

丛 书 序

智慧矿山建设是实现矿业可持续高质量发展、保障矿产资源稳定供给的基础，是矿业创新发展的必由之路。能源和矿产资源是国家安全的基石，是社会繁荣发展的基础产业。

世界能源中化石能源仍占约 80%，我国能源结构呈现以煤为主体，煤、油气、非化石能源“三足鼎立”格局，2025 年，我国煤炭产量占一次能源产量的 67.7%，消费量占能源消费总量的比重约为 51.4%；2025 年，我国油气产量双创历史新高，但仍高度依赖进口，原油对外依存度约为 72.8%，天然气对外依存度为 40%。俄乌和中东战争延宕，引爆能源“结构性断供”，全球能源格局正在从“经济、低碳优先”转向“安全、可靠优先”，各国不再追求激进地去化石能源时间表，而是在确保能源安全、可靠的前提下稳步推进。

2025 年中国发电量约 10.4 万亿千瓦时，其中火电 6.33 万亿千瓦时，煤电占火电发电量约 90%。煤电大幅度平抑了终端电价，支撑和保障了我国社会经济发展基础和价格体系的稳固，是国家能源安全无以替代的“压舱石”。

地缘政治冲突重塑矿产资源控制与分配格局，关键矿产安全保障已成为全球矿业战略竞争的核心，矿产资源支撑了国家经济稳定发展。我国以占全球 7%的资源禀赋，使用了全球约 32%的矿产资源，形成了近全球 60%的原材料工业规模，支撑了“世界工厂”的独特地位。

中国通过大规模清洁高效地利用本土煤炭资源，不仅保障了自身作为“世界工厂”的能源需求，也通过“替代效应”显著降低了对全球油气资源的消耗与进口依赖，平抑了国际油气价格，避免了国际油气价格的剧烈上涨，从而让世界共享了中国煤炭清洁高效利用的红利。今后较长时期内，全球仍将高度依赖化石能源，煤炭仍将是中国最可靠的能源。

数智技术正在加速与矿业深度融合，重塑矿业文明的新范式。数智技术赋能矿山采、选、冶等核心生产环节安全高效运行，实现矿山资源利用效率与经济社会效益动态平衡。新一代信息技术与矿产资源开发利用技术的融合创新全面地推进智慧矿山工艺流程再造、加速了配套技术装备的研发和应用。

现有传统矿业模式不适应数智化时代产业发展，必须推进产业的数智化和绿色化双重转型，重塑矿业运营模式和组织架构，加速转移进入算力、算法、数据的新赛道。将“资源红利”转化为“数据红利”和“算力红利”，打造以数智技术驱动的“资源—能源—生态”智慧综合体新业态，实现矿业的涅槃重生。

过去我们的矿业发展依赖“资源储量—资本投入—规模扩张”的线性路径，而未来必然要走“数据生成—知识沉淀—算法迭代—价值倍增”的指数模式。AI+矿业的核心场景将实现少人化、无人化，矿业产业工人转向数据标注与知识积累。数据成为第四大

生产要素，企业要完成从“资源运营商”到“数据运营商”的转换。这样一个史无前例的产业转型难度大。

矿山场景复杂，存在顶板、水、火、瓦斯、煤层等多种致灾隐患，安全管理难度大。随着矿产资源开发规模持续扩大与开采条件日趋复杂，地下与露天矿山均面临环境扰动增强、系统耦合复杂及安全高效开采压力持续提升等问题。以人工智能为核心的新一代数智技术快速发展，正推动矿山生产由机械化向智能化、无人化加速演进，成为提升矿山本质安全水平与生产效率的重要路径。当前，智能感知、多源融合、矿山大模型、数字孪生及群体协同控制等关键技术正逐步融入采矿全流程，推动矿山智能化由单装备自动化向系统协同自主化发展。

然而，在复杂环境自适应感知、多源异构数据融合、跨装备协同控制及动态可信决策等方面仍存在技术瓶颈。要实现“数据—知识”耦合，融合机器视觉、智能控制等技术与装备，形成“采集—运算—决策—执行”的闭环，推动生产从被动响应向主动预判跨越。加快人工智能在设计、中试、生产、服务、运营全环节场景落地应用。要打破“系统卡点多”壁垒，依托群体智能重塑生产协同逻辑，让系统涌现出单设备不具备的协同智能。打通全流程的数据链路，让原本独立作业的设备形成集群化协同，并基于实时数据动态调整作业节奏和参数，从而实现柔性化生产、联动避险和系统自恢复。这样的整体协同智能，将显著提升生产系统的效率与韧性。培育智能原生新模式新业态，通过标准化封装将行业算法整合为能力模块，行业知识转化为可插拔组件，灵活组合快速适配新场景，采用“场景牵引”的联合创新模式，推动行业从“单点突破”走向“系统跃迁”。

未来十年，将是 AI+矿业战略和智慧矿山建设的关键窗口期。唯有以人工智能为牵引，推动产业模式跃迁，培育复合型人才，健全安全与伦理规范，构建长效发展机制，方能夯实智慧矿山建设高质量发展的内生动能与制度根基，塑造人工智能与矿山产业开发技术全面融合的新时代产业体系，打造“AI+资源+能源+生态”的智慧综合体。

《智慧矿山丛书》全面系统地梳理智慧矿山建设的发展背景与技术演进脉络，介绍智慧矿山建设理论和技术创新研究成果，构建面向“感知—认知—决策—执行—安全”的矿山数智技术体系，并结合典型工程案例分析智慧矿山建设难题与对策，为我国矿智慧矿山建设提供理论技术支撑和建设指南。本丛书兼具理论性、工程实用性和前瞻性。

王同庆

中国工程院院士

中国煤炭科工集团首席科学家

煤炭无人化开采数智技术全国重点实验室主任

中国自动化学会智慧矿山专业委员会主任

2026年6月

前 言

2020年2月25日,国家发展改革委、国家能源局、应急部等八部委联合印发了《关于加快煤矿智能化发展的指导意见》,明确提出煤矿智能化的总体规划,具体目标为2025年大型煤矿和灾害严重煤矿基本实现智能化、2035年各类煤矿基本实现智能化。2020年10月10日,中国煤炭科工集团王国法院士主持制定了《智能化煤矿(井工)分类、分级技术条件与评价》《智能化采煤工作面分类、分级技术条件与评价指标体系》等团体标准;2021年6月5日,国家能源局、国家矿山安全监察局在《煤矿智能化建设指南(2021年版)》中,将智能地质保障系统作为煤矿智能化建设的基础平台,对其建设内容与技术要求做出明确的规定;2024年4月,国家矿山安全监察局等七部委联合印发了《关于深入推进煤矿智能化建设 促进矿山安全发展的指导意见》,提出到2026年全国煤矿智能化产能占比不低于60%,智能化工作面数量占比不低于30%,智能化工作面常态化运行率不低于80%等具体要求。截至2024年6月底,全国建成首批智能化示范煤矿60余座、智能化采煤工作面1900多个、智能化掘进工作面2100多个,煤矿智能化建设进入快车道。

我国煤矿数量众多,基础地质条件差异很大。2035年全国各类煤矿要基本实现智能化,智能地质保障是煤矿智能化采掘的基础和前提条件。因此,迫切需要回答什么是煤矿智能地质保障系统?为什么要构建煤矿智能地质保障系统?如何建设煤矿智能地质保障系统?为此,2022年3月王国法院士提出由中国煤炭科工集团西安研究院(集团)有限公司组织撰写《煤矿智能地质保障系统》一书,主要面向煤矿企业、科研院所从事智能化的管理人员和技术人员,介绍煤矿智能地质保障技术的最新进展、工程应用,以回答煤矿用户迫切需要了解的问题。

本书分为五篇十七章,由中国煤炭科工集团西安研究院(集团)有限公司长期从事煤矿地质、物探、钻探、水文以及透明地质等技术研究的多名学者共同撰写,中国煤炭科工集团庞义辉博士参与全书的内容策划。本书第一篇煤矿智能地质保障系统概述,简要介绍国内外煤矿地质保障技术发展历程及智能地质保障技术的需求分析、关键技术和系统架构,由程建远撰写;第二篇煤矿智能物探技术与装备,介绍随掘智能探测、随采智能探测、钻孔地质雷达、钻孔瞬变电磁、钻孔综合物探等技术、装备与应用,由王保利、范涛、蒋必辞、刘磊、覃思、金丹等分工撰写;第三篇煤矿智能化钻探技术与装备,介绍煤矿智能化钻探技术、智能化钻探装备与典型应用范例,由董洪波、范强、方鹏、刘飞、张幼振等分工撰写;第四篇煤矿灾害智能监测系统,介绍煤矿水文监测系统、煤矿微震监测系统、煤矿电法监测系统及应用实例,由鲁晶津、王云宏、张涛、崔伟雄等分工撰写;第五篇煤矿透明地质技术平台,介绍煤矿地质建模数据融合分析、煤矿三维地质建模技术、煤矿透明地质软件平台以及数字孪生技术在煤矿智能地质保障系统中的初步应用,由刘再斌、李鹏、李贵红、安林、刘松等分工撰写。全书由程建远、刘再斌、

董洪波统稿，田宏亮、晋香兰、韩琳、王盼参与书稿审定，李宇腾博士负责部分插图的清绘工作。

在此，谨向为本书撰写与出版付出辛勤努力的各位领导、专家及工作人员致以衷心的感谢！

作 者

2025 年 12 月

目 录

丛书序
前言

第一篇 煤矿智能地质保障系统概述

第 1 章 煤矿地质保障技术发展历程	3
1.1 国外煤矿地质保障的技术演进	4
1.1.1 地球物理探测技术	5
1.1.2 钻探技术与装备	9
1.1.3 三维地质建模技术	12
1.2 国内煤矿地质保障的发展历程	13
1.2.1 煤炭资源勘探开发地质保障阶段	13
1.2.2 “双高矿井”建设地质保障阶段	14
1.2.3 煤矿安全高效生产地质保障阶段	18
第 2 章 煤矿智能地质保障系统架构	25
2.1 煤矿智能地质保障系统的提出背景	25
2.1.1 智能地质保障系统的提出	25
2.1.2 智能地质保障系统的内涵	26
2.1.3 智能地质保障系统的外延	28
2.2 煤矿智能地质保障系统的总体设计	35
2.2.1 智能地质保障系统的技术架构	35
2.2.2 智能地质保障系统的核心技术	36

第二篇 煤矿智能物探技术与装备

第 3 章 随掘智能探测技术	43
3.1 随掘地震探测方法	43
3.1.1 地震可控震源技术原理	44
3.1.2 掘进机震源及其信号特征	44
3.2 随掘地震探测技术	47
3.2.1 随掘地震数据采集	47
3.2.2 随掘地震数据处理	47
3.2.3 随掘地震偏移成像	52
3.3 随掘地震参数论证	54
3.3.1 道间距	54

3.3.2	测线长度	55
3.4	随掘地震探测实例	57
3.4.1	随掘地震探测断层	57
3.4.2	随掘地震探测陷落柱	60
第4章	随采智能探测技术	63
4.1	随采地震探测方法	63
4.2	随采地震探测技术	64
4.2.1	随采地震数据采集	64
4.2.2	随采地震数据处理	66
4.3	随采地震探测工艺	74
4.4	随采地震探测实例	77
4.4.1	随采地震构造探测	77
4.4.2	贵州岩脚煤矿随采地震应力监测	79
第5章	钻孔地质雷达技术与装备	84
5.1	钻孔雷达探测技术	84
5.1.1	钻孔雷达探测原理	84
5.1.2	钻孔雷达仪器装备	85
5.2	钻孔雷达响应特征	86
5.2.1	煤岩界面特征	86
5.2.2	断层响应特征	87
5.2.3	陷落柱响应特征	87
5.2.4	裂隙带响应特征	88
5.3	钻孔雷达数据处理	88
5.3.1	数据编辑	89
5.3.2	常规处理	90
5.3.3	增强处理	95
5.4	钻孔雷达数据解释	97
5.5	钻孔雷达应用实例	100
5.5.1	煤岩界面探测	100
5.5.2	出水点探测	103
第6章	钻孔瞬变电磁技术与装备	105
6.1	钻孔瞬变电磁探测原理	105
6.2	钻孔瞬变电磁探测方法	106
6.2.1	钻孔瞬变电磁探测装备	106
6.2.2	钻孔瞬变电磁施工工艺	107
6.3	钻孔瞬变电磁数据处理	107
6.3.1	数据预处理	107
6.3.2	视电阻率数据处理	116

6.3.3 异常体空间定位技术	117
6.4 钻孔瞬变电磁应用实例	120
第 7 章 其他钻孔物探技术与装备	124
7.1 煤矿钻孔综合物探思路	124
7.2 钻孔孔内物探技术及装备	124
7.2.1 钻孔无线电波透视技术及装备	124
7.2.2 钻孔音频电透视技术及装备	127
7.2.3 钻孔伽马岩性探测技术	129
7.3 钻孔物探数据处理方法	130
7.3.1 钻孔电磁波透视数据处理方法	130
7.3.2 钻孔音频电透视数据处理方法	131
7.3.3 钻孔伽马测量数据处理方法	133
7.4 钻孔综合物探应用实例	133
7.4.1 钻孔音频电法透视实例	133
7.4.2 钻孔伽马岩性测井实例	135

第三篇 煤矿智能化钻探技术与装备

第 8 章 煤矿智能化钻探技术	139
8.1 钻机定位与导航技术	139
8.1.1 井下钻机导航自主化程度	139
8.1.2 井下钻机自主导航方式	140
8.1.3 井下钻机自主导航关键技术	140
8.1.4 井下钻机导航试验	142
8.2 位姿智能调节技术	142
8.2.1 智能钻机运动学建模	142
8.2.2 智能钻机姿态感知技术	146
8.2.3 姿态调节控制算法	148
8.3 智能感知与自适应控制技术	149
8.3.1 智能感知技术	150
8.3.2 自适应控制技术	156
8.4 远程数据交互技术	157
8.4.1 钻机远程交互系统的总体设计	157
8.4.2 远程交互系统硬件平台的搭建	158
8.4.3 远程交互系统控制软件的开发	160
第 9 章 煤矿智能化钻探装备	163
9.1 智能化钻探装备的定义与内涵	163
9.2 智能钻机的系统构成	163
9.2.1 模块化机械系统	163

9.2.2	负载敏感电液系统	166
9.2.3	分布式控制系统	168
第 10 章	智能化钻探装备应用	171
10.1	探放水钻孔施工	171
10.1.1	矿井概况	171
10.1.2	地质条件	171
10.1.3	施工方案	172
10.1.4	施工情况	175
10.2	瓦斯抽采钻孔施工	176
10.2.1	顺煤层钻孔施工	176
10.2.2	穿层钻孔施工	179
10.2.3	顶板高位大直径定向钻孔施工	182
第四篇 煤矿灾害智能监测系统		
第 11 章	煤矿水文监测系统	187
11.1	系统组成与功能	187
11.1.1	监测中心主站	188
11.1.2	监测网络	189
11.1.3	监测分站	190
11.1.4	系统功能	191
11.2	监测技术与装备	195
11.2.1	含水层水文监测	195
11.2.2	涌水量动态监测	196
11.2.3	采空区积水监测	198
11.2.4	地表水系及其他	198
11.3	监测系统及应用	198
11.3.1	试放水阶段	199
11.3.2	叠加放水第一阶段	200
11.3.3	联合放水阶段初期	202
11.3.4	放水试验期间	203
11.4	水文智能监测系统	204
11.4.1	水文智能监测系统融合与联动	205
11.4.2	基于互联网+水文监测系统	206
第 12 章	煤矿微震监测系统	208
12.1	微震监测技术原理	208
12.2	微震监测数据采集	209
12.2.1	微震监测观测系统	209
12.2.2	观测系统设计原则	210

12.3	微震监测仪器装备	211
12.3.1	微震监测系统构成	211
12.3.2	节点式微震监测系统	211
12.3.3	有缆式微震监测系统	213
12.4	微震监测数据处理	215
12.5	微震监测数据解释	218
12.5.1	微震事件震级	218
12.5.2	震源参数计算	219
12.6	微震监测应用实例	219
12.6.1	煤矿井下微震监测	219
12.6.2	井-地联合微震监测	228
第 13 章	煤矿电法监测系统	237
13.1	电法监测技术原理	237
13.1.1	技术背景	237
13.1.2	直流电阻率法	238
13.1.3	音频电透视法	241
13.2	电法监测数据采集	242
13.2.1	电法观测装置	242
13.2.2	多测线观测系统	247
13.2.3	组合探测方法	248
13.2.4	数据采集密度的选择	248
13.3	电法监测系统组成	249
13.3.1	系统结构	249
13.3.2	监测装备	252
13.3.3	控制软件	255
13.4	电法监测工艺方法	259
13.4.1	巷道电法监测工艺	259
13.4.2	孔中电法监测工艺	261
13.5	电法监测数据处理	262
13.5.1	电法监测数据预处理	262
13.5.2	电法监测数据反演成像	266
13.5.3	监测数据自动处理解释	270
13.6	电法监测应用实例	274
13.6.1	顶板裂隙带的高度监测	274
13.6.2	底板承压水害动态监测	277
13.6.3	注浆治理前后效果监测	280

第五篇 煤矿透明地质技术平台

第 14 章 煤矿地质建模数据融合分析	287
14.1 煤矿地质建模数据的特征	287
14.1.1 地质数据的多源性	287
14.1.2 地质数据的异构性	288
14.1.3 地质数据的时空性	289
14.1.4 地质数据的模糊性	289
14.2 煤矿地质建模数据的管理	289
14.2.1 地质建模数据分类	291
14.2.2 地质建模数据库设计	291
14.2.3 地质建模数据采集	294
14.2.4 地质建模数据应用	296
14.3 煤矿地质建模数据的融合	298
14.3.1 地质数据融合原则	298
14.3.2 地质数据融合方法	302
14.4 多源地质数据融合实例	307
14.4.1 工作面的基本情况	307
14.4.2 三维地震动态解释	308
14.4.3 构造探采对比解释	310
14.4.4 数据融合精度分析	310
第 15 章 煤矿三维地质建模技术	313
15.1 空间数据模型与三维地质建模方法	313
15.1.1 空间数据模型	313
15.1.2 三维地质建模方法	315
15.1.3 三维地质建模软件	318
15.2 体元切割的三维地质实体建模方法	319
15.2.1 体元切割的模型构建过程	319
15.2.2 基于离散光滑插值的煤层底板面模型构建	320
15.2.3 基于克里金插值煤层厚度的顶板面模型构建	325
15.2.4 初始四面体填充的三维实体模型构建	326
15.2.5 三角网切割四面体构建各地层实体模型	329
15.2.6 断层、陷落柱及井巷工程实体模型构建	332
15.3 三维地质建模的工程实例	333
15.3.1 矿井地质条件	333
15.3.2 三维地质模型构建	334
15.3.3 三维地质模型的精度	344

第 16 章 煤矿透明地质软件平台	346
16.1 煤矿透明地质软件的架构	346
16.1.1 微服务架构技术	346
16.1.2 Docker 技术	348
16.2 透明地质保障软件的设计	348
16.2.1 应用层	348
16.2.2 平台层	349
16.2.3 基础设施层	351
16.3 透明地质软件的微服务架构	352
16.3.1 数据获取的微服务构建	352
16.3.2 数据获取的微服务开发	352
16.3.3 数据获取的微服务部署	353
16.3.4 微服务系统平台的运维	354
16.4 透明地质软件的工程应用	356
16.4.1 透明地质的建设基础	356
16.4.2 透明地质保障系统功能设计	358
16.4.3 水害防治地质透明化	359
16.4.4 快速掘进地质透明化	360
16.4.5 智能开采地质透明化	362
第 17 章 煤矿数字孪生技术进展	365
17.1 煤矿数字孪生技术	365
17.1.1 数字孪生技术简介	365
17.1.2 煤矿数字孪生方法	366
17.2 采掘工作面的数字孪生	368
17.2.1 数字孪生的技术体系	368
17.2.2 数字孪生的逻辑架构	371
17.2.3 数字孪生的模型体系	372
17.3 基于数字孪生的智能开采	376
17.3.1 三维地质模型的构建	376
17.3.2 规划截割曲线的生成	378
17.3.3 采煤机智能调高算法	380
17.4 煤矿数字孪生技术应用实例	385
17.4.1 煤矿基本情况	385
17.4.2 工作面数字孪生系统的构建	385
17.4.3 工作面数字孪生的应用效果	387
参考文献	390

第一篇 煤矿智能地质保障系统概述

第 1 章 煤矿地质保障技术发展历程

据英国石油公司 2014 年资料，石油、煤炭、天然气和新能源在全球一次能源消费结构中的比例分别为 32.6%、30.0%、23.7%和 13.7%，且新能源的占比逐年上升，世界能源消费结构正在迈入“四分天下”的时代(图 1-1) (邹才能等，2016)。我国煤炭资源量居世界第三位，仅次于美国、俄罗斯；我国煤炭产量 1989 年首次突破 10 亿 t，此后一直位居世界第一；2024 年，我国原煤产量 47.6 亿 t，占全球煤炭产量的 52.49%；中华人民共和国成立以来，煤炭在全国一次性能源消费中的占比长时间保持在 60%以上(图 1-2)。

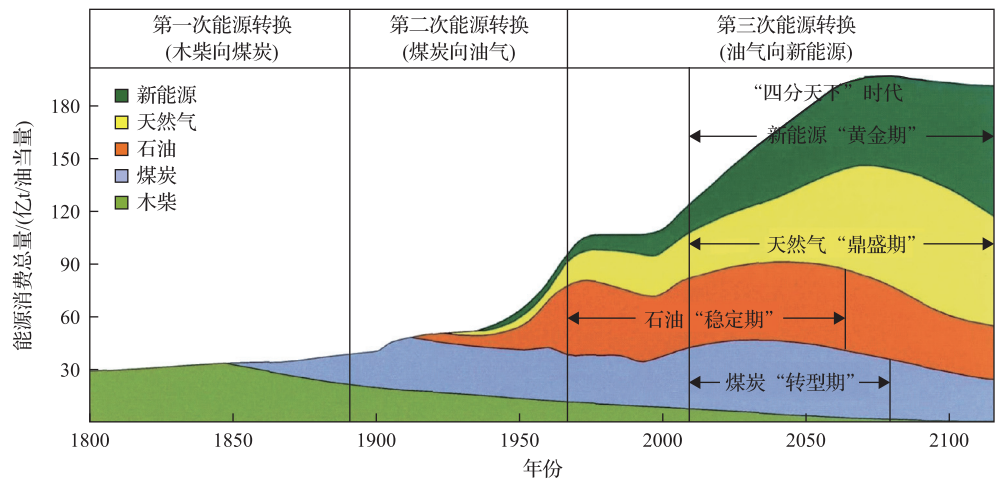


图 1-1 世界能源消费结构发展趋势 (引自邹才能等, 2016)

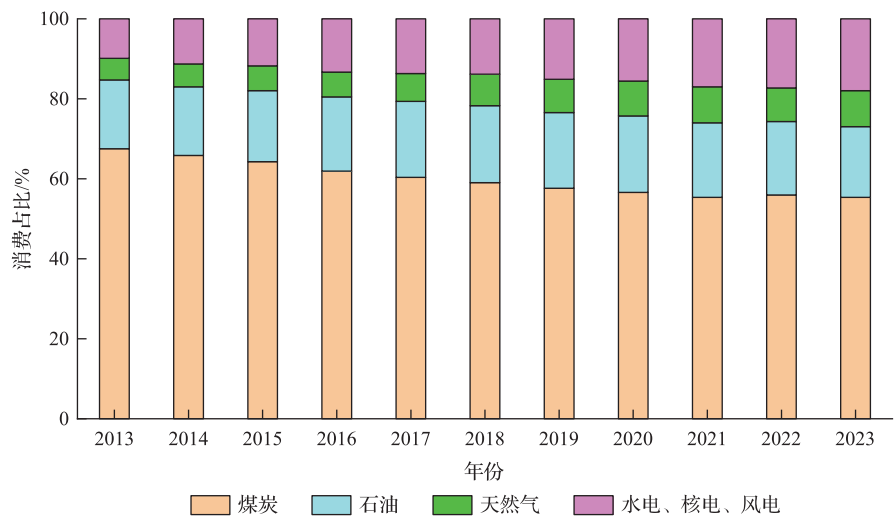


图 1-2 2013~2023 年全国一次能源消费结构变化 (引自中华人民共和国自然资源部, 2024)

“富煤、贫油、少气”的资源禀赋决定了今后煤炭仍将是我国的主体能源，且在未来较长时期内，煤炭仍将在国家能源安全中发挥不可替代的“稳定器”和“压舱石”作用。

煤炭地质工作是煤炭工业的基础性工作，贯穿于煤炭工业的全过程，在煤炭资源勘查、井田划分、矿井设计、建设、生产、关闭以及生态环境修复等不同发展阶段，都为煤炭工业的健康发展提供了基础条件保障。煤炭地质工作是煤炭资源勘查、设计、开发、利用以至于闭坑全链条、全生命周期中所有地质工作的统称，包含煤田地质与煤矿地质两个阶段。煤田地质是指煤矿建井阶段之前开展的地质工作，煤矿地质由建井阶段的矿建地质与生产阶段的矿井地质组成，其中矿井地质是在煤矿建井和生产过程中进行的、直接为煤矿生产服务的地质工作(柴登榜，1984)。煤矿地质工作的主要任务是查清含煤岩系的地质构造(包括断层、褶曲等)、煤层厚度及其变化、顶底板岩性及其稳定性、矿井水文地质、瓦斯赋存与分布规律、煤层中的地质异常体和煤矿开采对上覆地层的损伤等(彭苏萍，2020)。煤矿地质保障是一个系统工程，其中煤炭综合地质勘查技术是煤矿地质保障的核心技术支撑，是煤炭地质、水文地质、物化探、遥感、钻探与坑探、测试化验等多学科交叉的综合性技术。本章将以井工煤矿生产阶段的矿井地质条件精细探查技术为主，重点介绍煤矿地质保障系统中综合探测技术的发展历程。

1.1 国外煤矿地质保障的技术演进

20 世纪 50~60 年代，国外煤矿开始大力发展和推广机械化开采技术，采煤机械化程度迅速提高。1955 年美国采煤机械化程度已达到 84%，1965 年英国、联邦德国井工煤矿采煤机械化程度分别达到 75%和 79%；20 世纪 70 年代，联邦德国、英国、美国等主要采煤国家的采煤机械化程度达到 90%以上(郑行周，2003)。煤矿机械化开采方式极大地减轻了工人的劳动强度，降低了百万吨死亡率，具有很高的劳动生产效率；同时，煤矿机械化开采对地质条件的查明程度提出了更高的要求。只有在采前预先查明采煤工作面内部的煤层厚度、褶曲、断层等开采地质条件，以及可能影响安全开采的陷落柱、采空区、火烧区、冲刷带、富水区、底鼓带等隐蔽致灾因素的前提下，煤矿机械化开采的综合效能才能得到充分发挥；反之，采煤工作面地质构造不清，轻则造成机械化开采工作面的缩面减产，重则导致工作面停产搬家倒面，严重影响煤矿生产的正常进行。根据文献资料：由于地质构造不清等原因，英国曾有 1/3 的综采工作面被迫搬家倒面；1966~1970 年，苏联煤矿因地质条件的意外变化，每年约有 36%的综采工作面被迫减产或停产。为了保障煤矿机械化开采的顺利进行，必须合理选择适于机械化开采的采区和工作面，而要做到这一点，就必须超前查明采煤工作面的开采地质条件，由此推动了煤矿物探、钻探技术手段的快速发展。

围绕如何超前查明煤矿机械化开采工作面地质条件的技术难题，世界主要采煤国家先后开展了大量的探索工作。20 世纪中叶，欧美国家多将地质勘探工作纳入矿山或矿业主管部门管理，因而地质勘探与矿山开采结合得比较紧密，地质勘探直接为开采服务的

理念始终贯穿于地质勘探计划执行的全过程(范念寒, 1984)。20 世纪 70 年代起, 美国、英国、苏联、联邦德国与法国等开展了大量的地质探测方法研究、技术攻关、科研试验、技术示范和推广应用工作。在地面物探方面, 法国 SN 系列和美国 DFS 系列地震仪、法国 SYSCAL R2 数字电法仪及处理工作站等先进物探装备的成功研发极大地推动了高分辨率地震勘探和地面直流电法勘探技术的发展成熟和推广应用; 进入 21 世纪, 以法国 SERCEL 公司的 428 地震仪、加拿大凤凰公司的 V8 多功能电法仪、美国 Zonge 公司的 GDP32 电法工作站以及澳大利亚 TerraTEM、加拿大的地-空瞬变电磁探测系统等先进技术装备为标志, 国外已经形成了地面物探方法技术、仪器装备、处理解释软件等系列化产品。在矿井物探方面, 苏联最早开展了煤矿井下电法勘探的试验研究, 联邦德国先后开发出 SEAMEX、SUMMIT 型煤矿井下防爆槽波地震仪系列产品, 美国 RIM 公司开发了无线电波计算机断层扫描(CT)透视成像技术装备, 澳大利亚率先推出了煤矿井下千米定向钻探技术与装备等, 引领了煤矿地质保障技术与装备的科技进步。2010 年至今, 世界能源结构与需求变化、“温室效应”与“碳减排”环境政策出笼等原因使西方主要产煤国家普遍出现煤炭产量下降、煤矿关闭等情况, 由此导致近 10 多年来国外煤矿地质保障技术整体上处于裹足不前的局面。

下面从地球物理探测、钻探技术与装备、三维地质建模几个方面, 对国外煤矿地质保障技术与装备的发展历程加以回顾。

1.1.1 地球物理探测技术

1. 弹性波探测技术

1) 高分辨率地震勘探

20 世纪 70 年代中期, 为降低煤矿生产成本、提高劳动生产率, 美国煤矿开始采用长壁工作面机械化开采工艺。据美国矿业局估计: 如果走向长壁采煤工作面的地质条件出现较大变化导致机械化开采受阻, 将会造成每天 24 万~36 万美元的经济损失; 如果能够超前查明采煤工作面的煤层赋存条件, 则可以极大地减少或避免不必要的经济损失。为此, 英国、美国、澳大利亚、加拿大等国家开始将石油行业先进的地震勘探技术引入煤炭地质勘探领域, 直接推动了煤田地震勘探技术的蓬勃发展。

20 世纪 70 年代, 英国国家煤炭局(The UK National Coal Board)开创性地将地震勘探技术引入煤矿小断层和其他地质异常体(如冲刷、岩浆岩)的探测中。1986 年, 英国塞尔比煤田采用高分辨率地震勘探方法探测落差 10~15m 的断层, 其探测准确率达到 50%~85%; 在地震地质条件简单地区, 二维地震勘探甚至可以查出落差 5~8m 的小断层; 同期, 美国、澳大利亚等也开展了煤田二维高分辨率地震勘探工作, 特别是 1997 年在澳大利亚煤炭协会研究项目(Australian Coal Association Research Program, ACARP)的支持下, 澳大利亚在悉尼盆地和鲍恩盆地开展了煤田三维地震勘探的方法试验; 1998 年, 必和必拓(BHP)在古涅拉(Goonyella)煤矿开展了两次三维地震的示范性应用, 勘探面积达到 4.5km², 为煤矿三维地震的发展成熟奠定了基础。20 世纪 70 年代, 美国得克萨斯仪器公

司研制的 DFS-V 集中式多道数字地震仪,已经具备 240 道/4ms 的采集能力,为煤田高分辨率二维地震勘探提供了仪器装备支持;与此同时,随着数字计算机的发展,煤田地震勘探资料数字处理的能力得到大幅提高,加快了地震勘探的速度,实现了地震勘探技术的两大转变:一是地震勘探从间接找煤、寻找大型构造和隐伏露头,转向借助钻孔测井资料、制作人工合成记录,可以实现煤层赋存范围圈定、小断层探测以及地质异常体解释等,如英国利用高分辨率反射地震资料在大部分地区能分辨埋深 500~600m 煤层中落差大于 10m 的断层,深度解释误差不大于 2%;二是地面物探与孔间物探、矿井物探等综合探测技术得到成功应用。尽管在地面高分辨率反射地震条件良好的地区,二维地震能够分辨落差 10~15m 的断层,但对二维地震测线之间断层无法控制,而采用孔间物探或矿井物探技术手段,可以弥补二维地震勘探技术的不足。整体而言,国外煤矿的煤层赋存地质整体比较简单,且露天开采占比较高,三维地震在国外煤矿采前地质条件补充勘探中的应用相对较少。

进入 21 世纪,国外多家地球物理服务公司相继推出了高密度空间采样的地震勘探新技术。例如,西方地球物理公司(Western Geoco)的 Q-系列技术和 Discover 技术,法国地质勘探公司(CGG)的 Eye-D 技术,石油地理服务公司(PGS)的 HD-3D 和 GeoStreamer 技术以及英国石油公司(British Petroleum, BP)开发的 FOMA 采集技术等。基于“充分、均匀、对称、连续”的高保真、高精度数据采集理念,全数字、全波场、宽频段、宽方位、高密度地震勘探技术深入人心,地震采集、处理、解释一体化和地震地质综合解释等先进技术成为石油天然气、煤炭资源高精度勘探开发的主流技术;同时,“以模型为中心,以数据为驱动”的新一代人工智能解释软件已初见端倪。基于“从地震到模拟”(seismic-to-simulation, S2S)的思路,斯伦贝谢公司(Schlumberger)推出了全新的 Petrel 软件,融合了地震、地质、测井、油藏工程等多个学科数据;奥斯汀地质建模公司(Austin GeoModeling, AGM)推出的新一代地质解释软件 Recon 集成了地震沉积学的解释方法,实现了三维环境中多井对比和地质建模的一体化。近年来,人工智能技术在地震勘探的处理解释中出现了井喷式的增长。

需要说明的是:进入 21 世纪,国外地面高密度、高精度、全数字三维地震勘探技术主要应用于海上油气资源的三维地震勘探,煤矿采区三维地震的文献资料相对较少。

2) 煤矿井下槽波地震

在煤矿综采工作面设计之前,国外煤炭企业十分重视采煤工作面开采地质条件的评价工作。美国与澳大利亚要求采煤工作面必须编制各种地质险情图,苏联要求编绘开采地质条件定量预测图,联邦德国在鲁尔矿区采用构造指数、水平钻探、立体摄影、钻孔电视、井下测井、巷探、槽波地震等方法,结合详细的地质编录,开展采煤工作面断层构造的地质预测,对设计盘区的煤层条件是否适宜于进行机械化综采,预先做出定量评价;在此基础上,对设计采煤工作面的开采地质条件,在开采之前采用煤矿井下槽波地震探测技术开展进一步的详细探测(左德坤, 1981; 缪奋, 1991)。

1955 年, Evison 在新西兰煤矿井下首次发现槽波,并预测槽波有望成为一种新的探

测技术;1960年,Krey从理论和实践中证明了煤层中槽波的存在,并指出地震波在“岩层-煤层-岩层”的“三元”结构中传播会形成槽波,槽波传播时会形成有限的几种模式,槽波最重要的特征是具有很强的频散特性、速度低、频率高、能量强;1961年,Krey采用非防爆光点地震仪进行了煤矿井下槽波地震试验,并成功地接收透射槽波和反射槽波,此后他在萨尔煤田内斯多尔弗和格赛博恩煤矿进行了40多次的反射槽波及透射槽波试验(Krey,1963),不仅证明了煤层槽波的实际存在,还证实了槽波地震在探测煤矿井下小构造方面具有得天独厚的优势和很高的探测分辨率。基于Krey的研究成果,1967年以后,联邦德国、英国、法国、捷克、荷兰、匈牙利、苏联、美国等相继进行了槽波地震的井下试验、数值模拟和物理模拟等研究,其中联邦德国在槽波探测技术与装备的研发方面一直处于领先地位,先后研制出模拟防爆光点地震仪GSU(1966年)、MDH-01型防爆数字地震仪(1977年)、SEAMAX-85槽波地震仪(1985年)和SUMMIT-II(2010年)槽波地震仪等代表性仪器,并推出了配套的槽波处理软件(杨雪等,2017)。Brentrop在总结德国近200个煤矿井下槽波探测工程的经验后认为:槽波地震适于探测厚度0.6m以上煤层中落差大于1/5煤厚的断层,反射槽波和透射槽波小构造探测的准确率分别为63%和83%,反射槽波探测距离为煤厚的100倍、透视槽波探测距离为煤厚的1000倍。德国的煤矿槽波最大透视距离曾达到1780m,英国曾利用槽波地震探测出工作面前方45m处一条落差1.2m的断层,经证实位置误差<1m。煤矿井下槽波地震勘探技术与装备的发展成熟为煤矿机械化、综合机械化开采提供了可靠的地质保障。

21世纪以来,由于发达国家能源政策的改变和环保约束的加强,国外煤矿煤炭产量持续下降,不少发达国家陆续关闭煤矿。据报道:2002年1月30日,日本最后一家煤矿公司——太平洋炭矿公司(Taiheiyo Coal Mining Co., Ltd.)停产,从而使日本的煤矿产业彻底结束;2004年4月,法国关闭最后一座煤矿,告别了280年的采煤史;2015年12月18日,因持续恶化的煤炭行情等因素,英国煤炭控股有限公司(UK Coal Holdings Limited)正式关闭英国最后一个井工矿凯灵利(Kellingley)煤矿,至此宣告始于300年前工业革命时期的英国煤炭工业彻底退出历史舞台;2018年12月21日,德国境内所有硬煤井工煤矿已经停产,位于伯特鲁普市的哈尼尔(Haniel)煤矿在挖出最后一桶“黑金”后永久关闭。因此,国外煤矿井下槽波探测技术的最新成果较为少见。

2. 电磁波探测技术

早在1923年,苏联就开始了电磁波探测技术的理论研究和野外试验工作;1929年,苏联科学院A. A.彼得罗夫斯基院士首次提出了“无线电波阴影法”,他利用良导矿体对电磁波强烈吸收造成的“阴影”进行成像,进而圈定钻孔间或坑道间的金属盲矿体,取得了良好的应用效果;1946~1959年,苏联全苏地球物理勘探研究所(VNI Geophysika)研发了无线电波透视技术与装备,通过增强仪器设备的发射、接收能力,提高了对地下矿体的判别能力;20世纪60年代初,苏联研制出矿用防爆无线电波透视仪,其透视距离可达226m;70年代中期,莫斯科矿业学院(Moscow Mining Institute)雅姆希科夫博士等研究了不同煤层垂直极化波的吸收系数和初始场强,指出电磁波传播过程中的吸收衰减主要取决于煤层厚度、电阻率和频率等参数,该方法对煤层冲刷带、变薄区、褶曲和

小断层等地质异常体探测的准确率可达 76%。苏联曾采用多种地面物探方法只能探测出落差 10m 左右的断层,而采用无线电电磁法超前探测出距离巷道前方 14.6~21.0m 的充水巷道和断距 1.3m 的断层。迄今,俄罗斯、乌克兰等国家在地球物理勘探的基础理论研究方面依然具有一定的优势,只是其配套的物探仪器装备、计算机处理技术与地质工程应用等方面发展相对缓慢。

20 世纪 70 年代,美国、匈牙利、澳大利亚等借鉴苏联在无线电波透视方面的经验,陆续开展了无线电波透视法的理论研究、技术研发和仪器研制。Miller 和 Tuskruui 首次将电磁波成像技术和设备引入克拉里昂煤层的地质探测中;美国测井专家 Lytle 应用直射线理论,率先将 CT 技术引入钻孔电磁波透视数据处理中,显著提高了钻孔间、坑道间电磁波透视技术的成像分辨率。1977 年, Holzer 首次将钻孔雷达应用于煤矿地质构造探测,并取得了相应的雷达记录;1979 年, Dines 和 Lytle 改进了钻孔-钻孔间透视数据的迭代重建技术,取得了较好的层析成像效果;1980 年, Lytel 和 Dines 采用平滑约束条件改进了迭代射线追踪的非线性反演方法,提高了地质图像重建的质量;20 世纪 90 年代, Witten 和 Molyneux 给出了任意形式的辐射源地球物理层析成像方法, Ward 和 Hohmann 提出了相位成像技术, Jackson 和 Tweeton 将模糊数学和波前偏移技术应用于电磁波层析成像中; Alumbaugh 和 Newman 采用三维电磁反演方法研究了井中注入盐水前后电阻率三维层析图像的变化,圈定出钻孔周围盐水羽状渗流的准确位置。1991 年,美国矿业局(U.S.Bureau of Mines)利用脉冲多普勒和调频电磁波技术开展了煤层界面的探测技术研究,但探测结果的局限性较大(Cook, 1977; Mowrey, 1991)。此后,瑞典玛拉地球科学公司(MALA Geoscience)、美国地球物理测量系统公司(Geophysical Survey Systems, Inc., GSSI)、荷兰 T&A 测绘公司(T&A Survey)、澳大利亚地质鼯鼠公司(GeoMole Pty Ltd.)、加拿大传感器与软件公司(Sensors & Software Inc.)以及南非科学与工业研究理事会(Council for Scientific and Industrial Research, CSIR)等机构研发的钻孔雷达系统,包括 ProEx、SIR-30、TISA2D/TISA3D、GeoMole、pulseEKKO PRO 和 Aardwolf BR40,均获得了较好的商业应用。

21 世纪以来,电磁波反演以及地下介质图像重建成为研究的热点,代表性成果包括: Freye 和 Holloway 等研究了不同组分和不同湿度下波导结构中电磁波的衰减规律; Johnson 等提出了一种基于散射理论的地质雷达数据处理方法; Hussain 等采用有限元方法正演模拟了导电和绝缘两种情况下电磁波层析成像的效果,分析了层状介质模型和单一介质模型中电磁波的传播规律。美国、德国、荷兰、澳大利亚、加拿大、瑞典、日本等相继开展了钻孔雷达及其信号处理的方法研究,并在断层、溶洞、空洞、裂缝和含水异常探测等方面进行了钻孔雷达的试验和应用。特别值得一提的是:2010 年前后,澳大利亚地质鼯鼠公司研发了两种不同类型的单基和双基钻孔雷达系统,并在煤矿井下近水平钻孔探测中取得了较好的地质效果。

此外,澳大利亚曾采用磁法探测到距离巷道 9m 处、0.6m 大小的火成岩脉侵入体;匈牙利曾采用磁法测定了采煤工作面前方的巷道位置;波兰采用井下微重力法确定了断距为 4~10m 的正断层;苏联采用地音法研究了煤层顶板岩石强度和稳定性,以预测煤

层顶板的应力分布；美国在长壁工作面顶板钻孔中安装地音探测器，以探测顶板的微震活动及其位置，测定范围为水平距 $\pm 15\text{m}$ 以内，煤层垂直方向 $\pm 30\text{m}$ ；德国、英国、匈牙利等采用井下测井方法测定煤层厚度，开展煤层对比；一些国家曾试图利用矿井物探方法开展瓦斯泄出、岩溶、夹矸、老巷和封闭不良钻孔等探测的试验工作。

1.1.2 钻探技术与装备

1. 地面钻探技术

钻探技术在煤炭资源综合地质勘查、煤矿隐蔽致灾因素普查治理、井上下瓦斯抽采和水害防治等方面发挥了不可替代的作用。实际上，煤田地质钻探技术与石油地质钻探技术具有很多共性，一些先进的石油钻探技术与装备也不断移植到煤田地质钻探中，如地面绳索取心技术就是借鉴石油钻探技术的先进经验而发展起来的。

美国的德莱赛公司(Dresser Industries)长年系列钻机、瑞典的克芮留斯D系列钻机、日本利根的TXL系列钻机、俄罗斯的CKB系列钻机等采用液压自动卡盘、无导向杆的大通盘立轴回转器，一些钻机采用可调速的动力机、变量泥浆泵和绳索取心钻具，满足了金刚石和绳索取心钻进的要求，美国、加拿大、澳大利亚等地面钻进绳索取心方法的工作量占80%以上；瑞典的泰美克钻机和托拉姆 20×20 钻机、美国的长年HC-150型钻机是全液动力头式岩心钻机，其性能参数优良。由于地面钻探的工程量大、劳动强度高，钻探过程中的自动监控系统开始萌芽，如比利时的DBH-1500钻机可以自动规避人为的误操作、日本的CBP-NK-10A型程控钻机能够按预设的进尺自动钻进、英国博伊尔斯兄弟公司(Boyles Bros)的金刚石岩心钻机可以自动记录钻进期间的进尺、转数、钻头载荷、扭矩、冲洗液压力等参数，英国和加拿大分别开发了以微机处理为基础的自动钻进监测系统(ADM)，不仅可以测量和记录钻机的钻进参数，还可以对记录的钻进参数进行处理与分析，以达到最优化钻进的目的；德国也研发了基于电子-电液控制组件(ZBE)的导向监测系统等。这些钻探新技术提高了钻机的控制和自动化水平(韩广德，2000)。

20世纪90年代，为了在某些地面环境条件受限(如高山、湖泊)、地下地质条件特殊(如大倾角地层)、地质灾害治理(如地面瓦斯抽采)等场景下开展钻探作业，定向钻井技术得到快速发展，逐渐形成了地面水平井、多分支水平井、大位移井连续管等特殊钻井技术与装备，地面特种钻探的主要技术具体如下。

1) 近钻头测量技术

2010年以来，近钻头随钻测量仪器和工艺技术发展迅速，在定向井、水平井中得到广泛应用。国际油服公司都有自己的近钻头测量仪器，如斯伦贝谢公司的GST可提供近钻头方位电阻率、方位伽马、井斜、方位角等参数；哈里伯顿公司(Halliburton)的Geo-Pilot工具、路径探索公司(PathFinder)设计的iPZIG近钻头多参数随钻测量工具等均具备类似的多参数随钻测量功能。

2) 地质导向钻进技术

地质导向是采用随钻测量数据和随钻地层评价测井数据, 实现钻孔轨迹沿目标层位受控钻进的技术。在钻孔施工过程中, 通过测量多种地质和工程参数来对所钻地层的地质情况进行实时评价, 根据评价结果引导孔内钻具精确命中最佳地质目标。目前, 国外地质导向钻进技术比较成熟的公司主要有斯伦贝谢安纳德里尔公司 (Schlumberger Anadrill)、贝克休斯英泰克公司 (Baker Hughes INTEQ) 和哈里伯顿公司等, 它们研制了自然伽马测量、电阻率测井、中子密度测井等先进的地质导向仪器, 开发了配套的随钻地质解释与地质导向的软件系统, 已在石油、天然气开发领域的大位移定向井、水平井及特殊工艺钻井工程中获得广泛应用, 成为近年来油气钻井技术的核心技术之一。

3) 可视化钻进技术

可视化钻进技术是将钻探过程中所获取的数据转换为图形或图像信息, 以直观形象的表达方式展示空间信息, 并支持人机交互式操作分析, 以提高钻遇信息的地质分析能力。目前, 三维可视化技术已经在油气钻井勘探开发领域得到普遍应用, 促进了多学科之间的融合发展, 已逐渐成为钻井技术领域的重要研究方向。国外大型石油公司及地球物理公司已开发出适用于油气勘探开发的三维可视化软件, 包括斯伦贝谢公司、贝克休斯公司 (Baker Hughes)、兰德马克公司 (Landmark)、地质探索公司 (Geo-Quest) 等。其中, 西昆特公司 (Seequent) 与艾姆德克斯公司 (IMDEX) 联合将 Central 软件与 IMDEX HUB-IQ 软件进行集成, 首次实现孔内测量和结构化地质数据的三维实时可视化。

4) 反循环水力取心钻进

为提高碎软地层的取心率和钻进效率, 国外广泛采用双壁钻杆将冲洗液通过双壁钻杆外管和内管之间的环状间隙送达孔底, 然后从内管将岩心和钻屑通过冲洗液携带返出孔口。目前, 水力反循环取心钻进技术在矿产资源勘探中得到应用, 针对煤矿井下近水平条件下水力反循环取心钻进的研究较少。

5) 定向连续取心技术

通过岩心分析可获取地层走向、倾角、沉积特征和地应力方向等地质资料, 为油气勘探开发提供了重要的信息。传统的定向钻进只能钻进而不能取心, 传统的取心钻进只能进行直孔取心钻进而难以实现定向钻进。经过多年的技术攻关, 定向连续取心钻进技术已取得了一定的研究成果, 如贝克休斯公司、国际定向服务公司 (International Directional Services, IDS)、戴蒙特-斯特拉比特公司 (Diamant Boart Stratabit) 和美国克里斯滕森公司 (Christensen) 等均已开发出成熟的取心工具, 定向钻进的取心质量高、钻进速度快。

6) 地球物理测井技术

在煤田地质钻探完钻后, 钻孔地球物理测井可以分析解释煤层及其围岩的分界面、