移动扫码阅读

葛腾泽, 王创业, 刘　猛, 等. 耦合大功率微波加热的煤炭地下气化 CRIP 工艺研究[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(5): 324−334.

GE Tengze, WANG Chuangye, LIU Meng, *et al*. Study on CRIP process of underground coal gasification coupled with high-power microwave heating[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(5): 324−334.

耦合大功率微波加热的煤炭地下气化 CRIP 工艺研究

葛腾泽[1,2], 王创业[1,2], 刘　猛[1,2], 刘丹璐[1,2], 高尔斯[1,2], 吴　松[3], 袁淑霞[3], 樊玉光[3]

(1. 中石油煤层气有限责任公司, 北京　100028; 2. 中联煤层气国家工程研究中心有限责任公司, 北京　100095; 3. 西安石油大学 机械工程学院, 陕西 西安　710065)

摘　要: 煤炭地下气化注入点可控后退(Controlled Retraction Injection Point，CRIP)工艺能够实现中深层煤炭资源的清洁高效原位开采，将我国富裕的煤炭资源转化为战略或缺的燃气资源。为取代 CRIP 工艺中氧气和点火液的注入、提高煤层气化反应活性，基于煤炭地下气化生产工艺和微波加热技术特点，创新提出了耦合大功率微波加热的煤炭地下气化 CRIP 工艺设计，将气化剂和微波发生器产生的微波经由连续油管注入到地下煤层并在目标气化区释放。通过理论分析和实验研究，从微波的产生、传输、释放、与煤层作用、以及产业发展模式等方面分析了该工艺设计在工程实践中面临的难题和解决方案。研究结果表明，耦合大功率微波加热的煤炭地下气化 CRIP 工艺在技术上是可行的；在煤炭地下气化过程中加热煤层所需的热量较大，大功率磁控管可以满足工业生产规模需求；微波能够通过双层连续油管镀铜的内管外壁和外管内壁间的环形空间远距离传输到地下煤层；微波频率越高，微波功率衰减越快，2 450 MHz 和 915 MHz 频率微波在双层连续油管中传输 500 m 时，其功率分别衰减至 15.6% 和 32.1%，中深层煤炭地下气化应选用较低频率来远距离、低损耗输送微波；在双层连续油管前端的外管壁面上按一定规则割开缝隙，形成微波释能器，将微波从管线中泄漏出来辐射煤层；原煤在干燥、热解和燃烧阶段都能够较好地吸收微波能而被加热，在有氧条件下煤样温度升高到 587 ℃ 时焦炭被点燃，最高温度可达 1 080 ℃；风光电−储能−煤炭地下微波气化融合产业模式能够充分利用绿色能源，实现中深层煤炭清洁高效原位开采。研究能够为微波辅助煤炭地下气化提供理论基础和技术支持。

关键词: 煤炭地下气化; 注入点可控后退; 微波加热; 注入井系统

中图分类号: TE372　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 0253−2336(2024)05−0324−11

Study on CRIP process of underground coal gasification coupled with high-power microwave heating

GE Tengze[1,2], WANG Chuangye[1,2], LIU Meng[1,2], LIU Danlu[1,2], GAO Ersi[1,2], WU Song[3], YUAN Shuxia[3], FAN Yuguang[3]

(1. *PetroChina Coalbed Methane Company Limited*, *Beijing* 100028, *China*; 2. *China United Coalbed Methane National Engineering Research Center Co., Ltd*, *Beijing* 100095, *China*; 3. *School of Mechanical Engineering*, *Xi'an Shiyou University*, *Xi'an* 710065, *China*)

Abstract: The Controlled Retraction Injection Point (CRIP) process of underground coal gasification can mine in situ medium-deep coal resources efficiently and transform rich coal resources in China into strategic and scarce gas resources. In order to replace the injections of oxygen and igniting agent and improve the gasification reactivity of coal seam, the CRIP process of underground coal gasification coupled with high-power microwave heating was proposed in this paper based on technical characteristics of underground coal gasification and mi-

收稿日期: 2023−05−06　　**责任编辑:** 黄小雨　　**DOI:** 10.12438/cst.2023-0782

基金项目: 中国石油天然气股份有限公司重大科技攻关资助项目 (2019E-25); 陕西省自然科学基础研究计划资助项目 (2023-JC-QN-0609); 陕西省教育厅科研计划资助项目 (21JK0838)

作者简介: 葛腾泽(1988—), 男, 北京人, 工程师, 硕士。E-mail: getengze@petrochina.com.cn

通讯作者: 吴　松(1988 —), 男, 陕西西安人, 讲师, 硕士生导师, 博士。E-mail: songwu@xsyu.edu.cn

crowave heating. Gasification agents and microwave generated were injected into the underground coal seam through a continuous oil pipe and released in the target gasification area. Theoretical and experimental research were conducted to grope for solutions to microwave generation, transmission, release, coal seam heating, and industrial development model. The results show that the CRIP process of underground coal gasification coupled with high-power microwave heating is technically feasible. High-power magnetrons can supply a large amount of heat to meet the industrial production scale. Microwave can be transmitted remotely to underground coal seam through the annular space between the inner tube outer wall and the outer tube inner wall coated with copper in the double-layer continuous oil pipe. The higher microwave frequency is, the faster microwave power decays. If 2 450 MHz and 915 MHz microwaves are transmitted a distance of 500 m in the double-layer continuous oil pipe, their power decays to 15.6% and 32.1% respectively. Lower frequencies should be selected to transmit microwaves in long distance with low loss in medium-deep underground coal gasification. A microwave energy release device produced by cutting gaps on the outer wall surface at the front end of the double-layer continuous oil pipe according to certain rules can leak out the microwave and radiate the coal seam. Raw coal can absorb microwave energy well and be heated during the drying, pyrolysis, and combustion stages. When the sample temperature rises to 587 ℃, the coke is ignited in the air atmosphere. And a maximum temperature of 1 080 ℃ is observed. An integrated industrial model of wind-solar power, energy storage, and underground microwave gasification of coal is able to fully utilize green energies and achieve clean and efficient in-situ mining of medium-deep coal seams. The conclusions in the present study provide the theoretical basis and technical support for microwave assisted underground coal gasification.

Key words: underground coal gasification；controlled retraction injection point；microwave heating；injection well system

0 引　言

“碳达峰”“碳中和”是新时代我国重大的能源战略。天然气是清洁低碳的化石能源，来源广泛、输送便利，是全球能源消费从化石燃料转向绿色清洁“碳中和”式能源消费的过渡能源[1]。同时天然气在我国能源消费结构中占据重要地位，有力支撑着国计民生的发展。近 5 年我国天然气消费量逐年增长，为满足消费需求，我国天然气自产量不断提高，但仍需进口大量天然气。2021 年我国天然气进口量达 1 614 亿 m^3，占全年天然气消费量的 43.7%。为降低我国天然气的对外依赖度，保障国家能源安全，开辟天然气规模增产新途径极具战略意义[2]。

煤炭地下气化（Underground Coal Gasification，简称 UCG）通过在地下煤层中创造煤气化反应条件，使地下煤炭与注入的气化剂进行可控的燃烧、气化反应，将地下原煤转化为含有 CH_4、H_2、CO 等可燃组分的合成气并源源不断输送至地面加工利用[3-4]。UCG 是一种先进清洁的煤炭原位开采技术，避免了传统煤炭矿采存在的安全和环境风险，也可对难以矿采的中深层煤炭资源进行开发，极大提高了地下煤炭资源的利用率。“富煤、贫油、少气”是我国的基本能源禀赋，决定了我国在较长一段时间内能源消费仍以煤为主。UCG 能够充分发挥我国的能源禀赋，将富裕的煤炭资源清洁高效地转化为战略缺乏的燃气资源，提高天然气自产量，减少向外进口量，保障国家能源战略安全，提高资源利用率，助力“双碳”目标顺利达成[5]。

UCG 技术已历经近百年发展，中国、前苏联、美国、欧盟等[6-9] 进行了大量模拟和试验研究，研究结果验证了 UCG 技术的可行性，但常规地下气化存在煤气热值低、稳定性弱、规模小、测控难以及只适用于浅煤层等问题。美国劳伦斯利弗莫尔国家实验室[6-7] 提出了注入点可控后退（Controlled Retraction Injection Point，简称 CRIP）工艺，并进行多次试验，实现了中深煤层气化过程可导可控、产气优质稳定，是 UCG 技术的革命性突破。煤炭地下气化工艺要在地下进行点火、燃烧，以提供气化反应所需能量，而这一过程需要往地下注入 O_2。O_2 的注入增加了管道腐蚀、粗煤气爆炸的风险，降低了粗煤气的品位、增大了二氧化碳的分离成本，同时空分增大了生产成本。煤炭地下气化是在地下煤层中发生的原位反应，属于扩散控制，气化反应速率取决于气化剂向煤由表及里的质量传递[10-12] 和气化反应活化能，因此提高气化剂扩散速率和降低反应活化能对提升气化效果有重要意义。为实现以上两方面目的，提出采用大功率微波能进行煤炭地下气化的设想，并结合 CRIP 工艺和微波热解原煤试验结果以及本课题组在微波原油开采方面积累的成果进行了可行性研究。

微波是介于红外和无线电波之间的一种电磁波，频率范围为 300 ~ 300 000 MHz（相应波长为 100 ~ 0.1 cm）。微波加热是一种非接触式加热技术，加热速度快、效率高、易于控制，同时还具有整体性加热和选择性加热的特性，目前已广泛应用于工程实践中[13-14]。煤是一种复杂的混合物，含有水分、矿物质和极性含氧官能团等，因而具有较高的介电常数及介质损耗，能够吸收微波能而被加热[15-18]。在煤化工方面，微波加热应用于煤干燥、脱硫、热解制焦和

焦油等方面已有较多实验室规模研究[14,19-21]。在大规模矿产开采方面，已有学者[22-23]对微波加热辅助原油开采、煤层气开采开展了实验和模拟研究，结果表明微波加热能够有效提高原油和煤层气的开采量，是潜能巨大的前瞻性增产技术，然而这些研究工作目前多处于实验探索阶段，离工业化应用还有距离。

相关学者[24-28]在实验室中对微波加热条件下煤的气化反应特性进行研究。ELLISON 等[25]通过试验对比了微波加热和常规加热条件下煤的气化反应特性，结果表明升高气化反应温度，无论微波加热还是常规加热，其气化反应碳的转化速率都呈逐渐增加的趋势，使用原煤焦在气化温度 600 ~ 900 ℃ 时，微波加热条件下碳的转化速率均大于常规加热，微波加热更有利于提高气化反应速率，并且这种现象低温时更为明显。LIU 等[26]采用试验与数值模拟相结合的方法研究了微波加热煤焦气化反应动力学，发现微波加热可明显降低煤焦−水蒸气气化反应的活化能，与常规加热相比微波加热方式更有利于煤焦−水蒸气气化反应中 CO 的生成，对提高合成气的质量有重要的促进作用。这些研究结果证实了微波加热能够有效促进煤气化反应的进行。

当微波辐射到煤层时，在微波穿透深度内的煤层会整体吸收微波能而受热，温度开始升高并逐渐析出水分和热解气，气体逸出使得受热煤层内的空隙−裂隙结构增多，渗透率增大，反应活性增强[15,22,29]。将微波加热技术创造性地应用于煤炭地下气化 CRIP 工艺，一方面能够减少或取代纯氧的注入，提升粗煤气品质，另一方面提高了煤层气化反应速率，增大了煤炭原位开采速度。目前国内外对微波辅助加热的煤炭地下气化生产工艺鲜有研究。首先基于煤炭地下气化的生产工艺和微波加热的技术特点，开发了耦合大功率微波加热的煤炭地下气化 CRIP 工艺设计；其次针对该工艺设计，研究分析了微波的产生、传输、释放、以及与煤层作用的特点、影响参数和关键设备的可行性；最后提出了风光电−储能−煤炭地下微波气化融合产业模式，以进一步提高能效、减少碳排放。研究工作能够为微波辅助煤炭地下气化提供理论基础和技术支持。

1　微波气化原理

1.1　微波加热煤层机理

微波是具有一定频率范围的电磁波，其本身不是热源，不能直接加热物质。微波加热通过物质内部带电或具有偶极矩的微观粒子对微波产生不同的介电响应，把微波能转化成热能，使物质温度升高。物质材料由极性分子和非极性分子组成，其中极性分子受到交变电磁场的激励时会产生旋动，以每秒数十亿次的频率不断重新摩擦排列，进而产生热量。微波直接作用于物质内部的分子或离子，引起分子或离子振动产生热量[30]。与导热、对流、热辐射相比，微波能够渗透到物质内部被吸收转化为热能，不需要表面传热过程，加热速度快且实现物质温度整体升高。

微波辐射物质时会出现反射、吸收和穿透等现象，这取决于物质的介电性质。物质的介电性质用复介电常数 ε 来表示：

$$\varepsilon = \varepsilon' - \mathrm{i}\varepsilon'' \tag{1}$$

式中：ε' 为实介电常数，反映电介质对电场能量的储存能力；ε'' 为虚介电常数，亦称为介电损耗因子，反映电场能量在电介质中的损耗，物质材料的虚介电常数越大，越容易吸收微波能转化为内能；i 为虚数单位。

微波辐射物质时的穿透深度与微波波长成正比，波长越长，穿透深度越大。用渗透深度 d_p 来表达：

$$d_\mathrm{p} = \frac{\lambda}{2\pi\sqrt{2\varepsilon'}} \frac{1}{\sqrt{-1+\sqrt{1+(\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'})^2}}} \tag{2}$$

式中：λ 为微波波长；d_p 为当微波功率从物质表面衰减至表面值的 $1/e$ 时的距离。d_p 值越大，微波加热的作用范围越大，且 d_p 与微波的波长成正比，波长越大，渗透深度越深。

物质的微波吸收指数 A 反映了其对微波能的吸收效率：

$$A = \frac{2\sqrt{2(\sqrt{\varepsilon'^2+\varepsilon''^2}+\varepsilon')}}{d_\mathrm{p}(\sqrt{\varepsilon'^2+\varepsilon''^2}+\sqrt{2(\sqrt{\varepsilon'^2+\varepsilon''^2}+\varepsilon')+1})} \tag{3}$$

介质损耗平均功率密度 $\overline{P_\mathrm{d}}(Z)$ 反映了空间某点的微波平均吸收功率：

$$\overline{P_\mathrm{d}}(Z) = \frac{\omega}{c} \frac{4\varepsilon''\overline{S_0}e^{-2\alpha z}}{\sqrt{\varepsilon'^2+\varepsilon''^2}+\sqrt{2(\sqrt{\varepsilon'^2+\varepsilon''^2}+\varepsilon')+1}} \tag{4}$$

式中：ω 为角频率；c 为真空中的光速；$\overline{S_0}$ 为坡印廷矢量的平均值；α 为衰减因子；z 为电磁波的传播距离。

煤是一种复杂的混合物，在微波辐射时煤中水分、部分有机官能团和矿物质（灰分）会吸收微波能而使煤加热。水是极性分子，易对微波电磁场产生介电相应而吸收微波能转化为内能。煤中所含的缩合芳香体系中含有一定量的极性含氧官能团

(—COOH、—OH 等)，这些官能团的不同极性键矩矢量和不为 0，在微波电磁场作用下会表现出明显的极化性质，因而具有较高的介电常数和介质损耗，能够吸收微波能而被加热[17-18]。煤中含有一定量的矿物质，在煤热解、气化和燃烧过程中矿物质会演变为灰分，无论是矿物质还是灰分，都能够对微波产生介电相应而吸收微波能[27-29]。

如图 1 所示，煤在微波加热的不同阶段所依赖的吸收微波能的主要组分不同。微波辐射地下煤层时，煤层压力一般较高，在初始升温的干燥阶段(<300 ℃)，主要依靠煤中水分、极性含氧官能团和矿物质吸收微波能。在地下煤层的热解阶段(300 ~ 800 ℃)，主要依靠这些极性官能团和矿物质(灰分)来吸收微波能。地下煤层热解后固相物质剩下焦炭，煤中的矿物质以灰分形式留在焦炭中，当继续用微波辐射时，焦炭主要依靠灰分来吸收微波能(>800 ℃)。

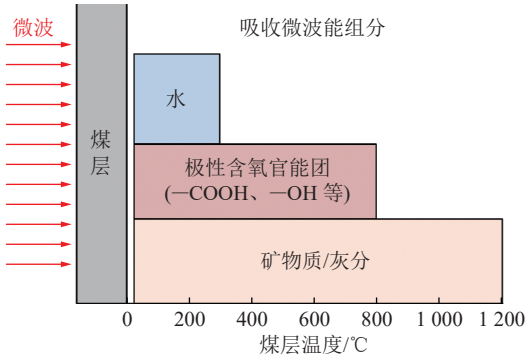

图 1　微波加热地下煤层机理

Fig.1　Microwave heating mechanism of underground coal seams

1.2　微波在煤炭地下气化中的作用

煤炭地下气化时，首先注入 O_2 和点火剂进行点火，在地下引燃煤层。煤在 O_2 作用下燃烧提供气化所需热量，促成煤炭与气化剂发生气化反应，生成粗煤气。在气化腔内发生气化反应的主要流程如图 2 所示。

在微波辐射下，煤层开始升温。当煤层温度升到 300 ℃ 时，开始发生煤炭的热解反应，有挥发分析出，热解反应如下：

$$\text{煤} \xrightarrow{\text{热解}} CH_4\uparrow + C_mH_n\uparrow + \text{焦油}\uparrow + (CO\uparrow、H_2S\uparrow、H_2\uparrow) + H_2O\uparrow + \text{焦炭} \quad (5)$$

煤的气化反应是指热解产生的挥发分、焦炭与气化剂发生的复杂反应。由于该反应是在缺氧条件下进行，因此主要产物包括：可燃的 CO、H_2 和 CH_4，少部分碳被氧化而成的 CO_2，还有少量的 H_2O。煤气化反应过程主要包括以下化学反应。

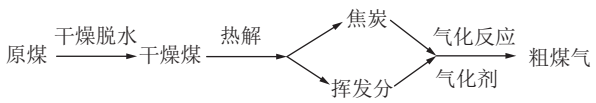

图 2　地下煤层气化反应流程

Fig.2　Reaction path of underground coal seam gasification

碳完全燃烧反应：

$$C + O_2 \rightarrow CO_2 + 393.8\ \text{MJ/kmol} \quad (6)$$

碳不完全燃烧反应：

$$2C + O_2 \rightarrow CO + 115.7\ \text{MJ/kmol} \quad (7)$$

CO_2 还原反应：

$$CO_2 + C \rightarrow 2CO - 162.4\ \text{MJ/kmol} \quad (8)$$

水煤气反应：

$$C + H_2O \rightarrow CO + H_2 - 131.5\ \text{MJ/kmol} \quad (9)$$

水煤气平衡/CO 变换反应：

$$CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2 + 41.0\ \text{MJ/kmol} \quad (10)$$

CH_4 生成反应：

$$C + 2H_2 \rightarrow CH_4 + 74.9\ \text{MJ/kmol} \quad (11)$$

$$CO + 3H_2 \rightarrow CH_4 + H_2O + 250.3\ \text{MJ/kmol} \quad (12)$$

在气化过程中引入微波加热后，微波可提供热源代替点火过程，彻底消除了点火不成功风险；煤炭气化所需 O_2 也大为减少，产生的粗煤气中 CO_2 含量降低，粗煤气热值提高。值得一提的是，微波场的存在不但可以提高分子碰撞的概率和增加分子的碰撞能量，还可以改变分子能量的类型和分子碰撞的方位，不仅可以加快化学反应速率，还可以改变化学反应的途径。

2　耦合大功率微波加热的煤炭地下气化 CRIP 工艺设计

2.1　煤炭地下气化 CRIP 工艺

煤炭地下气化注入点可控后退(Controlled Retraction Injection Point，简称 CRIP)工艺包括由注入井、水平井和生产井组成的 U 形井气化炉(图 3)，注入井通入双层连续油管和生产套管。由双层连续油管和生产套管注入 O_2、点火剂和气化剂，在靠近生产井处点火、燃烧并逐渐开始气化过程。随着气化腔的扩展，为确保煤层连续气化及煤气组分稳定，通过相关参数控制双层连续油管后退，使得气化剂注入点后移，实现煤层长距离、大范围气化并连续生产煤气。水平定向钻井和连续油管技术的成功应用推动了 CRIP 工艺的商业化。

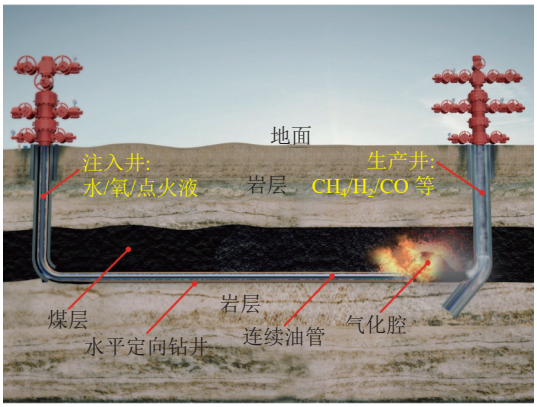

图 3　煤炭地下气化 CRIP 工艺示意

Fig.3　Schematic for the CRIP process of underground coal gasification

2.2　微波加热-煤炭地下气化 CRIP 工艺

基于微波加热的特性和煤炭地下气化 CRIP 工艺特点，提出了微波加热–煤炭地下气化 CRIP 工艺，如图 4 所示。与煤炭地下气化 CRIP 工艺相似，先利用定向钻井技术在煤层中构建 U 形井气化炉，将气化剂 H_2O 和 O_2 经注入井注入到地下煤层。微波发生器产生的微波也经由连续油管导入到地下煤层并在目标气化区释放，释放的微波渗透并加热煤层，从而减少或取代 O_2 注入。微波加热的煤层与气化剂发生气化反应，产生的粗煤气由生产井导出到地面上净化后使用。同时还设置有保护气体 N_2 的注入通道，当地下煤层气化腔内发生不可控着火、爆炸等紧急事故时注入 N_2 以保障安全。

与地上微波应用相比，采用微波能进行煤炭地下气化的关键工艺在于微波的长距离传输，即如何将微波以最小损耗导入地下。为减少微波传输过程的损失，传输管道必须足够光滑，设计了在双层连续油管内管和外管之间的环空通道中传输的工艺。为进一步减少微波传输损失，在双层连续油管内管外壁和外管内壁表面镀一层光滑的铜，形成同轴线型波导管将微波导入地下煤层。这利用了微波辐射镀铜表面时会被反射而不能穿透的特性。

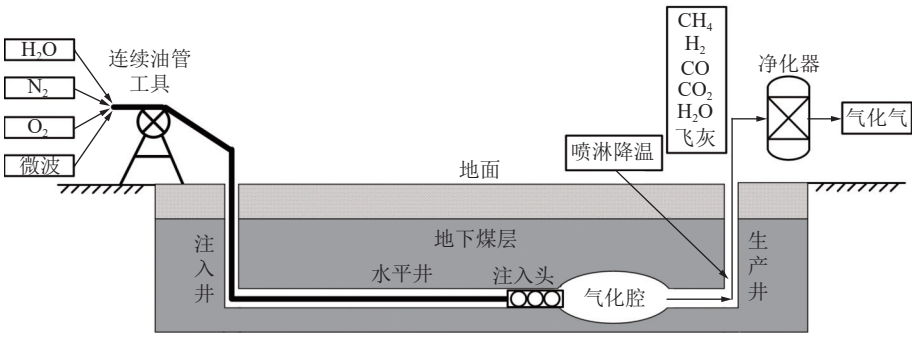

图 4　微波加热–煤炭地下气化 CRIP 工艺示意

Fig.4　Schematic for the CRIP process of underground coal gasification coupled with microwave heating

将注入井系统设计为多通道结构，如图 5 所示，从外到内分别是技术套管、生产套管、双层连续油管外管和双层连续油管内管。相应形成 4 层长输流通通道，包括内心圆管通道和外 3 层环空通道，从内到外分别是氧气注入通道、微波导入通道、水/水蒸气注入通道和氮气注入通道。微波传输中的能量损失最终转化为热能使管壁升温，在该结构设计中微波通道两侧的水和氧气流能够冷却管壁，同时水和氧气吸收的热量用于气化过程。

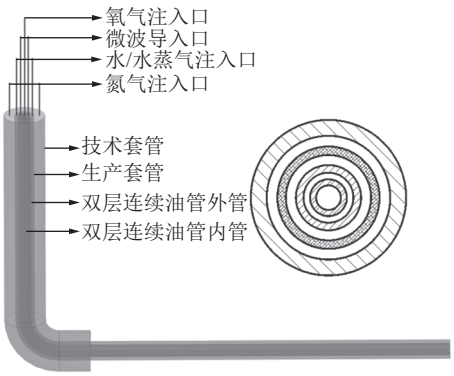

图 5　微波加热–煤炭地下气化 CRIP 工艺注入井结构

Fig.5　Injection well structure for the CRIP process of underground coal gasification coupled with microwave heating

随着气化腔的扩大与演变，地面上连续油管工具开始动作，控制双层连续油管逐渐后退，使得微波能在新的位置释放。该工艺中同时控制注入点和微波释放点后退。当气化腔逐渐变大，产品性能劣化后，需停止当前气化过程，控制连续油管后退，在新的位置开始新的气化腔。在传统 CRIP 工艺中该过程需要二次点火，在富含 O_2 的井中注入点火液存在很大安全风险，需要一系列停炉置换操作。引入微

波加热后煤层在微波加热作用下即可达到着火温度，随时进行二次点火，大幅提高了煤炭地下气化效率，同时降低了二次点火风险。

在 CRIP 工艺中引入微波加热后，省去了点火液，降低了点火风险。同时减少或取代 O_2 的注入，提高粗煤气的品位，增加反应煤层内的空隙–裂隙结构，提高煤层气化反应活性。微波加热–煤炭地下气化 CRIP 工艺提高了地下煤炭原位开采速率和品质，具有战略性、前瞻性。

3　耦合大功率微波加热的煤炭地下气化 CRIP 工艺可行性分析

3.1　大功率微波的产生

微波由微波发生器产生，微波管是微波发生器的核心，它可将电能转变为微波能。磁控管是常用的微波管型式，效率高、适应负载变化的能力强，特别适用于微波加热领域。微波加热设备主要工作于连续波状态，因而多用连续波磁控管。目前工业常用的磁控管参数见表 1。

表 1　工业常用磁控管参数

Table 1　Industrial magnetron parameters

型号	M116	M116-75	M116-100	M137	M172
频率/MHz	915±12	915±12	915±12	460±5	2 450±50
功率/kW	50	75	100	50	2

在煤炭地下气化过程中加热煤层所需的热量较大，因此采用大功率磁控管才能满足工业生产规模的需求。随着技术的进步，磁控管从起初的 500 W 发展到当今的 100 kW 成熟产品，电能向微波能转化效率达 80% 以上。现有 2 450 MHz 磁控管单管功率容量可达 30 kW，915 MHz 磁控管单管功率可达 100 kW。随着功率容量的增加，单个磁控管的生产成本显著增加，相对较为昂贵。同时因其物理机理和工艺结构的限制，磁控管的单管输出功率不能无限增加。采用多磁控管功率合成技术，来实现高功率微波源是一种经济有效的方法。通过微波功率注入可以实现对磁控管的频率锁定，基于阳极电压或者直流磁场调节形成类锁相环，控制输出相位的稳定。因此大功率微波源技术能够支撑微波加热–煤炭地下气化 CRIP 工艺的工业化实践。

3.2　大功率微波井下传输

微波辐射不同物质时会出现反射、吸收和穿透等现象。绝缘体等微波低损耗材料，微波透过时几乎没有能量损失；水、金属氧化物和碳基材料等高损耗材料，微波透过时会衰减并使物质加热；块状金属或合金等导体能够反射微波，且不能穿透。波导管利用金属导体对微波的反射作用，可以将微波约束在一个封闭空腔里进行传输。常见的有矩形波导管、圆形波导管和同轴线，如图 6 所示。在微波加热–煤炭地下气化 CRIP 工艺中采用双层连续油管，对双层连续油管内管外壁和外管内壁表面镀一层光滑的铜，铜对微波有非常好的反射效果，这样双层连续油管内外管之间的环形通道构成了同轴线型波导管，能够将地面大功率微波源产生的微波传输至地下煤层目标区域。为了让双层连续油管内管和外管在空间保持同心同轴，可在双层连续油管制造时每隔一段距离加装低微波损耗的绝缘支架。

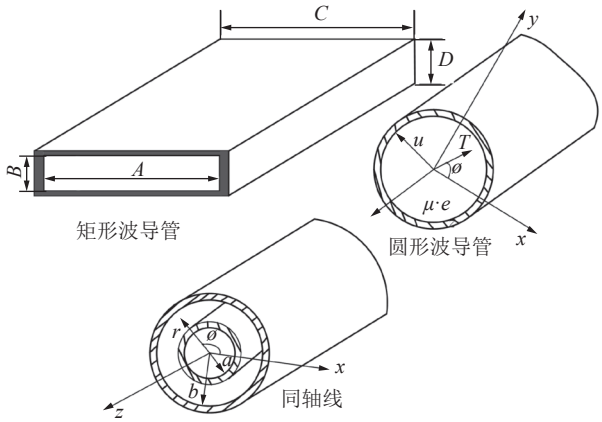

图 6　三种波导管的基本结构

Fig.6　Basic structure of three waveguides

微波在波导中传输时会发生损耗并造成功率衰减。传输距离越远，功率衰减越大。损耗的能量会以表面电流的形式耗散在波导的金属壁面上，最终转化为热能。中深层煤炭地下气化钻井深、距离远，微波从地面向地下煤层传输时会面临功率衰减的问题。若微波传输时衰减过大，不仅会降低微波加热的功率和效率，大量损耗的能量还会引起传输管线壁面升温，影响注入井系统安全运行。

微波在双层连续油管构成的同轴线中传输时的衰减因子按公式 (13) 确定：

$$\alpha = 7\times10^{-4}\sqrt{f\varepsilon}\frac{1+\dfrac{b}{a}}{2b\ln\left(\dfrac{b}{a}\right)} \tag{13}$$

式中：f 为微波频率；b 为双层连续油管外管的内径；a 为双层连续油管内管的外径。微波传输的衰减因子与微波频率和双层连续油管的尺寸结构有关，反映了微波传输过程中功率衰减的快慢。

图 7 展示了不同频率微波在双层连续油管中传

输时的衰减特性，双层连续油管的 a 为 60 mm，b 为 120 mm。微波功率传输效率是指微波传输一段距离后的功率与微波在双层连续油管入口时（即传输距离为 0 时）的功率之比。由图 8 可见随着微波传输距离的增大，微波功率传输效率降低，即微波功率降低，而微波功率随距离降低的幅度取决于微波频率。微波频率越高，单位距离微波损耗越大，微波功率衰减越快。图中还可发现工业中常用的 2 450 MHz 和 915 MHz 频率微波在双层连续油管中传输时衰减的非常快，当微波传输 200 m 时，2 450 MHz 和 915 MHz 频率微波其功率分别衰减至原来的 47.5% 和 63.5%，而传输 500 m 时，其功率分别仅剩原来的 15.6% 和 32.1%。在煤炭地下气化 CRIP 工艺生产中，双层连续油管作业长度在 1 000 m 以上，此时工业中常用的 2 450 MHz 和 915 MHz 频率微波因为衰减太大而不再适用，需要选择合理的微波参数。降低微波频率能够减小传输时的损耗，且频率越低，微波衰减越慢。在微波加热–煤炭地下气化 CRIP 工艺中，选用较低频率能够实现微波能的远距离、低损耗输送。美国 ORS 公司的电磁采油和微波采油技术所用频率也在低频段范围。

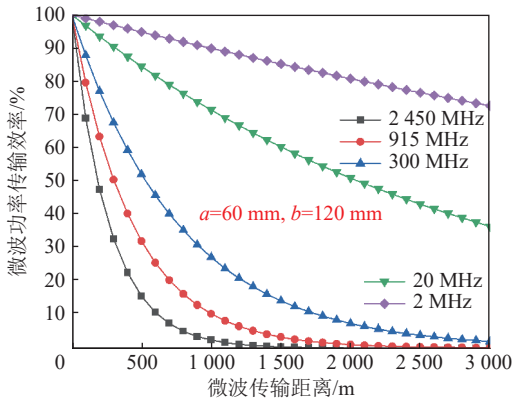

图 7　不同频率微波在双层连续油管中传输时的衰减特性

Fig.7　Attenuation characteristics of microwaves with different frequencies during transmission in a double-layer continuous oil pipe

3.3　大功率微波向地下煤层释放方法

大功率微波从地面经由双层连续油管传输到地下煤层气化区域后，需要将微波释放出来辐射煤层加热。在双层连续油管前端的外管壁面上按一定规则割开缝隙，形成微波释能器，将微波从管线中泄漏出来辐射煤层。微波释能器的缝隙尺寸根据微波波长、工艺所需的能量密度以及辐射煤层面积来设计，其结构如图 8 所示。地下煤层中的微波释能器工作环境苛刻，在设计上不仅要考虑耐高温高压、耐腐蚀和防灰尘堵塞，还要考虑与气化剂井下注入头工具的一体化集成。微波辐射煤层的加热范围跟微波的渗透深度 d_p 相关，取决于微波波长和煤层的介电常数。

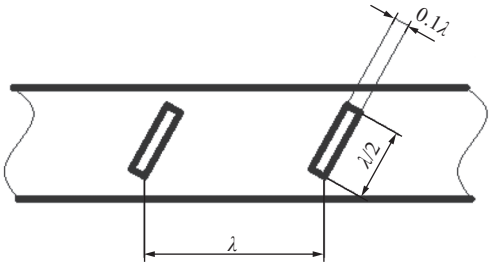

图 8　微波释能器的结构

Fig.8　Structure of the microwave energy releaser

3.4　微波加热原煤效果

为验证微波加热原煤辅助气化工艺的可行性，在实验室中开展了原煤微波加热试验。试验中所用自主改造的微波加热炉如图 9 所示。在微波加热炉顶部开一个直径 30 mm 的圆孔，圆孔上安装长度为 100 mm 的纯铜管，纯铜管能够有效防止微波加热腔内的微波外泄。试验中采用热电偶和红外测温仪来测量煤样温度。将热电偶经由纯铜管插到微波加热腔内测量煤样的温度，须使用铠装热电偶来进行温度测量，其金属铠甲可以屏蔽微波电磁场对信号的干扰。在微波加热腔后方开设有吹扫气路。石英几乎不吸收微波能，试验中采用高纯度石英坩埚来盛放煤样。试验开始前，先对微波加热功率进行标定。在石英烧杯中盛 500 mL 水放入微波加热炉中进行加热，测量并记录不同时刻的水温，线性拟合水温随时间的变化关系，通过斜率和热量平衡计算微波加热平均功率为 502 W，结果如图 10 所示。

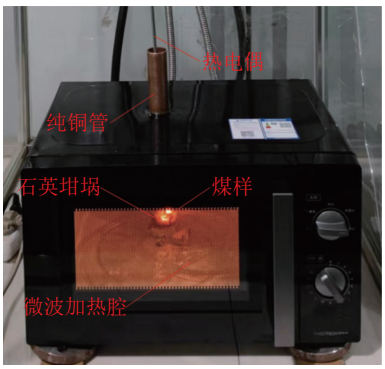

图 9　试验所用微波加热炉设备

Fig.9　Microwave heating oven equipment for the experiment

试验中所用原煤的工业分析和元素分析如表 2 所列。煤样在微波加热条件下温度和形貌随时间的

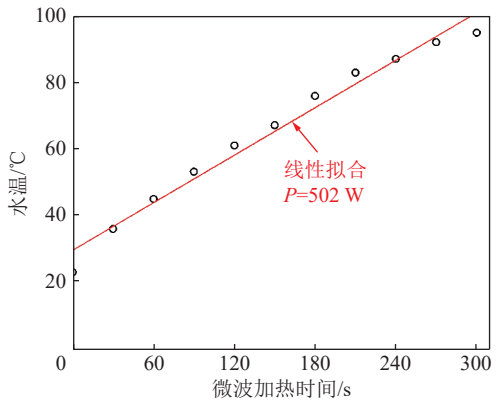

图 10　微波加热功率标定

Fig.10　Microwave heating power calibration

变化如图 11 所示，微波加热功率 P 为 502 W。石英坩埚中煤样为碎煤粒，平均粒径约 6 mm，初始质量为 100 g，初始温度为 23 ℃。由图可见当加热时长为 3 min 时，煤样温度升高到 152 ℃，此时煤样中水分全部析出，与初始煤样相比样品表面光泽变弱，粗糙度增加。加热时长为 6 min 时，温度继续升高至 274 ℃，样品表面光泽消失，粗糙度进一步增加，未观察到焦油析出。加热时长为 9 min 时，煤样温度升高到 478 ℃，此时有大量棕褐色焦油析出，煤样明显焦化并具有一定粘性。加热时长为 12 min 时，煤样温度升高到 587 ℃，焦油基本全部析出，残留焦炭在空气气氛中有少许氧化发白痕迹，表明焦炭已开始被点燃。加热时长为 15 min 时，煤样温度升高到 690 ℃，残留焦炭有明显燃烧现象。在微波加热和燃烧放热作用下，煤样温度继续升高，其 18 min 时燃烧状况如图中所示，焦炭呈炽红色，温度已达 805 ℃。在整个试验过程中，测得的煤样温度最高可达 1 080 ℃，此时透过微波加热炉玻璃前窗能够观测到炽白色燃烧亮点。试验表明随着微波加热时间增长，煤样温度迅速升高，在原煤的干燥、热解和燃烧阶段都能够较好地吸收微波能而被加热。在有氧环境中微波能够点燃原煤，因而在微波加热–煤炭地下气化 CRIP 工艺中无需点火液的注入，可以通过微波的定点释放实现地下煤层中目标区域的点火。

表 2　原煤的工业分析和元素分析（空气干燥基）

Table 2　Industrial and elemental analysis of raw coal (air dry basis)

工业分析/%				元素分析/%					发热量/(MJ·kg^{-1})
M_{ad}	A_{ad}	V_{ad}	FC_{ad}	C_{ad}	H_{ad}	O_{ad}	N_{ad}	$S_{t,ad}$	$Q_{net,ad}$
2.56	6.30	29.46	61.68	70.82	3.95	15.34	0.26	0.77	27.37

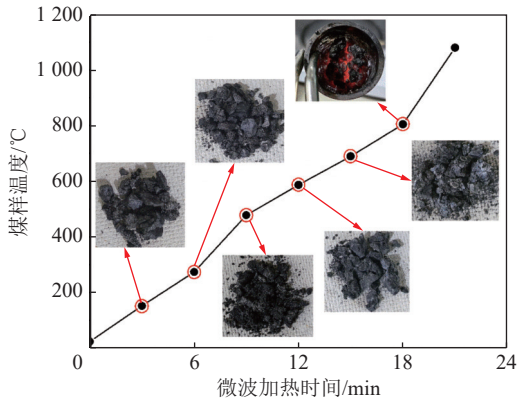

图 11　煤样温度和形貌随微波加热时间的变化（P=502 W）

Fig.11　Variations of temperature and morphology of coal samples with microwave heating time (P=502 W)

值得注意的是，上述结果是在实验室中得到的，所用煤样量较少，微波加热炉功率也较小，不能准确反映工业生产规模下大片煤层在大功率微波加热下的响应情况。煤层在微波加热时，传热条件复杂、煤层裂隙结构繁杂、电磁场分布多变，仍需进一步研究。

4　风光电–储能–煤炭地下微波气化融合产业模式

根据对固定床煤炭气化的研究，其气化区温度在 800 ℃ 左右。经过详细计算，气化 1 kg 煤所需热量约 7 118 kJ。若选用单台 M116-100 型磁控管，微波功率为 100 kW，加热 1 kg 煤和相应气化剂至气化温度所需时间约为 70 s。在大规模商业化生产中，利用微波能加热地下煤层和气化剂需要消耗大量电能。为进一步提高微波加热–煤炭地下气化 CRIP 工艺的能效，建立新型融合能源产业模式是一条有效途径。

针对难以开采的中深层地下煤炭资源，以微波加热–煤炭地下气化 CRIP 工艺为技术核心，联合风电、光电、电网余电建立如图 12 所示的新型能源产业模式。将绿色能源风电、光电以及电网余电一部分供给磁控管转化为微波，另一部分供给空分设备制取氧气和氮气，产生的微波、氧气、氮气以及气化剂水通过注入井通道注入到地下煤层气化区域。通过智能电能调配系统调节磁控管与空分设备用电配比，控制输入地下煤层的微波能量与氧气量，当微波

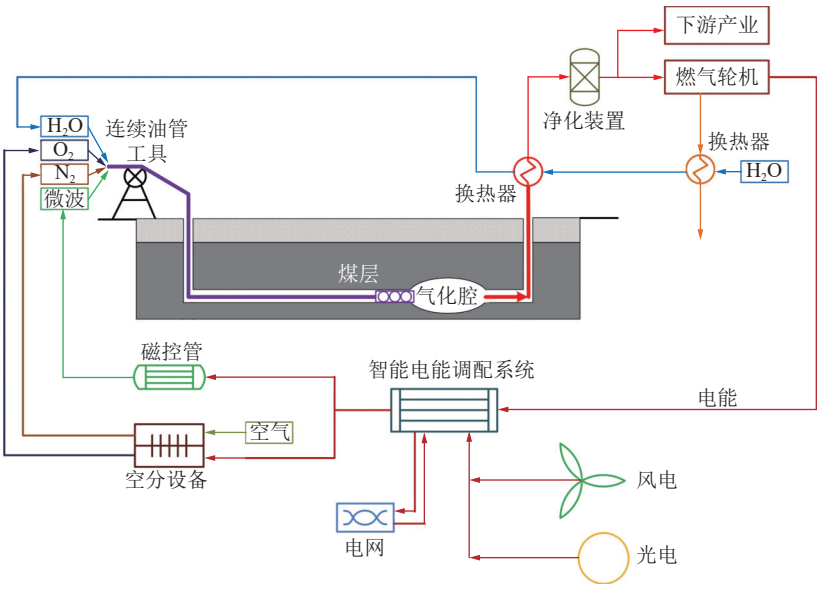

图 12　风光电–储能–煤炭地下微波气化融合产业模式概念图

Fig.12　Industrial model concept of the integrated wind-solar power, energy storage, and underground microwave gasification of coal

能量多而氧气量少时，所产粗煤气的热值大、品位高，反之亦然。煤炭地下气化产生的粗煤气经降温、净化后部分供给下游产业，另一部分送入燃气轮机中发电。发出的电用于补充微波耗电或者直接反哺电网。整个生产过程可视为一个高效大容量“储能”系统，可充分利用绿色能源，降低生产碳排放。气化剂水在注入地下前吸收高温粗煤气和燃气轮机排气的余热。

从可行性方面分析，该模式中微波的产生、传输、释放、煤层气化 CRIP 工艺技术是可行的，地面空分装置、粗煤气净化系统、燃气轮机发电系统、电网电能调配系统技术成熟，可实现工业生产。从经济性方面分析，该模式每生产 1 Nm^3 燃气的成本高于传统气井采气和进口天然气，但该模式一方面能够开发难以开采的中深层地下煤层，并转化为战略或缺的燃气资源输送用户，资源储量大、市场需求高，经济潜力、战略意义巨大，另一方面该模式能够实现电能–燃气转化互补，可利用绿色风电、光电和电网余电，助力电网“削峰填谷”，形成“多能互补”，建立以地下煤炭资源为核心的能源生产、存储、供应综合体。从风险性方面分析，微波加热–煤炭地下气化 CRIP 工艺虽然各个环节技术上可行，但由于地下生产环境复杂、初期投资高，目前尚缺乏中试试验验证，因此技术成熟度还有待提高。这种融合产业模式可以实现中深层煤炭清洁高效原位开采，燃气品质好，过程稳定可控、自动化程度高，引领绿色煤炭产业的发展。

5　结　　论

1）微波加热–煤炭地下气化 CRIP 工艺注入井系统设计为技术套管、生产套管、双层连续油管外管和双层连续油管内管同轴相套而成，从内到外形成氧气注入通道、微波导入通道、水/水蒸气注入通道和氮气注入通道。在双层连续油管内管外壁和外管内壁表面镀一层光滑的铜，形成同轴线型波导管将微波导入地下煤层，在内、外管间间隔加装低微波损耗的绝缘支架保持同心同轴。

2）大功率微波源技术能够支撑微波加热–煤炭地下气化 CRIP 工艺的工业化实践。大功率微波经双层连续油管向井下传输时，随着微波传输距离的增大，微波功率传输效率降低，且微波频率越高，单位距离微波损耗越大，微波功率衰减越快。2 450 MHz 和 915 MHz 频率微波在双层连续油管中传输 500 m 时，其功率分别衰减至 15.6% 和 32.1%。中深层煤炭地下气化应选用较低频率来实现微波能的远距离、低损耗输送。

3）大功率微波通过井下微波释能器上按一定规则排列的割缝泄漏出来辐射煤层。三塘湖煤的微波加热实验表明，随时间增长煤样温度迅速升高，在原煤的干燥、热解和燃烧阶段都能够较好地吸收微波能而被加热。在有氧条件下煤样温度升高到 587 ℃时焦炭点燃，温度最高可达 1 080 ℃。在微波加热–煤炭地下气化 CRIP 工艺中无需点火液注入，通过微波加热可以实现煤层点火。

4）耦合大功率微波加热的煤炭地下气化 CRIP

工艺在技术上是可行的。经过热平衡计算，仅利用微波能加热地下煤层和气化剂需要消耗大量的电能。风光电-储能-煤炭地下微波气化融合产业模式能够充分利用绿色能源，实现中深层煤炭清洁高效原位开采，契合现代绿色煤炭产业需求。

参考文献(References):

[1] 周淑慧，孙　慧，梁　严，等. “双碳”目标下“十四五”天然气发展机遇与挑战[J]. 油气与新能源，2021，33(3)：27-36.
ZHOU Shuhui, SUN Hui, LIANG Yan, *et al*. Carbon neutrality oriented 14th five-year opportunities and challenges of natural gas development[J]. Petroleum and New Energy, 2021, 33(3): 27-36.

[2] 王　坤，杨　涛，梁　坤，等. 碳达峰碳中和战略下天然气的能源优势与发展建议[J]. 能源与节能，2023(3)：27-31.
WANG Kun, YANG Tao, LIANG Kun, *et al*. Energy advantages and development suggestions of natural gas under strategy of carbon peaking and carbon neutrality[J]. Energy and Energy Conservation, 2023(3): 27-31.

[3] 刘淑琴，梅　霞，郭　巍，等. 煤炭地下气化理论与技术研究进展[J]. 煤炭科学技术，2020，48(1)：90-99.
LIU Shuqin, MEI Xia, GUO Wei, *et al*. Progress of underground coal gasification theory and technology[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(1): 90-99.

[4] 苏发强，荆士杰，高喜才，等. 煤炭地下气化燃空区发育及能量回收评价[J]. 煤炭学报，2021，46(11)：3682-3691.
SU Faqiang, JING Shijie, GAO Xicai, *et al*. Evaluation of gasification cavity growth and gas energy recovery in underground coal gasification[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(11): 3682-3691.

[5] 邹才能，陈艳鹏，孔令峰，等. 煤炭地下气化及对中国天然气发展的战略意义[J]. 石油勘探与开发，2019，46(2)：195-204.
ZOU Caineng, CHEN Yanpeng, KONG Lingfeng, *et al*. Underground coal gasification and its strategic significance to the development of natural gas industry in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(2): 195-204.

[6] 韩　军，方惠军，喻岳钰，等. 煤炭地下气化产业与技术发展的主要问题及对策[J]. 石油科技论坛，2020，39(3)：50-59.
HAN Jun, FANG Huijun, YU Yueyu, *et al*. Main problems and countermeasures of underground coal gasification industrial and technological development[J]. Petroleum Science and Technology Forum, 2020, 39(3): 50-59.

[7] 黄　婉，王　军，秦　勇，等. 美国 UCG 先导试验及其对现代 UCG 技术的贡献[J]. 煤田地质与勘探，2023，51(7)：34-42.
HUANG. Wan, WANG Jun, QIN Yong, *et al*. US UCG pilot test and its contribution to modern UCG technology[J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(7): 34-42.

[8] 孔维敏，周永峰，秦勇，等. 苏联 UCG 产业化历史回顾与评述[J]. 煤田地质与勘探：1-8.
KONG Weimin, ZHOU Yongfeng, QIN Yong, *et al*. Review and comment industrialization history of UCG in the Soviet Union[J]. Coal Geology &Exploration: 1-8.

[9] 周　泽，汪凌霞，秦　勇，等. 澳大利亚 UCG 工程示范历程与启示[J]. 煤田地质与勘探，2023，51(7)：52-60.
ZHOU. Ze, WANG Lingxia, QIN Yong *et al*. Progress and enlightenment of UCG engineering demonstraition in Australia[J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(7): 52-60.

[10] 崔　勇，梁　杰，王　旋. 基于非稳态渗流传递的煤炭地下气化数值模拟[J]. 煤炭学报，2014，39(S1)：231-238.
CUI Yong, LIANG Jie, WANG Xuan. Numerical simulation on UCG process based on non-steady flow in porous media transport[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(S1): 231-238.

[11] BUSTAMANTE RÚA M O, DAZA ARAGÓN A J, BUSTAMANTE BAENA P. A study of fire propagation in coal seam with numerical simulation of heat transfer and chemical reaction rate in mining field[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2019, 29(6): 873-879.

[12] SAULOV D N, PLUMB O A, KLIMENKO A Y. Flame propagation in a gasification channel[J]. Energy, 2010, 35(3): 1264-1273.

[13] ABDELSAYED V, SHEKHAWAT D, SMITH M W, *et al*. Microwave-assisted pyrolysis of Mississippi coal: a comparative study with conventional pyrolysis[J]. Fuel, 2018, 217: 656-667.

[14] 周　军，吴　雷，梁　坤，等. 微波技术在煤热解工艺中的应用现状[J]. 材料导报，2019，33(1)：191-197.
ZHOU Jun, WU Lei, LIANG Kun, *et al*. Status quo of applying microwave technique to the pyrolysis process of coal[J]. Materials Reports, 2019, 33(1): 191-197.

[15] REDDY B R, VINU R. Evidence of interactions in microwave-assisted co-pyrolysis of different varieties of coals[J]. Journal of the Energy Institute, 2021, 95: 18-29.

[16] SALOMATOV V, KARELIN V, PASCHENKO S, *et al*. Analytical study of microwave heating of the coal layer with mixed boundary conditions of I and III types[J]. MATEC Web of Conferences, 2016, 72: 01098.

[17] SINGH S, NECULAES V B, LISSIANSKI V, *et al*. Microwave assisted coal conversion[J]. Fuel, 2015, 140: 495-501.

[18] 张彦军. 低阶煤对微波的介电响应及其微波热解特性研究 [D]. 北京：中国矿业大学(北京)，2018.
ZHANG Yanjun. Microwave dielectric response and microwave pyrolysis characteristics of low-rank coal[D]. Beijing: China University of Mining & Technology, Beijing, 2018.

[19] 景翊峰，刘海玉，乔晓磊，等. 高硫煤泥微波碱法脱硫试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版)，2022，53(11)：4534-4542.
JING Yifeng, LIU Haiyu, QIAO Xiaolei, *et al*. Experimental research on microwave alkaline desulfurization of high sulfur coal slime[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, 53(11): 4534-4542.

[20] 李　静，连明磊，王克良. 活性炭辅助微波气化褐煤的研究[J]. 煤炭工程，2019，51(4)：118-122.
LI Jing, LIAN Minglei, WANG Keliang. Study on gasification of lignite with microwave assisted by activated carbon[J]. Coal Engineering, 2019, 51(4): 118-122.

[21] 王卫东，涂亚楠，孙阳阳，等. 微波吸收剂对褐煤微波提质的影响规律[J]. 煤炭学报，2018，43(5)：1440-1447.

WANG Weidong, TU Yanan, SUN Yangyang, *et al*. Enhancement of microwave absorbents on quality of microwave dehydrated lignite[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(5): 1440−1447.

[22] HUANG J X, XU G, LIANG Y P, *et al*. Improving coal permeability using microwave heating technology: a review[J]. Fuel, 2020, 266: 117022.

[23] IRANI M, SAEEDFAR A. Equilibrium analysis of desiccated zone growth during radio-frequency heating[C]//The SPE Canada Heavy Oil Technical Conference, Alberta, Canada, 2018.

[24] 李 静, 连明磊, 王克良. 活性炭辅助微波气化无烟煤–烟煤混合物[J]. 天然气化工(C1 化学与化工), 2019, 44(3): 33−37, 60.
LI Jing, LIAN Minglei, WANG Keliang. Gasification of anthracite-bituminous coal mixture with activated carbon-assisted microwave[J]. Natural Gas Chemical Industry, 2019, 44(3): 33−37, 60.

[25] ELLISON C, ABDELSAYED V, SMITH M, *et al*. Comparative evaluation of microwave and conventional gasification of different coal types: Experimental reaction studies[J]. Fuel, 2022, 321: 124055.

[26] LIU Q R, HE H, LI H P, *et al*. Characteristics and kinetics of coal char steam gasification under microwave heating[J]. Fuel, 2019, 256: 115899.

[27] STATE R N, VOLCEANOV A, MULEY P, *et al*. A review of catalysts used inmicrowave assisted pyrolysis and gasification[J]. Bioresource Technology, 2019, 277.

[28] 廉世华, 唐惠庆, 郭占成. 微波加热下煤的水蒸气气化的研究[C]//2012 年全国冶金物理化学学术会议专辑(下册), 昆明: 2012: 94-99.

[29] MALYI E I, CHEMERINSKII M S, HOLUB I V, *et al*. Influence of microwave radiation on the pyrogenetic transformation of coal grains[J]. Coke and Chemistry, 2018, 61(3): 87−90.

[30] 黄 铭, 彭金辉, 王家强, 等. 微波与物质相互作用加热机理的理论研究[J]. 昆明理工大学学报(理工版), 2005, 30(6): 15−17.
HUANG Ming, PENG Jinhui, WANG Jiaqiang, *et al*. Theoretical study on heating mechanisms of interaction between microwave and materials[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology, 2005, 30(6): 15−17.