~15-S1~6	静载	Y3.5kN
岩煤岩组合结构 II	CCRS- II -5~15-S1~6	静动组合加载	Y3.5kN+X5kN+D10kN

3.2.2 试样制备

图 3-6 为岩石、煤岩和夹层相似材料试样。夹层试样由石英砂、石膏、水泥、缓凝剂和水混合浇筑而成,经 14d 养护后钻取、切割分别制成 $\phi 50\text{mm} \times 100\text{mm}$ 圆柱体试样、 $50\text{mm} \times 50\text{mm} \times 50\text{mm}$ 正方体试样和 $\phi 50\text{mm} \times 25\text{mm}$ 圆柱体试样,分别用于单轴压缩试验、压剪试验和巴西劈裂试验,如图 3-6(a)~(c) 所示。经配比优化后制备成 $100\text{mm} \times 200\text{mm} \times (5/10/15)\text{mm}$ 试样,用于与砂岩和煤岩制备成岩煤岩组合结构试样。煤岩试样取自内蒙古鄂尔

多斯煤矿,经钻取、切割制备成 $\phi 50\text{mm} \times 100\text{mm}$ 圆柱体试样用于单轴压缩试验,如图 3-6(d)所示。砂岩试样为红砂岩试样,经钻取、切割制备成 $\phi 50\text{mm} \times 100\text{mm}$ 圆柱体试样,用于单轴压缩试验,如图 3-6(e)所示。岩煤岩组合结构试样组合方式为红砂岩-夹层-煤岩-夹层-岩石,为避免试验过程中层间接触面出现错动使用高强度环氧树脂作为黏结剂,制备好的试样如图 3-6(f)所示。

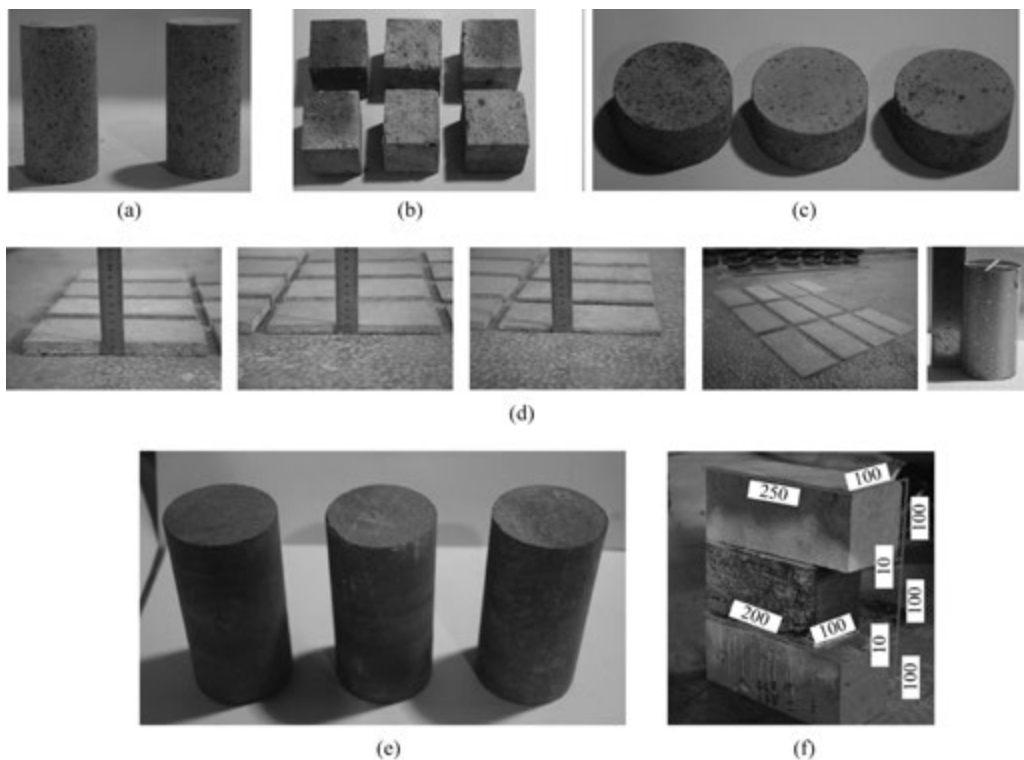


图 3-6 试验试样

(a) 夹层单轴试样; (b) 夹层压剪试样; (c) 夹层劈裂试样; (d) 5mm、10mm、15mm 夹层试样,煤岩试样(右一); (e) 红砂岩试样; (f) 煤岩组合试样

3.2.3 力学参数标定

图 3-7 为试验获得红砂岩、煤岩和夹层材料基本力学性质。由试验结果可得,试验所用砂岩强度均值为 90MPa ,煤岩强度均值为 15MPa ,夹层强度均值为 13MPa 。其中一组夹层强度特性介于岩石与煤岩之间,另一组夹层强度较低,用于模拟两种不同类型的夹层材料。为了进一步讨论岩煤岩组合结构滑移临界条件,需测定夹层力学参数。

本节开展压剪和劈裂试验,主要为测定夹层的力学性质,其中压剪试验主要是测夹层的黏聚力及内摩擦角,公式为

$$\tau = \frac{P_s}{A} (\sin\delta - f \cos\delta) \quad (3-1)$$

$$\sigma = \frac{P_s}{A} (\cos\delta + f \sin\delta) \quad (3-2)$$

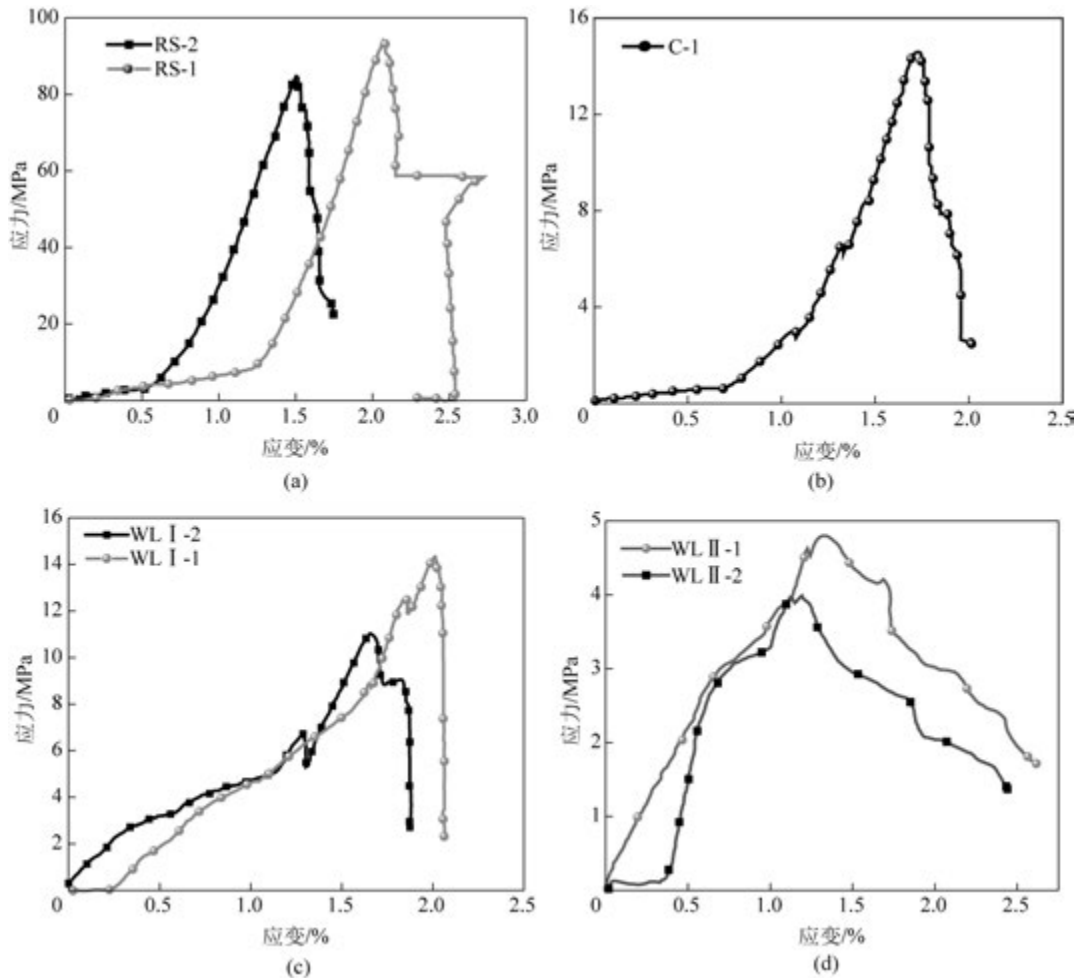


图 3-7 单轴压缩应力-应变典型曲线

(a) 红砂岩单轴压缩应力-应变曲线；(b) 煤岩单轴压缩应力-应变曲线；(c) I 类夹层单轴压缩应力-应变曲线；
(d) II 类夹层单轴压缩应力-应变曲线

$$\tau = \sigma \tan \varphi + c \quad (3-3)$$

式(3-1)和式(3-2)中： τ 为剪切破坏面上的切应力； σ 为剪切破坏面上的正应力； A 为剪切面积； P_s 为试样剪切破坏临界荷载； δ 为试样放置角度，本节选择 55° 、 65° 和 75° ； f 为摩擦系数，取0.1。将计算获得的切应力和正应力代入式(3-3)中，即可获得试样内摩擦角和黏聚力，式(3-3)中： φ 为内摩擦角； c 为试样黏聚力。

劈裂试验主要测夹层试样的抗拉强度，计算公式为

$$\sigma_b = 2P_s / \pi DL \quad (3-4)$$

式中： σ_b 为试样抗拉强度； D 为所用试样的直径； L 为所用试样的厚度。

两种夹层的力学性质如表 3-3 所示，夹层典型曲线如图 3-8 所示。

表 3-3 夹层力学参数

试样	密度 /(g/cm ³)	弹性模量 /GPa	泊松比	抗拉强度 /MPa	抗压强度 /MPa	黏聚力 /MPa	内摩擦角/(°)
I类夹层	1.59	16.02	0.22	1.32	13.0	2.86	26.24
II类夹层	1.43	3.33	0.31	0.98	4.8	2.47	19.88

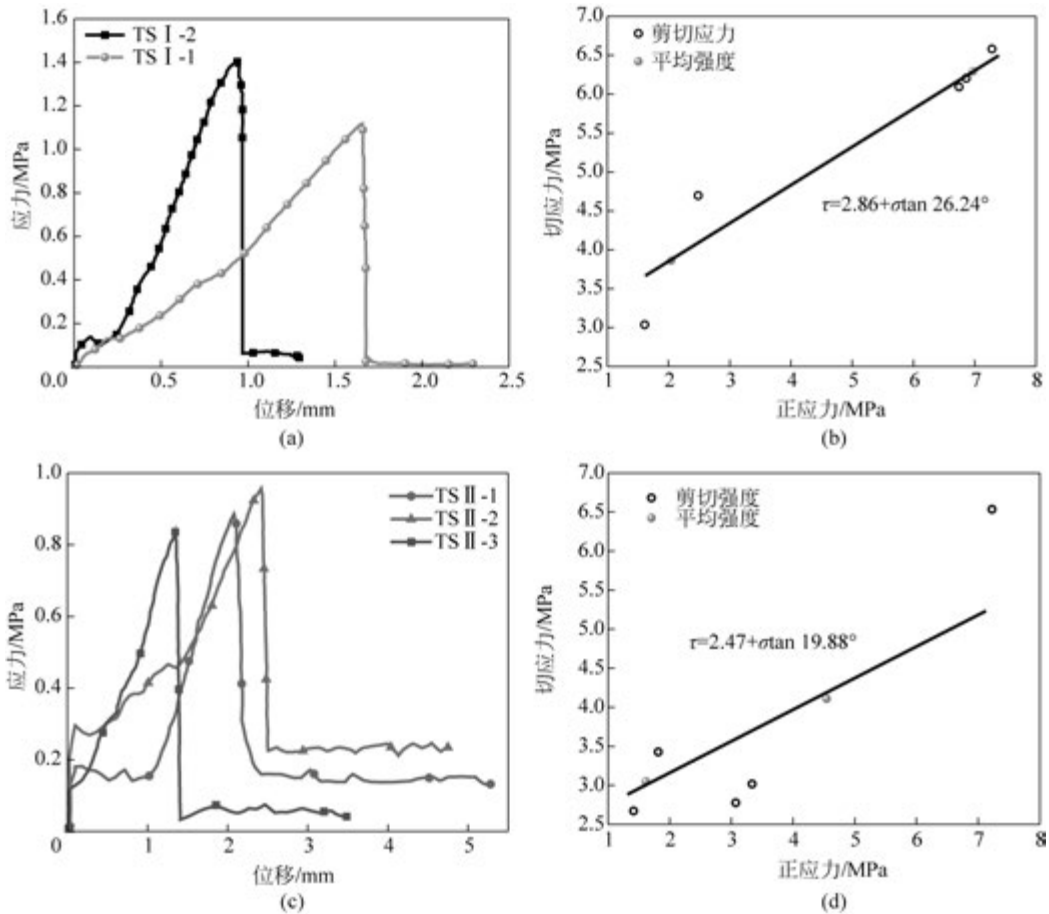


图 3-8 夹层力学性质测定曲线

- (a) I类夹层劈裂试验应力-位移曲线；(b) I类夹层压剪试验应力；(c) II类夹层劈裂试验应力-位移曲线；
(d) II类夹层压剪试验应力

3.3 静动荷载条件下岩煤岩组合结构滑移条件试验研究

3.3.1 静动荷载下岩煤岩组合结构全过程应力-应变曲线

在进行岩煤岩组合结构动载冲击试验(type IV)时,所施加的动载冲击是在静载基础上施加的,静载的稳定时间长,动载的采样频率高,因此在静载阶段的数据量是巨大的。单个试验的数据量超过 5×10^5 个,因此有必要对静载和静动组合加载两种试验条件的典型曲

线进行说明。图 3-9 为两种试验水平荷载和位移关于时间的曲线全过程示意图。

图 3-9(a)为初始静载施加阶段的应力-时间曲线,初始的荷载采用阶梯式分级加载,即应力加载至一个阶段后稳定一段时间,然后再加载,因此稳压阶段试样的变形基本不变,形成了大量的数据堆积,如图 3-9(b)所示即为对应的应力-位移曲线,图 3-9(c)和(d)为静载滑移试验的应力-时间曲线和应力-位移曲线。

静动组合加载试验的实验流程如图 3-9(e)、(f)所示。当静载施加到预设值后保持稳定,随后施加动载冲击,图 3-9(g)、(h)分别为静载保持阶段和冲击阶段对应的应力-位移曲线,需要注意的是静载稳定阶段同样产生了大量的数据堆积,如图 3-9(g)所示。

图 3-9(i)、(j)则分别对应静载和静动组合加载试验应力-位移曲线的能量分布情况,主要包括峰前阶段的弹性能(蓄能阶段),动载冲击产生的能量(启动阶段)以及残余能(显现阶段)。

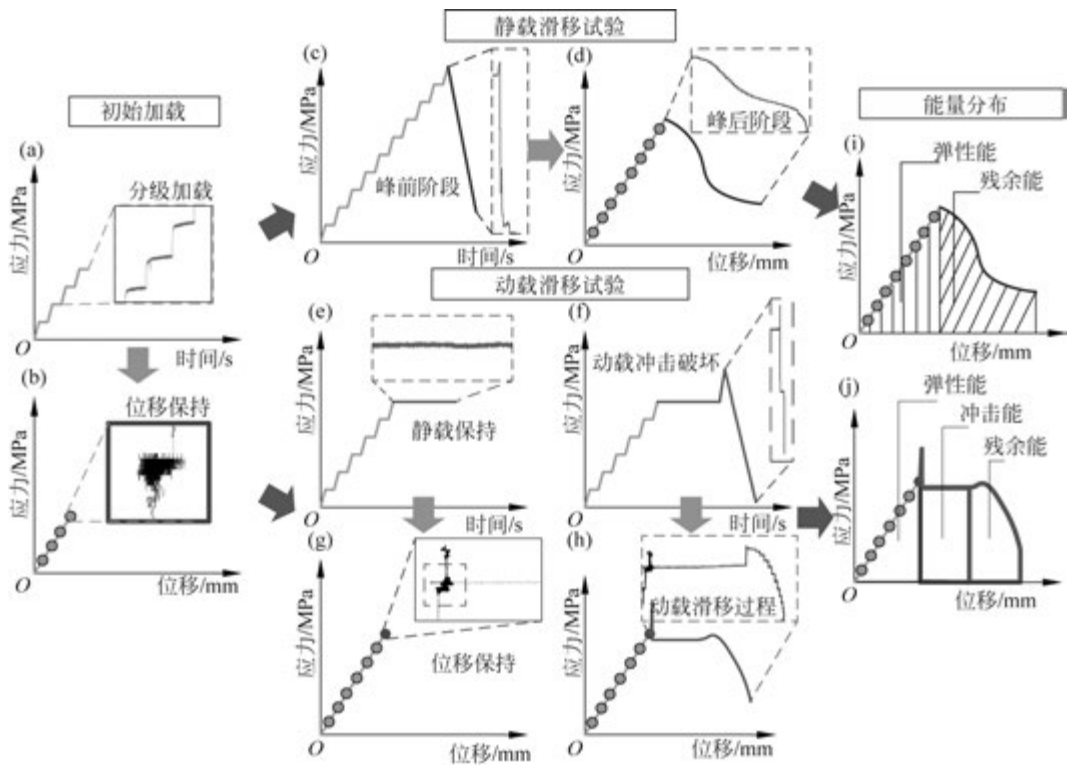


图 3-9 岩煤岩组合结构静动组合加载试验全过程曲线说明

接下来对数据进行相应的简化,保留了峰后阶段的全部数据,同时对峰前阶段所产生的数据堆积进行了优化,这对试验结果的准确性不会产生影响。后续的分析中水平动载冲击试验简称为动载试验,用以区分水平静载滑移试验条件。

3.3.2 静载条件下岩煤岩组合结构滑移条件试验研究

图 3-10 为水平静载条件下岩煤岩组合结构滑移试验应力-位移全程曲线。结果表明,静载条件下含夹层岩煤岩组合结构滑移失稳过程主要表现为:静载条件煤层滑移曲线可分

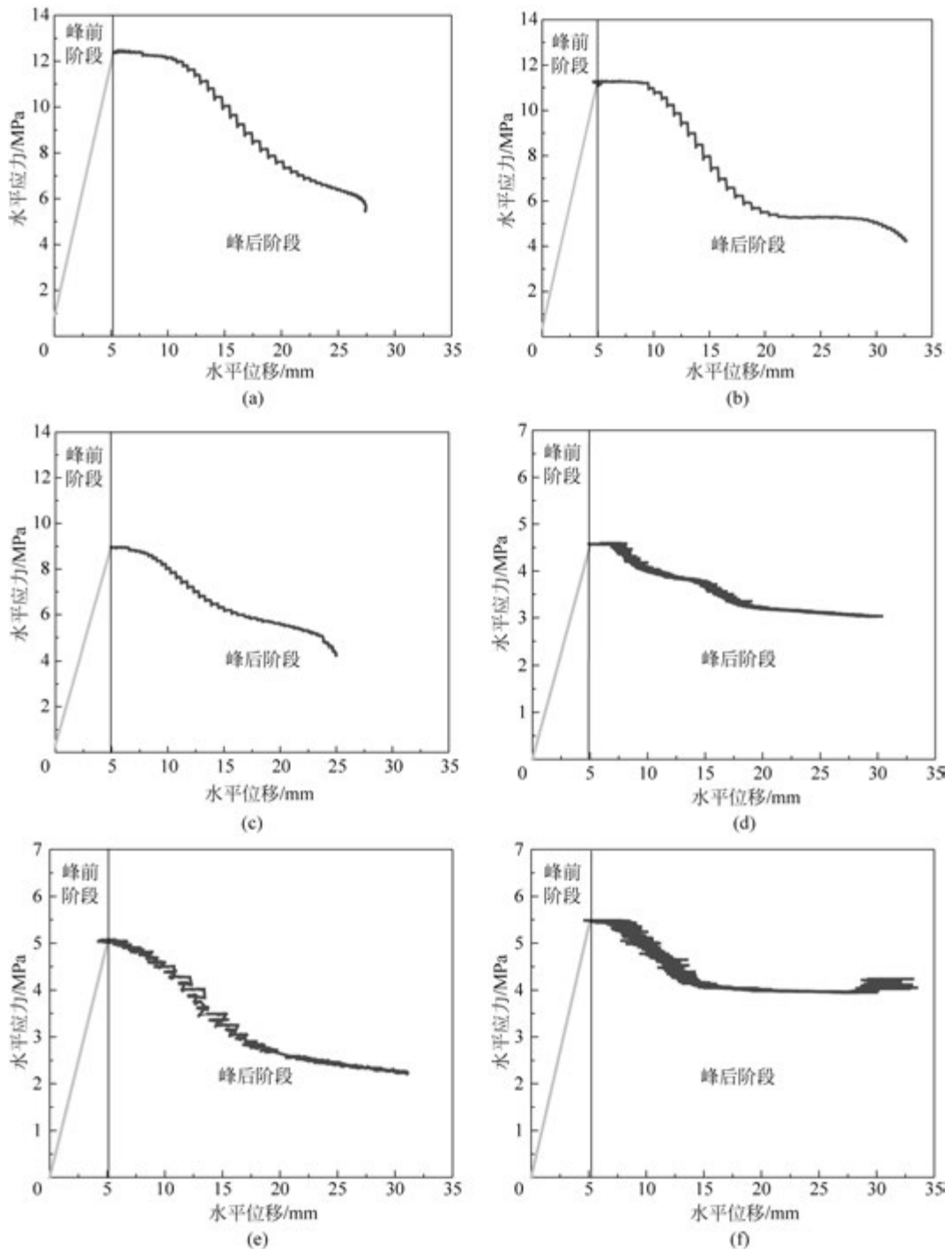


图 3-10 水平静载条件下岩煤岩组合结构滑移试验应力-位移曲线

- (a) I类夹层 5mm 水平静载应力-位移曲线；(b) I类夹层 10mm 水平静载应力-位移曲线；(c) I类夹层 15mm 水平静载应力-位移曲线；(d) II类夹层 5mm 水平静载应力-位移曲线；(e) II类夹层 10mm 水平静载应力-位移曲线；(f) II类夹层 15mm 水平静载应力-位移曲线