

引文格式:袁亮,涂庆毅,张通,等.“双碳”战略目标下煤炭甲烷管控技术路径思考[J].安徽理工大学学报(自然科学版),2025,45(5):1-13.

DOI:10.3969/j.issn.1672-1098.2025.05.001

“双碳”战略目标下煤炭甲烷管控技术路径思考

袁 亮^{1,2,3},涂庆毅^{1,2,3},张 通^{1,2,3},李姗姗^{1,2,3},王玥晗^{1,2,3},付 强^{1,2,3}

(1.安徽理工大学深部煤炭安全开采与环境保护全国重点实验室,安徽 淮南 232001;2.安徽理工大学煤炭安全精准开采国家地方联合工程研究中心,安徽 淮南 232001;3.安徽理工大学煤矿瓦斯治理国家矿山安全监察局重点实验室,安徽 淮南 232001)

摘 要:目的 煤炭甲烷管控是双碳战略中非二氧化碳温室气体减排的核心。为了提升煤层气绿色资源利用率和减少甲烷排放加剧的温室效应。**方法** 利用 CiteSpace 软件分析甲烷管控热点方向,系统阐述了我国煤炭甲烷管控的政策与技术现状、面临的挑战、科技创新。结合“双碳”战略目标,开展了煤炭行业碳减排技术路径和甲烷管控技术路线思考。**结果** 提出了深化煤炭甲烷管控理论与技术创新、完善煤炭甲烷管控政策体系和管理机制、推进甲烷管控多领域协同和国际合作、统筹能源安全与“双碳”目标协同实现等四条建议。**结论** 科技创新对推动煤炭行业高质量发展和支撑“双碳”目标实现具有重要的意义。

关键词:煤炭甲烷;甲烷管控;科技创新;煤层甲烷抽采;全浓度利用

中图分类号:TD712 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-1098(2025)05-0001-13

Reflections on Technical Approaches for Coal Mine Methane Management under the "Dual Carbon" Strategic Goals

YUAN Liang^{1,2,3}, TU Qingyi^{1,2,3}, ZHANG Tong^{1,2,3}, LI Shanshan^{1,2,3},
WANG Yuehan^{1,2,3}, FU Qiang^{1,2,3}

(1.National Key Laboratory of Deep Coal Safety Mining and Environmental Protection, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui 232001, China; 2.Joint National-Local Engineering Research Centre for Safe and Precise Coal Mining, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui 232001, China; 3.Key Laboratory of Gas Control in Coal Mines National Mine safety Administration, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui 232001, China)

Abstract: Objective To enhance the green resource utilization rate of coalbed methane and reduce the greenhouse effect exacerbated by methane emissions since coal mine methane management is the core of non-CO₂ greenhouse gas emission reduction in the “dual carbon” strategy. **Methods** This study employs CiteSpace software to analyze research hotspots in methane management. It systematically elaborates on the current policies, technological status, challenges, and scientific innovations in coal mine methane management in China. Combined with the goals of the “dual carbon” strategy, considerations are given to the technological pathways for carbon emission reduction in the coal industry and methane management technology routes. **Results** Four recommendations are proposed: deepening theoretical and technological innovations in coal mine methane management, improving the policy framework and management mechanisms for coal methane control, promoting multi-field collaboration in methane management and international cooperation in methane management, and balancing energy security with the coordinated achievement of “dual carbon” targets. **Conclusion** Technological innovations hold significant implications for advancing high-quality development in the coal industry and

收稿日期:2025-09-12

基金项目:中国工程院科技战略咨询项目(2025-XZ-53-02);国家重点研发计划项目子课题(2023YFC3009001);国家自然科学基金面上项目(52474203)

作者简介:袁亮(1960-),男,安徽淮南人,教授,硕士,研究方向:煤与瓦斯共采、煤炭甲烷管控等。

supporting the realization of "dual carbon" goals.

Key words: coal mine methane; methane control; technological innovation; coalbed methane extraction; full concentration utilization

甲烷作为第二大温室气体,根据 IPCC 第六次评估报告,来自化石能源甲烷的全球增温潜势是二氧化碳的 29.8 倍^[1]。随着全球温室气体排放量持续增加,全球气候治理进入关键节点。《2023~2024 甲烷控排全球进展报告》显示,甲烷造成了自工业革命以来约 0.5℃ 的全球变暖^[2-3]。根据第二十八次缔约方大会(COP28)报告,2023 年是有记录以来最热的一年,全球平均地表温度比工业化前水平高 2.06℃,升温首次超过 2℃^[4]。减少甲烷等非二氧化碳温室气体排放,降低全球气候温室效应,已经成为全球大多数国家的共识。中国甲烷排放约占全球甲烷排放的 18%。其中,能源领域排放约占 44.8%,能源领域甲烷排放中 85% 来自于煤炭开采^[5]。中国是推动甲烷管控的主要国家之一,2023 年 11 月发布的《甲烷排放控制行动方案》中,明确将煤炭甲烷纳入甲烷排放控制的重要组成部分,加大煤炭甲烷管控愈发受到中国政府和社会各界的重视。

甲烷作为煤炭资源的重要伴生产物。据自然资源部 2022 年统计数据,中国埋深小于 2 000 m 的煤炭资源中伴生的甲烷地质资源量约为 30.05 万亿 m³,可采资源量约为 12.5 万亿 m³^[6]。然而,中国大部分富含气煤层属于低渗煤层,渗透率小于 1 mD 的煤层占 72%,煤层渗透率较美国、澳大利亚等产煤国家的煤层渗透率低 2~3 个数量级^[7],低渗煤层对中国煤炭甲烷的高效开发带来了很大困难。此外,由于常年的煤炭资源高强度开采,许多矿区已相继进入深部开采阶段,部分矿井的开采深度甚至超过 1 000 m。深部开采阶段,煤炭与甲烷开采将面临更复杂的构造、高瓦斯压力、高瓦斯含量、高应力、低渗透等难题,深部煤层甲烷安全高效开发的难度将更大。

煤炭甲烷利用方面,在现代煤矿工业生产过程中,浓度在 30% 以上的高浓度瓦斯,大部分可被直接利用,主要用于民用、发电、工业燃料以及化工等方面,利用技术相对成熟,产业化效益较高^[8]。《煤层气(煤矿瓦斯)排放标准》(GB21522-2024)标准将甲烷体积浓度排放限值由 30% 下调至 8%,并引入抽采纯度 $\geq 10\text{m}^3/\text{min}$ 的判定指标,两者同时达标时

必须进行回收利用或销毁处^[9]。然而,目前煤矿抽采或排放甲烷浓度低于 8% 占比达到了 80% 或更高,浓度低于 8% 煤炭甲烷的产业化利用仍然相对困难,这为实现煤炭甲烷管控带来了重大挑战。

“双碳”目标背景下,实现煤炭甲烷管控,对解决煤炭开采过程中的灾害问题、提升绿色资源气体利用率和减少温室效应具有极其重要的意义。如何充分发挥煤矿甲烷安全、资源、环境三重效益,是“双碳”目标实现的关键。本文利用 CiteSpace 软件分析甲烷管控热点方向,系统阐述了中国煤炭甲烷管控的政策与技术现状、面临的挑战、科技创新;结合“双碳”战略目标,开展了煤炭行业碳减排技术路径和甲烷管控技术路线思考,提出了煤炭甲烷管控建议;研究成果对推动煤炭行业高质量发展和支撑“双碳”目标实现具有重要的意义。

1 煤炭甲烷管控研究与技术现状

1.1 煤炭甲烷管控热点研究

通过对甲烷管控文献的年度发文量和被引频次的综合分析,可以有效揭示国内外在该领域的研究现状和发展趋势。图 1 统计了 1985 年至 2024 年间该领域的文献发表情况,由图 1 可知,国际与中国甲烷减排研究的发文数量呈现持续上升的趋势,从时间上可以将甲烷减排研究的演进历程划分为萌芽期(1985~2007 年)、发展期(2008~2015 年)、繁盛期(2016~2024 年)3 个阶段。

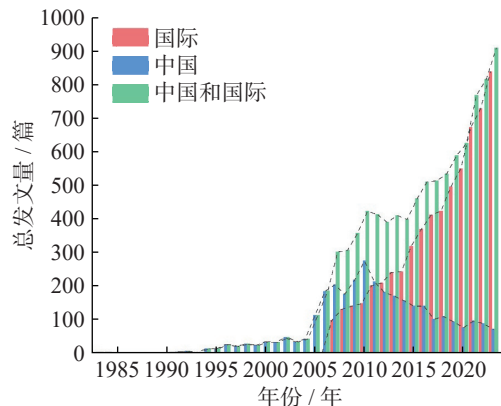


图 1 甲烷管控研究年发文量

从甲烷管控热点研究的国家分布、研究机构分布及期刊发文情况探讨甲烷管控研究的空間分布特征。通过分析甲烷管控研究的地理分布和合作模式,构建了中国甲烷管控研究的合作网络图谱,如图 2 所示。结果表明,当前机构或组织发表的甲烷减排相关文章数量众多,但各机构、组织之间的合作较少,中国科学院大学发文量最多,其次是中国科学院、中国农业科学院、中国矿业大

学等。

进一步探索了甲烷管控研究的方向和热点,如图3所示。中国甲烷管控研究的共现图谱包含723个关键词,网络密度为0.027,核心词汇包括甲烷排放、绿色气体减排、二氧化碳排放和排放等。在关键词中心性上,甲烷减排、温室气体排放、二氧化氮排放等词的中心性较高,说明这些词与其他词联系较为紧密,属于关键节点。



图2 甲烷管控研究机构合作网络

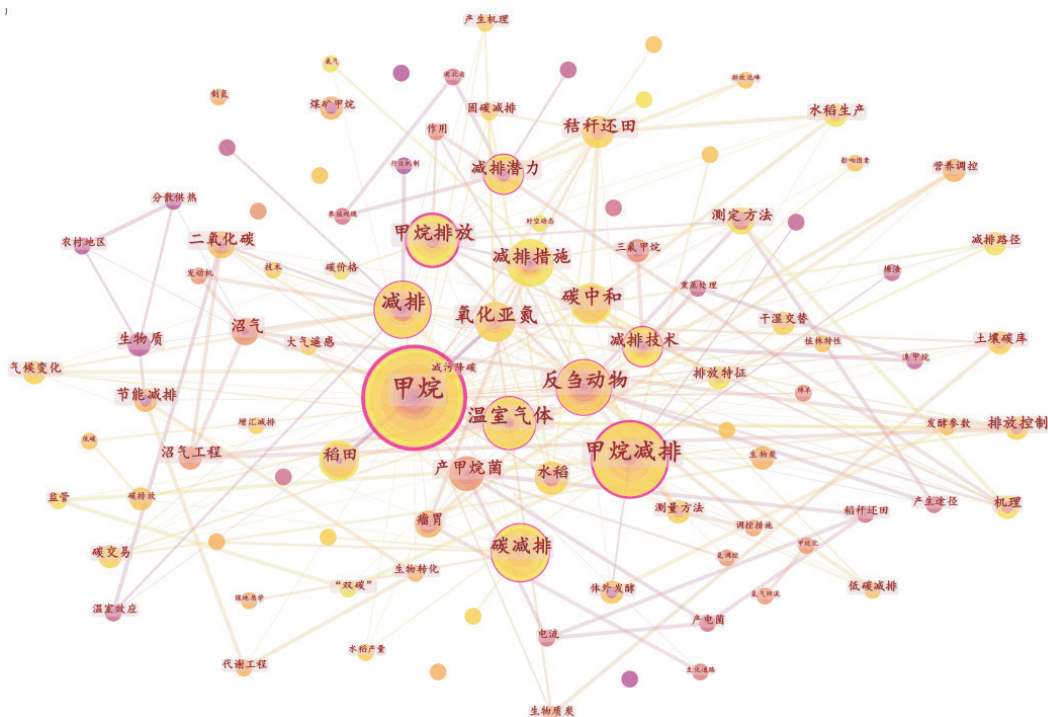


图3 中国甲烷管控研究关键词共现图谱

1.2 煤炭甲烷管控政策发展

多年来,煤炭甲烷管控经历了从安全、资源化利用到温室气体减排的发展,甲烷管控政策趋向于结合安全、资源、环保和气候变化等多要素驱动^[10]。中国通过发布一系列的政策和相关标准,促进了煤矿瓦斯的安全抽采、煤层气资源的高效开发,同时推动了煤炭甲烷的科学管控。

整体上,煤炭甲烷管控政策经历了 3 个阶段^[11]。第 1 阶段为有害气体防治阶段(2005 ~ 2008 年),煤炭甲烷排放管控政策主要围绕矿井甲烷防治和煤矿安全开采而制定推行;2005 年国务院成立煤炭甲烷防治部际协调领导小组,我国围绕甲烷防治工作相继出台了一系列部门规章、规范性文件和技术标准。第 2 阶段为能源气体开发利用阶段(2008 ~ 2020 年),2008 年国家环保总局出台《煤层气(煤炭甲烷)排放标准》,该标准规定甲烷体积分数 $\geq 30\%$ 的煤层气(煤炭甲烷)必须进行资源化利用,为煤炭行业的甲烷排放管控奠定了基础;2014 年国家发展和改革委员会发布《中国煤炭生产企业温室气体排放核算方法与报告指南(试行)》,第一次正式明确了煤炭甲烷的温室气体属性。第 3 阶段为煤炭甲烷温室气体减排阶段(2020 年以后),2020 年原国家质量监督检验检疫总局同原环境保护部联合颁布《关于进一步加强煤炭资源开发环境影响评价管理的通知》,首次提出甲烷温室气体排放管控要求,标志着我国进入第 3 阶段;2021 年生态环境部发布《关于统筹和加强应对气候变化与生态环境保护相关工作的指导意见》,明确在石油天然气、煤炭开采等重点行业试点开展甲烷排放监测,同年 3 月出台的《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要》,首次将甲烷管控纳入五年规划目标,为中国实现甲烷减排提供了依据和保障。

1.3 煤炭甲烷管控技术现状

煤炭甲烷排放管控技术主要包括甲烷排放监测与核算技术、煤矿瓦斯抽采与利用技术、煤层气勘探开发技术和关闭/废弃矿井瓦斯抽采利用技术^[12],初步形成了煤炭采前、采中和采后全生命周期煤炭甲烷管控技术路径^[13-14]。甲烷排放监测与核算方面,全球甲烷浓度资料主要来自全球大气监测

计划,包括地面观测体系、航空观测体系、卫星观测体系和综合观测体系四大子系统^[15]。随着高分 5 号等甲烷监测卫星、“新舟 60”等遥感飞机、甲烷地面监测站的投入运行,中国形成了“空-天-地”立体甲烷排放监测技术体系^[16]。

煤炭甲烷抽采技术方面,煤与瓦斯共采等理论推动了煤炭甲烷治理思路变革,变传统甲烷治理“风排”为主为高效“抽采”的新构想^[17-18]。同时,随着巷道法煤与瓦斯共采、无煤柱法煤与瓦斯共采、地面钻井法煤与瓦斯共采等技术的提出,以及基于卸压增透、压裂增透、生物法、驱替法等基本原理的煤炭甲烷开发关键技术装备的研发,保障了煤矿安全开采和甲烷高效抽采^[19-21]。此外,煤炭甲烷开发正在向精准化、数字化与智能化的技术体系发展。中国、美国、澳大利亚等为代表的产煤大国建立了煤层甲烷高效勘探、开发技术体系。

瓦斯利用技术方面,除高浓度瓦斯直接利用技术外,低浓度与乏风瓦斯利用技术也受到广泛关注。其中,浓度为 9% ~ 30% 的低浓度瓦斯大都采用燃气内燃机瓦斯发电技术进行发电;浓度 3% ~ 9% 的低浓度瓦斯的主要利用方式是发电、供热、热电联产等技术;浓度 $< 3\%$ 的乏风瓦斯利用则主要包括氧化利用(热逆流蓄热氧化、催化逆流氧化和预热催化氧化等)、贫燃燃烧、混燃发电和辅助燃烧(粉煤锅炉、内燃机)等技术^[22-23]。

2 煤炭甲烷管控面临的挑战

2.1 控排与经济高质量发展平衡难题

中国煤炭甲烷管控与经济高质量发展平衡难题主要体现在第二产业占比高、减排时间短和人均排放量大等。国家发展改革委员会预测“十四五”期间中国的 GDP 潜在增长率为 5.0% ~ 5.5%。与此同时,为实现碳达峰碳中和目标,科技部等九部门联合印发《科技支撑碳达峰碳中和实施方案(2022 ~ 2030 年)》,明确提出 2025 年单位 GDP 温室气体排放要比 2020 年下降 18%,2030 年要比 2005 年下降 65% 以上^[24]。然而,当前第二产业占 GDP 比重达 39%,工业生产消耗超过 60% 的能源、贡献 70% 以上的碳排放,高耗能产业仍占较大比重^[25]。这一以传统产业为主的发展模式,已成为实

现“双碳”目标的重要制约。

2022年中国与能源相关的温室气体排放量约为121亿吨。从碳达峰到碳中和,中国计划仅用30年,远短于欧盟的71年、美国的43年和日本的37年,分别为中国的2.4倍、1.4倍和1.2倍^[26]。这意味着中国须以全球最快的降碳速度,在极短时间内完成这一转型。此外,中国单位GDP碳排放量、人均温室气体排放量、人均碳排放量分别约为全球的1.8、1.5、1.7倍,减排压力显著。

2.2 能源结构转型与技术政策短板

中国整体能源结构为“缺气、少油、相对富煤”,2022年中国煤炭占一次能源消费比例高达56.2%,同年石油、天然气对外依存度分别达71.2%、41.2%。据中国工程院预测,至2050年煤炭在我国一次能源消费比例仍将维持在50%左右^[27]。2050年以前,以煤炭为主导的能源结构难以改变,以煤炭为主导能源是国家发展的必然选择。然而,我国能源生产和消费逆向分布特征明显,中东部是主要能源消费区,西部地区是主要能源基地,能源消费区和主要能源基地的甲烷排放量与排放特征差异是开展甲烷管控亟需考虑的难题。

2022年我国万元GDP能耗比2021年下降0.1%,万元GDP温室气体排放下降0.8%,节能降耗减排稳步推进^[28]。然而,煤炭甲烷管控与低碳利用关键技术仍未能实现高水平科技自立。尽管国家已初步建立“双碳1+N”政策体系^[28],煤炭甲烷管控体制机制、地方政策配套仍跟不上碳中和背景下能源转型变革的步伐,推动科技自主与政策协同成为当前甲烷治理的关键。

2.3 低渗煤层致甲烷抽采利用难

我国煤炭资源分布广,煤层的储层条件差异性大,许多矿区含煤地层地质构造复杂,构造煤广泛分布,煤层渗透率低。图4显示了中国主要矿区煤层渗透率与美国主要矿区煤层渗透率对比,大部分中国矿区煤层渗透率比美国矿区煤层渗透率低2~3个数量级,中国煤层甲烷抽采难度大,给矿山安全生产造成严重威胁。

随着开采深度增加,煤炭资源的分布与赋存条件将更加复杂,造成煤层甲烷抽采难度大、抽采浓度低,抽采甲烷利用率低等问题凸显。中国煤层甲

烷年抽采量约240亿 m^3 ,其中井下抽采量约130亿 m^3 。但是,井下抽采浓度超过80%的甲烷占比仅为1%,抽采浓度30%~80%的甲烷占比为5%,抽采浓度9%~30%的甲烷占比为11%,抽采浓度低于9%的甲烷占比为83%,井下抽采甲烷的利用率仅约45%^[29]。因此,针对深部、低渗煤层复杂地质条件,如何提高煤层甲烷抽采率、抽采浓度是当前开展煤炭甲烷管控亟待解决的关键问题。

2.4 甲烷排放源监测核算能力不足

随着高分5号等甲烷监测卫星、“新舟60”等遥感飞机、甲烷地面监测站的投入运行,煤炭行业基本形成了“空天地”立体甲烷排放监测技术体系,并在吕梁、长治、鄂尔多斯等矿区实现了甲烷排放源监测。然而,煤矿生产过程中的甲烷排放源多、排放量大、排放强度高,排放源呈点源、面源等形态,且存在时空分布不均等问题,给煤炭甲烷排放监测工作带来了极大难度。

受预测模型方法与数据资源的限制,煤炭甲烷排放的科学预测还存在诸多难题^[30-31]。各类煤炭甲烷排放监测技术数据融合性不高,数据统计与管理体系不健全,煤炭甲烷排放监测、报告及核查体系尚未完全建立,导致相关基础数据的不确定性较大。中国现有煤炭甲烷排放清单在完整性、准确性、连续性、一致性、透明度等方面都存在一定的不足。甲烷排放清单、排放因子、排放核算范围和边界等的不确定性都会影响煤炭甲烷排放评估与预测。

2.5 技术减排潜力与发展路径不明

煤炭行业开采技术、装备水平参差不齐,甲烷管控与减排技术短板突出,甲烷排放的控制、利用等技术不够成熟,相关研究与科技支撑力量薄弱^[32-33]。较早时,受制于技术与资金投入不足,煤炭甲烷管控与减排措施通常主要以生产安全、资源再利用等为出发点。结合煤层地质条件和资源禀赋现状,经过数十年发展,中国已形普遍应用护层开采、松动爆破、水力化致裂等较成熟的强化抽采技术。近年来,微波辐射、液氮冷侵等增透新技术得到快速发展。甲烷高效抽采技术逐渐具备大范围、精准化和智能化的特征。在甲烷利用方面,目前我国低浓度甲烷(浓度 $<9\%$)利用技术已进入市场化阶段,超低浓度甲烷(浓度 $<3\%$)利用技术尚未

规模化推广, 乏风甲烷(浓度 $<0.75\%$)氧化技术处于初级应用阶段^[34]。然而, 着眼未来甲烷管控与减排行动的需要, 还缺少规模化的甲烷管控技术示范应用与工程实践。

此外, 由于人为源甲烷排放在能源、农业、废弃物等不同领域的产生机理具有较大差异, 所以实现系统性减排还需协同应用技术减排与措施减排。在总体资金投入有限条件下, 亟需加强技术减排与措施减排潜力评估, 根据减排效果差异化的影响因素, 优化配置资金, 统筹不同领域甲烷排放行动进程与减排路径。总体来看, 当前煤炭甲烷管控技术减排与措施减排的潜力并不明晰。

3 煤炭甲烷管控科技创新

3.1 煤炭甲烷治理的工程实践

经过长期探索研究及工程实践, 袁亮等^[35-36]学者发现甲烷治理是困扰淮南、淮北、焦作、平顶山、晋城等高瓦斯或突出矿区煤矿安全开采的重大工程技术难题。为此, 中国数十年来开展了大量工程实践, 包括加大通风量降低开采中瓦斯浓度、引进美国地面开采煤层气技术、引进大钻机井下煤层抽放瓦斯等^[37], 为解决区域甲烷灾害问题提供了技术支撑。然而, 由于煤矿瓦斯赋存与流动存在显著的地质特殊性, 引进的技术并不能有效解决高瓦斯或突出矿区瓦斯治理难题, 遏制不了瓦斯爆炸、突出等事故发生^[38]。因此, 必须结合矿区的地质特征实现理论突破和工程技术创新, 提出一套高效的瓦斯治理工程技术方法。

针对低透气煤层群条件下的瓦斯抽采难题, 两淮矿区、焦作矿区、平顶山矿区等主要高瓦斯或突出矿区实践了低透气性煤层群井上下立体式煤与瓦斯共采系列关键技术及装备^[39], 成功应用了首采煤层顶板抽采富集区瓦斯技术^[40]、无煤柱 Y 型通风留巷钻孔法抽采瓦斯关键技术等^[41], 实现了低渗煤层群条件下甲烷治理工程实践。同时, 为解决单一煤层难以区域卸压抽采的技术难题, 国内部分矿区等建立了三区联动井上下立体抽采煤层瓦斯方法, 首次通过地面直井与井下顺层钻孔联合抽采, 突破了单一煤层区域甲烷治理的技术瓶颈, 将煤矿瓦斯抽采模式发展为煤与气一体化开发模式及矿区煤

层气三区联动立体抽采模式。

此外, 以现场测试为基础, 学者们等^[39]研究发现了高瓦斯矿井地应力与瓦斯压力、煤层透气性系数之间的关系及岩层移动时空规律, 为煤炭甲烷高效开发理论突破提供了现场数据支撑。

3.2 煤炭甲烷高效开发理论

为有效提高煤炭甲烷(瓦斯)开发水平, 袁亮在 1996 年提出了“煤与瓦斯共采”科学构想及工程技术路线图, 为煤炭甲烷高效开发理论创新奠定基础^[40-41]。其中, 煤与瓦斯共采的关键思路是让煤体松动卸压, 增加透气性, 实现卸压抽采瓦斯。在煤与瓦斯共采理论支撑下, 淮南矿区利用煤层群赋存条件, 打破传统自上而下的煤层开采程序, 设计了优先开采煤层群中关键卸压层的开采方案^[42], 实现了煤层甲烷高效开发和灾害治理。

2004 年, 随着无煤柱煤与瓦斯共采技术原理的提出, 部分矿区首采保护层工作面瓦斯抽采工程量大和成本高、U 型通风上隅角瓦斯难治理等问题得到了有效解决^[43]。该技术原理是通过改变通风流场, 将空气压力场位能和瓦斯场流动运移向采空区后方挪移, 进而消除上隅角瓦斯的安全威胁。该技术原理为 Y 型通风技术的成功应用提供了理论支撑^[44]。此外, 首采层采动瓦斯高效抽采“高位环形裂隙体”理论体系^[45]和卸压系数概念^[46]等的提出, 不仅丰富了煤炭甲烷高效开发理论体系, 同时为新技术与装备的研发奠定了理论基础。

3.3 煤炭甲烷灾害科学防控

甲烷灾害的科学防控作为煤炭甲烷管控社会、经济效益直接展示, 煤炭甲烷灾害科学防控同样是推进煤炭甲烷管控的重要组成部分。为了攻克突出定量模拟难题, 袁亮等研发了全封闭、真三维、大尺度煤与瓦斯突出大型科学实验装置, 完善了煤与瓦斯突出相似体系, 创建了以巷道掘进揭煤诱突的模型制作、充气保压和精细测控试验方法与工艺, 并以典型突出事故为原型, 全球首次成功实现了巷道掘进揭煤诱发煤与瓦斯突出试验。在先进仪器设备支持下, 通过科学研究揭示了多场耦合条件下煤与瓦斯突出孕育及发展机制, 构建了“地应力-瓦斯”耦合模型和煤与瓦斯突出的临界判据, 建立了

煤与瓦斯突出多参量预警指标体系,如图4所示。

为了实现突出灾害的精准监测预警,中国研究团队构建了突出多源信息融合预警模型,实现了多指标自动融合分析与决策、预警模型的自修正、预警原因可追溯,开发了采掘面分布式声电突出预警

系统、基于B/S结构和支持跨平台的矿井突出智能预警系统,构建了煤与瓦斯突出区域远程监控预警系统云平台,如图5所示。该成果被国家矿山局应用到国家煤矿安全生产风险监测预警系统中,实现了3300余座矿井安全监测数据联网与预警。

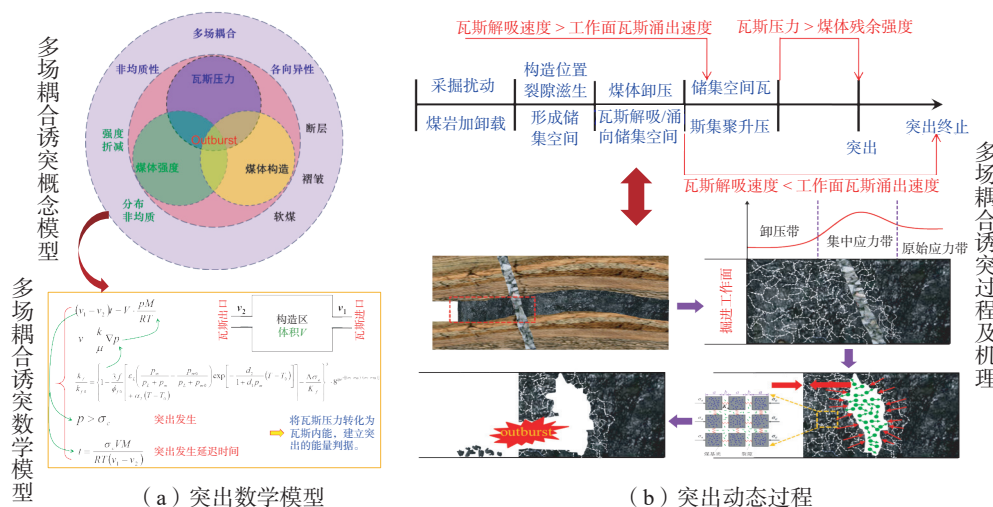


图4 多场耦合条件下煤与瓦斯突出数学模型及动态过程



图5 煤矿安全生产风险监测预警系统

3.4 煤炭甲烷全浓度利用

多年来,通过理论突破和技术创新,形成了0~100%全浓度范围煤炭甲烷利用技术体系,尤其在浓度低于30%的低浓度甲烷利用技术取得了关键突破,如图6所示。目前,低浓度瓦斯的利用技术可分为浓度9%~30%的瓦斯利用技术、浓度3%~9%的瓦斯利用技术、浓度3%以下的瓦斯利用技术等。

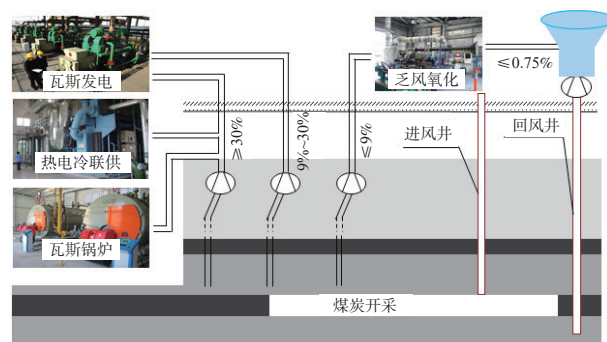


图6 煤矿瓦斯全浓度高效利用示意图

浓度为 9%~30% 的低浓度瓦斯主要采用燃气内燃机瓦斯发电技术进行发电。如,淮南矿区利用真空变压吸附技术将瓦斯浓度从 12% 浓缩至 30%, 已建成亚太地区第一座瓦斯发电热电冷联供示范工程。对于浓度为 3%~9% 的低浓度瓦斯,主要通过直接燃烧技术进行利用,中国研究团队目前已攻克了低浓度瓦斯点火、防爆、安全稳定燃烧、防回火脱火等难题,研制了全球首套 3%~9% 煤矿低浓度瓦斯安全稳定燃烧装置,研发了 3%~9% 低浓度甲烷直流热氧化等技术,并在山西柳林寨崖底煤矿建成世界首座 3%~9% 煤炭甲烷直流热氧化发电厂。在浓度 3% 以下的瓦斯利用方面,甲烷蓄热式氧化(浓度 0.75%~3%)、乏风甲烷自回热型蓄热氧化(浓度<0.75%)等理论与技术瓶颈已经取得

突破。

3.5 废弃矿山甲烷管控

针对废弃矿山甲烷(瓦斯)的管控,中国已形成了一套集理论、技术研发与现场实践于一体的集群式采控协同理念和创新技术体系,如图 7 所示。在理论层面,袁亮等率先提出了“煤与瓦斯共采”理念,构建了卸压开采抽采瓦斯的技术体系,旨在同步实现安全防控与资源化利用;石必明进一步提出了“先固后气—双源分步”的评估模型,强调需分水平、分块段精准评估废弃矿井的固体煤炭储量和瓦斯资源量,为定量开发奠定了基础。此外,秦勇教授等则关注了煤炭地下气化(UCG)与甲烷控采的协同可能性。

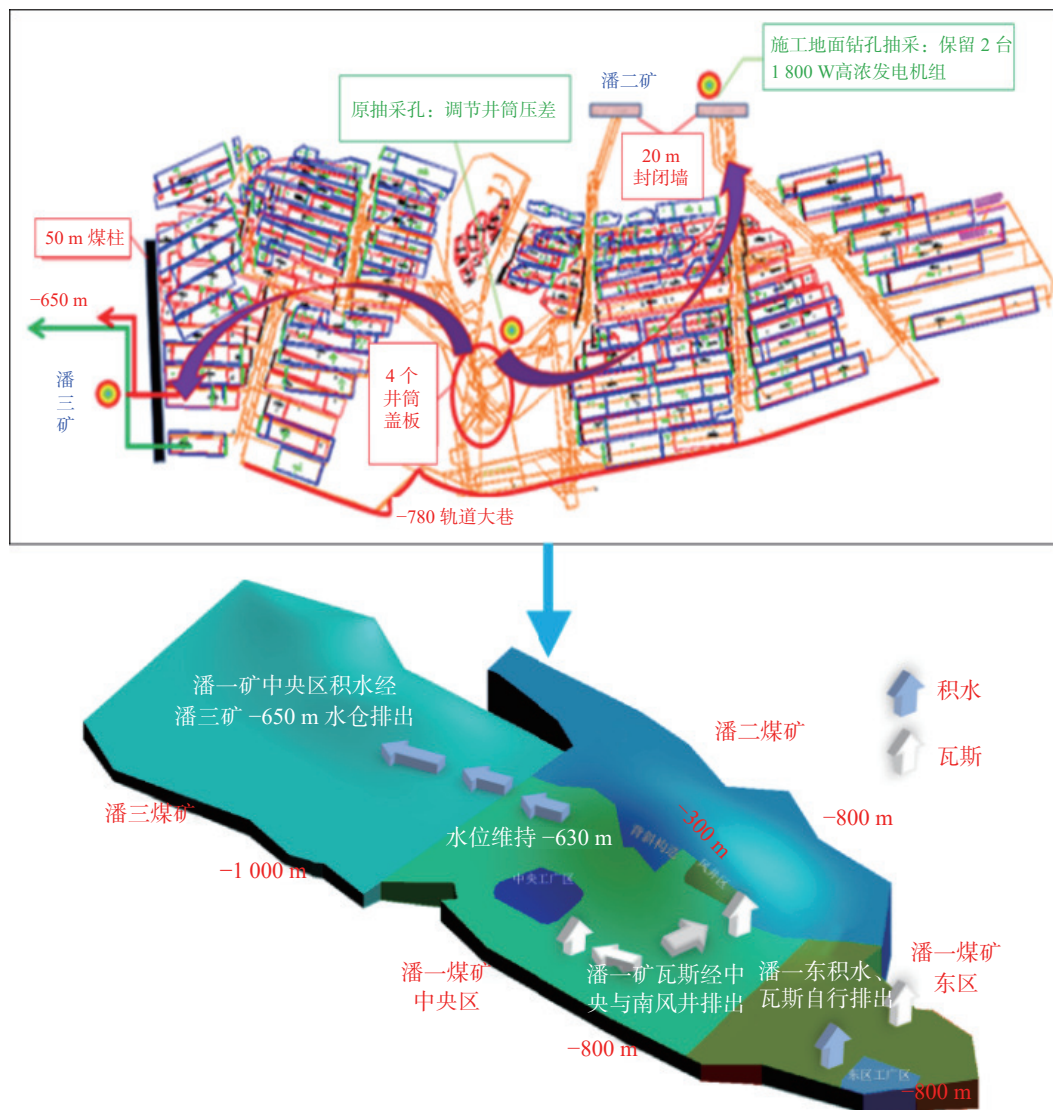


图 7 淮南矿区废弃矿井集群式采控协同技术体系

在技术研发层面,当前的研究工作主要围绕“精准评估-高效抽采-安全防护”主线展开。国内研究团队研发了多项关键技术,包括地面 L 型钻井抽采、采空区密闭与井下钻孔联合抽采等工艺,并利用数值模拟手段优化了钻井布井位置和抽采参数。同时,智能化的抽采与监控系统的研发,实现了对瓦斯浓度、流量参数的实时监测与自动调控,提升了抽采过程的安全性效率。在现场实践方面,废弃矿山甲烷管控创新成果已应用于多个大型矿区并取得显著效益。以淮南矿业集团(现淮河能源)潘一矿为例,该矿应用地面钻井与井下密闭联合抽采技术,自 2019 年关闭至 2024 年 5 月,已累计抽采瓦斯 8 000 万 m³,利用这些瓦斯发电 1.6 亿度,创造经济效益约 4 000 万元人民币,同时有效避免了甲烷逸散带来的温室效应。晋城、阳泉等矿区则探索了“L 型水平井”、“过采空区抽采下部煤层气”等多样化地面抽采模式。这些实践不仅消除了废弃矿井的瓦斯爆炸和窒息风险,更将甲烷转化为清洁能源,为废弃矿山资源化利用和助力“双碳”目标提

供了可复制、可推广的路径。

4 煤炭甲烷管控技术路线思考

4.1 煤炭“双碳”战略技术路径

“碳达峰、碳中和”是一项复杂的系统工程,实现“双碳”目标要从能源、产业、经济、社会多端口协同发力。其中,能源作为产业、经济、社会发展的基础和动力,是实现“双碳”目标的关键环节。“双碳”战略的实现要抓住主要矛盾,以能源减排为关键突破口,统筹能源、产业、经济与社会结构协同转型,构建现代能源体系。在“双碳”目标下,煤炭行业发展的战略思想是:以实施差异达峰、协同中和为原则,在坚持“全国一盘棋”的基础上,结合区域差异化特征,划分能源生产区、能源应用区和新能源耦合区,分区域、分步骤,跨时间、跨空间、跨要素、跨场景精准实施,如图 8 所示。通过系统化部署与差异化路径选择,煤炭行业能够在“双碳”战略下实现分区达峰与协同中和的目标。

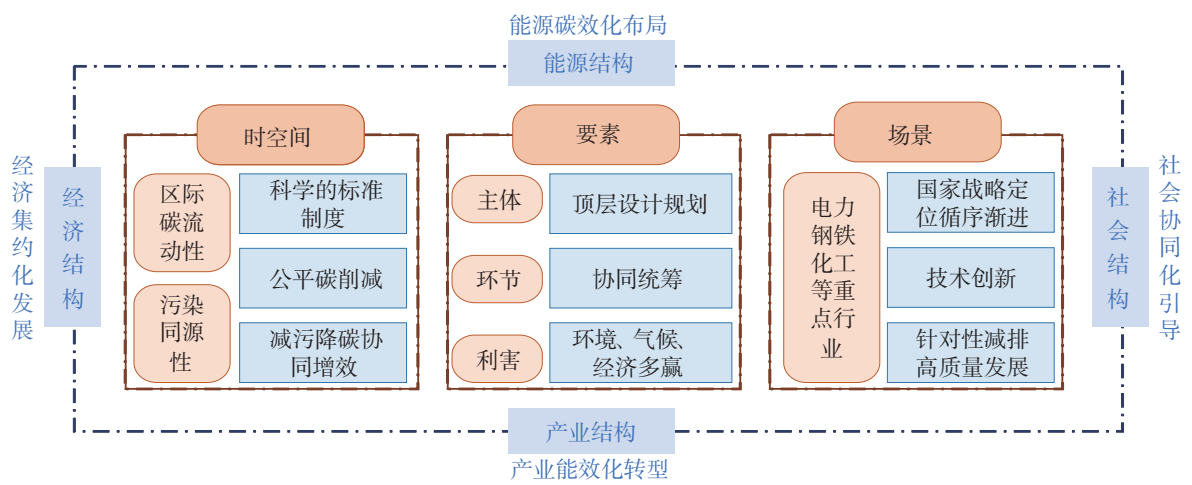


图 8 “双碳”目标下煤炭行业发展的战略思想

“双碳”目标下煤炭行业发展的战略路径主要包括生产端、消费端和固碳端,如图 9 所示。其中,通过“煤炭智能精准开采”和“煤电+原料化利用”,推进生产端碳减排,依托大数据、云计算与 5G 等信息技术的深度融合,推动煤炭低碳绿色开采与煤炭甲烷全浓度抽采利用,同时通过低碳清洁高效燃煤发电、煤制气、煤制油、煤制氢等高效转化技

术,实现生产过程中的低碳减排;消费端则以“碳能耦合循环利用”为核心,通过储能与调峰调频技术提升可再生能源利用水平,实现碳替代;固碳端减排主要依托煤炭全流程+CCUS 技术路径,包括“燃煤发电+CCUS”“煤炭高效转化+CCUS”“废弃矿井+CCUS”等技术,推动煤炭产业在固碳环节的大规模减排。

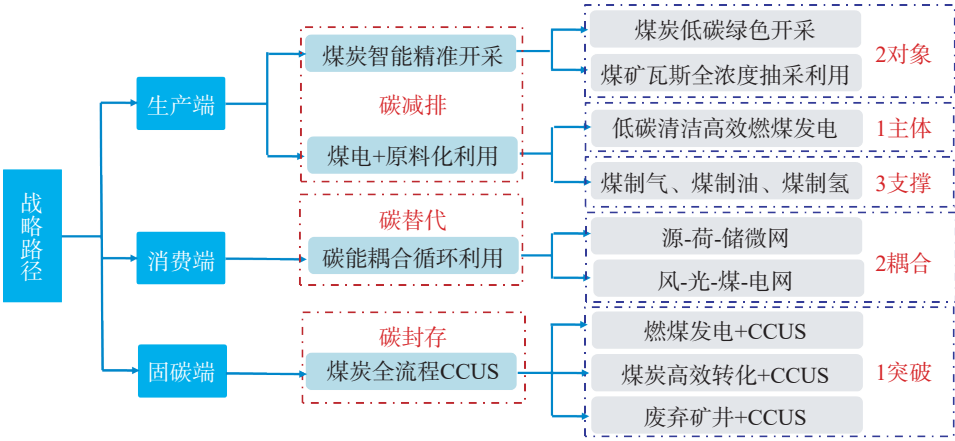


图 9 “双碳”目标下煤炭行业发展的战略路径

为了实现煤炭行业力争 2023 年碳达峰、确保 2060 年碳中和的战略需求,进一步明晰煤炭行业生产端、消费端、固碳端全产业链全过程减排降碳的目标任务,本研究提出了“双碳”目标下煤炭行业发展的路线图,如图 10 所示。路线图在煤炭行业碳减排关键路径基础上,明确了 2030 年煤炭能源消

费占比能够逐步降低至 50%、2030 年非化石能源占一次能源消费比将达到 25%、2060 年非化石能源占一次能源消费比将达到 80% 以上等关键指标,同时本研究进一步提出了煤炭甲烷全浓度利用技术及装备、煤炭高效低碳转化利用技术及装备等重大关键技术攻关需求。

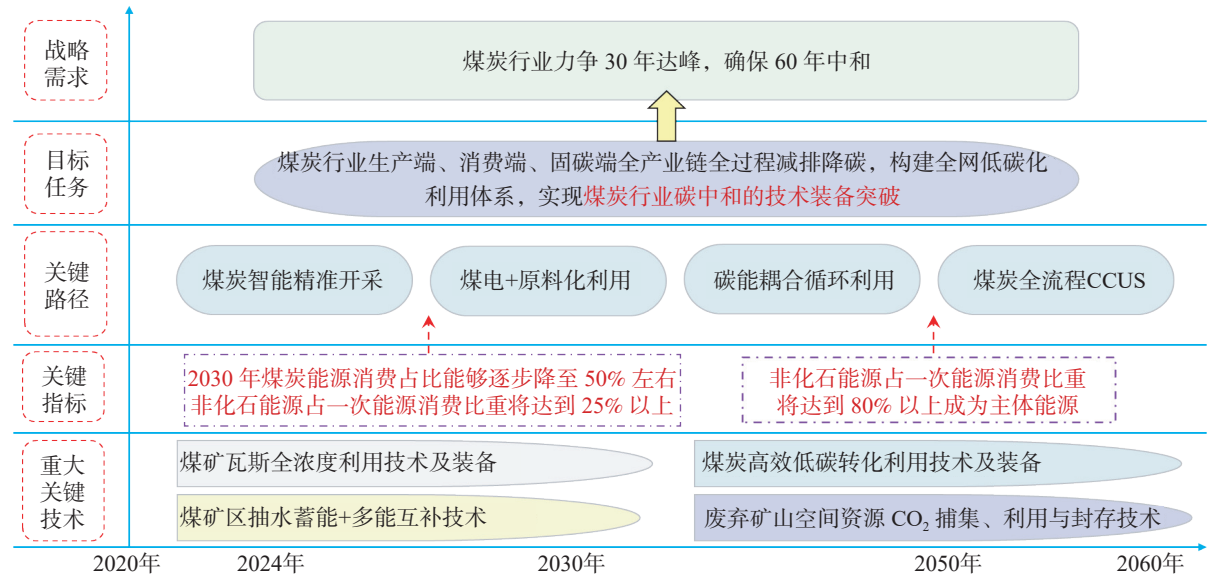


图 10 “双碳”目标下煤炭行业发展路线图

4.2 煤炭甲烷管控技术路线

煤炭甲烷管控工作将以“双碳”目标为引领,以技术创新为核心驱动力,继续沿着科技创新发展的道路前进,以管理创新和制度创新为保障措施,制定适合于煤炭行业发展的甲烷管控目标(图 11),全面推进煤炭甲烷管控。其中,2025 年煤炭甲烷减排优化期,通过推动大范围精准化抽采与低浓度甲烷利用技术发展,实现矿井甲烷抽采率

提高 5%,矿井甲烷利用率提高至 50%;2030 年煤炭甲烷减排加速期,通过全面推广煤炭甲烷智能化高效抽采利用技术,低浓度甲烷和乏风甲烷利用效能显著提升,矿井甲烷抽采率提高 10%,矿井甲烷利用率提高至 65% 以上;2060 年煤炭甲烷全面减排期,建立并全面推广煤炭全浓度甲烷高品质利用近零排放模式,构建我国煤炭甲烷排放监测、报告和核查体系,实现煤炭甲烷排放的动态科学监测管控。

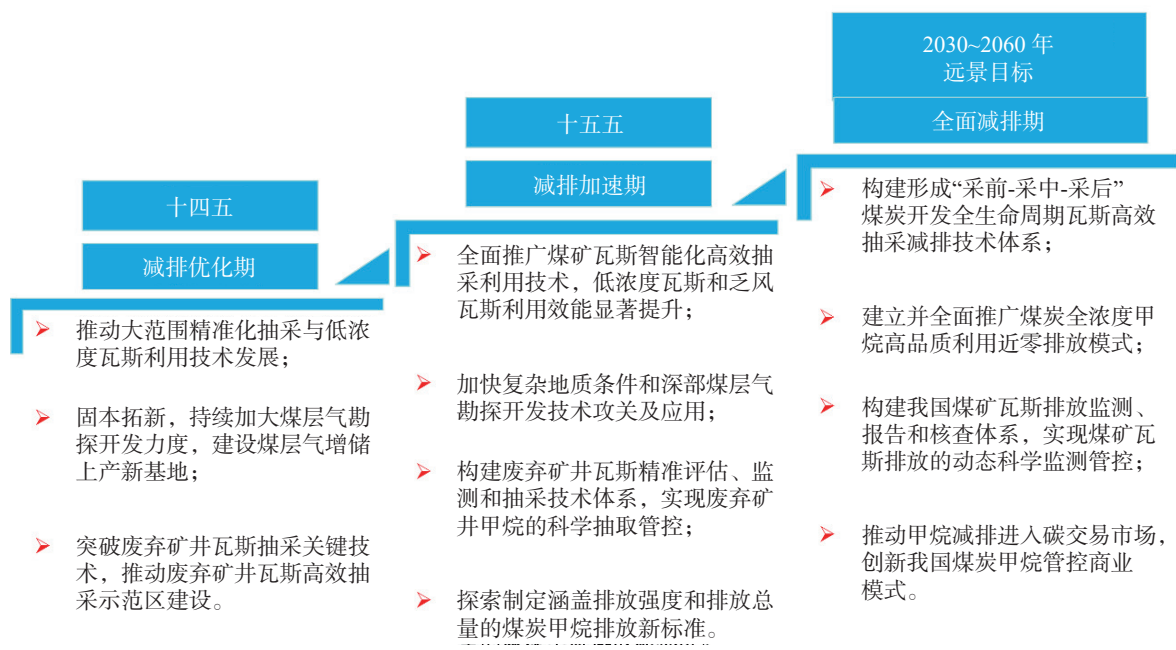


图 11 煤炭甲烷管控目标

在煤炭甲烷管控目标的引领下, 相关部门应围绕甲烷减排与资源化利用两大方向, 推进关键技术的协同创新与系统集成。煤炭行业可通过煤炭甲烷排放监测、煤与瓦斯共采、煤层甲烷抽采智能调控、低浓度甲烷产业化利用等技术革新, 构建甲烷减排与资源化利用全链条技术集成体系, 逐步形成煤炭甲烷管控技术路线, 推动能源、农业、废弃物等

跨领域协同创新, 从而支撑国家“双碳”目标与甲烷行动深度融合, 如图 12 所示。技术路线的战略需求是, 破解煤炭甲烷管控技术碎片化与跨领域协同不足的瓶颈, 构建甲烷减排与资源化利用技术集成体系, 支撑“双碳”目标与甲烷行动协同推进。技术路线的关键路径包括监测诊断体系化、技术集成场景化、政策市场协同化和标准规则国际化等。

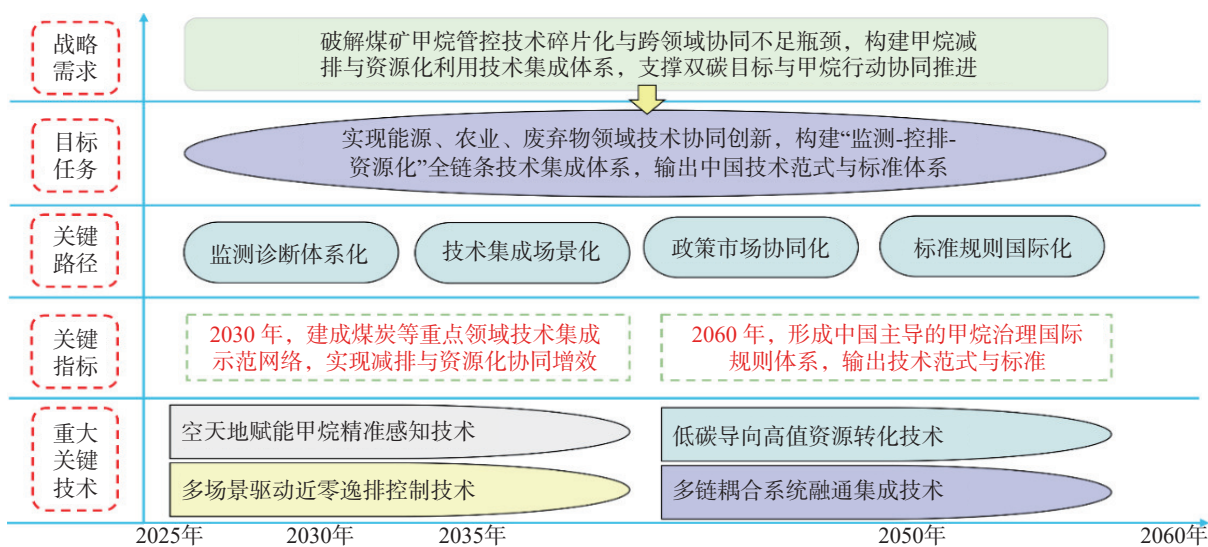


图 12 煤炭甲烷管控技术路线

5 结论与建议

(1) 深化煤炭甲烷管控理论与技术创新

着力打造在煤炭甲烷领域具备前沿创新能力的国家级科研平台, 重点强化煤与瓦斯协同开采理论、智能抽采技术、低浓度甲烷转化利用以及“空-

天-地”一体化甲烷排放监测等方向的科技创新研究,全面构建国家战略科技力量核心支撑。充分发挥国家部委在重大科技攻关中的组织与引领作用,系统布局煤炭甲烷管控重大专项、重点研发计划、重大科研仪器研制项目及自然科学基金课题,集中攻克深部煤炭甲烷管控领域关键核心技术瓶颈。

(2)完善煤炭甲烷管控政策体系和管理机制

健全煤炭甲烷排放监测、报告与核查标准体系,加强对甲烷排放数据的科学评估。统筹考虑煤炭甲烷管控的安全、经济、环境效益,制定科学合理的煤炭甲烷管控目标和路径,加强财政补贴、税收减免等政策引导,发挥煤炭甲烷管控的综合效益。同时,加强宣传教育和社会监督力度,提高全社会对煤炭甲烷管控工作的认知和参与度,推动政府、企业、高校、科研院所协同创新,构建“政-产-学-研-用”融合发展的新模式。

(3)推进甲烷管控多领域协同和国际合作

围绕甲烷管控减排战略,联合政策、监测、能源、农业和废弃物等领域组建甲烷管控减排联盟,推动跨领域协同创新。继续加强与国际社会的合作与交流,共同推动全球甲烷管控事业的发展。积极参与国际气候治理合作机制建设,加强与相关国家和国际组织的沟通协调,借鉴国际先进经验与技术成果,推动煤炭甲烷管控工作不断迈上新台阶。

(3)统筹能源安全与“双碳”目标协同实现

我国应以煤炭甲烷管控为契机,推动煤炭产业绿色低碳转型。加快煤炭清洁高效利用技术研发和应用推广,推动煤炭与可再生能源的融合发展,构建清洁低碳、安全高效的现代能源体系,为实现我国经济社会的高质量发展提供坚实支撑。

参考文献:

- [1] 张博,郭金玲,高俊莲,等.我国甲烷排放控制的中长期挑战与应对[J].中国工程科学,2024,26(2):185-197.
- [2] 李志斐,董亮,张海滨.中国参与国际气候治理30年回顾[J].中国人口·资源与环境,2021,31(9):202-210.
- [3] 中国气象局.中国温室气体公报[EB/OL].[2024-09-13].<https://www.cma.gov.cn/zfxgk/gknr/qxbg/202312/P020231218348621734404.pdf>.
- [4] 国家林业和草原局,国家公园管理局.2023年成为有记录以来最热一年——携手应对全球变暖刻不容缓[EB/OL].[2024-09-13].<https://www.forestry.gov.cn/lyj/1/xyd/20240104/540878.html>.
- [5] 中国气象局.追问气候变化解答你的关心和忧思[EB/OL].[2024-09-12].https://www.cma.gov.cn/2011xwzx/zdbk/jdbkxw/202303/t20230317_5376289.html.
- [6] 张福凯,徐龙君.甲烷对全球气候变暖的影响及减排措施[J].矿业安全与环保,2004,33(5):6-9.
- [7] 孙晨,赵昆峰,易志国.甲烷完全催化氧化研究进展[J].无机材料学报,2023,38(11):1245-1256.
- [8] 张羽中,毛慧琴,陈翠红,等.卫星观测在甲烷排放清单校核中的应用[J].遥感学报,2024,28(8):1940-1954.
- [9] 袁亮.我国煤层气开发利用的科学思考与对策[J].科技导报,2011,29(22):3.
- [10] 桑树勋,袁亮,刘世奇,等.碳中和地质技术及其煤炭低碳化应用前景[J].煤炭学报,2022,47(4):1430-1451.
- [11] 袁亮.中国甲烷管控技术发展路线图[M].北京:科学出版社,2024:13.
- [12] 张江华,李国富,孟召平,等.过采空区煤层气井地面抽采关键技术[J].煤炭学报,2020,45(7):2552-2561.
- [13] 王宁.基于区域因子分析的我国煤炭甲烷排放与控排对策研究[D].北京:中国矿业大学(北京),2013.
- [14] 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.
- [15] 刘良云,陈良富,刘毅,等.全球碳盘点卫星遥感监测方法、进展与挑战[J].遥感学报,2022,26(2):243-267.
- [16] 刘毅,王婧,车轲,等.温室气体的卫星遥感——进展与趋势[J].遥感学报,2021,25(1):53-64.
- [17] 袁亮.我国深部煤与瓦斯共采战略思考[J].煤炭学报,2016,41(1):1-6.
- [18] 贺天才,王保玉,田永东.晋城矿区煤与煤层气共采研究进展及急需研究的基本问题[J].煤炭学报,2014,39(9):1779-1785.
- [19] 王耀锋.煤炭行业瓦斯抽采技术装备现状与展望[J].煤矿安全,2020,51(10):67-77.
- [20] 黎力,梁卫国,李治刚,等.注热CO₂驱替增产煤层气试验研究[J].煤炭学报,2017,42(8):2044-2050.
- [21] 李国富,李贵红,刘刚.晋城矿区典型区煤层气地面抽采效果分析[J].煤炭学报,2014,39(9):1932-1937.
- [22] 陈宜亮,马晓钟,魏化兴.煤矿通风瓦斯氧化技术及氧化热利用方式[J].中国煤层气,2007,14(4):27-30.
- [23] 李庆钊,张桂韵,刘鑫鑫,等.煤矿超低浓度瓦斯蓄热燃烧特性及其关键影响因素分析[J].中国电机工程学报,2021,41(23):8078-8088.

- [24] 韩超,崔敏. “双碳”目标约束下的高质量发展: 内在冲突、机遇与应对 [J]. 天津社会科学, 2022, 42(4): 83–92.
- [25] 孙自愿, 马琳, 王文娇. 数字赋能“有效论”: 数字化转型对重污染企业绿色创新的双向效应 [J]. 北京工商大学学报(社会科学版), 2024, 39(3): 53–66.
- [26] 刘峰, 郭林峰, 张建明, 等. 煤炭工业数字智能绿色三化协同模式与新质生产力建设路径 [J]. 煤炭学报, 2024, 49(1): 1–15.
- [27] 申森. 实现碳达峰碳中和是一场广泛而深刻的经济社会变革——学习习近平关于实现“双碳”目标重要论述 [J]. 党的文献, 2022, 35(5): 36–43.
- [28] 刘文革, 徐鑫, 韩甲业, 等. 碳中和目标下煤炭甲烷减排趋势模型及关键技术 [J]. 煤炭学报, 2022, 47(1): 470–479.
- [29] 贾国伟, 许邦, 邵壮壮. 基于 Cite Space 的甲烷管控技术研究进展和热点分析 [J]. 矿业安全与环保, 2022, 49(5): 64–72.
- [30] 解瑞丽, 柴麒麟. 基于 SPAMC-Methane 模型的中国甲烷减排路径研究 [J]. 气候变化研究进展, 2024, 20(5): 593–610.
- [31] 程德强, 张瑞, 谢同喜, 等. 基于迭代压缩 U 型网络的煤颗粒分割与粒度分析方法 [J]. 煤炭学报, 2025, 50(2): 1 362–1 375.
- [32] 陈嵩嵩, 张国帅, 霍锋, 等. 煤基大宗化学品市场及产业发展趋势 [J]. 化工进展, 2020, 39(12): 5 009–5 020.
- [33] 李树刚, 张静非, 林海飞, 等. 双碳战略中煤气共采技术发展路径的思考 [J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(1): 138–153.
- [34] 王晓光, 董青, 郎文丽, 等. 超低浓度甲烷减排与资源化利用研究进展 [J/OL]. 化工进展. [2025-09-18]. <https://doi.org/10.16085/j.issn.1000-6613.2024-1219>.
- [35] 袁亮, 薛俊华, 张农, 等. 煤层气抽采和煤与瓦斯共采关键技术现状与展望 [J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(9): 6–11.
- [36] 华心祝, 李琛, 刘啸, 等. 再论我国沿空留巷技术发展现状及改进建议 [J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(1): 128–145.
- [37] 牟全斌, 闫志铭, 张俭. 煤矿井下定向长钻孔水力压裂瓦斯高效抽采技术 [J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(7): 296–303.
- [38] 王阳, 向杰, 秦勇, 等. 阳泉—晋城矿区关闭煤矿煤层气资源特征及抽采模式 [J/OL]. 煤炭科学技术. [2024-11-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.TD.20240325.1800.008.html>.
- [39] 余岩. 地应力对煤层透气性的控制作用研究 [D]. 淮南: 安徽理工大学, 2012.
- [40] 袁亮. 留巷钻孔法煤与瓦斯共采技术 [J]. 煤炭学报, 2008, 33(8): 898–902.
- [41] 袁亮, 薛俊华. 低透气性煤层群无煤柱煤与瓦斯共采关键技术 [J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(1): 5–11.
- [42] 袁亮. 瓦斯治理理念和煤与瓦斯共采技术 [J]. 中国煤炭, 2010, 36(6): 5–12.
- [43] 袁亮. 我国煤炭主体能源安全高质量发展的理论技术思考 [J]. 中国科学院院刊, 2023, 38(1): 11–22.
- [44] 曹文超, 龚选平, 孙峰, 等. 综放工作面高位定向钻孔布置优化分析 [J]. 矿业安全与环保, 2020, 47(3): 82–86.
- [45] 罗平亚, 朱苏阳. 中国建立千亿立方米级煤层气大产业的理论与技术基础 [J]. 石油学报, 2023, 44(11): 1 755–1 763.
- [46] 何祥, 杨科, 袁亮, 等. 双关键层跨煤组远程卸压增透效应试验研究 [J]. 中国矿业大学学报, 2020, 49(2): 238–246.

(责任编辑: 丁 寒)