



# 聚焦采场智能支护 助力新一代信息技术与煤炭开采技术融合发展

——记中国煤炭科工集团首席科学家庞义辉



## 庞义辉

研究员，博士，中国煤炭科工集团首席科学家

中煤科工开采研究院有限公司智能化分院所所长，煤炭青年专家委员会委员，国家能源局和国家矿山安全监察局首批煤矿智能化专家，国家能源局煤矿智能化建设工作专班成员。孙越崎青年科技奖获得者，获全国煤矿支护优秀专家、北京市优秀博士毕业生、2022年度煤矿智能化卓越青年等荣誉称号。

主持国家自然科学基金项目2项，主持/参与国家重点研发计划课题、国家“863计划”课题、“973计划”课题、中国煤炭科工集团科技创新基金项目等10余项，主持完成横向课题近40项。研究成果以第一完成人获中国专利奖1项，省部级一等奖4项、二等奖5项；出版学术著作5部，制定国家标准1项、团体标准3项；发表学术论文78篇，SCI/Ei检索34篇，以第一/通讯作者获评领跑者5000（F5000）中国精品科技期刊顶尖学术论文4篇，获“三高”（高PCSI、高被引、高下载）论文17篇；以第一发明人获国家授权发明专利14项，申请国际发明专利3项，以第一著作权人获授权软件著作权7项。

# 采

煤工作面是煤炭开采的主要场所,基于液压支架对围岩自适应控制实现工作面智能化开采是践行煤矿减人、增安、提效的关键。2020年2月,国家八部委联合发布了《关于加快煤矿智能化发展的指导意见》,明确提出:“重点突破精准地质探测、智能化快速掘进、复杂条件智能化综采、连续化辅助运输等”。2022年,党的二十大报告提出:“深入推进能源革命,加强煤炭清洁高效利用,加强能源产供储销体系建设,确保能源安全。”全面开展煤矿智能化建设是落实党的二十大精神的具体行动,是保障能源安全稳定供给的关键举措,是助推能源低碳转型的有效手段,是煤炭企业实现高质量发展的核心技术支撑。综采工作面实现智能化采煤是智能化煤矿建设的标志性目标,将新一代信息技术与煤炭开采技术进行深度融合,实现液压支架对围岩的智能自适应支护是工作面智能化开采的关键。

中国煤炭科工集团是我国煤炭工业科技创新的国家队和排头兵,作为中国煤炭科工集团首席科学家和国家首批煤矿智能化专家,庞义辉以煤科人强烈的使命感和责任感,聚焦采场智能自适应支护十余载,助力新一代信息技术与煤炭开采技术融合发展,为实现煤炭产业高端化、智能化、绿色化转型,提升煤矿工人工作环境和幸福指数贡献自己的科技力量。

## 创新大采高综采 / 放采场围岩控制原理

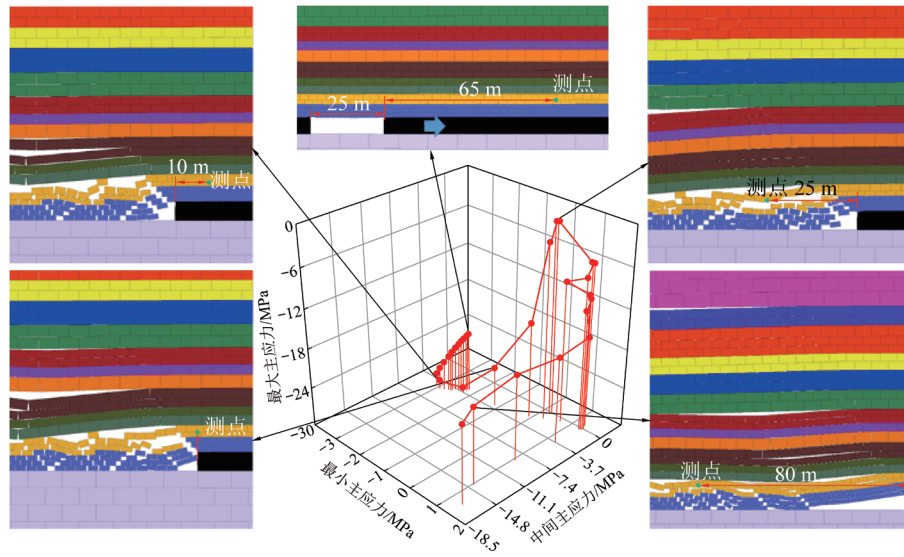
我国西部晋陕蒙新等大型煤炭基地赋存有厚度为6~12 m、埋深较浅、基岩层较薄、厚度稳定、煤质坚硬的厚及特厚煤层,煤炭产量与储量均占到全国总产量和储量的50%以上,非常适宜采用大采高综采/放开采技术进行开采。但超大开采空间、超高煤壁、强扰动岩层运动导致采场围岩控制困难,极易发生顶板动载矿压、煤壁片帮、液压支架支护失效。

由于采动应力是诱发围岩发生损伤破坏及断裂失稳的关键因素,为此,庞义辉及其研发团队聚

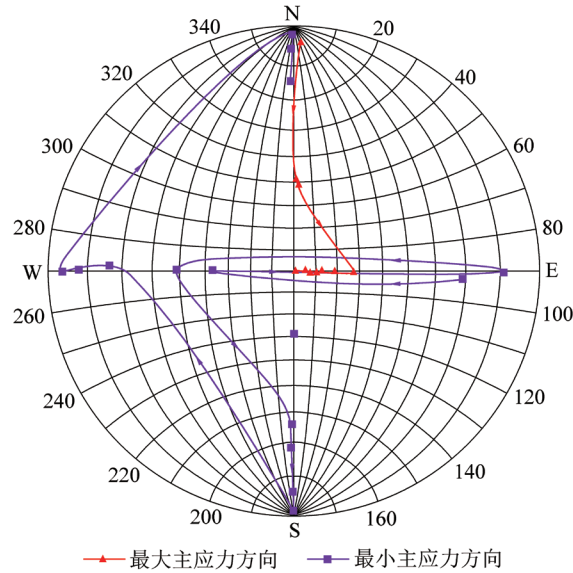
焦厚及特厚煤层开采过程中采场中部、端头、超前支护区域的全周期三向采动应力旋转效应及时空演化规律,探索围岩断裂结构力学模型及采动应力与围岩断裂失稳的映射关系。基于摩尔-库仑强度准则分析了不同加卸载条件下主应力呈现的6种变换形式,提出了以最大、最小主应力差值与摩尔应力圆圆心到强度曲线距离的比值作为三向采动应力强扰动判别指标,推导得出了三向采动应力扰动系数;采用数值模拟方法分析了煤层开采过程中沿工作面推进方向、工作面长度方向上覆岩层的三向采动应力大小、方向变化规律,揭示了上覆岩层内三向采动应力的旋转效应与时空演化规律(图1)。

通过系统分析采场上覆岩层应力演化与断裂失稳的全过程,庞义辉提出了采场上覆岩层由初始原岩应力状态至采动损伤破坏、离层、断裂失稳、压实破断等全周期破断运动的“五阶段”观点。发现上覆岩层发生损伤破坏与离层主要受三向采动应力状态及变换形式影响,而上覆岩层的损伤断裂结构是否发生失稳则主要受水平应力制约,揭示了垂直应力、水平应力在上覆岩层断裂失稳过程中的作用机制;系统分析了采场区段煤柱不同区域在巷道开挖-右侧工作面回采-左侧工作面回采-回采稳定4个阶段的三向采动应力全周期时空演化规律,发现工作面推进顺序不同导致煤柱上覆岩层断裂结构呈现明显的非对称性,初步揭示了上覆岩层采动应力与断裂失稳的映射关系。不同开采阶段上覆岩层的采动应力与位移关系如图2所示。

为解决超大采高综采工作面围岩控制难题,庞义辉建立了采场上覆岩层断裂失稳的“悬臂梁+砌体梁”力学模型及煤壁片帮的“拉裂-滑落”力学模型,揭示了煤壁片帮影响因素的敏感性排序。为解决坚硬特厚煤层综放工作面顶煤冒放性差、冒落块度大等问题,庞义辉建立了坚硬顶煤破断的悬臂梁力学模型,得出了顶煤厚度、强度与极限悬顶长度的简化关系式,揭示了相同机采高度条件下大采高综放工作面更容易发生煤壁片帮的力学机理,提出了坚硬特厚煤层综放工作面合理机采高度的确定方法,为大采高综放采场围岩稳定控制奠定了理



(a) 三向采动应力与覆岩断裂失稳关系



(b) 三向采动应力旋转

图1 三向采动应力旋转效应

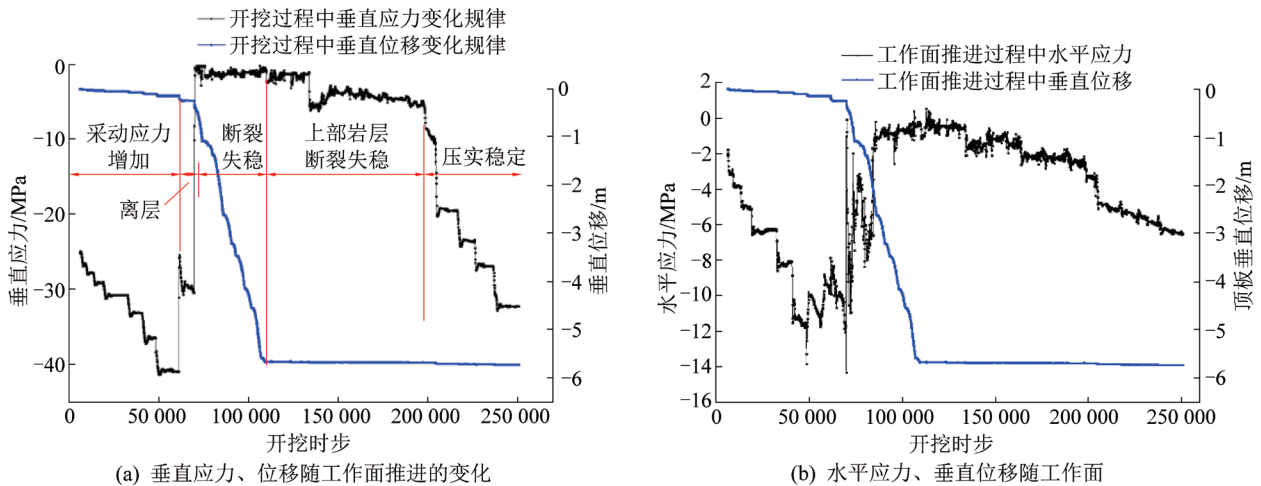


图2 不同开采阶段上覆岩层的采动应力与位移关系



论基础。大采高综采围岩断裂结构力学模型如图3所示。

基于上述研究,庞义辉负责的“超大采高长工作面强动载矿压致灾机理及围岩控制技术研究”项目获省部级一等奖(庞义辉为第一完成人)。他的博士毕业论文《超大采高液压支架与围岩的强度耦合关系》获评北京市优秀毕业论文,其本人也被评为北京市优秀博士毕业生,理论研究成果获得了行业专家的认可。

### 研发大采高综采/放采场围岩控制技术与装备

液压支架是采场支护顶板、防护煤壁、隔离采空区冒落矸石的主要支护设备,液压支架与围岩的耦合作用关系是液压支架研发的基础,液压支架服役特性及失效机制是实现采场高效、高可靠支护

的关键。

为解决超大采高工作面液压支架工作阻力难以确定的难题,庞义辉及研发团队建立了静动载复合工况下液压支架与围岩的耦合动力学模型,得出了动载矿压作用下液压支架主体结构件的冲击动载荷变化规律;通过对液压支架与煤壁的“拉裂-滑落”力学模型进行计算分析,得出了煤壁的拉裂破坏深度、宽度与工作面开采高度、煤体抗拉强度的关系,提出了液压支架抑制煤壁拉裂破坏体发生滑落失稳需要的临界护帮力计算方法。通过现场实测与理论研究发现,大采高采场液压支架不仅需要有效支护顶板,还应有效抑制煤壁片帮,即液压支架的工作阻力应综合考虑对采场顶板与煤壁的控制,为此,他提出了大采高液压支架合理工作阻力确定的“双因素”控制方法(图4)。

由于大采高综放采场顶煤冒落放出与煤壁片

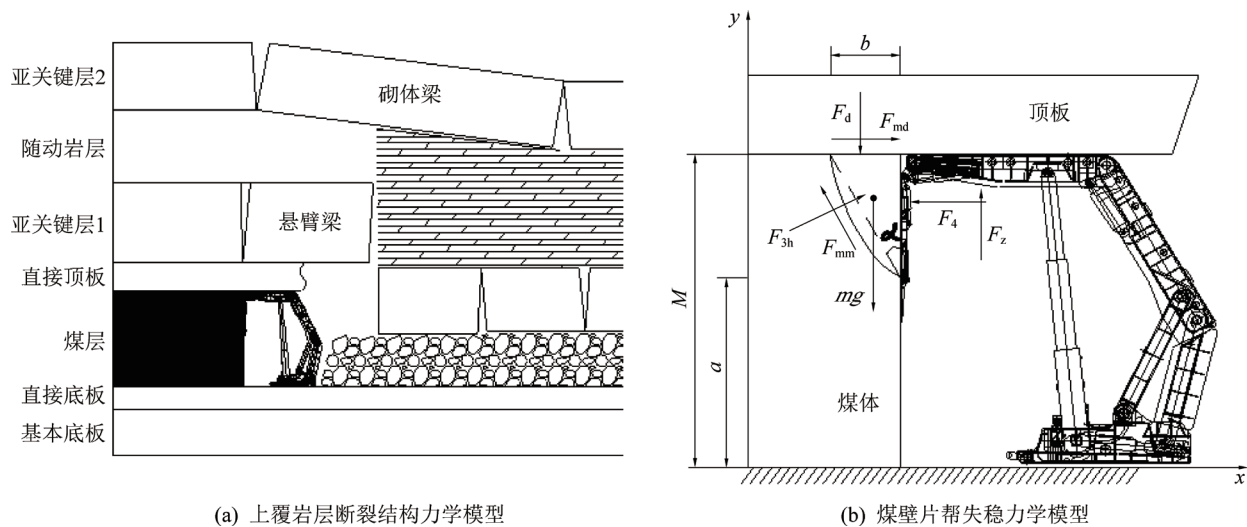


图3 大采高综采围岩断裂结构力学模型

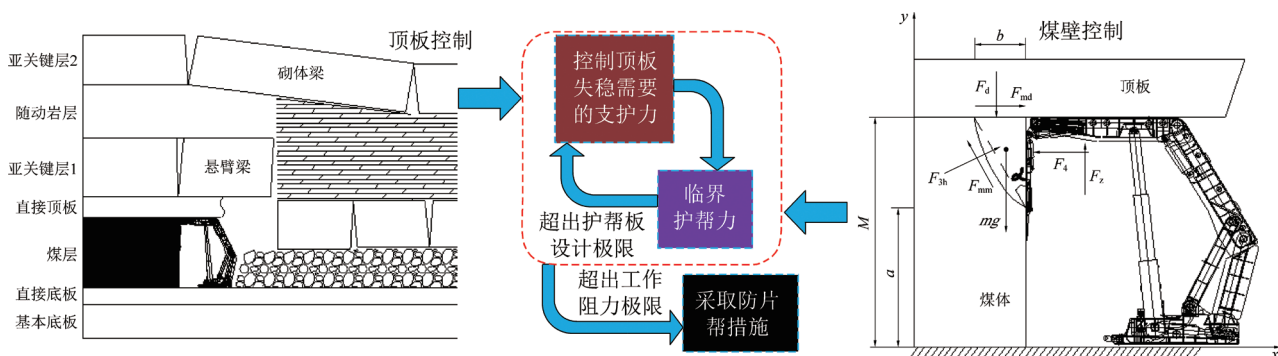


图4 大采高液压支架合理工作阻力确定的“双因素”控制方法





帮的力源均为矿山压力，为此，庞义辉提出了综放工作面提高顶煤冒放性与抑制煤壁片帮的矛盾，首次定量阐明了顶煤厚度、强度、极限悬顶长度与液压支架主动支护力、支护次数的关系；通过对综放工作面液压支架与围岩的耦合关系进行力学分析，揭示了提高顶煤冒放性与抑制煤壁片帮的协调机制及相关方法，在提高顶煤冒放性的同时，降低煤壁片帮的概率，提高了对综放采场的围岩控制效果。顶煤冒放性与煤壁片帮矛盾及措施如图5所示。

由于大采高综采/放采场开采空间大、巷道断面尺寸大，超前支护区域是大采高综采/放采场的支护难点。庞义辉及研发团队通过分析不同开采条件下采场超前支护区域采动应力及塑性破坏区演化规律，以巷道围岩变形量和超前支承应力集中系数

2个参数作为判定指标，提出了采场超前液压支架合理支护强度计算方法；为适应超前支护区域顶板与顶板不平等条件，发明了超前液压支架支护姿态自适应调整机构及系列超前液压支架，解决了超前液压支架支护姿态差、有效支护作用力低、对大变形巷道适应性差等问题。超前支护原理及自适应调整机构如图6所示。

基于上述研究，庞义辉及其团队研发了系列超大采高综采/放液压支架（图7），并已在山东能源集团金鸡滩煤矿、中煤能源集团新集口孜东煤矿、中国大唐集团龙王沟煤矿等成功进行应用，研究成果获省部级一等奖2项、二等奖3项；庞义辉以第一发明人发明的“一种智能自适应超前液压支架”获评第二十二届中国专利奖，技术研发成果得到了行业专家的认可。

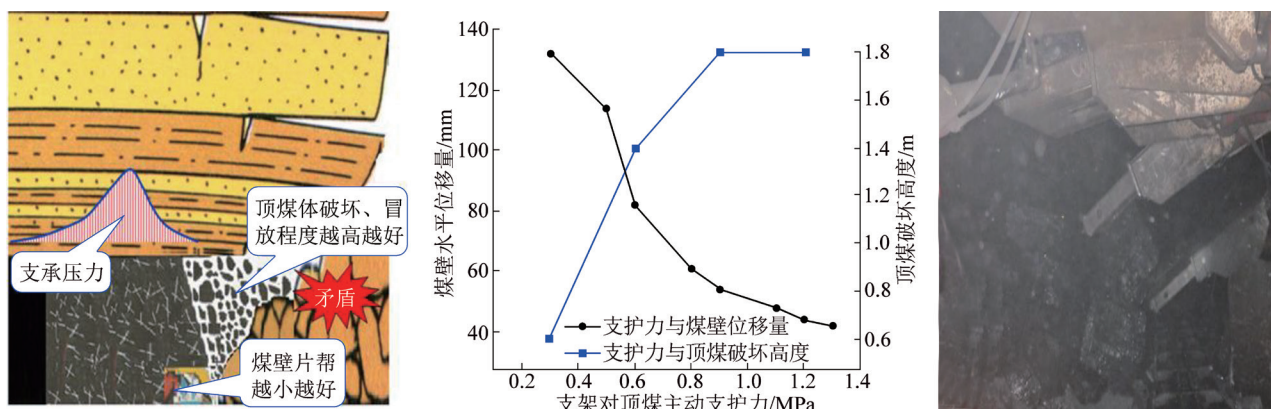


图5 顶煤冒放性与煤壁片帮矛盾及措施

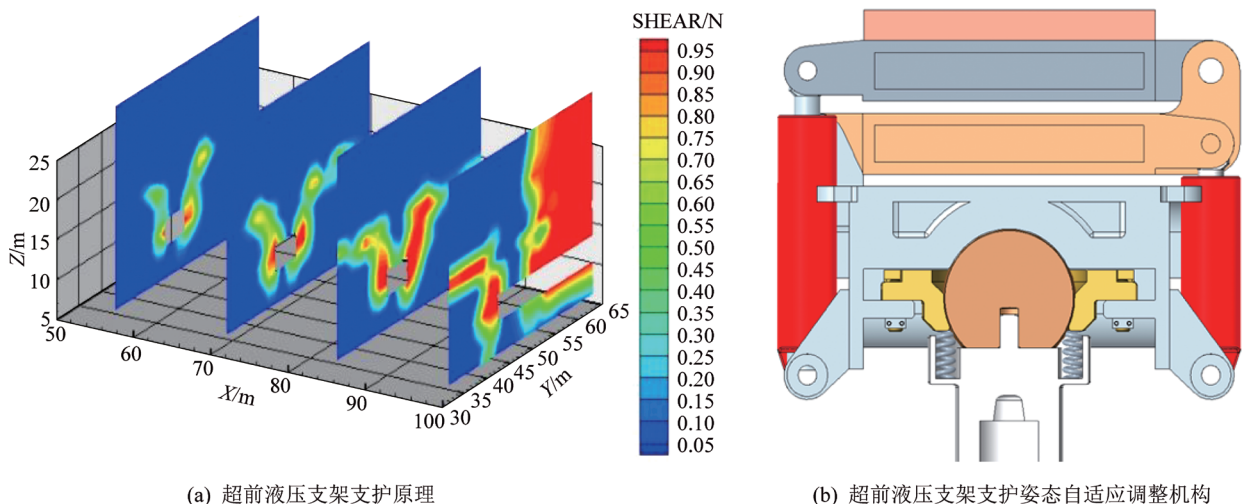


图6 超前支护原理及自适应调整机构

## 探索综采 / 放采场智能化开采理论与技术

作为国家能源局煤矿智能化专班成员，庞义辉积极参与国家相关政策、技术文件的制定，参与制定了国家能源局、国家矿山安全监察局等八部委联合发布的《关于加快煤矿智能化发展的指导意见》，以及国家能源局、国家矿山安全监察局联合印发的《煤矿智能化建设指南(2021年版)》和《智能化示范煤矿验收管理办法(试行)》；同时作为国家首批煤矿智能化专家积极走进现场作煤矿智能化建设学术报告(图8)，并参与国家智能化示范煤矿的验收(图9)，在智能化煤矿建设及验收过程中积累了大量宝贵经验。

为进一步促进煤矿智能化技术装备发展，庞义辉及其团队积极探索采场智能化开采理论与技术的研发及实践，提出了采场无接触感知方法，构建了液压支架骨架结构参数运动学模型，提出了基于千斤顶行程驱动的液压支架支护姿态、高度解析方法，开发了液压支架支护姿态与高度解析算法及软件平台(图10)，实现了液压支架支护姿态、高度的快速、精准解算；基于液压支架与围岩耦合作用原理，提出了液压支架支护状态特征参量及围岩与液压支架支护状态综合感知技术架构，建立了以液压支架与围岩适应性综合指数为核心的液压支架支护质量评价模型，实现了液压支架对采场围岩控制效果的前评价、过程评价与后评价。

提出了基于液压支架位姿-载荷变化的工作面顶板灾害监测信息特征参数，采用数据特征分解方法有效提取了液压支架载荷数据的趋势项与循环周期项，得出了工作面顶板的周期来压特征。采用多种算法对液压支架载荷监测数据进行数据建模分析，较好地实现了对液压支架载荷的单点预测及1个支护循环周期的载荷预测，对比分析了不同算法的预测效果。基于数据模型驱动的工作面顶板灾害预测如图11所示。

为提高综采/放工作面智能化开采水平，庞义辉发明了基于透明地质的煤层厚度自适应截割控制方法(ZL201910067488.2)、综放工作面智能



图7 庞义辉及其团队研发的超大采高综采/放液压支架



图8 庞义辉作煤矿智能化建设学术报告

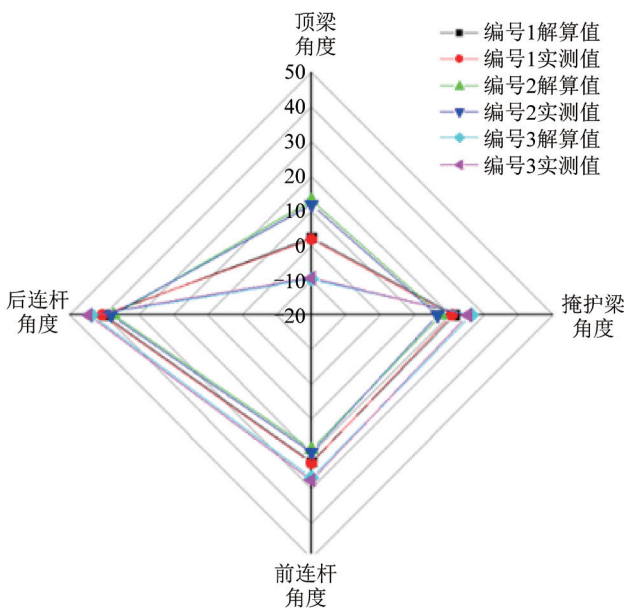


图9 庞义辉参加智能化示范煤矿现场验收



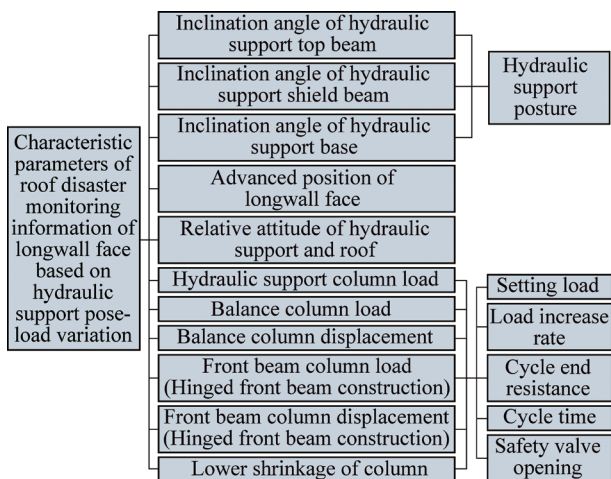


(a) 液压支架支护姿态智能解算平台界面

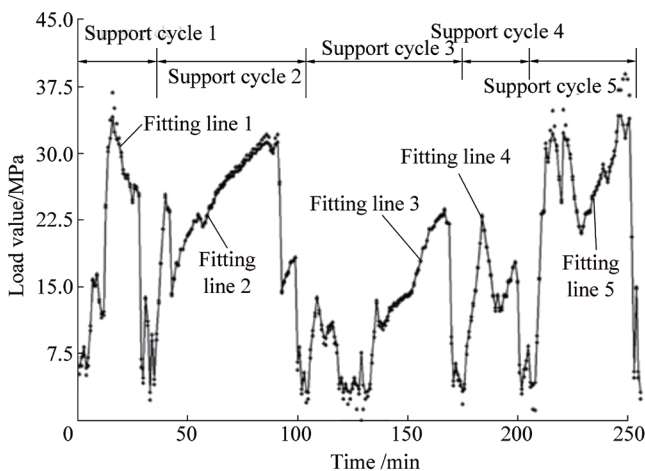


(b) 液压支架支护姿态解算结果

图10 液压支架支护姿态智能解算平台和计算结果



(a) 顶板灾害预测指标体系



(b) 液压支架载荷预测

图11 基于数据模型驱动的工作面板板灾害预测

化放煤控制方法 (ZL202010777446.0)、液压支架与刮板输送机监测方法 (ZL201910493976.X) 等, 为综采/放工作面智能化开采提供了方法与技术支撑。

当前, 我国煤矿智能化发展尚处于初级阶段, 采场围岩智能自适应支护理论与技术装备仍有很大的发展空间, 需要探索实践。庞义辉及其团队已深耕采场围岩控制理论及智能自适应支护技术装备十余载, 多年的沉淀与积累塑造了他专业的学术

素养与坚韧不拔的科研态度, 如今已成长为采场围岩控制与智能化开采领域的青年专家。凡心所向, 素履可往, 在采场围岩控制与智能化开采技术装备的研发征途中, 庞义辉已绽放出耀眼光芒, 未来, 他将带着梦想与激情, 在煤炭科技创新和服务行业高质量发展的道路上砥砺前行、勇攀高峰。

■ 责任编辑: 李金松