

引用格式:杨兆中,袁健峰,朱静怡,等.煤层气注热增产研究进展[J].油气藏评价与开发,2022,12(4):617-625.

YANG Zhaozhong, YUAN Jianfeng, ZHU Jingyi, et al. Thermal injection stimulation to enhance coalbed methane recovery[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2022, 12(4): 617-625.

DOI:10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2022.04.009

煤层气注热增产研究进展

杨兆中¹,袁健峰¹,朱静怡^{1,2},李小刚¹,李扬³,王浩¹

(1.西南石油大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室,四川成都610500;2.西南石油大学化学化工学院,四川成都610500;3.振华石油控股有限公司,北京100031)

摘要:注热增产技术是除水力压裂外另一种有效的煤层气增产方法,适用于含水率低和降压解吸困难的煤层。通过国内外文献调研,阐述了煤层气注热的增产机理,分析了注热升温对煤层吸附/解吸和渗透率的影响,总结了热采煤层气过程中的热—流—固耦合关系,介绍了注热蒸汽法、注热CO₂法、微波注热法以及火烧煤层法4种注热增产的方法,综述了4种方法的技术原理、技术特点以及目前国内外的研究进展。研究表明注热方法可促进煤层气的解吸,提高游离态煤层气含量,达到煤层气增产的目的。同时注热导致的热致裂和煤热解可以改善煤层孔隙结构,沟通和增大煤层裂缝网络,有利于煤层气的扩散和渗流。煤层气的注热增产技术能有效解决煤层气含水率低、降压解吸困难、强水敏等问题,是可替代水力压裂的另一种极具潜力的增产方法。

关键词:煤层气;注热增产;吸附/解吸;渗透率;水力压裂

中图分类号:TE37

文献标识码:A

Thermal injection stimulation to enhance coalbed methane recovery

YANG Zhaozhong¹, YUAN Jianfeng¹, ZHU Jingyi^{1,2}, LI Xiaogang¹, LI Yang³, WANG Hao¹

(1. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China; 2. College of Chemistry and Chemical Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China; 3. China ZhenHua Oil Co., Ltd., Beijing 100031, China)

Abstract: Thermal injection stimulation technology, which is suitable for coal seams with low water content and difficult pressure reduction and desorption, is an effective method to increase coalbed methane production besides hydraulic fracturing. Based on the literature research at home and abroad, the stimulation mechanism of coalbed methane heat injection is expounded, the influences of heat injection and temperature rise on adsorption and desorption and permeability of coal seam are analyzed, and the thermal-hydraulic-mechanical coupling relationship in the process of thermal coalbed methane production are summarized. Then, four methods, which are thermal steam injection, thermal CO₂ injection, microwave thermal injection and coal seam burning, are introduced, and their technical principles, characteristics and research progress at home and abroad are summarized. The study shows that the method of heat injection can promote the desorption of coalbed methane, increase the content of free coalbed methane and achieve the purpose of increasing the coalbed methane production. Meanwhile, thermal cracking and coal pyrolysis caused by heat injection can improve the pore structure of coal seam, and communicate and increase the fracture network of coal seam, which are beneficial to the diffusion and seepage of coalbed methane. The thermal injection stimulation technology of coalbed methane can effectively solve the problems of low water content, difficult depressurization and desorption, and strong water sensitivity of coalbed methane, which is another potential stimulation method to replace hydraulic fracturing.

Keywords: coalbed methane; thermal stimulation; adsorption desorption; permeability; hydraulic fracturing

收稿日期:2022-04-14。

第一作者简介:杨兆中(1969—),男,博士,教授,从事油气藏增产改造理论、技术和非常规天然气开发研究。地址:四川省成都市新都区新都大道8号西南石油大学,邮政编码:610500。E-mail: yzzycl@vip.sina.com

通信作者简介:朱静怡(1991—),女,博士,助理研究员,从事非常规油气资源的增产改造技术研究。地址:四川省成都市新都区新都大道8号西南石油大学,邮政编码:610500。E-mail: zhujingyizoe@163.com

基金项目:中国博士后科学基金项目“微波加热下稠油降黏改质机理及其电磁热流固耦合效应研究”(2020M683361)。

煤层气主要成分为 CH_4 ,以吸附态、游离态和溶解态3种形式存在于煤层中。合理开采煤层气不仅可以减少瓦斯爆炸的工程事故,还能在一定程度上弥补中国天然气供应不足的劣势。中国煤层气储量丰富,开发潜力巨大,但煤层气中的游离态气体含量占比很小,大多以吸附态的形式赋存于煤层中,同时绝大部分煤层普遍具有三低(含气压力低、饱和度低、渗透率低)特点,导致煤层气开采难度巨大,采收率低下。煤层气解吸主要受温度和压力的影响,在实际开发中常用水力压裂技术结合排水降压方式进行开采^[1];然而水力压裂中大量水基压裂液的注入会造成煤层的水敏、水锁和固相伤害,排水降压主要适用于含水煤层,对于不含水或弱含水煤层适用性较差。

除了降压解吸以外,升温是另外一种促进煤层气解吸的方法。因此,国内外学者提出了煤层气的注热增产改造技术。通过向煤层中注入热介质使得 CH_4 分子活性增大,从而促进煤层气的解吸和运移,同时温度升高也可增加煤层的渗透率^[2]。注热开采还可与传统开采方法相结合进一步强化开采煤层气,因此,加强对煤层气注热增产方法的研究具有重要的意义。基于国内外文献调研,针对煤层气的注热增产技术开展了以下工作:①简述了煤层气吸附/解吸的基本原理,讨论了温度对煤层气吸附/解吸以及渗透率的影响;②分析了煤层气注热开采过程中热一流一固三场耦合关系;③综述了4种注热开采方法的基本原理、技术特点以及研究现状。

1 煤层气注热开采机理

1.1 煤层气吸附/解吸机理

1.1.1 煤层气吸附机理

煤岩表面剩余力场^[3]的存在使得煤岩具有很强的吸附特性,可以吸附 CH_4 、 CO_2 等气体分子。煤层中70%~90%的煤层气是吸附态,煤岩吸附煤层气主要依赖于分子间的作用力。煤岩中 CH_4 的吸附过程可分为3个阶段:低相对压力阶段(小于0.15 MPa)、中相对压力阶段(0.15~0.30 MPa)和高相对压力阶段(大于0.30 MPa)。随着相对压力的不断增大,吸附机理也有所改变,从最初的孔隙表面与 CH_4 分子的碰撞阶段逐渐转变为单分子吸附和多层吸附的中间阶段^[4]。

当气体分子在某一位置时,其能量最低且吸附态最稳定,则该位置为煤表面的吸附势阱,吸附是气体分子能量逐渐降低的放热过程。为了评估 CH_4 分子与煤表面之间的作用力,引入了吸附热的概念。吸附热是指吸附过程产生的热效应,系统的吸附热反映了吸附相和自由相之间的能量差,可用于评估 CH_4 分子与煤表面之间的作用力,吸附热越大,吸附越强。煤层气的吸附过程属于物理吸附,物理吸附的吸附热等于吸附质的凝缩热与湿润热之和,一般为每摩尔几百到几千焦耳,最大不超过40 kJ/mol。 CH_4 吸附热一般随吸附容量的增加而增加,并与微孔表面积呈正相关^[5-7]。

1.1.2 煤层气解吸机理

处于吸附态的分子从煤基质表面脱离出来的过程称为解吸,吸附和解吸是一个可逆的过程,二者是同时进行的。在煤层气未被开发的情况下,煤层气处于吸附和解吸的动态平衡。煤层气的解吸主要受温度和压力影响,煤层气开采过程中煤层压力不断降低,当煤层压力低于煤层气临界压力时,吸附于煤基质上的气体分子便会解吸出来,由吸附态转变为游离态。吸附是分子能量降低的放热过程,解吸则与之相反,解吸过程要求分子具有足够的动能和内能以脱离吸附势阱,因此,需要从周围环境中获取能量,是一个吸热的物理过程。

邱峰^[8]通过实验证明,由于“解吸滞后”以及“再吸附”现象的存在,实际情况下煤层气解吸需要吸收更多的能量才能脱附,而解吸所需的能量主要是从周围环境中获取。因此,通过注热的方式可以为 CH_4 分子提供足够的能量,从而实现脱附。

1.2 温度对煤层气开采的影响

1.2.1 温度对煤层气解吸的影响

煤层气解吸是一个吸热的物理过程。大量实验证明温度上升有利于煤层气的解吸。研究表明温度每升高1℃,煤岩对煤层气的吸附能力会降低约8%^[9]。吸附是气体为了达到平衡状态降低自身表面能的方式,温度升高, CH_4 分子活性增大,因而具有更高的内能与动能。能量的增加有利于煤层气脱离吸附势阱深度而转变为游离态。图1是升温前后 CH_4 分子赋存状态的对比,由此可见,升温使 CH_4 从煤基

质中脱离并转变为游离状态。

国内外学者通过室内实验证明了升温对煤层气的解吸作用。马东民等^[10]开展了温度对煤层气吸附/解吸影响的实验研究,从15℃升温到40℃的过程中,煤的吸附系数逐渐减小,解吸速率提高约20倍。曾社教等^[11]同样进行了煤岩加热过程中煤层气的解吸实验,从22℃升温到38℃,温度每增加1℃,煤层气解吸率增加1.5%。LIU等^[12]研究了25~800℃热处理范围内煤层气吸附势和解吸效率的变化,发现高温处理主要提高了煤层气的解吸效率,并得出2种烟煤和1种无烟煤的最佳热处理温度分别为550℃、450℃和470℃。温度在450℃以上时,煤会发生温和热解生成煤焦油、煤气和半焦,因此,对于富油煤开采而言,通过人工加热的方式不仅可以促进煤层气增产,还可实现煤、油、气同步开采^[13-15]。

1.2.2 温度对煤层气渗透率的影响

温度对渗透率的影响主要包括热应力、热膨胀、热分解、水相蒸发、煤岩力学性质变化等。

温度对渗透率的影响因素较多,规律复杂,其作用结果既有正反馈也有负反馈,因此,多数学者对此的研究结论并不统一。经过文献调研,目前关于温度对煤岩渗透率影响的几种结果如表1所示。

滕腾^[23]综合考虑升温时各项因素对煤岩渗透率的影响,推导并定义了热刺激指标 KT ,根据 KT 的正负可判断渗透率与温度的相关性。虽然各学者的研究结果不尽相同,但是若煤层温度控制合理是可以促进孔隙裂隙发育从而利于煤层气开发的。

1.3 注热基础理论

煤层气注热增产的思路源于稠油热采工艺^[24],

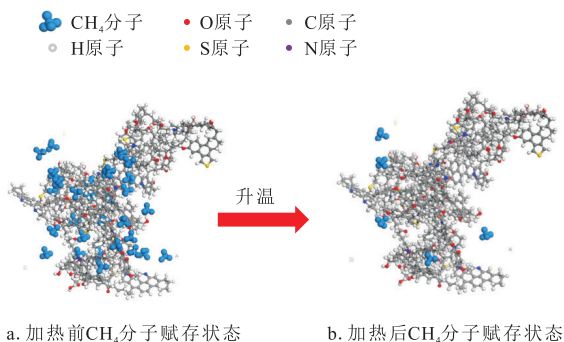


图1 CH₄分子赋存状态分布

Fig. 1 Occurrence state distribution of CH₄ molecular

二者的区别在于稠油热采的原理主要是通过高温降低稠油黏度从而改善其流动性,而煤层气注热增产则是通过升温提供煤层气解吸所需能量,促进煤层气解吸。注热工艺在稠油热采中已经有成熟的体系,有利于推动煤层气注热增产工艺的实现。目前使用的热采工艺主要有两大类:①通过注入热介质如热蒸汽、热CO₂等进行加热;②在目的层内部就地产生热量,如微波辐射煤岩加热以及火烧煤层法。不论哪种注热方式,主要作用都是加热煤岩达到促进煤层气解吸以增大游离态气体含量,其次是通过升温改善煤岩渗透率促进煤层气渗流。

1.4 注热增产过程中热—流—固耦合关系

数值模拟方法是研究煤层气注热增产的有效手段。研究注热增产过程中各物理场之间的相互耦合关系有助于建立煤层气注热增产的数值模型,从而有效研究不同地层参数和工程参数对煤层气解吸、扩散、渗流的影响,最终指导煤层气注热增产的现场应用,优选煤层气注热增产方法的施工参数。

煤层气注热开采过程中具有复杂的热—流—固耦合关系^[25](图2):①对于温度场和变形场而言,温

表1 温度对渗透率影响规律
Table 1 Influence law of temperature on permeability

升温对渗透率的影响规律	文献来源
渗透率随温度升高逐渐增大	任常在等 ^[16] ;LI等 ^[17] ;JIANG等 ^[18]
渗透率随温度升高先减小再增大	李波波等 ^[19]
高有效应力时,渗透率与温度成负相关	巩天白 ^[20] ;GAO等 ^[21]
渗透率随温度升高先降低后升高再降低	LI等 ^[22]

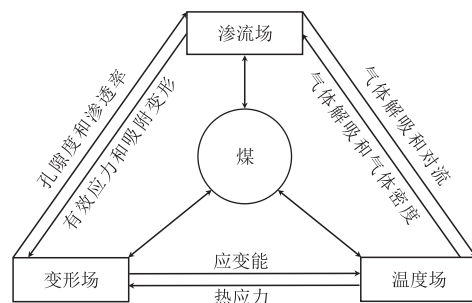


图2 热—流—固耦合机理

Fig. 2 Coupling relationship of thermal-hydraulic-mechanical

度变化引起的热应力对变形场有影响,煤岩骨架内能量耗散产生的应变能对储层温度有影响;②对于温度场和渗流场而言,温度的变化引起气体吸附和解吸以及气体密度和黏度的变化,从而对渗流场产生影响,气体流动过程中的传热和对流以及气体的吸附/解吸对温度场也有影响;③对于渗流场和变形场而言,煤岩变形引起的孔隙度渗透率的变化对煤层气流动有影响,气体压力的变化和吸附/解吸会影响煤岩吸附变形。

2 煤层气注热开采的方法

2.1 注热蒸汽法

注热蒸汽法根据注入及开采方式的不同主要分为蒸汽驱替法和蒸汽吞吐法两种。蒸汽驱替法(图3)是在地面打一口注气井,通过注气井注入热蒸汽,将煤层气从生产井开采出来的方法;而蒸汽吞吐法(图4)则是注入和产出均在生产井进行,通过向井内注入热蒸汽,然后关闭井口闷井数日后再开采煤层气。

热蒸汽在煤层中传递热量的方式主要有对流换热、相变潜热和热传导3种,水的比热容较大,在相同温度下所携带的热量更多。相较于直接注热水而言,热蒸汽能减少注入过程中的热损失,充分利用热能。热蒸汽注入煤层时释放大量的热量加热煤层,对煤层有明显的升温作用。刘杰^[26]建立了井筒传热模型,利用有限元软件模拟分析了注热蒸汽过后的温度场分布,计算结果表明注热蒸汽可以使井筒附近煤层温度显著升高,距离井筒越远的位置升温效果越不明显。在蒸汽注热10 d的条件下,距井筒半

径为15 m的范围内,温度变化大,煤层受热效果好,而超过该范围的区域温度梯度变化较小。石晓巖^[27]进行了无烟煤和贫煤的注热蒸汽升温实验,拟合实验数据显示煤岩温度低于80 °C时升温速率较快,在80~100 °C升温速率逐渐减缓。

煤岩对水的亲和性大于 CH_4 ,因此,除加热作用外,蒸汽还有置换 CH_4 与 CH_4 形成竞争吸附的作用。水分子能与褐煤、烟煤和无烟煤中分子的一OH形成氢键;而煤岩吸附 CH_4 主要依赖的是分子间作用力,该作用力远小于氢键的作用,故煤岩对水分子的吸附能力强于 CH_4 ,可以通过注蒸汽抢占煤层中 CH_4 的吸附位达到置换 CH_4 的目的^[28]。

关于注热蒸汽的数值模拟研究,唐明云等^[29]分别模拟了注250 °C蒸汽、注250 °C热水以及常规开采3种开采方式。模拟结果显示:在相同温度下,注热蒸汽热损失较小,比注热水升温效率更高。统计开采100 d的产量,发现与常规开采方式相比,注热蒸汽开采产量提高了17.5%。杨新乐等^[30]对比了注热蒸汽10 d和不注热2种情况,统计抽采煤层气100 d的累计产量,结果显示注热蒸汽开采的产量提高了1.2倍。

虽然注热蒸汽法在加热煤层和置换 CH_4 上优势明显,但目前面临以下问题:①热蒸汽注入煤层后会遇冷凝结为水滴,水相的存在会使得裂隙中气相饱和度降低,气相渗透率减小从而抑制煤层气在裂隙中的渗流;②周围岩层会吸取蒸汽释放的热量,产生

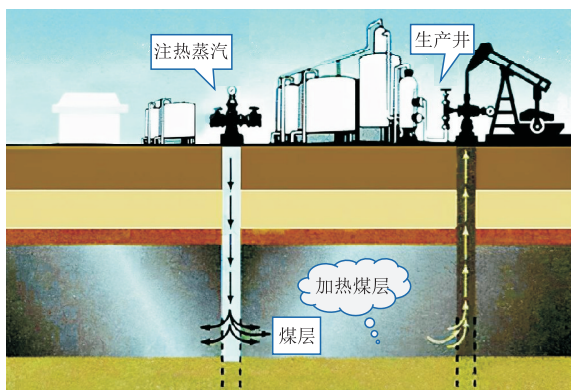


图3 蒸汽驱替
Fig. 3 Steam flooding

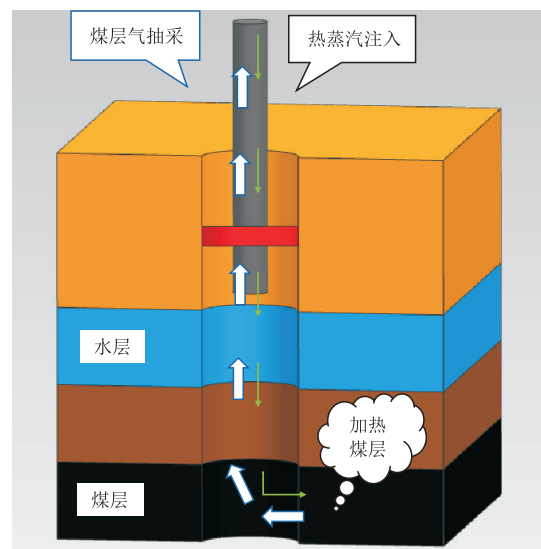


图4 蒸汽吞吐
Fig. 4 Steam huff and puff

较大的能量损失导致热效率低下;③水分的引入可能造成水锁伤害。

2.2 注热CO₂法

注CO₂强化开采煤层气可有效提高采收率。一方面,CO₂的吸附势阱远大于CH₄,煤岩对CO₂的亲水性也就更大,注入煤层后可以与CH₄形成竞争吸附从而将其置换出来^[31];另一方面,CO₂分子直径比CH₄小,可以填补吸附空位降低孔隙表面张力削弱煤岩对CH₄的吸附^[32]。于是有学者提出将注热和注CO₂相结合强化煤层气开采,如图5所示。

注热CO₂开采煤层气同时兼具了注热和注CO₂二者的优点。一方面,热CO₂注入煤层通过热传导、热对流的方式使煤层温度升高,提供煤层气解吸时所需能量从而促进煤层气解吸;另一方面,煤层温度升高发生热致裂可以提高煤岩渗透率^[33]。

目前将热注入和CO₂相结合的方式还处于起步阶段,国内外对此还处于理论研究和数值模拟阶段,多名学者进行了注热CO₂开采煤层气的数值模拟。FANG等^[34]建立了CO₂驱替CH₄过程中热一流一固全耦合模型,讨论了温度的影响,分析了不同CO₂注入压力和生产井温度下储层渗透率的变化,发现生产井温度从40℃提高至70℃,CH₄产量增长率提高了5%~10%。FANG等^[35]采用沁水盆地地质条件参数模拟了注热CO₂开采煤层气,探究注热CO₂有效影响半径。模拟结果表明注热CO₂的有效影响半径随注热时间和压力的增加而增大,有效影响半径与CO₂注入时间呈幂指数函数关系,函数系数与CO₂注入压力呈线性关系。MA等^[36]采用模拟器模拟非等温条件

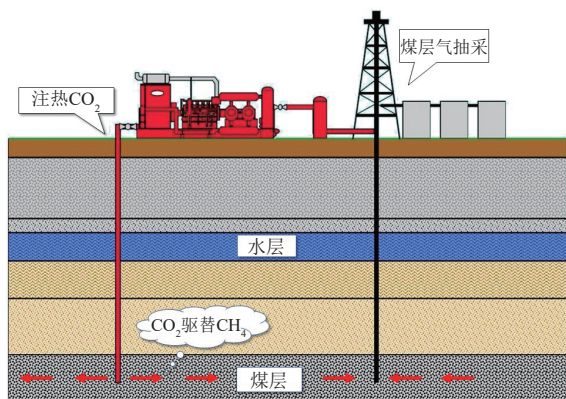


图5 注热CO₂开采煤层气

Fig. 5 Exploitation of coalbed methane by injection of thermal CO₂

下CO₂强化煤层气开采,结果发现向煤中注入热CO₂改变了煤层内部的流动过程,进而影响煤岩渗透率、应力状态以及变形。黎力等^[37-38]分别从实验和数值模拟对注热CO₂驱替煤层气展开研究。室内实验结果表明,注气压力一定时,注气气体温度升高32℃,使CH₄产出率增加40%左右;数值模拟结果发现,在大于60℃的温度下,升温能明显提高煤层气产量。

在开采煤层气方面,注热CO₂可以起到升温促进煤层气解吸、改善煤岩渗透率以及置换CH₄三重作用。因此,在强化开采煤层气上极具优势。其次,在碳中和目标的指导下,注热CO₂法可以有效封存CO₂减少温室效应。另外,目前已有注CO₂开采的理论支撑^[39-40],注热CO₂可在此基础上进行。基于以上各方面优点,该方法将是今后煤层气注热增产的热门研究方向。

2.3 微波注热法

微波作为一种新型加热方式在各个领域中已有广泛应用,在加热稠油、油页岩和油砂等非常规油资源上已取得一定成效^[41]。微波加热具有如下优点:加热速度快、选择性加热、控制及时、环保无污染,因此,提出了微波注热开采煤层气的思路。区别于常规的注入热介质加热的方式,微波加热是利用电磁场力的作用使得物质中的极性分子反复交替做高频率的定向运动,分子运动过程中碰撞和摩擦产生热量,从物质内部产生热源使之升温^[42],如图6所示。在微波加热过程中,微波热效应有助于提高煤层气解吸、促进煤岩致裂、解除水锁效应等作用^[43]。

关于微波热效应的实验包括煤层气解吸和煤岩渗透率两方面,在煤层气解吸实验中,不论是持续辐射还是间歇辐射都有以下规律:微波功率越高,煤岩

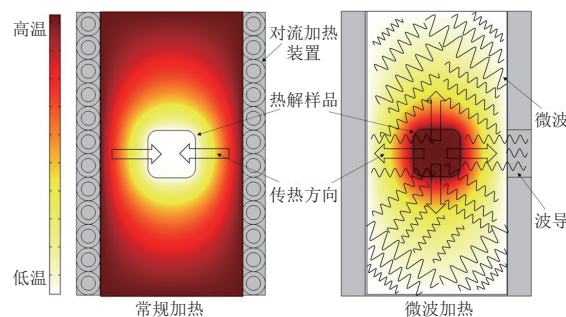


图6 微波加热示意图

Fig. 6 Schematic diagram of microwave heating

升温越快;辐射的时间越长,煤层气的总解吸量增幅越明显;低功率间歇辐射加热均匀,对煤层气解吸效果更优,更具经济性^[44-45]。有学者进行了微波加热的相关实验,以探究微波热效应对煤层气产量的影响,胡国忠等^[46]通过对比有无微波加热实验发现,在可控源微波场作用下,CH₄解吸量大幅增加,辐射阶段的累计产气量提高了0.65~2.79倍;WANG等^[47]实验发现微波在30、60、90 W功率下的总脱附量分别是室温脱附试验的1.87、2.49、3.26倍。除此以外,微波热效应还可以减少煤中含氧基团的总量,减弱煤对CH₄的最大吸附能力^[48]。在探究煤岩渗透率变化方面,随着温度的升高,煤岩中活性物质和挥发物被分解使孔隙和裂隙扩大,微波的选择性加热可以蒸发水分,破坏孔隙结构,使微孔隙向中孔隙和大孔隙发育^[49]。微波加热速率快且温度分布不均匀的特点可以使煤岩温度发生较大变化,从而产生较大的局部热应力破坏煤岩内部结构。LAN等^[50]采用微波辐射煤岩120 min后,平均温度上升了42 °C,能效达到85%,促进了裂纹扩展。

数值模拟可以直观反映出微波热效应对煤层气开采的影响。学者们通过建立相关的电磁—热—流—固耦合模型,探讨了储层孔隙度、温度及渗透率的演化规律以及注热条件下煤层气的运移和采出过程。在微波加热条件下,煤岩总体温升趋势呈现“快—慢—快”的特征,微波加热煤岩对频率非常敏感,2.45 GHz为最优辐射频率,在此条件下煤层渗透率和温度提升幅度最大^[51-52]。在模拟开采煤层气方面,微波功率的高低和辐射方式的不同都有各自的优势。ZHU等^[53]模拟微波加热煤层,研究了电场、储层温度、CH₄浓度的分布。计算结果表明,使用200 W功率微波加热1 d就可以使煤层温度上升至81 °C,煤层孔隙度增加了9%,渗透率增加了 $1.11 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;1 600 W功率下^[54],最高温度可在30 s内达到240 °C左右,实现了快速升温、孔隙发育和裂缝生成。SUN等^[55]建立了新的具有双孔隙单渗透率的电磁—热—水—力学耦合模型,模拟开采6 000 d煤层气的情况,发现功率为1 000 W的情况下,累计产气量增加了80%。总体而言,低功率加热更加均匀和节能,而高功率可以实现快速加热并具有热不均一性^[56],而采用间歇循环加热方式,煤岩能保持高温状态,煤层气渗透率和解吸量持续增大,产量呈现增产与稳产交替出现,有利于提高能量利用效率^[57]。

虽然微波加热相比于注热介质加热有很大优势,但微波注热法目前亟需解决微波如何入井的问题。现场开采煤层气所使用的微波装置与实验室内的装置有所区别,需要考虑入井时的各方面问题;另外对微波装置的各方面性能也有更高要求,如微波的辐射半径、频率以及功率等,同时还需考虑井下装置的耐温性能等^[58]。

2.4 火烧煤层法

2011年毛琼等^[59]综合借鉴石油开采中火烧油层法、煤层气注热开采以及注CO₂法,提出了火烧煤层开采煤层气。与火烧油层法类似(图7),在注气井控制空气注入量,通过点火系统和控火系统控制煤层处于不完全燃烧的状态。煤层燃烧时的热效应可以促进煤层气解吸、煤岩破裂以及解除水锁,产生的CO₂等气体,既可以置换CH₄,又可提供气体渗流的驱动力增大渗流速度^[60]。

目前对火烧煤层法研究主要是在数值模拟方面,谢启红^[61]建立了单层圆筒壁的稳态导热模型和以IAS多组分吸附理论为基础的CO₂驱气理论模型,模拟了火烧煤层驱气效果,结果表明:随着温度升高,CO₂浓度和煤层加热半径增大,煤层气采收率也大幅增加,温度每升高5 °C,采收率平均提高1.74%。刘盈等^[62]运用数值模拟方法,对井下抽采与火烧煤层开采煤层气两种开采方式中煤层气日产量、井底压力、累计产量进行对比分析。发现煤层气的日产量、气井的井底压力均高于常规抽排水作业开采煤层气,能够提高煤层气的采收率。已有的现场强水敏性煤层进行火烧煤层的试验初探表明,采用火烧煤层法使煤层气采收率提高了40%^[63]。

尽管有火烧油层的技术经验,但火烧煤层的技术应用还不成熟,主要有以下问题:①煤层点火方面,若煤层含水量高则会出现燃烧困难的问题;②环保方面,煤炭燃烧时会向大气中排放大量SO₂和H₂S

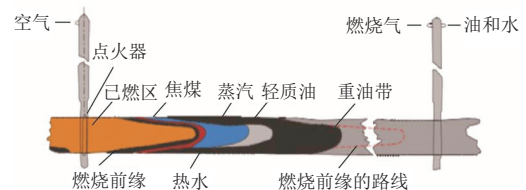


图7 火烧油层示意图

Fig. 7 Schematic diagram of oil layer combustion

气体造成严重的污染问题;③井壁稳定性方面,火烧煤层过后可能出现区域坍塌的问题。目前对火烧煤层的相关研究较少,未来的重心应该针对火烧煤层技术设计合理实验方案,对火烧煤层的机理、煤层燃烧温度场变化规律、高温导致煤岩结构的变化及注气速率等关键控制技术深入研究。

2.5 各注热方法对比

注热介质法目前主要有注热蒸汽和注热CO₂两种方法,该方法主要优势在于:具有稠油热采的成熟工艺体系,技术相对而言较为成熟,可控性较好;热介质同时兼具升温 and 竞争吸附的作用。虽然注热蒸汽法优势明显但也存在一些缺点:①介质从管线到井筒的流动过程中沿程热损失较大;②容易受到非均质岩层吸热影响,导致热效率降低;③热介质采用蒸汽时,蒸汽在井筒中液化形成水滴可能造成水锁。

微波加热和火烧煤层则是从煤岩内部加热的方法。相比于常规的注热介质加热,这两种方法直接在目的层加热,热损失较小、热效率更高。微波加热具有加热速度快、选择性加热和控制及时等优点,但是仍面临一些困难有待解决,如微波如何入井和井下装置的耐高温性能等问题。火烧煤层能直接利用地下煤矿资源作为热源和气源,但仍有爆炸程度难以控制、燃烧会有区域坍塌、生成有毒有害气体等问题。

3 结论与展望

随着煤层气开采难度的增加,常规的排水降压开采方式已经不能满足产量的需求,迫切需要一种新的技术手段来实现煤层气增产。煤层气的注热增产技术是提高煤层气产量的重要手段,其实质是通过加热煤岩促进煤层气解吸以及改善渗透率,在实现煤层气增产的同时又能满足环保清洁高效的要求。注热的方式虽多,但在实际现场试验和应用时,依据稠油热采的经验,应考虑以下几方面问题:

1) 煤层深度。注热介质法沿程热损失很大,该方法适用于低深度煤层,采用绝热管柱降低热量损耗可以应用于更深的煤层;微波加热和火烧煤层可以适用于较深的煤层,对于火烧煤层而言要考虑空气在地层中的注入性,若注入性良好则可拓宽深度范围。

2) 煤层压力。压力增大,热介质温度增加,沿程热损失增大,煤层吸收的热量减少,尤其对于注蒸汽法而言,不适用于压力接近蒸汽临界压力的煤层;微波加热和火烧煤层法不受压力限制,在煤层压力较高时应考虑采用。

3) 渗透率。对于低渗煤层,不宜采用注热介质法,因为无法向受热带提供足够的热量促使其向远端扩展;而对于火烧煤层而言,只需要满足空气注入速度能维持燃烧前缘即可,故火烧煤层可以在低渗透煤层使用。微波加热依托的是电磁场直接作用于煤层,所以同样适用。对于中高渗煤层,4种方法均适用。

煤层气的注入增产还有望促进后续煤矿资源开采。可以将热采煤层气和煤炭地下气化、地下煤炭原位热解等工艺相结合,以充分发挥热采煤层气后的余热。比如在注热开采完煤层气之后,注入富氧湿气使煤炭燃烧气化;或者再持续注热提高地层温度,在隔绝空气条件下将煤层升温至热解温度以上,此时煤炭会原位热解为煤气、焦油、半焦等产品。注热增产结合传统增产改造模式也是一种发展趋势,比如在构建羽状水平井和水力压裂施工后再实施注热,以进一步强化开采煤层气。

参考文献

- [1] 杨兆中,刘云锐,张平,等.煤层气直井地层破裂压力计算模型[J].石油学报,2018,39(5):578-586.
YANG Zhaozhong, LIU Yunrui, ZHANG Ping, et al. A model for calculating formation breakdown pressure in CBM vertical wells[J]. Acta Petrolei Sinica, 2018, 39(5): 578-586.
- [2] 李波波,高政,杨康,等.考虑温度、孔隙压力影响的煤层渗透性演化机制分析[J].煤炭学报,2020,45(2):626-632.
LI Bobo, GAO Zheng, YANG Kang, et al. Analysis of coal permeability evolution mechanism considering the effect of temperature and pore pressure[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(2): 626-632.
- [3] 秘旭晴.低渗透储层煤层气注热开采过程能量分布规律研究[D].阜新:辽宁工程技术大学,2019.
MI Xuqing. Study on energy distribution law of coal seam gas injection in low permeability reservoir[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2019.
- [4] LIU D M, ZOU Z, CAI Y D, et al. An updated study on CH₄ isothermal adsorption and isosteric adsorption heat behaviors of variable rank coals[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2021, 89: 103899.
- [5] CHIHARU U, KOKI U, TAKUYA A, et al. New insights into the heat of adsorption of water, acetonitrile, and n-hexane in porous carbon with oxygen functional groups[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2019, 552: 412-417.

- [6] YE J C, TAO S, ZHAO S P, et al. Characteristics of methane adsorption/desorption heat and energy with respect to coal rank [J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2022, 99: 104445.
- [7] DENG J C, KANG J H, ZHOU F B, et al. The adsorption heat of methane on coal: comparison of theoretical and calorimetric heat and model of heat flow by microcalorimeter[J]. *Fuel*, 2019, 237: 81–90.
- [8] 邱峰.煤层气吸附/解吸过程中能量变化特征[D].北京:中国地质大学(北京),2021.
QIU Feng. Variation characteristics of energy in the process of coalbed methane adsorption and desorption[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2021.
- [9] 刘曰武,苏中良,方虹斌,等.煤层气的解吸/吸附机理研究综述[J].*油气井测试*,2010,19(6):37–44.
LIU Yuewu, SU Zhongliang, FANG Hongbin, et al. Review on CBM desorption/adsorption mechanism[J]. *Well Testing*, 2010, 19(6): 37–44.
- [10] 马东民,张遂安,王鹏刚,等.煤层气解吸的温度效应[J].*煤田地质与勘探*,2011,39(1):20–23.
MA Dongmin, ZHANG Sui'an, WANG Penggang, et al. Mechanism of coalbed methane desorption at different temperatures[J]. *Coal Geology and Exploration*, 2011, 39(1): 20–23.
- [11] 曾社教,马东民,王鹏刚.温度变化对煤层气解吸效果的影响[J].*西安科技大学学报*,2009,29(4):449–453.
ZENG Shejiao, MA Dongmin, WANG Penggang. Effect of temperature changing on desorption of coalbed methane[J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2009, 29(4): 449–453.
- [12] LIU J, KANG Y, CHEN M, et al. Effect of high-temperature treatment on the desorption efficiency of gas in coalbed methane reservoirs: Implication for formation heat treatment[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2022, 47 (19): 10531–10546.
- [13] HAO S, ZHANG L, JIA Y. Synergistic effect of blast furnace slag on the pyrolysis process of oil-rich coal, tar product distribution and kinetic analysis[J]. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 2021: 1–14.
- [14] 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 Li, WANG Shuangming, DUAN Zhonghui, 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.
- [15] 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 Shuangming, SHI Qingmin, WANG Shengquan, 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.
- [16] 任常在,代元军,赵龙广.低渗透煤层气间歇注热实验研究[J].*煤炭技术*,2016,35(1):22–24.
REN Changzai, DAI Yuanjun, ZHAO Longguang. Experimental study of low permeability coal bed by intermittent inject Heat [J]. *Coal Technology*, 2016, 35(1): 22–24.
- [17] LI B, REN C, WANG Z, et al. Experimental study on damage and the permeability evolution process of methane-containing coal under different temperature conditions[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2020, 184: 106509.
- [18] JIANG C, WANG Y, DUAN M, et al. Experimental study on the evolution of pore-fracture structures and mechanism of permeability enhancement in coal under cyclic thermal shock[J]. *Fuel*, 2021, 304: 121455.
- [19] 李波波,高政,杨康,等.温度与孔隙压力耦合作用下煤岩吸附-渗透率模型研究[J].*岩石力学与工程学报*,2020,39(4):668–681.
LI Bobo, GAO Zheng, YANG Kang, et al. Study on coal adsorption-permeability model under the coupling of temperature and pore pressure[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, 39(4): 668–681.
- [20] 巩天白.低渗透储层煤层气注热开采能量迁移及热经济性评价研究[D].阜新:辽宁工程技术大学,2020.
GONG Tianbai. Study on the evaluation of energy migration and thermal economics evaluation of CBM thermal injection mining in low permeability reservoirs[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2020.
- [21] GAO Z, LI B, LI J H, et al. Coal permeability related to matrix-fracture interaction at different temperatures and stresses[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2021, 200: 108428.
- [22] LI X C, YAN X P, KANG Y L. Effect of temperature on the permeability of gas adsorbed coal under triaxial stress conditions[J]. *Journal of Geophysics and Engineering*, 2018, 15 (2): 386–396.
- [23] 滕腾.煤层气开采中的热-湿-流-固耦合机理研究[D].徐州:中国矿业大学,2017.
TENG Teng. Mechanism of heat-moisture-fluid-solid interactions in coal seam gas recovery[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2017.
- [24] WANG Z, LI S, LI Z. A novel strategy to reduce carbon emissions of heavy oil thermal recovery: Condensation heat transfer performance of flue gas-assisted steam flooding[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2022, 205: 118076.
- [25] 杨新乐,张永利.热采煤层气藏过程煤层气运移规律的数值模拟[J].*中国矿业大学学报*,2011,40(1):89–94.
YANG Xinle, ZHANG Yongli. Numerical simulation on flow rules of coal-bed methane by thermal stimulation[J]. *Journal of China University of Mining and Technology*, 2011, 40(1): 89–94.
- [26] 刘杰.低渗透煤层煤层气注热开采中注热过程的温度场分析[D].阜新:辽宁工程技术大学,2008.
LIU Jie. Analysis on temperature field through injection of heat into low permeability coal seam[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2008.
- [27] 石晓巖.煤层气热采等效热传导物理与数值模拟研究[D].太原:太原理工大学,2021.
SHI Xiaodian. Study on equivalent heat conduction physics and numerical simulation of exploitation of CBM by vapor injection [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2021.

- [28] 柴琳.煤吸附超临界状态甲烷—水蒸气规律及注热增产机理研究[D].太原:太原理工大学,2017.
CHAI Lin. Study on adsorption law of super critical methane and water vapor and heat injection mechanism of ECBM[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2017.
- [29] 唐明云,张亮伟,郑春山,等.考虑蒸汽相变煤层气注热开采数值模拟研究[J].采矿与安全工程学报,2022,39(2):370-379.
TANG Mingyun, ZHANG Liangwei, ZHENG Chunshan, et al. Numerical simulation of coalbed methane production by heat injection considering steam condensation[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2022, 39(2): 370-379.
- [30] 杨新乐,任常在,张永利,等.低渗透煤层气注热开采一流—固耦合数学模型及数值模拟[J].煤炭学报,2013,38(6):1044-1049.
YANG Xinle, REN Changzai, ZHANG Yongli, et al. Numerical simulation of the coupled thermal fluid solid mathematical models during extracting methane in low permeability coal bed by heat injection[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(6): 1044-1049.
- [31] WEI G M, WEN H, DENG J, et al. Liquid CO₂ injection to enhance coalbed methane recovery: An experiment and in-situ application test[J]. Fuel, 2021, 284: 119043.
- [32] 王永康.注二氧化碳驱替甲烷实验及数值模拟分析[D].徐州:中国矿业大学,2016.
WANG Yongkang. Experiment and numerical simulation analysis of displacing CH₄ by CO₂ injection[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2016.
- [33] MU Y L, FAN Y P, WANG J, et al. Numerical study on the injection of heated CO₂ to enhance CH₄ recovery in water-bearing coal reservoirs[J]. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 2019: 1-19.
- [34] FANG H H, SANG S X, LIU S Q. The coupling mechanism of the thermal-hydraulic-mechanical fields in CH₄-bearing coal and its application in the CO₂-enhanced coalbed methane recovery[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2019, 181: 106177.
- [35] FANG H H, SANG S X, LIU S Q. Numerical simulation of enhancing coalbed methane recovery by injecting CO₂ with heat injection[J]. Petroleum Science, 2019, 16(1): 32-43.
- [36] MA T R, RUTQVIST J, OIDENBURG C M, et al. Coupled thermal-hydrological-mechanical modeling of CO₂-enhanced coalbed methane recovery[J]. International Journal of Coal Geology, 2017, 179: 81-91.
- [37] 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.
LI Li, LIANG Weiguo, LI Zhigang, et al. Experimental investigation on enhancing coalbed methane recovery by injecting high temperature CO₂[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(8): 2044-2050.
- [38] 黎力.注热CO₂驱替增产煤层气试验与数值模拟研究[D].太原:太原理工大学,2017.
LI Li. Experimental and numerical investigation on enhancing coalbed methane recovery by injection heated CO₂[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2017.
- [39] 封官宏.二氧化碳置换煤层气(CO₂-ECBM)地质工程中多相渗流和相态转化过程分析与数值模型[D].长春:吉林大学,2018.
FENG Guanhong. Process analyses and numerical models for multiphase flow and phase change in CO₂-ECBM engineering[D]. Changchun: Jilin University, 2018.
- [40] 桑树勋.二氧化碳地质存储与煤层气强化开发有效性研究述评[J].煤田地质与勘探,2018,46(5):1-9.
SANG Shuxun. Research review on technical effectiveness of CO₂ geological storage and enhanced coalbed methane recovery [J]. Coal Geology Exploration, 2018, 46(5): 1-9.
- [41] 杨兆中,朱静怡,李小刚,等.微波加热技术在非常规油资源中的研究现状与展望[J].化工进展,2016,35(11):3478-3483.
YANG Zhaozhong, ZHU Jingyi, LI Xiaogang, et al. Progress in researches on microwave heating in unconventional oil resources [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2016, 35(11): 3478-3483.
- [42] 崔宏达.微波加热开采煤层气解吸渗流过程数值模拟研究[D].阜新:辽宁工程技术大学,2015.
CUI Hongda. Numerical simulation of the exploitation of CBM desorption process by microwave heating[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2015.
- [43] 李贺.微波辐射下煤体热力响应及其流—固耦合机制研究[D].徐州:中国矿业大学,2018.
LI He. Thermodynamical response of coal and the hydraulic-mechanical coupling mechanism under microwave irradiation [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2018.
- [44] 崔余岩.微波加热提高煤层气渗流性能的研究[D].阜新:辽宁工程技术大学,2017.
CUI Yuyan. Study on improving the seepage performance of coal-bed methane by microwave heating[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2017.
- [45] 马小童.微波对煤中甲烷解吸—二氧化碳吸附双重激励作用及机理[D].焦作:河南理工大学,2019.
MA Xiaotong. Double excitation and mechanism of microwave on methane desorption and carbon dioxide adsorption in coal[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2019.
- [46] 胡国忠,朱怡然,李志强.可控源微波场促进煤体中甲烷解吸的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2017,36(4):874-880.
HU Guozhong, ZHU Yiran, LI Zhiqiang. Experimental study on desorption enhancing of methane in coal mass using a controlled microwave field[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(4): 874-880.
- [47] WANG Z J, WANG X J. Promotion effects of microwave heating on coalbed methane desorption compared with conductive heating[J]. Scientific Reports, 2021, 11(1): 1-16.
- [48] FU X X, LUN Z M, ZHAO C P, et al. Influences of controlled microwave field irradiation on physicochemical property and methane adsorption and desorption capability of coals: Implications for coalbed methane (CBM) production[J]. Fuel, 2021, 301: 121022.
- [49] HUANG J X, XU G, LIANG Y P, et al. Improving coal

- [17] 魏迎春,张劲,曹代勇,等.煤层气开发中煤粉问题的研究现状及研究思路[J].煤田地质与勘探,2020,48(6):116-124.
WEI Yingchun, ZHANG Jing, CAO Daiyong, et al. Research status and thoughts for coal fines during CBM development[J]. Coal Geology & Exploration, 2020, 48(6): 116-124.
- [18] 李袖臣,张文,吕洋,等.煤层气排采井防煤粉技术研究[J].湖北大学学报(自然科学版),2021,43(5):498-501.
LI Xiucheng, ZHANG Wen, LYU Yang, et al. Coal powder control technology for coalbed methane well[J]. Journal of Hubei University (Natural Science), 2021, 43(5): 498-501.
- [19] 郭智栋,曾雯婷,方惠军,等.重复脉冲强冲击波技术在煤储层改造中的初步应用[J].中国石油勘探,2019,24(3):397-402.
GUO Zhidong, ZENG Wengting, FANG Huijun, et al. Initial application of intense repeated pulse wave for stimulating CBM reservoirs[J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(3): 397-402.
- [20] 王喆.可控冲击波解堵增透技术在延川南煤层气田中的应用[J].油气藏评价与开发,2020,10(4):87-92.
WANG Zhe. Application of controllable shock wave plugging removal and permeability improvement technology in CBM gas field of Southern Yanchuan[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2020, 10(4): 87-92.

(编辑 徐佩)

(上接第625页)

- permeability using microwave heating technology—A review[J]. Fuel, 2020, 266: 117022.
- [50] LAN W J, WANG H X, LIU Q H, et al. Investigation on the microwave heating technology for coalbed methane recovery[J]. Energy, 2021, 237: 121450.
- [51] 王晓娟.微波辐射下煤储层电磁—热—流—固耦合及数值模拟[D].焦作:河南理工大学,2020.
WANG Xiaojuan. Electromagnetic-thermal-hydraulic-mechanical coupling and numerical simulation of coal reservoir under microwave irradiation[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2020.
- [52] HUANG J X, XU G, HU G Z, et al. A coupled electromagnetic irradiation, heat and mass transfer model for microwave heating and its numerical simulation on coal[J]. Fuel Processing Technology, 2018, 177: 237-245.
- [53] ZHU J Y, WANG H, YANG Z Z, et al. Thermal stimulation on enhanced coalbed methane recovery under microwave heating based on a fully coupled numerical model[C]/Paper SPE-208904-MS presented at the SPE Canadian Energy Technology Conference, Calgary, Alberta, Canada, March 2022.
- [54] ZHU J Y, YANG Z Z, LI X G, et al. The effect of microwave irradiation on coal for enhanced gas recovery of coalbed methane[C]/Paper URTEC-2019-92-MS presented at the SPE/AAPG/SEG Unconventional Resources Technology Conference, Denver, Colorado, USA, July 2019.
- [55] SUN C, LIU W Q, YANG R, et al. Sensitivity analysis on the microwave irradiation enhancing coal seam gas recovery: A coupled electromagnetic-thermo-hydro-mechanical model[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2022, 100: 104457.
- [56] LIN B Q, LI H, CHEN Z W, et al. Sensitivity analysis on the microwave heating of coal: A coupled electromagnetic and heat transfer model[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 126: 949-962.
- [57] 杨新乐,姜涛,苏畅,等.脉动微波循环注热开采煤层气数值模拟[J].微波学报,2021,37(4):89-94.
YANG Xinle, JIANG Tao, SU Chang, et al. Numerical simulation of coalbed methane extraction by pulsation cycle microwave heat injection[J]. Journal of Microwaves, 2021, 37(4): 89-94.
- [58] WANG Z X, GAO D L, FANG J. Numerical simulation of RF heating heavy oil reservoir based on the coupling between electromagnetic and temperature field[J]. Fuel, 2018, 220: 14-24.
- [59] 毛琼,王绪性,王芳,等.火烧煤层开采煤层气的研究[J].中国煤层气,2011,8(6):33-36.
MAO Qiong, WANG Xuxing, WANG Fang, et al. Study on extraction of CBM by combustion of coal seams[J]. China Coalbed Methane, 2011, 8(6): 33-36.
- [60] BHUTTO A W, BAZMI A A, ZAHEDI G. Underground coal gasification: From fundamentals to applications[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2013, 39(1): 189-214.
- [61] 谢启红.火烧煤层提高煤层气采收率机理研究[D].秦皇岛:燕山大学,2017.
XIE Qihong. The mechanism of burning coal on enhancing coalbed methane recovery[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2017.
- [62] 刘盈,马悦,黄俊杰.火烧煤层数值模拟研究[J].煤炭技术,2017,36(9):29-31.
LIU Ying, MA Yue, HUANG Junjie. Numerical simulation study on combustion of coal seam[J]. Coal Technology, 2017, 36(9): 29-31.
- [63] 刘盈,白兴家.火烧煤层提高强水敏储层煤层气采收率初探[J].煤矿安全,2016,47(10):180-183.
LIU Ying, BAI Xingjia. Exploration on enhancing extraction of CBM in water-sensitive reservoir by combustion of coal seams [J]. Safety in Coal Mines, 2016, 47(10): 180-183.

(编辑 黄颖)