



注热强化煤层气抽采的试验研究及工业应用

胡林杰 冯增朝 周动 王幸

引用本文：

胡林杰, 冯增朝, 周动, 等. 注热强化煤层气抽采的试验研究及工业应用[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(12): 194–205.
HU Linjie, FENG Zengchao, ZHOU Dong. Experimental research and industrial application of heat injection-enhanced coalbed methane extraction[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(12): 194–205.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13199/j.cnki.est.mcq22-1407>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

超声波激励下煤层气解吸扩散特性的研究

Study on desorption and diffusion characteristics of coalbed methane under ultrasonic excitation
煤炭科学技术. 2020, 48(3) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/4b0f87cd-dd92-473f-9fd8-088027a0ea84>

水分对煤层气吸附/解吸微观作用研究进展

Research progress micro effect of water on coalbed methane adsorption/desorption
煤炭科学技术. 2023, 51(2): 256–268 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.est.2022-1537>

基于气水两相流的注热CO₂增产CH₄数值模拟研究

Numerical study of heat injection CO₂ to increase CH₄ production based on gas–water two-phase flow
煤炭科学技术. 2024, 52(3): 115–128 <https://doi.org/10.12438/est.2023-0690>

晋城矿区废弃矿井采空区煤层气地面抽采研究进展

Research progress on surface drainage of coalbed methane in abandoned mine gob of Jincheng Mining Area
煤炭科学技术. 2022, 50(1): 204–211 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/6f9a3691-b7fb-4cfa-889f-363b9fadbf0c>

晋城寺河井区煤矿采空区煤层气地面抽采关键技术研究

Study on key technology for surface extraction of coalbed methane in coal mine goaf from Sihe Wells Area, Jincheng
煤炭科学技术. 2021, 49(1): 240–247 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.est.2021.01.020>

煤层气井液氮伴注压裂增透机制及应用研究

Study on mechanism and application of liquid nitrogen injection combined with fracturing to enhance permeability in CBM wells
煤炭科学技术. 2019(11) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/a7ea770e-36a7-41b0-8c9b-4d254fcbb08bb>



关注微信公众号，获得更多资讯信息



移动扫码阅读

胡林杰, 冯增朝, 周 动, 等. 注热强化煤层气抽采的试验研究及工业应用[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(12): 194–205.

HU Linjie, FENG Zengchao, ZHOU Dong, et al. Experimental research and industrial application of heat injection-enhanced coalbed methane extraction[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(12): 194–205.

注热强化煤层气抽采的试验研究及工业应用

胡林杰¹, 冯增朝¹, 周 动², 王 幸¹

(1. 太原理工大学 原位改性采矿教育部重点实验室, 山西 太原 030024; 2. 太原理工大学 安全工程与应急管理学院, 山西 太原 030024)

摘要: 煤层气作为煤层中主要的清洁能源, 其高效抽采和利用, 将有利于提高资源利用率和保障煤矿安全生产。然而, 甲烷的强吸附性和煤层的低渗透性, 导致煤层气的采收率特别低。基于能量守恒方程, 完善了注热强化煤层气抽采的理论, 在实验室和煤矿井下分别进行了注热强化煤层气抽采的试验, 研究了不同条件下甲烷的解吸规律和注热对煤层气抽采的促进作用。室内试验结果表明, 注水解吸、自然解吸和注热解吸 3 种条件下的煤样终态解吸率分别为 12%、37% 和 81%。定量计算结果表明, 自然解吸和注水解吸后的注热强化解吸, 分别可以增加 46% 和 68% 的解吸率, 证明了注热具有强化甲烷解吸以及解除水锁效应的作用。阳泉矿区现场试验结果表明, 注热方法不仅可以提高煤层气的抽采率, 还可以缩短煤层气的抽采时间。注热方法可以将煤层气的浓度和日产气量分别提高 10 倍和 100 倍, 其中最大煤层气浓度和最大日均产气量分别为 98% 和 123 m³/d。8 号注热钻孔的有效注热半径超过 5 m, 并且注热后的抽采阶段是煤层气高效抽采时间段。研究结果可为注热强化煤层气抽采的现场应用和煤矿井下局部瓦斯的防治提供参考。

关键词: 煤层气; 注热强化煤层气抽采; 甲烷解吸规律; 有效注热半径; 能量刺激

中图分类号: TD712.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2336(2022)12-0194-12

Experimental research and industrial application of heat injection-enhanced coalbed methane extraction

HU Linjie¹, FENG Zengchao¹, ZHOU Dong², WANG Xing¹

(1. Key Laboratory of In situ Property Improving Mining of Ministry of Education, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;

2. College of Safety and Emergency Management Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: As the main clean energy in coal seams, the efficient extraction and utilization of coalbed methane (CBM) will help to improve resource utilization and coal mine safety production. However, due to the strong adsorption characteristics of methane and the low permeability characteristics of coal seams, the recovery efficiency of CBM is particularly low. Based on the energy conservation equation, the theory of heat injection-enhanced CBM extraction was improved. The experiments of heat injection-enhanced CBM extraction were carried out in the laboratory and in the coal mine, and the desorption law of methane under different conditions and the promotion effect of heat injection on CBM extraction were studied. The laboratory experiment results show that the final desorption rates of coal samples under the three conditions of water injection desorption, natural desorption and thermal injection desorption are 12%, 37% and 81%, respectively. The quantitative calculation results show that the enhanced desorption by heat injection after natural desorption and water injection desorption can increase the desorption rate by 46% and 68% respectively, which proves that heat injection can enhance the desorption of methane and release the water lock effect. The field test results in Yangquan mining area show that the heat injection method can not only improve the desorption rate of CBM, but also shorten the extraction time of CBM. The heat injection method can increase the concentration of CBM and the daily gas production by 10 times and 100 times respectively, wherein the maximum concentration of CBM and the maximum daily average gas production are 98% and 123 m³/d, respectively. The effective heat injection radius of No.8 heat injection bore-hole is more than 5 m, and the extraction stage after heat injection is the efficient extraction period of CBM. The research results can

收稿日期: 2022-08-03 责任编辑: 黄小雨 DOI: 10.13199/j.cnki.cst. mcq22-1407

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金资助项目(51904197)

作者简介: 胡林杰(1992—), 男, 湖北襄阳人, 博士研究生。E-mail: 651130375@qq.com

provide reference for the field application of heat injection-enhanced CBM extraction and the prevention and control of local gas in coal mines.

Key words: coalbed methane; heat injection-enhanced CBM extraction; methane desorption law desorption rate; effective heat injection radius; energy stimulation

0 引言

煤层气作为一种重要的非常规天然气资源,在全球能源结构中扮演着重要角色。全球埋深2 000 m以浅的煤层气资源总量约为24万亿m³^[1-2]。然而,作为煤层气的主要成分,甲烷也时刻威胁着煤矿工人的安全。因此,技术创新对于提高煤层气的采收率,促进资源利用和煤矿安全生产具有重要意义^[3]。

煤层气的开采受多种因素的影响,其中最常见的是储层渗透率、温度、压力和抽采方法。因此,国内外众多学者试图通过水力压裂、水力冲孔和水力割缝等方法来提高煤层的渗透率^[4]。水力压裂增渗技术是通过将高压水注入煤层,使煤层产生新的裂缝,并与煤层中的原始裂缝相互贯通和融合,从而达到提高煤层渗透性的目的^[5]。例如,张福旺^[6]在平煤九矿开展了水力冲孔强化煤层气抽采的试验研究,发现该技术显著地改善煤层气的抽采效果并降低了煤与瓦斯突出的风险;卢义玉^[7]等研究发现,地面定向井+水力割缝卸压的方法可以扩大煤层的卸压范围,强化甲烷解吸和扩散。然而,水力压裂和水力冲孔等外载荷应力技术虽然增加了煤层的渗透性,但是水锁效应会严重影响煤层气的抽采效率^[8-9]。因此,需要开发一种更安全、更有效和更经济的增强型气体提取技术。

煤对甲烷的吸附能力随着温度的升高而降低,由此可以推断,升高煤层温度将会促进甲烷的解吸^[10-11]。张遵国^[12]和杨涛^[13]等的研究结果表明,煤体吸附甲烷为温度升高的放热过程,而解吸为温度降低的吸热过程。能量是控制解吸效率的关键因素,只有给吸附态甲烷足够的能量,才能使甲烷持续不断的解吸^[14-15]。因此,众多学者基于温度对甲烷解吸的影响,提出了注热强化煤层气抽采的想法,并进行了大量的室内试验和数值模拟研究,这为注热强化煤层气抽采的现场试验奠定了理论基础。SALMACHI^[16]和王志军^[17]等分别提出了利用地热资源提高煤层气采收率的方法,以及利用微波加热促进甲烷解吸的技术。杨新乐^[18]和腾腾^[19]等建立了煤层气注热开采的热-流-固耦合数学模型,发现注热能够促进甲烷解吸,增加煤层气的产量。

综上所述,以往对于提高煤层气采收率的研究

主要集中在甲烷的解吸规律方面,涉及注热强化煤层气抽采原理和现场应用的研究相对较少。虽然有不少学者进行了注热的数值模拟研究,但是对于现场注热试验的产气规律和注热效果,还需进一步研究。因此,笔者根据能量守恒原理对甲烷的解吸和运移进行了理论分析,完善了注热强化煤层气抽采的理论。在实验室进行了不同条件下的甲烷解吸试验。在煤矿井下进行了现场注热试验,以验证所提出的注热理论和技术。研究结果为提高煤层气采收率提供了理论依据和经验指导。

1 注热强化煤层气抽采的能量刺激理论

自然界中的任何系统在被外界干扰之前,总是保持能量平衡的状态,只有当原有的能量平衡状态被打破,系统才会发生变化,比如当煤层受到扰动时,煤层内部的甲烷才开始解吸。所以,要想获得更多的煤层气,就必须打破煤层的能量平衡状态。在传统的瓦斯抽采过程中,因为煤层所受到的扰动有限,导致甲烷解吸和运移的动力不足,所以煤层气的产量比较低。而注热方法作为强化煤层气开采的一种直接注能方法,它不仅可以打破煤层的能量平衡状态,还可以为煤层提供持续的能量注入,大大提高煤层气的抽采率^[20]。

甲烷的解吸和运移是需要消耗能量的,只有向煤层中注入新的能量,才可以得到更多的煤层气,这是一个基本的能量平衡问题。将煤体、煤层气和注入介质视为一个系统,则该系统满足能量守恒方程,这种能量平衡可以用式(1)^[21]表示:

$$E_{\text{pr}} = E_{\text{in}} + E_{\text{or}} - E_{\text{co}} \quad (1)$$

式中: E_{pr} 为流出系统的能量,为有效能量,包括从系统中抽采出来瓦斯的动能和内能; E_{or} 为系统的原始能量,包括煤和煤层气的内能、动能等固有能量; E_{in} 为注入系统的能量,包括外界通过介质(如过热水)向系统中注入的总能量; E_{co} 为煤及煤层气所消耗的能量,包括煤层气解吸和运移、注入介质与煤层之间的热交换、煤骨架变形等消耗的能量。

注热强化煤层气抽采的实质就是通过向煤层中注入过热水的方式来提高储层的能量,促进甲烷解吸,从而达到提高煤层气采收率的目的。注热强化煤层气抽采的原理如图1所示。根据已有的研究成

果和能量守恒原理,注热强化煤层气抽采的机理可综合分析归纳^[21]如下。

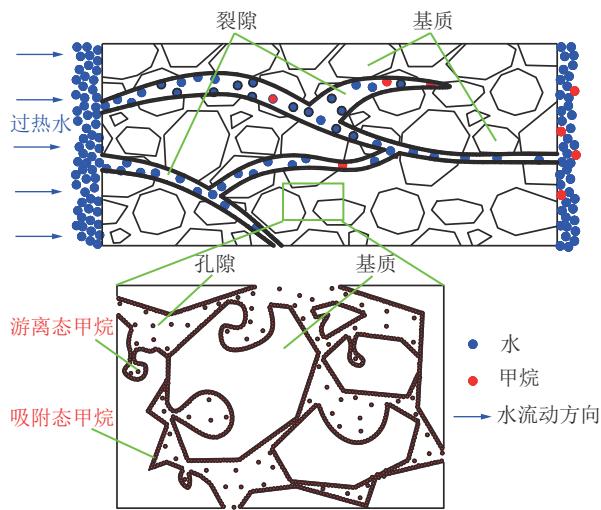


图1 注热强化煤层气抽采的原理示意

Fig.1 Schematic diagram of the principle of heat injection-enhanced CBM extraction

1)促进甲烷解吸的作用。煤层中的甲烷主要以两种状态存在:吸附态和游离态,当煤层的孔隙压力和温度保持恒定时,吸附态的甲烷和游离态的甲烷达到动态平衡。煤层气开采的实质是将甲烷由吸附态转化成游离态的过程,而且伴随着甲烷解吸的过程中,会吸收一部分热量,这部分热量就是解吸热。甲烷解吸是一个吸热过程,所以要想获得更多游离态的甲烷,就必须给煤层提供足够多的能量^[20]。根据改进的朗缪尔吸附方程可知^[19],升高储层温度和降低储层压力均可以促进甲烷解吸。通过向煤层中注入高温过热水,不仅可以打破系统的能量平衡状态,还可以将热能转移到煤层中,促进甲烷的解吸。改进的朗缪尔吸附方程为:

$$V_{sg} = \frac{V_L P}{P_L + P} \exp \left[-\frac{c_2(T - T_{ref})}{1 + c_1 P} \right] \quad (2)$$

式中: V_{sg} 为甲烷吸附量, m^3/kg ; P_L 为朗缪尔压力常数, Pa ; P 为煤层气压力, Pa ; V_L 为朗缪尔体积常数, m^3/kg ; T_{ref} 为甲烷吸附的参考温度, K ; T 为煤层温度, K ; c_1 为压力系数, Pa^{-1} ; c_2 为温度系数, K^{-1} 。

2)促进煤层气运移的作用。煤层中煤层气的运移是自然界物质的基本运动,特殊的是,煤层气的运移路径是由不同尺度的孔隙和裂隙形成的。因此,菲克扩散定律和达西渗流理论构成了煤层气运移的基本原理^[22]。

煤层气在孔隙和裂隙中的扩散和渗流都是需要消耗能量的。当煤层气的运移阻力与驱动力达到平

衡时,煤层气将停止运移。因此,向煤层中注入能量不仅可以为煤层气的运移提供能量,还可以提高煤层气的扩散速度和渗流速度。不仅如此,随着高温高压能量的注入,煤层中的孔隙压力逐渐增加,煤基质所受到的有效应力逐渐降低,可能会打开一些原本闭合的裂隙,拓宽煤层气的运移通道,有利于甲烷的解吸和运移^[21]。

2 试验设备和方法

2.1 试验地点及煤样制备

2.1.1 目标矿区地质概况

经过一系列的调查,选取阳泉矿区某矿的15号煤层作为现场试验地点。该矿15号煤层的埋深为200~440 m,顶板为石灰岩,厚度为13 m,平均含水率为0.6%,平均抗压强度为115.93 MPa。底板为砂质泥岩,厚度为2 m,平均含水率为0.67%,平均抗压强度为25.3 MPa。直接顶与直接底均为砂质泥岩,起到隔水层的作用,可防止过热水串入顶底板的岩层中。该矿15号煤层的坚固性系数为0.86,平均煤层厚度为6 m,孔隙率为6.91%,透气性系数为0.736 $\text{m}^2/(\text{MPa}^2 \cdot \text{d})$ 。该矿属于高瓦斯矿井,煤层气地质条件复杂,不同区域的煤层气含量呈现不均匀性,原始煤层气含量为6.87 m^3/t ,平均煤层气压力为0.61 MPa,吸附常数a为21.7395 m^3/t ,b为1.404 MPa^{-1} ,钻孔瓦斯流量衰减系数为0.0408 d^{-1} 。

2.1.2 煤样制备

为了对注热强化煤层气抽采进行模拟研究,从现场试验的煤层中进行取样。因此,选取山西省阳泉市某矿的贫煤为试验煤样。从现场取样后立即用蜡封好,然后带回实验室并制成Ø50 mm × 100 mm的标准试件,煤样沿层理方向进行取样,并用砂纸将端面打磨平整。煤样的基本性质见表1。

2.2 室内试验系统及方法

2.2.1 室内注热试验系统

试验中所使用的仪器和设备连接如图2所示。

注热强化甲烷解吸的试验系统可以分为以下6个部分:

1) 甲烷吸附和解吸系统:主要包括三轴夹持器、甲烷储气罐和参考罐,采用三轴夹持器对甲烷进行吸附和解吸试验。

2) 抽真空系统:采用真空泵对试验系统进行抽真空。

3) 甲烷收集系统:主要包括量筒、铁架台以及水槽,采用排水集气法收集解吸出来的甲烷气体。

4) 注水系统:采用恒压注水泵对煤样进行注水,

表1 试验煤层的工业分析及煤炭等级
Table 1 Proximate analysis and rank of test coal seam

煤层编号	工业分析/%			$w(S_{t,d})/\%$	$R_{o,max}/\%$	煤变质程度	煤种
	M_{ad}	A_d	V_{daf}				
15号	0.50~0.920.81	6.81~11.699.39	10.35~13.3412.44	1.39~2.211.90	2.471	高阶煤	贫煤

注: $R_{o,max}$ 为最大镜质体反射率。

注水压力范围为0~20 MPa。

5) 温度控制系统:采用电加热的方式对煤样进行加热及保温。温度控制范围为20~180 °C,温度

控制精度为±1 °C。

6) 压力控制系统:采用双缸注水泵对轴压和围压进行控制和监测。

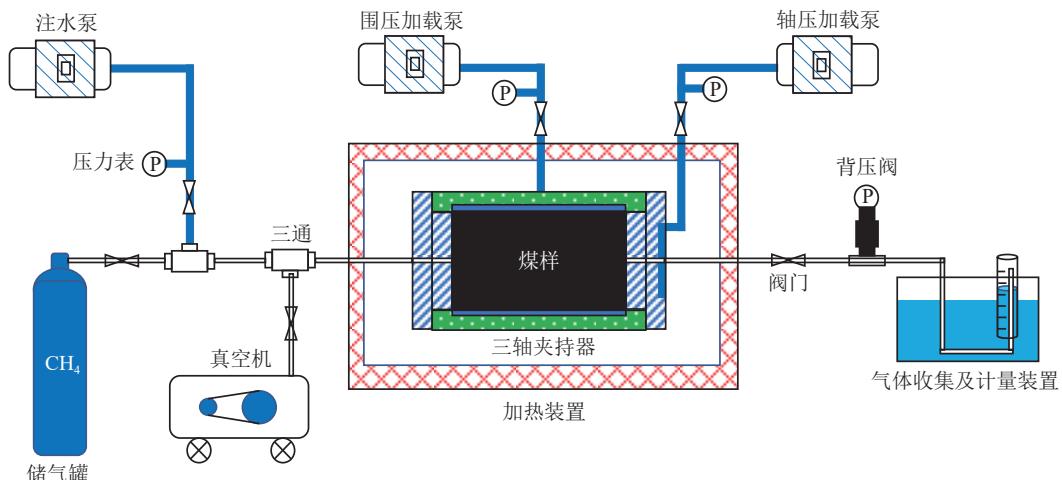


图2 室内注热试验的系统连接示意
Fig.2 System connection diagram of indoor heat injection experiment

2.2.2 室内注热试验方法

为了研究不同条件下甲烷的解吸特性以及注热强化甲烷解吸的规律,一共设计了2部分试验。第

1部分为不同条件下甲烷的解吸试验,第2部分为有无水压条件下的注热强化甲烷解吸试验。具体试验方案及试验过程简化分别见表2和图3。

表2 试验方案
Table 2 Experimental scheme

煤样编号	试验	吸附压力/ MPa	注水压力/ MPa	注热温度/ °C	试验步骤
1号	自然解吸	0.5	—	—	吸附-解吸
	注水解吸	0.5	8	—	吸附-注水-解吸
	注热解吸	0.5	—	140	吸附-注热-解吸
2号	自然解吸条件下的注热强化解吸	0.5	—	140	吸附-自然解吸-注热解吸
3号	注水解吸条件下的注热强化解吸	0.5	8	140	吸附-注水解吸-注热解吸

2.2.3 不同条件下的解吸试验

利用同一个煤样(1号煤样)依次进行3种条件下的解吸试验,煤样在每次吸附前,均需要进行12 h的烘干处理。

1) 自然解吸试验。具体试验步骤为:先将1号煤样进行12 h的烘干处理,然后放入试验装置中。检查完装置的气密性后,首先进行24 h的抽真空处理;然后在0.5 MPa的吸附压力下进行24 h的甲烷

吸附试验;待甲烷吸附平衡后(压力变化率小于0.002 MPa/h视为吸附平衡),依次交替施加轴压和围压,直至达到目标压力(轴压为10 MPa,围压为12 MPa);最后将解吸装置的出口阀门打开,在大气压条件下进行24 h的自然解吸试验,直至解吸平衡(解吸速率变化小于0.096 mL/(g·h)视为解吸平衡),整个试验过程均在25 °C的室温下进行。

2) 注水解吸试验。具体试验步骤与自然解吸试

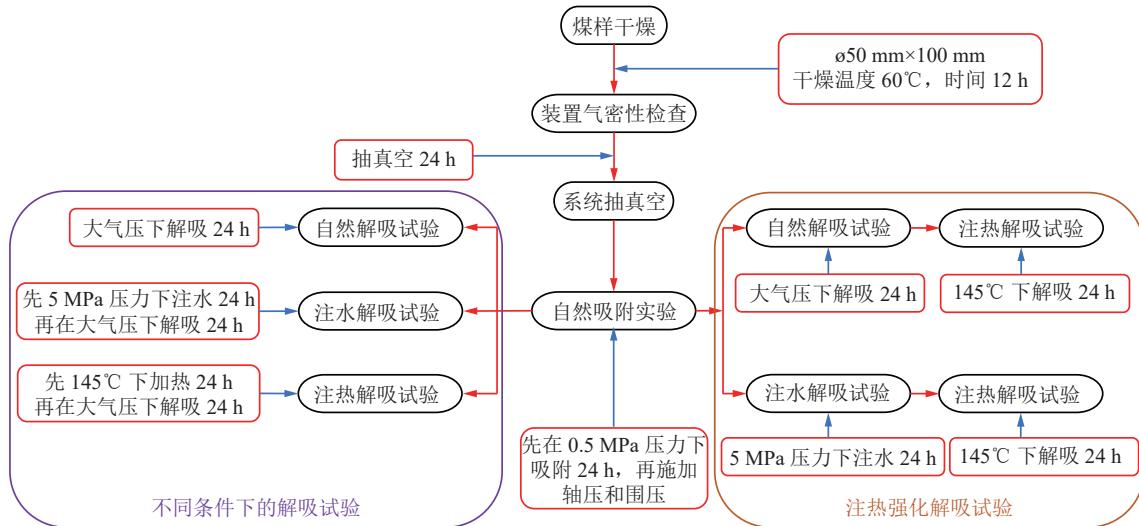


图3 试验过程简化示意

Fig.3 Simplified schematic diagram of experimental process

验基本相同,主要的区别在于:甲烷吸附完成后,先在5 MPa的压力下进行24 h的注水试验,待注水完成后,再打开解吸装置的出口阀门,在大气压下进行24 h的解吸试验。

3)注热解吸试验。具体试验步骤与自然解吸试验基本相同,主要的区别在于:甲烷吸附完成后,先打开加热装置,以140 °C的温度加热煤样24 h,然后打开解吸装置的出口阀门,在大气压下进行24 h的解吸试验。

2.2.4 注热强化甲烷解吸试验

为了进一步验证注热在强化甲烷解吸方面的作用,分别设置了两种条件下的注热强化解吸试验。

1)自然解吸条件下的注热强化解吸试验。具体试验步骤为:先将2号煤样在0.5 MPa的吸附压力下进行甲烷吸附试验;然后在大气压下进行自然解吸试验;待解吸平衡后,进行140 °C的注热强化解吸试验。注热强化解吸时需要先将煤样加热到140 °C,然后打开装置的解吸阀门。吸附和自然解吸试验均需要在25 °C的室温下进行。

2)注水解吸条件下的注热强化解吸试验。具体试验步骤为:先将3号煤样在0.5 MPa的吸附压力条件下进行甲烷吸附试验;然后以5 MPa的压力进行注水解吸试验;待解吸平衡后,进行140 °C的注热强化解吸试验。

2.3 现场试验设备及步骤

2.3.1 试验设备及工艺流程

如图4所示,现场注热试验的主要设备及功能如下:一个提供水源的水箱(容积为1 m³);一台提供注热压力的柱塞泵(额定功率为15 kW,最大排量为

1 m³/h,最大压力为20 MPa);一台提供加热功能的电加热装置(额定功率为400 kW,最高温度为200 °C);以及一套数据监测和采集设备。

注热强化煤层气抽采试验包括钻孔施工及封孔、系统连接、系统的密封性检查、注过热水加热煤层、煤层气抽采和数据监测及采集6个步骤,每个步骤的详细信息如下:

1)钻孔施工及封孔。按照试验设计要求进行钻孔施工,钻孔施工完成后采用水泥封孔的方式对所有钻孔进行封孔。

2)系统连接。系统连接主要包含3个部分,分别是注热系统连接、抽采系统连接以及数据监测和采集系统的连接。
①注热系统连接。注热系统主要由矿井给水管路、水箱、高压煤层注水泵、电加热锅炉、输热管和注热管组成,注热系统连接的详细信息如图4所示。
②抽采系统连接。抽采系统主要由抽放管、气水分离器、气体流量计和矿井负压抽采管组成,抽采系统连接的详细信息如图4所示。
③数据监测及采集系统连接。数据监测及采集系统主要用于监测煤层的温度和压力,以及采集钻孔的出水量和出气量。

3)系统的密封性检查。试验开始之前,需要先检查注热系统的密封性,确保管路畅通且不漏水,然后检查抽采系统的密封性。

4)注过热水。打开注水泵和电加热锅炉,将常温常压水加热成过热水并沿着注热管路进入煤层,当注水速度下降到设定值以下时,即可停止注热。

5)煤层气抽采。当煤层气抽采速率下降到试验要求的下限值后,即可停止抽采。

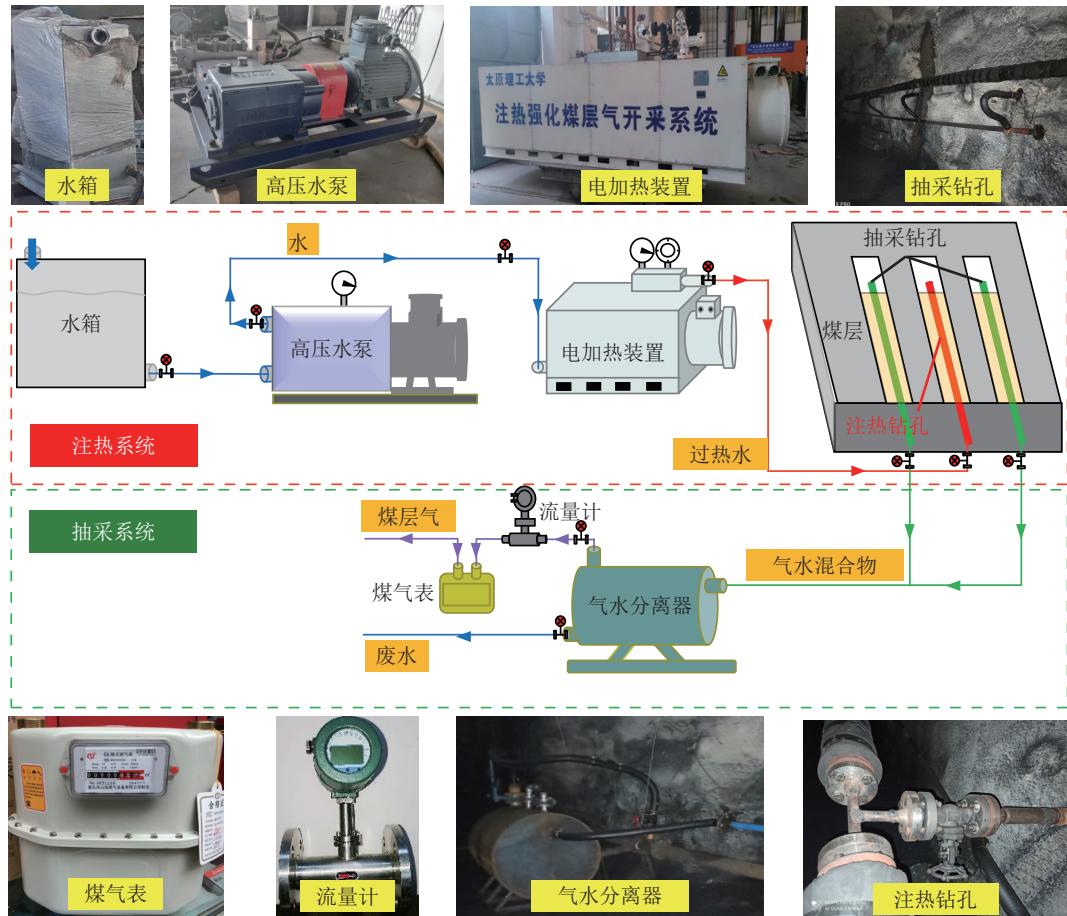


图4 试验设备及系统连接示意

Fig.4 Schematic diagram of experimental equipment and system connection

6)数据监测和采集。在注热过程中,实时监测相邻钻孔的温度和压力,当相邻钻孔的温度和压力达到试验设计要求后,即可停止注热。

2.3.2 钻孔布置及试验方案

在进行注热强化煤层气抽采的现场试验之前,对阳泉矿区某矿的15313工作面和南回风大巷进行了现场专项调查,并认真查阅了该矿的地质资料,提出了可行的注热试验方案。本次现场试验分为注热

试验区和非注热试验区,注热试验区进行注过热水强化煤层气抽采试验,非注热试验区作为对照组,只进行常规的负压抽采试验。注热试验区设置1个注热钻孔和6个抽采钻孔,非注热试验区设置4个抽采钻孔。

本次现场注热试验的钻孔间距为5 m,钻孔水平设计深度为100 m,钻孔布置方式如图5所示。钻孔采用水泥封孔,封孔深度为30 m。具体试验方案如

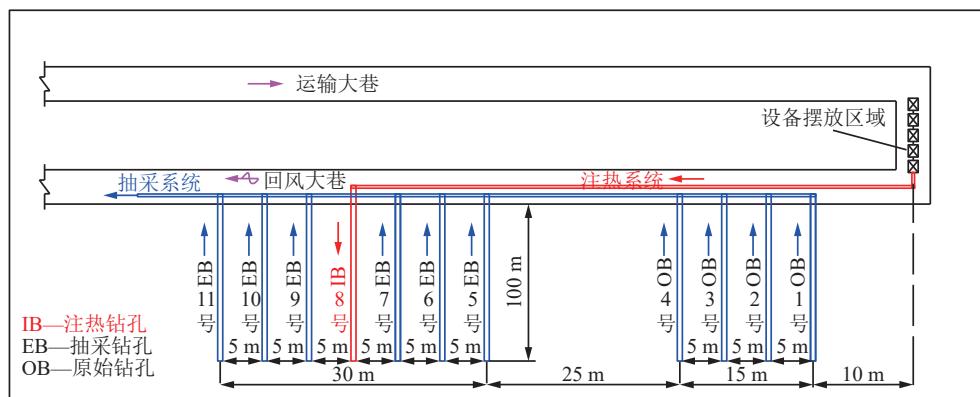


图5 钻孔布置示意

Fig.5 Schematic diagram of drilling arrangement

下:在注热试验开始之前,首先进行传统的煤层气抽采试验,即采用负压抽采的方式,该阶段称为原始抽采阶段。然后进行注热强化煤层气抽采试验,该阶段称为注热阶段和注热后的抽采阶段。

3 试验结果和分析

3.1 室内注热试验结果与分析

3.1.1 不同条件下的解吸率变化特征

不同煤样孔隙和裂隙的发育程度不同,在相同条件下煤样的吸附量和解吸量也会存在差异^[23]。因此为了更加准确的分析试验结果,将煤样的解吸量转化为解吸率进行分析。解吸率的定义为煤样在某一时刻的累计解吸量与总吸附量的比值,分为瞬时解吸率和终态解吸率。终态解吸率为煤样解吸平衡时的累计解吸量与总吸附量的比值,该时刻定义为解吸平衡时间。图6为1号煤样在自然解吸、注水解吸和注热解吸3种条件下的试验结果。

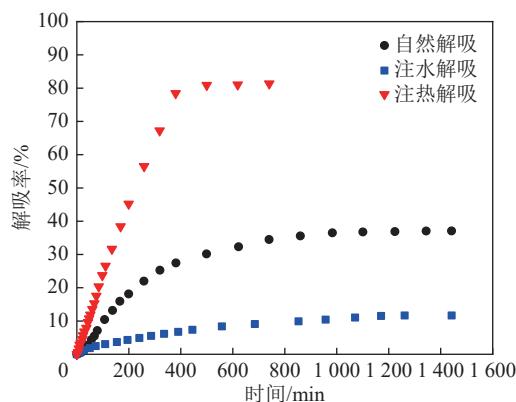


图6 不同条件下的解吸率

Fig.6 Desorption rates under different conditions

从图6可以看出,3种条件下的解吸率随时间均

呈现出相同的变化趋势,即先迅速增加,然后缓慢增加,最后保持不变。注水解吸、自然解吸和注热解吸的终态解吸率分别为12%、37%和81%,3种解吸条件下达到解吸平衡的时间分别为1170、980、380 min。这表明注水会抑制甲烷的解吸,降低甲烷的解吸速度,减少甲烷的终态解吸率,而注热可以强化甲烷解吸,提高甲烷的解吸速度,增加甲烷的终态解吸率。

3.1.2 不同条件下解吸的时间效应

解吸的时间效应是注热强化煤层气开采的一个关键性评价指标,它直接影响着煤层气抽采的时间。根据前人的研究结果^[23-24],可得到不同条件下解吸率随时间的变化关系:

$$\eta = \eta_{\max} \{1 - \exp[-(t/t_0)^n]\} \quad (3)$$

式中, t_0 和 n 分别为时间效应的发散度和临界值; t 为甲烷解吸时间, min; η 为 t 时刻的解吸率; η_{\max} 为终态解吸率。

对式(3)进行变换,令 $y = \ln[\eta_{\max}/(\eta_{\max} - \eta)]$, $x=t$, 则式(3)可变为

$$y = (x/t_0)^n \quad (4)$$

根据式(3)和式(4)对不同条件下的解吸试验数据进行拟合,拟合结果见表3。

从表3可以看出,3种解吸条件下拟合曲线的相关系数均大于0.97,说明该数学模型可以很好的描述自然解吸、注水解吸以及注热解吸条件下,煤样解吸率随时间的变化关系。 t_0 是用来描述解吸时间效应的临界值, t_0 的值越小,煤样达到解吸平衡的时间越短,解吸速度也就越快。3种不同解吸条件下,煤样的 t_0 值分别为427、295以及199 min,这说明注水解吸达到平衡的时间最长,而注热解吸达到平衡的时间最短。

表3 解吸时间效应的拟合结果
Table 3 Fitting results of desorption time effect

解吸条件	式(3)的拟合结果	式(4)的拟合结果	t_0 /min	n	相关系数R
注水解吸	$\eta = 0.12 \{1 - \exp[-(t/427)^{1.0436}]\}$	$y = 0.0018x^{1.0436}$	427	1.0436	0.98
自然解吸	$\eta = 0.37 \{1 - \exp[-(t/295)^{1.1116}]\}$	$y = 0.0018x^{1.1116}$	295	1.1116	0.99
注热解吸	$\eta = 0.81 \{1 - \exp[-(t/199)^{1.4071}]\}$	$y = 0.0006x^{1.4071}$	199	1.4071	0.97

煤样的解吸平衡时间是由甲烷的解吸速度和扩散速度决定的,煤样的温度越高,甲烷的解吸率就越大,煤样孔隙内气体的浓度差越大,甲烷的扩散速度就越大^[9]。注水解吸条件下,液态水进入煤样的孔隙和裂隙中,不仅占据了甲烷的运移路径,还会产生毛细管阻力,使甲烷很难解吸出来,导致煤样的解吸速

度和扩散速度降低,因此注水条件下煤样达到解吸平衡的时间增加^[21]。而注热解吸条件下,煤样温度升高,一方面促进了甲烷解吸,增加了煤样内部的气体压力;另一方面,升温降低了水分子的动力黏度^[25-26],加剧了分子的热运动,当甲烷的驱动力大于毛细管阻力时,水锁效应解除,煤样的解吸速度和扩散速度

大幅度提高^[27]。因此注热条件下煤样达到解吸平衡的时间缩短。值得注意的是,在这3种解吸条件下,n的变化非常小,这说明不同解吸条件下,煤样解吸的发散度大致相同。综上所述,解吸条件的改变,只会对时间效应的临界值 t_0 造成较大的影响,而不会影响解吸的发散度。

3.1.3 注热强化甲烷解吸规律的研究

如图7所示,2号煤样先进行自然条件下的解吸试验,然后进行注热强化解吸试验;3号煤样先进行注水条件下的解吸试验,然后进行注热强化解吸试验。

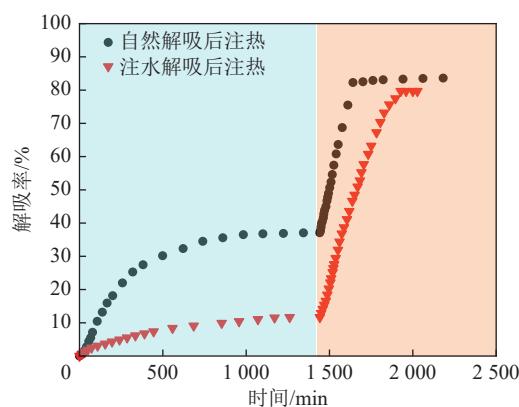


图7 不同条件下的注热强化甲烷解吸规律

Fig.7 Law of CH_4 desorption enhanced by heat injection under different conditions

从图7可以看出,2号煤样在自然条件下的终态解吸率为37%,而注热强化解吸后的终态解吸率为

83%;3号煤样在注水条件下的终态解吸率为12%,而注热强化后的终态解吸率为80%。不仅如此,无论是自然解吸还是注水解吸,在经过注热强化解吸后,煤样达到解吸平衡的时间都缩短了一半以上。这说明注热不仅可以提高甲烷的终态解吸率,还可以缩短煤样达到解吸平衡的时间。通过对比发现,注热对于注水后的煤样,具有更好的强化解吸作用。自然解吸后的注热强化解吸,可以增加46%的解吸率,而注水解吸后的注热强化解吸,可以增加68%的解吸率。这是因为甲烷解吸是一个吸热的过程,高温可以为甲烷解吸提供热量,促进注水条件下残留的吸附态甲烷解吸^[11,25]。此外,水分子的动力粘度随温度的升高而降低,当煤样内部的气体压力大于水的毛细阻力时,水锁效应解除,甲烷的解吸率和解吸速度大幅度提高^[9]。因此,注热不仅可以提高甲烷的解吸率,缩短煤样达到解吸平衡的时间,还可以解除水锁效应,强化注水煤样的解吸。

3.2 现场注热试验结果与分析

3.2.1 试验结果

选取注热组中的8号钻孔为注热钻孔,其余的6个钻孔为抽采钻孔,分别为5号、6号、7号、9号、10号和11号钻孔。对照组的4个钻孔编号分别为1号、2号、3号和4号钻孔。注热及抽采的详细情况见表4。

注热组和对照组的百米钻孔平均日产气纯量(以下简称“日产气量”)、煤层气体积分数和累计产气纯量(以下简称“累计产气量”)如图8和9所示。

表4 注热参数
Table 4 Heat injection parameters

组别	阶段	注水压力/MPa	注热温度/℃	时间/d	总注水量/m ³	总抽采量/m ³
注热组	原始抽采阶段	—	—	29	—	14.8
	注热阶段	8	140	23	254.7	4.1
	注热后抽采阶段	—	—	26	—	675.4
对照组	抽采阶段	—	—	78	—	64.5

图8为注热组和对照组在原始抽采阶段的煤层气平均日产气量和平均浓度。从图8可以看出,注热组的平均日产气量和平均浓度分别为0.16 m³/d和2.96%,对照组的平均日产气量和平均浓度分别为0.39 m³/d和8.18%。这说明2组试验区采用负压抽采方法时,煤层气的浓度和日产气量都很低,抽采效果一般。

图9为注热组和对照组煤层气累计抽采量的实时变化曲线。从图9中可以看出,注热之前,2组试

验区的累计产气量几乎没有增加;注热过程中,两组试验区的累计产气量开始缓慢增加;但是注热完成后,注热组的累计产气量迅速增加,而对照组的累计产气量依旧缓慢增加。截止到第78天,注热组和对照组的累计抽采量分别为695 m³和65 m³,其中注热组的累计产气量是对照组的10.7倍。这说明井下注过热水不仅可以促进甲烷解吸,提高煤层气的累计抽采量,还可以缩短煤层气的抽采时间,达到高效抽采煤层气的目的。

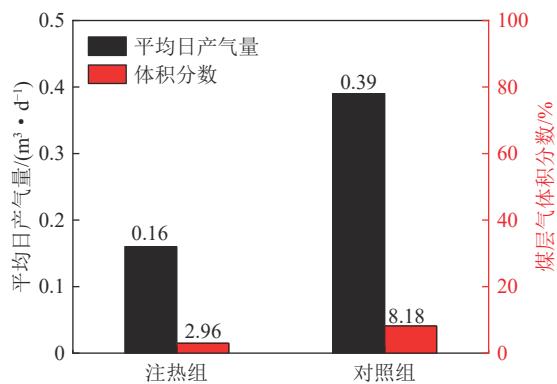


图8 注热组和对照组在原始抽采阶段的平均日产气量和平均浓度

Fig.8 Average daily gas production and average concentration in the original extraction stage of the heat injection group and control group

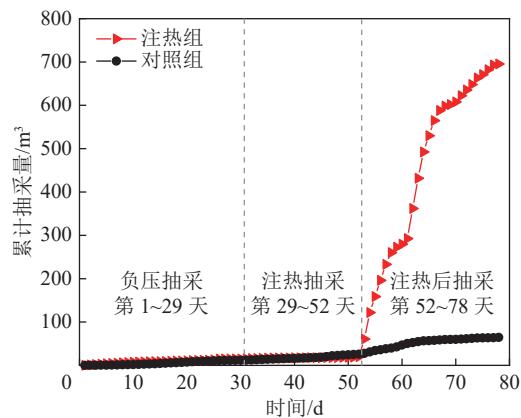


图9 注热组和对照组的累计抽采量

Fig.9 Cumulative extraction volume of heat injection group and control group

3.2.2 有效注热半径

为了研究现场注热试验的有效注热半径，采用温度传感器和甲烷检测仪对抽采钻孔的温度和煤层气浓度进行实时监测。距离注热钻孔5 m(7号钻孔)和10 m(10号钻孔)的抽采钻孔中煤层气温度和浓度的变化情况见表5。从表5可以看出，注热之前，两个抽采钻孔中煤层气的温度和浓度均比较低，但是注热完成后，它们的温度和浓度都有了不同程度的提高。其中7号钻孔的煤层气浓度从2.7%增加到35.2%，而10号钻孔的煤层气浓度从2.1%增加到11.6%。

注热过程中，7号和10号抽采钻孔的温度变化曲线如图10所示。从图中可以看出，随着注热时间的增加，两个抽采钻孔的温度也开始逐渐升高。截止到注热完成时，距离注热钻孔5 m处的抽采钻孔中，煤层气的温度增加了3倍；而距离注热钻孔10 m处的抽采钻孔中，煤层气的温度却只增加了0.8倍。

结合抽采钻孔中煤层气温度和浓度的变化规律，可以得出结论，注热强化煤层气抽采试验的有效注热半径大于5 m。

表5 注热过程中抽采钻孔的温度和煤层气浓度

Table 5 Temperature and CBM concentration of extraction borehole in heat injection stage

注热时间/d	温度/℃		煤层气体积分数/%	
	7号	10号	7号	10号
0	14.5	14.2	2.7	2.1
1	14.7	14.9	1.9	2.5
5	15.4	14.6	4.3	3.1
10	24.5	15.3	13.7	5.6
23	58.8	25.1	35.2	11.6

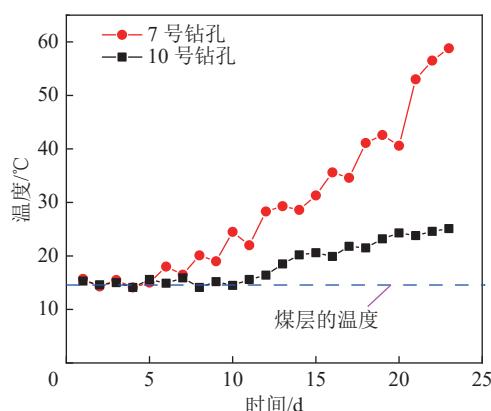


图10 注热过程中抽采钻孔的温度变化曲线

Fig.10 Temperature variation curve of extraction borehole in the heat injection stage

3.2.3 注热方法的产气规律分析

图11和12为注热组各个阶段的百米钻孔日产气量和浓度随时间的变化曲线。

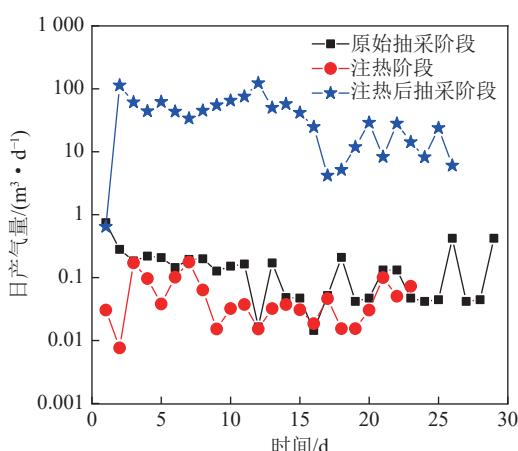


图11 日产气量随时间的变化曲线

Fig.11 Variation curve of daily gas production with time

从图11可知,注热组的日产气量随时间具有阶段性变化的特点,即原始抽采阶段和注热阶段的日产气量都很低,但是注热后抽采阶段的日产气量大幅度提高。其中原始抽采阶段和注热阶段的日产气量均不超过 $1\text{ m}^3/\text{d}$,而注热后抽采阶段的日产气量在 $10\text{ m}^3/\text{d}$ 以上。由此可知,注热后的抽采阶段是煤层气大量排出的高产时间段。从图中还可以看出,注热后抽采阶段的日产气量先迅速升高,然后缓慢降低。其中在第64天达到峰值,为 $123\text{ m}^3/\text{d}$,是其原始抽采阶段日产气量的769倍。截止到试验结束时,日产气量为 $6\text{ m}^3/\text{d}$,是其原始抽采阶段的38倍。因此注热可以将煤层气的日产气量可以提高100倍以上。

图12为注热组各阶段的煤层气浓度随时间的变化曲线。从图中可以看出,煤层气浓度的变化规律与日产气量的变化规律具有一致性。原始抽采阶段和注热阶段的煤层气浓度都在5%以下,而注热后抽采阶段煤层气浓度的最大值可达98%,最小浓度值也在25%以上。从图中还可以看出,注热后抽采阶段煤层气浓度的变化规律为先升高再降低。其中在第74天煤层气浓度达到了峰值,为98%,是气原始抽采阶段的33倍。截止到试验结束时,煤层气浓度依旧保持在35%,为原始抽采阶段的12倍。因此注热可以将煤层气的浓度可以提高10倍以上。

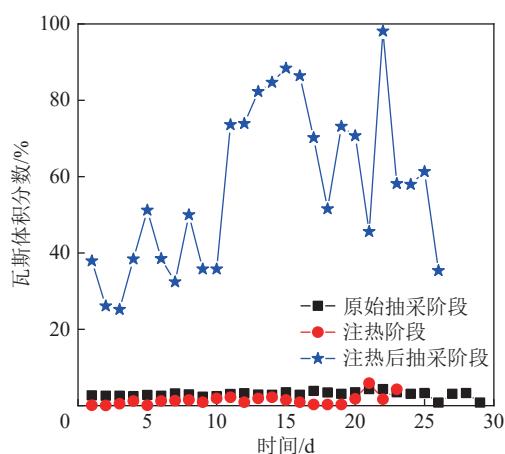


图12 浓度随时间的变化曲线

Fig.12 Variation curve of concentration with time

由注热强化煤层气抽采的能量刺激理论可知,向煤层中注入过热水,不仅可以加热煤层,促进甲烷的解吸,还可以加快煤层气的运移速度,缩短煤层气的抽采时间^[21,28]。在注热过程中,由于过热水的注入,导致煤层气处于高温和高压环境。由式(2)可知,高温促进甲烷的解吸,但高压会抑制甲烷的解吸。所

以,注热阶段甲烷的解吸率和抽采速度都比较低。但在注热后的抽采阶段,由于停止注热,煤储层压力突然降低,此时的煤层气处于高温和低压环境。由式(2)可知,高温和低压都会促进甲烷的解吸。所以,注热后的抽采阶段甲烷的解吸率大幅度提高,煤层气的抽采速度明显加快。综上所述,注热理论不仅可以很好地解释注热过程中煤层气的产出规律,还可以用于指导现场试验。

3.2.4 注热效果评价

注热强化抽采煤层气是一项综合注热成本、经济效益和安全施工等多因素的系统工程,对注热方法的效果进行科学评价是在煤层注热工程中工艺优选、技术优化的关键依据。因此,本文主要以煤层气的日产气量和浓度作为评价指标,对注热强化抽采煤层气的效果进行综合评价。

注热组在进行注热之前,采用的是传统的负压抽采方法,为期29 d,煤层气的累计抽采量为 14.75 m^3 ;然后采用的是注热强化煤层气抽采的方法,为期49 d,煤层气的累积抽采量为 680.56 m^3 。传统负压抽采方法和注热强化抽采方法的平均日产气量和浓度如图13所示。

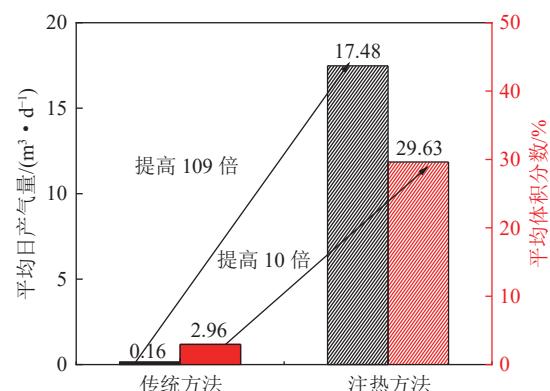


图13 传统方法和注热方法的平均日产气量和平均浓度

Fig.13 Average daily gas production and average concentration of traditional method and heat injection method

从图13可以看出,注热组在采用传统负压抽采方法时的平均日产气量和平均浓度都很低,但是采用注热强化抽采方法后,平均日产气量和平均浓度分别提高了109倍和10倍。不仅如此,从图11和图12可知,采用注热强化抽采方法后,注热组的最大日产气量和最大浓度分别达到了 $123\text{ m}^3/\text{d}$ 和98%。这说明与传统的负压抽采方法相比,注热方法可以强化甲烷解吸,提高煤层气的日产气量和浓度,大大改善煤层气的抽采效果。

此次井下注热试验的结果不仅可以为提高煤层

气采收率提供宝贵的经验,还可以为以后的现场实践提供重要的技术参数。值得注意的是,注热强化煤层气抽采的模拟研究是在实验室条件下进行的,不同的试验条件得到的结果可能会有些许的差异,但是注热能够促进煤层气抽采的结论毫无疑问是正确的。

4 结 论

1) 对不同条件下煤样的解吸率进行了计算,结果表明:注水解吸、自然解吸和注热解吸3种条件下的煤样终态解吸率分别为12%、37%和81%。注水会抑制甲烷的解吸,降低甲烷的解吸速度,减少甲烷的解吸率,而注热可以强化甲烷解吸,提高甲烷的解吸速度,增加甲烷的解吸率。

2) 通过对解吸时间和终态解吸率的分析,结果表明:自然解吸后的注热强化解吸,可以增加46%的解吸率,而注水解吸后的注热强化解吸,可以增加68%的解吸率。这说明注热对于注水后的煤样,具有更好的强化解吸作用。注热不仅可以促进甲烷解吸,还可以解除水锁效应。

3) 现场试验结果表明,注热后抽采阶段是煤层气的高产时间段,其中最大煤层气浓度和最大日均产气量分别为98%和123 m³/d。抽采钻孔中煤层气温度和浓度的变化结果表明注热方法的有效加热半径大于5 m。通过对比注热前后煤层气的抽采效果发现,注热方法可以将煤层气的浓度和日产气量分别提高10倍和100倍,大大缩短了煤层气的抽采时间。

参考文献(References):

- [1] WEI Xiaorong, MASSAROTTO Paul, WANG Geoff, et al. CO₂ sequestration in coals and enhanced coalbed methane recovery: New numerical approach[J]. Fuel, 2010, 89(5): 1110–1118.
- [2] 李菁华,张磊,薛俊华,等.注气驱替中CO₂置换煤体CH₄行为特性[J].煤炭学报,2021,46(S1): 386–396.
LI Jinghua, ZHANG Lei, XUE Junhua, et al. Characteristic of binary gas displacement adsorption on coal in CO₂ – ECBM[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(S1): 386–396.
- [3] RANATHUNGA A S, PERERA M S A, RANJITH P G, et al. An experimental investigation of applicability of CO₂ enhanced coal bed methane recovery to low rank coal[J]. Fuel, 2017, 189(1): 391–399.
- [4] 秦江涛,陈玉涛.低透气性煤层高压水力压裂—冲孔联合增透技术研究及应用[J].矿业安全与环保,2021,48(6): 53–57.
QIN Jiangtao, CHEN Yutao. Research and application of combined antireflection technology of high pressure hydraulic fracturing and punching in low permeability coal seam[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2021, 48(6): 53–57.
- [5] 石晓红,赵立朋,李俊堂,等.复杂构造带低渗高瓦斯煤层水力压裂增透技术[J].矿业安全与环保,2022,49(3): 101–106.
SHI Xiaohong, ZHAO Lipeng, LI Juntang, et al. Antireflection technology of hydraulic fracturing of low permeability and gassy coal seam in complex tectonic belt[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2022, 49(3): 101–106.
- [6] 张福旺,秦汝祥,杨应迪.密集水力冲孔增透抽采瓦斯试验研究[J].煤炭科学技术,2022,50(4): 142–148.
ZHANG Fuwang, QIN Ruxiang, YANG Yingdi. Experimental study on gas extraction with intensive hydraulic punching and penetration enhancement[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(4): 142–148.
- [7] 卢义玉,李瑞,鲜学福,等.地面定向井+水力割缝卸压方法高效开发深部煤层气探讨[J].煤炭学报,2021,46(3): 876–884.
LU Yiyu, LI Rui, XIAN Xuefu, et al. Discussion on the efficient exploitation method of deep coked methane with pressure relief by ground directional well + hydraulic slotting[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(3): 876–884.
- [8] 田伟兵,李爱芬,韩文成.水分对煤层气吸附解吸的影响[J].煤炭学报,2017,42(12): 3196–3202.
TIAN Weibing, LI Aifen, HAN Wencheng. Effect of water content on adsorption/desorption of coalbed methane[J]. Journal of the China Coal Society, 2017, 42(12): 3196–3202.
- [9] LI Xiaowei, ZHAO Dong, ZHANG Chao, et al. Gas desorption characteristics and related mechanism analysis under the action of superheated steam and pressurized water based on an experimental study[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2021, 96: 104268.
- [10] 唐明云,张海路,段三壮,等.基于Langmuir模型温度对煤吸附解吸甲烷影响研究[J].煤炭科学技术,2021,49,(5): 182–189.
TANG Mingyun, ZHANG Hailu, DUAN Sanzhuang, et al. Study on effect of temperature on methane adsorption and desorption in coal based on Langmuir model[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49,(5): 182–189.
- [11] 李惟慷,杨新乐,张永利,等.饱和蒸汽作用下煤体吸附甲烷运移产量规律试验研究[J].煤炭学报,2018,43(5): 1343–1349.
LI Weikang, YANG Xinle, ZHANG Yongli, et al. Experimental study on migration yield law of coal-bed methane under the condition of saturated steam[J]. Journal of the China Coal Society, 2018, 43(5): 1343–1349.
- [12] 张遵国,赵丹,张春华,等.不同温度下软煤等温吸附/解吸特性[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2021,40(6): 510–517.
ZHANG ZUNGUO, ZHAO Dan, ZHANG Chunhua, et al. Isothermal adsorption/desorption characteristics of soft coal at different temperatures[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2021, 40(6): 510–517.
- [13] 杨涛.煤体瓦斯吸附解吸过程温度变化试验研究及机理分析[D].北京:中国矿业大学(北京),2014.
YANG Tao. Experimental study and mechanism analysis on temperature variation during the process of gas adsorption and desorption [D]. Beijing: China University of Mining & Technology,

- Beijing, 2014.
- [14] 任常在, 代元军, 赵龙广. 低渗透煤层气间歇注热试验研究[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.
- [15] 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, ZHANG Chunshan, et al. Numerical simulation of coalbed methane production by heat injection considering steam condensation [J]. Journal of Mining & Safety Engineering. 2022, 39(2): 370–379.
- [16] SALMACHI A, HAGHIGHI M. Feasibility study of thermally enhanced gas recovery of coal seam gas reservoirs using geothermal resources[J]. Energy & Fuels, 2012, 26(7/8): 5048–5059.
- [17] WANG Zhijun, WANG Xiaojuan, MA Xiaotong, et al. Laboratory measurements of methane desorption behavior on coal under different modes of real-time microwave loading [J]. Adsorption, 2020, 26: 61–73.
- [18] 杨新乐, 任常在, 张永利, 等. 低渗透煤层气注热开采热-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.
- [19] TENG Teng, ZHAO Yixin, FENG Gao, et al. A fully coupled thermo-hydro-mechanical model for heat and gas transfer in thermal stimulation enhanced coal seam gas recovery[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 125: 866–875.
- [20] 冯增朝, 周 动, 赵 东. 煤体瓦斯热力学[M]. 北京: 科学出版社, 2022.
- [21] LIANG Weiguo, YAN Jiwei, ZHANG Beining, et al. Review on coal bed methane recovery theory and technology: recent progress and perspectives[J]. Energy & Fuels, 2021, 35(6): 4633–4643.
- [22] 赵阳升. 多孔介质多场耦合作用及其工程响应[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [23] ZHAO Dong, FENG Zengchao, ZHAO Yangsheng. Laboratory experiment on coal-bed-methane desorption influenced by water injection and temperature[J]. Journal of Canadian Petroleum Technology, 2011, 50(7–8): 24–33.
- [24] AIREY E. M. Gas emission from broken coal: an experimental and theoretical investigation[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1968, 5: 475–494.
- [25] 王建美. 煤层气热力开采的气水两相流动机理研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2015.
WANG Jianmei. The mechanism research on gas-liquid two phase flow for thermal exploitation of CBM recovery [D]. Taiyuan : Taiyuan University of Technology, 2015.
- [26] 王苛宇, 周 康, 申哲娜, 等. 超低渗透轻质油藏热水驱油机理研究[J]. 长江大学学报(自科版), 2015, 12(23): 61–66, 6.
WANG Keyu, ZHOU Kang, SHEN Zhengna, et al. Study on mechanism of hot water flooding in ultra-low permeability light oil reservoirs[J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition), 2015, 12(23): 61–66, 6.
- [27] 李义贤. 考虑温度作用下煤层气—水两相流运移规律的研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2009.
LI Yixian. Research on considering temperature influence gas-water two-phase flow migration rule [D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2009.
- [28] ZHAO Dong, LI Dayuan, MA Yulin, et al. Experimental study on methane desorption from lumpy coal under the action of hydraulic and thermal[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2018: 1–10.