



煤层井下低温取心过程瓦斯损失量推算模拟试验

王龙 邓志亮 王兆丰 刘军 胡龙生 王新丰

引用本文:

王龙, 邓志亮, 王兆丰, 等. 煤层井下低温取心过程瓦斯损失量推算模拟试验[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(5): 174–185.
WANG Long, DENG Zhiliang, WANG Zhaofeng. Simulated test of gas loss calculation during the freezing coring process in underground coal seam[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(5): 174–185.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2024-0307>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

瓦斯含量测定中取心管管壁温度变化特性研究

Study on characteristics of temperature variation of coring tube wall during gas content determination process
煤炭科学技术. 2020, 48(6) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/5f40ec5f-4007-4557-9acc-122c19562e95>

基于Fick定律的柱状煤瓦斯扩散系数变化规律及模型构建

Direct determination of the diffusion coefficient variation of coal based on Fick's law and model establishment
煤炭科学技术. 2023, 51(8): 140–149 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-0966>

深部煤层原位保压保瓦斯取心技术装备及初步应用

Technology and application of in-situ pressure and gas maintaining coring for deep coal seam
煤炭科学技术. 2024, 52(4): 143–154 <https://doi.org/10.12438/cst.2024-0156>

密度梯度驱动的煤粒瓦斯解吸扩散模型及试验研究

Gas desorption and diffusion model driven by density gradient in coal particle and its experimental study
煤炭科学技术. 2022, 50(1): 169–176 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/5e74b2a0-fb91-4497-a1c4-43b982697510>

受限空间煤粒瓦斯吸附扩散特性及模型适配差异分析

Analysis of gas adsorption and diffusion characteristics of coal particles in confined space and model adaptation differences
煤炭科学技术. 2020, 48(9): 146–151 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/242c6fe8-b3d2-488c-b989-8ad527d28a72>

基于长距离密闭取心的煤巷条带瓦斯预抽效检研究

Study on efficiency verification of strip in gas pre-drainage coal roadways based on long-distance sealed coring
煤炭科学技术. 2021, 49(3): 106–111 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021.03.013>



关注微信公众号，获得更多资讯信息



移动扫码阅读

王 龙, 邓志亮, 王兆丰, 等. 煤层井下低温取心过程瓦斯损失量推算模拟试验[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(5): 174-185.

WANG Long, DENG Zhiliang, WANG Zhaofeng, *et al.* Simulated test of gas loss calculation during the freezing coring process in underground coal seam[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(5): 174-185.

煤层井下低温取心过程瓦斯损失量推算模拟试验

王 龙^{1,3}, 邓志亮¹, 王兆丰^{2,3}, 刘 军^{2,3}, 胡龙生¹, 王新丰¹

(1. 湘潭大学 环境与资源学院, 湖南 湘潭 411105; 2. 河南理工大学 安全科学与工程学院, 河南 焦作 454003;

3. 煤炭安全生产与清洁高效利用省部共建协同创新中心, 河南 焦作 454003)

摘 要: 低温取心技术既能在煤层中定点取样, 又可有效减少取样过程的瓦斯逸散, 在井下煤层瓦斯含量精准测定中应用前景广阔。为了准确推算低温取心过程的煤心瓦斯损失量, 依托含瓦斯煤低温取心吸附解吸模拟平台, 在不同管壁外热、不同平衡压力 (1~4 MPa) 条件下开展了低温取心型煤瓦斯解吸模拟试验, 研究了低温环境下的瓦斯解吸特征; 并基于图解法, 采用 3 种不同扩散模型对低温取心的解吸曲线进行拟合分析, 评价了 3 种损失量推算模型的优劣。结果表明: 常规取心过程产生的摩擦热会大大增加煤心瓦斯损失量; 瓦斯解吸量随取心管壁温度上升逐渐增大, 当管壁外热分别为 60、70、80、90 °C 时, 30 min 内解吸量分别为 6.587、7.082、7.460 和 7.981 cm³/g, 较之恒温 30 °C 解吸量的增幅分别达到 13.71%、22.25%、28.78% 和 37.77%。低温取心时, 煤心解吸出现倒吸回流现象, 这是降温导致煤样罐内压力小于大气压造成的。经不含瓦斯煤倒吸对比试验校正, 低温取心时的真实解吸量随着管壁外热降低逐渐减小, 管壁外热分别为 60、70、80、90 °C 时, 30 min 内低温取心解吸量分别为 3.578、3.842、4.215 和 4.76 cm³/g, 较之常规取心的解吸抑制率在 40%~46% 间。低温环境下, 瓦斯解吸量随吸附平衡压力升高逐渐增大, 但增长幅度逐渐减小; 低温取心时的扩散系数较之常规取心减少得多, 且随着降温呈现线性降低。采用 Logistic 增长模型对低温取心解吸曲线的拟合精度明显优于 \sqrt{t} 模型和指数模型, 损失量推算误差小于 0.5%, 能够满足低温取心时瓦斯损失量推算的需要。

关键词: 低温取心; 瓦斯损失量; 管壁外热; 瓦斯解吸; 扩散系数; Logistic 增长模型

中图分类号: TD713

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2025)05-0174-12

Simulated test of gas loss calculation during the freezing coring process in underground coal seam

WANG Long^{1,3}, DENG Zhiliang¹, WANG Zhaofeng^{2,3}, LIU Jun^{2,3}, HU Longsheng¹, WANG Xinfeng¹

(1. College of Environment and Resources, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China; 2. School of Safety Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China; 3. Collaborative Innovation Center of Coal Work Safe Production and Clean High Efficiency Utilization, Jiaozuo 454003, China)

Abstract: The freezing coring technology can not only perform the fixed-point sampling in coal seams, but also effectively reduce gas leakage during the sampling process. It has broad prospects for application in the precise measurement of gas content in coal seams. To accurately evaluate the gas loss of coal sample during the freezing coring process, the simulated tests of gas desorption during coring were carried out under the different external heats and the equilibrium pressures (1-4 MPa) by using a simulation platform for gas adsorption/desorption on gas bearing coal. The gas desorption characteristics in low-temperature conditions were also studied. Based on the graphical method, the three diffusion models were adopted to analyze the gas desorption curves under low-temperature conditions, and

收稿日期: 2024-03-12 策划编辑: 宫在芹 责任编辑: 钱小静 DOI: 10.12438/cst.2024-0307

基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目(52074107); 国家自然科学基金青年基金资助项目(52104224); 湖南省自然科学基金青年基金资助项目(2023JJ40632)

作者简介: 王 龙(1989—), 男, 河南平顶山人, 副教授, 硕士生导师, 博士。E-mail: 18336860596@163.com

the fitting performance of the gas loss estimation models were evaluated. The results show that the tube frictional heat generated during the conventional coring process greatly increases the gas loss; and the gas desorption amount gradually increases with the temperature rise in the core tube wall. When the friction heat of the tube wall is 60, 70, 80, and 90 °C, the desorption amounts within 30 min are 6.587, 7.082, 7.460, and 7.981 cm³/g, respectively; and the increments in desorption amounts compared to that of 30 °C are 13.71%, 22.25%, 28.78%, and 37.77%, respectively. During the freezing coring, there is a back-flow phenomenon in the desorption, which is caused by the coal sample cooling leading to the pressure inside the sample tank lower than atmospheric pressure. Through the correction tests of the pure back-flow of coal without gas, the gas loss during the freezing coring gradually decreases as the external heat of the tube wall. When the external heat of the tube wall is 60, 70, 80 and 90 °C, the desorption amounts within 30 min are 3.578, 3.842, 4.215, and 4.76 cm³/g, respectively; and the desorption inhibition rates reach 40%–46%, compared with the conventional coring. At low temperatures, the desorption amount gradually increases with the rise of adsorption pressure, but the growth rate gradually decreases. The diffusion coefficient during the freezing coring is much reduced compared to the conventional coring, and it shows a linear decrease with cooling. The fitting accuracy of the gas desorption curve at low temperatures via the logistic growth model is significantly better than that of the \sqrt{t} model and the exponential model, with a loss estimation error of less than 0.5%. Therefore, the logistic growth model can meet the needs of gas loss estimation during the freezing coring in coal seams.

Key words: freezing coring; gas loss amount; external heat of tube wall; gas desorption; diffusion coefficient; Logistic growth model

0 引 言

煤层瓦斯含量测定是开展矿井瓦斯防治的一项极为重要的基础工作,我国煤矿瓦斯含量的测定主要采用煤层瓦斯含量井下直接测定方法^[1-2]。井下直接法测定的瓦斯含量主要包括煤样井下自然解吸量、实验室测定残存量以及利用解吸规律推算取样过程的损失量 3 部分^[3-4]。井下解吸量和实验室残存量可以实测,但取样开始到煤样解吸试验前的瓦斯损失不可避免,通常是依据采样结束后,煤样在前几分钟的解吸量与时间的关系拟合推算得到^[5-6]。因此,尽可能地减少取样过程的瓦斯损失,以及建立可靠的损失量推算模型是实现煤层瓦斯含量精准测定的关键^[7-8]。

井下现场较多采用钻屑法取样,但此法易混样,无法保证煤样的纯净,导致瓦斯含量测定的可靠性难以保证^[9]。常规煤心管取样过程中,钻头切削热和管壁与钻孔壁间的摩擦热会使煤心温度升高,并且取心时间较长,导致推算的瓦斯损失量往往低于取样中实际值^[10-11]。为了减少瓦斯逸散,孙四清等^[12]提出了“三简单动、球阀关闭、取心筒与解吸罐一体化”的煤层气密闭取心器;李泉新等^[13]将密闭取心技术运用到煤层井下长距离定点取样;谢和平团队^[14-15]研发了的保压保瓦斯工艺可实现低扰动取心,保压能力强;王西贵等^[16]设计了保温保压保形的煤层气取心工具。这些方法一定程度上提高了取样深度和精度,但设备工艺较繁琐,仍无法消除取心器具局部生热对瓦斯解吸的影响。

瓦斯损失量推算一般通过构建瓦斯扩散模型来进行计算补偿,前人总结了诸多颗粒煤中瓦斯流动

规律公式^[17-18]。李志强等^[19]提出了煤粒多尺度多级孔隙模型,能适应均质与非均质煤体的扩散。程远平等^[20]进一步研究了煤的孔径类型对气体扩散系数的影响。秦跃平等^[21]提出了密度梯度驱动的扩散模型;王亮等^[22]优化了颗粒煤基质尺度计算参数,使其在粉化程度高的煤样中同样具有较好适用性。王兆丰等^[23-24]系统研究了-30~30 °C 条件下的颗粒煤瓦斯吸附/解吸特性,发现低温能有效抑制瓦斯解吸,并提出了低温取心技术。马树俊等^[25]通过程序升/降温闭合性变温试验发现吸附和解吸两者基本可逆。此外,陈江龙等^[26]认为损失瓦斯量的补偿计算值随取样时间延长而减小,与实测值误差逐渐增大。

以往学者们对煤样在恒温、高温环境下的瓦斯吸附/解吸规律研究较多,随着低温下瓦斯吸附/解吸特性的工程意义逐渐被重视,引起了越来越多的关注。低温取心过程不同于恒温边界条件,煤中瓦斯解吸受到取心管外壁摩擦热和内部制冷剂的双重影响。基于此,笔者依托含瓦斯煤低温取心吸附解吸模拟平台,开展了不同管壁外热、平衡压力条件下低温取心瓦斯解吸模拟试验;并采用图解法,对 3 种不同扩散模型的解吸拟合效果进行评价,以期揭示低温取心过程中的煤心瓦斯解吸规律,构建低温取心瓦斯损失量推算方法。

1 低温取心解吸试验

1.1 煤样制备

采用取心管在硬煤层取样时,由于受到钻机推进挤压作用,所取煤样多呈圆柱状,其尺寸较大,扩散路径较之颗粒煤大大增加。由于原煤结构较松散,难以打孔布置温度传感器。故选用焦作矿区赵固二

矿二 1 煤层的无烟煤, 将其研磨筛分后装入型煤模具中压成型煤样品; 并利用微型台钻在型煤样品中心位置钻进一个直径约为 2.5 mm 的小孔, 布置温度传感器监测试验过程中煤心温度变化, 如图 1 所示。



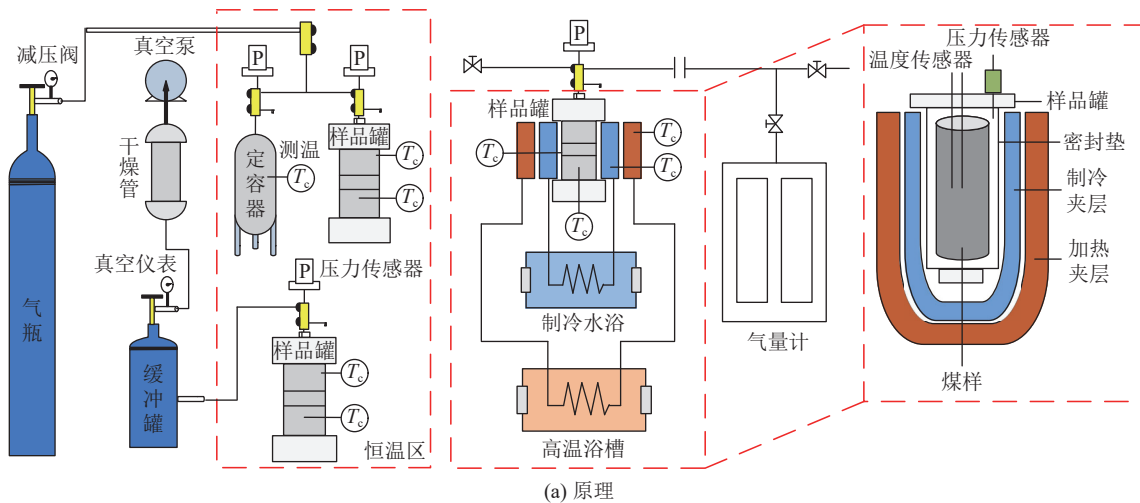
图 1 柱状型煤试样

Fig.1 Cylindrical moulded coal

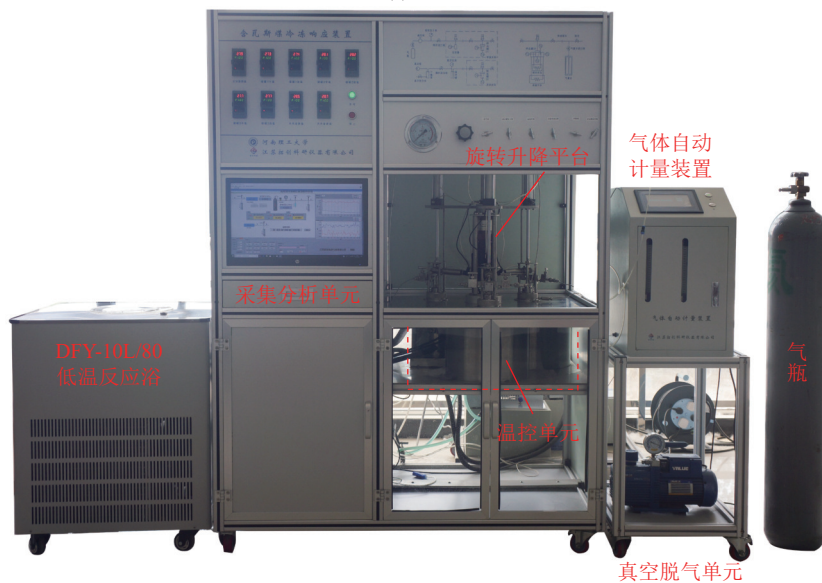
1.2 试验平台

含瓦斯煤低温取心吸附解吸模拟平台主要由真空脱气系统、注气吸附系统、程序温控系统、解吸自动计量系统、体积标定系统和样品罐自动旋转升降系统组成, 可真实模拟常规/低温取心过程煤样瓦斯的扩散过程, 如图 2 所示。

井下低温取心时, 取心管内制冷剂既要抵抗取心钻头切削热和管壁与孔壁间的摩擦热, 又要使所取煤心迅速降温。煤心瓦斯即处于低温变温环境中解吸。为营造冷冻取心过程“外热内冷”的温度环境, 试验温控单元采用相互独立的双层夹套反应器(两夹套紧贴但不连通)。其中低温冷却液反应浴槽容积 10 L, 额定功率 3.8 kW, 空载调温范围 $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ~ 室温, 制冷量 3 679 W, 循环泵流量 20 L/min; 程序升温油浴用于模拟取心钻进过程摩擦生热, 加热过程中使用苯基硅油作为导热介质。双层夹套反应器具



(a) 原理



(b) 实物

图 2 含瓦斯煤低温取心吸附解吸模拟平台

Fig.2 Testing platform for gas adsorption/desorption on gas bearing coal during the freezing coring

有相互独立的内/外循环泵系统,可将低温反应浴内的冷却液(95%工业酒精)和高温导热油分别引进到反应器的内外浴槽内。根据焦作矿区二1煤层实测的取样过程取心管壁温度数据^[23,27],将加热油浴温度分别设定为60、70、80和90℃,模拟不同取心深度时的取心管壁外热温度。采用干冰接触制冷时,煤心最终达到的低温为-36.8℃^[28],因此将制冷反应浴的温度统一设定为-40℃。

1.3 试验过程

首先对型煤样品进行真空脱气,至10 Pa以下。将样品罐置于30℃恒温水浴中,向其反复充入甲烷气体,直至罐内压力达到预设压力并保持4 h不变,以模拟煤样在未暴露时的吸附平衡状态。冷冻取心瓦斯解吸模拟时,首先将低温反应浴温度设定为-40℃并打开制冷循环;当内层夹套浴槽的温度达到并保持与低温反应浴相同时,启动加热油浴,根据现场实测的取心全过程温度曲线设置升温程序,以此创造冷冻取心过程的真实温度环境。在钻进升温程序开始时,立即将样品罐放入夹套反应器内,并迅速打开排气阀,释放排出样品罐内的游离气体;当样品罐内压力降至大气压时,关闭排气阀;打开样品罐与气体流量计量装置连接的所有阀门,实时采集解吸数据,直至样品罐内的瓦斯不再解吸。随后,依次重复以上试验步骤,模拟不同管壁外热和不同吸附压力条件下低温取心过程煤心瓦斯扩散过程。

2 试验结果分析

2.1 常规取心解吸

在不同管壁外热条件下(60、70、80、90℃),首先开展了常规取心升温瓦斯解吸试验,并与恒温30℃时的解吸量进行对比,如图3所示。煤样瓦斯吸附平衡压力为2 MPa,对应的吸附量为15.93 cm³/g。

常规取心时,同一时间内瓦斯累计解吸量随着取心管外壁温度的上升逐渐增大,高温取心环境中的解吸曲线始终位于恒温30℃解吸曲线的上方。瓦斯累计解吸量曲线可分为2个阶段:①初期快速增长阶段,前15 min内的瓦斯解吸速率较快,因此解吸量增长迅速;②后期稳定增长阶段,随着解吸速率大幅衰减,管壁的热量逐渐传递至煤心内部,解吸量稳定增长。管壁温度分别为60、70、80、90℃时,10 min时煤心累计解吸量分别为4.601、4.827、4.877和5.113 cm³/g,较之30℃解吸量4.362 cm³/g的增幅分别为5.48%、10.66%、11.81%和17.22%;30 min时的累计解吸量分别为6.587、7.082、7.460和7.981 cm³/g,较之30℃解吸量5.793 cm³/g的增

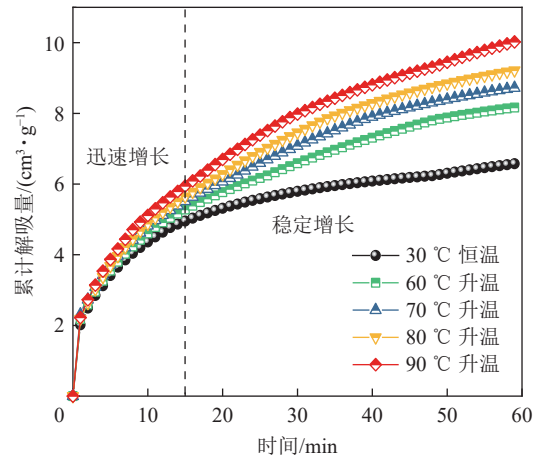


图3 高温取心环境与常温下瓦斯解吸量对比

Fig.3 Comparisons of gas desorption amount at between high and normal temperatures

幅分别为13.71%、22.25%、28.78%和37.77%。可见取心管采样过程中产生的摩擦热会大大增加煤心瓦斯损失量,若以恒温30℃时解吸规律推算真实取样时的瓦斯损失量,会直接影响瓦斯含量测定的准确性。

不同管壁外热常规取心过程的瓦斯解吸速率如图4所示。解吸初期瓦斯扩散速率最高,扩散速率随时间延长呈幂函数衰减,如式(1)所示。扩散速率

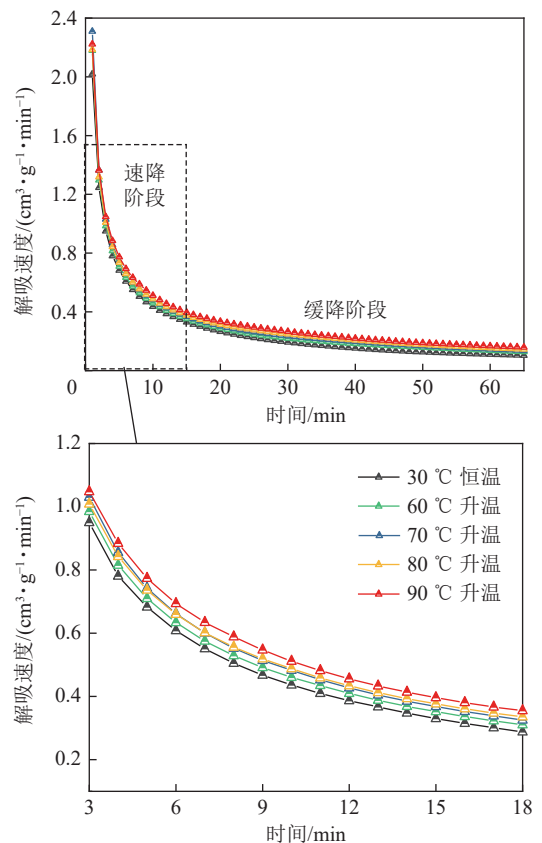


图4 常规取心过程瓦斯扩散速率

Fig.4 Gas desorption velocities during the conventional coring

曲线具有明显的分段特征:前 15 min 扩散速率急剧下降;15 min 后解吸速率降至较低值。且高温环境下的解吸速率曲线始终位于恒温 30 °C 速率曲线的上方,表明升温加快了瓦斯解吸。

$$v_t = v_1 t^{-\alpha} \quad (1)$$

式中: v_1 为第 1 min 时瓦斯扩散速率, $\text{cm}^3/(\text{g} \cdot \text{min})$; v_t 为 t 时刻的瓦斯扩散速率, $\text{cm}^3/(\text{g} \cdot \text{min})$; α 为扩散速率衰减系数。

2.2 低温取心解吸

为了控制变量,探讨低温取心过程与常规取心瓦斯解吸规律的差异,在管壁外热温度(60、70、80、90 °C)保持不变的前提下,在低温取心试验中,将内层夹套低温反应浴的温度设为-40 °C。开展了吸附平衡压力为 2 MPa 下的低温取心瓦斯解吸试验,结果如图 5 所示。

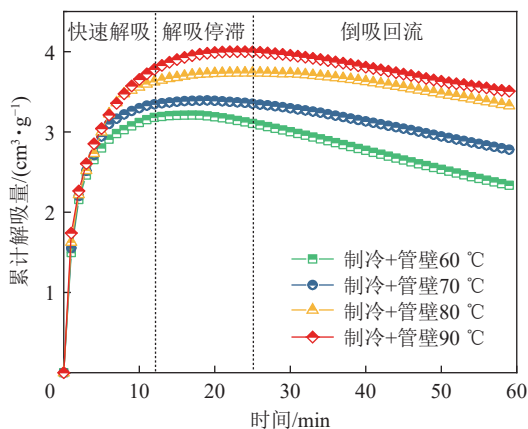


图 5 低温取心环境瓦斯初始解吸量曲线

Fig.5 Primary curves of gas desorption amounts during the freezing coring

不同于常温和高温环境解吸,低温条件下的瓦斯初始解吸曲线呈现出三段式变化。初期快速解吸阶段,煤心内部与外界的甲烷体积分数梯度较大,因此扩散速率较大,解吸量迅速增加。中期缓慢解吸,瓦斯扩散速率大幅衰减和煤心温度逐渐降低,解吸量增长缓慢,并出现了短暂的停滞现象。后期出现“倒吸回流”现象,20 min 后当煤心温度降至一定程度,累计解吸量开始逐渐下降;并且管壁外热温度越低,低温取心时解吸曲线出现倒吸的时间就越短。

扩散是由吸附体系内外的浓度差引起的,低温取心时甲烷分子的平均自由程随温度下降逐渐降低^[29],即低温对扩散具有抑制效应。但只要吸附体系内的甲烷体积分数大于外界浓度,在绝对零度以上甲烷分子就不会停止运动,扩散现象就不会停止。由理想气体状态方程 ($PV=nZRT$) 可知,对于整个吸

附系统而言,吸附质甲烷物质的量 n 、理想气体常数 R 、压缩因子 Z 和煤样罐吸附空间体积 V 均为恒定。系统处于低温环境解吸时,温度 T 不断下降,样品罐内压力 P 势必会相应地降低,当温度下降到一定程度,煤样罐内的压力低于煤样罐外大气压时,就会出现外界的空气向罐内回流的现象。

为消除倒吸回流对瓦斯解吸定量计算的影响,在低温取心解吸试验前,在同样的环境温度下(高温浴依次设为 60~90 °C,低温设置-40 °C),开展了不含瓦斯型煤的纯倒吸对比试验(罐内不充入甲烷),以校正低温取心过程瓦斯的真实解吸量。倒吸试验结果如图 6 所示。

由图 6 可知:在低温条件下,样品罐倒吸曲线与煤心降温曲线变化趋势总体一致,具有良好的线性关系,即说明倒吸现象的实质是在低温作用下,样品罐内压力降低造成的结果。初始阶段,样品罐内部与外部温差较大,降温速率较快,故罐内的压力下降较快导致倒吸量急剧增加。随着煤心降温速率逐渐减小,样品罐内负压不再增加,倒吸量增长速率也随之减缓。当管壁外热分别为 60、70、80、90 °C 时,低温取心煤心最终温度为-17.9、-22.1、-25.0、-29.8 °C。

得到不含瓦斯煤的绝对倒吸量后,将图 5 中混合瓦斯解吸和倒吸的初始解吸曲线减去各对应温度条件下的倒吸量,即可校正得到低温取心过程的真实解吸量,如图 7 所示。低温环境下,煤样真实解吸量随时间延长逐渐增加。相较于常规取心解吸规律,低温取心时解吸量快速增长阶段的时间更短,10 min 后解吸量缓慢增长至解吸停止。管壁外热越低,低温取心的累计解吸量就越小。当外热温度分别为 60、70、80、90 °C 时,前 10 min 内低温解吸量分别为 3.207、3.391、3.623 和 3.780 cm^3/g ; 30 min 内解吸量分别为 3.578、3.842、4.215 和 4.76 cm^3/g 。

为量化相同管壁外热条件低温取心对瓦斯解吸的抑制效果,将低温与常规取心各时段的解吸量进行比较,见表 1。解吸抑制率定义为低温与常规取心瓦斯解吸量差值与常规解吸量的比值,即

$$\eta = \frac{|Q_f - Q_c|}{Q_c} \times 100\% \quad (2)$$

式中: η 为低温取心瓦斯解吸抑制率,%; Q_f 为低温取心解吸量, cm^3/g ; Q_c 为常规取心时解吸量, cm^3/g 。

见表 1,低温取心较之常规取心法的解吸抑制率随时间延长逐渐增大,基本呈线性增长。前 10 min 内低温取心解吸抑制率在 25%~30%; 30 min 内的解吸抑制率在 40%~46%; 60 min 内的抑制率在

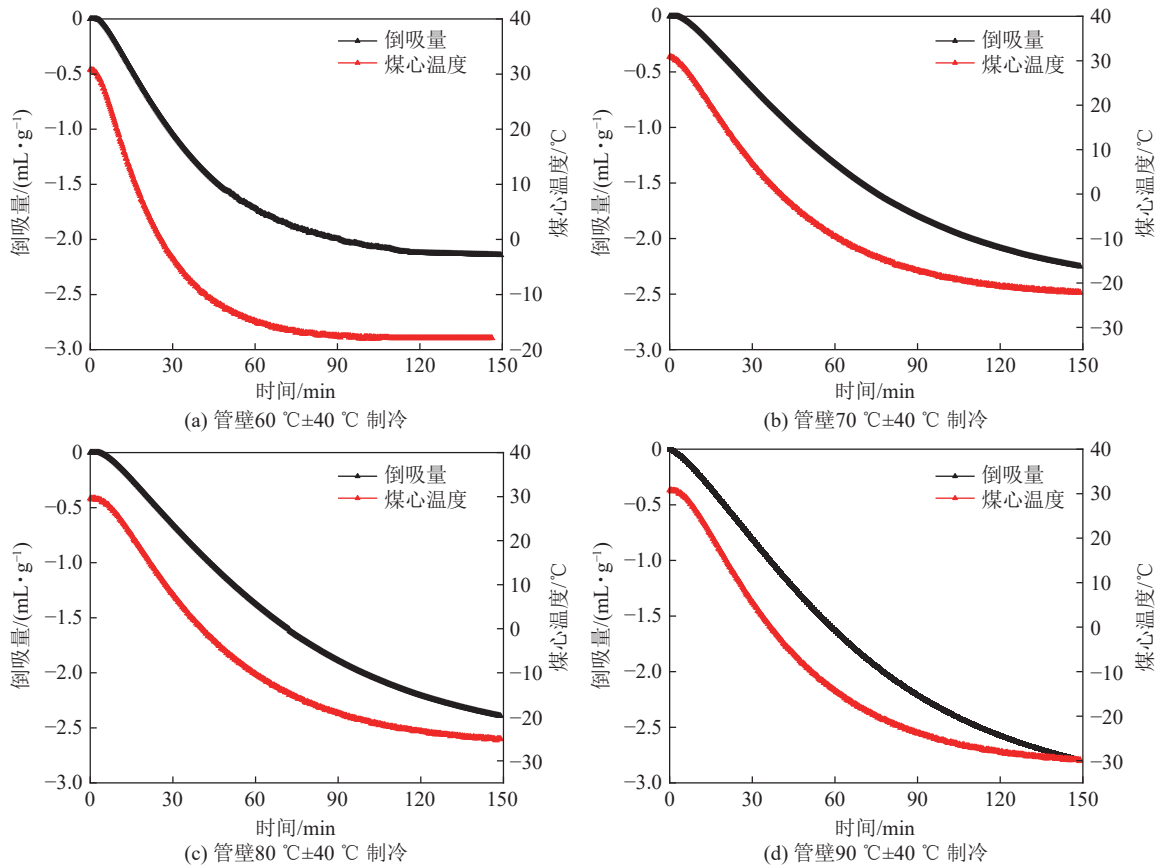


图 6 不含瓦斯煤低温环境下倒吸量与温度变化曲线

Fig.6 The back-flow rate and temperature changes in the coal sample without gas during the freezing coring

51% ~ 56%，验证了低温取心确实可有效降低采样过程中的瓦斯损失量。

2.3 平衡压力对解吸影响

为了分析低温取心时瓦斯吸附平衡压力对“低温抑解”效应的影响，开展了不同平衡压力 (1、2、3、4 MPa) 条件下低温取心解吸模拟试验。这里管壁外热均设为 70 °C，制冷浴为 -40 °C。校正后的不同平衡压力条件下的真实解吸量、解吸速率结果如图 8、图 9 所示。

图 8 表明：在相同的低温取心环境下，瓦斯解吸曲线仍可分为初期快速增长、后期缓慢增长 2 个阶段。高压条件下，解吸量初期增幅较大且解吸持续时间更长，整个过程的累计解吸总量更大。当平衡压力从 1 ~ 4 MPa 等压递增时，各对应的解吸量曲线间距变得逐渐紧密，表明解吸量随压力的增长幅度逐渐减小。这是由于吸附压力高的煤心解吸时吸收的热量更多，煤心降温更快，增强了低温对瓦斯抑解效果。平衡压力分别为 1、2、3、4 MPa 时，10 min 内的解吸量分别为 2.391、3.391、3.850 和 4.20 cm³/g，解吸率分别为 20.05%、21.29%、21.64% 和 22.27%；30 min 内累计解吸量分别为 2.708、3.842、4.361 和 4.758 cm³/g，解吸率分别达到 22.71%、24.11%、

24.51% 和 25.23%。

由图 9 可知，不同平衡压力下，前 10 min 为解吸速率迅速下降阶段，10 min 后进入平缓下降阶段；且瓦斯解吸速率随平衡压力上升而逐渐增大。平衡压力分别为 1、2、3、4 MPa 时，第 10 min 时的平均解吸速率分别为 0.239、0.339、0.385 和 0.42 cm³/(g · min)，分别降低至第 1 min 解吸速率 v_1 的 21.24%、21.81%、21.78% 和 21.69%；第 30 min 时的平均解吸速率分别为 0.091、0.128、0.147 和 0.157 cm³/(g · min)，分别降低至 v_1 的 8.09%、8.24%、8.31% 和 8.11%。可见前 10 min 内的瓦斯解吸速率衰减率最大，故解吸过程具有明显的分段特征。

2.4 温度对扩散系数影响

扩散系数是衡量气体在多孔介质中扩散难易程度的重要参量。为研究温度对取样时煤中瓦斯扩散系数的影响，采用聂百胜法^[30]对常规取样及低温取样时 30 min 内的平均扩散系数进行计算，结果见表 2。在第 3 类边界条件下，用毕欧准数和傅里叶准数来反映煤样瓦斯扩散与时间的动态变化特征，扩散率 Q/Q_∞ 一般表达式为

$$\ln\left(1 - \frac{Q_t}{Q_\infty}\right) = -\lambda t + \ln A, \quad \lambda = \frac{\pi^2 D}{r_0^2} \quad (3)$$

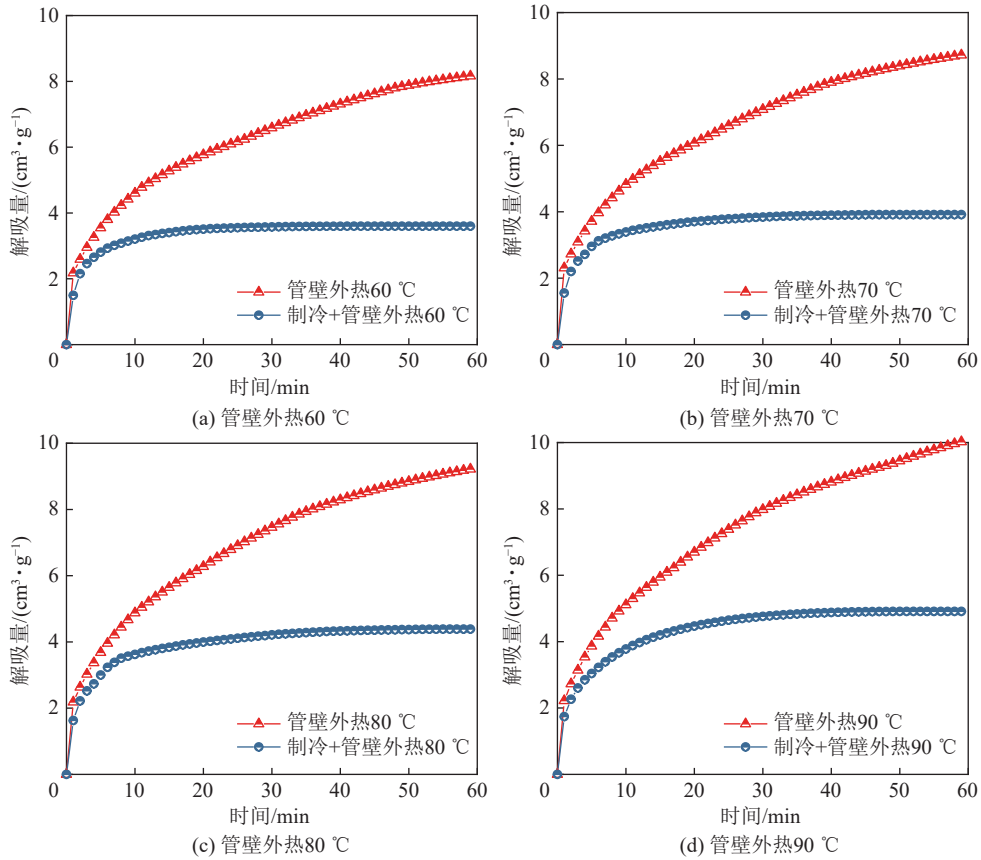


图 7 不同管壁外热条件低温与常规取心瓦斯解吸量对比

Fig.7 Comparisons of gas desorption amounts during freezing and conventional coring under different tube temperatures

表 1 低温与常规取心瓦斯解吸参数

Table 1 Parameters of gas desorption during between the freezing and conventional coring

时间/ min	管壁60 °C解吸量/ (cm ³ ·g ⁻¹)			管壁70 °C解吸量/ (cm ³ ·g ⁻¹)			管壁80 °C解吸量/ (cm ³ ·g ⁻¹)			管壁90 °C解吸量/ (cm ³ ·g ⁻¹)		
	冷冻	常规	抑制 率/%	冷冻	常规	抑制 率/%	冷冻	常规	抑制 率/%	冷冻	常规	抑制 率/%
10	3.207	4.601	30.30	3.391	4.827	29.75	3.623	4.877	25.71	3.780	5.113	26.07
20	3.510	5.770	39.17	3.704	6.071	38.99	3.996	6.279	36.36	4.469	6.698	33.28
30	3.578	6.587	45.68	3.842	7.082	45.75	4.215	7.46	43.50	4.76	7.981	40.36
40	3.599	7.31	50.77	3.898	7.901	50.66	4.330	8.291	47.77	4.880	8.809	44.60
60	3.602	8.190	56.02	3.914	8.752	55.28	4.387	9.253	52.59	4.91	10.080	51.29

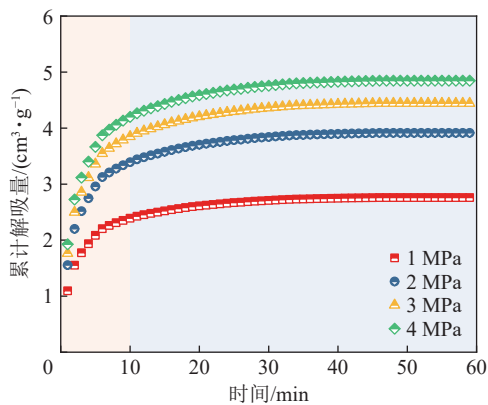


图 8 不同平衡压力下低温取心瓦斯解吸量

Fig.8 Gas desorption amounts at different adsorption pressures during the freezing coring

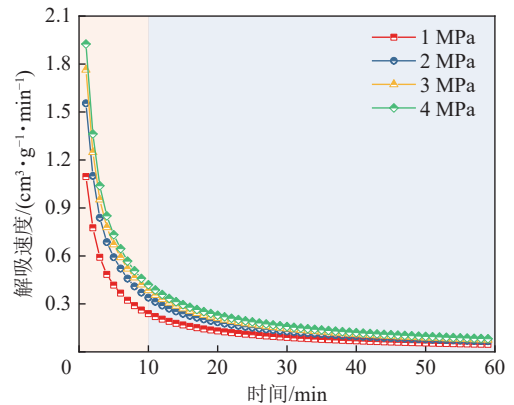


图 9 不同平衡压力低温解吸速率

Fig.9 Curves of gas diffusion velocity at different adsorption pressures during freezing coring

表 2 不同外热冷冻/常规取心扩散系数拟合关系

Table 2 Fitting parameters of gas diffusion coefficient during the freezing and conventional coring

解吸温度/℃	拟合方程	R^2	扩散系数 $D/(cm^2 \cdot s^{-1})$
30	$\ln(1-Q_t/Q_\infty)=-0.0107t-0.1783$	0.872	1.086×10^{-7}
管壁60	$\ln(1-Q_t/Q_\infty)=-0.013t-0.1788$	0.924	1.32×10^{-7}
管壁70	$\ln(1-Q_t/Q_\infty)=-0.0145t-0.1844$	0.950	1.466×10^{-7}
管壁80	$\ln(1-Q_t/Q_\infty)=-0.0162t-0.1729$	0.965	1.644×10^{-7}
管壁90	$\ln(1-Q_t/Q_\infty)=-0.0184t-0.1724$	0.966	1.866×10^{-7}
-40制冷+管壁60	$\ln(1-Q_t/Q_\infty)=-0.0035t-0.1724$	0.832	3.536×10^{-8}
-40制冷+管壁70	$\ln(1-Q_t/Q_\infty)=-0.004t-0.1794$	0.847	4.022×10^{-8}
-40制冷+管壁80	$\ln(1-Q_t/Q_\infty)=-0.005t-0.1838$	0.875	5.005×10^{-8}
-40制冷+管壁90	$\ln(1-Q_t/Q_\infty)=-0.0069t-0.1811$	0.872	6.961×10^{-8}

其中, r_0 为煤样颗粒半径, 这里取平均值 0.1 mm; A 为拟合系数; Q_t 为 t 时刻的解吸量, cm^3/g ; Q_∞ 为 $t \rightarrow \infty$ 时的极限解吸量, 通常为煤样处于吸附平衡后在常压 0.1 MPa 下 $t \rightarrow \infty$ 时的扩散量, 即

$$Q_\infty = \left(\frac{abP}{1+bP} - \frac{abP_0}{1+bP_0} \right) \frac{100 - A_{ad} - M_{ad}}{100} \frac{1}{1 + 0.31M_{ad}} \quad (4)$$

其中, a 为吸附常数, 当 $P \rightarrow \infty$ 时的极限吸附量, cm^3/g ; b 为吸附常数, MPa^{-1} ; A_{ad} 为煤样灰分, %; M_{ad} 为煤样中的水分, %; P_0 为常压 0.1 MPa。常规/低温取样时扩散率的拟合结果如图 10、图 11 所示。

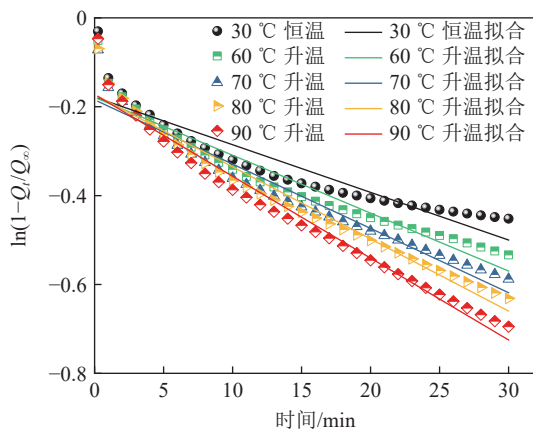


图 10 常规取样瓦斯扩散率与时间关系

Fig.10 Relations between the gas desorption ratio and time during the conventional coring

由表 2 可知: 相同管壁外热条件下, 低温取心时瓦斯扩散系数较之常规取心扩散系数减少得多; 并且扩散系数随着环境温度的下降而呈现线性降低。管壁外热分别为 60、70、80、90℃ 时, 常规取心环境下的扩散系数分别为 1.32×10^{-7} 、 1.466×10^{-7} 、 1.644×10^{-7} 、 $1.866 \times 10^{-7} cm^2/s$; 而低温取心时扩散系数分别为 3.536×10^{-8} 、 4.022×10^{-8} 、 5.005×10^{-8} 和 $6.961 \times 10^{-8} cm^2/s$, 仅占到同外热常规取心的 0.3 ~ 0.4 间。

在低温环境下 ($<0^\circ C$), 瓦斯分子的平均自由程和活性能减小, 分子热运动受限, 多数吸附态气体分子无法获得足够的动能摆脱吸附势阱的束缚从煤孔隙表面扩散出来, 在煤孔隙表面的停留时间也被延长。同时瓦斯解吸是吸热过程, 煤心降温也抑制了解吸进程。宏观表现为低温环境的扩散系数比高温环境扩散系数小得多。

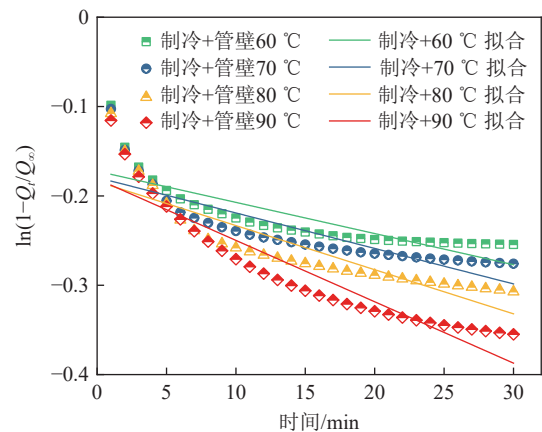


图 11 低温取样瓦斯扩散率与时间关系

Fig.11 Relations between the gas desorption ratio and time during the conventional coring

3 低温取心损失量推算

建立可靠的损失量推算模型是测定采样过程中瓦斯损失量的关键。经典的 \sqrt{t} 模型、负指数模型、幂函数模型、动扩散系数模型^[31] 等是基于颗粒煤瓦斯扩散试验建立的经验或半经验公式。严格来讲, 这些球状扩散模型并不能准确描述瓦斯在型煤孔隙中的扩散特征。李志强等^[32] 建立的柱状煤单孔隙扩散模型存在无穷级数项, 也不便应用于现场取样推算损失量。

根据低温取心模拟试验得到的瓦斯解吸量曲线

特征,笔者发现低温变温环境下,解吸量与解吸时间呈现 Logistic 函数增长的趋势。Logistic 增长曲线模型特点是初始阶段样本的数量随时间大致呈几何级数增长;而后受环境条件制约开始变得缓和,直至停止增长^[33]。低温取心采样时,煤心刚暴露被切削下来进入取心管时,瓦斯大量放散;随后退钻过程中受制冷剂作用,煤心温度持续降低,低温很好地抑制了瓦斯解吸,因此后期的瓦斯累计解吸量曲线逐渐平缓,这与 Logistic 模型(式(5))的增长趋势相似。

$$Q_t = b_1 + \frac{a_1 - b_1}{[1 + (t/t_0)^c]} \quad (5)$$

式中: a_1 为低温取心过程瓦斯损失量, cm^3/g ; b_1 为取样结束后,煤样在测定时间内的井下解吸量, cm^3/g ; t_0 为解吸总量中值所对应的时间, min ; c 为解吸曲线增长因子。

基于图解法,分别采用 \sqrt{t} 模型、指数式模型和 Logistic 增长模型对不同管壁外热、平衡压力条件下

的低温取心解吸 $Q-t$ 曲线拟合分析,评价这 3 种损失量推算模型的优劣。为统一比较,整个取心过程和装入样品罐的总时长设为 15 min,则前 15 min 的解吸量即为取样过程的损失量;15 min 后开始计时,记录煤样罐中瓦斯解吸量。不同条件下,低温取心过程的解吸量拟合结果如图 12、图 13 所示。

由图 12、图 13 可见,采用 Logistic 增长模型对不同低温取心条件下的瓦斯解吸拟合曲线基本与试验数据重合,拟合精度均在 0.99 以上,效果明显优于 \sqrt{t} 模型和指数模型。低温取心过程中煤心迅速降温,且柱状煤心由于尺寸较大,瓦斯扩散路程及在孔隙中迂曲程度较大,取样结束被装入煤样罐后,解吸量曲线开始出现拐点,测试时间内的解吸量较小。而 \sqrt{t} 模型和指数模型解吸拟合曲线随时间逐渐递增,在测试时间内(15 min)并没有收敛的趋势。因此,采用 \sqrt{t} 模型和指数模型推算低温取样过程的损失量严重失真。

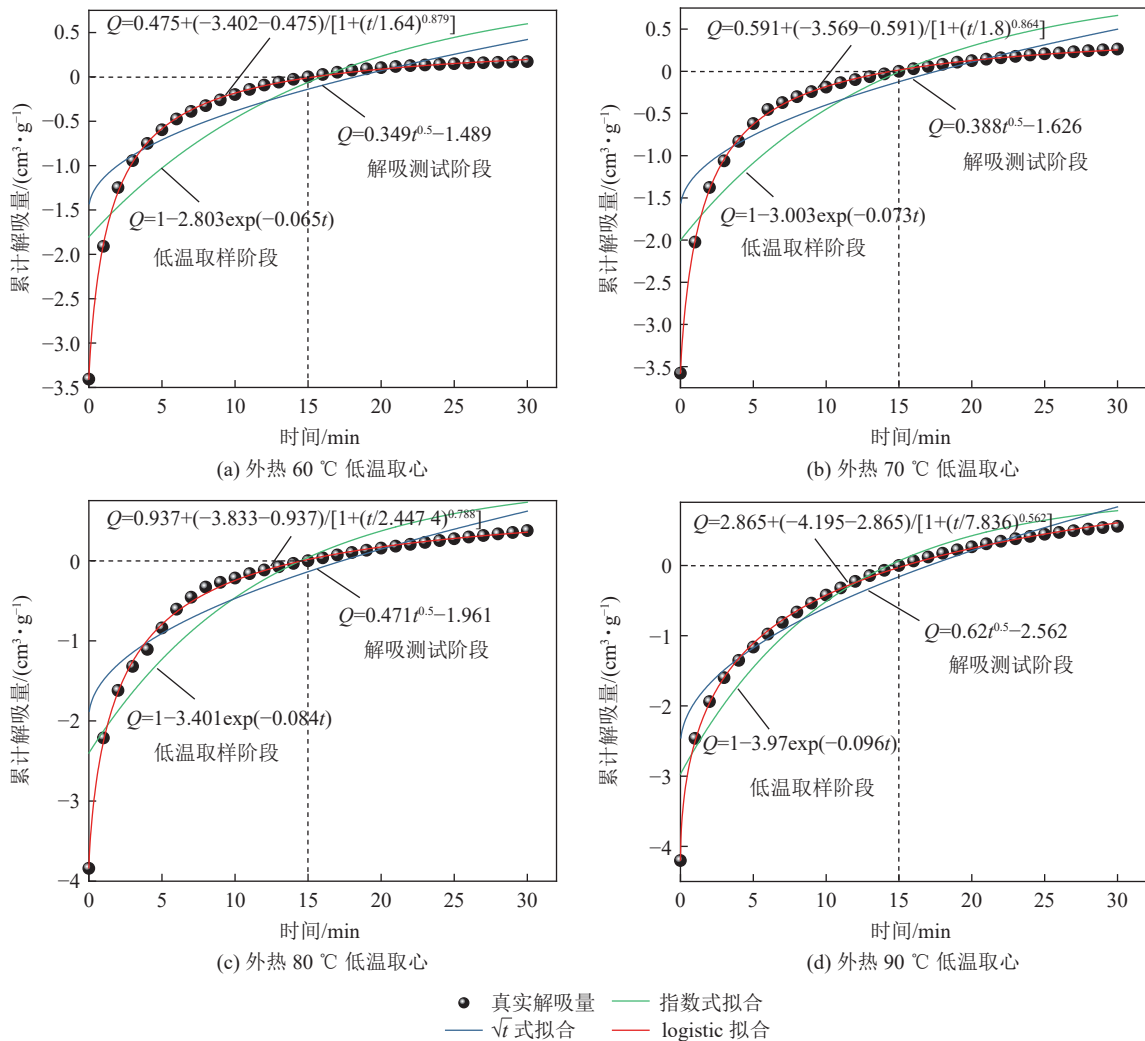


图 12 不同外热低温取心过程损失量拟合曲线

Fig.12 Fitting curves of the gas loss at different tube temperatures during the freezing coring

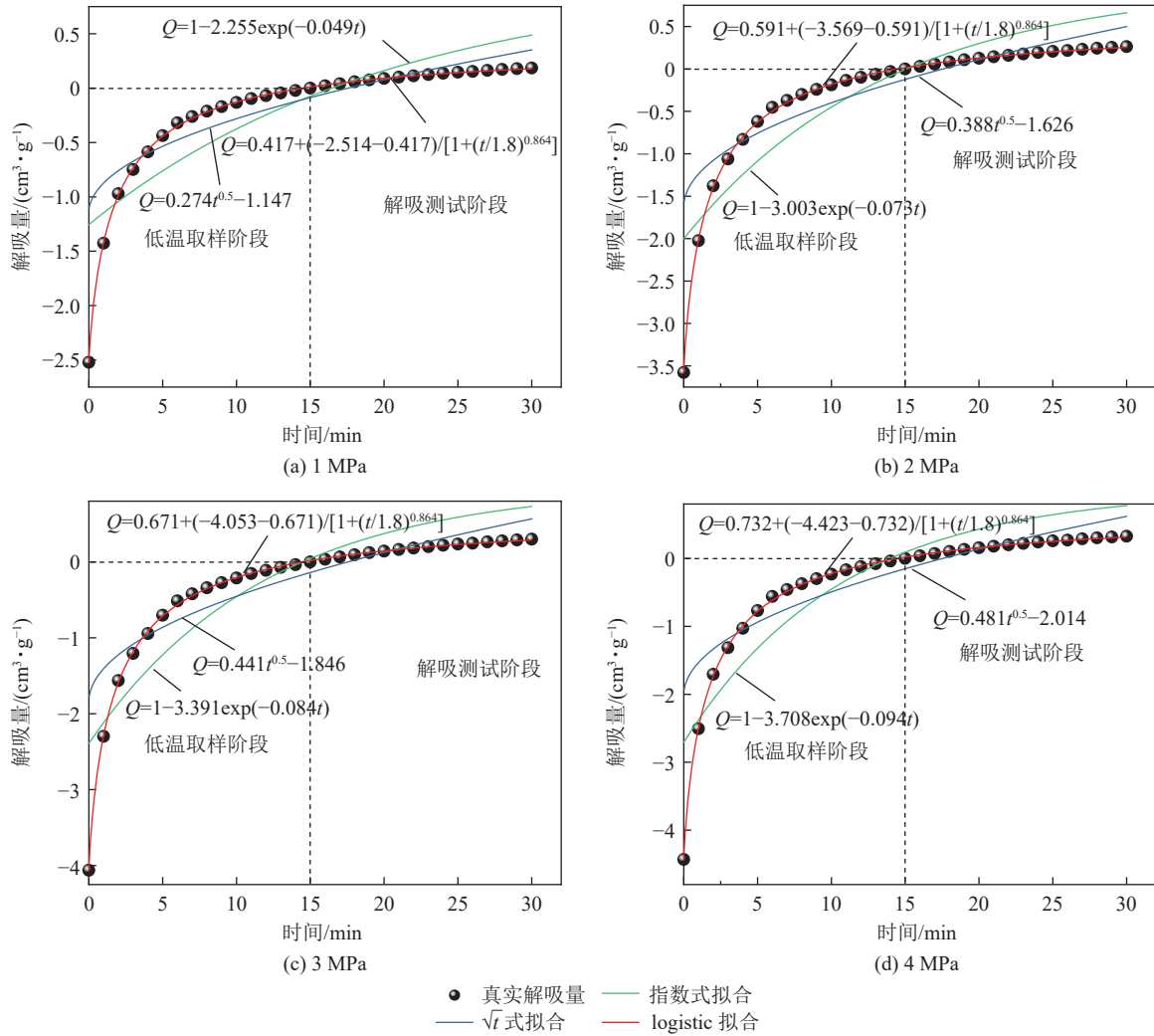


图 13 不同平衡压力下低温取心过程损失量拟合曲线

Fig.13 Fitting curves of the gas loss at different sorption pressures during the freezing coring

由表 3 可知, 不同管壁外热、平衡压力条件下, 采用 Logistic 增长模型推算出的瓦斯损失量与解吸试验值之间的误差均小于 0.5%。指数式拟合的损失量误差在 29.3% ~ 56.3%, 当瓦斯吸附压力较大或取

心管外热较高时, 推算误差逐渐降低; 而 \sqrt{t} 模型的推算误差更大, 整体在 41.6% ~ 58.1%, 推算出的瓦斯损失量远低于真实值。因此, 现阶段采用 Logistic 增长曲线模型拟合低温取心过程瓦斯解吸曲线, 能够满

表 3 3 种模型低温取心过程损失量推算结果对比

Table 3 Comparisons of calculation results of gas loss during the freezing coring by the three models

低温取心	损失量试验值/ ($\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$)	指数式模型			\sqrt{t} 模型			Logistic模型			
		推算值/ ($\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$)	误差/%	R^2	推算值/ ($\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$)	误差/%	R^2	推算值/ ($\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$)	误差/%	R^2	
不同管壁外热	60 °C	3.406	1.803	56.3	0.71	1.428	58.1	0.82	3.402	0.12	0.99
	70 °C	3.578	2.003	44.02	0.74	1.559	56.43	0.84	3.569	0.25	0.99
	80 °C	3.839	2.401	37.46	0.77	1.879	51.05	0.88	3.833	0.16	0.99
	90 °C	4.202	2.97	29.32	0.92	2.454	41.60	0.95	4.195	0.17	0.99
不同吸附压力	1 MPa	2.523	1.255	50.26	0.69	1.099	56.44	0.83	2.514	0.36	0.99
	2 MPa	3.578	2.003	44.02	0.74	1.559	56.43	0.84	3.569	0.25	0.99
	3 MPa	4.062	2.391	41.14	0.77	1.770	54.54	0.86	4.053	0.22	0.99
	4 MPa	4.431	2.708	38.89	0.78	1.931	57.67	0.87	4.423	0.18	0.99

足推算各种低温环境下的瓦斯损失量的需要。

4 结 论

1) 常规取心时, 瓦斯解吸量随取心管壁温度上升逐渐增大; 解吸曲线分为初期快速增长、后期稳定增长两阶段。管壁外热分别为 60、70、80、90 °C 时, 30 min 内解吸量分别为 6.587、7.082、7.460 和 7.981 cm³/g, 较之恒温 30 °C 解吸量 5.793 cm³/g 的增幅分别为 13.71%、22.25%、28.78% 和 37.77%。可见取心管采样过程中产生的摩擦热会大大增加煤心瓦斯损失量。

2) 低温取心过程中, 煤心解吸量曲线出现倒吸回流现象, 这是降温导致煤样罐内压力小于大气压造成的。通过不含瓦斯煤倒吸对比试验校正, 得到低温取心真实解吸量, 相较于常规取心, 低温取心解吸量快速增长的时间更短; 且随着管壁外热降低, 解吸量逐渐减小。管壁外热分别为 60、70、80、90 °C 时, 30 min 内低温取心解吸量分别为 3.578、3.842、4.215 和 4.76 cm³/g, 较之常规取心的解吸抑制率在 40%~46% 间。

3) 低温环境下, 瓦斯解吸量随平衡压力升高逐渐增大, 但增长幅度逐渐减小; 前 10 min 内的解吸速率衰减率最大。低温取心扩散系数较之常规取心减少得多; 且扩散系数随着降温呈现线性降低。

参考文献(References):

- [1] 蓝航, 陈东科, 毛德兵. 我国煤矿深部开采现状及灾害防治分析[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(1): 39-46.
LAN Hang, CHEN Dongke, MAO Debing. Current status of deep mining and disaster prevention in China[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(1): 39-46.
- [2] 袁亮, 薛生, 谢军. 瓦斯含量法预测煤与瓦斯突出的研究与应用[J]. 煤炭科学技术, 2011, 39(3): 47-51.
YUAN Liang, XUE Sheng, XIE Jun. Study and application of gas content to prediction of coal and gas outburst[J]. Coal Science and Technology, 2011, 39(3): 47-51.
- [3] 孙四清, 杨帆, 郑玉岐, 等. 煤层瓦斯含量测定技术及装备研究进展[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(4): 164-176.
SUN Siqing, YANG Fan, ZHENG Yuqi, et al. Research progress of coal seam gas content determination technology and equipment[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(4): 164-176.
- [4] HOU X W, LIU S M, ZHU Y M, et al. Evaluation of gas contents for a multi-seam deep coalbed methane reservoir and their geological controls: in situ direct method versus indirect method[J]. Fuel, 2020, 265: 116917.
- [5] 周福宝, 康建宏, 王有湃, 等. 煤层瓦斯含量井下一站式自动化精准测定方法[J]. 煤炭学报, 2022(8): 2873-2882.
ZHOU Fubao, KANG Jianhong, WANG Youpai, et al. Method of

underground integrated automatic and accurate determination of coalbed gas content[J]. Journal of China Coal Society, 2022(8): 2873-2882.

- [6] 李成武, 王义林, 王其江, 等. 直接法瓦斯含量测定结果准确性试验研究[J]. 煤炭学报, 2020, 45(1): 189-196.
LI Chengwu, WANG Yilin, WANG Qijiang, et al. Experimental study on accuracy of direct gas content determination[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 189-196.
- [7] 李志强, 陈金生, 李林, 等. 煤层瓦斯微纳米串联多尺度动态扩散渗透率实验-模型-机理及意义[J]. 煤炭学报, 2023, 48(4): 1551-1566.
LI Zhiqiang, CHEN Jinsheng, LI Lin, et al. Experiment, modelling, mechanism and significance of multiscale and dynamic diffusion-permeability of gas through micro-nano series pores in coal[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(4): 1551-1566.
- [8] ZHAO W, CHENG Y P, PAN Z J, et al. Gas diffusion in coal particles: A review of mathematical models and their applications[J]. Fuel, 2019, 252: 77-100.
- [9] 刘永茜. 钻屑法测定瓦斯含量存在问题分析及改进[J]. 煤炭科学技术, 2014, 42(6): 136-139.
LIU Yongqian. Analysis on problems existed in gas content measurement with drilling cuttings method and improvement[J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(6): 136-139.
- [10] 刘帅强, 王兆丰, 马树俊, 等. 取心管取心过程管壁温度变化特性试验[J]. 中国安全生产科学技术, 2020, 16(10): 96-101.
LIU Shuaiqiang, WANG Zhaofeng, MA Shujun, et al. Experimental study on temperature variation characteristics of tube wall during coring process of coring tube[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2020, 16(10): 96-101.
- [11] WANG L, WANG Z F, QI C J, et al. Physical simulation of temperature and pressure evolution in coal by different refrigeration modes for freezing coring[J]. ACS Omega, 2019, 4(23): 20178-20187.
- [12] 孙四清, 张群, 郑凯歌, 等. 地面井煤层气含量精准测试密闭取心技术及设备[J]. 煤炭学报, 2020, 45(7): 2523-2530.
SUN Siqing, ZHANG Qun, ZHENG Kaige, et al. Technology and equipment of sealed coring for accurate determination of coalbed gas content in ground well[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(7): 2523-2530.
- [13] 李泉新, 方俊, 许超, 等. 井下长距离定点保压密闭煤层瓦斯含量测定取样技术[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(7): 68-73, 166.
LI Quanxin, FANG Jun, XU Chao, et al. Sampling technology for measuring gas content in coal seam with long distance fixed-point pressure sealing in underground mine[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(7): 68-73, 166.
- [14] 谢和平, 崔鹏飞, 尚德磊, 等. 深部煤层原位保压取心技术原理与瓦斯参数测定研究进展[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(8): 1-12.
XIE Heping, CUI Pengfei, SHANG Delei, et al. Research advances on the in-situ pressure-preserved coring and gas parameter determination for deep coal seams[J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(8): 1-12.
- [15] 高明忠, 宋杰, 崔鹏飞, 等. 深部煤层原位保压保瓦斯取心技术装备及初步应用[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(4): 143-154.

- GAO Mingzhong, SONG Jie, CUI Pengfei, et al. Technology and application of in-situ pressure and gas maintaining coring for deep coal seam[J]. *Coal Science and Technology*, 2024, 52(4): 143–154.
- [16] 王西贵, 邹德永, 杨立文, 等. 煤层气保温保压保形取心工具研制及现场应用[J]. *石油钻探技术*, 2021, 49(3): 94–99.
WANG Xigui, ZOU Deyong, YANG Liwen, et al. Development and field application of a coalbed methane coring tool with pressure maintenance, thermal insulation, and shape preservation capabilities[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2021, 49(3): 94–99.
- [17] 张飞燕, 韩颖. 煤屑瓦斯扩散规律研究[J]. *煤炭学报*, 2013, 38(9): 1589–1596.
ZHANG Feiyan, HAN Ying. Research on the law of gas diffusion from drill cuttings[J]. *Journal of China Coal Society*, 2013, 38(9): 1589–1596.
- [18] 杨其鑫, 王佑安. 煤屑瓦斯扩散理论及其应用[J]. *煤炭学报*, 1986(3): 87–94.
YANG Qiluan, WANG Youan. Theory of methane diffusion from coal cuttings and its application[J]. *Journal of China Coal Society*, 1986(3): 87–94.
- [19] 李志强, 刘勇, 许彦鹏, 等. 煤粒多尺度孔隙中瓦斯扩散机理及动扩散系数新模型[J]. *煤炭学报*, 2016, 41(3): 633–643.
LI Zhiqiang, LIU Yong, XU Yanpeng, et al. Gas diffusion mechanism in multi-scale pores of coal particles and new diffusion model of dynamic diffusion coefficient[J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(3): 633–643.
- [20] 程远平, 胡彪. 基于煤中甲烷赋存和运移特性的新孔隙分类方法[J]. *煤炭学报*, 2023, 48(1): 212–225.
CHENG Yuanping, HU Biao. A new pore classification method based on the methane occurrence and migration characteristics in coal[J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(1): 212–225.
- [21] 秦跃平, 徐浩, 毋凡, 等. 密度梯度驱动的煤粒瓦斯解吸扩散模型及试验研究[J]. *煤炭科学技术*, 2022, 50(1): 169–176.
QIN Yueping, XU Hao, WU Fan, et al. Gas desorption and diffusion model driven by density gradient in coal particle and its experimental study[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(1): 169–176.
- [22] 王亮, 李子威, 郑思文, 等. 颗粒煤基质尺度计算新方法及应用[J]. *煤炭科学技术*, 2024, 52(2): 115–125.
WANG Liang, LI Ziwei, ZHENG Siwen, et al. A new method for calculating particle coal matrix scale and its application[J]. *Coal Science and Technology*, 2024, 52(2): 115–125.
- [23] 王兆丰, 王龙, 董家昕, 等. 冷冻取心过程含瓦斯煤样温度场演化规律模拟研究[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(1): 199–210.
WANG Zhaofeng, WANG Long, DONG Jiabin, et al. Simulation on the temperature evolution law of coal containing gas in the freezing coring process[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(1): 199–210.
- [24] 王兆丰, 岳高伟, 康博, 等. 低温环境对煤的瓦斯解吸抑制效应试验[J]. *重庆大学学报*, 2014, 37(9): 106–112, 143.
WANG Zhaofeng, YUE Gaowei, KANG Bo, et al. Gas desorption inhibitory effect of coal in low temperature environment[J]. *Journal of Chongqing University*, 2014, 37(9): 106–112, 143.
- [25] 马树俊, 王兆丰, 任浩洋, 等. 低温变温条件下煤吸附瓦斯过程研究[J]. *中国安全科学学报*, 2019, 29(10): 124–129.
MA Shujun, WANG Zhaofeng, REN Haoyang, et al. Study on gas adsorption process of coal at low and variable temperature[J]. *China Safety Science Journal*, 2019, 29(10): 124–129.
- [26] 陈江龙, 赵训, 陈学习, 等. 解吸时长对损失瓦斯量补偿计算准确性影响试验研究[J]. *煤炭技术*, 2023, 42(10): 170–175.
CHEN Jianglong, ZHAO Xun, CHEN Xuexi, et al. Experimental study on effect of desorption time on accuracy of gas loss estimation[J]. *Coal Technology*, 2023, 42(10): 170–175.
- [27] 马树俊, 王兆丰, 韩恩光, 等. 瓦斯含量测定中取心管管壁温度变化特性研究[J]. *煤炭科学技术*, 2020, 48(6): 95–101.
MA Shujun, WANG Zhaofeng, HAN Enguang, et al. Study on characteristics of temperature variation of coring tube wall during gas content determination process[J]. *Coal Science and Technology*, 2020, 48(6): 95–101.
- [28] 李小军, 王兆丰, 祁晨君, 等. 干冰为冷源的含瓦斯型煤低温冷冻试验[J]. *煤炭学报*, 2017, 42(S1): 160–165.
LI Xiaojun, WANG Zhaofeng, QI Chenjun, et al. Freezing experiments on moulded coal with methane using dry ice as cold source[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(S1): 160–165.
- [29] 兰学芳, 赵瑞玉, 赵愉生, 等. 分子筛晶内扩散系数测定方法的研究进展[J]. *化工进展*, 2012, 31(1): 62–68.
LAN Xuefang, ZHAO Ruiyu, ZHAO Yusheng, et al. Research advance in the measurement of intracrystalline diffusivities in zeolites[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2012, 31(1): 62–68.
- [30] 聂百胜, 郭勇义, 吴世跃, 等. 煤粒瓦斯扩散的理论模型及其解析解[J]. *中国矿业大学学报*, 2001, 30(1): 19–22.
NIE Baisheng, GUO Yongyi, WU Shiyue, et al. Theoretical model of gas diffusion through coal particles and its analytical solution[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2001, 30(1): 19–22.
- [31] 秦玉金, 安丰华, 苏伟伟, 等. 基于 Fick 定律的柱状煤瓦斯扩散系数变化规律及模型构建[J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(8): 140–149.
QIN Yujin, AN Fenghua, SU Weiwei, et al. Direct determination of the diffusion coefficient variation of coal based on Fick's law and model establishment[J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(8): 140–149.
- [32] 李志强, 成墙, 刘彦伟, 等. 柱状煤心瓦斯扩散模型与扩散特征试验研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2017, 46(5): 1033–1040.
LI Zhiqiang, CHENG Qiang, LIU Yanwei, et al. Research on gas diffusion model and experimental diffusion characteristic of cylindrical coal[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2017, 46(5): 1033–1040.
- [33] 李希建, 陈刘瑜, 刘钰, 等. 温度对构造煤解吸初期规律试验研究[J]. *矿业研究与开发*, 2019, 39(6): 73–75.
LI Xijian, CHEN Liuyu, LIU Yu, et al. Experimental study on influence laws of temperature on tectonic coal in initial stage[J]. *Mining Research and Development*, 2019, 39(6): 73–75.