

# “双碳”目标驱动下煤系伴生资源协同开发技术框架

王方田<sup>1</sup>, 张辰凯<sup>1</sup>, 张村<sup>2\*</sup>, 贾胜<sup>2</sup>

1. 中国矿业大学矿业工程学院; 煤炭精细勘探与智能开发全国重点实验室, 徐州 221116

2. 中国矿业大学(北京)能源与矿业学院, 北京 100083

**摘要** “碳达峰, 碳中和”目标为煤系伴生资源科学开发和高质量发展提供了指引。结合煤系伴生资源赋存特点提出了“绿色低碳、能采尽采、变废为宝”的协同开发利用理念, 论述了煤炭资源在碳中和进程中的定位, 构建了煤炭低碳化、零碳化开发的技术体系。“双碳”目标下煤矿行业将经历煤炭主导、能源耦合及新能源主导3个阶段。结合煤系伴生资源赋存特点, 重点围绕煤热、煤气、煤水等煤系伴生资源, 评述了伴生资源协同开发中低碳、零碳等多种碳捕获、利用与封存技术(CCUS)。技术的发展方向、现状与前景; 采空区高碳材料充填开采、矿区生态修复协同生物质能开发、煤层气驱替开采、煤地下制氢技术等具备煤矿特色的CCUS技术有迫切需求。神东矿区依托地下水库工程实现了煤水共采, 每年增加的碳汇量可以达到5085 t, 基于煤矿地下水库设计构建理念创新提出了一种深井采空区CO<sub>2</sub>封存与地热水抽采协同技术。

**关键词** 碳中和; 煤系伴生资源; 协同开发; 绿色低碳; CCUS技术

能源、资源、环境、安全、健康是21世纪人类面临的五大问题, 它们关联密切、相互作用, 直接影响着国民经济和社会发展。能源资源开发利用为人民生产生活提供物质基础与基本保障, 同时制约着生态环境变化, 例如过量温室气体排放造成全球气候变暖、工业废水污染地下水、生活垃圾导致水与

空气质量下降等, 进而影响人民的健康与国家的安全。为积极应对全球气候变化的挑战, 2020年9月22日习近平主席在第75届联合国大会上承诺中国CO<sub>2</sub>排放力争于2030年前达到峰值, 努力争取2060年前实现碳中和。“双碳”目标将成为煤炭行业高质量发展的主旋律。

收稿日期: 2023-02-16; 修回日期: 2023-03-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(51974297, 52104155); 北京市自然科学基金项目(8212032); 徐州市重点研发计划项目(KC22283); 中央高校基本科研业务费专项(2023YQNY02)

作者简介: 王方田, 教授, 研究方向为煤岩力学响应及煤系伴生资源协同开发, 电子信箱: wangfangtian111@163.com; 张村(通信作者), 副教授, 研究方向为废弃矿井再利用, 电子信箱: cumt-zc@cumt.edu.cn

引用格式: 王方田, 张辰凯, 张村, 等. “双碳”目标驱动下煤系伴生资源协同开发技术框架[J]. 科技导报, 2024, 42(7): 40-55;

doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2023.02.00248

煤炭兼具能源和资源的双重属性,是人民生产生活的物质保障,更是我国能源安全的基石。但是煤炭资源的过度生产消费也严重影响着生态环境。图1展示了中国近20年主要能源碳排放量,每年煤炭消耗占全部一次性能源消耗的50%以上,煤炭生产和利用过程中的碳排放占碳排放总量的70%~80%,而石油、天然气在生产和利用过程中的碳排放约占碳排放总量的15%<sup>[1]</sup>。长久以来煤炭背负高排放、高污染的形象,然而高排放、高污染并非煤炭的特质,只是煤炭未按绿色、低碳、清洁的方式开采利用<sup>[2-5]</sup>。

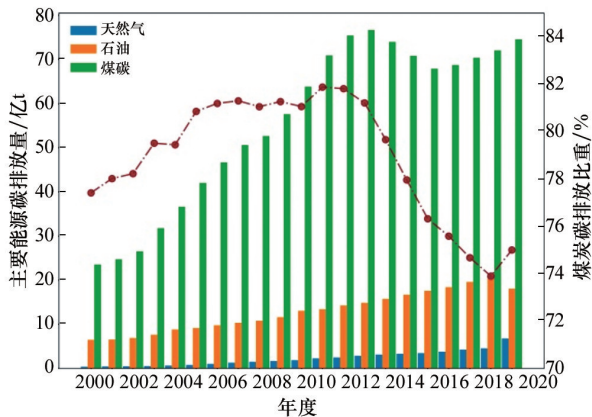


图1 中国主要能源碳排放量

习近平总书记在2014年中央财经领导小组第6次会议上指出,煤炭大规模开发利用带来两大问题:一是煤炭开发造成地下水破坏和地表生态损伤,二是煤炭利用带来大气污染。当前阻碍煤炭绿色低碳开发利用的关键问题有:(1) 煤炭开采过程中水资源浪费、生态环境破坏问题突出,环境负效应明显;(2) 因开采规划设计不合理等造成生产能耗高;(3) 煤炭生产利用过程中产生大量瓦斯、二氧化碳,导致排放量高;(4) 煤矿地下空间设施丰富,但开发利用较少,可能诱发潜在环境灾害及空间设施资源浪费<sup>[6-8]</sup>。

在实现“碳达峰,碳中和”目标的过程中,要积极探寻符合中国国情的煤炭行业转型发展道路。本文以煤炭资源的绿色低碳开发利用为指导思想,结合煤炭行业发展现状,介绍煤及煤系伴生资源开采技术、煤炭生产节能降耗技术、清洁能源开发利用、负碳排放技术。

## 1 煤炭行业碳中和技术路径

煤炭行业现状与碳中和远景目标仍有巨大差距,突出表现为:与碳中和目标匹配的行业规范不完善、煤炭企业碳排放监测与评价技术不成熟、技术研发被动且不充分、碳汇奖励机制不完善<sup>[9]</sup>。在全球碳约束下煤炭行业深化改革的时间十分有限,应尽早布局资源高效开采、煤炭清洁利用、碳捕获、利用与封存技术(CCUS)、新能源等技术,以便应对煤炭行业发展所面临的危机。未来煤炭行业的发展路线应与碳中和远景目标相匹配,以碳达峰、碳中和2个时点为分界,依次经历煤炭主导期、能源耦合期与新能源主导期,如图2<sup>[9]</sup>所示。

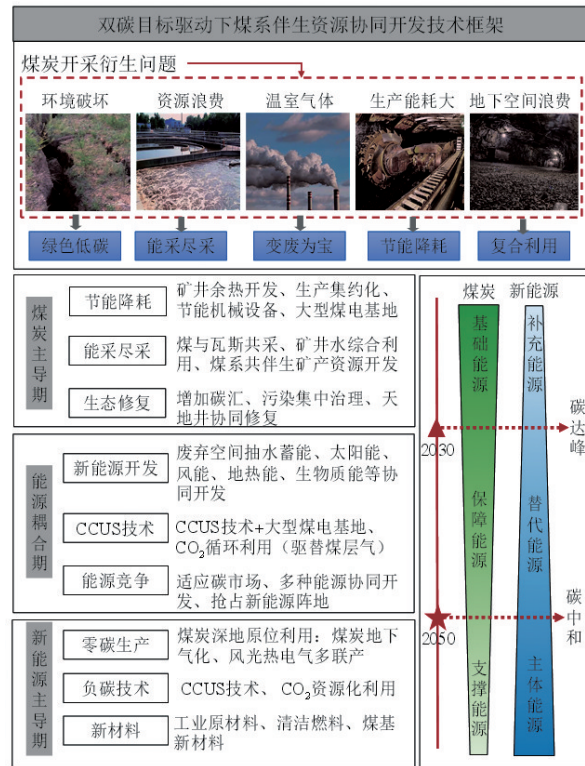


图2 “双碳”目标驱动下煤系伴生资源协同开发技术框架

1) 煤炭主导期(2021—2030年)。碳中和目标早期阶段煤炭资源仍为推动经济和社会发展的基础能源。谢和平等<sup>[1-2]</sup>认为该阶段煤炭总体需求量不会产生较大波动,煤炭生产总量维持在35亿~45亿 t/a。该阶段是煤炭行业转型发展的最佳准备期。煤炭行业要抓住碳达峰前的10年窗口期,实

施碳减排技术路径,主动适应“碳达峰”进程的同时储备支撑高质量发展的先进人才与技术设备。本阶段实现碳减排路径包含4个方面:(1)坚持节能降耗,淘汰高能耗的用煤方式,更新节能技术,采用煤炭高效开采设备,水、瓦斯等煤系伴生资源能采尽采,提升地下空间设施利用效率,加快碳减排关键技术攻关;(2)积极介入新能源产业,加强余热利用,扩大地热能等可再生能源的使用,开展煤电热多联产项目<sup>[8]</sup>;(3)推进煤电一体化,建设大型煤电基地,构建煤电、煤化工等协同发展的循环经济,促进煤炭多元化利用,实现燃煤发电过程中污染物集中治理;(4)考虑以增加碳汇为目标的矿山生态修复技术,实行地井协同修复。在重塑地貌、重构土壤的同时增加生态碳汇<sup>[9]</sup>;开发井下废弃空间,为新能源产业的发展提供空间条件<sup>[10]</sup>。

2) 能源耦合期(2031—2050年)。煤炭资源转化为保障资源,新能源成为替代能源,二者耦合形成独特的能源体系。由于新能源不稳定等关键问题未得到根治,煤炭资源仍然是重要能源,但新能源在能源消费结构中占比逐渐增加,煤炭行业将面临来自碳市场的各种能源企业竞争。煤炭与新能源竞争的过程中,煤炭行业需要主动适应碳市场,赢得可持续发展的机会与空间。煤炭行业应通过科技创新抢占新能源市场:(1)攻关煤炭低碳利用关键技术,推动煤炭开采、加工、运输、利用等全产业链清洁低碳生产,实现煤炭规模化清洁绿色利用;(2)突破CCUS技术瓶颈,合理利用碳汇技术,实现CO<sub>2</sub>的深度减排及循环利用,在政策、投资、示范工程等方面加大投入力度,综合开展CO<sub>2</sub>强化采油、驱替煤层气等项目,力争在碳市场的竞争中处于引领地位;(3)依靠矿区发展可再生能源的先天优势抢占新能源阵地,例如在开采沉陷区内进行风光发电,大落差井巷中开展抽水蓄能,高温矿井发展地热开发利用技术等,使煤炭行业由单一能源开采转向综合性能源开发。

3) 新能源主导期(2050年以后)。随着经济社会的逐渐发达,新能源等先进技术趋于成熟,储能及稳定性等相关问题充分解决,开始进入煤炭工业5.0时代<sup>[5]</sup>。煤矿智能化开采、深部煤层原位利用、

太阳能、风能、抽水蓄能、氢能等技术得到广泛应用,煤炭资源与新能源的地位将发生调换,新能源成为主体能源,煤炭只起到电力调峰、碳质还原剂等用途。这个阶段突出煤炭的原料属性,新的煤炭消费市场形成,煤炭更多作为工业原材料在清洁燃料、煤基新材料等方面做出贡献。煤矿企业可依托先进技术在深部煤层气化制氢、智能开采、生态修复、煤炭清洁转化利用等方面持续深耕。

## 2 煤系伴生资源协同开发关键技术

### 2.1 煤热共采

#### 2.1.1 矿井热害防治

煤矿热害是矿井常见自然灾害之一,随着煤炭资源开发向深部转移,矿井的热害问题也变得日益严重。据不完全统计,中国已有100多处深部矿井工作面温度超过35℃,最高温度接近50℃<sup>[11]</sup>。高温高湿环境损害井下人员身心健康,增加工人失误概率,引发安全事故,因此必须采取有效措施对矿井热害进行防治。矿井热源包括围岩、运行的机械设备、矿物氧化、涌出的热水等。深部围岩放出的热量占50%以上,成为深部矿井主要热源;矿物氧化释放热量约占25%;深部煤层开采难度增加,机械设备运行功耗也相应增大,放出的热量也不容忽视<sup>[12-13]</sup>。

矿井热害防治技术分为非人工制冷技术、人工制冷技术2类<sup>[14]</sup>。非人工制冷技术主要包括优化通风系统、增加风量、控制矿井热源放热、喷淋水冷却新鲜风流、岩层调热圈冷却风流、设置隔热保温层等。除此之外可以采用混有蓄冷剂的充填材料进行充填开采,蓄冷剂可放出大量冷量来维持采场低温环境。人工制冷技术常见措施包括进风井口制冷空调降温、人工制冰降温、水源热泵及热管等新型人工制冷技术。此外智能化温度监控系统也必不可少,实时监测风流温度,依靠人工智能、大数据等技术方法辨识系统内部危险源,提高事故分析的效率。煤矿热害防治及地热能开发技术如图3所示。

#### 2.1.2 矿井余热利用

正在运行矿井或废弃矿井中的水资源蕴含丰富的热能。中国煤炭开采每年破坏约80亿t地下

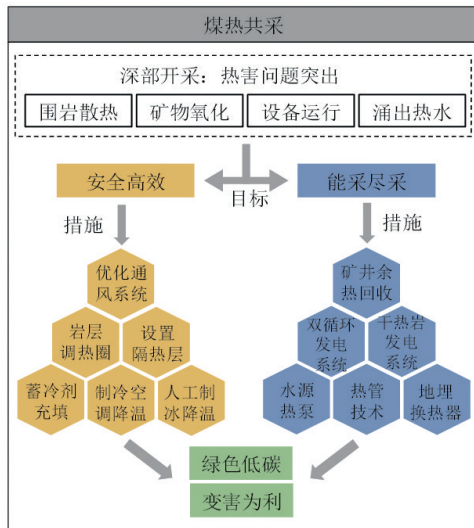


图3 煤矿热害防治及地热能开发

水,最终仅利用约20亿t地下水<sup>[15-16]</sup>,其中可利用的热能至少相当于6万t标准煤。若能将其中的余热资源应用于建筑保温及防冻、洗浴热水、矿区建筑取暖等领域,可有效降低煤矿生产过程中的功耗。

当前,矿井水余热资源利用的关键技术为热泵技术。该技术通过消耗少量高品位能量,将大量不可直接利用的低品位能量转化为热能<sup>[17-18]</sup>。矿井水水量大且稳定、水温常年恒定在20℃左右,它是水源热泵的理想热源。水源热泵具体工作原理如图4所示。制热模式下,低温低压制冷剂进入蒸发器吸收矿井水热量后,经压缩机压缩形成高温高压气体,高温高压制冷剂在冷凝器内向供热水放热,冷凝器一侧获得源源不断的供热水。制冷剂在膨胀阀的作用下,再次转化为低温低压液体<sup>[19-20]</sup>。

当前全世界的能源消耗绝大多数能量用于取暖,而电加热过程中会产生CO<sub>2</sub>等温室气体,造成环境污染问题;水源热泵属于节能设备,与电加热系统相比,可降低功耗70%以上,具有显著的环境效益。矿井水取热方法与其他常规能源取热碳排放量对比见表1<sup>[20]</sup>。因地制宜地开展矿井水余热提取技术,对节能减排具有重要意义,是煤矿企业在“双碳”目标早期阶段可规划的重要技术。

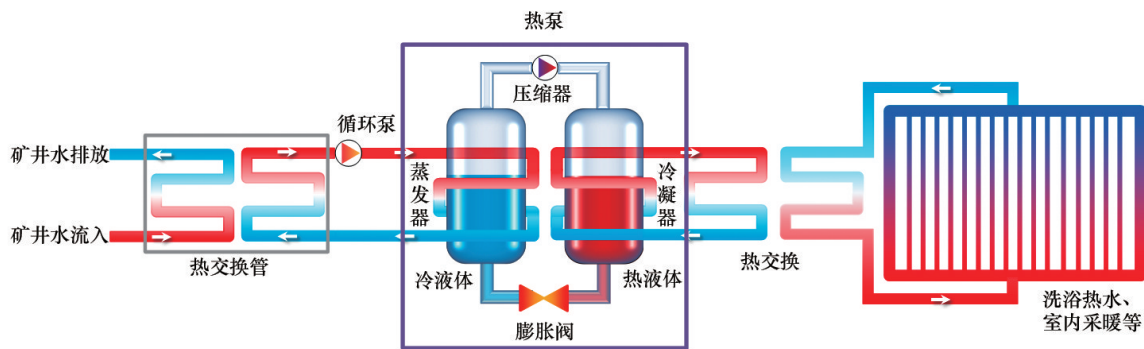


图4 矿井排水余热资源提取工作原理<sup>[20]</sup>

表1 不同取热功率下矿井水取热与其他常规能源取热碳排放量

类别	CO <sub>2</sub> 排放量/(t·a <sup>-1</sup> )			
	1 MW	3.5 MW	5 MW	10 MW
天然气	549.8	1526.9	2619.4	5085.7
电能	663.0	1841.3	3158.6	6132.8
柴油	773.5	2148.2	3685.1	7154.9
矿井水余热	130.0	361.0	619.4	1202.5

### 2.1.3 矿井乏风余热利用

除了矿井水中的余热,矿井回风中同样蕴含十分丰富的热能。回风井在其服务年限内连续运行,

回风流量大且湿度高<sup>[21]</sup>,温度稳定在20℃左右。热泵技术同样可以回收回风中的余热能,工作原理与矿井水余热回收相同。

近年来兴起的热管技术为乏风余热资源的回收提供了新思路。热管技术能够将热量快速传递至热源外,具有高导热性、高传热效率等优点。蒸发段受热时,工作介质蒸发后进入冷凝段冷凝并放出热量,冷凝后的液态工作介质又流回蒸发段吸热,热量不断地从热管一端传递至另一端<sup>[22-23]</sup>。将低温热管系统蒸发段与回风井口连接,其中的工作介质吸收乏风余热,气态工作介质在冷凝段冷凝放

出热量,获取的热量可用于井筒防冻、矿区建筑采暖等。热管工作原理如图5所示。

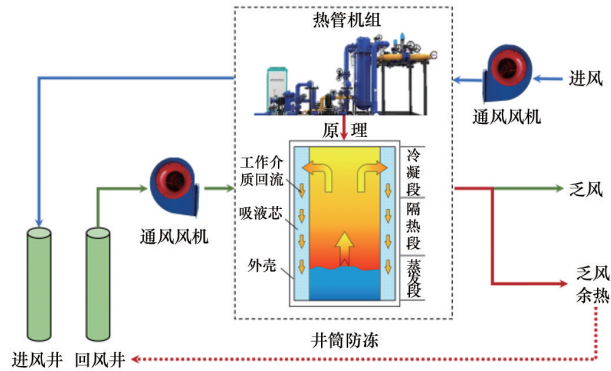


图5 热管工作原理

#### 2.1.4 废弃矿井地热能利用

废弃矿井内蕴藏着丰富的地热等资源,开发价值巨大。废弃矿井地热资源的开发包括双循环地热发电系统和干热岩发电系统2种模式,工作原理分别如图6、图7<sup>[24]</sup>所示。当废弃矿井热源温度较低时,需要利用中间介质来提升热能源转换效率,在这种情况下,通常采用废弃矿井双循环地热发电系统开发地热能。热源流体一般由处理净化后的地下水充当,热源流体在蒸汽发生器中放热冷却后再次注入地下。低沸点工质流体在蒸汽发生器内吸收热量后形成高压蒸汽,进入发电机组发电,做功结束的蒸汽冷凝后可循环利用。

当废弃矿井深度达到1 km以上,可以利用深部矿井独特的地理优势,继续钻至4~6 km,这里的

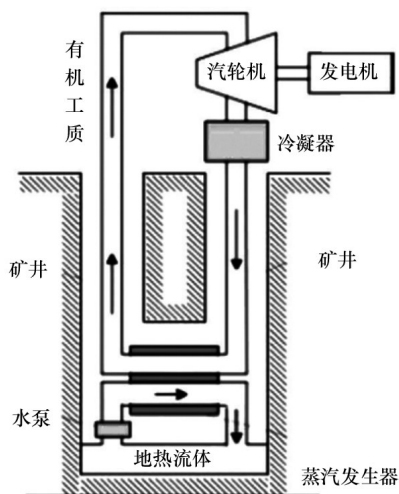


图6 废弃矿井双循环地热发电系统

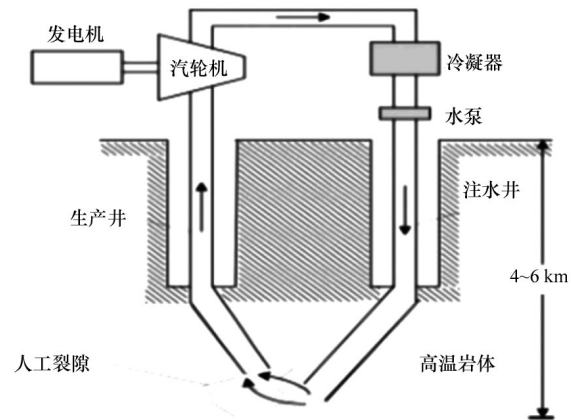


图7 废弃矿井干热岩发电系统

岩层为高温岩体,温度可达120℃以上。通过这种方式开发地热能,可将废弃矿井转化成为干热岩开发矿井。废弃矿井干热岩发电系统需将地表冷水注入地下。地下水经过高温岩体中的人工裂隙后,转化为高温高压蒸汽,进入汽轮机后带动发电机工作,蒸汽冷凝后可循环利用,实现持续发电。

## 2.2 煤气共采

### 2.2.1 瓦斯灾害防治

瓦斯是煤的伴生产物,是煤矿的主要危险源。据统计瓦斯爆炸事故约占煤矿重大事故总数的70%,是煤矿安全生产的最大威胁因素。瓦斯事故多发生在采煤工作面,危害范围大,破坏力强。当前防治瓦斯爆炸事故的措施可分为防爆和抑爆两类。防爆主要包括:优化通风系统、加强瓦斯排放、防治瓦斯聚集、监测瓦斯浓度、避免点火源出现等;抑爆措施主要采用隔爆和抑爆装置,将爆炸限制在小范围内,减少瓦斯事故造成的人员伤亡和经济损失。

瓦斯更是一种宝贵的不可再生能源,距离地表2 km以深范围内煤层气全球储量约 $2.6 \times 10^{14} \text{ m}^3$ ,与常规天然气储量相当,中国煤层气总量大,储量约 $3.681 \times 10^{13} \text{ m}^3$ ,世界排名第3<sup>[25-26]</sup>。煤矿获得瓦斯的途径大致可分为2种:一种是煤与瓦斯共采技术,该方法获得瓦斯浓度较高;另一种是获取乏风中浓度低于1%的低浓度瓦斯。开发利用煤层气既可以缓解温室效应,又可以弥补可再生清洁能源短缺且不稳定的问题。瓦斯灾害防治与瓦斯开采与利用如图8所示。

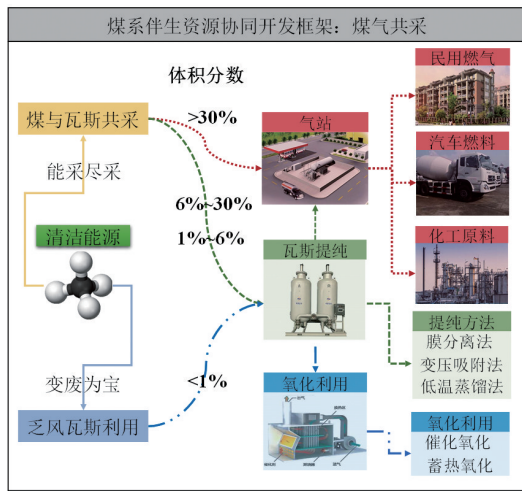


图8 瓦斯灾害防治与瓦斯开采与利用

### 2.2.2 煤与瓦斯共采技术

煤与瓦斯共采根据抽采不同阶段可以分为:采前预测、采中抽采和采后抽采;抽采方式可以分为地面钻井抽采和井下钻孔抽采,如图9<sup>[27-29]</sup>所示。

地面钻井采前瓦斯预抽采如图10所示。通过地面钻井对煤层进行瓦斯预抽采,遵循“先抽后采”的原则,能够从源头上治理瓦斯灾害。该方法得到的瓦斯体积分数大,可以达到90%~100%。但是中国大多数高瓦斯矿井地质条件复杂,煤层透气性低,采前瓦斯预抽采技术实践效果不佳。

地面钻井抽采除了进行采前预抽,还可以实现采中卸压瓦斯抽采和采后采空区瓦斯抽采,具体如图10<sup>[30-31]</sup>所示。该技术适用于保护层开采方法,地



图9 煤与瓦斯共采技术体系

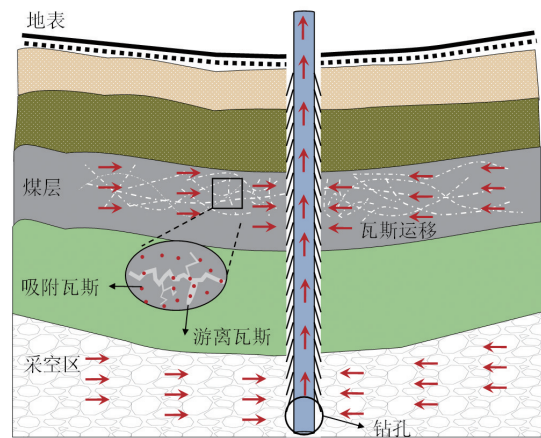


图10 地面钻井抽采卸压煤层与采空区瓦斯

面钻孔由地面穿过卸压煤层直至采空区,实现卸压煤层与采空区瓦斯共同抽采。开采时被保护煤层处于裂隙带与弯曲带,保护煤层的开采使被保护煤层发生大范围卸压,提高了瓦斯的流动性,抽采效果好,抽采瓦斯体积分数可达到30%~90%。

本煤层采前瓦斯钻孔抽采可分为穿层钻孔抽采和顺层钻孔抽采<sup>[32-33]</sup>。穿层钻孔抽采方法在底板岩层中布置穿层钻孔,抽采煤巷瓦斯、条带瓦斯,可提升工作面运输平巷掘进安全性,穿层钻孔布置如图11(a)所示。顺层钻孔抽采方法在回风平巷和运输平巷内向煤层内布置顺层钻孔,抽采开采区域瓦斯,顺层钻孔布置如图11(b)所示。无论哪种方法,抽采效果与煤层透气性、钻孔直径等因素密

切关联。增加煤层透气性,比如深孔松动爆破,可显著增加瓦斯抽采效果。采用瓦斯钻孔抽采方法获得的煤层气瓦斯体积分数在6%~30%。

### 2.2.3 乏风瓦斯吸收

由于煤炭开采过程中严格限制瓦斯浓度,矿井乏风中 $CH_4$ 浓度多在1%以下,浓度低、爆炸危险大、热值低、难以富集及利用。绝大多数煤层气经矿井通风系统直接排放到大气中,造成严重的温室效应和能源损失。据估计全球范围内每年瓦斯排放量占温室气体总量的19%,煤矿瓦斯排放量约占全球瓦斯排放量10%<sup>[34-35]</sup>。目前低浓度瓦斯富集技术包括:真空变压吸附法、低温蒸馏法、 $CH_4$ 水合物分离、膜分离法<sup>[36]</sup>。其中真空变压吸附法已在天然气净化

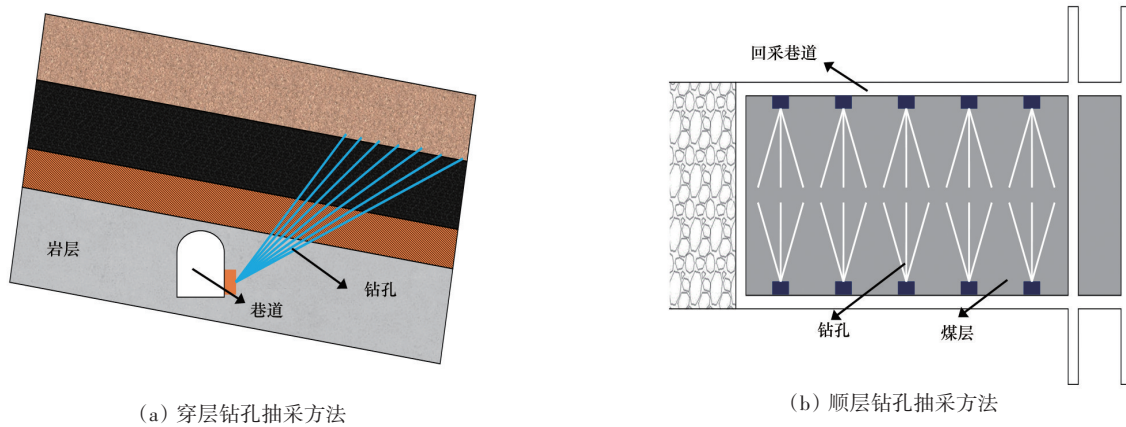


图11 本煤层采前瓦斯钻孔抽采

领域实现工业化,具备成熟技术。此外真空变压吸附法还可以在环境压力条件下吸附,负压条件下脱附,避免高温高压环境出现,安全性能高<sup>[37]</sup>,变压吸附法在富集低浓度瓦斯方面具有良好的应用前景。

真空变压吸附法是利用混合气体中不同组分在吸附剂上的吸附特性及吸附量随压力变化而变化的特性实现气体分离<sup>[26]</sup>,但已有的吸附剂材料对 $\text{CH}_4/\text{N}_2/\text{O}_2$ 的吸附性能并没有出色的分离特性,对于低浓度瓦斯中的 $\text{CH}_4$ 提浓并未取得很好的效果<sup>[34]</sup>。因此,研制新型吸附剂是推动变压吸附法工业化的重点,也是有效解决乏风瓦斯提浓的关键。变压吸附法吸收乏风瓦斯原理如图12<sup>[25]</sup>所示。

#### 2.2.4 瓦斯发电

低浓度的乏风瓦斯的另一用途是燃烧发电。当前乏风瓦斯发电技术主要分为蓄热氧化燃烧技术和催化氧化燃烧技术<sup>[38-39]</sup>。蓄热氧化燃烧发生需要的温度较高,反应产生的高温烟气可带动涡轮发电。图13<sup>[35]</sup>为蓄热氧化反应器原理示意图。高

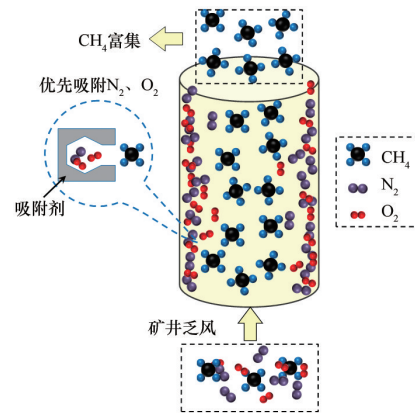


图12 变压吸附法吸收乏风瓦斯

温烟气将反应装置内部温度提升到乏风瓦斯自燃温度时,打开阀1、阀4,乏风按照蓝色箭头方向进入反应装置。当乏风到达上部的蓄热体时,温度升高至 $1000^\circ\text{C}$ 左右,瓦斯开始进行氧化反应并释放大量热能。前半个过程结束后,阀1与阀4关闭,乏风按照绿色箭头方向进入反应装置,进行与前半个过程类似的蓄热氧化反应<sup>[26]</sup>。

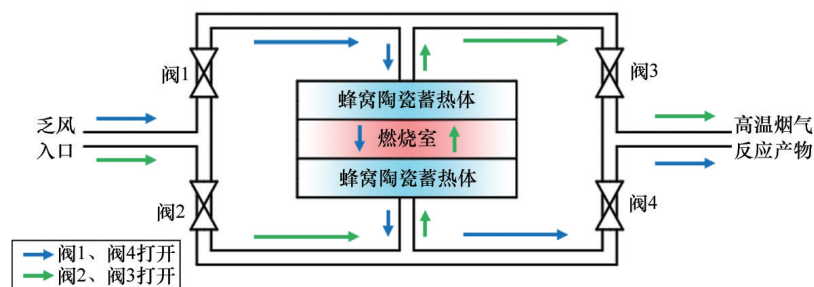


图13 蓄热氧化反应

催化氧化燃烧反应可以在低温下进行,一般为500~800℃。如图14为催化氧化反应器原理示意图。纯净且浓度稳定的瓦斯在燃烧室被加热至催化反应所需的最低温度后,在蜂窝状催化剂表面发生催化氧化反应,燃烧温度可到达700~800℃,反应产生的高温烟气一部分用来膨胀做功,推动发电机发电,另一部分高温烟气通过回热器继续加热原料气体,若能将温度提升至瓦斯发生催化氧化反应的最低温度,则停止使用燃烧装置<sup>[29-30]</sup>。相比于蓄热氧化燃烧技术,催化氧化燃烧可以实现CO、NO<sub>x</sub>等污染物的超低排放,但是反应所需的催化剂载体和活性成分在高温条件下易烧结失活,从而导致催化反应受阻<sup>[38-41]</sup>。推动催化氧化燃烧技术工业化,需要研制热稳定性强、高温下不易失活的新型催化剂。

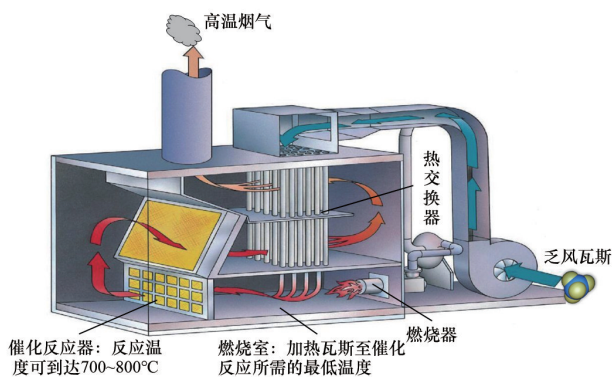


图14 催化氧化燃烧

## 2.3 煤水共采

### 2.3.1 矿井突水事故防治

矿山开采过程中,由于巷道开挖、工作面采动、含水层等原因,大量水体可能突然涌出,淹没矿井,造成突水事故。突水事故不仅威胁井下生产,还会影响矿区生态环境,加剧水土流失,破坏生物多样性。矿山开采前,可利用地质钻孔、物理探测等方法对整个矿区进行探测,探明水源分布状况,在可能发生突水事故的位置设置监测点;开采过程中,实时关注危险位置与关键位置监测参数的变动。当水量较大时,可采用井下堵截水、注浆堵水、疏水降压等方法,减小地下水对矿井安全的威胁。构建矿井地下水监测信息系统,开发突水事故预测算法,提升矿井突水事故防治的信息化与智能化水平。

### 2.3.2 矿井水净化

中国煤炭资源的开发重心逐渐转移至水资源短缺、生态环境脆弱的西部地区。煤炭开采过程中产生大量矿井水,若将其排至地表,不仅需要耗费大量的能源,还会造成水资源严重浪费。针对这些问题,以“导储用”为理念的煤矿地下水库技术体系应运而生<sup>[16,42]</sup>。利用开采形成的采空区建设煤矿地下水库,储蓄开采产生的矿井水、地面雨水、工业生活废水等水资源,通过地下水库系统实现水资源的高效综合利用<sup>[43-44]</sup>。

煤矿地下水库净水机理已受到学术界的广泛关注,具有巨大的实际应用价值。采空区内堆积着含有裂隙、空隙的垮落岩体。储存水体与岩体间发生多种物理化学过程,在一定程度上净化了矿井水,使得原先污浊的水体回灌入地下水库并存储一段时间,在出水口就能有清水流出。水岩相互作用包括水、岩、有机物及微生物在内的复杂作用,主要有吸附作用、溶解作用、水解作用和阳离子交换反应等<sup>[45-46]</sup>,具体如图15所示。

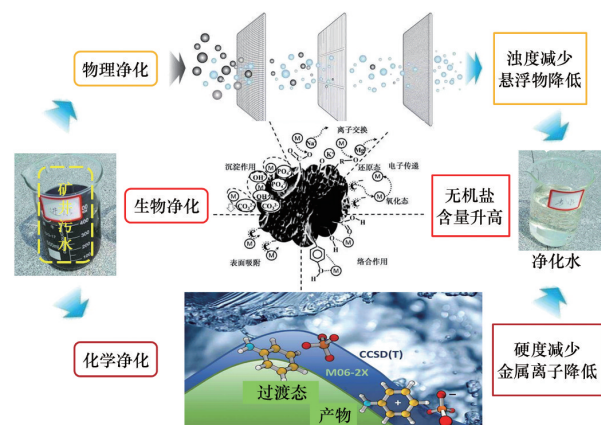


图15 煤矿地下库净化机制

针对西部矿区排出的矿井水中有机氮和无机氮(硝酸盐氮、亚硝酸盐氮或氨氮)含量较高的问题,张庆等<sup>[47]</sup>通过室内模拟实验,开展了矿井水中有机氮及“三氮”在地下水库的迁移转化规律研究。张凯等<sup>[48]</sup>证明了大柳塔煤矿地下水库发生的主要水-岩相互作用为阳离子交换反应。这些研究成果从机制上揭示了水岩作用,解释了煤矿地下水库储净水机制,解释了地下水库Na<sup>+</sup>增多和Ca<sup>2+</sup>减少

的离子变化规律。由于煤矿地下水库技术尚未广泛应用、地下水库环境具有密闭性和复杂性、不同含水层离子浓度差异大等原因,对水岩相互作用机制研究仍不成熟,还具有广阔的研究空间。

### 2.3.3 矿井抽水蓄能发电

废弃矿井如何利用已成为当前一个亟待解决的问题。传统地面蓄能发电站受水文地质条件影响显著,占用大量土地资源,破坏生态环境。若将废弃煤矿、金属矿、露天矿坑等开采遗留空间改造为地下蓄水设施,不仅可以节省土地资源,还能降低发电站建设成本<sup>[49-50]</sup>。煤矿地下水库抽水蓄能电站在电网用电需求低时,将电网富裕电量用于抽取下库中的水至上库,电能转化为水的势能;当电网用电需求较高时,上盘水库的水被释放到下盘水库,水的势能又转化为电能补充电网,具体如图16所示。抽水蓄能电站可以利用电网用电低谷时过剩能量抽水,同时也可以利用风能、太阳能等清洁能源发电抽水<sup>[51-53]</sup>。

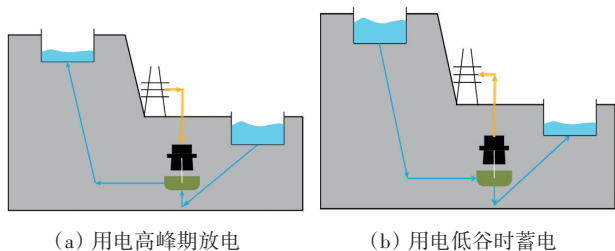


图16 抽水蓄能发电原理

煤炭开采过程中将地下水库技术与抽水蓄能发电技术一体化,可实现水资源的大规模存储与低成本高效利用。利用不同开采水平地下水库的高差,建设地下水库抽水蓄能发电站,规模存储清洁能源,提升电力系统稳定性。地下水库储蓄的水体中蕴含丰富的低品位热能<sup>[53-54]</sup>,加之西部地区光照充足、风力强劲,开展地下水库抽水蓄能,协同开发地热能、风能、太阳能清洁能源,为“双碳”目标下煤矿企业的转型与发展提供了新路径,具体如图17<sup>[54]</sup>所示。

煤矿地下水库抽水蓄能调峰方法启动速度快、可靠性高,促进煤矿企业新能源开发、矿井水循环利用等相关产业发展,保护矿区生态环境,具有巨

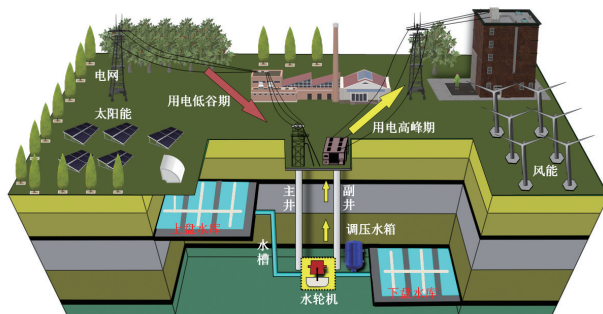


图17 地下水库技术与抽水蓄能发电技术一体化

大的社会和经济价值。由于受到地形条件与水文条件的限制,地下水库抽水蓄能发电站的应用范围受到限制;抽水蓄能系统复杂,生产过程中必须保证地下水库安全运行,大幅提升了生产成本。优化煤矿地下水库抽水蓄能系统,降低水库管理成本,提升水库安全性能,是地下水库抽水蓄能建设亟需解决的关键问题。

## 2.4 煤系共伴生矿产资源共采

### 2.4.1 煤系共伴生矿产资源开发现状

中国煤系分布广、厚度大,多数煤系不仅赋存大量煤炭资源,还共伴生丰富的矿产资源,其中不少伴生矿产资源储量大、可开采价值高<sup>[55]</sup>。我国煤系共伴生矿产资源涉及能源矿产、金属矿产、非金属矿产和水气矿产<sup>[55-56]</sup>。煤系共伴生矿产资源分类及开发现状见表2。随着煤炭开发力度逐渐加大,单一矿种开发模式不能满足能采尽采的要求,且存在较为严重的浪费和环境污染,煤及煤系伴生资源的开发是新时代资源开发模式变革的导向<sup>[57-60]</sup>。

### 2.4.2 煤系共伴生矿产资源开发技术体系

1) 煤及煤系共伴生资源综合勘探:构建天地井协同探测系统,创新以“声、光、电、磁”等为原理的综合地球物理勘探仪器,实时感知、采集、运输多源多参量数据,透明化煤及煤系共伴生矿产资源赋存状态。精准复刻精细化的地质模型,形成三维可视化空间地质体,实现对煤、气、水、地质构造、共伴生资源等地层信息的直观显示<sup>[55]</sup>。

2) 煤系共伴生资源开采综合评价:多矿种协同开采时,各生产系统相互关联,针对单一矿种的资源开采评价体系已不适用于多矿种协同开采。

表2 煤系共伴生矿产资源及开发现状

煤系共伴生矿产资源	代表矿产	开发现状
能源矿产	煤层气、页岩气、油页岩与致密气	“高储低渗”的特点限制了我国煤层气工业发展;页岩气、油页岩与致密气在局部地区进入实质开采阶段
金属矿产	锂、铍、钠、镁、钙、铝、镓、锗、锡、锑等65种	国家能源集团在镓、锗、锂等高价金属元素提取技术研发方面也走在了前列。铝等大宗金属矿物多从煤矸石与粉煤灰中提取
非金属矿产	高岭土、耐火黏土、硅藻土、膨润土、石墨等	高岭土是目前煤系非金属伴生矿的最主要开采矿种;我国煤系共伴生硅藻土、膨润土、石墨储量可观,且品味较高
水气矿产	地下水等	以“导储用”为理念的煤矿地下水库实现了地下水的分级处理、分质利用

综合评价煤系共伴生资源协同开采,详尽分析煤层特征、沉积条件、后生作用等诸多因素,科学确定包括可采储量、可采品味在内的综合评价指标,实现煤系共伴生矿产资源协调共采,最大程度地节约成本,达到能采尽采的目的<sup>[56]</sup>。

3) 合理确定协调开采工序:多资源协调共采各生产系统相互影响,采用错乱的工序将导致后续开发难题及严重经济损失。煤层开采工艺以强烈的地层响应为特点,开采扰动下覆岩运移会直接影响其他矿产资源的安全高效开发。例如煤铀失调共采,可能导致含铀溶浸液沿采动裂隙移动,污染地表土壤、地下水、井下巷道及下部煤层;煤气失调开采可能会发生掘进机碰撞天然气井的情况,导致天然气大量泄漏至采掘空间,引发爆炸、人员中毒和窒息等风险<sup>[57]</sup>。

分析不同矿种开发引起的地层响应与环境负效应,有利于合理确定煤系共伴生矿产资源开采工序。以煤矿为代表的固态沉积层状矿体开采最显著的特点是强烈的地层移动,为了实现多资源间协调开采,该类矿床的开采时要尽可能保护岩层稳定性,降低对其他生产系统的影响,可以选择充填法开采。固态非层状矿体开采的主要方法有溶浸开采、化学开采等方法,这类矿床开采时产生的溶浸液对地下环境造成威胁,特别是含有放射性的有毒有害物质,若控制不当将会产生系列生产问题;流体资源开采时,既要考虑流体资源的采出率问题,又要限制流体资源在开采扰动作用下的无规律迁移,防止有毒气体液体干扰其他资源开采。由于煤

系伴生资源数量多,产状特征差异大,现有开采方法多针对单一矿产资源,不同资源的开采系统相对独立,难以进行多资源共采,应在合理确定各资源开采工序的基础上,探索新的协调开采方法。

4) 多资源协调开采复合灾害防治:不同矿种开采引发的灾害以及对环境的负面影响具有不同的特点。当多种资源协同开采时,这些负面效应相互叠加,形成更为复杂的复合灾害,涉及应力场、能量场、裂隙场、渗流场、温度场和化学场的多场耦合效应。例如煤铀共采时,煤层开采形成的“三带”可能导致铀矿活化,进而造成放射性污染。在煤层气共采过程中,煤层开采引发地表变形并产生沉陷盆地,导致开采影响范围内的天然气井、集运管道等发生变形破坏<sup>[61]</sup>。未来可依托大数据、人工智能、云计算、智能终端、超级计算、5G通信等现代信息技术,感知和揭示煤铀协同开采过程中多场耦合演化规律,监控上覆岩层、地质构造、活化流体的动态运移。基于大数据、人工智能、深度学习等理论,掌握煤及煤系共伴生资源协调开发过程中灾害因子的时空耦合特征,实现风险区域的快速识别、动态圈定、智能评估。

### 3 碳捕获利用与封存(CCUS)技术

#### 3.1 煤炭行业CCUS技术潜力巨大

CCUS被国际公认为是减少温室气体最具潜力的方法。据统计中国有超过2500处矿井以及广泛分布的地下含盐水层,存储容量为 $2.3 \times 10^{11}$  t,存储

潜力大<sup>[62]</sup>。在煤炭开发、煤化工、火力发电等领域大规模、低成本地覆盖应用CCUS技术是煤炭行业“双碳”目标发展的重点<sup>[63]</sup>。中国14个大型煤炭基地煤炭产量占全国总产量的95%，煤电、煤热、煤化工等高耗能企业逐步向西部大型煤炭基地集中。CO<sub>2</sub>排放源在空间上的集中为大规模集群部署CCUS技术创造了条件，同时也为CCUS技术低成本运用提供了可能。另一方面，由于CO<sub>2</sub>的用途广泛，CCUS可以促进煤炭企业的转型发展，促进煤炭、石油、天然气、电力、化工等不同行业之间的深度合作，拓宽煤矿行业经营领域，提升自身竞争力。CO<sub>2</sub>驱替煤层气(CO<sub>2</sub>-ECBM)技术是煤矿企业部署CCUS技术最直接的方式；利用采空区等井下废弃空间及不可采煤层，采用充填开采等方式封存CO<sub>2</sub>

也是极具前景的CCUS技术方向<sup>[64]</sup>；上述技术能够在实现煤系伴生资源协同开发的同时实现CO<sub>2</sub>的地下封存。

### 3.2 煤系资源协同开发的CCUS技术

1) 充填开采与CO<sub>2</sub>封存联合技术：随着开采强度的增大，浅部煤炭资源日益减少，国内很多矿井都进入深部煤炭资源开发状态。随着开采深度的增加，冲击地压、巷道围岩大变形等工程灾害频繁发生，大量实践表明，超高水材料充填开采能有效减少动力灾害的发生。研制新型高碳充填材料，采用充填开采技术在采空区等废弃空间封存CO<sub>2</sub><sup>[65]</sup>，既实现深部煤层安全高效开采又实现CO<sub>2</sub>的地质封存。充填开采与CO<sub>2</sub>封存联合技术如图18所示。

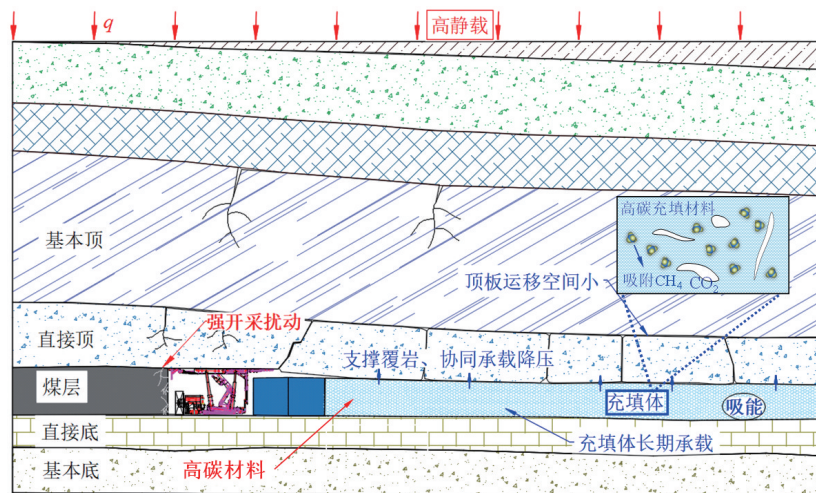


图18 充填开采与CO<sub>2</sub>封存联合技术

2) 生物质能及CO<sub>2</sub>捕获与封存技术：生物质在生长过程中具有碳捕获作用，能够将大气中过量的CO<sub>2</sub>转化为有机质，并以化学能形式储存在生物质中。在煤水共采过程中进行生态修复，利用生物质生长实现太阳能和CO<sub>2</sub>的物质能量转化。收集生物质生长过程中产生的生物质垃圾，将其作为能源进行供热、发电，生物质能利用过程中产生的CO<sub>2</sub>又可捕获封存起来加以利用<sup>[66]</sup>。此外，煤炭生产过程中产生的煤矿废渣约占煤炭总产量的10%~15%。若将这些固体废物、煤渣与生物质混合，转化为发电燃烧系统中的原料，可有效控制污染，实现变废为宝<sup>[67-68]</sup>。

3) CO<sub>2</sub>驱替煤层气(CO<sub>2</sub>-ECBM)技术：CO<sub>2</sub>-ECBM技术是提高煤层产量的途径之一。已有不少研究表明煤层对CO<sub>2</sub>的吸附能力大于对CH<sub>4</sub>的吸附能力，可以使用CO<sub>2</sub>驱替煤层中的CH<sub>4</sub>，使得CH<sub>4</sub>由吸附状态变为游离态，既强化了煤层气的开采，又实现了CO<sub>2</sub>地质封存<sup>[69]</sup>。由于煤矿得天独厚的地理优势，开展CO<sub>2</sub>-ECBM具有巨大的潜力，不可采煤层、构造破坏煤层、高瓦斯难采煤层、极薄煤层等都可以用来作为CO<sub>2</sub>长久封存场地。CO<sub>2</sub>驱替煤层气技术不仅有巨大的环境意义，而且具备很大的经济效益。因此CO<sub>2</sub>-ECBM被认为是一种极具前途的CCUS技术，有望在不久的将来实现商业化。

4) 煤地下气化制氢(UCG)技术:氢气既是一种极其重要的化工工业原料,也是一种世界公认的新型清洁能源。随着燃料电池技术的迅速发展,氢气的地位也越来越重要。近年来我国制定了大量政策,将氢气开发和燃料电池技术创新作为重大发展方向,未来氢需求将会迅速增长<sup>[70]</sup>。目前,在中国通过天然气、煤炭等化石能源生产氢是主流技术路线。煤制氢的关键技术是先将固态的有机物通过多相化学反应转变为气态产物,再将气态产物进一步转换为氢,该过程将煤中的有机物质最大限度

转化为产品,气化后残留物只有灰渣。地下气化技术不需要布置复杂的采煤系统,煤炭不必升井,总投资低,比地面气化更具优势。煤地下制氢具体原理与工艺如图19所示。进气孔进入的气化剂,有效成分为 $O_2$ 和水蒸气。气化剂进入氧化区后, $O_2$ 与煤发生多相化学反应,产生的热量可使气化炉温度达到 $900\sim 1500^\circ C$ 。高温条件下 $CO_2$ 、水蒸气与煤层接触后产生 $CO$ 及 $H_2$ 。煤层在高温作用下挥发组份热分解,产生干馏煤气。煤层在气化剂的作用下,形成了含有 $H_2$ 、 $CO$ 、 $CH_4$ 的气态产物<sup>[67]</sup>。

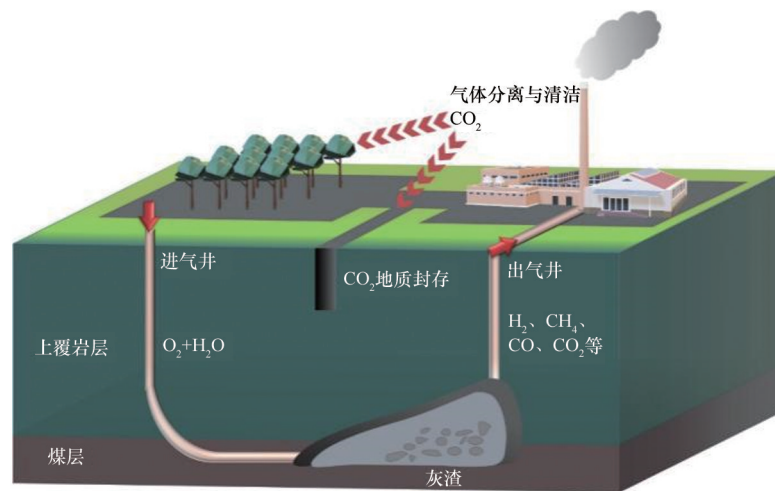


图19 煤炭地下气化过程

中国现阶段应大力发展煤气化制氢技术,联合UCG技术与CCUS技术,建立完整一体化产业链,主要包括:煤制氢、 $CO_2$ 捕获与运输、 $CO_2$ 驱气、地质封存一体化。这样可以减少煤炭的使用,提高清洁能源的利用率,降低 $CO_2$ 的排放和运输成本,提高 $CO_2$ 的利用效率,增加煤层气产量的同时达到封存 $CO_2$ 的目的,兼顾经济效益与环境效益。

#### 4 煤水共采固碳工程实践

黄河流域煤炭资源富集与生态环境脆弱并存,分布有中国九大煤炭基地,高强度煤炭开采耗水量巨大,平均吨煤排水量2 t以上,加剧了流域水资源短缺。因此,亟待破解煤炭资源开发与生态环境保护的矛盾,构建黄河流域高质量发展新格局。矿井地下水资源的提出对实现生态脆弱矿区矿井采

空区地下空间及矿井水资源化、能源化利用,促进环境生态保护提供了有益借鉴。煤矿地下水库技术涉及水源预测、煤柱坝体与人工坝体稳定性控制、地下水库水质演化、安全保障技术等多个基础理论和技术难题<sup>[71-73]</sup>。矿井地下水库技术在神东矿区大柳塔煤矿、补连塔煤矿等多个矿井进行了推广应用,实现了矿井污废水“零排放”目标和煤炭绿色开采,矿井水利用率超90%。依托地下水库生态治理面积达 $339\text{ km}^2$ ,矿区植被覆盖率达64%。许多研究人员基于较长时期生态系统碳储量的变化,研究了中国森林生态系统碳汇,得出的森林植被碳汇系数介于 $0.15\sim 0.739\text{ t}/(\text{hm}^2\cdot\text{a})$ <sup>[74-75]</sup>,假设依托地下水库生态治理面积 $339\text{ km}^2$ 均为森林植被,考虑到矿区林木多为低矮植被,本文取已有文献的最低值 $0.15\text{ t}/(\text{hm}^2\cdot\text{a})$ 计算,则神东矿区生态治理面积每年增加的碳汇量达到了5085 t。

矿井地下水库除了储水供水作用外,以矿井地下水库为基础可以构建采空区 CO<sub>2</sub>封存与地热抽采协同系统。如图 20 所示,矿井附近的 CO<sub>2</sub>捕集设备将高纯度 CO<sub>2</sub>输送至工厂储存罐,储存部分捕集 CO<sub>2</sub>,随后由管路将 CO<sub>2</sub>输送至采空区附近硐室进行加压液化,由采空区注射井注入破碎岩体内;在采空区抽采井处抽采地热水,由井筒提升至地面,由地面热泵系统换热后将热量供给居民区,矿井水

经净化后可按需供给矿区生产或生产使用。为满足碳封存和地热抽采的需要,基于煤矿地下水库设计构建的理念提出改造技术,包括:采空区储层防渗处理,建设高抗渗性人工坝体和煤柱坝体的多重防渗体系;盖层密封,构建多关键层的复合盖层及综合评价体系;建立超临界 CO<sub>2</sub>注射和地热抽采利用系统;设立近远场综合 CO<sub>2</sub>泄漏监测系统<sup>[72]</sup>。

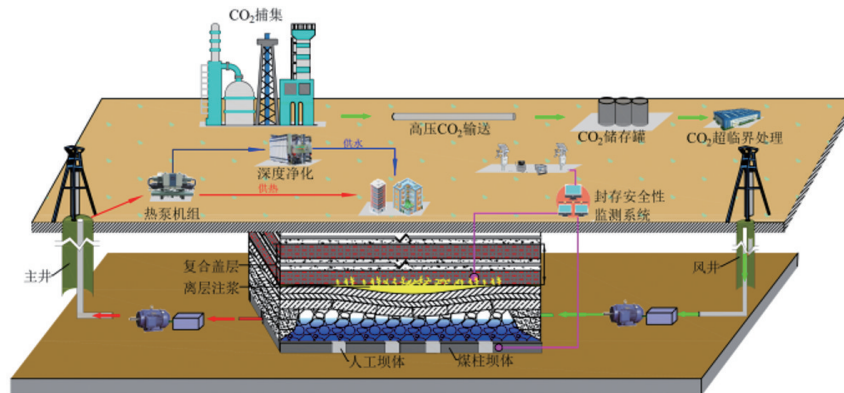


图 20 采空区 CO<sub>2</sub>封存与地热抽采协同系统

## 5 结论

1) 煤矿行业在实现双碳目标的过程中将经历煤炭主导期、能源耦合期、新能源主导期 3 个阶段。煤炭主导期紧跟碳达峰进程,及早布局低碳绿色开采技术;在能源耦合期煤矿行业将面临各种能源的竞争,为了抢占新能源市场,应注重新能源的开发与利用;新能源主导期将步入煤炭工业 5.0 时代。推动煤炭行业朝着高质量方向发展,实现绿色开采与开发清洁能源并重才是实现“双碳”目标的关键。

2) 碳中和技术路径的内涵主要包括:煤热共采、煤水共采、煤气共采、煤系共伴生矿产资源共采、二氧化碳捕集利用与封存技术、煤地下制氢技术、生物质能技术等。煤炭资源开发过程中应该秉承“绿色低碳、能采尽采、变废为宝”的协同开发利用理念。在各个生产环节采用高效节能设备,利用热泵、热管、变压吸附、地下水库等技术,综合开展节能降耗项目。

3) 煤炭资源开发过程中应充分利用井下废弃空间,主动扩大清洁能源的使用,通过构建煤矿地下水库、地下抽水蓄能发电站、弃矿井干热岩发电

系统,将电能、太阳能、热能、风能、抽水蓄能融入煤炭开发过程,降低煤炭生产过程中的碳排放;推动煤炭深地原位利用,利用煤地下制氢技术开采深部难采煤层,提高煤炭资源可采储量的同时扩大清洁能源氢气的利用。

4) 神东矿区依托地下水库生态治理面积 339 km<sup>2</sup>,每年增加的碳汇量可以达到 5085 t。基于煤矿地下水库设计构建理念创新提出了一种深井采空区 CO<sub>2</sub>封存与地热水抽采协同技术,在采空区一端注射超临界 CO<sub>2</sub>的同时,在另一端抽采地热水,利用煤矿采空区的地下空间实现矿井水利用、地热开采和 CO<sub>2</sub>封存,抵消部分碳封存成本。

## 参考文献 (References)

- [1] 谢和平,任世华,谢亚辰,等. 碳中和目标下煤炭行业发展机遇[J]. 煤炭学报, 2021, 46(7): 2197-2211.
- [2] 谢和平,吴立新,郑德志. 2025 年中国能源消费及煤炭需求预测[J]. 煤炭学报, 2019, 44(7): 1949-1960.
- [3] 平新乔,郑梦圆,曹和平. 中国碳排放强度变化趋势与“十四五”时期碳减排政策优化[J]. 改革, 2020(11): 37-52.

- [4] 康红普, 王国法, 王双明, 等. 煤炭行业高质量发展研究[J]. 中国工程科学, 2021, 23(5): 130-138.
- [5] 陈浮, 于昊辰, 卞正富, 等. 碳中和愿景下煤炭行业发展的危机与应对[J]. 煤炭学报, 2021, 46(6): 1808-1820.
- [6] 袁亮. 我国煤炭工业高质量发展面临的挑战与对策[J]. 中国煤炭, 2020, 46(1): 6-12.
- [7] 谢和平, 钱鸣高, 彭苏萍, 等. 煤炭科学产能及发展战略初探[J]. 中国工程科学, 2011, 13(6): 44-50.
- [8] 张胜利, 焦洪桥, 杨靖华, 等. 碳中和背景下现代煤化工产业生态链布局和创新发展战略[J]. 中国煤炭, 2022, 48(8): 7-13.
- [9] 卞正富, 于昊辰, 韩晓彤. 碳中和目标背景下矿山生态修复的路径选择[J]. 煤炭学报, 2022, 47(1): 449-459.
- [10] 袁亮. 推动我国关闭/废弃矿井资源精准开发利用研究[J]. 煤炭经济研究, 2019, 39(5): 1.
- [11] 李孜军, 徐宇, 贾敏涛, 等. 深部矿井岩层地热能协同开采治理热害数值模拟[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(3): 671-680.
- [12] 刘晓鑫, 胡汉华. 我国深部矿井热害治理设想和展望[J]. 矿业研究与开发, 2011, 31(1): 84-87.
- [13] 徐宇, 李孜军, 贾敏涛, 等. 深部矿井热害治理协同地热能开采构想及方法分析[J]. 中国有色金属学报, 2022, 32(5): 1515-1527.
- [14] 何满潮, 徐敏. HEMS深井降温系统研发及热害控制对策[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(7): 1353-1361.
- [15] 蓝航, 陈东科, 毛德兵. 我国煤矿深部开采现状及灾害防治分析[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(1): 39-46.
- [16] 顾大钊, 张勇, 曹志国. 我国煤炭开采水资源保护利用技术研究进展[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(1): 1-7.
- [17] 张吉雄, 汪集暘, 周楠, 等. 深部矿山地热与煤炭资源协同开发技术体系研究[J]. 工程科学学报, 2022, 44(10): 1682-1693.
- [18] 沈明云. 热泵技术与应用[J]. 工程建设与设计, 2022(12): 56-58.
- [19] Hall A, Scott J A, Shang H. Geothermal energy recovery from underground mines[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011, 15(2): 916-924.
- [20] Menéndez J, Ordóñez A, Fernández-Oro J M, et al. Feasibility analysis of using mine water from abandoned coal mines in Spain for heating and cooling of buildings[J]. Renewable Energy, 2020, 146: 1166-1176.
- [21] 向艳蕾, 杨允, 闫文瑞, 等. 煤矿回风余热资源利用技术现状与展望[J]. 煤质技术, 2021, 36(6): 77-83.
- [22] 吕向阳, 翟宇, 赵旭. 整体式热管换热技术在煤矿井口防冻系统中的应用[J]. 煤炭工程, 2021, 53(3): 57-61.
- [23] 辛嵩, 张兆鹏. 矿井回风余热分离式热管回收技术研究[J]. 矿业研究与开发, 2020, 40(11): 160-164.
- [24] 谢友泉, 高辉, 苏志国, 等. 废弃矿井地热资源的开发利用[J]. 太阳能, 2020(10): 13-18.
- [25] Wang X X, Zhou F B, Ling Y H, et al. Overview and outlook on utilization technologies of low-concentration coal mine methane[J]. Energy & Fuels, 2021, 35(19): 15398-15423.
- [26] Lu B, Shen Y H, Tang Z L, et al. Vacuum pressure swing adsorption process for coalbed methane enrichment[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2021, 32: 264-280.
- [27] 张村, 屠世浩, 袁永, 等. 卸压瓦斯抽采的工作面推进速度敏感性分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2017, 34(6): 1240-1248.
- [28] 张村, 屠世浩, 袁永, 等. 卸压开采地面钻井抽采的数值模拟研究[J]. 煤炭学报, 2015, 40(增刊2): 392-400.
- [29] Wang F T, Ren T, Tu S H, et al. Implementation of underground longhole directional drilling technology for greenhouse gas mitigation in Chinese coal mines[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2012, 11: 290-303.
- [30] Zhang C, Zhang L, Tu S H, et al. Experimental and numerical study of the influence of gas pressure on gas permeability in pressure relief gas drainage[J]. Transport in Porous Media, 2018, 124(3): 995-1015.
- [31] Zhang C, Tu S H, Bai Q S, et al. Evaluating pressure-relief mining performances based on surface gas venthole extraction data in longwall coal mines[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2015, 24: 431-440.
- [32] Wang F T, Zhang C, Liang N N. Gas permeability evolution mechanism and comprehensive gas drainage technology for thin coal seam mining[J]. Energies, 2017, 10(9): 1382.
- [33] Zhang C, Tu S H, Chen M, et al. Pressure-relief and methane production performance of pressure relief gas extraction technology in the longwall mining[J]. Journal of Geophysics and Engineering, 2017, 14(1): 77-89.
- [34] Abd A A, Othman M R, Naji S Z, et al. Methane enrichment in biogas mixture using pressure swing adsorption: Process fundamental and design parameters[J]. Materials Today Sustainability, 2021(11/12): 100063.
- [35] 金刚, 王康. 矿井乏风瓦斯蓄热氧化发电关键技术研究[J]. 科学技术创新, 2020(26): 193-194.
- [36] 高鹏飞. 乏风瓦斯提浓利用技术现状及展望[J]. 矿业安全与环保, 2017, 44(3): 95-99.
- [37] 李强, 龙伍见, 霍春秀. 矿井乏风瓦斯氧化发电技术研

- 究进展[J]. 矿业安全与环保, 2012, 39(4): 81-84.
- [38] 原丽俊. 煤矿通风瓦斯氧化技术及氧化热利用方式探讨[J]. 石化技术, 2020, 27(1): 268-269.
- [39] 李海波. 煤矿通风瓦斯氧化技术及氧化热利用方式[J]. 黑龙江科学, 2021, 12(16): 106-107.
- [40] 韩甲业, 应中宝. 我国低浓度煤矿瓦斯利用技术研究[J]. 中国煤层气, 2012, 9(6): 39-41.
- [41] 何满潮, 谢和平, 彭苏萍, 等. 深部开采岩体力学研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(16): 2803-2813.
- [42] 顾大钊. 煤矿地下水库理论框架和技术体系[J]. 煤炭学报, 2015, 40(2): 239-246.
- [43] 张村, 贾胜, 吴山西, 等. 基于矿井地下水库的煤矿采空区地下空间利用模式与关键技术[J]. 科技导报, 2021, 39(13): 36-46.
- [44] 张村, 宋子玉, 赵毅鑫, 等. 矿井地下水库破碎岩体迁移的DEM-CFD耦合分析[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2021, 3(4): 85-95.
- [45] 沈照理, 王焰新, 郭华明. 水-岩相互作用研究的机遇与挑战[J]. 地球科学, 2012, 37(2): 207-219.
- [46] 张村, 韩鹏华, 王方田, 等. 采动水浸作用下矿井地下水库残留煤柱稳定性[J]. 中国矿业大学学报, 2021, 50(2): 220-227, 247.
- [47] 张庆, 罗绍河, 赵丽, 等. 有机氮和“三氮”在西部煤矿区地下水库迁移转化的实验研究[J]. 煤炭学报, 2019, 44(3): 900-906.
- [48] 张凯, 高举, 蒋斌斌, 等. 煤矿地下水库水-岩相互作用机理实验研究[J]. 煤炭学报, 2019, 44(12): 3760-3772.
- [49] 谢和平, 侯正猛, 高峰, 等. 煤矿井下抽水蓄能发电新技术: 原理、现状及展望[J]. 煤炭学报, 2015, 40(5): 965-972.
- [50] 李庭, 顾大钊, 李井峰, 等. 基于废弃煤矿采空区的矿井水抽水蓄能调峰系统构建[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(9): 93-98.
- [51] 张文亮, 丘明, 来小康. 储能技术在电力系统中的应用[J]. 电网技术, 2008, 32(7): 1-9.
- [52] 卞正富, 朱超斌, 周跃进, 等. 黄河流域九省区废弃矿井抽水蓄能利用潜力评估[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(12): 51-64.
- [53] Fan J Y, Xie H P, Chen J, et al. Preliminary feasibility analysis of a hybrid pumped-hydro energy storage system using abandoned coal mine goafs[J]. Applied Energy, 2020, 258: 114007.
- [54] Zhang C, Wang F T, Bai Q S. Underground space utilization of coalmines in China: A review of underground water reservoir construction[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021, 107: 103657.
- [55] 孙升林, 吴国强, 曹代勇, 等. 煤系矿产资源及其发展趋势[J]. 中国煤炭地质, 2014, 26(11): 1-11.
- [56] 崔艳. 我国煤系共生矿产资源分布与开发现状[J]. 洁净煤技术, 2018, 24(增刊1): 27-32.
- [57] 王文, 杨昆, 何云, 等. 煤-气交叉开采区天然气井防碰撞预警技术研究[J]. 矿业科学学报, 2022, 7(4): 490-497.
- [58] 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.
- [59] 代俊峰, 李增华, 许德如, 等. 煤型关键金属矿产研究进展[J]. 大地构造与成矿学, 2021, 45(5): 963-982.
- [60] 宁树正, 曹代勇, 朱士飞, 等. 煤系矿产资源综合评价技术方法探讨[J]. 中国矿业, 2019, 28(1): 73-79.
- [61] 王文, 任建东, 王付斌, 等. 鄂尔多斯盆地“煤气走廊”开采模式研究[J]. 金属矿山, 2019(10): 23-31.
- [62] 李嘉豪, 王怀林, 肖前华, 等. 全球CO<sub>2</sub>驱油及封存技术发展现状[J]. 重庆科技学院学报(自然科学版), 2022, 24(4): 103-108.
- [63] 冯潇婷, 何耀宇. 碳中和视角下的煤炭工业技术创新[J]. 能源技术与管理, 2022, 47(5): 49-51, 90.
- [64] 杨方亮, 许红娜. “十四五”煤炭行业生态环境保护与资源综合利用发展路径分析[J]. 中国煤炭, 2021, 47(5): 73-82.
- [65] 何学秋, 田向辉, 宋大钊. 煤层CO<sub>2</sub>安全封存研究进展与展望[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(1): 212-219.
- [66] 张贤, 李凯, 马乔, 等. 碳中和目标下CCUS技术发展定位与展望[J]. 中国人口·资源与环境, 2021, 31(9): 29-33.
- [67] 刘荣, 罗海峰, 熊登宇, 等. 生物质燃烧技术研究现状[J]. 农业工程与装备, 2022, 49(1): 8-14.
- [68] 刘淑琴, 畅志兵, 刘金昌. 深部煤炭原位气化开采关键技术及发展前景[J]. 矿业科学学报, 2021, 6(3): 261-270.
- [69] 侯东升, 梁卫国, 张倍宁, 等. CO<sub>2</sub>驱替煤层CH<sub>4</sub>中混合气体渗流规律的研究[J]. 煤炭学报, 2019, 44(11): 3463-3471.
- [70] 曹军文, 张文强, 李一帆, 等. 中国制氢技术的发展现状[J]. 化学进展, 2021, 33(12): 2215-2244.
- [71] 王方田, 邵栋梁, 牛滕冲, 等. 浅埋高强度开采回撤巷道煤柱受载特征及累积损伤机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(6): 1148-1159.
- [72] Wang F T, Tu S H, Zhang C, et al. Evolution mechanism of water-flowing zones and control technology for longwall mining in shallow coal seams beneath gully topography[J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(19): 1309.

- [73] 王方田, 梁宁宁, 李岗, 等. 复杂应力环境煤柱坝体损伤破坏规律研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2019, 36(6): 1145-1152.
- [74] 方精云, 郭兆迪, 朴世龙, 等. 1981—2000年中国陆地植被碳汇的估算[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 2007, 37(6): 804-812.
- [75] 安英莉, 卞正富, 戴文婷, 等. 煤炭开采形成的碳源/碳汇分析: 以徐州贾汪矿区为例[J]. 中国矿业大学学报, 2017, 46(2): 415-422.

## A collaborative development framework of coal-related resources under carbon peaking and carbon neutrality goals

WANG Fangtian<sup>1</sup>, ZHANG Chenkai<sup>1</sup>, ZHANG Cun<sup>2\*</sup>, JIA Sheng<sup>2</sup>

1. School of Mines, State Key Laboratory for Fine Exploration and Intelligent Development of Coal Resources, China University of Mining Technology, Xuzhou 221116, China
2. School of Energy and Mining, China University of Mining Technology-Beijing, Beijing 100083, China

**Abstract** Combined with the characteristics of coal-related resource endowment, in this article a collaborative development and utilization concept of "safe and efficient, green and low-carbon, energy-saving and consumption reduction, exhaustion of mining, and turning waste into treasure" is proposed, the positioning of coal resources in the process of carbon neutrality is discussed, and a technical system for low-carbon and zero-carbon development of coal is constructed. It is shown that under the dual carbon goals, the coal mining industry will go through three stages: coal dominance, energy coupling, and new energy dominance. Combined with the characteristics of coal-related resources, and focusing on coal-heat, coal-gas, coal-water, and other associated resources in coal measures, the article reviews the development direction, status quo, and prospects of multiple CCUS (carbon capture, utilization, and storage) technologies for collaborative development of associated resources such as low carbon, zero carbon, and so on. There is an urgent need for CCUS technologies with coal mine characteristics, such as high-carbon material filling and mining in goaf areas, collaborative biomass energy development in mining areas, coalbed methane substitution mining and coal underground hydrogen production technology. Shendong mining area has realized coal water co-mining relying on underground reservoir, and the annual increase in carbon sequestration can reach 5085t. Based on the innovation of design and construction concept of underground reservoir in coal mine, a collaborative technology of CO<sub>2</sub> storage and geothermal water extraction in deep mine goaf is also proposed.

**Keywords** carbon neutrality; coal associated resources; collaborative development; green and low carbon; CCUS technology ●



(责任编辑 刘志远)