

# 煤矿地质保障技术现状与智能探测前景展望

程建远<sup>1</sup> 王会林<sup>2</sup>

1.中煤科工集团西安研究院有限公司; 2. 山西省煤炭地质144勘查院

## 摘要

煤矿智能化开采对煤矿地质保障技术提出了前所未有的挑战和机遇。传统的煤矿地质保障技术以煤炭资源勘查与评价、煤矿采区地质条件探测和矿井生产地质超前预测为目标任务,采用高精度三维地震、孔-巷瞬变电磁、反射槽波技术、定向钻探技术与装备等探测手段,为煤炭工业提供了大量的后备资源和可靠的技术支撑,但尚不能满足煤矿智能化、无人化开采的地质需求。煤矿智能化开采对高精度智能探测技术的需求,“倒逼”煤矿地质保障技术必须朝着从静态探测到动态探测、从主动探测到被动探测、从探掘异步到掘探同步、从人工探测到无人探测等方向转变;研发高精度智能动态探测技术与装备,开展探采地质信息的相互反馈,构建基于4D-GIS的地质透明化模型,实现三维地质模型与智能开采数据的深度融合,将成为煤矿智能化开采地质保障技术的发展趋势。

**关键词:** 煤矿地质保障; 智能化开采; 智能探测; 三维地质模型

煤田地质工作是煤炭工业的基础,它横跨了煤田勘探、井田划分、矿井设计、开拓掘进、安全回采、综合利用以至于矿井关闭等不同的开发阶段,贯穿于煤炭工业的全生命周期,是实现煤炭资源高效安全智能绿色开采的基础和前提,在我国煤炭工业健康快速发展中处于重要的基础地位。

“九五”期间煤矿地质保障系统作为煤矿高效、安全开采的关键技术之一,列入高产高效矿井建设的5大保障体系。70多年来,传统的煤田地质工作通过研究聚煤盆地、成煤构造等空间分布规律,采取先进的勘查技术手段,查明了含煤岩系、煤层及其共伴生矿产,先后开展了3次全国煤炭资源普查,为支撑我国煤炭工业的可持续发展提供了有支撑。煤矿地质工作是煤田地质勘查工作的延续,煤炭开采的机械

化、自动化、信息化、智能化、无人化以及智慧矿山建设,迫切需要超前查明开采前方地质条件的变化,它已经成为煤炭高产、高效、安全开采的关键环节之一<sup>[1-3]</sup>。随着电子技术、信息技术、装备制造技术的不断进步,煤田地质勘探与矿井地质工作出现了交叉融合的发展趋势,传统的煤田地质勘探开始走向煤矿生产地质勘探的新领域,初步形成了煤矿安全高效开采地质保障体系<sup>[4-6]</sup>。彭苏萍院士<sup>[7]</sup>对煤矿地质保障系统的内涵进行了全面诠释,他认为以地质分析预测为基础,以物探、钻探和采掘以及试验等技术为手段,依托先进的信息技术实现生产地质工作的动态管理,为矿井设计、采区布置、生产准备、采煤工作面布置到回采等各个阶段提供可靠的地质信息,只有通过系统和清楚地掌握影响煤炭开采的地质因素,才能实现煤

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2018YFC0807804, 2018YFC0807806);国家自然科学基金资助项目(42074175)

作者简介:程建远(1966—),男,陕西乾县人,研究员,博士生导师。E-mail: cjjy6608@163.com

矿的安全生产与高产高效。

随着煤矿智能开采技术的发展，袁亮院士<sup>[8]</sup>提出了煤炭精准开采的科学构想，他指出基于透明空间地球物理和多物理场耦合，最终实现开采地质条件的透明化是精准开采的必然要求；王国法院士<sup>[9]</sup>构架的煤矿智能化开采8大系统中，将基于4D-GIS的透明地质模型及动态信息系统列为实现煤矿智能化开采的关键技术之一；王双明院士<sup>[10]</sup>针对煤炭开采对生态环境损害的问题，提出了煤炭资源绿色开采地质保障技术的新理念。2020年9月25日召开的全国煤矿智能化建设现场推进会上明确提出：央企、省属企业、基础条件好的企业，要率先建成一批智能化示范矿井；冲击地压、煤与瓦斯突出等灾害严重的矿井，要尽快上智能化，力争2021年全部建成；新建、改扩建矿井，要将智能化作为项目核准的必备条件；对基础条件差、智能化开采有困难的煤矿，要逐步从机械化、自动化向智能化迈进；无法实现机械化、智能化开采的煤矿企业将陆续退出。

综上所述，煤炭资源安全高效智能绿色开采已经上升为行业共识和国家战略。煤矿地质保障技术作为煤炭工业高质量发展的关键技术，曾经为我国煤炭工业做出了巨大的贡献。在煤矿智能化开采阶段，煤矿地质保障技术又被赋予新的内涵，也迎来了新的机遇与挑战。如何构建煤矿智能开采条件下的地质保障技术体系，成为当前和今后迫切需要解决的热点问题。

## 1 煤矿地质保障技术的发展历程

新中国成立70多年来，我国的煤炭开采技术经历了从人力开采、炮采、普采、高档普采、机械化开采、综合机械化开采到自动化开采的发展阶段，正在朝着智能化、无人化、智慧化开采的方向迈进。伴随着我国煤炭开采技术的不断进步，煤炭地质保障系统的内涵与外延不断丰富和完善，迄今为止可以概括为4个发展阶段。

### 1.1 煤炭资源勘查的地质保障

1949年，我国的煤炭产量仅有0.43亿t；2013年，

全国煤炭产量达到38.5亿t；中国工程院预测：2050年煤炭在我国一次能源消费比例还将保持在50%左右。

我国国民经济健康发展对能源的需求十分强劲，煤田地质工作长期以来把为煤炭工业提供后备资源保障作为首要任务，在全国范围内先后开展了3次煤田预测、普查与评价，目前已查明埋深2 000 m以浅的煤炭资源总量5.95万亿t。1950—1985年间，煤田地质工作作为新建、基建矿井提供了大量的可靠的后备煤炭资源保障，这一阶段可以视为煤矿地质保障技术的萌芽阶段。

### 1.2 “双高矿井”建设的地质保障

“九五”期间，煤炭工业开始创建以高产高效为主要特征的“双高矿井”，随着大型综采配套设备的投入使用，矿井设计、机械化开采迫切需要超前查明煤矿采区的构造地质、水文地质、工程地质等开采条件。为了适应这一需求，1985—2000年间煤矿地质保障技术开始从以资源勘查为主导的煤田地质勘探阶段，向直接为矿井设计、“双高矿井”建设提供高质量地质资料的生产地质方向转型发展，这是煤矿地质保障技术发展的初级阶段。

### 1.3 煤矿安全高效生产地质保障

进入21世纪以来，煤矿瓦斯、水害等各类灾害事故频发，煤矿安全生产的“红线”意识不断加强，以地面高分辨率三维地震、煤矿井下槽波地震与电磁法探测技术以及受控定向钻进技术与装备为先导，煤矿地质保障工作开始全方位服务于煤矿隐蔽致灾地质因素的探查与治理，煤矿地质保障工作以服务于煤矿安全高效生产为主要目标，煤矿地质保障技术开始由单一技术手段的孤立运用，逐渐发展到地面与井下相结合、物探与钻探相结合、地质与开采相结合的一体化方向迈进，煤矿地质保障系统初步形成，进入成熟发展的阶段。

### 1.4 煤矿智能化开采的地质保障

从2014年黄陵一矿首次实现智能化开采以来，少人化、无人化、智能化开采以及智慧矿井等先进生产理念深入人心，煤炭绿色产能、智能精准开采、透明

工作面、透明矿井、绿色矿山、智慧矿山建设等逐渐成为行业发展的共识，这对煤矿地质保障系统提出了新的更高的要求。2019年1月10日，国家煤矿安监局发布了《煤矿机器人重点研发目录》，要求井下危险场所、繁重体力劳动岗位逐渐机器人化；2020年2月，《关于加快煤矿智能化发展的指导意见》颁布实施，煤炭地质保障系统迎来了以精准探测、智能探测、无人化探测为目标的新的历史发展阶段。

纵观70多年的发展历程，煤矿地质保障系统的内涵已由煤田地质资源勘查、煤矿地质保障技术向煤炭地质保障系统演进，其外延也从煤炭资源地质保障、“双高矿井”建设地质保障、高产高效地质保障、安全高效地质保障，向煤炭智能开采地质保障、绿色开采地质保障的方向发展。

## 2 煤矿地质保障技术的主要进展

煤矿地质保障系统涵盖了煤田地质、水文地质、矿井地质、地球物理勘探、钻探技术等诸多学科。近年来，以高密度全数字三维地震勘探、孔-巷瞬变电磁探测、煤矿井下槽波地震探测、大透距多频同步无线电波透视等先进的探测技术为代表，煤矿精细地质构造、煤与瓦斯突出、突水灾害隐患等探测精度和准确率不断提高，支撑了我国煤矿安全高效开采的技术进步；2019年，煤矿井下超长距离定向钻进技术与装备创造了顺煤层钻进3 353 m、孔径120 mm、中靶坐标误差小于0.15%新的世界纪录；西部矿区煤层顶板离层水害成灾机理研究取得突破，东部矿区煤层底板水害区域超前防治技术得到迅速推广<sup>[11]</sup>。这一切，标志着煤矿安全高效开采地质保障技术逐步发展成熟。

### 2.1 高精度三维地震勘探技术

2007年，中石油东方公司率先在淮南矿区丁集煤矿开展高密度全数字三维地震探测的方法研究，将煤矿采区三维地震的CDP网格从10 m×10 m加密到5 m×5 m、覆盖次数从24次提高到64次，配套先进的三维地震叠前偏移处理与全三维地震解释技术，将三维地震对小断层的分辨能力从5 m提升到3 m、对陷

落柱的解释水平从直径30 m以上提升到直径15 m以上（图1）。特别值得一提的是：利用高密度全数字三维地震勘探成果，首次清晰对地下埋深近800 m、断面尺寸3.4 m×3.4 m的采煤工作面回风、运输巷道以及开切眼实现了准确成像。丁集煤矿8个采煤工作面的回采验证结果表明：该技术对于落差2 m以上断层的探测准确率超过80%<sup>[12-13]</sup>。目前，高密度全数字三维地震勘探技术在淮南、淮北和皖北矿区得到了全面的推广应用，并在永煤、晋煤、伊泰、陕煤、神华、内蒙古、陕煤、新疆、阳煤等矿区开展了试验和示范。2014年，以“两宽一高”技术为核心，淮南张集煤矿进行了一块满覆盖面积1.6 km<sup>2</sup>、面元2.5 m×5 m的高密度全数字全方位的三维地震试验，地质效果得到进一步提升<sup>[14]</sup>。

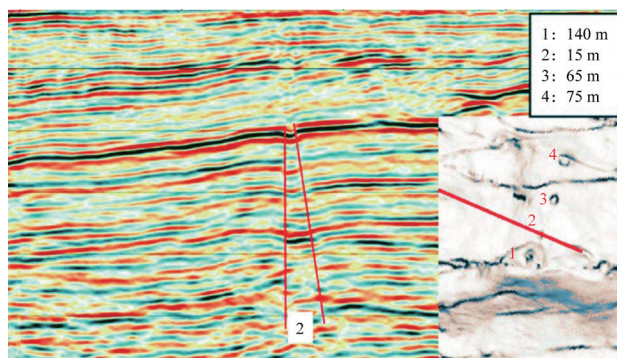


图1 直径15 m陷落柱的高密度全数字三维地震解释

据不完全统计：2009—2019年，中煤科工集团西安研究院有限公司、东方地球物理公司、中国煤炭地质总局物探研究院三家单位先后完成的煤矿采区高密度全数字三维地震勘探项目，控制面积约420 km<sup>2</sup>。高密度全数字三维地震不但在查明煤层中发育的小断层、采空区、陷落柱、岩浆岩侵入等方面效果显著，而且在查明煤层顶板薄层砂岩、底板奥灰含水层方面初显成效，有望为今后透明矿井三维建模、区域超前治理工作、煤层气开发等提供地质依据。淮南矿区常规三维地震、高密度全数字三维地震的成功实践，成为我国煤矿采区三维地震发展历程中的2次标志性技术进步，初现了煤矿高精度三维地震勘探第4次技术



进步的萌芽!

## 2.2 孔-巷瞬变电磁探测技术

“十二五”期间,煤矿井下瞬变电磁探测技术以其对低阻体反应较灵敏、体积效应小、定向性强、方便快捷等突出优势,成为煤矿井下含水异常区探测的主流技术,并得到推广应用。大量的探采对比实践表明:由于煤矿井下瞬变电磁的发射天线难以实现定向发射,导致所接收的二次感应场是来自全空间的叠加场,因此该方法受掘进机、装载机、破碎机、钻机、锚杆、锚网、铁轨等干扰严重,导致探测结果的多解性强、误报率偏高;另一方面,由于煤矿井下既非半空间亦非全空间的特殊探测环境,半空间条件下成熟的瞬变电磁视电阻率计算公式和时-深转换方法在煤矿井下难以适用,造成了井下瞬变电磁探测的视电阻率过小、深度转换误差偏大以及巷道空腔造成的假异常等问题屡屡出现,降低了探采对比的验证率。因此,2018年8月1日新颁的《煤矿防治水细则》第三十六条明确规定:采用电法实施掘进工作面超前探测的,探测环境应当符合“距探测点20 m范围内不得有积水,且不得存放掘进机、铁轨、输送带机架、锚网、锚杆等金属物体;巷道内动力电缆、大型机电设备必须停电”等要求。可见,煤矿井下瞬变电磁探测的施工环境要求与井下掘进空间的环境条件是不完全适应的<sup>[15]</sup>。

2015年,中煤科工集团西安研究院范涛博士带领研发团队等开展了孔-巷联合瞬变电磁探测技术与装备的研发,通过采用大功率发射电磁波以压制背景噪声,在巷道发射电磁波形成一次场、在钻孔中接收断电后的二次感应场,取得了较好的应用效果<sup>[16]</sup>。孔-巷瞬变电磁技术具有如下优点:①在钻孔中接收瞬变电磁的二次纯异常场,有效躲避了掘进巷道迎头及四周采掘机械铁磁性物质的干扰,减少了假异常;②在孔中接收来自钻孔径向30~50 m范围内的二次纯异常场,接收点距离低阻异常近、二次场的弱信号衰减减小,异常反映强;③在钻孔中可以按一定间距在多点接收二次感应场,通过数据处理手段实现二次场信

号的多次叠加,达到增强信号、压制干扰的目的;④孔中三分量瞬变电磁探测可以准确定位异常的深度和方位,克服了常规瞬变电磁探测深度不准、方位不明等难题。大量的生产实践表明:煤矿井下孔-巷瞬变电磁探测技术与装备提高了瞬变电磁探测的准确性(图2)。

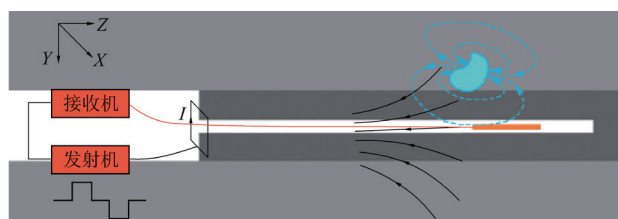


图2 孔-巷瞬变电磁探测示意

## 2.3 煤矿井下反射槽波探测技术

2010年以前,我国煤矿井下槽波地震勘探的仪器装备与处理软件全部被国外公司所垄断。2013年,中煤科工集团西安研究院物探研发中心首次开发出了具有自主知识产权的节点式槽波地震仪器和配套的透射槽波处理软件,打破了国外长期的技术垄断,并实现了弯道超车;首次创新性地利用透射槽波Z分量实现了采煤工作面内部断层、陷落柱、煤厚变化等超前探测,为工作面的安全高效回采提供了可靠的地质保障<sup>[17]</sup>。“十三五”期间,晋煤集团、阳煤集团、淮北矿业、焦作矿业等煤炭企业,已将工作面采前槽波地震探测列入企业技术标准,开展煤矿井下透射槽波技术与装备的工程应用<sup>[18]</sup>;2016年颁布的《煤矿安全规程》、2018年新版《煤矿防治水细则》等将槽波地震探测技术列为先进适用的推荐技术。

据不完全统计,煤矿安全生产事故大多数发生在掘进工作面,以水害事故和瓦斯事故居多,其中小断层是主要诱因,如何超前查明掘进工作面前方地质构造成为急需解决的技术难题。2018年,中煤科工集团西安研究院物探研发中心率先攻克了煤矿井下反射槽波地震探测的技术难题,成果达到了国际领先水平。在阳煤集团、宁煤集团、晋煤集团、晋能集团等地大量的探采对比结果表明:煤矿井下反射槽波超前探测技术可以实现沿煤层单条巷道前方、侧帮200~300 m范围内的小断层、陷落柱、老窑巷道等精细探测,其

探测准确率高于80%，显示出良好的推广应用前景，成为“十三五”期间矿井物探技术进步的一大“亮点”。

## 2.4 大透距多频同步无线电波透视技术

煤矿井下无线电波透视已有30多年的发展历史，其在探测工作面内的陷落柱、断层、破碎带、冲刷带、煤厚变薄带等地质异常体上发挥了重要作用，该技术以其准确率较高、穿透距离大、操作简单、成果直观等优势，在我国煤矿井下回采工作面的地质条件探测中得到广泛应用。但是，以往的煤矿井下无线电波探测主要采用单频多点为主的方式进行探测；如果采用多频无线电波透视，其探测时间、工作量成倍增加，在一定程度上影响了该技术效能的发挥<sup>[19]</sup>。

“十三五”期间，中煤科工集团重庆研究院研发出新一代无线电波透视多频同步探测技术及装备，可实现多种探测频率同步发射接收。由于低频率具有较强的穿透能力和信号稳定性，而高频率具有较高的灵敏度和分辨率，因此多频探测可以兼顾两者的优势，有效提升了探测精度和准确性，同时节省大量时间和工作量。2019年，吴燕青等研发的大透距多频同步无线电波透视技术与装备，获得煤炭工业科学技术一等奖。

## 2.5 煤矿井下长距离定向钻进技术与装备

历经多年的科技攻关，我国煤矿井下近水平定向钻进技术与装备打破了国外的技术垄断，形成了独具特色的系列化技术与装备，成为煤矿井下地质构造超前探查、隐蔽水害探查与治理、瓦斯抽采、冲击地压防治、应急救援、粉尘防控等方面的核心技术支撑，为煤矿安全高效开采提供了可靠的地质保障。

### 1) 煤矿井下定向钻进技术与装备形成系列化。

2007年，中煤科工集团西安研究院成功研制出国内第1台煤矿井下定向钻机，目前已经形成系列化产品，可以满足各种不同的地质需求。例如：煤矿井下定向钻机的转矩达到4 000~20 000 N·m，机身宽度在0.85~2.00 m，钻进深度达到3 353 m，钻孔口径94~300 mm，信号传输支持有线通缆、泥浆脉冲和电磁波无线传输等制式，行走方式满足履带运输、胶轮

运输的要求；孔底定向螺杆马达的驱动介质可以是泥浆和空气介质；配套钻具可以是外平、三棱、螺旋和其他异型钻杆；适应普氏系数0.3以上的地层；钻进方式同时满足滑动钻进、回转钻进和复合钻进等各种需求。目前，我国煤矿井下随钻测量定向钻进技术及装备已经形成了系列化的技术与装备<sup>[20]</sup>。

### 2) 煤矿井下定向钻进深度的最深纪录不断刷新。

2003年，国内引进的澳大利亚VLD1000定向钻进装备在中硬煤层顺层定向钻进的深度最大达到1 002 m，钻孔终孔孔径94 mm；2017年澳大利亚Metropolitan煤矿采用滑动定向钻进技术，完成了钻孔深度2 151 m的定向钻孔。2007年，中煤科工集团西安研究院研制出国内首台具有自主知识产权的煤矿井下定向钻进装备，2008年在陕西亭南煤矿成功钻进1 046 m，钻孔终孔孔径98 mm；2014年，国产定向钻机在寺河矿成功施工主孔孔深1 881 m的水平定向孔，终孔孔径120 mm；2017年，在保德煤矿施工钻孔最大深度达到2 311 m、终孔孔径120 mm，打破了澳大利亚Metropolitan煤矿顺煤层定向钻孔最大孔深2 151 m、终孔孔径99 mm的世界纪录；2019年，中煤科工集团西安研究院在保德煤矿完成了主孔深度3 353 m、钻孔孔径120 mm的顺煤层超长定向钻孔，钻孔日平均进尺达到200 m，再次刷新了煤矿井下顺煤层定向钻进深度的世界纪录，引领了煤矿井下定向钻进技术与装备的技术进步，实现了煤矿井下瓦斯抽采由巷道抽采、采面抽采到盘区预抽的跨越，为今后煤矿井下区域超前瓦斯抽采提供了技术与装备的地质保障<sup>[21]</sup>。

### 3) 煤矿井下定向钻探技术应用领域不断扩大。

煤矿井下近水平随钻测量定向钻进技术与装备以其钻进效率高、钻孔深度大、钻孔轨迹可控以及一孔多分支等独特优点，已在我国煤炭企业得到了广泛的推广应用。

目前，煤矿井下定向钻进技术与装备的应用领域不断扩大，从以往的煤矿井下地质构造超前探查、隐蔽水害探查与治理、瓦斯消突、煤层气抽采等方面的应用，逐步扩展到煤矿井下冲击地压防治、应急救援、粉尘防控、防灭火等新的领域。

## 2.6 煤矿水害隐患探查与防治技术

“十二五”期间，煤矿采空区透水事故成为主要的水害类型，几乎占到煤矿水害事故起数和死亡人数的80%以上；“十三五”期间，晋、陕、蒙、宁、新、甘等省区煤炭企业的开采规模逐年增大，千万吨矿井不断涌现，出现了以煤层顶板“离层水”、薄基岩突水溃沙、厚砂砾岩含水层顶板水害等新的水害类型<sup>[22]</sup>；同时，我国东部矿区随着开采深度的不断加大，采深超过1 000 m矿井达到60余座，煤层底板高承压灰岩岩溶水隐患不断增加。煤矿水害新出现的类型与特点，催生了煤矿防治水技术的不断创新。

### 1) 煤矿顶板砂岩水超前治理技术。

随着采煤工作面的不断推采，上覆岩体的应力平衡状态被打破，采空区上覆岩层内应力重新分布，以达到新的平衡。煤矿在开采过程中，上覆岩层发生断裂、垮落、弯曲和下沉的运动速率并不完全一致，导致岩层在垂直方向的位移差形成“离层”空间，“离层”在满足相对封闭的底界条件时，不断接受周边含水层或水体的横向或垂向补给，从而形成离层水，给西部矿区煤炭资源安全高效开采带来了很大的隐患<sup>[23]</sup>。

“离层突水”作为一种新的煤矿突水类型，打破了传统意义上的顶板水防治理念。

“十三五”期间，通过大量的理论探索，结合顶板水害的案例剖析，中煤科工集团西安研究院揭示了煤层顶板离层水害的成灾机理，创造性地提出了基于定向钻孔的顶板水超前疏放技术，在工作面回采前可以控制性地探放顶板砂岩水，减缓了煤层开采后顶板来水的压力；同时，研发出了“离层水”的地面与井下超前疏放技术，这一成果已经在蒙、陕、宁等地取得了明显的效果<sup>[24]</sup>。

### 2) 煤矿底板承压水区域超前治理技术。

随着浅部煤炭资源趋于枯竭，我国东部煤矿普遍进入深部开采区域，面临着高水压、高瓦斯、高地温、地质条件复杂等技术难题。东部矿区煤炭开采面临的主要水害类型为煤层底板高承压灰岩岩溶水害，一些矿井由于揭露隐伏陷落柱导致了突水淹井事故，

如皖北的任楼煤矿、徐州的张集煤矿、邢台的东庞煤矿、峰峰的梧桐庄煤矿等<sup>[25-26]</sup>。以往煤层底板奥灰水防治的主要技术途径是在煤矿井下巷道开展煤层底板注浆改造，这在煤层底板水压不高于4 MPa的情况下具备可行性；当煤层底板承压水的水头压力高于4 MPa时，在煤矿井下煤层底板进行钻探注浆改造时，治理过程本身的安全性都难以保障，更何况传统的“纳鞋底”式注浆方法还存在着注浆工作量大、注浆盲区大、有效注浆段短等弊端。因此，煤层底板高承压水突水隐患超前治理，成为煤层底板岩溶水害防治的难点。

2015年以来，冀中能源集团率先利用地面定向钻进技术超前施工定向钻孔，开展煤层底板薄层灰岩含水层的注浆改造、相对弱隔水层的加固补强等大胆尝试与工程实践，成功实现了多个受煤层底板水害威胁严重工作面的安全回采，初步形成了区域治理的理念，这一成功经验在《煤矿防治水细则》得到采纳。煤层底板水害区域超前治理技术实现了由采前被动防守到掘前主动出击、由局部治理到区域治理的重大转变，进而实现了从采面超前防治水到采区超前防治水的技术转变，大幅提升了煤矿水害超前防治的能力，解放了大量受奥灰水害威胁的呆滞煤炭资源。随着地面定向钻进、钻孔径向高压水射流和煤矿井下定向钻进技术的日臻成熟，煤矿底板水害区域超前治理技术，基本消除了东部矿区深部开采底板高承压灰岩水的威胁，已在冀中能源、淮北、皖北、淮南、新集、焦作及山能集团等得到推广应用，取得了很好的防治水效果<sup>[27-29]</sup>。

## 3 煤矿智能开采地质保障的技术难题

改革开放40多年来，我国国民经济快速发展对能源的需求推动了煤炭工业的技术进步，煤矿安全高效开采的地质需求催生了煤矿地质保障系统的升级换代。随着工业化和信息化技术的深度融合，煤炭工业已经迎来了智能化开采的新时代，这给煤矿地质保障系统带来了新的机遇与挑战。应该清醒地看到：尽管过去的70多年时间里，煤矿地质保障技术取得了一



些显著的技术进步,但是与煤矿智能化开采的地质需求相比仍存在着很大的差距<sup>[30-31]</sup>。围绕煤矿智能化开采对地质条件精准探测、三维地质透明化的需求,现有的地质保障技术手段尚存在以下问题:一是探测精度明显不足;二是不同技术手段处于“单兵作战”层次,协同能力欠缺;三是作业模式局限于地质条件的“静态探测”,对于煤矿开采动力地质灾害的探测、监测、检测、预警等缺少应对措施;四是煤矿智能化开采已经实现了“少人化”,终将趋于“无人化”,而地质工作仍处于依靠人工作业、凭借经验解释推断的低级层次等。具体表现在以下4个方面。

### 3.1 采煤工作面地质透明化精度偏低

2019年,全国已有200多个智能化开采工作面投入运行。受煤矿开采地质条件查明程度不足的制约,我国煤炭智能化开采尚有以下问题未能很好解决:一是现有智能化开采对地质条件的适应性不足,虽然实现了以“远程视频监控、采煤机记忆截割”为主要特征的智能化开采,但是由于煤岩自动识别技术尚未解决,智能化开采尚不能灵活适应在地质构造复杂、煤层厚度变化大等复杂条件;二是智能化开采设备的稳定性、可靠性有待进一步提高,如在采煤工作面复杂工况环境下高精度传感器的抗震性、精度等偏低;三是对于智能化开采的系统性考虑不足,一些煤矿领导认为只要购买、安装了智能化开采的机械设备“硬件”,就能够实现智能化开采,忽视了智能化开采系统工程中透明工作面三维地质建模等“软件”的作用。

实际上,煤矿要实现真正的智能化、少人化开采,最终建成无人化的智慧煤矿,除了煤矿大型采掘设备的高度自动化、智能化外,实现智能开采工作面的优选、掘进工作面、采煤工作面前方的地质透明化和高精度三维地质动态建模以至于构建透明矿井,是下一步急需研究解决的技术难题。

### 3.2 掘进工作面前方智能化随掘随探

我国煤矿井下每年掘进巷道长度约12 000 km。与采煤工作面的自动化、智能化发展水平相比,掘进工作面存在设备多(如掘进机、转载机、破碎机、输

送带、钻机等)、工序繁(如探测、掘进、支护、运输等)、推进慢(如大多数煤矿煤巷掘进效率不足10 m/d)等问题,致使井下掘进头多、用人多、事故多<sup>[32]</sup>。从煤矿地质保障的角度来看,如果能够从时间、空间上实现掘进与探测的“平行作业”,将煤矿“三班倒”中的地质探测从需要停掘探测,上升为掘进同步超前探测,可为快速掘进赢得宝贵的时间。因此,今后应该研发煤矿井下掘进与探测“平行作业”的探测技术与装备,在掘进与探测工序互不干扰、探测结果与掘进设计互为反馈的前提下,通过超前构建掘进前方三维地质透明化模型,预先优化巷道掘进的施工设计,才能保障煤矿井下掘进工作面的高效快速智能掘进。

### 3.3 智能化超前探测、监测与预警技术

目前,煤矿井下“采煤、掘进、机电、运输、通风、排水”(简称采、掘、机、运、通、排)六大系统建设的智能化、无人化进程明显加快。“采”,已经初步实现少人化、无人化;“掘”,已在少数矿井进行少人化、无人化智能掘进的试验和示范;“机”,已具备实现远程无人操控的充要条件;“运”,通过引入输送带运行状态巡检机器人,可以实现无人化;“通”,正在开展通风网络的节点化管理,逐步实现智能通风;“排”,在采区水仓、中央泵房实现了自动排水。相对而言,煤矿地质工作还远远没有摆脱依靠人工作业、人工解释的局面,与智能化、无人化的需求相去甚远,已经成为制约煤矿智能化开采向更高水平发展的瓶颈问题。

随着大数据、云计算、人工智能、信息技术、先进传感器技术等相关学科的快速发展,机器人智能巡检、井下5G通信、工业物联网等新技术正在与传统的煤炭开采业实现跨界融合。为了适应未来煤矿开采少人化、无人化、智能化开采的发展要求,急需研发“互联网+”、“5G+”、“机器人+”条件下高精度、智能化的探测技术与装备。

### 3.4 绿色开采倒逼地质保障技术进步

70多年来,煤矿开采先后由炮采、普采、高档普

采,发展到综合机械化开采、综放开采、智能化开采等发展阶段,先后经历了由“粗放开采”向“集约开采”的开采模式,“科学开采”、“绿色开采”的先进理念正在形成,煤矿智能开采、绿色开采已成为今后煤炭工业转型升级高质量发展的必然趋势<sup>[33]</sup>。以神东、淮南、阳煤、新矿集团等为代表,煤矿巷道掘进方式正在从炮掘、机掘、综掘向盾构掘进技术发展;煤矿开采正在从综采、综放向限高开采、条带开采、充填开采、保水采煤等煤矿绿色开采技术方向发展,谢和平院士<sup>[34-35]</sup>提出的煤炭地下流态化开采技术正在加快研发等。煤炭绿色开采技术的快速发展,给煤矿地质保障技术提出了新的课题!

#### 4 煤矿智能开采地质保障的发展方向

煤矿智能化开采对地质保障技术提出了前所未有的新挑战,也提供了转型升级的新机遇,“倒逼”煤矿地质保障技术必须加大创新超越的步伐,加速从以往的煤炭资源勘查向矿井生产地质转变、从以往的人工静态探测向智能动态探测转变、从以往的探掘异步向掘探同步协同转变等,这也是今后煤矿智能开采地质保障的发展趋势。唯有如此,煤矿地质保障技术才能真正融入到煤矿安全、高效、绿色、智能开采发展的大趋势中。

##### 4.1 煤矿井下钻探物探协同探测

目前,煤矿智能化开采正在加速示范与推广,整体而言尚处于初级阶段,大多数煤矿仍以安全高效开采为重点,其面临的主要问题是高效掘进与低效探测之间的矛盾、钻探与物探分离的矛盾等,这就需要加快传统煤矿地质保障技术的转型升级。

在煤矿地质保障系统的探测技术手段中,钻探技术是煤矿井下探测精度最高的技术手段,尤其是定向钻探技术,其不足表现在成本相对较高、探测范围较小、“一孔之见”等;物探技术具有全方位快速探测等优势,但是随着探测距离的增加,探测精度相应降低,且单一物探手段的探测结果具有多解性。因此,如果能够借鉴石油行业“一趟钻”的理念<sup>[36]</sup>,让钻孔

在发挥原有的探放水、瓦斯抽采、地质探查等功能的基础上,通过单个钻孔孔内、钻孔-钻孔之间物探技术与装备的研发,利用钻孔孔内物探仪器实现对钻孔径向一定范围内的地质构造、煤层顶底板起伏、煤层厚度、煤岩界面、低阻异常区等综合探测,利用钻孔-钻孔之间的物探技术与装备实现探测、监测与检测等综合效能,就能把钻探、物探手段有机地融合起来,发挥“一孔多用”,形成钻探、物探的“两探”融合,充分发挥物探与钻探优势互补的作用,真正将“一个钻孔就是一项工程”落到实处。

例如:某矿掘进巷道设计前,按照瓦斯超前预抽和探放水设计的要求,沿煤层顶板开展顺层定向长钻孔施工,以实现瓦斯抽采、探放水的功能;为了充分发挥顶板定向长钻孔的作用,在主孔钻进的同时施工顶板梳状孔、前进式开分支,每50 m开分支向下探测煤层的顶板与底板,开展对煤层起伏、煤层厚度、小构造、陷落柱等综合探测;同时,利用钻孔瞬变电磁探测钻孔径向30 m范围内的含(导)水低阻异常,利用钻孔伽马测井准确判定煤岩分界面,利用钻孔地质雷达探测小断层与陷落柱等。通过钻探与物探一体化的技术手段,开展瓦斯、水患、煤层形态、煤层厚度以及地质构造等“五位一体”探测,成功实现了煤矿灾害防治与地质探测相互融合、钻探与物探的一体化协同探测(图3)。

##### 4.2 煤矿井下随掘智能超前探测

2019年1月10日,国家煤矿安监局发布了《煤矿机器人重点研发目录》,主要包括掘进、采煤、运输、安控和救援等5类38种煤矿机器人,其中采煤工作面机器人、钻锚机器人、选矸机器人和巡检机器人已在一些煤矿开始试用。煤炭开采的智能化、无人化对煤矿智能探测技术的研发形成倒逼态势,即未来的煤矿地质保障系统也应该朝着少人化、无人化、机器人化、智能化的方向发展。

传统的煤矿地质保障技术与装备主要依靠人工操作、主动激发的方式建立待测物理量的初始地球物理场(如弹性波场、电场、磁场、放射性等),通过专



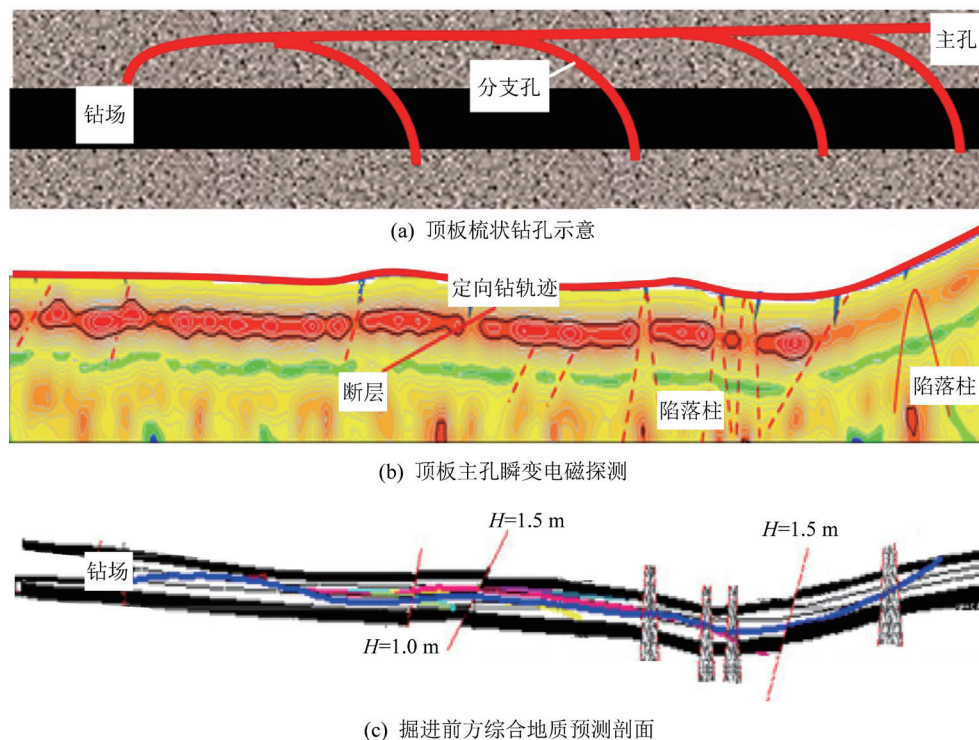


图3 掘进工作面前方向钻探与钻孔物探一体化探测示意

用仪器设备测量人工场的空间变化及其分布,反演地下煤岩层的结构和构造等。今后煤矿智能探测技术与装备的开发,其地球物理场的建立可以立足于3个方面:一是研发自动化、智能化建立地球物理场的设备,如地面激发、井下接收的仪器,也可以进行远程遥控激发建场以及采用工业机器人取代人工操控等;二是应该大量采用基于被动源的地球物理新技术,如利用采掘机械振动、压裂作业诱发的岩石破裂等,代替人工打眼放炮的方式开展弹性波探测,利用采矿、钻探活动产生的微震及其裂隙场、应力场进行观测实现构造探测,还可以将煤矿井下大型机电设备开停、运转诱发的次生电磁场等开展水害隐患探测;三是充分发挥天然场无源探测的优势,对大地电场、自然伽马、地温场、应力场等进行监测,以实现地质探测的目标。

目前,科工集团西安研究院物探研发团队已经成功研发出煤矿井下随掘智能动态探测、随采智能实时探测的技术与装备,并在金彩黔公司、乌海能源、阳

煤集团等开展了试验、示范和推广应用<sup>[37]</sup>。以智能探测、智能导航和智能控制技术为核心,未来的煤矿智能化开采必将迎来无人化智能探测的新纪元!

#### 4.3 煤矿动力灾害智能监测预警

目前,煤矿智能化开采技术的研究热点,主要集中在煤矿采掘设备的高度自动化和集控中心的远程操控等方面,对于煤矿地质保障的技术需求侧重于采煤工作面的地质透明化,其重心在于高精度查明采煤工作面内部影响回采的地质构造,如断层、陷落柱、煤厚变化等。实际上,煤层与其顶底板形成了一个“汉堡包式”的三层结构,煤矿智能化开采不但要关注煤层自身的赋存条件变化,同时还应清楚掌握煤炭开采过程中的动力地质灾害<sup>[38-39]</sup>。

煤矿动力地质灾害包括开采活动诱发的冲击地压、煤与瓦斯突出、突水、断层或陷落柱活化、冒顶等,这些因素是影响煤炭资源安全高效智能化开采的隐蔽致灾地质因素。由于煤矿井下开采扰动造成了原始应力平衡状态被打破、应力场重新分布,在“应力

平衡—应力失衡—应力重新分布—应力动态平衡”的过程中，有可能出现局部地段的应力异常集中或突然卸载等现象，进而诱发煤与瓦斯异常突出、冲击地压、断层或陷落柱突水等。

围绕煤矿开采过程中动力地质灾害的探测、监测、预测、预警问题，目前已经发展出微震监测、地音监测、应力在线监测、静电场在线监测等成套的技术与装备。但是，由于上述动力地质灾害的发生，不但与地质条件密切相关，也与推采速度、开采高度、采煤方法、支护条件等密不可分，对于其萌生、发展、贯通以至于最终导致岩石破裂失稳的机理尚不清楚，只有在大量的理论研究、试验模拟等基础研究的基础上，通过开展大量的现场多物理场监测预警，才有可能早日取得突破，使得煤矿开采动力地质灾害的防治于萌芽状态。

#### 4.4 透明矿井三维地质动态建模

煤矿采掘活动在时间上和空间上是一个动态历经的过程，对采掘地质条件的认识也是一个不断修正、逐步深化的认识过程。因此，只有采用先进的探测技术手段，结合采掘工程的实践，通过实践、认识、再实践、再认识的往复过程，动态构建矿井三维地质模型，才能逐级、渐次趋于矿井地质透明化的终极目标。

在矿井多元地质信息集成分析的基础上，基于云计算、大数据分析和人工智能等先进的技术手段，实

现多源异构海量地质数据的智能解译，建立矿井地测大数据共享服务平台，构建高精度的三维动态地质模型；在此基础上，开展三维动态地质模型与煤矿生产决策系统实时互馈和动态刷新，构建基于4D-GIS的三维地质透明化模型和虚拟仿真数字孪生系统，形成记忆截割曲线和规划截割“模板”；结合惯性导航精准定位技术，实现智能工作面开采全过程的动态协同管控，这一思路和做法有可能成为未来煤矿智能开采与地质保障深度融合的技术途径<sup>[40]</sup>。

## 5 结语

随着我国煤矿智能化开采技术的蓬勃发展，传统的煤矿地质保障技术遇到了前所未有的机遇和挑战。煤炭资源智能化开采理念、方式、方法、技术与装备的快速进步，“倒逼”煤矿地质保障技术与装备必须加快升级换代的步伐。

煤矿井下随掘随采智能化动态探测、采掘工作面三维地质透明化建模等将成为煤矿地质保障技术新的发展方向，随着大数据、云计算、人工智能、5G通信、物联网、智能材料等高新技术与煤炭工业的深度融合，煤矿地质保障技术必将迎来智能化、无人化、精准探测与监测预警的新时代。

■ 责任编辑：王晓珍





## 参考文献

- [1] 潘振武. 发展中的中国煤田地质学[J]. 煤田地质与勘探, 2003, 31(6): 1-5.
- [2] 张泓, 张群, 曹代勇, 等. 中国煤田地质学的现状与发展战略[J]. 地球科学进展, 2010, 25(4): 343-352.
- [3] 张群. 煤田地质勘探与矿井地质保障技术[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- [4] 夏玉成. 论高产高效工作面地质保障系统[J]. 中国煤田地质, 1997, 9(S1): 33-36.
- [5] 彭苏萍. 中国煤矿高产高效矿井地质保障系统[J]. 河北煤炭, 1999(S0): 1-4.
- [6] 韩德馨, 彭苏萍. 我国煤矿高产高效矿井地质保障系统研究回顾及发展构想[J]. 中国煤炭, 2002, 28(2): 5-9.
- [7] 彭苏萍. 我国煤矿安全高效开采地质保障系统研究现状及展望[J]. 煤炭学报, 2020, 45(7): 2331-2345.
- [8] 袁亮. 煤炭精准开采科学构想[J]. 煤炭学报, 2017, 42(1): 1-7.
- [9] 王国法, 刘峰, 孟祥军, 等. 煤矿智能化(初级阶段)研究与实践[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(8): 1-35.
- [10] 王双明, 孙强, 乔军伟, 等. 论煤炭绿色开采的地质保障[J]. 煤炭学报, 2020, 45(1): 8-15.
- [11] 郑士田. 地面定向钻进技术在煤矿陷落柱突水防治中的应用[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(7): 229-233.
- [12] 杨臣明. 全数字高密度煤矿采区三维地震技术研究与实践[J]. 中国煤炭地质, 2014, 26(3): 46-52.
- [13] 方良才, 赵伟, 徐翀. 淮南煤田三维地震勘探技术应用进展[J]. 中国煤炭地质, 2010, 22(8): 73-82.
- [14] 张建军, 徐礼贵, 黄元溢, 等. 一次高密度全方位煤矿三维地震采集探索[C]// 中国石油学会 2015 年物探技术研讨会论文集, 2015: 147-150.
- [15] 范涛. 矿井巷道-钻孔瞬变电磁二维拟地震反演方法及应用[J]. 煤炭学报, 2019, 44(6): 1804-1816.
- [16] 范涛. 孔巷瞬变电磁动源定接收方法探测采空区试验[J]. 煤炭学报, 2017, 42(12): 3229-3238.
- [17] 程建远, 江浩, 姬广忠, 等. 基于节点式地震仪的煤矿井下槽波地震勘探技术[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(2): 25-28.
- [18] 王康, 姚小帅, 廉洁, 等. 槽波地震勘探技术在煤矿灾害探测中的适用性研究[J]. 煤炭技术, 2017, 36(4): 128-130.
- [19] 段天柱. 多频无线电波透视探测技术在煤层冲刷带探测中的应用[J]. 煤矿安全, 2019, 50(5): 146-149.
- [20] 姚克, 田宏亮, 姚宁平, 等. 煤矿井下钻探装备技术现状及展望[J]. 煤田地质与勘探, 2019, 47(1): 1-5.
- [21] 石智军, 董书宁, 杨俊哲, 等. 煤矿井下 3000m 顺煤层定向钻孔钻进关键技术[J]. 煤田地质与勘探, 2019, 47(6): 1-7.
- [22] 曹海东. 煤层顶板次生离层水体透水机理及防治技术[J]. 煤田地质与勘探, 2017, 45(6): 90-95.
- [23] 吕玉广, 肖庆华, 韩港. 软岩矿区顶板弱含水层高强度携沙突水机理研究[J]. 煤矿安全, 2019, 50(1): 38-43.
- [24] 吕玉广, 肖庆华, 程久龙. 弱富水软岩-沙混合型突水机制与防治技术: 以上海庙矿区为例[J]. 煤炭学报, 2019, 44(10): 3154-3163.
- [25] 段中稳. 任楼煤矿隐伏导水陷落柱的快速判识与探查[J]. 西安科技大学学报, 2004, 24(3): 268-271.
- [26] 赵庆彪, 程建远, 杜再申, 等. 东庞矿突水陷落柱综合探查技术[J]. 煤炭科学技术, 2008, 36(8): 96-100.
- [27] 刘再斌. 基于孔型组合的煤矿水害区域治理模式研究[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(7): 184-189.
- [28] 张党育. 深部开采矿井水害区域治理关键技术研究及发展[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(8): 8-12.
- [29] 赵庆彪, 赵兵文, 付永刚, 等. 大采深矿井地面区域治理奥灰水害关键技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(8): 14-20.
- [30] 袁亮, 张平松. 煤炭精准开采地质保障技术的发展现状及展望[J]. 煤炭学报, 2019, 44(8): 2277-2284.
- [31] 程建远, 朱梦博, 王云宏, 等. 煤炭智能精准开采工作面地质模型梯级构建及其关键技术[J]. 煤炭学报, 2019, 44(8): 2285-2295.
- [32] 康红普, 徐刚, 王彪, 等. 我国煤炭开采与岩层控制技术发展 40a 及展望[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2019, 1(2): 7-39.
- [33] 范立民, 马雄德, 蒋泽泉, 等. 保水采煤研究 30 年回顾与展望[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(7): 1-30.
- [34] 谢和平, 高峰, 鞠杨, 等. 深地煤炭资源流态化开采理论及技术构想[J]. 煤炭学报, 2017, 42(3): 547-556.
- [35] 谢和平, 高峰, 鞠杨, 等. 深地科学领域的若干颠覆性技术构想和研究方向[J]. 工程科学与技术, 2017, 49(1): 1-8.
- [36] 刘克强. “一趟钻”关键工具技术现状及发展展望[J]. 石油机械, 2019, 47(11): 13-18.
- [37] 程建远, 覃思, 陆斌, 等. 煤矿井下随采地震探测技术发展综述[J]. 煤田地质与勘探, 2019, 47(3): 1-9.
- [38] 程建远, 金丹, 覃思. 煤矿地质保障中地球物理探测技术面临的挑战[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(9): 112-116.
- [39] 张平松, 许时昂, 郭立全, 等. 采场围岩变形与破坏监测技术研究进展及展望[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(3): 14-35.