

西部地区富油煤开发利用潜力分析和技术体系构想

王双明^{1,2,3}, 王虹^{4,5}, 任世华^{4,6*}, 董书宁^{7,8}, 郑德志⁴, 谭克龙⁹, 侯恩科³,
王生全³, 曲洋¹⁰, 焦小淼⁴

(1. 西安科技大学煤炭绿色开采地质研究院, 西安 710054; 2. 陕西省煤炭绿色开发地质保障重点实验室, 西安 710054; 3. 西安科技大学地质与环境学院, 西安 710054; 4. 煤炭科学研究总院有限公司, 北京 100013; 5. 中国煤炭科工集团有限公司, 北京 100013; 6. 中国矿业大学(北京)管理学院, 北京 100083; 7. 中煤科工集团西安研究院有限公司, 西安 710054; 8. 陕西省煤矿水害防治技术重点实验室, 西安 710077; 9. 中国煤炭地质总局勘查研究总院, 北京 100039; 10. 煤炭工业规划设计研究院有限公司, 北京 100120)

摘要: 西部地区富油煤资源量丰富, 具备产业规模化发展的资源基础; 科学认识富油煤的油气资源属性, 推动以油气为主要产品的富油煤开发与转化, 是增加国内油气供给、缓解油气对外依存度、保障国家能源安全的战略方向。本文依据现阶段煤炭资源的勘查成果, 估算了西部地区富油煤资源潜力; 系统梳理了西部地区富油煤开发利用的现状和存在问题; 针对碳达峰、碳中和战略目标, 智能绿色开发, 弥补油气不足等新要求, 论证提出了西部地区富油煤开发利用的基本理念与技术构想。研究认为, 富油煤的开发利用, 需要着重突破高精度综合勘查、高回采率开采、井下原位热解、热解气化一体化、原位热解半焦 CO₂ 封存等关键技术。研究建议, 将富油煤纳入非常规油气资源管理, 加大富油煤开发利用科技攻关, 设立富油煤开发利用国家级示范区, 推动西部地区新能源和富油煤协同开发, 由此发挥富油煤作为煤基油气资源的特殊优势、实现煤炭资源低碳高值利用。

关键词: 富油煤; 西部地区; 煤基油气资源; 资源潜力; 开发利用; 技术体系

中图分类号: P618.11 **文献标识码:** A

Potential Analysis and Technical Conception of Exploitation and Utilization of Tar-Rich Coal in Western China

Wang Shuangming^{1,2,3}, Wang Hong^{4,5}, Ren Shihua^{4,6*}, Dong Shuning^{7,8}, Zheng Dezhi⁴,
Tan Kelong⁹, Hou Enke³, Wang Shengquan³, Qu Yang¹⁰, Jiao Xiaomiao⁴

(1. Geological Research Institute for Green Coal Mining, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Geological Support for Coal Green Exploitation, Xi'an 710054, China; 3. College of Geology and Environment, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 4. China Coal Research Institute, Beijing 100013, China; 5. China Coal Technology and Engineering Group Corporation, Beijing 100013, China; 6. School of Management, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China; 7. Xi'an Research Institute, China Coal Technology & Engineering Group Corporation, Xi'an 710054, China; 8. Shaanxi Key Laboratory of Prevention and Control Technology for

收稿日期: 2022-05-06; **修回日期:** 2022-06-01

通讯作者: *任世华, 煤炭科学研究总院有限公司研究员, 研究方向为煤炭相关技术经济评价、能源战略; E-mail: ren@cct.org.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“煤制油气战略基地规划布局资源保障研究”(2022-XZ-36); 中国工程院咨询项目“西部富油煤开发战略研究”(2020-XZ-12)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

Coal Mine Water Hazard, Xi'an 710077, China; 9. General Prospecting Institute of China National Administration of Coal Geology, Beijing 100039, China; 10. CCTEG Coal Industry Planning Institute, Beijing 100120, China)

Abstract: The resources of tar-rich coal in Western China are abundant and are available for large-scale development. Understanding the oil and gas resource properties of tar-rich coal and promoting the development and transformation of tar-rich coal to produce oil and gas are crucial for increasing domestic oil and gas supply, relieving external dependence on oil and gas, and ensuring national energy security of China. This study estimated the potential of tar-rich coal resources in Western China based on the current exploration results of coal resources, reviewed the current status and existing problems, and proposed the basic concept and technical conception for the development and utilization of tar-rich coal in Western China considering the new requirements for carbon reduction, intelligent green development, and compensation for oil and gas shortage. The study concluded that the development and utilization of tar-rich coal needs to focus on key technologies, including high-precision comprehensive exploration, high-recovery-rate mining, underground in-situ pyrolysis, pyrolysis and gasification integration, and in-situ pyrolysis char CO₂ storage. Furthermore, we suggest that the tar-rich coal should be included in the management of unconventional oil and gas resources, scientific and technological research on the development and utilization of tar-rich coal should be strengthened, a national demonstration area should be established, and development of new energy and tar-rich coal in Western China should be coordinated, so as to maximize the special advantages of tar-rich coal as coal-based oil and gas resources and realize the low-carbon and high-value utilization of coal resources.

Keywords: tar-rich coal; western regions; coal-based oil and gas; potential of resources; development and utilization; technical system

一、前言

我国石油和天然气资源总量相对较少，加之人口众多，人均石油和天然气资源在世界上处于较低水平（仅为世界平均水平的1/15左右）。受资源条件限制，我国石油和天然气对外依存度持续攀升，2020年分别达到73.5%、43.2% [1]，其中石油对外依存度超过美国的历史高点。随着经济高质量发展、居民生活水平提高，我国的油气需求仍将增加 [2,3]。然而，国内常规油气增产有限，非常规油气增产、稳产难度较大；在油气进口风险加剧的国际形势下，立足国内寻求新的油气供给途径、增强油气自主供给能力，成为保障国家能源安全的重大需求。富油煤通过中低温热解可以生产油、气和半焦，具有油气转化效率高、生产成本低的优势。我国富油煤中的潜在油气资源丰富，实施以油气为主要产品的富油煤开发与转化并推进产业的规模化发展，既是实现煤炭清洁低碳发展的合理路径，也是增加国内油气供给、缓解油气对外依存度的战略选择 [4~6]，还是促进国内大循环和国际国内双循环的重要保障。

构建清洁低碳、安全高效的能源体系，要求加快实现煤炭清洁低碳利用，推动由燃料化利用向原料化、材料化利用转型 [7~10]。立足我国以煤为主的能源资源禀赋和能源生产消费特征，结合替补油气供给的巨大需求，重构富油煤开发利用方式；发挥富油煤作为煤基油气资源的特殊优势，实现煤炭资源的低碳高附加值利用，将是支持实现碳达峰、

碳中和战略目标的重要举措。目前，在我国富油煤赋存规律、地球化学特征等方面开展了不少研究。文献 [11]以榆神府矿区富油煤为对象，采用低温液氮吸附法、压汞法、核磁共振法、气渗透法等手段，分析了富油煤的多尺度孔隙结构：相较于普通低阶煤，富油煤具有较大的孔比表面积和低温氮吸附量，具备提油炼气的良好物性条件。文献 [12]研究了陕北石炭—二叠纪煤田典型矿区的富油煤赋存特征，分析了可采煤层焦油产率的变化特点、富油煤时空分布规律，探讨了富油煤赋存影响因素。文献 [13]以陕北地区侏罗纪延安组6个主采煤层为研究对象，采用气相色谱—质谱联用方法分析了富油煤的有机地球化学特征。文献 [14]以榆神矿区延安组2-2煤、5-2煤为对象，根据原煤的焦油产率进行了富油煤赋存特征分析及分级研究；同时结合灰成分指数、硫分、镜惰比等参数，探讨了2-2煤层、5-2煤层的富油煤沉积环境。

值得指出的是，已有研究主要基于特定矿区或煤层来分析富油煤的赋存特征，而有关我国富油煤开发利用技术体系的综合性研判分析未见开展。笔者团队近年来围绕富油煤的资源属性和开发利用课题进行了系列研究 [15~18]，基于相关研究成果提出了“富油煤就是煤基油气资源”的理念。在中国工程院咨询项目支持下，本文着重梳理西部地区富油煤的资源储量及分布特征，分析富油煤勘查、开发、利用的现状与存在问题；构思西部地区富油煤开发利用的理念与技术体系，辨识开发利用的关键技术，

以为油气资源开发与管理研究提供参考。

二、西部地区富油煤资源潜力分析

(一) 富油煤概念界定

《矿产资源工业要求手册》(2014年修订本)根据煤的焦油产率分级,将煤的含油性划分为3个等级(见表1)。煤炭行业标准《煤中焦油含量分级》(MT/T 1179—2019)将煤中焦油含量分为四级(见表2);煤中焦油产率在7%以上者,分别称为中、高、特高油产率煤。然而在研究中发现,虽然以煤中焦油产率大小对富油煤进行界定具有重要意义,但未能从资源属性的视角来刻画富油煤的内在特点。

本文建议可从煤炭资源、油气资源、矿产资源3个维度对富油煤的资源属性进行界定。①富油煤是中低煤化程度的煤炭资源,挥发分产率一般大于30%;②富油煤是中低成熟度的油气资源,焦油产率大于7%,镜质体反射率为0.5%~1%;③富油煤是集煤、油、气属性于一体的层状沉积矿产资源,有机质含量大于60%(由碳、氢、氧等元素组成),无机质含量一般小于30%(由硅铝氧化物等组成)。具有高能量密度的氢、碳原子,可通过热解转化为油气的赋存形式。

由此可见,富油煤涵盖了煤、油、气属性,其中的油、气资源又以非常规形式赋存,无法利用常规油气开采方式获取;将富油煤称为煤基油气资源,是更为确切的概念表述。科学认识富油煤的油气资源属性,对揭示煤、油、气的成因联系,丰富

和发展油气成藏理论,立足国内增加油气供给,均有理论与现实意义。

(二) 富油煤资源量及分布

从煤炭资源分布看,陕西、内蒙古、新疆、甘肃、宁夏等省份的低中阶变质程度煤中有一部分是富油煤,但各地的富油煤资源占比及焦油产率存在明显差异。以陕西省为例,富油煤资源量高达 1.5×10^{11} t,广泛分布于陕北侏罗纪煤田、陕北三叠纪煤田、陕北石炭—二叠纪煤田、黄陇侏罗纪煤田;陕北三叠纪煤田的焦油产率平均值高达11.42%,陕北侏罗纪煤田、黄陇煤田的焦油产率平均值分别为9.33%、8.04%;石炭—二叠纪煤田的焦油产率波动很大,北部的古城矿区山西组、太原组焦油产率平均值分别达9.12%、9.58%,但南部的渭北煤田仅为1.7%左右[6]。

根据“陕西省富油煤开发潜力评价”项目研究、中国煤炭地质总局相关研究的成果,我国富油煤资源主要分布在陕西、内蒙古、宁夏、甘肃、新疆等五省份,初步测算的资源量为 5.5×10^{11} t以上(见表3)[6,18,19]。其中,潜在油资源为 5×10^{10} t,气资源量约为 7.5×10^{13} m³(组分以H₂、CH₄、C₂H₆、CO为主),高于页岩气(可采资源量约为 2.18×10^{13} m³[20])、页岩油(可采资源量约为 3.5×10^9 t[21])。因此,我国富油煤产业的规模化发展具有资源基础。

三、西部地区富油煤开发利用现状及存在问题分析

(一) 勘查现状及存在问题

1. 对富油煤资源属性认识不足

富油煤是集煤、油、气属性于一体的煤基油气

表1 煤的焦油产率分级

级别	焦油产率/%
高油煤	>12
富油煤	7~12
含油煤	≤7

表2 煤中焦油含量分级

级别名称	代号	焦油产率/%
低油产率煤	Tard-1	≤7
中油产率煤	Tard-2	7~12
高油产率煤	Tard-3	12~15
特高油产率煤	Tard-4	>15

注: Tard表示焦油产率。

表3 西部地区富油煤资源量

省份	累计探明资源量/ $\times 10^8$ t	保有资源量/ $\times 10^8$ t	富油煤/ $\times 10^8$ t	富油煤占比/%
陕西	2511.03	1878.88	1500	80
内蒙古	10 011.79	6588.86	2000~2600	30~40
宁夏	479.35	410.6	80	20
甘肃	450.44	434.14	90	20
新疆	4225.58	4102.77	2050	50
总计	17 678.19	13 415.25	5500~6100	—

资源，但长期以来未能得到科学认识和充分利用。富油煤的形成伴随特定的地质历史演化过程及地质条件，不同时代、不同区域甚至相同时代、不同煤层的资源状况均存在显著的差异性。当前对富油煤变质演化规律、地质驱动条件等地质科学问题研究不足，对富油煤资源调查、评价不足，导致富油煤资源家底不清，难以支撑富油煤清洁高效利用。

2. 富油煤勘查的规范性文件缺失

富油煤资源专项勘查和评价工作尚处于起步阶段。以往及现行的固体矿产勘查或煤炭地质勘查行业标准，均未对富油煤的勘查进行专门规定；仅《煤、泥炭地质勘查规范》《煤炭资源勘查煤质评价标准》规定，当原煤空气干燥基挥发分产率大于28%时，选择50%的见煤点进行原煤低温干馏测试，据此测定原煤的焦油产率。富油煤的勘查和加工利用，缺乏煤岩、煤质、采样、测试、评价等标准规范；相关标准体系的缺失，不利于富油煤勘查工作有序开展。

3. 富油煤勘查投入严重不足

我国煤炭地质勘查主要由中央或省级地方政府、煤炭企业出资开展。中央或省级地方政府主要以地质勘查基金项目的形式，委托地质勘查单位完成整装勘查区的预查和普查工作。煤炭企业出资进行的煤炭地质勘查多是探矿权人的自主行为，一般在矿区和井田划分之后进行详查和精查，旨在为矿井设计与建设提供地质依据。国家层面尚未设立富油煤资源勘查专项资金，对富油煤家底认识不清，难以支撑富油煤规模化开发利用。

4. 富油煤勘查精度仍然较低

2019年自然资源部煤炭资源勘查与综合利用重点实验室发布的“陕西省富油煤开发潜力评价”项目研究成果，是陕西省首次摸清富油煤资源“家底”，揭示了各大煤田富油性的分布特点、焦油资源的分布规律，为富油煤资源管理与规模化开发确立了基础。国家层面尚未开展全国范围内富油煤资源的精细勘查，富油煤开发利用的国家级科技支撑不足。目前对富油煤的平面分布、厚度变化、焦油产率等指标参数的掌握程度，远不能满足富油煤资源评价需求，导致支撑相应评价的基础资料仍是以往的煤炭资源勘查成果；仅在划定勘查区范围内（先期开采地段）按规范要求对50%的原煤见煤点测定其焦油产率，不能满足特殊煤种详查程度的精

度要求；富油煤的有机显微组分、煤中矿物组成、挥发分、元素组分含量、有害元素分布等参数直接影响煤的热解产物和效率，相关的勘查精度更低。因此，勘查程度和精度尚不能支撑富油煤高质量开发利用的需求。

（二）开发现状及存在问题

1. 富油煤分布区的煤炭开发强度大

富油煤分布集中的西部五省份，煤炭总产能约为 2.6×10^9 t/a；2019年煤炭产量为 2.074×10^9 t，超过全国煤炭产量的50%。大规模高强度的开发，导致部分省份后续煤炭储备不足，影响资源接续。

2. 矿井智能化水平发展不平衡

富油煤分布集中的西部五省份，先进高效的大型现代化煤矿与技术装备落后、生产效率较低的落后煤矿并存，资金实力雄厚、管理水平高、具有国际竞争力的大型煤炭企业与技术人才匮乏、管理落后、经营困难的中小煤炭企业并存。中小煤矿的采煤技术装备自动化、信息化、可靠性水平整体偏低。

3. 煤炭开采环境扰动较大

富油煤分布集中的西部五省份，干旱少雨且生态环境脆弱。煤炭开发引发的地下和地表水系破坏、地表沉陷等，对当地生态环境造成较大影响。陕西省、宁夏回族自治区的不少老矿区环境治理滞后，环境保护历史欠账较多。内蒙古自治区的煤炭绿色发展水平有待提升，面临的生态环境修复治理压力趋紧。新疆维吾尔自治区哈密市、昌吉州等煤炭富集区的水资源严重短缺。

4. 有关生态环境影响的勘查评价不足

在矿井设计与建设阶段，虽然要求采（探）矿单位编制《环境影响评价报告》《水资源论证报告》《水土保持方案》等与生态环境恢复治理相关的技术报告，但在煤炭开采引发的次生地质灾害，煤炭开采对生态环境、水资源、土地资源的损害方式、影响程度以及有效恢复治理措施等方面的勘查和评价不足。

（三）利用现状及存在问题

1. 利用方式不合理

西部五省份以富油煤为主的煤炭消费，作为动力煤燃烧的占到75%，而化工用煤仅占20%左右。在陕西省，2019年煤炭消费量为 2.186×10^8 t，以电

力、冶金、化工用煤为主；其中火力发电用煤为 6.48×10^7 t（占比为 29.64%），冶金用煤为 5.745×10^7 t（占比为 26.28%），化工用煤为 5.725×10^7 t（占比为 26.19%），建材用煤为 1.252×10^7 t（占比为 5.73%），民用及其他用煤为 2.657×10^7 t（占比为 12.16%）。以生产油气为目的的热解利用占比很低，油气组分没有发挥应有价值。

2. 富油煤热解产品的深加工产业链有待形成

富油煤利用的产品结构未能以油为先，热解焦油、热解气生产精细化工产品及特种油品的能力不足。半焦用于气化、发电、高炉喷吹、铁合金生产、高端碳材料制备等的上、下游产业链（见图 1）尚未形成。

3. 规模化利用技术不够成熟

经过多年发展，低阶煤热解、热解产物深加工技术逐步成熟，但还有一些技术难题尚未解决。在低阶煤热解方面，粉煤热解、催化热解、油尘分离等关键技术还处于示范和优化阶段，油收率偏低且单体装置规模偏小，半焦综合利用滞后。

四、西部地区富油煤开发利用理念与技术体系构想

（一）开发利用理念

1. 树立富油煤就是煤基油气资源的观念，优化开发布局

从认知观念上，强化富油煤的油气资源保障意识。将富油煤作为煤基油气资源，其开发利用方式区别于普通煤炭，最大程度地开发富油煤资源并发挥富油煤蕴含的油气价值。查清富油煤资源底数，在现有地质勘查资料的基础上，开展富油煤补充勘查。考虑生态保护红线、黄河流域生态环境保护、煤炭赋存等影响因素，客观评估富油煤资源量和可采规模。合理规划富油煤的开发时序、规模、区域，改变当前富油煤仅作为普通煤炭的开发方式。

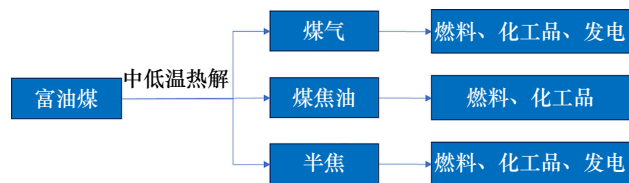


图 1 富油煤热解利用产业链示意图

富油煤热解一体化的提效降碳潜力巨大。2019 年西部地区用于燃烧发电和供热的富油煤约为 5.2×10^8 t，如全部按照热解发电一体化方式进行利用，可生产油品近 5×10^7 t；与常规燃煤发电相比，提高能效 6%，减少碳排放 2.8×10^8 t。

2. 适应经济社会发展新要求，科学开采富油煤资源

推进绿色开发，保护生态环境。按照“绿水青山就是金山银山”的绿色发展理念，采前系统规划、采中精准控制、采后有效恢复，发展富油煤绿色开采技术，推进协同开发并构建一体化开发新模式。在提高富油煤回采率、充分开发富油煤资源的同时，积极保护西部地区脆弱的环境，实现资源开发与环境保护的协调发展；由单一煤炭资源开发拓展为煤及共伴生资源综合开发、煤与煤层气等协同开发，提高资源综合开发效率，实现煤炭资源开采变革为煤、油、气等资源联产的目标。

3. 充分利用富油煤油气属性，增加国内油气供给

以油为先，开展梯级利用。最大限度地利用富油煤中的油气组分，生产轻质汽油、特种油品、高端煤基含氧化合物产品、高品质燃气等油气产品及其替代品，增加国内油气供给。耦合集成，提高产品附加值。通过各单项技术、多种产品、不同品位能量的耦合集成，减少投资和成本，提高利用效率，增加产品利用的附加值，推动煤炭由燃料向原料与燃料并重转变。

（二）技术体系构想

着眼富油煤勘查—开发—利用全过程，针对当前富油煤开发利用存在的问题，依托现有技术基础实施富油煤勘查开发利用关键技术攻关，力求形成富油煤开发利用技术体系；变革富油煤的传统开发利用方式，支持实现富油煤资源的精细勘查、矿区一体化开采、井上与井下立体热解利用。

1. 基于精细勘探技术，补充勘查富油煤资源分布及变化规律

以取心分析化验、智能测井为基础，综合运用高分辨率三维地震勘探、高精度电磁新方法探测、快速精准钻探技术、遥感技术等新手段，构建“空天地”一体化勘查技术；与地质大数据技术协同配合、相互验证、综合分析，精准探测西部地区富油

煤的资源量及分布状况。

2. 攻关高回采率与精细分选技术难题，最大程度地减少资源浪费

富油煤作为煤基油气资源，首先利用其中的油，其次是气，最后是煤。针对富油煤资源的节约开发和梯级利用需求，一是对富油煤资源开发进行单独规划，研究井下无煤柱开采等技术以提高回采率；二是创新原煤分选工艺技术，攻克一批具有精细化、智能化特征的煤炭分选加工共性技术，提高富油煤洗选水平，为富油煤热解提供充足的原料用煤。

3. 创新热解技术体系，破解规模化发展瓶颈

对于规模化发展富油煤开发利用面临的高温气固分离难、焦油含尘量高、半焦高附加值利用技术不成熟等瓶颈问题，现有的热解技术因处于研发和工业化初始阶段而无法全面解决。根据热解技术的示范应用情况，深入开展催化热解、加压热解与多联产等新技术研发，为优化百万吨级粉煤热解工艺提供充分的技术保障。

4. 探索原位热解技术，实现井下提取和转化

提高热解效率及产率，探索富油煤地下原位热解抽取油气资源应用，需要解决煤的热传导性较差、煤焦油的热解产率偏低、热解过程污染物控制困难等问题。研究大功率电加热、过热蒸汽加热等技术，形成地下富油煤的热反应场；增加富油煤原位热解过程中热量传递的稳定性和传导性，使过热蒸汽带来的热量均匀分散到煤层中，提高热解效率。

五、富油煤开发利用关键技术分析

（一）高精度综合勘查技术

生态红线划定、煤炭智能化开采、全过程安全绿色开采要求精细勘查富油煤资源及赋存条件，为建设现代化煤矿、促进煤炭资源开发与矿区生态环境保护协调发展提供直接支撑。西部地区的不同区域，富油煤资源占比及焦油产率存在明显差异 [6]。在空间特征上富油煤与整体煤层共同富集，所以高精度勘查技术的关键在于从勘探煤层中寻找富氢组分较高、煤化程度较低的富油煤层。建立适应西部地区富油煤赋存特征的高精度综合勘查技术，重点突破水平定向钻探、定向分支钻探、三维地震勘探、高精度电磁法勘探等内容；全面刻画地质体赋存状态及动态，提高多物性特征精度，实现多种地

质信息综合研究目标，弥补传统综合勘查技术在精度、深度探测方面的不足。

经过多年的技术攻关，以地震技术为主、多种技术手段相配合、井上与井下相联合的多维立体综合勘探技术取得突破；逐步形成了以三维高分辨率地震探测为核心、采前与采中配合、井上与井下一体、“空天地”一体化的煤矿地质勘探与保障技术体系 [22]。对于富油煤层的精准探测，水平定向钻探、定向分支钻探是关键技术，最后利用取心分析化验完成整体探测，完成更加针对富油煤层、从煤层精细探测到富油煤精准“提取”的全过程。

在综合勘查、多维立体勘查技术基础上，进一步提高勘查钻孔资料利用率、地震勘探精度；借助计算机模拟技术和空间地理信息系统平台，推动常规煤炭地质勘查向数字勘查、信息化勘查迈进；查明富油煤的分布、厚度变化、焦油产率等指标，提升富油煤资源整体勘查程度，为科学有序开发工作提供坚实支撑。

（二）高回采率开采技术

我国煤炭资源回收率平均为40%，距离世界先进水平的80%以上差距明显，特别是小煤矿的回收率更低 [23]。目前，富油煤并未作为特殊煤种而采取专门的开采方法，采出率同样不高，不利于发挥所蕴含油气资源的价值。

高回采率开采要求对矿区富油煤资源进行统一规划，合理布局开发时序与方法，采取专门的开采技术，以此提高煤炭回采率（见图2）。在规划矿井时选择合理的开采方案，降低设计损失；减少工业广场的煤柱，减少防水煤柱的数量；优化采区的设计方案，合理布置采区巷道。在采区煤层地质条件允许的条件下，加大采区工作面的倾斜长度，减少采区工作面的阶段煤柱；合理布置工作面，尽量减少三角煤和断层造成的损失 [23]。

（三）井下原位热解技术

井下原位热解指将热量导入地下煤层并对其直接加热，在煤炭的固态有机质受热发生裂解后，将产生的液态和气态有机质抽取至地面进行处理加工的过程 [24,25]。通过富油煤的原位热解，直接提取油气组分，将煤炭中的大部分碳留在地下残焦中，由此实现“取氢留碳”。深部煤炭原位热解技术方

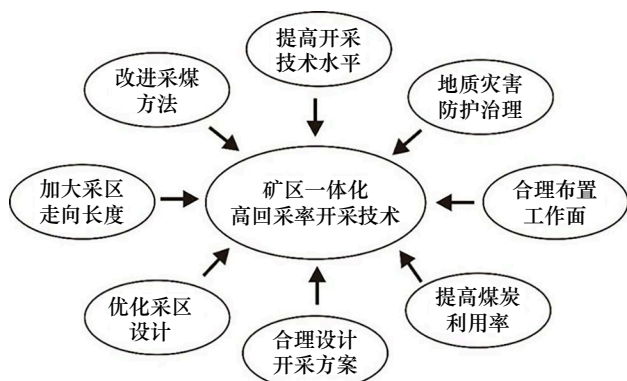


图2 高回采率开采技术构成

案 [26], 采用水平井中的电磁感应加热管、微波加热管进行加热, 通过高温热气促使地下煤炭发生热解反应, 利用垂直布设的抽采井将裂解形成的液态和气态有机物抽到地表; 煤炭原位流态化开采技术方案研究 [27] 提出了深部原位流态化开采的采动岩体力学等理论、煤炭深部原位流态化开采的发展路线, 为开展富油煤井下原位热解提供了借鉴。

需要进一步研究大功率电加热、过热蒸汽加热、井下小型核反应堆加热等技术, 形成地下富油煤热反应场。可以与矿区可再生能源进行耦合利用, 应用可再生能源进行井下加热, 进一步减少化石能源使用量。

(四) 热解气化一体化技术

在碳中和目标下, 富油煤地面热解气化一体化技术是实现煤炭分级、分质转化利用, 提高能源利用效率的重要途径, 正成为富油煤清洁高效利用的发展方向。

热解气化一体化技术可以分为热解-气化一体化、热解-发电-化学一体化等方式 [6]。陕西延长石油(集团)有限责任公司研发的万吨级粉煤热解-气化一体化技术, 创造性地将粉煤热解、半焦气化结合在同一个反应器内, 生产煤焦油、合成气两种基础化工原料, 煤焦油收率可超过 15%; 能够有效解决传统煤加工利用过程中焦油收率低、热解半焦利用难、环境污染严重等现实问题, 具有焦油收率高、能源转化效率高、工艺设备集成先进等技术优势, 为富油煤地面热解-气化一体化应用提供了新思路。

我国需要加快突破中低温热解油气与热解粉焦的高温气固在线分离、油尘分离等技术, 逐步实现

富油煤热解气化的规模化及产业化。

(五) 原位热解半焦 CO₂ 封存技术

采取原位热解方式, 可以最大限度地提取富油煤中的油气资源并将半焦留存地下, 直接支持碳达峰、碳中和发展目标。富油煤在井下原位热解后形成了发达的孔缝结构空间, 大量热解产物产出使半焦形成以中孔、大孔为主的孔隙结构; 在“取氢留碳”的基础上, 可将 CO₂ 注入热解半焦层进行永久封存。与常规煤炭 CO₂ 封存方法相比, 该技术为 CO₂ 吸附提供了良好的封存空间, 对盖层扰动也较小, 封存的稳定性、安全性较高, 是固碳、减碳的新手段。

富油煤的井下原位热解与 CO₂ 封存尚处于前期探索阶段, 面临诸多认识瓶颈和技术挑战。CO₂ 封存空间形成与调控、封存潜力评价、封存地质条件选址与密闭性评价、地质风险探测等基础问题与应用技术仍需深入研究。在开展岩层密闭性、高温岩层损伤特点选址评价的基础上, 在井下利用密封隔热材料对煤层分割充填, 据此高效实施油气热解提取和 CO₂ 吸附空间调控, 实现半焦层 CO₂ 物理吸附储集, 将扩大 CO₂ 封存规模、提高长期封存稳定性 [28]。

六、促进西部地区富油煤开发利用的措施建议

(一) 将富油煤纳入非常规油气资源管理

富油煤是集煤、油、气属性于一体的煤基油气资源, 建议将富油煤作为非常规油气资源纳入战略性矿产资源范畴。针对富油煤的油气资源属性, 开展富油煤油气资源开发潜力综合评价; 将富油煤勘查相关要求纳入《中华人民共和国矿产资源法》修订内容, 为推进富油煤开发利用提供高层级的依据和保障; 按照优先生产油气的原则开发利用富油煤资源, 开发规模可不受煤炭产能限制, 利用规模可不计入燃煤总量控制范围。

(二) 合理加大富油煤开发利用科技攻关力度

攻关富油煤资源勘查、开发、转化关键核心技术, 加快形成具有自主知识产权的全产业链关键技术体系, 为富油煤的规模化开发利用提供科技支撑。

一是加强国家级富油煤开发利用研发中心和试验平台建设,推进富油煤形成机理、热解温度场控制、焦油回收率提高、地下原位热解大功率加热等勘探开发利用理论与技术攻关;二是推动建立以企业为主体、“产学研用”相结合的富油煤开发利用技术创新平台,形成西部地区富油煤开发利用创新联盟。

(三) 设立富油煤开发利用国家级示范区

建议选择富油煤资源总量丰富,开采地质条件相对简单的陕西省榆林市矿区,设立国家级富油煤产业发展示范区,纳入国家重大专项范围。支持示范区建设富油煤原位开采和大规模热解生产油气示范工程,突破富油煤原位热解大功率加热装置、煤层致裂增渗提高导热性能装置、单台百万吨以上热解装置温度控制技术等技术瓶颈,推动富油煤大规模、高效率生产油气技术进步,促进原位热解生产油气实现“0到1”的突破。

(四) 推动西部地区新能源和富油煤协同开发

西部地区风、光资源丰富,富油煤分布范围广、资源总量大,实施新能源和富油煤协同开发的条件得天独厚。建议借鉴国内外页岩油开发经验,支持发展基于风能/光伏的大功率电加热、煤层增渗导热、热解油气保温防堵输送等技术,开展西部地区富油煤原位热解工程试验。富油煤是煤基油气资源,可比照页岩气等非常规油气资源的开发利用补贴政策,研究制定相应的税收激励政策,同时鼓励地方对富油煤利用企业按油气生产量进行财政补贴。

利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: May 6, 2022; **Revised date:** June 1, 2022

Corresponding author: Ren Shihua is a research fellow from Coal Research Institute Co., Ltd. His major research fields include coal-related technical and economic evaluation and energy strategies. E-mail: ren@cct.org.cn

Funding project: Chinese Academy of Engineering project “Research on Resource Guarantee for Planning and Layout of Coal-Based Oil and Gas Strategic Bases” (2022-XZ-36), “Research on Development Strategy of Oil-rich Coal in West China” (2020-XZ-12)

参考文献

[1] 中国石油集团经济技术研究院. 2020年国内外油气行业发展报

告[M]. 北京:石油工业出版社,2021.

CNPC Economics & Technology Research Institute. Report on domestic and international oil and gas industry in 2020 [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2021.

[2] 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.

Kang H P, Wang G F, Wang S M, et al. High-quality development of China's coal industry [J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(5): 130-138.

[3] 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.

Xie H P, Wu L X, Zheng D Z. Prediction on the energy consumption and coal demand of China in 2025 [J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(7): 1949-1960.

[4] 谢克昌.“十四五”期间现代煤化工发展的几点思考[J].煤炭经济研究,2020,40(5):1.

Xie K C. Several thoughts on the development of modern coal chemical industry during the 14th Five-Year Plan period [J]. Coal Economic Research, 2020, 40(5): 1.

[5] 朱妍.中国工程院院士王双明:“煤炭兜底”与“绿色低碳”并行不悖[N].中国能源报,2021-07-16(01).

Zhu Y. Wang Shuangming: Coal and low-carbon go hand in hand [N]. China Energy News, 2021-07-16(01).

[6] 王双明,师庆民,王生全,等.富油煤的油气资源属性与绿色低碳开发[J].煤炭学报,2021,46(5):1365-1377.

Wang S M, Shi Q M, Wang S Q, et al. Resource property and exploitation concepts with green and low-carbon of tar-rich coal as coal-based oil and gas [J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(5): 1365-1377.

[7] 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.

Xie H P, Ren S H, Xie Y C, et al. Development opportunities of the coal industry towards the goal of carbon neutrality [J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(7): 2197-2211.

[8] 王国法,任世华,庞义辉,等.煤炭工业“十三五”发展成效与“双碳”目标实施路径[J].煤炭科学技术,2021,49(9):1-8.

Wang G F, Ren S H, Pang Y H, et al. Development achievements of China's coal industry during the 13th Five-Year Plan period and implementation path of “dual carbon” target [J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(9): 1-8.

[9] 任世华,曲洋.煤炭与新能源深度耦合利用发展路径研究[J].中国能源,2020,42(5):20-23.

Ren S H, Qu Y. Research on development path of deep coupling utilization of coal and new energy [J]. Energy of China, 2020, 42(5): 20-23.

[10] 任世华,焦小淼,谢亚辰.碳达峰碳中和目标下煤炭行业发展若干思考[J].中国能源,2021,43(11):34-40.

Ren S H, Jiao X M, Xie Y C. Some thoughts on coal industry development under carbon neutralization target [J]. Energy Industry Development, 2021, 43(11): 34-40.

[11] 申艳军,王旭,赵春虎,等.榆神府矿区富油煤多尺度孔隙结构特征[J].煤田地质与勘探,2021,49(3):33-41.

Shen Y J, Wang X, Zhao C H, et al. Experimental study on multi-scale pore structure characteristics of tar-rich coal in Yushenfu

- mining area [J]. *Coal Geology & Exploration*, 2021, 49(3): 33–41.
- [12] 姚征, 罗乾周, 李宁, 等. 陕北石炭—二叠纪富油煤赋存特征及影响因素 [J]. *煤田地质与勘探*, 2021, 49(3): 50–61.
Yao Z, Luo Q Z, Li N, et al. Occurrence characteristics of carboniferous-permian tar-rich coal and its influencing factors in Northern Shaanxi [J]. *Coal Geology & Exploration*, 2021, 49(3): 50–61.
- [13] 张宁, 许云, 乔军伟, 等. 陕北侏罗纪富油煤有机地球化学特征 [J]. *煤田地质与勘探*, 2021, 49(3): 42–49.
Zhang N, Xu Y, Qiao J W, et al. Organic geochemistry of the Jurassic tar-rich coal in Northern Shaanxi Province [J]. *Coal Geology & Exploration*, 2021, 49(3): 42–49.
- [14] 王锐, 夏玉成, 马丽. 榆神矿区富油煤赋存特征及其沉积环境研究 [J]. *煤炭科学技术*, 2020, 48(12): 192–197.
Wang R, Xia Y C, Ma L. Study on oil-rich coal occurrence characteristics and sedimentary environment in Yushen mining area [J]. *Coal Science and Technology*, 2020, 48(12): 192–197.
- [15] 师庆民, 米奕臣, 王双明, 等. 富油煤热解流体滞留特征及其机制 [J]. *煤炭学报*, 2022, 47(3): 1329–1337.
Shi Q M, Mi Y C, Wang S M, et al. Trap characteristic and mechanism of volatiles during pyrolysis of tar-rich coal [J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(3): 1329–1337.
- [16] 师庆民, 王双明, 王生全, 等. 神府南部延安组富油煤多源判别规律研究 [EB/OL]. (2021-12-28)[2022-05-10]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2190.TD.20211228.1329.004.html>.
Shi Q M, Wang S M, Wang S Q, et al. Multi source identification and internal relationship of tar-rich coal of Yan'an formation in the south of Shenfu [EB/OL]. (2021-12-28)[2022-05-10]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2190.TD.20211228.1329.004.html>.
- [17] 王双明. 对我国煤炭主体能源地位与绿色开采的思考 [J]. *中国煤炭*, 2020, 46(2): 11–16.
Wang S M. Thoughts about the main energy status of coal and green mining in China [J]. *China Coal*, 2020, 46(2): 11–16.
- [18] 马丽, 王双明, 段中会, 等. 陕西省富油煤资源潜力及开发建议 [J]. *煤田地质与勘探*, 2022, 50(2): 1–8.
Ma L, Wang S M, Duan Z H, et al. Potential of oil-rich coal resources in Shaanxi Province and its new development suggestion [J]. *Coal Geology & Exploration*, 2022, 50(2): 1–8.
- [19] 中国煤炭地质总局. 西北地区富油煤资源评价与开发利用研究 [R]. 北京: 中国煤炭地质总局, 2021.
China National Administration of Coal Geology. Evaluation and exploitation of tar-rich coal resources in Northwest China [R]. Beijing: China National Administration of Coal Geology, 2021.
- [20] 中国石油集团经济技术研究院. 2018 年国内外油气行业发展报告 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2019.
CNPC Economics & Technology Research Institute. Report on domestic and international oil and gas industry 2018 [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2019.
- [21] 王倩茹, 陶士振, 关平. 中国陆相盆地页岩油研究及勘探开发进展 [J]. *天然气地球科学*, 2020, 31(3): 417–427.
Wang Q R, Tao S Z, Guan P. Progress in research and exploration & development of shale oil in continental basins in China [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2020, 31(3): 417–427.
- [22] 李爽, 薛广哲, 方新秋, 等. 煤矿智能化安全保障体系及关键技术 [J]. *煤炭学报*, 2020, 45(6): 2320–2330.
Li S, Xue G Z, Fang X Q, et al. Coal mine intelligent safety system and key technologies [J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(6): 2320–2330.
- [23] 袁亮. 煤炭精准开采科学构想 [J]. *煤炭学报*, 2017, 42(1): 1–7.
Yuan L. Scientific conception of precision coal mining [J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(1): 1–7.
- [24] 高振楠. 煤液化油中酚类化合物的提取利用研究 [J]. *煤炭学报*, 2010, 35(7): 1188–1192.
Gao Z N. Study on the phenolic compounds extraction and application in coal liquefaction oils [J]. *Journal of China Coal Society*, 2010, 35(7): 1188–1192.
- [25] 万志军, 毕世科, 张源, 等. 煤—热共采的理论与技术框架 [J]. *煤炭学报*, 2018, 43(8): 2099–2106.
Wan Z J, Bi S K, Zhang Y, et al. Framework of the theory and technology for simultaneous extraction of coal and geothermal resources [J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(8): 2099–2106.
- [26] 葛世荣. 深部煤炭化学开采技术 [J]. *中国矿业大学学报*, 2017, 46(4): 679–691.
Ge S R. Chemical mining technology for deep coal resources [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2017, 46(4): 679–691.
- [27] 谢和平, 鞠杨, 高明忠, 等. 煤炭深部原位流态化开采的理论及技术体系 [J]. *煤炭学报*, 2018, 43(5): 1210–1219.
Xie H P, Ju Y, Gao M Z, et al. Theories and technologies for in-situ fluidized mining of deep underground coal resources [J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(5): 1210–1219.
- [28] 王双明, 申艳军, 孙强, 等. “双碳”目标下煤炭开采扰动空间 CO₂ 地下封存途径与技术难题探索 [J]. *煤炭学报*, 2022, 47(1): 45–60.
Wang S M, Shen Y J, Sun Q, et al. Underground CO₂ storage and technical problems in coal mining area under the “dual carbon” target [J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(1): 45–60.