

2022 年以来，实验室研究团队在科研、教学、承担国家项目、发表学术论文等方面取得了较大的进展，在实验室主要研究方向上取得了较好的创新性成果。2022 年，实验室共发表 SCI 论文 87 篇、EI 论文 38 篇，授权发明专利 66 件；截至 2022 年 11 月底，获得包括山西省科学技术奖励委员会、中国岩石力学与工程学会等省部级与行业科技奖励 7 项。

本年度实验室主要研究方向取得的创新性成果包括如下：

1、深部煤炭充填开采理论与技术

在深部煤炭充填开采岩层控制理论、井下充填材料制备技术、采充协调作业关键技术等方面，依托国家重点研发计划“深地”专项、国家杰出青年科学基金及一批企业科技攻关项目，研究了深部多场耦合环境充填体本构关系和采场矿压显现规律，建立了深部充填工作面采场煤体、支架与充填体协同作用矿压控制理论；研究了深部开采覆岩移动时空演化与地表沉陷响应机制，构建了岩层移动和地表沉陷场一体化模型，形成了深部充填开采岩层移动与地表沉陷动态预测、工程设计方法；研发了煤矿井下高效采充协调作业关键装备，设计了采充一体化协调作业系统与工艺；研制了矸石基聚合物充填充填材料，开发了矸石基聚合物充填沿空留巷技术。上述研究创新了深部煤炭资源生产模式，有力推动了煤炭行业科技创新。

1) 研究了深部多场耦合环境充填体本构关系和采场矿压显现规律，建立了深部充填工作面采场充填体-支架-煤体矿压控制力学模型，揭示煤体、支架与充填体协同控顶机理；形成深部充填开采工作面采场矿压控制理论。

(1) 深部多场耦合环境下充填体本构关系。

研发了深部多场耦合环境下充填体力学特性测试系统，如图 1 所示，采用单因素变量轮换控制方法，并结合分级加载试验方法，测试了渗流场、化学场及应力场等多场耦合环境下充填体承载压缩特性，采用 Burgers 蠕变模型描述了多场耦合环境下充填体的蠕变特征，引入损伤变量 D 构建了蠕变损伤元件，给出了充填体在不同水化学溶液侵蚀条件下的损伤度，在 Burgers 模型中串联了一个 H-P-C 化学损伤体，建立了深部多场耦合环境下充填体本构关系，如图 2 所示。

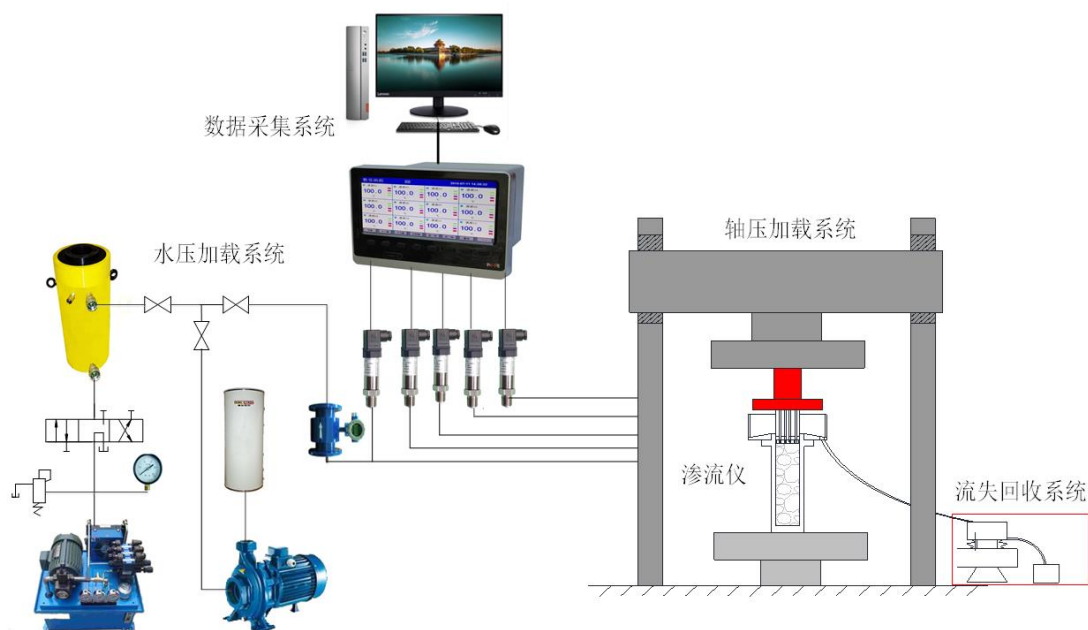


图 1 多场耦合环境下充填体力学特性测试系统

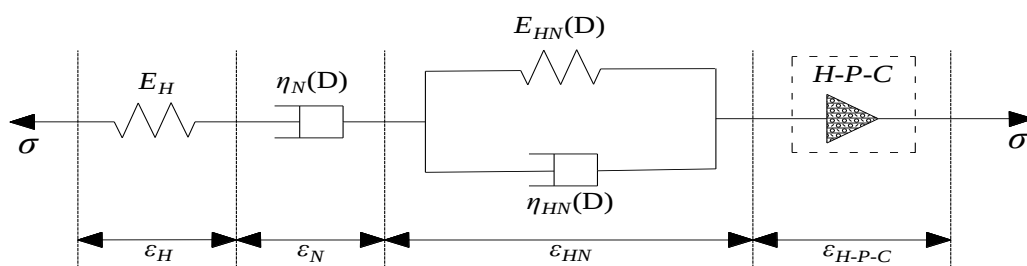


图 2 深部多场耦合环境下充填体本构关系

(2) 深部充填工作面采场矿压显现规律。

采用自行研制的深部充填开采物理相似模拟试验平台，结合非接触式全场应变测量系统与应力监测传感器，建立了深部充填工作面开采物理相似模拟模型，如图 3 所示；研究了充实率对深部充填工作面采场覆岩变形及应力演化的影响规律；基于多场耦合环境充填体承载压缩特性，构建了深部充填工作面开采数值模型；研究了充实率、采高、煤层强度对深部充填工作面采场顶板变形、破坏及应力演化的影响规律，如图 4 所示；基于物理相似与数值模拟研究结果，得到了深部充填工作面采场矿压显现的主要影响因素，揭示了深部充填工作面采场矿压显现规律。

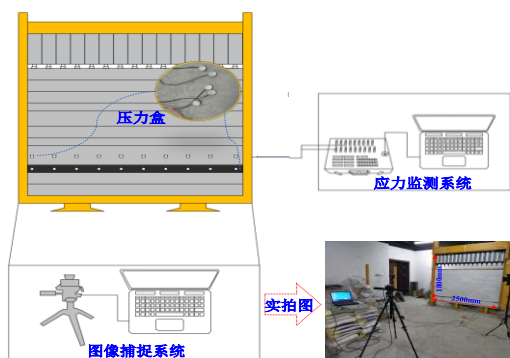


图 3 深部充填面开采物理相似模拟模型

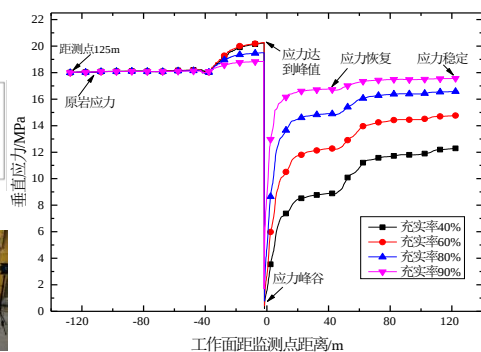


图 4 充实率影响深部充填面应力演化曲线

(3) 深部充填工作面采场煤体-充填体-支护体协同控顶机理。

分析了不同充实率条件下深部充填工作面采场顶板变形与破断特征，如图 5 所示，建立了深部煤体-充填体-支护体协同矿压控制力学模型，求解得到了不同充实率条件下深部充填工作面采场顶板挠度方程，研究了充实率、覆岩载荷、顶板岩性、支架阻力等对深部充填工作面采场顶板变形的影响规律，如图 6 所示，给出了深部充填工作面采场顶板变形控制的关键因素，揭示了深部充填工作面采场煤体-充填体-支护体协同控顶机理。

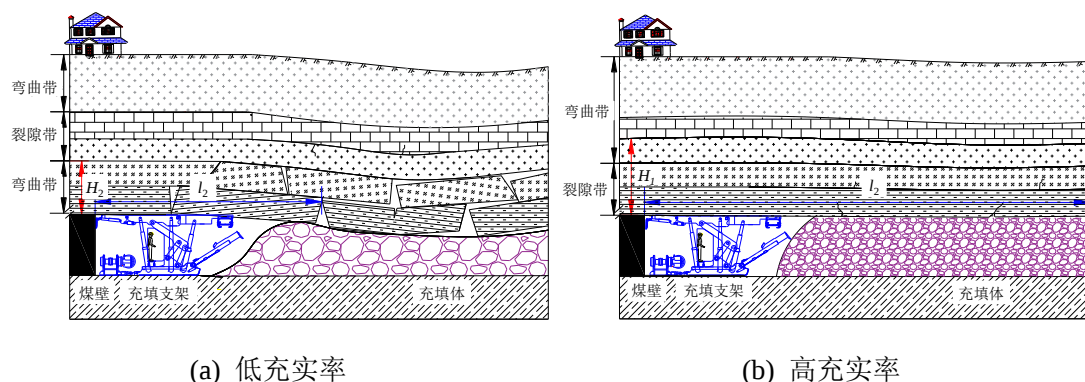


图 5 充实率影响下深部充填工作面采场顶板变形与破断特征

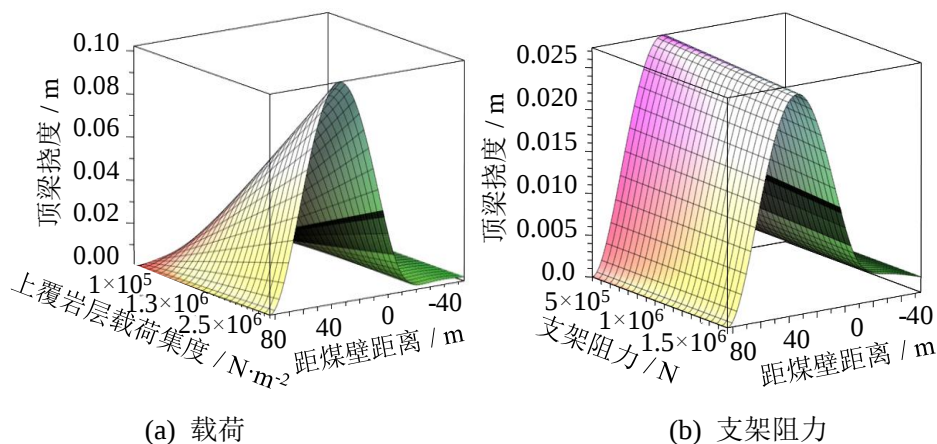


图 6 关键因素影响深部充填工作面采场顶板变形规律

2) 研究了深部充填开采覆岩运动时空演化与地表沉陷响应机制, 开发了深部充填开采岩层移动与地表沉陷动态预计方法与预测软件, 构建了基于不同保护对象需求的深部充填开采工程设计方法, 形成了深部覆岩移动与充填开采地表沉陷多源井上下综合监测技术体系。

(1) 深部充填开采覆岩运动时空演化与地表沉陷响应机制。

提出了模拟深部充填开采覆岩运动与地表沉陷的离散-连续介质耦合数值方法, 建立了深部充填开采耦合数值模型, 如图 7 所示, 模拟得到了深部充填开采覆岩应力场演化、岩层运动及破坏特征, 给出了深部充填开采地表沉陷的主要影响因素, 研究了覆岩岩性、工作面宽度及充填体配比等因素对深部充填开采地表沉陷的影响规律, 如图 8 所示, 揭示了深部充填开采覆岩运动时空演化与地表沉陷响应机制。

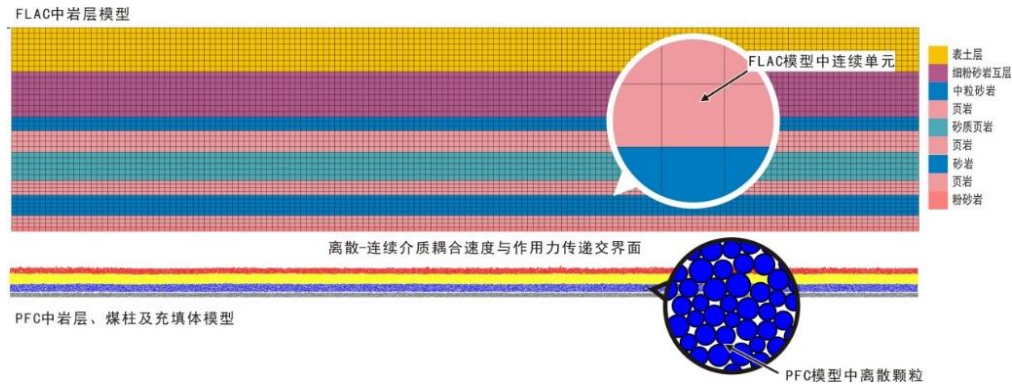


图 7 深部充填开采耦合数值模型

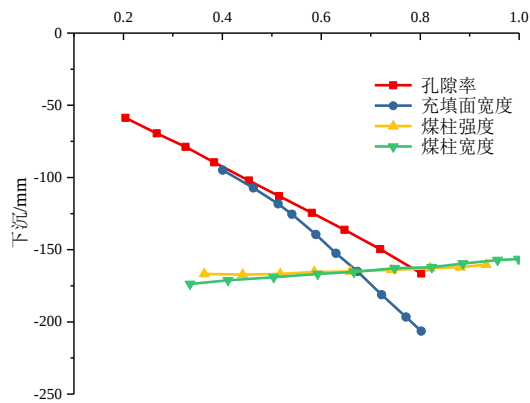


图 8 各因素对地表沉陷影响程度

(2) 深部充填开采岩层移动和地表沉陷场一体化模型。

结合 Winkler 地基弹性薄板理论、空间层状介质理论及概率积分法, 分别构建了深部全部充填开采岩层移动与地表沉陷场一体化计算理论模型, 如图 9 所

示，预计得到了深部充填开采岩层移动与地表沉陷情况，如图 10 所示，实现了深部充填开采岩层移动与地表沉陷的有效预计。

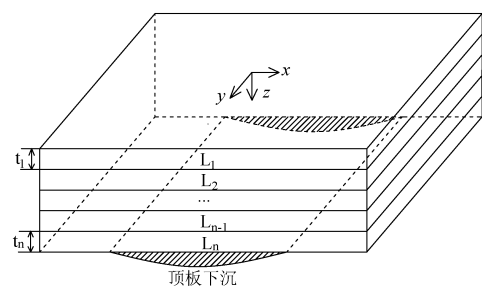


图 9 深部充填开采岩层移动与地表沉陷一体化计算理论模型

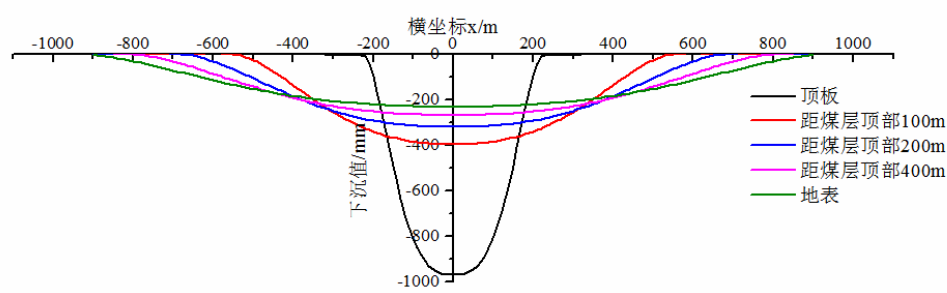
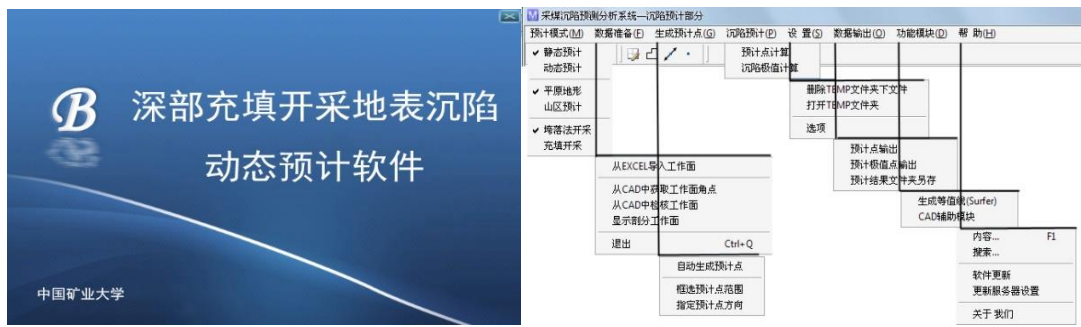


图 10 深部充填开采不同层位岩层下沉计算结果

(3) 深部充填开采岩层移动与地表沉陷动态预计与工程设计方法。

建立了深部充填开采岩层移动与地表沉陷动态预计模型，推导出了深部充填开采岩层移动与地表沉陷动态预计影响函数，求解得到了深部充填开采岩层移动与地表沉陷动态预计公式，提出了深部充填开采岩层移动与地表沉陷动态预计方法，开发了深部充填开采岩层移动与地表沉陷动态预计软件，如图 11 所示；基于等价采高理论以及地表沉陷与变形预计的概率积分法模型，得到了充填开采后地表移动变形最大值计算公式，提出了建（构）筑物下充填开采沉陷控制设计方法，如图 12 所示，形成了基于不同保护对象需求的深部充填开采工程设计方法。



(a) 预计软件启动界面

(b) 预计软件主界面

图 11 深部充填开采岩层移动与地表沉陷动态预计软件

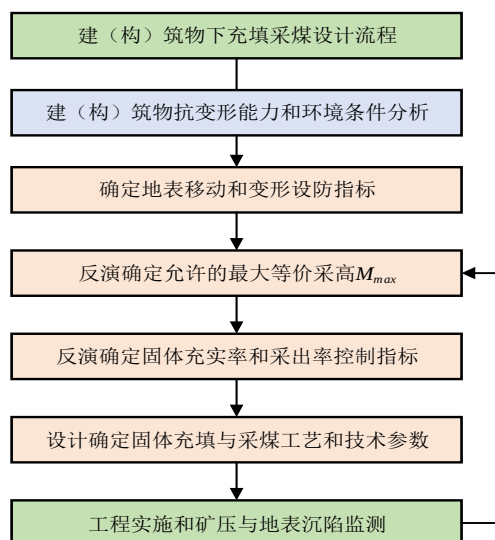


图 12 建筑物下地表沉陷控制设计流程

（4）深部覆岩移动与充填开采地表沉陷多源井上下综合监测技术体系。

分析了三维激光扫描 RIEGL VZ-1000、光学水准仪 DSJ3-Z、GPS 等测量技术在深部充填开采覆岩移动与地表沉陷监测方面的适用性，并针对深部充填开采覆岩移动与地表沉陷特征，提出了采用常规测量融合 InSAR 监测的深部覆岩移动与充填开采地表沉陷多源井上下综合监测方法，建立了集采空区充填体压缩变形、工作面矿压、地表移动变形等监测于一体的充填开采工作面多源井上下综合监测体系，如图 13 所示。

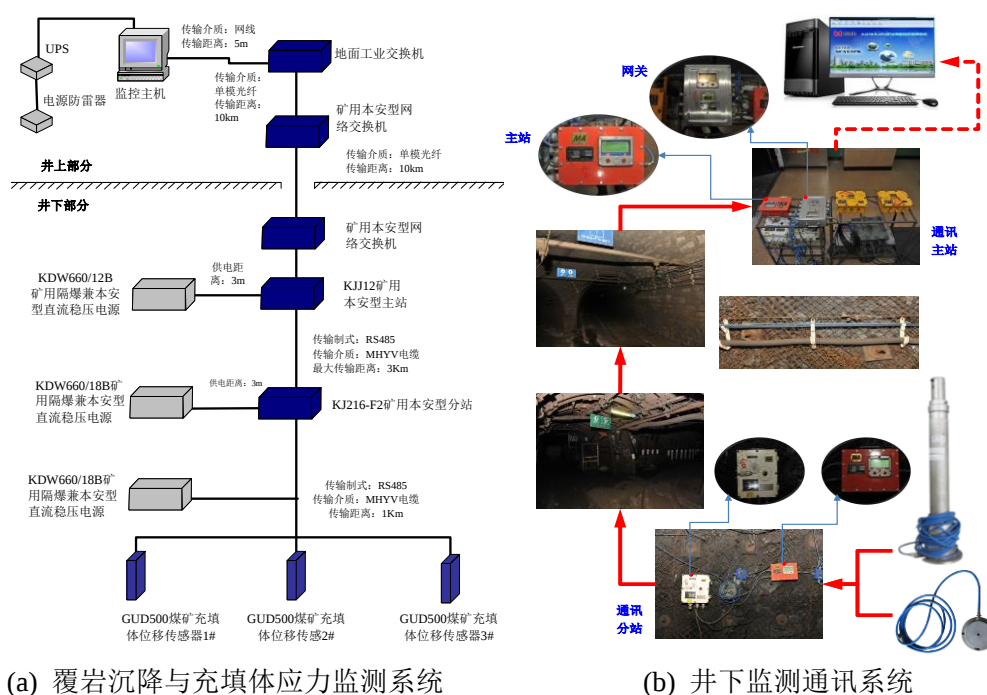


图 13 充填开采工作面多源井上下综合监测体系

3) 研发了深部煤矿井下高效、自动化的采充一体化操作空间支护、充填材料输送、充填材料夯实等采充关键装备,研发了采煤与充填协调作业的自动化系统与工艺,形成了深部煤矿井下高效自动化采充一体化协调作业技术。

(1) 高效采充协调作业关键装备。

将采充液压支架三维模型导入深部充填开采数值模型内,分析得到了深部充填开采时采充液压支架各部件的强度要求及疲劳寿命,如图 14 所示;研究了采充液压支架顶梁载荷分布类型,分析了采充液压支架工作阻力影响因素,提出了采充液压支架工作阻力设计方法,确定了采充液压支架的主要技术参数;引入电液控系统与位移传感器、倾角传感器等硬件,开发了采充液压支架、多孔底卸式充填输送机的自动化控制程序,实现了充填液压支架的移架、推溜、开合护帮、多孔底卸式充填输送机卸料及夯实机构夯实等各种功能的程序自动化控制,如图 15 所示。

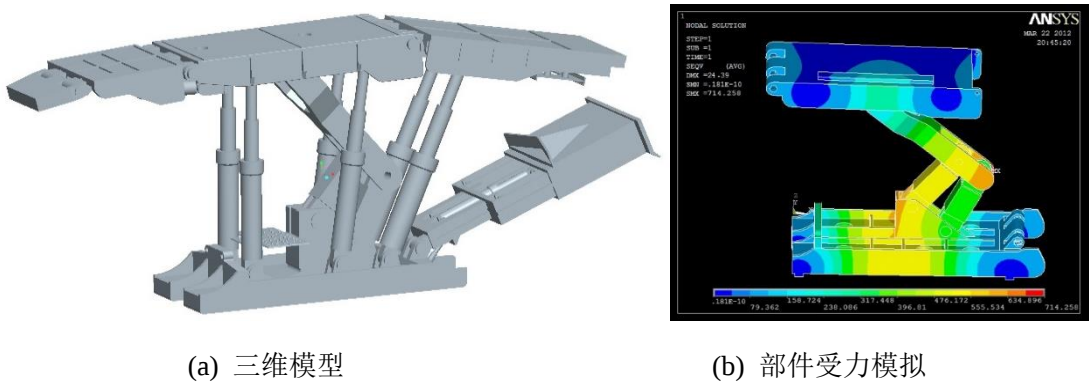


图 14 采充液压支架各部件受力及疲劳模拟分析

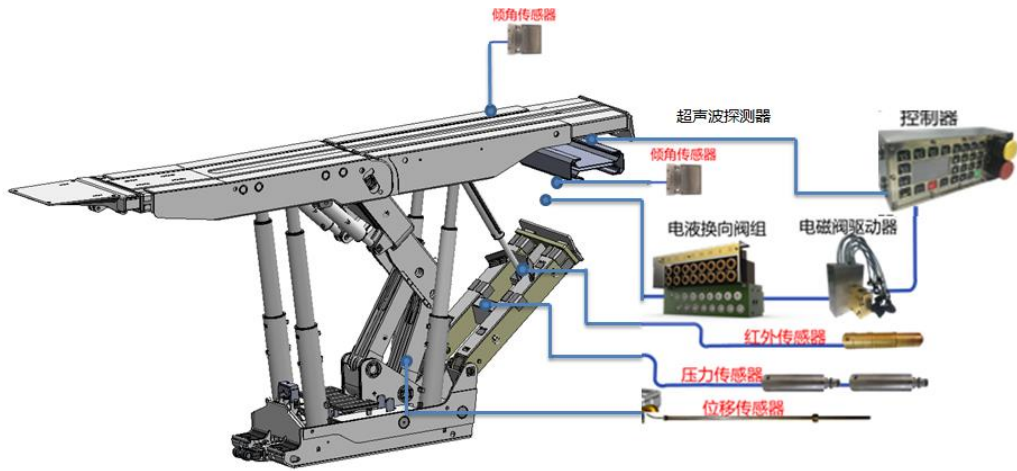


图 15 采充液压支架、多孔底卸式充填输送机自动化控制

(2) 高效采煤与充填协调作业工艺。

优化设计了采充液压支架移架、新型多孔底卸式充填输送机卸料及夯实机构夯实等作业的自动化工艺流程，形成了采煤与充填协调作业的自动化工艺，如图 16 所示；充填作业的自动化通过倾角传感器、超声波探测器、压力传感器、位移传感器、红外传感器等技术手段实现信号采集，利用系统控制器实现命令控制；在充填作业动作结束后，控制系统会接收到相关信号，给出执行支架移架、推溜的自动控制命令，在采充液压支架的移架完成之后再反馈给控制系统，再次执行后部充填的自动化控制。

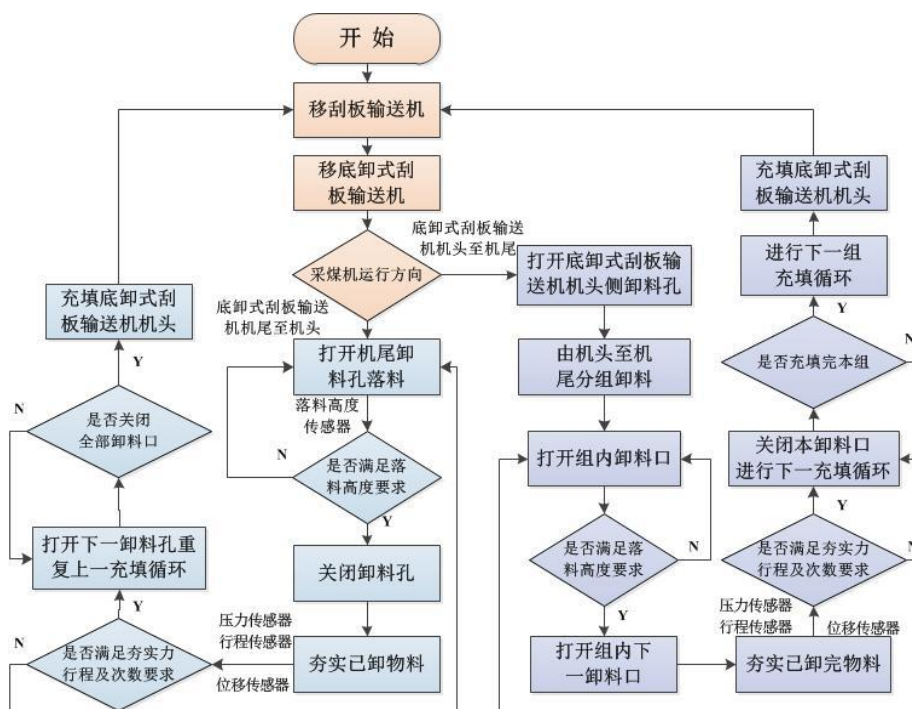


图 16 高效采煤与充填协调作业工艺

4) 研发了高承载性能的矸石基聚合物充填新材料，建立了充填采煤沿空留巷顶板力学模型，揭示了巷旁充填体与围岩耦合作用机制；设计了采煤-充填-留巷高效协同作业工艺，开发了矸石基聚合物材料充填沿空留巷技术。

(1) 矸石基聚合物充填材料研制及其承载压缩特性。

研究了矸石粒径、聚合物类型及其添加量对矸石基聚合物材料承载压缩特性的影响规律，研发了聚合物高固水胶结材料、高砂高泡水泥基材料等多种矸石基聚合物材料，如图 17 所示；测试了丁苯乳液、氯丁乳液和丙烯酸酯与破碎矸石混合后的矸石基聚合物材料承载压缩特性，揭示了聚合物的界面黏结作用增强破碎矸石整体性的机理，降低了矸石基聚合物材料承载压缩率。



图 17 碎石基聚合物材料研制及承载压缩特性测试

(2) 碎石基聚合物材料充填沿空留巷围岩稳定性原理。

建立了碎石基聚合物材料充填沿空留巷顶板力学模型和夯实机构侧压力计算模型，如图 18 所示，获得了夯实机构侧向应力分布特征，研究了碎石基聚合物材料充填沿空留巷顶板下沉及应力分布规律，形成了碎石基聚合物材料充填沿空留巷巷旁支护体宽度计算方法；构建了碎石基聚合物材料充填沿空留巷围岩应力与变形演化规律三维数值模型，研究了不同充实率、开采深度、巷旁充填体宽度及承载压缩率条件下碎石基聚合物材料充填沿空留巷围岩变形、应力分布规律及塑性区发育特征，如图 19 所示，揭示了碎石基聚合物材料充填沿空留巷围岩稳定性机理。

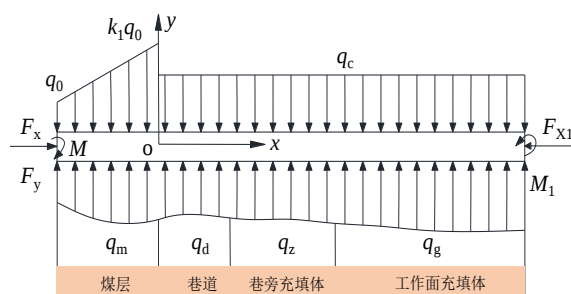


图 18 充填沿空留巷顶板力学模型

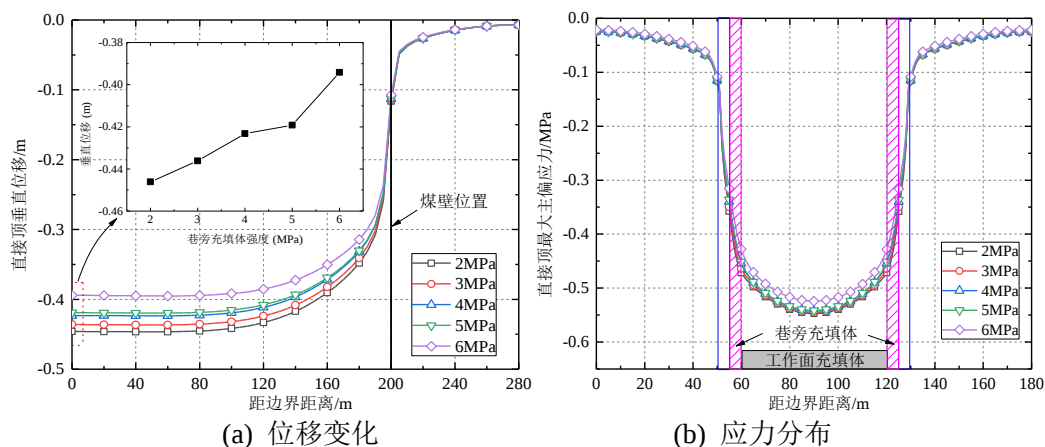


图 19 充填沿空留巷围岩变形与应力分布

(3) 矽石基聚合物材料充填沿空留巷技术。

基于矽石基聚合物材料承载压缩特性与充填沿空留巷围岩稳定性原理,分析得到了矽石基聚合物材料充填沿空留巷围岩稳定性关键控制因素,设计了矽石基聚合物材料充填沿空留巷工艺,如图 20 所示,其主要步骤包括支护材料准备、封闭挡板安设、矽石基聚合物材料运输与夯实、充填墙体成型等,研发了矽石基聚合物材料充填沿空留巷技术,构建了以矽石基聚合物材料为巷旁支护体的“采选充+留”技术体系。

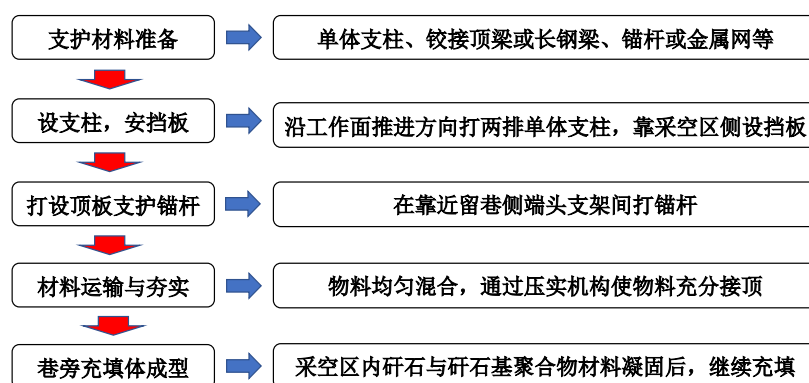


图 20 矽石基聚合物材料充填沿空留巷工艺流程

依托上述研究,获批了国家自然科学基金重点项目、高等学校学科创新引智计划支持;共发表学术论文 70 余篇,出版学术专著 1 部;授权国内国外发明专利 20 余件;制定国家标准 1 项、能源行业标准 1 项。研究成果已在我国新汶、开滦、平顶山等大型煤炭集团的 10 余个矿井进行了推广应用,取得了显著的经济、社会与环境效益。

2、深部围岩动力灾害控制理论与技术

在深部煤炭资源开采冲击矿压机理、监测预警与防治研究方面,依托国家自然科学基金及一批校企联合科技攻关项目,围绕国内不同矿区开展了相关研究工作,如巨厚砂岩承压含水层、煤层群开采等复杂环境下的冲击矿压防治问题,研究了彬长矿区巨厚承压含水关键层下冲击显现和矿震特征及其对覆岩运动的控制作用,提出了巨厚承压含水关键层疏水调压聚能诱冲机理、冲击危险应力-震动-能量“三场”耦合监测预警体系及区域和局部结合的冲击危险综合防治方法。研究了高压水射流割缝技术卸压效果影响性因素、揭示了水射流破煤机理及卸压防冲原理,构建了水射流割缝喷嘴结构和工况参数优化模型。研究了煤层群下行开采扰动效应,揭示了煤层群开采静载分布和传递规律及动载扰动诱冲机理。研

究了动静组合加载下巷道围岩响应及卸压-支护对巷道围岩响应特征的影响。上述研究为煤矿的冲击矿压防治与安全生产提供了有效保障。

1) 针对蒙陕地区煤层埋深大、顶板赋存巨厚砂岩承压含水层等典型赋存环境，揭示了巨厚承压含水关键层对采场覆岩运动及围岩应力演化具有控制作用，提出了巨厚承压含水关键层疏水调压聚能诱冲机理，建立了巨厚承压含水关键层下冲击危险应力-震动-能量“三场”耦合监测预警体系，构建了优化盘区尺度和采掘布置、控制顶板承压水运动及局部卸压解危的综合防治方法。

(1) 巨厚承压含水关键层对采场覆岩运动及围岩应力演化的控制效应。

随采空区面积增加，顶板巨厚关键层悬臂-铰接梁结构逐渐加剧围岩采动应力集中，采场支承压力影响范围进一步增大（图 21）。煤层大巷区域受两侧采场支承压力叠加影响，静载应力不断升高，巨厚关键层破断后，静载应力有所降低；巨厚关键层下低位老顶破断导致悬臂-铰接结构中多岩层的协同破断，诱发高能矿震产生强动载应力（图 22）。

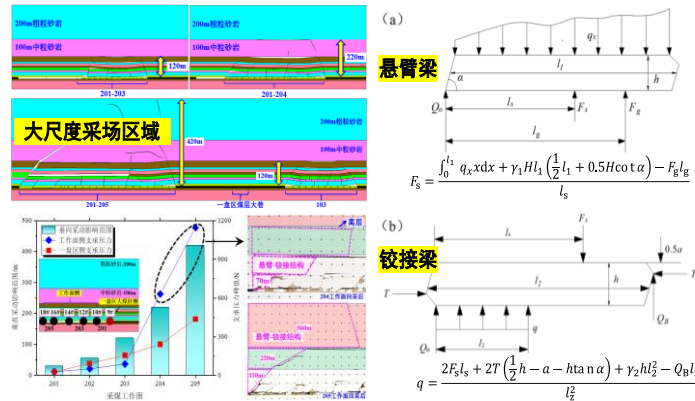


图 21 巨厚关键层作用下大尺度悬臂-铰接结构的采场围岩应力集中效应

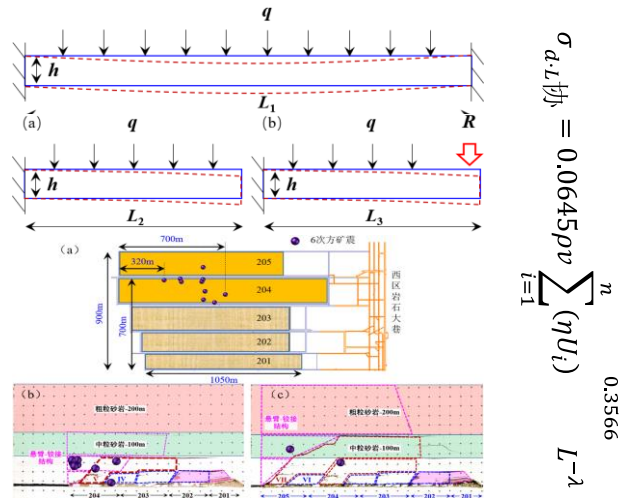


图 22 大尺度悬臂-铰接结构中多岩层的复合破断

(2) 巨厚承压含水关键层疏水调压聚能诱冲机理。

基于顶板承压水疏放的调压聚能和诱发冲击作用提出了巨厚关键层承压水疏放调压聚能诱发冲击的判据准，其应力判据为： $\sigma_s + \sigma_d + \sigma_w \geq \sigma_{bmin}$ ，能量判据为： $\frac{dU}{dt} = \frac{dU_R}{dt} + \frac{dU_C}{dt} + \frac{dU_D}{dt} + \frac{dU_w}{dt} > \frac{dU_b}{dt}$ ，即在顶板承压水疏放调压聚能作用下，煤岩体中叠加应力超过其临界载荷且释放的总能量超过其破坏所消耗的能量时，诱发冲击矿压（图 23）。同时确定了巨厚承压含水关键层下动静载力源及冲击矿压类型，大尺度采场工作面超前顺槽区域冲击矿压为高静载+强动载型，两侧采动煤层大巷区域冲击矿压为高静载+低动载扰动型（图 24）。

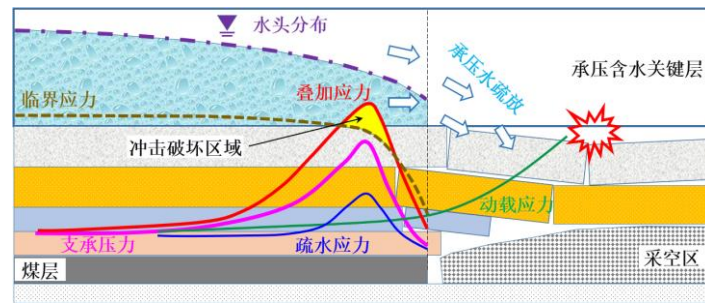


图 23 巨厚关键层作用下大尺度悬臂-铰接结构的采场围岩应力集中效应

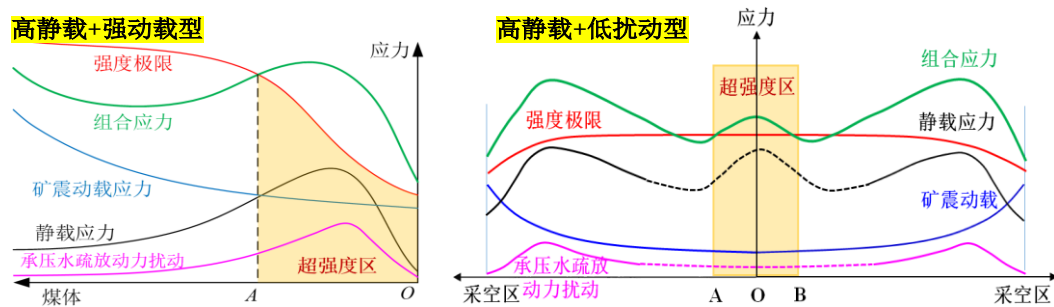


图 24 巨厚承压含水关键层下动静载力源及冲击矿压类型

(3) 巨厚承压含水关键层下冲击危险应力-震动-能量“三场”耦合监测预警体系及区域和局部结合的冲击矿压综合防治方法。

基于巨厚承压含水关键层下冲击矿压发生机理、冲击类型及力源分析，从煤岩的震动场、应力场、能量场出发，建立了冲击危险应力-震动-能量“三场”耦合监测预警体系（图 25）。同时基于采场动载、静载及顶板承压水疏放调压聚能效应，从区域和局部两个维度提出了巨厚承压含水关键层下冲击矿压综合防控方法（图 26）。

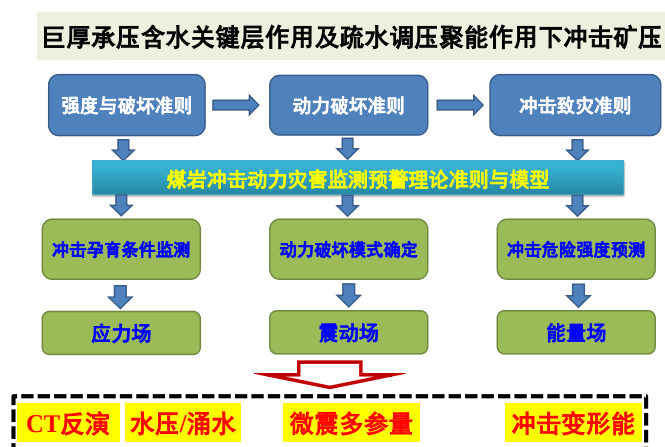


图 25 冲击矿压应力-震动-能量“三场监测”预警体系

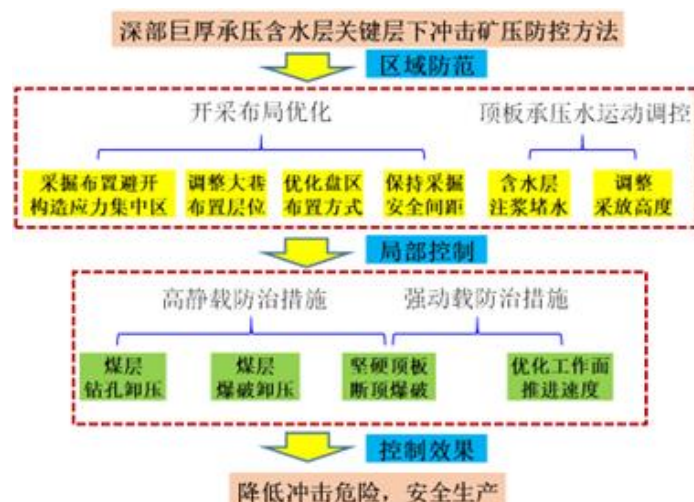


图 26 冲击矿压综合防控方法

2) 高压水射流割缝卸压技术具有粉尘量少及无火花等优点，可在煤岩体内部形成卸压带，从而降低冲击危险。围绕水射流割缝卸压参数优化以增强卸压效果，通过理论分析、数值模拟及工业实践等方法，分析了高压水射流割缝卸压效果影响性因素、水射流破煤过程及破煤机理，从应力演化规律及能量场分布特征出发，研究了高压水射流割缝卸压防冲原理，构建了深部冲击地压煤层高压水射流割缝卸压参数优化理论模型，采用 LS-DYNA 及 FLAC3D 确定了最佳喷嘴结构并应用于现场工业实践。

(1) 高压水射流割缝卸压防冲原理。

从高压水射流割缝卸压区应力演化规律及能量场分布特征的角度出发对其防冲原理进行分析研究，巷道两帮煤体在卸压后垂直应力曲线由“单峰型”转变为“双峰型”，应力分布情况可分为三个区域。卸压后巷道帮部煤体内所积聚的弹性能大幅度降低，煤体内部能量释放效果明显，大幅的降低了巷道帮部煤体的能量集聚程度，提升了巷帮抵抗冲击载荷的能力。

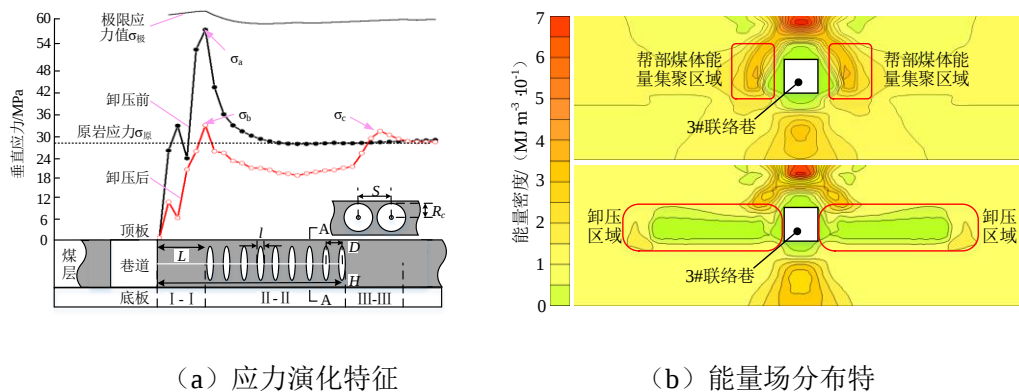
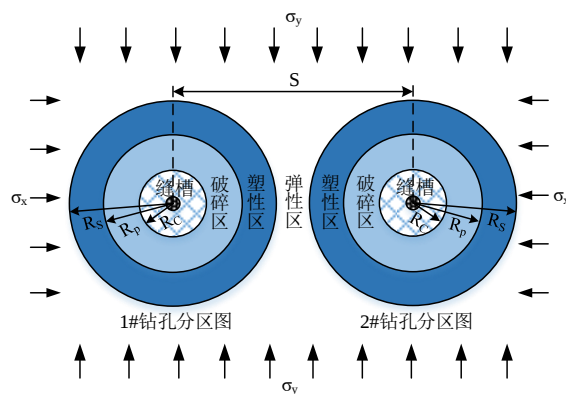


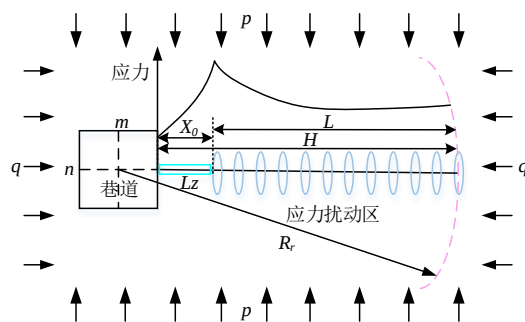
图 27 高压水射流割缝卸压应力场与能量场特征

(2) 高压水射流割缝工况参数优化理论计算模型。

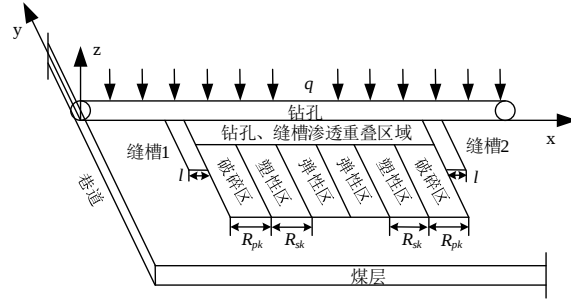
通过分析高压水射流割缝卸压影响因素、破煤机理及防冲原理，构建了工况参数优化的理论计算模型，其包括钻孔间距-割缝半径理论计算模型、钻孔深度-割缝长度理论计算模型和缝槽切割宽度-缝槽切割间距理论计算模型，并通过计算得到最佳卸压效果的工况参数。



(a) 钻孔间距-割缝半径理论模型



(b) 钻孔深度-割缝长度理论模型

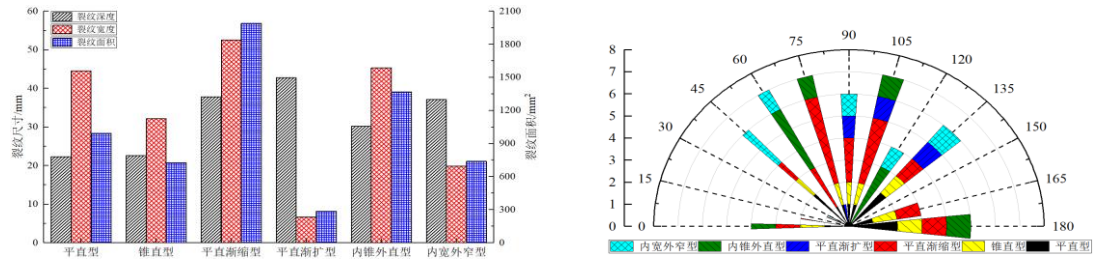


(c) 缝槽切割宽度-缝槽切割间距理论计算模型

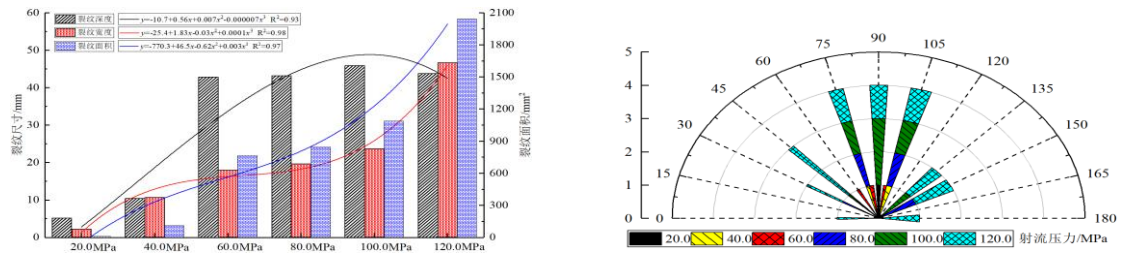
图 28 水射流割缝卸压参数理论计算模型

(3) 高压水射流割缝喷嘴结构参数优化。

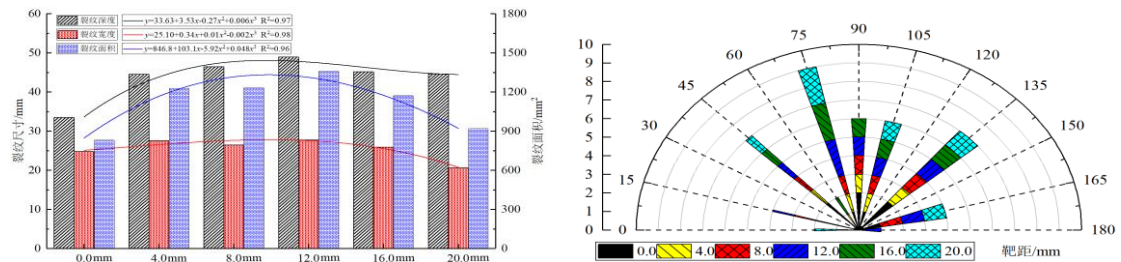
采用 LS-DYNA 软件光滑粒子流 (SPH) 耦合有限单元法 (SPH) 对不同喷嘴类型、射流直径、射流压力、射流角度及靶距参数下连续水射流冲击破煤过程进行模拟，确定了深部冲击地压煤层高压水射流割缝卸压喷嘴结构最优参数：平直渐缩型喷嘴、射流压力 120MPa、靶距 12.0mm、射流直径 3.5mm、射流角度 90° 。



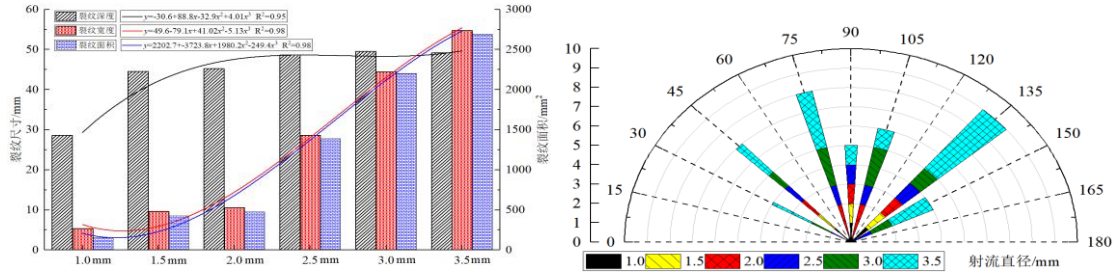
(a) 不同喷嘴类型参数条件下水射流破煤效果



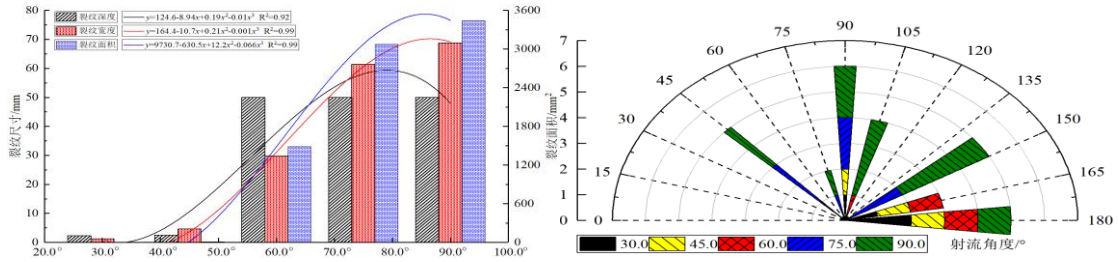
(b) 不同射流压力参数条件下水射流破煤效果



(c) 不同靶距参数条件下水射流破煤效果



(d) 不同射流直径参数条件下水射流破煤效果



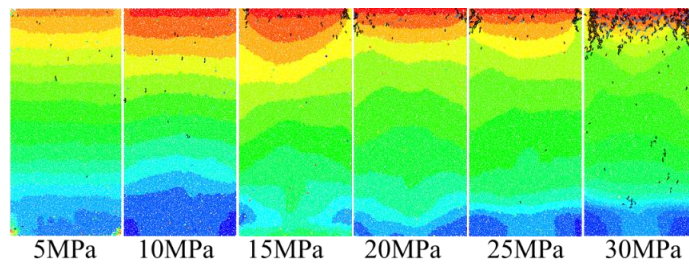
(e) 不同射流角度参数条件下水射流破煤效果

图 29 高压水射流割缝卸压喷嘴结构参数

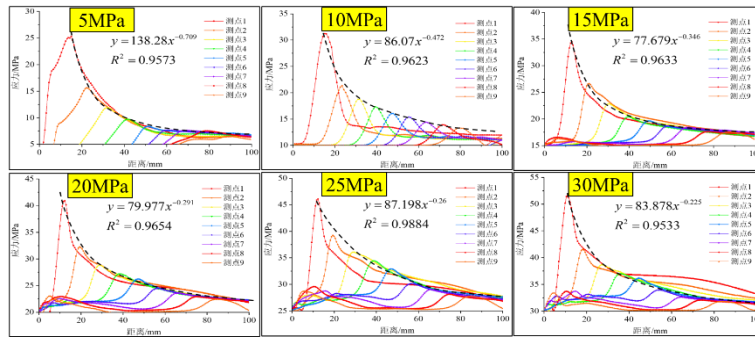
3) 针对煤层群下行开采时，上下煤层的开采造成静载应力的传递集中和动载应力的相互扰动，容易造成冲击矿压灾害的发生，开展了动静载加载扰动作用下煤体损伤研究，提出了煤层群下行开采扰动效应和诱冲机理，建立了开采扰动诱冲效应的表征方法，研究成果可为煤层群开采的冲击矿压机理及防治研究提供理论指导。

(1) 动静载扰动作用下煤体损伤特征。

在静载应力作用下，围压越高，试样损伤程度越低，动态应力波穿过试样后衰减幅度越小；随着轴压升高，试样损伤程度加大，试样内裂隙发育，动态应力波穿过试样时能量变化程度越高，煤体的粘结强度变化率增大。在动载扰动作用下，应力入射波波长越长、峰值越高，试样的动态损伤程度越大，入射波衰减越快，黏结能量越高，煤体的粘结强度变化率越大。



(a) 试样破坏

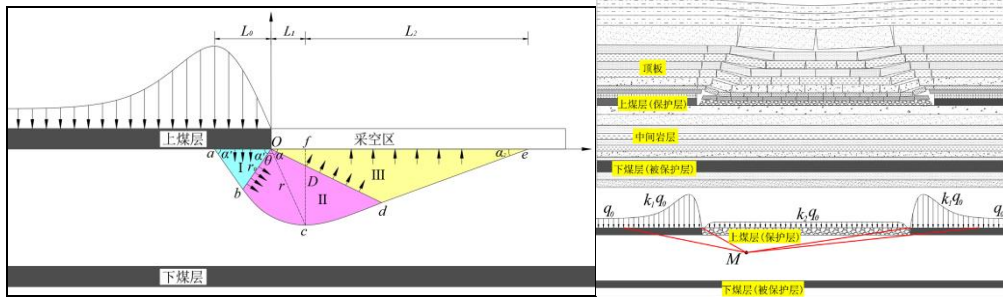


(b) 应力波衰减

图 30 动静载扰动作用下煤岩体损伤破坏特征

(2) 煤层群开采扰动的应力分布及诱冲效应。

建立了煤层群开采的力学模型，给出了保护层卸压开采效应的解析解，揭示了煤层群开采静载分布和传递规律，得出了煤层群开采后支承压力的分布范围和底板破坏范围；推导了顶板破断和煤柱失稳造成的动静载强度表达式，给出了采高、埋深、层间岩性、煤层间距等主要影响煤层群下行开采动静载强度因素的影响程度。提出了煤层群开采扰动诱发冲击矿压的机理，并建立了冲击矿压发生的判别准则。



(a) 煤层底板岩体塑性破坏区域分布 (b) 上煤层开采后支承压力计算模型

图 31 煤层群开采后底板破坏范围和静载分布及传递规律

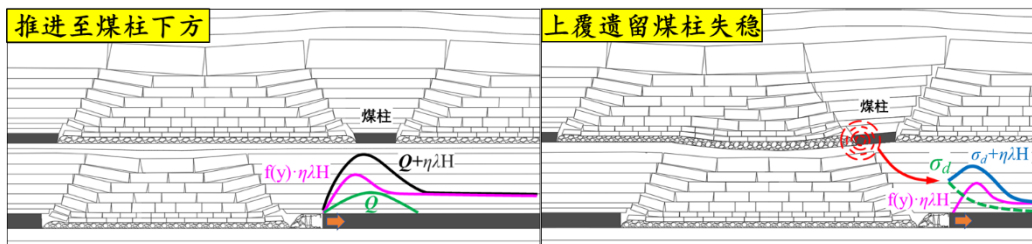


图 32 顶板破断和煤柱失稳动静载来源及类型

(3) 煤层群开采扰动动静载强度的影响因素。

随着采高增大，煤柱内承载载荷增加，对工作面开采的影响逐渐增大；煤层间距增加，煤柱对工作面的影响减小，保护层卸压效果降低；煤层层间岩层强度增强，层间岩层垮落步距增大，引起的采场周围煤岩体静载应力明显升高，工作面煤壁前方的应力集中程度增大和集中范围扩大，支架阻力动载系数增加。

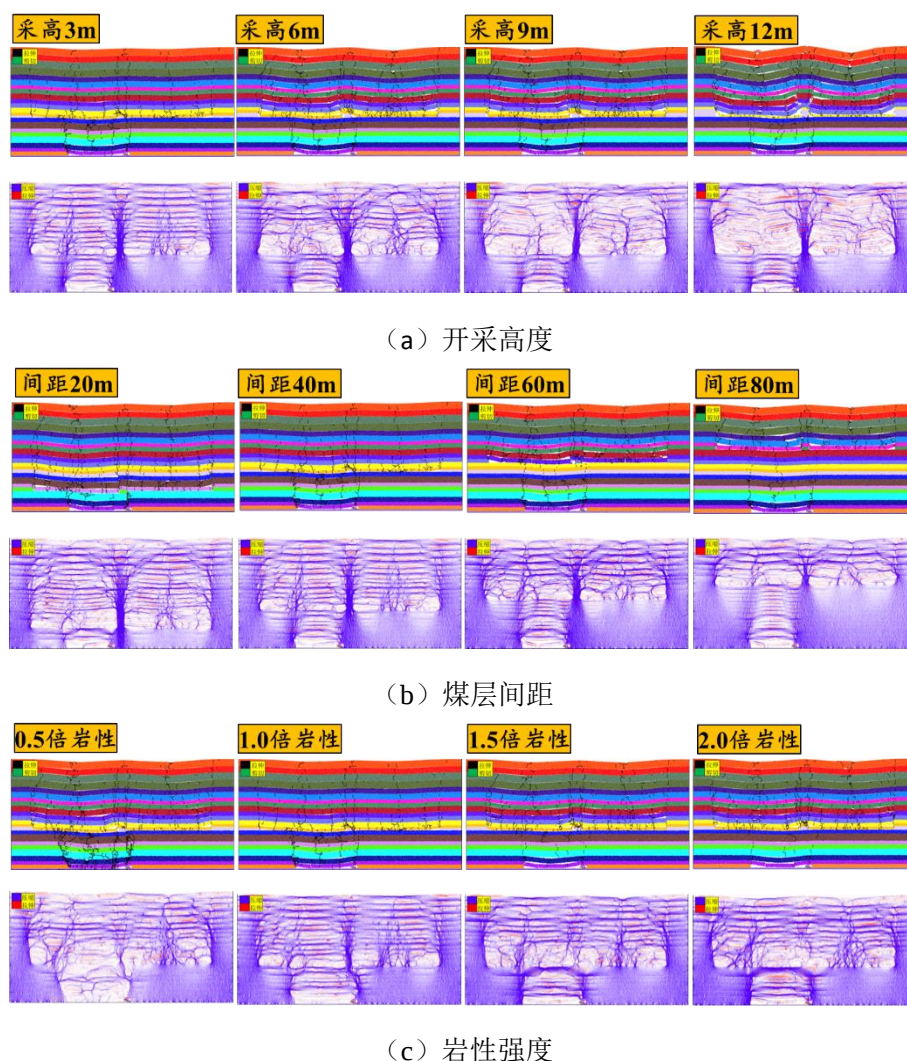


图 33 煤层群开采扰动不同影响因素差异

4) 针对当前防冲支护、卸压中存在的问题，综合考虑静载应力、动载应力、支护条件和卸压程度等因素，研究了动静组合加载下巷道围岩响应特征，探究了卸压和支护对巷道围岩响应及变形破坏特征的影响，研究成果可为巷道冲击破坏及相关支护、卸压的研究提供理论指导。

(1) 动静组合加载下巷道围岩响应特征。

研究发现动载扰动是诱发冲击矿压的关键因素，随着动载强度的升高，巷道

围岩中应力集中区域的范围、程度明显增强，当动载强度达到一定值后，巷道发生瞬时性的变形破坏；相较于正常应力条件，动载作用下高水平应力条件下的巷道底板发生明显的变形破坏。

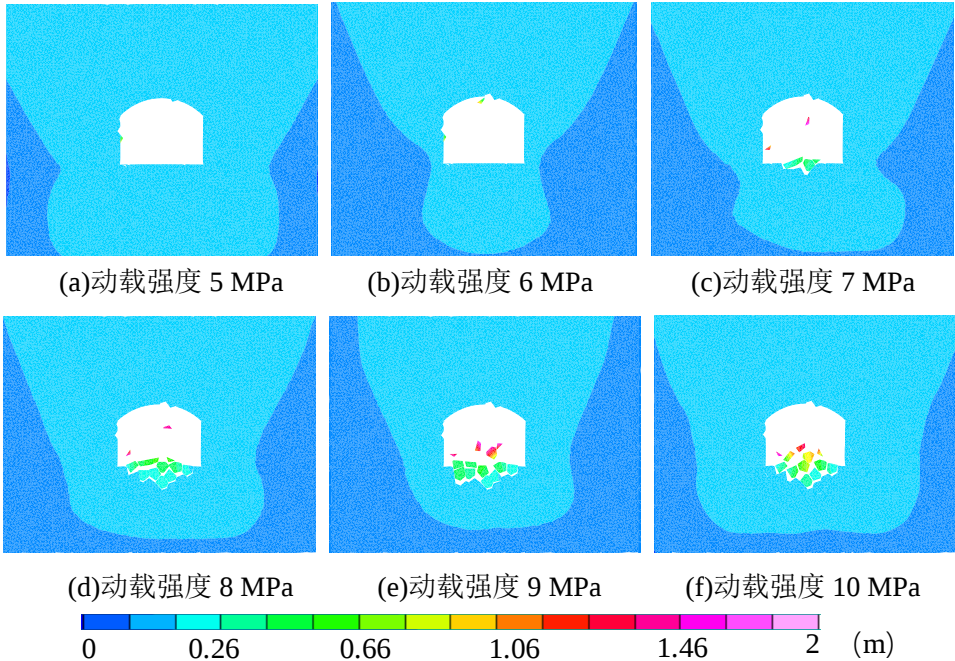


图 34 不同强度动载作用下巷道围岩位移云图

(2) 卸压和支护对巷道围岩响应特征的影响。

采用相似模拟、数值模拟等研究手段，分析了动静组合加载条件下巷道的加速度、位移变形等物理量响应特征，确定了不同强度动载作用下巷道围岩冲击破坏过程及临界动载强度，研究了卸压措施对于动载作用下巷道围岩的影响，发现卸压措施对高强度动载作用下的巷道围岩冲击破坏程度具有积极的抑制作用，有利于保持巷道形状稳定。

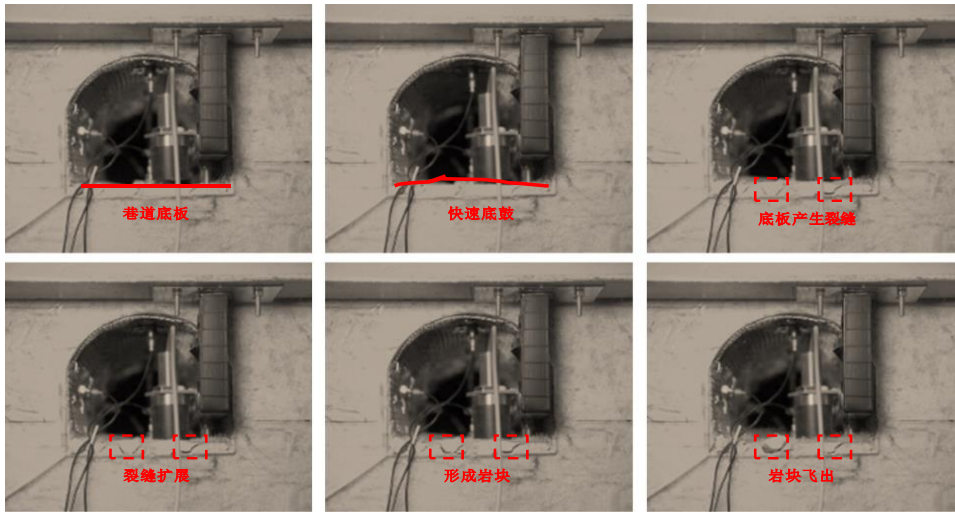


图 35 动态追踪冲击破坏过程（动载能量 411.6J）



(a) 静载作用下巷道模型（0-200 mm）(b) 多次施加动载后巷道模型（0-200 mm）



(c) 静载作用下巷道模型（200-400 mm）(d) 多次施加动载后巷道模型（200-400 mm）

图 36 有无底板爆破卸压巷道破坏形态对比图

该研究方向本年度共发表 SCI/EI 论文 23 篇，授权发明专利 3 项，申请发明专利 23 项，获甘肃省科技进步三等奖 2 项，中国职业安全健康协会科学技术三等奖 1 项，研究成果已在彬长矿区、开滦矿区、徐州矿区、华亭矿区等类似地质条件矿井进行了推广应用，取得了显著的经济效益和社会效益。

3、深部岩体地质力学参数测试理论与技术

小孔径原位测试以其便携、快速、准确、方向可控、测试位置灵活的特点，在煤岩体地质力学参数测试中的应用快速发展。自从上世纪七十年代至今，小孔径测试的原理与方法不断革新并趋于稳定，各类测试设备的研发也层出不穷。但由于不同厂家研发与制造设备的过程中采用的机械原理、材料以及设备适用性的不同，导致现有的小孔径测试设备所测参数的大小范围、试验误差等没有一个统一的参考标准，甚至不同测试设备测试结果的可靠性也很难保证。

针对深部强度低、破碎、应力高等特点及井下特殊环境，开发了一套便携式煤岩体原位测试系统，实现了煤岩体地质力学参数准确、快速测量，并已在部分矿井实测应用。国内外已有的装置相比，本套系统的特点：1）水压致裂地应力

测试装置实现了小型化且可快速大规模测试，测量钻孔孔径为 50mm；2）煤岩体单轴抗压强度原位测试仪可实现随锚杆孔（30mm）及时测量；3）通过钻孔成像仪与岩石钻孔剪切仪和岩石钻孔弹模仪的有机配合使用，实现在 1 个 76~80 mm 的岩体钻孔中快速、准确、低成本地获取煤岩体的抗剪强度参数、弹性模量；4）基于钻孔成像的围岩结构测试实现了巷道围岩破坏程度量化分析。

系统包括矿用钻孔成像仪（ZKXG30）测定钻孔内围岩结构发育特征，岩石钻孔弹模仪（RBEMT-75）测定孔内岩体待测段的弹性模量 E ，岩石钻孔强度仪（RBUST-30）测定待测段单轴抗压强度 σ_c ，岩石钻孔剪切仪（RBST-75）测定孔内待测段岩体岩体强度 C 和 ϕ ，水压致裂原位地应力测试装置（RBHST-50）测量地应力。

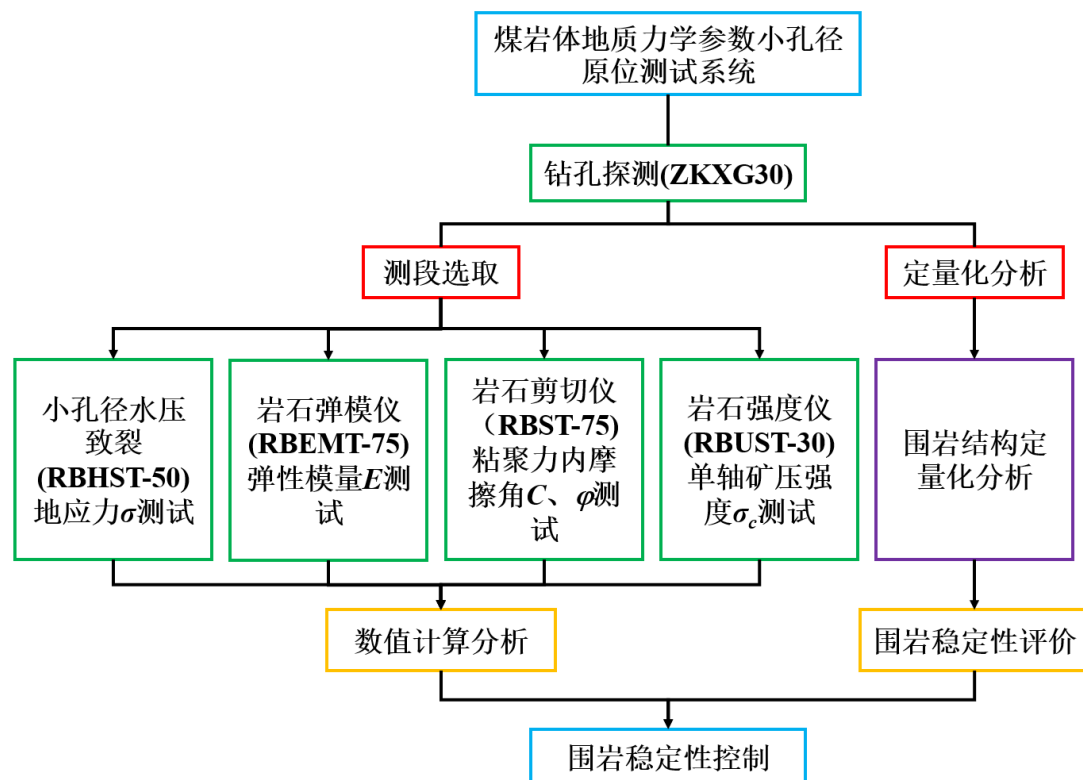


图 37 煤岩体原位测试系统

（1）煤岩体单轴抗压强度小孔径原位测试。

煤岩体单轴抗压强度采用 RBUST-30 岩石钻孔强度仪，该仪器由高压泵、探头、压力表、压力传感器、高压管、数据采集仪组成，如图 38 所示。仪器测试孔径为 30mm，可使用锚杆孔等已有钻孔进行测试。能够测量井下不能取样的软弱破碎岩体，可获得钻孔内不同深度、不同层位的岩体单轴抗压强度。该仪器测量过程简单方便，可实现快速测量。

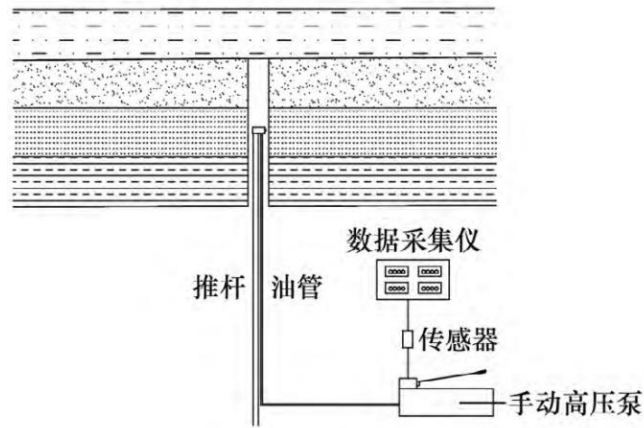


图 38 RBUST-30 型岩石钻孔强度仪

采用 ZKXG30 型钻孔成像仪选取待测煤体或岩体的测试段，然后连接测试装置，注入液压介质，并对测试装置进行检漏试验，接着将测试装置的探头送至测试段，对探头进行加压，使其内部探针压向钻孔孔壁至测试段压裂，最后根据压裂时的临界压力与煤岩体单轴抗压强度的关系，计算单轴抗压强度公式为：

$$\begin{cases} \delta_i = \delta_p d_1^2 / d_2^2 \\ \delta_{cc} = k_{sf} \delta_f \end{cases} \quad (0-1)$$

式中： d_1 为探头活塞直径，RBUST-30 所用探头活塞直径为 15mm； d_2 为探针的直径，RBUST-30 所用探针直径为 5mm； δ_p 为手动液压泵内液压介质的压力，即防爆压力表显示的泵入液压介质的压力，MPa； δ_i 为探针端部的压力，即探针施向钻孔的压力，MPa； δ_f 为临界压力，即钻孔破裂时施加在孔壁的探针端部压力，MPa； δ_{cc} 为煤岩体单轴抗压强度，MPa； k_{sf} 为强度换算系数。

以同煤集团塔山矿 2311 巷为工程背景，采用该装置测试顶板单轴抗压强度，2311 巷直接顶由泥岩、砂质泥岩和中粒砂岩 3 层岩层组成。其中，泥岩直接顶厚度为 0~3.52m，砂质泥岩直接顶厚度为 0~4.52m，中粒砂岩直接顶厚度为 1.60~5.52m；老顶由泥岩、中粒砂岩和泥岩 3 层岩层组成，下层泥岩老顶厚度为 1.06~2.69m，中粒砂岩老顶厚度为 0.85~6.50m，上层泥岩老顶厚 0~4.40m，巷道顶板单轴抗压强度测试结果如表 1 所示。

表 1 单轴抗压强度测试结果

钻孔编号	测点深度/m	测点岩性	单轴抗压强度/MPa
1#	0.5	泥岩	37.83
	1.0	砂质泥岩	52.96

2#	0.5	泥岩	34.11
	1.0	泥岩	35.45

(2) 煤岩体地质抗剪强度参数小孔径原位测试。

抗剪强度参数的小孔径测试设备是由美国研发的 RBST-75 岩石钻孔剪切仪，以在水平测孔中采用 RBST-75 岩石钻孔剪切仪进行抗剪强度参数的小孔径测试为例，设备测试方法如图 39 所示。

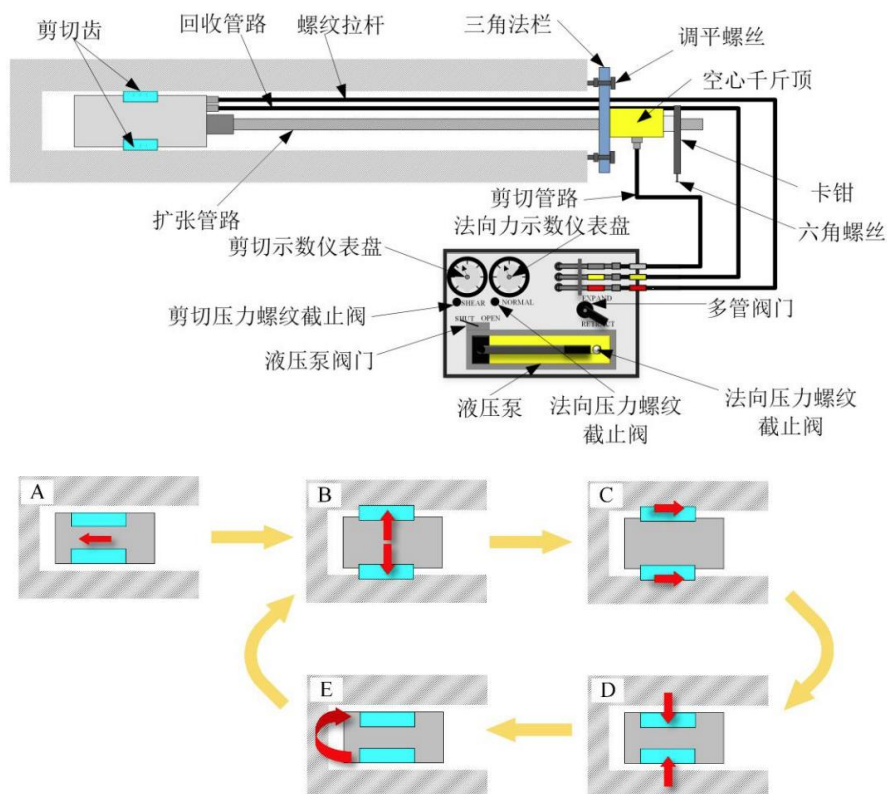


图 39 抗剪强度参数小孔径测试过程

剪切齿对于孔壁部分的受力分析如图 40，剪切齿内间距为 L ，剪切齿垂直于页面方向，长度为 B ，设剪切过程中，法向力为 f_n ，拉力为 $2f_s$ ，则单侧受剪切部分煤岩体所受的拉力为 f_s ，应力分布见下式(0-2)。

$$\begin{cases} \sigma = \frac{f_n}{BL} \\ \tau = \frac{f_s}{BL} \end{cases} \quad (0-2)$$

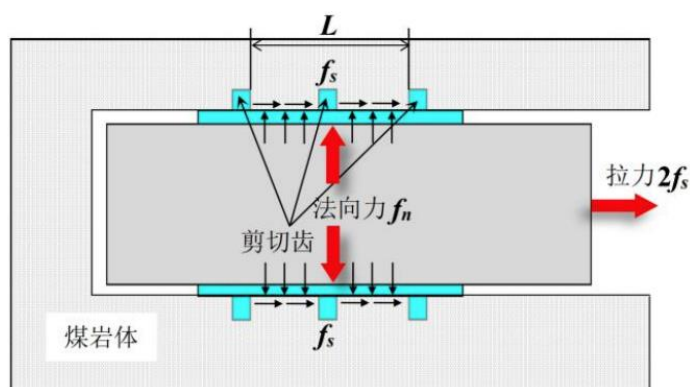
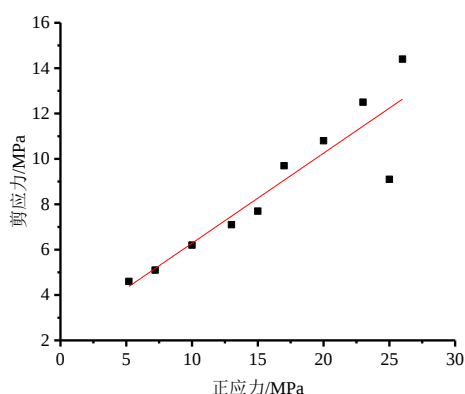


图 40 孔壁直剪受力分析

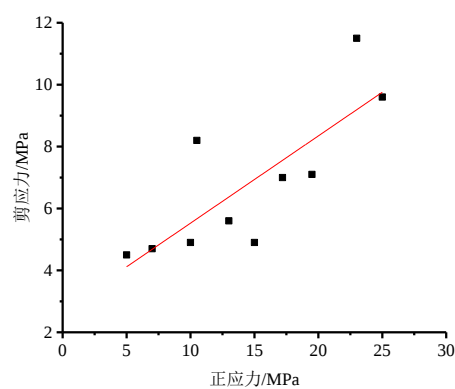
读取并记录剪切过程中的最大剪应力及其对应的正应力数值，通过摩尔库伦准则即可得到齿间煤岩体的抗剪强度参数。

钻孔剪切仪在工程现场实测时，均采用在同一钻孔的同一深度处进行 4~6 次测试，每次测试完后，旋转 30°左右进行下一次测试，得到不同法向应力下对应的剪应力数值，拟合曲线方程获得该位置处煤岩体的抗剪强度参数，取纵轴截距为粘聚力 C ，直线斜率为内摩擦角正切值 $\tan\phi$ 。

以刘桥二矿 6 煤层煤巷为工程背景，采用该装置进行煤岩体强度参数测试。刘桥二矿可采煤层顶板以泥岩为主，粉砂岩次之，少量细砂岩，底板多为泥岩和粉砂岩。钻孔位置根据现场实际情况选取，本次测量共布置 3 个钻孔，位于巷道底板，间隔 5m，竖直向下施工，各个钻孔应通过高压水冲孔清洗，确保孔壁无岩石碎屑覆盖，钻孔规格为：①孔径 $\Phi 76\sim 77$ mm；②孔深为 9.0 m。



(a) 2 号孔 2.6~3 m 剪切关系图



(b) 2 号孔 4.4~5 m 剪切关系图

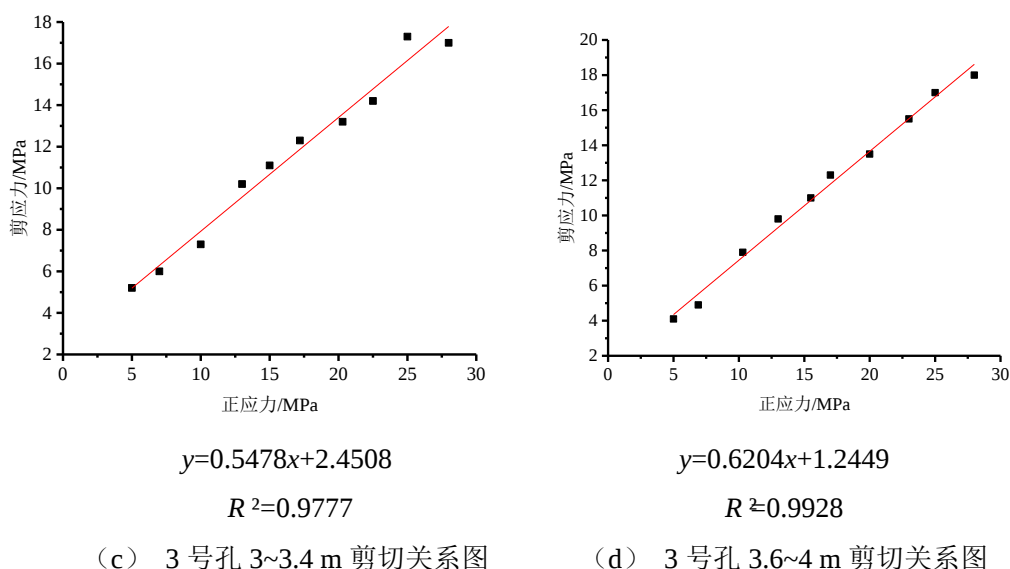


图 41 钻孔剪切关系图

通过 ZKXG30 矿用钻孔成像轨迹检测装置与岩石钻孔剪切仪的配合使用，对钻孔内岩体强度进行测量，1 号钻孔发生堵孔，不作研究。正应力和剪应力的关系曲线如图 41 所示，围岩强度参数测试结果如错误!未找到引用源。所示。

由图 41 可知，2 号孔 2.6~3 m 段正应力低于 20MPa 时，正应力与剪应力线性相关性强，正应力高于 20MPa 时，正应力与剪应力的关系较为离散。2 号孔 4.4~5 m 段测得的正应力与剪应力的关系较为离散，线性相关性较低。3 号孔 3~3.4 m 段与 3.6~4 m 段正应力和剪应力关系的散点分布离散性都比较低，线性拟合程度较好。根据正应力与剪应力的线性拟合直线计算出测试段岩体黏聚力与内摩擦角，如表 2 所示。

表 2 岩体黏聚力与内摩擦角测试结果

力学参数	2 号孔 2.6~3m	2 号孔 4.6~5 m	3 号孔 3~3.4 m	3 号孔 3.6~4 m
砂岩黏聚力/MPa	2.3111	2.7061	2.4508	1.2449
内摩擦角/°	21.6270	15.7370	28.5800	31.5930

(3) 煤岩体地质变形参数小孔径原位测试。

煤岩体变形参数的钻孔弹性模量测试，是在待测煤岩体中钻取指定孔径大小、深度和空间方位的测孔后，采用钻孔弹模测试设备，对孔壁施加径向压力的同时测得相应径向位移变化量，继而获得不同法向应力量级下的弹性/变形模量值。选用 RBEMT-75 钻孔弹模仪，钻孔弹模仪主要分为测试探头、动力源、数据传输、数据读取四个部分。其中测试探头主要由刚性承压板以及位于刚性承压

板中部的两个高精度环形位移传感器组成，动力源部分是通过手压油泵的方式为测试探头承压板的伸出过程供给压力，数据传输部分由位移传感器数据接收电缆和数显压力变送器数据接收电缆组成，数据读取部分由液压表和读数箱组成。以在竖直测孔中采用 RBEMT-75 钻孔弹模仪进行变形参数的小孔径测试为例，设备测试方法如图 42 所示。

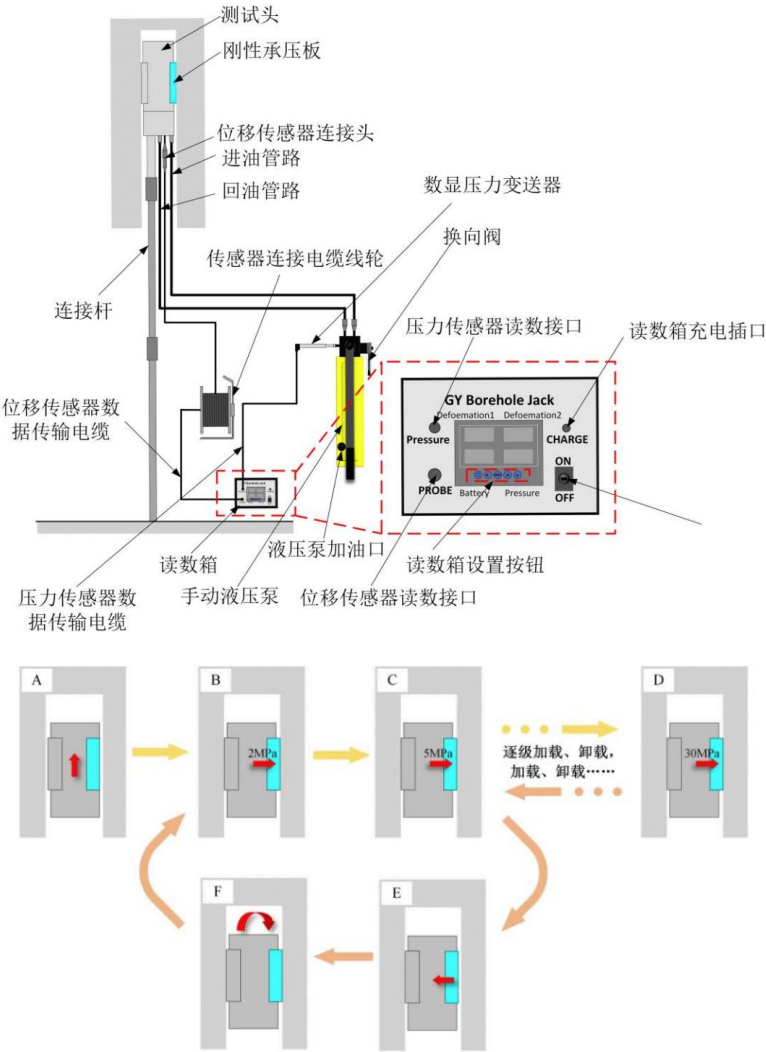


图 42 变形参数小孔径测试过程

钻孔弹性模量测试基本原理是测试头一侧的条带状承压板伸出，在与孔壁的接触面内施加对称的均匀分布力，据此，建立 RBEMT-75 钻孔弹模仪测试的力学模型，对测试过程中承压板施压时的位移变化量进行求解，如图 43 所示。该力学模型可以分解为 A 模型与 B 模型相加，a) 在 2β 范围内对孔壁径向加压；b) 在孔壁 2β 范围内对孔壁径向加压与剪切，根据模型边界条件，可将两个模型分别求解后再叠加，即可以得到待求解模型的理论解。

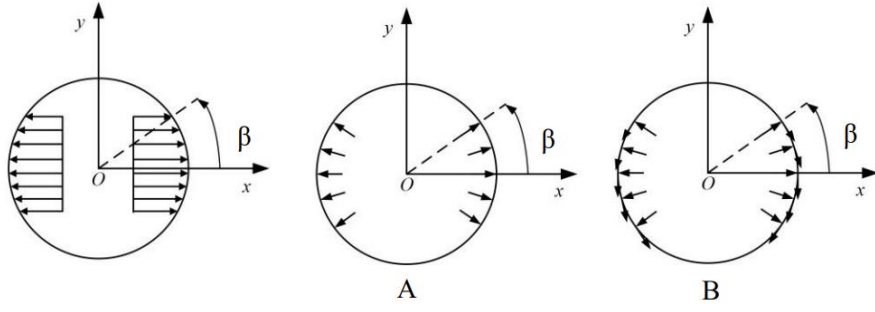


图 43 RBEMT-75 岩石钻孔弹模仪的测试力学模型

$$2G\pi \frac{dr}{dp} = -2\beta \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4-4\mu}{n(2n-1)} \cos 2n\theta \sin 2\theta \quad (1-1)$$

$$2G\pi \frac{dr}{dp} = (3 \sim 4\mu)(-2\beta \cos \theta) - \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{3-4\mu}{2n-1} \cos 2(n+1)\theta \right] \frac{\sin 2n\theta}{n} \quad (1-2)$$

将式(1-1)与(1-2)叠加后可得待求解模型的理论解，表示为：

$$E = A \times H \times D \times T^*(v, \beta) \times \frac{\Delta Q}{\Delta D} \quad (1-3)$$

式中：A-二维公式计算三维问题的影响系数；

H-压力修正系数；

D-钻孔直径，mm；

ΔQ -压力，MPa；

ΔD -测孔径向位移，mm；

$T^*(v, \beta)$ -与承压板接触角和岩体泊松比有关的系数。

以钱营孜煤矿 3226 工作面回风巷为例，利用该装置进行围岩弹性模量测试。3226 工作面回风巷平均埋深 540m，设计长度为 2025m。煤层平均煤厚 2.89m，平均倾角为 12° 。煤层直接顶为 1.02m 厚泥岩，直接底为 1.7m 厚的泥岩，基本顶和老底岩性以泥岩为主，次为粉砂岩和细砂岩。本次测量工作在距工作面大约 160m 处，面向工作面推进方向每间隔 2m 布置钻孔，共布置 3 个钻孔，钻孔位于巷道顶板中央，竖直顶板施工。钻孔完毕后，利用 ZKXG30 矿用钻孔成像轨迹检测装置选取围岩结构裂隙不发育的完整段，记录完整区域的位置及其长度，并将弹模仪探头伸入指定完整段进行弹模试验，可得各个钻孔的弹性模量及变形模量，各钻孔内岩体弹性模量测试结果如图 44 所示。

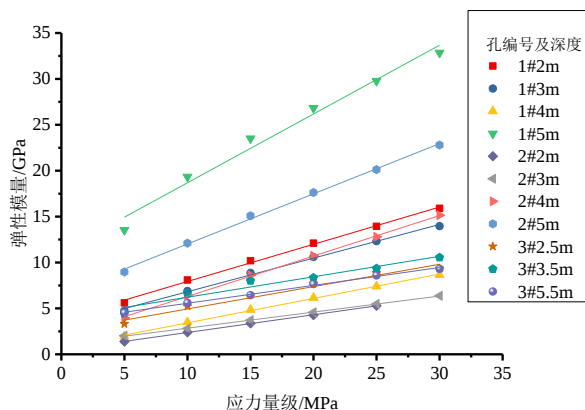


图 44 不同应力量级下的弹性模量变化趋势

由图 44 可知，不同应力量级下的弹性模量规律基本符合线性关系，岩体的弹性模量随着正应力的增大而线性增大。但同一岩层、不同钻孔下，在相同应力量级下测量得到的弹性模量并不相同，这是由于测试结果取决于各个试验段的节理裂隙的发育程度。另外，不同应力量级情况下，岩体的弹性模量值不同，由于测试段岩体是多裂隙非线性弹性体，其弹性模量和应力量级有关，以往工程计算中选取的岩体弹性模量来源于实验室，所取试样多为完整少节理岩块，且使用加载曲线计算弹性模量，所得弹性模量为定值。弹性模量原位测试为今后岩体力学参数准确选取提供了一种新的途径。

(4) 小孔径单回路水压致裂地应力测试装备。

基于水压致裂原理，研发了一套小孔径（50mm）单回路气动增压水压致裂地应力测试装备（图 45），该装备以常规风压为动力，创新了压裂液驱动方式，通过水压控制器的自动调节模块，单回路实现了钻孔封堵和孔壁压裂双过程，压裂系统体积小（0.076m³）、质量轻（30kg），适用范围广，实现了煤矿井下地应力快速、大规模测试（图 6）。

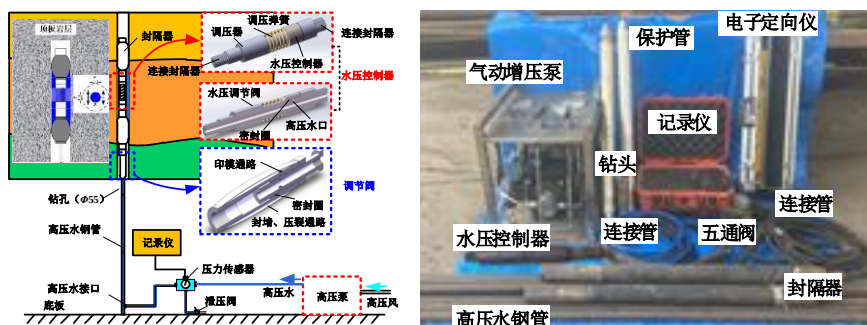


图 45 水压致裂应力测试系统

采用 ZKXG30 钻孔成像装置进行钻孔，选取 1.2~1.5m 长的完整孔段，将封隔器放置在孔壁光滑、孔径一致的位置，安装测量设备后，按照风泵座封、压裂、

关系、卸压、裂缝方位测定等步骤依次操作。地应力测量数据采集采用水压致裂地应力测量数据记录仪进行采集。垂直应力根据覆岩重力进行计算，最大主应力 σ_H 和最小主应力 σ_v 计算公式为

$$\sigma_h = p_s - \gamma_w h \tag{1-4}$$

$$\sigma_H = 3p_s - p_r - \gamma_w h \tag{1-5}$$

式中： p_s 为水压读数仪记录的关闭压力； p_r 为水压读数仪记录的重张压力； γ_w 为水的容重； h 为钻孔压裂处到水压读数仪的垂直距离。

以皇联煤矿为工程背景，选取 9#二水平回风巷布置 2 个测站，进行水压致裂地应力测试。9#煤层直接顶板多为中、细粒砂岩，局部为粉砂岩或泥岩，厚 1.10~3.57m，基本顶一般为灰色泥质胶结的中、细粒砂岩，厚 4.30~7.40m。水压致裂试验中，会得到很多的曲线与数据，但并不是所有的数据曲线都能真实反映地应力状态。因此，在根据实测资料计算主应力之前，应将不合理的数据剔除。此次水压致裂地应力测量压裂曲线测量结果如图 46 所示。

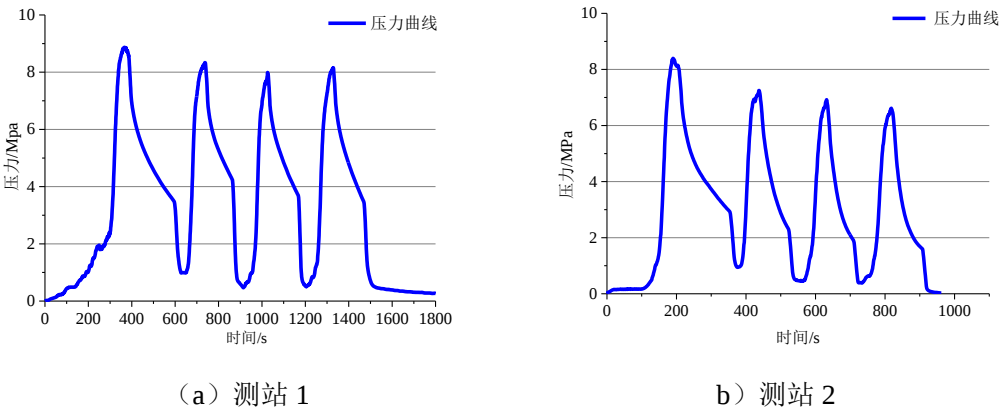


图 46 皇联煤矿水压致裂地应力测量压裂曲线

根据皇联煤矿地应力测量压裂曲线及水压致裂测试原理，结合钻孔窥视压裂裂缝的方向，得皇联煤矿地应力测试结果如表 3 所示。

表 3 皇联煤矿地应力测试结果

测站 编号	测点 位置	埋深 /m	垂直应力 σ_v /MPa	最大水平主应 力 σ_H /MPa	最小水平主应 力 σ_h /MPa	最大水平应力方 向
1	9#	246	6.64	6.40	5.20	N26.79° W
2	9#	246	6.64	6.40	4.60	N26.12° W

地应力测量结果表明，皇联煤矿 2 个测点中垂直应力 σ_v 均为 6.64MPa，最大水平主应力 σ_H 为 6.60MPa，最小主应力 σ_h 为 4.60MPa。2 个测点的应力状态均为

$\sigma_v > \sigma_H > \sigma_h$ ，测压比分别为 0.96，0.99，均接近于 1。皇联煤矿地应力以垂直应力为主，最大水平应力方向处于 N26.12° W~N26.79° W。

(5) 围岩结构原位测试与智能识别。

围岩结构测试采用的是 ZKXG30 矿用钻孔成像轨迹检测装置，该设备是一款对钻孔进行全面检测的高科技设备，该设备集钻孔拍照、窥视录像、成像和轨迹测量等功能于一身，一次测试完成，同时可以获取钻孔动态录像视频、局部高清照片、全孔壁展开图和钻孔空间轨迹，高效快捷。仪器以低功耗嵌入式双核处理器为核心，配以高清高线数摄像机和军工级高精度空间角度测量器件，辅之以先进的控制算法和图像处理算法等软件系统，同步实现全部功能。该仪器充分考虑煤矿井下实际工作环境，操作简便，系统性能稳定。

该测试方法可直观地观察和测试钻孔壁上结构面和裂隙的分布情况，特别适用于取芯率低的破碎煤岩体，方便、快速、成本低，适用于煤矿井下大范围快速观测，在评价巷道支护效果及巷道围岩变形破坏研究等方面应用效果显著。

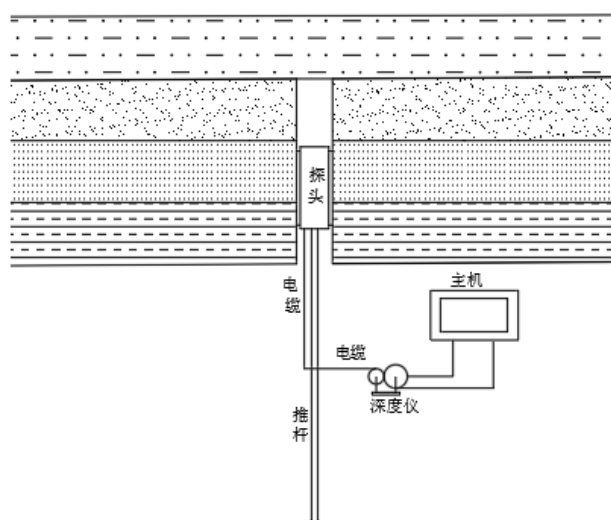


图 47 ZKXG30 钻孔成像仪各部件连接示意图

卷积神经网络在处理图像数据时主要使用卷积操作提取图像特征、通过最大池化和平均池化不断降低特征图尺寸，并尽可能保留上层图像的特征信息，建立分类回归模型检测上层特征信息得到目标信息区域和目标类别信息。通过反向传播降低损失，使用梯度下降算法逼近模型参数的最优值。建立端到端的检测通过代替了原始图像处理复杂流程。降低了传统图像处理的被动性。主动寻找图像特征，判断图像中目标类别和位置。

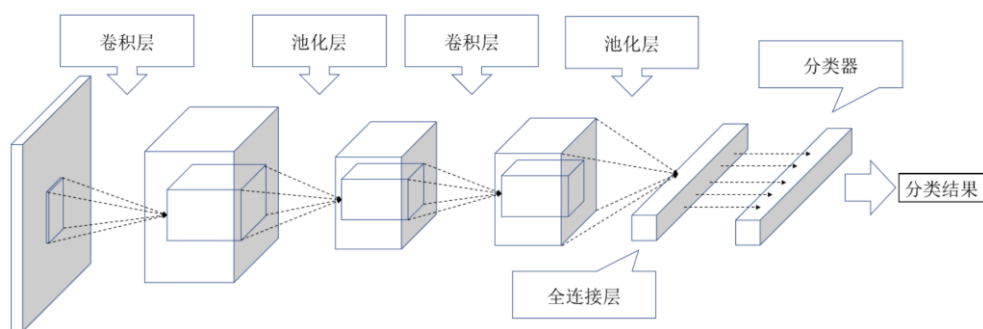


图 48 卷积神经网络结构

以华泓煤矿 9+10 号煤层巷道为工程背景，布置测站进行钻孔窥视，并采用煤岩体内部结构面参数量化方法处理钻孔图像。某一测站顶板中央钻孔内结构面分布情况如图 48 所示，该图清晰地反映了周围岩体随钻孔深度的破碎情况，对评价巷道围岩变形提供了一定理论依据。

当纵向开裂结构面长度较长，延伸到多个单位长度钻孔段内时，含有该纵向开裂结构面的钻孔段都应该把该纵向开裂结构面列入计算。同样的道理，若横向破碎区宽度超过单位长度时，含有该横向破碎区的钻孔段应该把处在该钻孔段内的横向破碎区宽度列入计算。

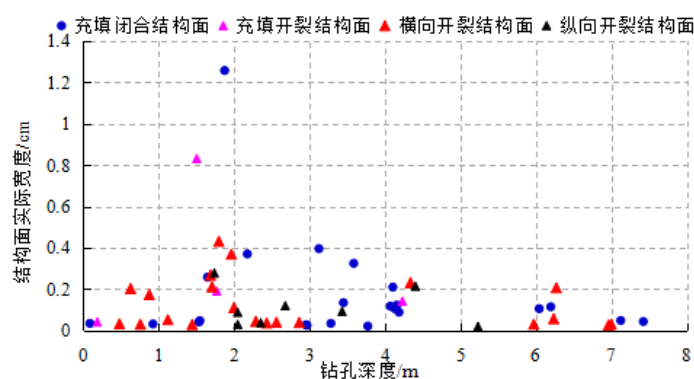


图 49 钻孔方向上结构面分布图

对各类型结构面进行统计，在图上表示各不同类型结构面分布情况。由图可知大多数结构面实际宽度小于 0.2cm。3.6-3.8m 段围岩虽然结构面条数较少，但横向开裂结构面宽度较大，且含有一条横向破碎区。

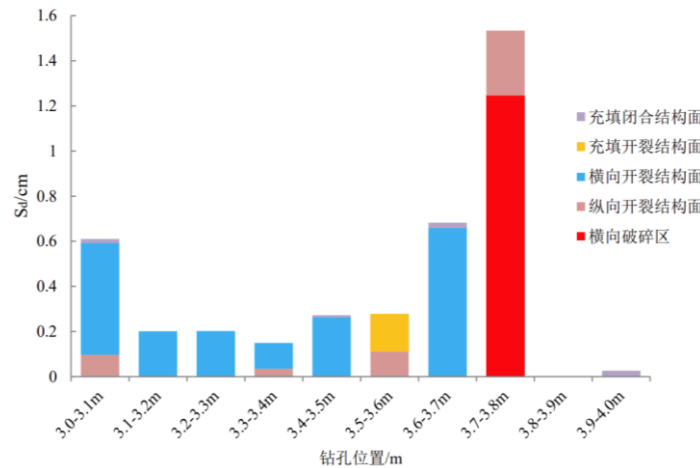


图 50 钻孔方向上结构面综合宽度分布图

对各单位长度内各类型结构面综合宽度进行统计，在图上表示钻孔方向上各单位长度结构面综合宽度情况，如图 50 所示。由图可知，3.6-3.8m 段围岩综合宽度较大（围岩破碎程度大），与上文分析结果相同，但更为直观。围岩的破碎表现主要由横向开裂结构面和横向破碎区组成。

上述研究共发表学术论文 20 余篇；授权发明专利 10 余件。研究成果获得中国煤炭工业协会科学技术奖一等奖、安徽省科技进步奖三等奖，入选了煤炭行业“中国好技术”库，并在皖北煤电集团、国家能源集团、中天合创能源有限公司、华亭煤电集团、华电煤业集团等下属 20 余对矿井得到了应用与验证，建立了皖北矿区主采煤层地应力数据库，为深部巷道支护提供了关键参数。