

煤炭科学开采新理念与技术变革研究

谢和平¹, 王金华^{2,3,4}, 姜鹏飞^{2,4}, 刘见中^{2,3}, 吴刚¹, 周宏伟⁵, 任怀伟^{2,4}

(1. 四川大学, 成都 610065; 2. 中国煤炭科工集团有限公司, 北京 100013; 3. 煤炭科学研究总院, 北京 100013;
4. 天地科技股份有限公司, 北京 100013; 5. 中国矿业大学(北京), 北京 100083)

摘要: 煤炭产业作为我国重要的传统能源支柱产业, 在经济发展新常态下也必将发生重大变化, 以智能、安全、绿色为特征的
科学开采成为趋势。本文基于煤炭科学开采新理念, 提出了煤炭技术变革战略路线, 论述了 2016—2030 年不同阶段、不
同层次的煤炭变革技术, 包括升级与换代技术、拓展与变革技术、引领与探索技术, 提出了不同阶段需要重点研发的理论与
技术。

关键词: 煤炭; 科学开采; 技术变革; 战略路线

中图分类号: TD821 **文献标识码:** A

New Concepts and Technology Evolutions in Scientific Coal Mining

Xie Heping¹, Wang Jinhua^{2,3,4}, Jiang Pengfei^{2,4}, Liu Jianzhong^{2,3}, Wu Gang¹,
Zhou Hongwei⁵, Ren Huaiwei^{2,4}

(1. Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. China Coal Technology & Engineering Group Co., Ltd., Beijing 100013, China;
3. China Coal Research Institute, Beijing 100013, China; 4. Tiandi Science & Technology Co., Ltd., Beijing 100013, China;
5. China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: As a pillar in China's traditional energy industry, coal mining industry will change significantly under the new normal of the Chinese economy. Scientific mining becomes a trend which is characterized by intelligence, safety and green. In this paper, strategic direction of coal mining technology evolutions is proposed based on scientific coal mining concepts. Systematic discussions on the potential stages of the coal mining technology evolutions from 2016 to 2030 are presented, including upgrading and updating technology, developing and transforming technology, leading and exploring technology. Major theories and technologies for different evolution stages are also discussed.

Key words: coal; scientific mining; technology evolution; strategic direction

一、前言

随着我国经济由高速增长转为中高速增长、环境问题日益凸显, 能源消费强度下降, 近 10 年来

年均煤炭消费增长 2×10^8 t、年均增速 10% 左右的发展阶段已经结束。煤炭作为我国主体能源的地位仍难以改变, 根据《能源发展战略行动计划(2014—2020)》, 到 2020 年, 煤炭占一次能源的比重仍在

收稿日期: 2015-11-06; 修回日期: 2015-11-11

作者简介: 谢和平, 四川大学, 教授, 中国工程院院士, 长期从事岩石力学与矿山工程理论与技术研究; E-mail: xiehp@scu.edu.cn

基金项目: 中国工程院咨询项目“中国煤炭能源革命的战略研究”

本刊网址: www.enginsci.cn

62%左右；到2030年，煤炭在我国一次能源消费结构中的比重仍占55%左右，煤炭消费量达到 $4.5 \times 10^9 \sim 4.8 \times 10^9$ t；我国煤为基础、多元发展的能源方针不会改变。

2014年，习近平总书记在中央财经领导小组第六次会议提出了推动能源供给、消费、技术、体制改革。煤炭产业作为我国重要的传统能源支柱产业，在经济发展新常态下也必将发生重大变化。煤炭生产必须摒弃长期以来依靠数量增加、速度增长、规模扩张的粗放型发展模式，要转向创新驱动、结构优化、智能转型、绿色发展的集约型模式。行业由增量扩能型向调整存量、做优增量并重的深度结构调整转变，煤炭生产向服务型生产转变，行业发展由生产、销售原煤向销售商品煤、洁净煤转变。产量不再是企业追求的唯一目标，以智能、安全、绿色为特征的科学开采成为趋势，煤炭提质、降本增效、安全生产、保护环境成为煤炭企业共同追求的目标。

二、煤炭科学开采新理念

科学开采是指以科学发展观引领的与地质、生态环境相协调前提下最大限度地获取自然资源，在不断克服复杂地质条件和工程环境带来的安全隐患前提下进行的安全、高效、绿色、经济、社会协调的可持续开采^[1]。

科学开采新理念体现到技术层面，主要表现在智能、安全、绿色三个方面，三者是相互关联、相互影响的。例如，采用智能化开采技术与装备可提高开采效率，同时可减少井下作业人员，从而提高安全性；开采保护层、瓦斯抽采等安全技术措施同时是提高资源回收率、能源综合利用的过程。科学开采技术与装备要满足煤炭工业“煤炭提质、降本增效、安全生产、环境友好”的发展新常态，须遵循技术发展的趋势和规律，加快战略调整，实现技术变革。

通过煤矿开采技术变革，实现以提升科学产能为目标的科学开采，是经济、社会和行业发展的必然要求，也是科学技术发展到一定阶段的必然成果。当前经济社会发展进入“新常态”，煤炭行业要尽快完成转型升级，煤矿开采技术变革的战略目标、战略路线和研发技术必须与之相适应，从而推动产

业结构迈向中高端。

通过以科学开采为理念，以技术变革为手段，全面提高煤炭开发利用的科学化水平，建立智能、安全、绿色的社会全面协调的可持续发展的现代化煤炭工业技术体系，实现采掘作业智能化、煤矿生产安全化、生态环境友好化、职工队伍知识化，支撑和保障国民经济和社会发展的能源需求。

三、煤炭技术变革战略路线

（一）智能生产技术变革的战略路线——“自动化-智能化-无人化”

煤矿建设和生产过程复杂，开采装备系统庞大，由巷道掘进、工作面采煤系统、快速搬家、辅助运输、煤炭提升系统等多达几十种装备组成。各设备作业条件复杂，动作多，且对动作顺序、准确性、响应速度等要求高。20世纪末期以来，高新技术不断地向传统掘采领域渗透，美国、澳大利亚、英国、德国等国家采用了大功率可控传动、微机工况监测监控、自动化控制、机电一体化等先进技术设计和制造的适应不同地质条件的高效掘采大型设备。新型设备在装机功率、工作能力大幅度增加的同时，功能内涵发生重大突破，并实现了主要设备工作过程的自动化控制，为煤矿的建设和生产提供了装备保障。

近十年来，随着技术的进步以及更复杂开采地质条件的出现，开采工艺往往要求设备对围岩、环境变化自动适应以及设备间更加快速、准确的配合，这对处于单机自动化、分散控制的煤机装备来说是无法做到的，因而智能化技术逐步被引入并开始应用到实际井下生产过程中。例如，采煤机记忆截割、三维方向自动定位、摇臂自动调高、工作面三机联动等，液压支架跟机移架、自动找直，刮板输送机煤流平衡控制等；在围岩及环境信息获取方面，煤尘监测及自动控制、液压支架支护质量监控、瓦斯及温度监测、水害防治等系统也开始广泛应用。

目前，煤炭生产系统整体处于自动化向智能化过渡的时期，一些新的技术、工艺和控制模式也在不断的创新过程中。例如，液压支架电液控制系统由目前的集中式控制方式逐渐向分布式群组协同控制发展，工作面集中控制系统也将由单一的数据汇总、统计功能向具有数据特征挖掘、决策控制功能

的基于工业互联网的分布式协同控制平台转变。煤炭生产系统的最终发展方向是无人化。

随着煤炭开采深度增加，工人所处工作面的生产环境急剧恶化，深部开采除地质灾害发生率高、偶然性强外，井下工作面温度、湿度大大增加，工人几乎没有办法进入工作面进行作业。因此，在智能化的基础上必须大幅减少井下作业人数，并最终实现无人化开采，才能从根本上解决未来深部资源开采的问题。

实现无人化开采可能有许多技术途径，例如研发开采智能机器人，创建精准煤岩界面快速在线识别测试传感方法；研究液压支架群组的自组织推进和协同排队控制机制，建立无人运输系统的自动检测和故障诊断系统，实现远程监测监控和与其他设备的协同联动；创新基于感知系统反馈的动态决策机制，建立系统级别的互联协议和控制机制等。

根据煤机装备技术发展和应用的进程，一般每10~15年装备就可全部更新一代。因此，到2025年之前，智能化成套装备就会全面取代现在的自动化装备，到2030年，随着煤炭开采全面进入深部，无人化技术及装备也将成熟。

（二）安全生产技术变革的战略路线——“被动安全-主动安全-协同安全”

安全是煤矿生产永恒的主题，没有人员安全一切都无从谈起。煤矿安全生产技术的发展从理论到实践经历了几个阶段：从单纯显现的岩层垮落、透水、瓦斯突出防治理论到岩层运移规律、矿井水超前探测、煤岩瓦斯动力灾害发生机理的研究，从木垛支护、自然排水、通风等传统防治技术到液压支架自动支护、锚杆锚索联合支护、疏堵结合排水、瓦斯预抽等现代防治技术；再到目前的针对全矿井的煤矿应急通讯、指挥决策系统的建立，安全避险装备的研发等全方位的安全保障；后续还要继续研究灾区侦检探测可视化系统、应急救援模拟仿真与演练系统、灾区探测救援机器人等更为先进的安全保障技术。

这些安全生产技术实现了从“被动安全”到“主动安全”的转变，从“事后救灾”逐渐转为“灾害预防”，使得煤矿生产的事故率和死亡率大幅下降。然而，由于安全保障技术和安全投入的不足，以及我国煤矿开采条件的复杂性，我国煤矿每年的死亡

人数仍远高于国外发达国家。

要从根本上实现煤炭安全生产，还必须从发生灾害的机理入手。煤矿事故发生有一个共同的特点，都是由于原有地质应力场、渗流场、裂隙场原始平衡被打破，能量释放，物质由高势能状态向低势能状态过渡，从而发生冲击地压、煤与瓦斯突出、透水等灾害。若要避免这些灾害，就要想办法使这些处于高势能状态物质的能量通过其他途径得到释放，使矿井状态处于低势能的总体平衡状态。只有这样，才能从源头消除灾害发生的可能，实现矿井的“协同安全”。此外，从开采的角度，无论是煤炭还是其他的天然气、石油等，获取能源是根本目标，而灾害的发生则往往是煤岩体的能量释放，如果我们能在释放过程中将能量收集，则不但消除了灾害，还能够实现获取更多的能源，大幅提高开采效益，而且符合绿色开采的理念。例如，煤与瓦斯共采，地热资源利用，大变形能量释放采集、转化和梯级利用等。

目前，安全生产技术整体还处于“被动安全”向“主动安全”过渡阶段。根据安全技术发展和应用的进程，到2025年由智能化、安全避险系统等带来的“主动安全”能够全面实现；而在“协同安全”方面，由于煤系地层及采动影响范围的煤岩体的能源释放和收集利用的理论基础非常缺乏，相应的能量开发利用技术难度和投资都相对较大，要大规模投入生产应用应在2030年以后。

（三）绿色生产技术变革的战略路线——“降低损害-生态恢复-采补平衡”

绿色生产技术在20世纪90年代被提出来，但由于当时开采强度和规模并不大，造成的地表沉陷、水系破坏，以及矿井内生产环境的污染并不严重，因而没有受到特别的重视。然而，面对近年来接近 4×10^9 t的年煤炭开采量，受到影响的范围及影响强度越来越大，严重影响了矿区的生产生活环境，甚至威胁到了人们的生命安全。因此，消除煤炭生产给环境带来的不利影响，实现行业的可持续发展，是科学开采的重要理念。

近年来，绿色生产技术经历了从“降低损害”到“生态恢复”的转变。例如，在环境脆弱的华东、东北地区实施保水、充填开采，采取沉陷区治理、地表生态恢复等补救性措施，迅速将采煤对环境的影响降低。统筹安排，将原来的环境治理只有被动

投入没有经济效益产出的模式转变为主动经营环境的模式。例如,淮南矿业集团的“和谐矿区”建设完成了 3 期 $1.56 \times 10^7 \text{ m}^2$ 的生态湿地,形成了 3 个开放式城市公园,成为生态文明建设的典范。

然而,目前这种先破坏再治理的模式毕竟需要投入巨大的人力、物力,而且有些地区环境遭到破坏后是不可恢复的。因此,对新建矿井必须严把环保关,考虑环境的承受能力,控制环境影响范围和强度,力争实现采煤和环境的协调发展。上面提到的伴生资源共同开采和利用技术是未来煤炭绿色开采的方向。例如,煤层气与煤炭一体化开采技术,矸石充填开采技术,矿井乏风瓦斯利用技术,深部矿井瓦斯抽采与热电冷联供技术,地下水人工补给技术和装备等。大同煤矿集团有限责任公司建设的塔山循环经济园区就是煤炭开发与环境平衡发展的典范。

目前,绿色生产技术受到认识、经济、政策等方面的限制,推广应用的范围非常有限。随着环保要求的不断提升,到 2025 年采取生态恢复措施的矿井有望提升到 50% 以上;而在“采补平衡”方面,技术难度和投资都相对较大,规模投入生产应用应在 2030 年以后。

四、不同阶段煤炭开发技术的变革

煤炭开发技术变革包括:升级与换代技术;拓展与变革技术;引领与探索技术。

(一) 2016—2020 年煤炭技术的变革

2016—2020 年即我国“十三五”期间,该阶段主要基于现有科学技术的提升,面向未来,进行科学技术的探索、展望和预研。具体包括以下 6 个方面。

1. 深部煤矿基于“应力场—裂隙场—渗流场—湿度场”融合的地质保障技术

高精度的地震勘探、电磁法勘探、岩体层射线扫描(CT)等新型勘探方法相结合的深层煤矿床资源综合探测的技术体系。

2. 大型煤矿快速建井技术

东部千米深井快速建井技术,西部复杂条件快速建井技术,竖井掘井机,千米沿轴向斜井冻结,盾构(TBM)斜井施工技术,大直径斜井反井井钻机。

3. 煤炭智能化开采技术

智能化快速掘进与支护;智能化运输系统;智

能化提升系统;智能化供配电系统;综采工作面智能化控制系统及操作运行模式,矿井清洁生产 and 声、磁、电降尘法技术与装备,工作面三机协同联动控制。

4. 高效安全煤与瓦斯共采技术

建立煤与瓦斯共采新理论和模型,煤与煤层气协调开发,低浓度瓦斯梯级利用,气液多相压裂技术及装备。

5. 生态环境低损害的煤炭绿色开发技术

地下水资源保护技术,地面充填开采覆岩离层快速探测技术,新型高性能充填材料,采选充系统的监测预警和自动化控制技术,仿自然的地表生态环境采复一体化治理技术,酸性废石堆的长效治理技术、生物、植物修复技术。

6. 复杂条件煤炭开采技术

薄煤层智能机械化开采技术,50 m 巨厚煤层高效开采技术,急倾斜煤层自动化钻煤破煤成套工艺和技术,急倾斜煤层柔性钻煤破煤一体机成套装备,急倾斜煤层原位洗煤零排放清洁开采技术。

(二) 2020—2025 年煤炭技术的变革

2020—2025 年,该阶段煤炭行业将立足本行业固有技术的研究探索,进行拓展性的研究探索,适应经济发展方式的转变,推进多行业交叉,开展转型性的、和其他行业联动的科学与技术探索。具体包括以下 7 个方面。

1. 煤炭资源扩展勘探的理论与技术

陆相与海相、陆地与海洋深部(1 000~2 000 m)与超深部(大于 2 000 m)煤炭资源勘探理论与技术;弄清海洋深部(1 000~2 000 m)与超深部(大于 2 000 m)煤炭资源地质储量、经济可采储量、技术可采储量。

2. 煤与煤系伴生物共采一体化开发理论与技术

煤系是多种宝贵矿产资源赋存的重要层系,煤与煤系伴生物资源如图 1 所示。重点研究煤系气共生藏作用与资源预测模型;煤系稀散金属元素成矿作用与成矿规律;提出煤系矿产资源一体化开发新技术。到 2025 年,要实现煤与煤系伴生物共采一体化开发。

3. 深部矿井降温与地热利用的“煤热共采”技术

发展适合不同开采条件下的深井高效节能降温与地热利用技术,实现矿区零燃煤零排放;深部煤

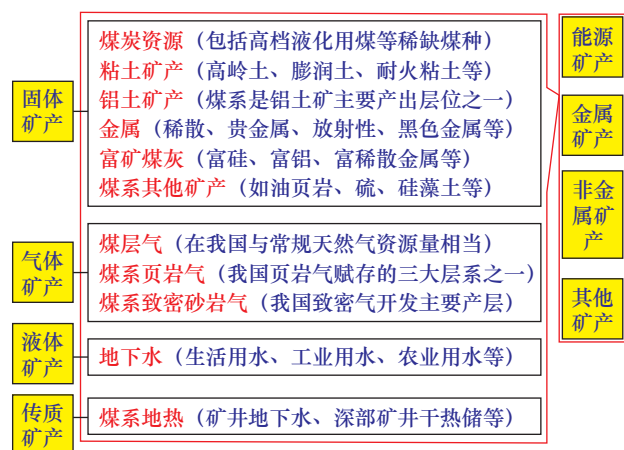


图1 煤与煤系伴生物资源

岩体中热源气体高效交换与开采利用技术。

4. 深部煤岩动力能量利用技术

深井高应力煤层冲击地压及大变形能量释放采集、转化和梯级利用技术。

5. 煤炭生物固—气转化技术

煤地质微生物菌群培养及产气机理、煤炭生物固—气转化抽采技术。

6. 深部煤矿动力灾害防治技术

强冲击倾向性煤岩体浸润改性亲水材料，深部煤层采动区围岩应力场电子计算机 X 线体层扫描实时探测及预警技术，煤岩耦合动力灾综合防治。

7. 难采煤层的化学开采 / 地下气化技术

气化工作面综合探测技术、气化区顶板冒落及地下水防控技术等。

(三) 2025—2030 年煤炭技术的变革

2025—2030 年,该阶段煤炭行业将进行颠覆性、革命性、创新性的科学与技术探索,全面实现科学开采,煤炭科学化水平达到世界领先地位。具体包括以下 7 个方面。

1. “深部”与“采动力学”基础科学原理与理论探索

深部开采是我国煤炭未来发展的必然趋势,但目前对于深部开采的基础理论和概念还未完全弄清。深部不是深度,而是一种力学状态,综合反映深部开采的应力水平、应力状态和围岩赋存属性。未来将从力学角度出发,为深部界定给出一个机理性的、量化的描述。同时,与岩土工程或土木工程不同,煤炭开发过程将对周围岩体产生强烈的采动影响,而煤岩体的采动应力状态与采动方式相关,

在煤炭技术革命后,采动方式将发生变化,因此需要研究煤炭开发的采动力学新理论。

2. 极深部 (2 000 m 及以下) 岩体力学原理与理论探索

极深部 (2 000 m 及以下) 岩体力学理论的研究主要包括以下内容。

① 极深岩体超常本构行为。多国大陆架钻探研究发现,6 000 m 以下深部岩体,地应力呈三向等压静水应力状态,极深岩石具有强流变性态。极深岩体在高地压高地温的极端环境下,其力学行为可能在源头上就呈现非线性、非可逆特征,经典的基于弹簧模型的胡克弹性定律、基于加载实验的宏观唯像弹塑性理论将难以适用或被完全颠覆。分子力学方法更适宜解释能量释放机制和宏观非线性行为,并且把粒子科学、化学、热力学、晶体学有机结合在一起。有可能揭示极深部岩石力学超常行为的微观本质特征并建立微观理论基础。综上,需要研究深部煤炭资源地质赋存规律,研究卸荷岩体力学规律;研究分子岩石力学理论。

② 极深岩体微观环境力学。主要包括:深部环境水、微生物的活化;深部致密岩体中的水气渗流与扩散;深部岩体中的多组份气体的吸附与竞争;深部岩体 CO₂ 地质处置;深部能源开发与能源存储。

③ 极深岩体声磁力学行为。主要包括:深部环境辐照损伤岩体力学,例如:深部岩体核素迁移规律,水、岩、核相互作用,深部高放核废料永久埋置,深部岩体核防护;深部声磁力学与地震预报,例如:地磁场变化与地应力偏转,温压地磁变化,岩层运动与声磁辐射,地磁异常与地震活动等。

3. 深部开采的应力场、裂隙场、渗流场理论及可视化技术

① 应力场可视化。发展三维应力冻结、三维光弹、相移法等技术和理论方法,采用“冻结记忆”和“数字化识别”方法来提取经历不同加载阶段时的内部应力场。

② 裂隙场可视化。开发不同开采应力下煤岩内部裂隙网络演化可视化技术。

③ 渗流场可视化。开发不同开采应力下煤岩内部渗流场可视化技术。

4. 零生态损害的绿色开采新理论与技术

研究零生态损害绿色开采的原理与理论,开发零生态损害绿色开采的技术与装备。开发煤与瓦斯

共采技术、煤与水共采技术、煤与地热共采技术、煤炭资源化学开采及生物开采技术。

5. 深部煤矿地质保障技术及复杂矿井智能探测技术

研制类似月球探测车的复杂矿井智能探测车,可携带多种探测设备,可包括:应力场、裂隙场和渗流场“三场”监测仪器和设备、带实时画面传输的防爆摄像机、温度探测仪器等,实现煤矿井下地质采矿条件及其变化的全面探测。

开发类似无人机似的煤矿井下探测小型智能飞行器,飞行器可以携带一些较小的探测设备与仪器,如带实时画面传输的防爆摄像机、温度探测仪器、瓦斯探测仪器等,实现某些特殊条件下地质与采矿条件探测。

6. 大型煤矿无人化建井及煤炭开发技术

突破大型煤矿无人化建井技术,研制具备信息感知、智能监测、远程控制和自动执行功能的、能够实现煤矿自动化、无人化建井、生产的高可靠性全矿井智能化系统,加快煤炭开采方式转变,实现煤炭生产与经济、社会发展的协调统一。

7. 煤矿井下“采、选、充、电、气”一体化开发技术

煤炭开采可能引起地表塌陷、矿山灾害,煤炭燃烧可能引发温室效应、城市雾霾。因此提出煤矿井下“采、选、充、电、气”一体化开发技术,如图2所示,未来的生态矿山主要体现在电力传输与能源储运。

五、 结语

煤炭“科学开采”新理念体现到技术层面,主要表现在智能、安全、绿色三个方面,三者是相互关联、相互影响的。未来煤炭工业的发展应以科学

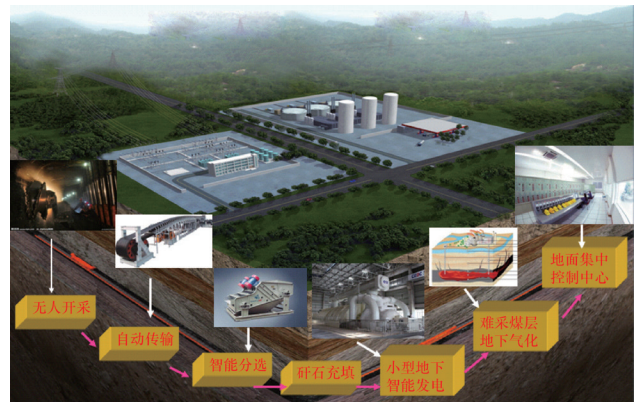


图2 煤矿井下“采、选、充、电、气”一体化开发技术

开采为理念,以技术变革为手段,全面提高煤炭开发利用的科学化水平,建立智能、安全、绿色的社会全面协调的可持续发展的现代化煤炭工业技术体系,实现采掘作业智能化、煤矿生产安全化、生态环境友好化、职工队伍知识化,支撑和保障国民经济和社会发展的能源需求。

基于煤炭科学开采新理念,提出了煤炭技术变革战略路线,即:智能生产技术变革的战略路线——“自动化—智能化—无人化”;安全生产技术变革的战略路线——“被动安全—主动安全—协同安全”;绿色生产技术变革的战略路线——“降低损害—生态恢复—采补平衡”。

提出了2016—2030年不同阶段煤炭开发技术的变革,包括:升级与换代技术、拓展与变革技术;引领与探索技术。提出了不同煤炭发展阶段需要重点研发的理论与技术。

参考文献

- [1] 谢和平,王金华,申宝宏,等.煤炭开采新理念——科学开采与科学产能[J].煤炭学报,2012,37(7):1069-1079.