

中文引用格式:白刚,张海晶,苏俊,等. 电厂烟气注气压力对煤层吸附态瓦斯解吸效率的影响[J]. 中国安全科学学报, 2025, 35(5): 91-98.

英文引用格式:BAI Gang, ZHANG Haijing, SU Jun, et al. Influence law of power plant flue gas injection pressure on desorption efficiency of adsorbed state gas in coal beds [J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(5): 91-98.

电厂烟气注气压力对煤层吸附态瓦斯 解吸效率的影响^{*}

白刚^{1,2,3}教授, 张海晶², 苏俊¹, 梁晗²讲师, 张潇文¹讲师, 刘正东⁴副教授
(1 辽宁工程技术大学 安全科学与工程学院, 辽宁 葫芦岛 125105; 2 辽宁工程技术大学 矿业学院,
辽宁 阜新 123000; 3 辽宁工程技术大学 鄂尔多斯研究院, 内蒙古 鄂尔多斯 017004;
4 东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

中图分类号:X936

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.05.1581

基金项目:国家自然科学基金资助(52274204); 中国科协青年人才托举工程项目(2022QNRC001); 辽宁省自然科学基金优秀青年基金资助(2024JH3/10200042)。

【摘要】 为探究电厂烟气注气压力对煤层吸附态瓦斯解吸效率的影响特性, 采用核磁共振(NMR)技术定量研究不同电厂烟气注气压力下煤层CH₄竞争吸附的动态变化过程, 得到烟气注气压力对甲烷解吸量、解吸效率和单位时间回收效率的影响特征。试验结果表明:无烟煤吸附CH₄时, T₂谱呈现双峰特征, 随着时间增加, 吸附态CH₄的T₂谱峰值增加, 游离态CH₄的T₂谱峰值降低, 随着时间增加, 煤对CH₄的吸附速率变缓; 电厂烟气与煤中CH₄竞争吸附过程中, T₂谱呈现3峰特征, 随着时间推移, 吸附态CH₄的T₂谱峰降低, 游离态CH₄的T₂谱峰增加, 吸附态、游离态T₂谱积分与吸附时间呈现指数函数变化, 与电厂烟气注气压力呈现线性函数变化; 电厂烟气注气压力与CH₄解吸效率呈现线性增长, 其中, 注3.5 MPa电厂烟气较1.5 MPa对样品罐中煤样吸附CH₄的总解吸量增加0.016 mol, 单位时间回收效率提高3.440%, 总解吸效率提升20.631%。

【关键词】 电厂烟气; 注气压力; 吸附态瓦斯; 解吸效率; 核磁共振(NMR); 竞争吸附

Influence law of power plant flue gas injection pressure on desorption efficiency of adsorbed state gas in coal beds

BAI Gang^{1,2,3}, ZHANG Haijing², SU Jun¹, LIANG Han², ZHANG Xiaowen¹, LIU Zhengdong⁴

(1 College of Safety Science & Engineering, Liaoning Technical University, Huludao Liaoning 125105, China; 2 College of Mining, Liaoning Technical University, Fuxin Liaoning 123000, China;

3 Ordos Research Institute, Liaoning Technical University, Ordos Inner Mongolia 017004, China;

4 School of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang Liaoning 110819, China)

Abstract: In order to explore the effect of gas injection pressure of power plant on the adsorption gas desorption efficiency of coal seam, NMR technology was used to quantitatively study the dynamic change process of CH₄ competitive adsorption under different gas injection pressure of power plant. The influence law of gas injection pressure on methane desorption, desorption efficiency and unit time recovery efficiency

was obtained. The experimental results show that when anthracite coal adsorbs CH_4 , the T_2 spectrum shows a bimodal characteristic. As time increases, the peak of T_2 spectrum of adsorbed CH_4 increases, while the peak of T_2 spectrum of free CH_4 decreases. With the increase of time, the adsorption rate of CH_4 by coal slows down. During the competitive adsorption process of power plant flue gas and CH_4 from coal, the T_2 spectrum exhibits three-peaks characteristics. As time progresses, the T_2 spectrum peaks of adsorbed CH_4 decreases, while the T_2 spectrum peaks of free CH_4 increases. The integrals of adsorbed and free T_2 spectra show an exponential function with the adsorption time, and a linear function with the pressure of flue gas injection in the power plant. The power plant flue gas injection pressure shows a linear increase with CH_4 desorption efficiency. The injection of 3.5 MPa power plant flue gas increases the total desorption of adsorbed CH_4 from coal samples in the sample tank by 0.016 mol, enhances the recovery efficiency per unit time by 3.440%, and increases the total desorption efficiency by 20.631%, compared to 1.5 MPa.

Keywords: power plant flue gas; injection pressure; adsorbed gas; desorption efficiency; nuclear magnetic resonance(NMR); competitive adsorption

0 引言

我国煤层气资源丰富,但因普遍埋藏深,渗透率低,使我国煤层气采收率低。注气增产煤层气技术能显著提高煤层气采收率,其中,注电厂烟气提高煤层气采收率技术以兼具安全、环保和经济价值成为研究重点。而电厂烟气注气压力是影响瓦斯解吸效率的一个重要因素,因此,揭示电厂烟气注气压力,对瓦斯解吸效率的作用机制具有重要意义。

随着注气增产煤层气技术的不断完善,研究发现,注 CO_2 提高煤层气采收率技术会增加煤与 CO_2 突出的危险性^[1]。注 N_2 提高煤层气采收率技术会导致 CH_4 产量下降^[2]。注 CO_2/N_2 混合气体会增加气体捕集和分离成本^[3]。而将电厂烟气注入煤层在增产煤层气同时封存 CO_2 , 不仅可实现资源利用与 CO_2 封存,还可有效降低气体捕集成本。在注入电厂烟气以提高煤层气采收率技术研究中,金智新等^[4]通过数值模拟研究发现, CO_2/N_2 和 CO_2/O_2 的吸附选择性随烟气比例的增加逐渐降低。MAZUMDER 等^[5]研究发现,在干煤和湿煤中 CO_2 吸附能力最强。通过高压使烟气吸附在煤上,可以从烟气中剥离出 CO_2 。赵宇新^[6]研究发现,煤对 CO_2 的吸附量显著高于 N_2 。高飞等^[7]研究证明,注电厂烟气能实现 CO_2 封存。MAZUMDER^[5]、WU Siyuan^[8-9]、李成兵^[10]等研究发现,煤对气体的吸附量随温度和含水量的增加而减少,注入烟气比注入 CO_2 更有利于 CH_4 的解吸。HASSANPOURYOUBAND 等^[11]研究证明,将电厂烟气直接注入永久冻土层水合物储层用于 CH_4 回收和二氧化碳地质捕集及封存具有

经济可行性。MU Yongliang 等^[12]通过数值模型研究发现,在注入电厂烟气提高煤层气采收率技术的应用过程中,煤基体膨胀和应力增加导致煤体渗透率初期降低,而 N_2 诱导的吸附 CH_4 解吸占主导地位,显著提高煤体渗透率。上述研究主要从多场耦合数学模型构建及其仿真模拟、气体竞争吸附分子动力学模拟等方面开展,但构建的热-流-固多场耦合模型中忽略了电厂烟气中含有 4%~6% 的 O_2 对煤层瓦斯运移特性的影响,同时,注气压力是影响煤层注气置换瓦斯效率的一个关键因素^[13],关于注气压力对电厂烟气与煤中 CH_4 竞争吸附过程中 CH_4 动态演化特征的影响鲜有报道。

因此,笔者采用低场核磁共振(Nuclear Magnetic Resonance,NMR)技术研究电厂烟气注气压力对煤中 CH_4 解吸效率的影响机制,得到电厂烟气与煤中 CH_4 的竞争吸附特性,定量计算煤中 CH_4 与不同注气压力下的电厂烟气在竞争吸附过程中对 CH_4 的解吸量及解吸效率,以期评估不同电厂烟气注气压力对 CH_4 的解吸效果。

1 NMR 原理

低场 NMR 技术是在外部磁场强度改变时含有¹H 的流体自旋磁矩发生变化进而产生 NMR 信号。这些信号通过测量横向弛豫时间(T_2)进行表征。横向弛豫时间包括自由弛豫、表面弛豫和扩散弛豫^[14]。煤中孔隙流体 3 种不同的弛豫机制对 T_2 谱的贡献不同,自由弛豫与扩散弛豫的贡献均远小于表面弛豫项。因此,横向弛豫时间 T_2 可近似表示为^[15]:

$$\frac{1}{T_2} \approx \frac{1}{T_2^b} = \rho_2 \left(\frac{S}{V} \right) = F_s \frac{\rho_2}{r_c} \quad (1)$$

式中: T_2 为横向弛豫时间,ms; T_2^b 为表面横向弛豫时间,ms; ρ_2 为表面弛豫率, $\mu\text{m}/\text{ms}$; S 为孔隙的面积, μm^2 ; V 为孔隙体积, μm^3 ; F_s 为孔隙几何形状因子,无量纲; r_c 为煤岩试件孔隙半径, μm 。

低场 NMR 技术检测的是煤孔裂隙中 CH_4 的 ^1H ,NMR 信号强度与煤吸附的 ^1H 核数成正比,NMR 信号强度越高,煤吸附的 CH_4 量越大, T_2 谱峰越高。对 T_2 谱纵坐标信号幅度进行积分可以表示煤孔隙中 CH_4 的量^[16]。

2 不同烟气压力解吸煤中 CH_4 试验

2.1 试验样品制备

试验煤样选用阳泉五矿无烟煤,将煤样用保鲜膜包裹后用密封袋封存送至实验室,在实验室内取出煤样将其砸成小块后放入磨煤机进行粉碎,用筛网筛选出 60~80 目的煤样,并在 110℃ 的真空干燥箱中干燥 10 h,去除水分对核磁信号的干扰,待煤样冷却后用密封袋封存备用。

2.2 不同烟气压力下 CH_4 解吸效率的测定流程

试验主要涉及试验前对游离态 CH_4 的标定、无烟煤对 CH_4 的吸附试验和电厂烟气与 CH_4 的竞争吸附试验 3 部分,具体试验流程如下:

1) 游离态 CH_4 的标定。①注入惰性气体检测整个试验系统的气密性;②检测良好后连接抽真空系统对整个系统在真空度为 -0.1 MPa 下连续脱气 1 h,并采集真空条件下空样品罐的基底数据;③注入不同压力的 CH_4 气体,待所需试验压力的数字平稳后进行数据采集, CH_4 注气压力分别为 0.5、1.3、2.1、2.9、3.5、4.5、5.5 MPa。

2) 煤吸附 CH_4 试验。①将煤样放入样品腔内,在真空度 -0.1 MPa 下连续脱气 1 h,脱气结束后,采集样品腔内煤样基底数据;②向样品罐内注入 1.0 MPa 的 CH_4 ,每 1 h 采集煤样的核磁信号,直至相邻 2 次数据基本一致为止,记录吸附平衡压力。

3) 电厂烟气与煤中 CH_4 竞争吸附试验。① CH_4 在 1.0 MPa 下达到吸附平衡后,排出管道内的 CH_4 气体,并用烟气对管道进行 2~3 次洗气;②烟气注气压力设置为 1.5 MPa,每 1 h 采集煤样核磁信号;③数据采集结束后,记录吸附平衡压力,排出试验气体,结束竞争吸附试验。

不同烟气注气压力下烟气与煤中 CH_4 竞争吸

附的试验流程与上述流程相似,只需将烟气注气压力依次变化为 2.0、2.5、3.0、3.5 MPa 即可。

3 注气压力对煤层吸附态瓦斯解吸效率的影响

3.1 游离态 CH_4 标线方程

对不同压力下 CH_4 的 T_2 谱信号幅度积分,再将得到的 T_2 谱振幅积分与对应压力下计算得到的 CH_4 物质的量进行拟合,得到二者的函数关系,建立 T_2 谱振幅积分与 CH_4 物质的量的转换方程,实现对游离态 CH_4 的标定^[17]。

不同 CH_4 注气压力下空样品罐中 CH_4 的 T_2 谱如图 1 所示。由图 1 可知:向空样品罐中注入不同压力的 CH_4 时,其 T_2 谱整体上呈现单峰结构。说明 CH_4 气体在样品罐中的存在形式是单一的,由于没有样品的填充,可以推出 CH_4 气体的存在形式为游离态。随着空样品罐内 CH_4 注入压力的增加, T_2 谱逐渐向右移动。这是因为随着 CH_4 注入压力的增加, CH_4 分子间自旋运动受到抑制, CH_4 弛豫速率降低,致使 T_2 弛豫时间增加。 CH_4 平均自由程随压力的增加逐渐减小,弛豫时间增大。

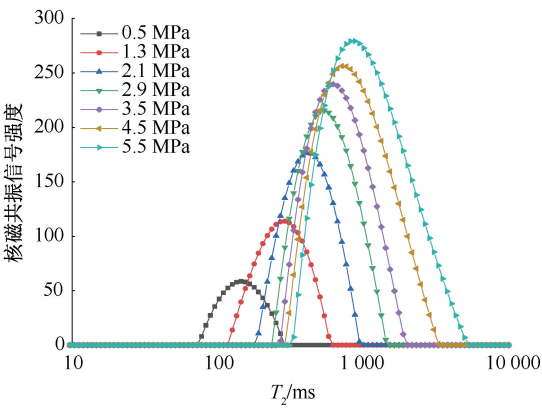


图 1 不同压力下游离态 CH_4 的 T_2 谱
Fig. 1 T_2 spectrum of free state CH_4 under different pressures

计算不同压力下 CH_4 物质的量前需要计算不同压力下 CH_4 的体积分数。试验中样品罐的体积为 33.457 cm^3 ,试验环境温度为 32℃。标准状况下样品罐内不同 CH_4 压力对应的体积分数计算公式为^[18]:

$$C = \left(\frac{M}{22.4} \right) \times \left[\frac{273.15}{273.15 + h} \right] \times 1 \times \frac{P \times 10^6}{101\,325} \quad (2)$$

式中: M 为试验气体摩尔质量, g/mol ; h 为试验环境温度,℃; P 为试验气体压力,MPa。

得到不同压力下 CH_4 体积分数后,进一步根据样品罐体积和 CH_4 体积分数等计算出不同压力下 CH_4 质量和物质的量,并将计算得到的不同压力下 CH_4 物质的量与不同压力的游离态 CH_4 的 T_2 谱振幅积分进行拟合,如图 2 所示。

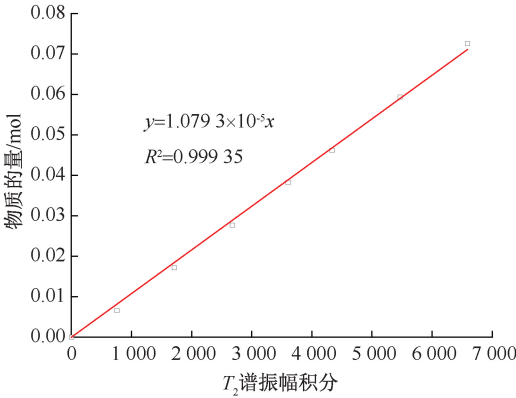


图 2 游离态 CH_4 的 T_2 谱振幅积分与 CH_4 物质的量的拟合关系

Fig. 2 Fitting relationship between the integral of T_2 spectrum amplitude of free state CH_4 and the molar amount of CH_4

由图 2 可知:游离态 CH_4 的 T_2 谱振幅积分和 CH_4 物质的量呈线性增长趋势,其方程式见下式:

$$N_B = 1.0793 \times 10^{-5} T_B \quad (3)$$

式中: N_B 为 CH_4 物质的量, mol; T_B 为 CH_4 的 T_2 谱振幅积分。

3.2 煤吸附 CH_4 的 T_2 谱特征

为探究煤吸附 CH_4 过程中吸附态、游离态 CH_4 随时间的变化特征,注 1 MPa CH_4 进行 CH_4 的吸附试验。不同时刻煤吸附 CH_4 核磁共振 T_2 谱如图 3 所示。

由图 3 可知:煤吸附 CH_4 的 T_2 谱均呈现出明显的双峰特征,谱峰主要分布在 0.1~3 ms 和 11~253 ms 等 2 个范围区间内。由于 CH_4 在干燥煤样中主要以吸附态和游离态 2 种形式存在,根据核磁共振测试原理,短弛豫时间对应表征煤的中小孔隙内的流体^[17],因此, T_2 谱峰从左到右依次表示吸附态 CH_4 (P_1 峰)和游离态 CH_4 (P_2 峰)。0~6 h 内 P_1 峰逐渐增大, P_2 峰逐渐降低,具体表现为从 0~6 h 吸附态 T_2 谱振幅积分分别为 4 693.431、5 416.632、5 607.907、6 165.857、6 836.802、7 215.579 和 7 457.984。游离态 T_2 谱振幅积分主要从 0 h 的 5854.458 降低至 6 h 的 3849.702,说明游离态甲烷逐渐转变为吸附态。而在 0~1 h 内, P_2 峰明显左

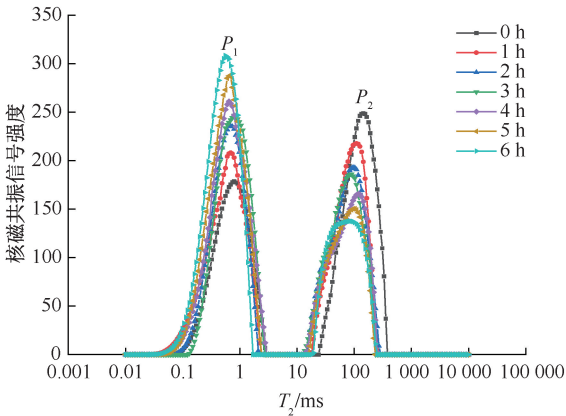


图 3 无烟煤吸附 CH_4 的 T_2 谱

Fig. 3 CH_4 T_2 spectrum of anthracite adsorption

移,同时 P_1 峰增高, P_2 峰降低,说明游离态 CH_4 在迅速向吸附态转化。但随着时间增加, P_2 峰所在区间变化不明显,说明游离态 CH_4 向吸附态转变的趋势变缓。这主要是由于煤中赋含的孔隙数量与吸附位点有限,吸附初期,裂隙与微小孔隙中 CH_4 的体积分数差较大, CH_4 的扩散速率较快,且吸附位点较多,所以吸附速率快。随着吸附的进行,裂隙与微小孔隙中 CH_4 的体积分数差逐渐减小, CH_4 的扩散速率降低,且煤中的优先吸附位点被占据,煤对 CH_4 的吸附转向次吸附位点,因此,煤对 CH_4 的吸附能力逐渐降低,最终,煤中的吸附位点将达到饱和状态,煤吸附 CH_4 将达到吸附平衡。

3.3 电厂烟气与 CH_4 竞争吸附的时间效应

煤在 CH_4 注气压力为 1.0 MPa 下达到吸附平衡,平衡时系统压力为 0.6 MPa,向煤中注入 1.5 MPa 电厂烟气,探究电厂烟气与 CH_4 竞争吸附的时间效应。电厂烟气与煤中 CH_4 竞争吸附 T_2 谱如图 4 所示。

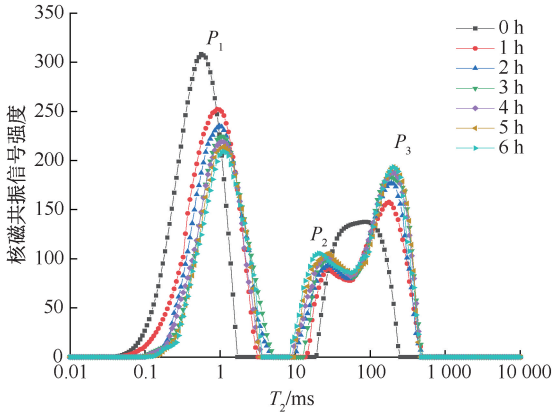


图 4 1.5 MPa 烟气与 CH_4 竞争吸附 T_2 谱

Fig. 4 1.5 MPa flue gas competes with CH_4 for adsorption T_2 spectra

图 4 中,0 h 的 T_2 谱为煤在 1.0 MPa 下吸附 CH_4 达到平衡时的 T_2 谱。此时 T_2 谱呈双峰分布,注入电厂烟气后,在电厂烟气与 CH_4 的竞争吸附作用下 T_2 谱呈现出 3 峰的分布特征。从左到右依次为吸附在微小孔隙中的吸附态 CH_4 (P_1 峰)、煤颗粒间的游离态 CH_4 (P_2 峰)和样品罐自由空间的游离态 CH_4 (P_3 峰)^[19]。文中将煤中 CH_4 按照相态类型分为吸附态 CH_4 (P_1 峰)和游离态 CH_4 (P_2 与 P_3 峰)。气体间的竞争吸附会改变 T_2 谱中吸附峰和游离峰的形态^[17]。电厂烟气主要由 79% N_2 、4.5% O_2 和 16.5% CO_2 构成,这些气体分子具有较强的吸附能力,极易与煤发生相互作用并取代一部分原来吸附在煤中的 CH_4 ,导致这些 CH_4 从微小孔隙中解吸,进入到较大的孔隙或裂隙中,使 CH_4 在孔隙中的分布状态发生变化,进而使 T_2 谱形态发生改变。由图 4 可知:随着电厂烟气注入后混合体系竞争吸附时间增加,吸附峰逐渐降低,从 0 h 的 7 457.984 降低至 6 h 的 4 816.17,降低了 35.423%。游离态峰逐渐增高,从 0 h 的 3 849.702 增加至 6 h 的 6 124.485,增加了 59.090%,游离峰形右移,说明电厂烟气与煤中 CH_4 的竞争吸附促使煤中的吸附态 CH_4 迅速转变为游离态。另外,孔隙间的连通性是决定煤中 CH_4 运移难易水平的关键因素^[20]。核磁共振 T_2 谱峰之间的连续性反映了煤样孔隙之间的连通性^[21-22]。若 T_2 谱峰间存在孔径分布为零的现象,说明对应孔隙间连通性不好,零值对应的弛豫时间差越大,其连通性越差^[23]。煤孔隙间的连通性越好,越有利于电厂烟气进入煤的微小孔中解吸出 CH_4 ^[24]。随着时间的增长,与 0 h 的 T_2 谱相比,吸附峰逐渐向右移动,与游离峰之间的界限变小,说明注入电厂烟气增加了煤孔隙间的连通性。

为了更清晰地反映 1.5 MPa 电厂烟气与 CH_4 竞争吸附过程中吸附态和游离态 CH_4 随时间的变化情况,文中根据 NMR 测试原理中游离态 CH_4 的增加量变化来自于吸附态 CH_4 的减少量,即相邻时间的游离态振幅积分增加量对应的 CH_4 物质的量必然等于吸附态振幅积分减少量对应的 CH_4 物质的量^[17]。进一步将吸附态 CH_4 振幅积分的变化量与 CH_4 物质的量的变化量进行拟合,可以得到吸附态 CH_4 振幅积分与 CH_4 物质的量的拟合关系,如图 5 所示。

由图 5 可知:吸附态 CH_4 的 T_2 谱振幅积分与物质的量的转化关系见下式:

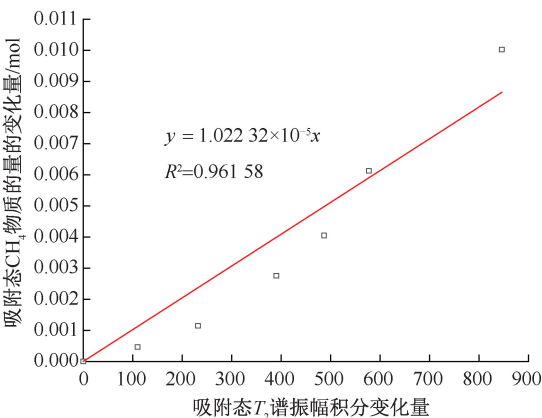


图 5 吸附态 CH_4 的 T_2 谱振幅积分与 CH_4 物质的量的拟合关系

Fig. 5 Fitting relationship between the amplitude integral of T_2 spectrum of adsorbed state CH_4 and molar amount of CH_4

$$N_{P_1} = 1.022\ 32 \times 10^{-5} T_A \quad (4)$$

式中: N_{P_1} 为吸附态 CH_4 物质的量, mol; T_A 为吸附态 CH_4 的 T_2 谱振幅积分。

1.5 MPa 下电厂烟气与煤中 CH_4 竞争吸附过程中吸附态和游离态 CH_4 物质的量与时间的变化关系如图 6 所示。

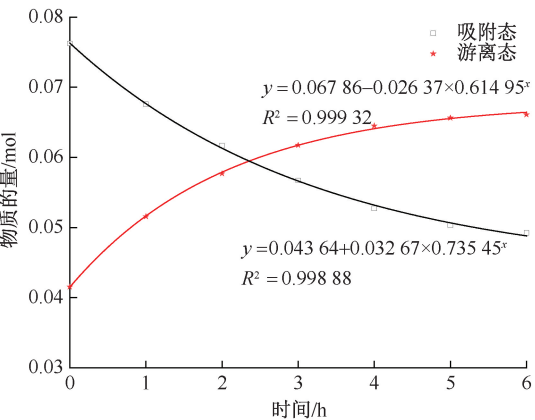


图 6 1.5 MPa 电厂烟气与 CH_4 竞争吸附中吸附态、游离态 CH_4 随时间的变化特征

Fig. 6 Variation characteristics of adsorbed and free state CH_4 over time during competitive adsorption with 1.5 MPa power plant flue gas

由图 6 可知:0~6 h 电厂烟气与煤中 CH_4 竞争吸附过程中,吸附态 CH_4 随时间的增加呈现出指数函数降低趋势,其物质的量分别为 0.076、0.068、0.062、0.057、0.053、0.050、0.049 mol,相邻时间段内吸附态 CH_4 减少率分别为 11.346%、8.730%、8.067%、7.034%、4.495%、2.225%。而游离态 CH_4

随着时间的增加呈现出指数函数增加趋势。0~6 h 内电厂烟气注气压力 1.5 MPa 时样品罐中煤样吸附 CH₄ 的总解吸量为 0.027 mol。说明注入电厂烟气能够增大煤中 CH₄ 的解吸量,随着时间的增加,电厂烟气与 CH₄ 竞争吸附过程中吸附态 CH₄ 的减少速率逐渐变缓。

3.4 电厂烟气注气压力对竞争吸附的影响

在煤吸附 1.0 MPaCH₄ 吸附平衡后,系统压力变为 0.6 MPa,在此基础上开展不同电厂烟气注气压力下烟气与煤中 CH₄ 竞争吸附试验。不同电厂烟气注气压力下电厂烟气与煤中 CH₄ 竞争吸附 T₂ 谱如图 7 所示。由图 7 可知:随着电厂烟气注气压力增大,吸附峰明显降低,游离峰明显增加。具体表现为吸附态 CH₄ 的 T₂ 谱振幅积分由 1.5 MPa 的 4 816.17 降低至 3.5 MPa 的 3 277.484,3.5 MPa 下吸附态 CH₄ 较 1.5 MPa 下的吸附态 CH₄ 减少 31.95%。游离态 CH₄ 的 T₂ 谱振幅积分由 1.5 MPa 的 6 124.485 增加至 3.5 MPa 的 7 560.750,3.5 MPa 下的游离态 CH₄ 较 1.5 MPa 下的游离态 CH₄ 增加 23.451%。吸附峰区间和游离峰区间均表现出增大趋势,T₂ 谱吸附峰与游离峰之间的界限变小。说明增大电厂烟气注气压力会在不同程度上增加孔径间的连通性,有助于更多的吸附态 CH₄ 向游离态 CH₄ 转变。这是因为增加电厂烟气注气压力会提高气体的扩散速率,增强烟气中强吸附性气体的竞争吸附能力,加速煤中 CH₄ 解吸。而吸附态减少量与游离态增加量不一致是因为 CH₄ 在煤中的解吸过程存在滞后效应,吸附态 CH₄ 减少,游离态 CH₄ 并不会立即反映出相应的变化,尤其是在短时间内。这种滞后效应使游离态 CH₄ 的增加量少于吸附态 CH₄ 的减少量。但利用核磁共振原理定量表征 CH₄ 解吸量是合理的,因为试验中 CH₄ 总量基本不变。

电厂烟气注气压力在 1.5~3.5 MPa 内每 0.5 MPa 下吸附态、游离态 CH₄ 物质的量与电厂烟气注气压力的变化情况如图 8 所示。由图 8 可知:吸附态 CH₄ 与电厂烟气注气压力呈现出线性降低趋势,1.5~3.5 MPa 下吸附态 CH₄ 物质的量分别为 0.076、0.049、0.046、0.041、0.037、0.034 mol。游离态 CH₄ 与电厂烟气注气压力呈现出线性增长趋势,其物质的量分别为 0.042、0.066、0.069、0.072、0.074、0.082 mol。与样品罐中煤吸附 CH₄ 达到吸附平衡时 CH₄ 的总吸附量相比,注 1.5~3.5 MPa 电厂烟气对样品罐内煤样吸附 CH₄ 的总解吸量分别

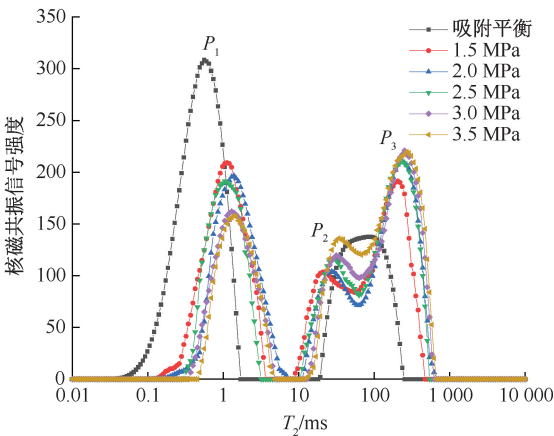


图 7 不同压力电厂烟气与 CH₄ 竞争吸附 T₂ 谱

Fig. 7 Flue gas from power plants with different pressures competes with CH₄ for adsorption T₂ spectra

为 0.027、0.030、0.035、0.039、0.043 mol,注 3.5 MPa 电厂烟气相较于 1.5 MPa 对样品罐内煤吸附 CH₄ 的总解吸量增加了 59.259%。这进一步说明增加电厂烟气注气压力能促进吸附态 CH₄ 向游离态转变,加快 CH₄ 解吸效率。

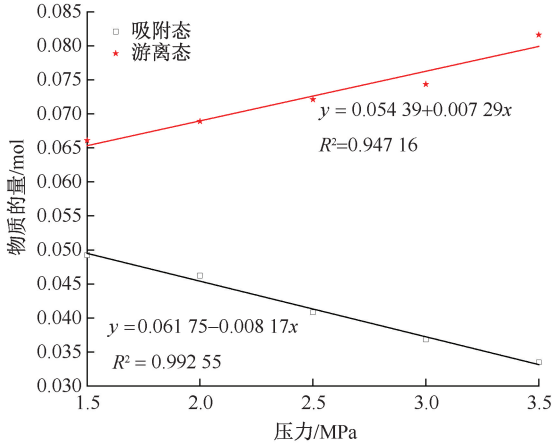


图 8 气体竞争吸附中吸附态、游离态 CH₄ 随压力变化特征

Fig. 8 Pressure variation characteristics of adsorbed and free state CH₄ during gas competitive adsorption

3.5 电厂烟气对煤中 CH₄ 解吸效率的影响

为更加清晰地反映电厂烟气注气压力对煤中 CH₄ 解吸效率的影响,文中定量计算不同电厂烟气注气压力下,电厂烟气对煤中 CH₄ 的解吸效率和单位时间回收效率,公式如下:

$$\eta = \frac{Q_0 - Q_1}{Q_0} \tag{5}$$

$$R_t = \frac{\eta}{t} \tag{6}$$

式中: Q_0 为初始煤对 CH_4 的吸附量, mol; Q_1 为最终煤对 CH_4 的吸附量, mol; η 为解吸效率, %; R_t 为单位时间回收效率, %; t 为时间, h。

通过计算得到电厂烟气注气压力由 1.5~3.5 MPa CH_4 解吸效率分别为 35.423%、39.368%、46.444%、51.666%、56.054%, 单位时间回收效率分别为 5.9%、6.6%、7.7%、8.6%、9.3%。在 3.5 MPa 注气压力下, 电厂烟气对煤中 CH_4 的单位时间回收效率较 1.5 MPa 下提高 3.440%, 而总解吸效率提升 20.631%。说明电厂烟气注气压力越大, CH_4 解吸量越大, 解吸效果越好。证明增大电厂烟气注气压力可以提高煤层气采收率。

4 结 论

1) 无烟煤吸附 CH_4 核磁共振 T_2 谱呈双峰分布, 吸附过程中游离态 CH_4 逐渐转变为吸附态 CH_4 , 因煤中吸附位点有限, 煤对甲烷的吸附速率逐渐降低直至吸附平衡。

2) 注电厂烟气能促进煤中吸附态甲烷解吸为游离态 CH_4 , 解吸速率随时间的增加逐渐变缓。电厂烟气与煤中 CH_4 竞争吸附会改变 T_2 谱峰形并增加煤孔隙间的连通性。

3) 增加电厂烟气注气压力有助于提高 CH_4 的解吸量、解吸效率和单位时间回收效率, 并在不同程度上扩大了煤孔隙间的连通性。

参 考 文 献

- [1] 刘峻麟. 低渗煤层 CO_2 -ECBM 过程气体吸附解吸-扩散-渗流特征及煤岩物性响应机理[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2023.
LIU Junlin. Characteristics of gas adsorption-desorption-diffusion-seepage and response mechanism of petrophysical properties in low permeability coal during CO_2 -ECBM process [D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2023.
- [2] LIU He, LI Zhenbao, WANG Hu, et al. Numerical simulation investigation of N_2 injection for enhanced coalbed methane recovery [J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2024; DOI: 10.1007/s13369-024-09123-1.
- [3] ZHANG Hongyang, DIAO Rui, MOSTOFI M, et al. Molecular simulation of enhanced CH_4 recovery and CO_2 storage by CO_2 - N_2 mixture injection in deformable organic micropores [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2020, 84; DOI: 10.1016/j.jngse.2020.103658.
- [4] 金智新, 武司苑, 邓存宝, 等. 不同浓度烟气在煤中的竞争吸附行为及机理[J]. 煤炭学报, 2017, 42(5): 1 201-1 206.
JIN Zhixin, WU Siyuan, DENG Cunbao, et al. Competitive adsorption behavior and mechanism of different flue gas proportions in coal [J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(5): 1 201-1 206.
- [5] MAZUMDER S, VAN HEMERT P, BUSCH A, et al. Flue gas and pure CO_2 sorption properties of coal: a comparative study [J]. International Journal of Coal Geology, 2006, 67(4): 267-279.
- [6] 赵宇新. 离柳矿区煤对电厂烟气吸附特性试验研究[J]. 同煤科技, 2022(3): 29-33, 36.
- [7] 高飞, 邓存宝, 王雪峰, 等. 电厂烟气注入采空区封存的可行性[J]. 环境科学研究, 2016, 29(7): 1 096-1 100.
GAO Fei, DENG Cunbao, WANG Xuefeng, et al. Feasibility analysis on seal of power plant smoke injected in to the goaf [J]. Research of Environmental Sciences, 2016, 29(7): 1 096-1 100.
- [8] WU Siyuan, JIN Zhixin, DENG Cunbao. Molecular simulation of coal-fired plant flue gas competitive adsorption and diffusion on coal [J]. Fuel, 2019, 239: 87-96.
- [9] WU Siyuan, DENG Cunbao, WANG Xuefeng. Molecular simulation of flue gas and CH_4 competitive adsorption in dry and wet coal [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2019, 71; DOI: 10.1016/j.jngse.2019.102980.
- [10] 李成兵. $\text{N}_2/\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ 抑制甲烷爆炸化学动力学机理分析[J]. 中国安全科学学报, 2010, 20(8): 88-92.
LI Chengbing. Chemical kinetic mechanism analysis of $\text{N}_2/\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ suppressing methane explosion [J]. China Safety Science Journal, 2010, 20(8): 88-92.
- [11] HASSANPOURYOUBAND A, YANG Jinhai, OKWANANKE A, et al. An experimental investigation on the kinetics of integrated methane recovery and CO_2 sequestration by injection of flue gas into permafrost methane hydrate reservoirs [J]. Scientific Reports, 2019, 9(1): DOI: 10.1038/s41598-019-52745-x.
- [12] MU Yongliang, FAN Yongpeng, WANG Jiren, et al. Numerical study on injection of flue gas as a heat carrier into coal

- reservoir to enhance CBM recovery [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2019, 72: DOI: 10.1016/j.jngse.2019.103017.
- [13] 杨宏民, 梁龙辉, 冯朝阳, 等. 注气压力对不同注源气体置驱效应的影响[J]. 中国安全科学学报, 2017, 27(9): 122-128.
- YANG Hongmin, LIANG Longhui, FENG Zhaoyang, et al. Study on influence of injection pressure on replacement effect for different injection gases [J]. China Safety Science Journal, 2017, 27(9): 122-128.
- [14] ZHAO Guang, WANG Chen. Influence of CO₂ on the adsorption of CH₄ on shale using low-field nuclear magnetic resonance technique [J]. Fuel, 2019, 238: 51-58.
- [15] 翟成, 孙勇, 范宜仁, 等. 低场核磁共振技术在煤孔隙结构精准表征中的应用与展望[J]. 煤炭学报, 2022, 47(2): 828-848.
- ZHAI Cheng, SUN Yong, FAN Yiren, et al. Application and prospect of low-field nuclear magnetic resonance technology in accurate characterization of coal pore structure [J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(2): 828-848.
- [16] 韩光, 李东芳, 常利强, 等. 基于核磁共振技术不同煤样吸附 CH₄ 实验研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2021, 17(1): 143-148.
- HAN Guang, LI Dongfang, CHANG Liqiang, et al. Experimental research on CH₄ adsorption of different coal samples based on NMR technology [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2021, 17(1): 143-148.
- [17] 罗明坤, 李胜, 荣海, 等. CH₄ 与 N₂, CO₂ 间竞争吸附关系的核磁共振实验研究[J]. 煤炭学报, 2018, 43(2): 490-497.
- LUO Mingkun, LI Sheng, RONG Hai, et al. Experimental study on competitive adsorption relationship between CH₄ and N₂, CO₂ by NMR [J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(2): 490-497.
- [18] YAO Yanbin, LIU Dameng, XIE Songbin. Quantitative characterization of methane adsorption on coal using a low-field NMR relaxation method [J]. International Journal of Coal Geology, 2014, 131: 32-40.
- [19] ZHOU Guangzhao, DUAN Xianggang, ZHANG Jin, et al. Investigation of CH₄/CO₂ competitive adsorption-desorption mechanisms for enhanced shale gas production and carbon sequestration using nuclear magnetic resonance [J]. Energy, 2023, 278: DOI: 10.1016/j.energy.2023.127964.
- [20] ZHAO Yu, WANG Chaolin, LIN Ning, et al. Pore and fracture development in coal under stress conditions based on nuclear magnetic resonance and fractal theory [J]. Fuel, 2022, 309: DOI: 10.1016/j.fuel.2021.122112.
- [21] SUN Xiaoxiao, YAO Yanbin, LIU Dameng, et al. Interactions and exchange of CO₂ and H₂O in coals: an investigation by low-field NMR relaxation [J]. Scientific Reports, 2016, 6(1): DOI: 10.1038/srep19919.
- [22] LI Xiangchen, KANG Yili, HAGHIGHI M. Investigation of pore size distributions of coals with different structures by nuclear magnetic resonance (NMR) and mercury intrusion porosimetry (MIP) [J]. Measurement, 2018, 116: 122-128.
- [23] 杨明, 柳磊, 张学博, 等. 不同阶煤孔隙结构与流体特性的核磁共振试验研究[J]. 中国安全科学学报, 2021, 31(1): 81-88.
- YANG Ming, LIU Lei, ZHANG Xuebo, et al. Nuclear magnetic resonance experimental study on pore structure and fluid characteristics of coal at different ranks [J]. China Safety Science Journal, 2021, 31(1): 81-88.
- [24] BAI Gang, ZHOU Zhongjie, LI Xueming, et al. Quantitative analysis of carbon dioxide replacement of adsorbed methane in different coal ranks using low-field NMR technique [J]. Fuel, 2022, 326: DOI: 10.1016/j.fuel.2022.124980.



作者简介: 白刚 (1991—),男,安徽灵璧人,博士,教授,博士生导师,主要从事矿井瓦斯与火灾防治等方面的研究。E-mail: baigang_1992@163.com。