

· 专题一:石油矿业安全领域学科发展(矿业与安全工程) ·

煤孔隙空间几何特征对瓦斯解吸曲线形态的控制机制研究进展

王凯^{1,2*} 赵伟^{1,2*}

1. 中国矿业大学(北京) 共伴生能源精准开采北京市重点实验室,北京 100083
2. 中国矿业大学(北京) 应急管理与安全工程学院,北京 100083

[摘要] 煤孔隙空间特征控制着瓦斯解吸曲线的具体形态,构建可表征孔隙空间几何特征的煤体瓦斯解吸扩散模型是科学化研究瓦斯解吸特性控制机制的重要内容之一。本文首先深入梳理了当前解吸扩散模型的缺陷,并提出了一种反演孔隙几何参数的瓦斯扩散模型建模路径,即利用自扩散系数的边界感应特性,构建扩散系数衰减的定量化模型,进而引入经典的单孔扩散模型,形成一种含孔隙几何参数的单孔优化模型,并归纳总结了瓦斯解吸扩散研究中亟待解决的科学问题和工程问题。研究进展为定量化研究煤孔隙结构和瓦斯解吸曲线形态的关系指明了方向和思路,为进一步实现精准化瓦斯抽采及智能化突出防治提供了重要理论依据。

[关键词] 瓦斯解吸;孔隙特征;扩散模型;自扩散系数

瓦斯是指井下一切有害气体的总称,其主要成分是甲烷。而甲烷是一种清洁高效的绿色能源,同时也是全球温室效应气体排放的重要来源。据IPCC第五次气候变化报告显示^[1],全球16%的温室效应来源于甲烷的排放,其温室效应等效值是二氧化碳的28倍。2021年党中央作出重大战略决策,力争2030年前实现碳达峰,2060年前实现碳中和。因此,实现煤层甲烷高效抽采、减排和利用,是达成“双碳”目标的重要组成部分。

在人为采动影响下,煤层瓦斯会随着浓度差解吸并运移到巷道中,对生产工作造成威胁。单位质量煤体中瓦斯逸散到空气中的体积随时间的变化规律则被称为瓦斯解吸规律。瓦斯解吸规律的准确描述决定着瓦斯抽采的效率、瓦斯减排的程度以及瓦斯灾害的大小^[2-6],如图1所示。因此,建立精确合理的数学模型一直是矿井瓦斯防治领域的研究重点。然而在描述煤粒解吸规律时,会发现煤样在不同实验条件下常会产生不同形态的解吸曲线,有时为初期急速上升且解吸时间较为短暂的幂函数型,有



王凯 中国矿业大学(北京)教授,博士生导师,教育部“长江学者”特聘教授,主要从事安全科学与工程领域的教学与科研工作。承担国家863计划、国家重点研发计划课题、国家自然科学基金、高等学校博士点基金项目等数十项课题。发表学术论文200余篇,获省部级科技奖一等奖5项、二等奖10项,北京市高等教育教学成果奖一等奖1项,全国煤炭行业教育教学成果奖特等奖1项、一等奖2项,江苏优秀图书奖一等奖1项。



赵伟 中国矿业大学(北京)副教授,硕士生导师。主要研究方向为多孔介质的孔隙表征方法、煤及页岩吸附膨胀特性及煤与瓦斯突出机理及防治技术等。承担国家自然科学基金、北京市自然科学基金及重点实验室开放基金等多项课题。

时为初期解吸速度较为平缓但时间持久的直线型,有时或在两者之间过渡。因此,在工程实践中用以适配的解吸模型多达十余种,通过人为比较各模型拟合度才能最终确定此煤样的定量解吸规律。然而由于对解吸曲线形态的内在演化机制研究不清,以

收稿日期:2021-05-15;修回日期:2021-10-04

* 通信作者, Email: kaiwang@cumtb.edu.cn, 381zhao@cumtb.edu.cn
本文受到国家自然科学基金项目(52130409, 52121003, 51904311)的资助。

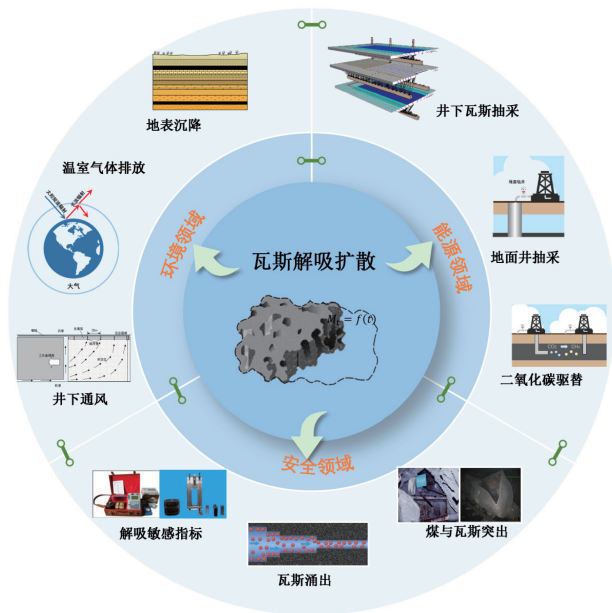


图1 瓦斯解吸扩散规律的应用场景

往的解吸模型多从宏观质量分数变化角度推导,这就造成各解吸数学模型对不同样品的解吸曲线匹配不一,且模型参数变化只能定性解释的问题^[7,8],因此,瓦斯相关的抽采防突等指标有时会出现敏感性不强的缺陷。另外,在煤与瓦斯突出灾害防治研究中,迫切需要定量标定煤粒孔隙损伤(如孔断裂、孔生成、开闭孔转换等因素)对瓦斯解吸速度的促进作用,以期对突出过程中的瓦斯贡献及后续的衍生灾害做出定量评价。如何从宏观解吸曲线反演得出孔隙空间特征参数、瓦斯传质方式和破坏程度等参数,对探索构建以钻孔抽采曲线特征或孔底压力变化等瓦斯动力参数为基础的新预测指标也具有非常重要的理论意义^[9-11]。

本文围绕如何基于瓦斯解吸曲线反演孔隙几何参数这个问题,总结探讨了研究团队近年来对含孔隙几何参数数学模型建模的相关研究进展。首先总结了现阶段解吸扩散模型的主要缺陷,然后利用自扩散系数的边界感应特性,构建了自扩散系数、修正扩散系数与表观扩散系数的数学联系,获得了瓦斯表观扩散系数的衰减特征,进而建立了一种可以反演孔隙几何参数的扩散模型。最后,归纳总结了瓦斯解吸扩散研究中亟待解决的科学问题和工程问题。本文论述的研究进展可为实现精准化、科学化瓦斯治理与利用提供重要依据。

1 当前解吸扩散模型的缺陷

目前,我国煤矿瓦斯防治领域中常用的描述解

吸规律的模型主要有基于菲克扩散定律的数学推导模型和经验模型两类,如图2所示。Crank首先给出了适用于不同边界条件的单孔均质模型数学解^[12]。之后,Ruckenstein等将单一扩散系数分为大孔扩散系数和小孔扩散系数,得到了双孔模型^[13]。Clarkson和Bustin认为该模型引入的是Henry模型进行吸附量计算,对于高压段的瓦斯吸附解吸过程不适合^[14]。袁军伟、李志强、刘厅等人则基于单孔模型提出了动扩散模型^[15-17]。单孔及双孔模型均以无穷级数或者偏导形式存在,难以直接应用于工程。在国内煤炭科学领域,多采用形式简单的经验公式进行解吸规律的描述,如Airey式、Barrer式、Winter式、乌斯基诺夫式、Bolt式、王佑安式、孙重旭式等^[18]。这些解吸模型虽然得到了广泛应用,但仍有较大不足。

1.1 扩散系数的恒定假设与现实条件不符

扩散系数是沿扩散方向,在单位时间每单位浓度梯度的条件下,垂直通过单位面积所扩散某物质的质量或摩尔数,其与浓度、位置以及时间有关。然而受制于测试方法的局限和解析解获得的难度,学者们常常将扩散系数假设为常数,从而通过公式拟合求出适用于煤体这种多孔介质的表观扩散系数,建立单孔扩散模型以及一系列衍生的动力学模型。但这类模型由于与现实中动态可变的扩散系数条件不符,常常与实验所得的解吸曲线拟合匹配性较差,使用此类模型分析后续规律时误差较大。将扩散系数看作变化的物理量是解决拟合效果低的一个有效途径,与单孔模型同样应用广泛的双孔模型,甚至三孔或多孔模型便是其中较为有效的尝试。此方法将煤粒孔隙分为大孔和小孔,进而将扩散系数分为大孔扩散系数和小孔扩散系数,从而获得了更好的拟合效果。然而上述方法并没有摆脱扩散系数在某一部分是常数的假设。现阶段也有学者从经验模型拟合动态扩散系数,但经验公式仍缺乏科学性与说服力。因此,推导出适合煤粒解吸特性的扩散系数衰减模型的理论表达式显得尤为重要。

1.2 反演参数的单一化

已有解吸模型获得的参数主要有两类(如图2所示):一类以扩散方程为依据,形成的扩散类参数,如:扩散系数、扩散组分、扩散路径长度等,这类主要以扩散模型为代表;另一类直接以解吸曲线为根据,形成的解吸动力学参数,如:时间常数、极限解吸量、解吸动力学参数等,部分参数仅具有拟合的经验性,而不具有实际的物理意义,这类主要以经验模型为

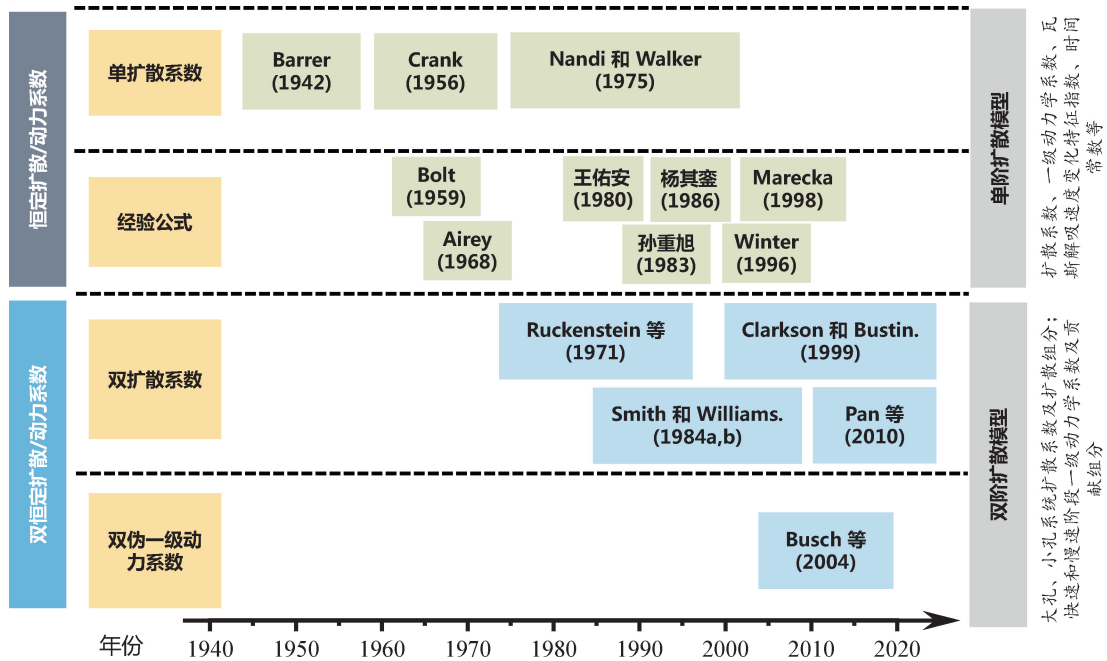


图 2 常用瓦斯解吸模型及获取参数统计^[8, 12-14, 19-25]

代表。可以发现，上述两类参数都停留在对表观特征进行说明的阶段，得不出孔隙几何形态、基质基本尺度等细微观特征参数，缺乏与孔隙测定实验分析结论的关系桥梁，难以相互印证，使各模型的应用场景受限。因此，当前文献中在进行解吸扩散规律分析时，只能进行简单的扩散系数、时间常数、扩散组分等参数的对比，而对更为本质的细微观参数缺乏对比探讨。

2 基于瓦斯解吸扩散动态衰减规律的孔隙几何结构特征提取方法路径

2.1 自扩散系数衰减规律中的孔隙几何特征信息

孔隙空间几何特征是十分复杂的，但对于孔隙中主控孔型的几何特征仍是可以获知的。以典型的液氮和压汞实验为例，根据其滞后环可以给出所测试样品的主要孔隙形状特征，如平板型、锥形、圆柱形等。对于解吸现象而言，其本质上是大量瓦斯分子在煤中的扩散传质现象。而根据经典的核磁共振实验(NMR)可知^[26]，多孔介质中单一粒子的自扩散行为是能够有效反映孔隙的几何结构信息的，其本质是基于扩散粒子对孔隙边界的感应效应。粒子在孔隙中呈不规则的分子热运动状态，在扩散初期，粒子具有初始自扩散系数 $D_{s0}(t)$ ，此时粒子并没有与孔壁进行碰撞，显现的是其本身的热力学性质。随着时间推移，粒子的扩散距离逐渐加长，会与孔壁发生碰撞，初始的动能会随着碰撞逐渐丧失，进

而使得扩散能力下降，扩散系数便会衰减，如图 3 所示。

扩散系数的衰减规律往往体现了孔道的基本特征，其与孔道的体积和表面积有着定量的关系^[26]。但单一粒子的自扩散系数与粒子群的表观扩散系数是存在差异的，其碰撞特征不仅仅体现了孔隙空间的影响，还体现了粒子间的碰撞以及随体流动的影响，两种扩散系数衰减的规律是存在差异的。因此，需要找到两者的转换关系，才能应用自扩散系数的孔隙空间敏感性。Skoulidas 和 Sholl 曾指出自扩散系数与表观扩散系数之间，可引入修正扩散系数来建立定量的联系^[27]。修正扩散系数表征的是以化学势梯度为动力驱动下的粒子扩散能力大小，其与表观扩散系数以及自扩散系数之间存在着与表面覆盖度相关的定量关系。然而在低压区或者 Henry 压力区(吸附量与压力成正比的区域)，表面覆盖度不高，这三种扩散系数可近似认为相等^[28]。地球化学动力学著名专家 Zhang Youxue 教授也提出三种扩散系数在理想或者近理想体系中可近似看为等

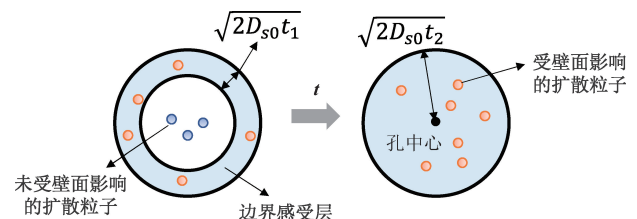


图 3 扩散粒子边界感受与自扩散系数衰减原理

价^[29]。因此,如果可以得到解吸曲线中表观扩散系数的衰减规律,特别是低压段的解吸曲线,便可以推算出孔隙的具体形态特征。

2.2 含孔隙几何结构的时变扩散模型的建构方法

图4给出了由单一粒子的自扩散系数转换为粒子群的表现扩散系数的具体方法思路。构建该方程时,首先从分子动力学微观角度,分析自扩散系数与不同几何特征受限空间碰撞行为差异,找到可以反映孔隙几何特征的自扩散系数时变衰减模型;之后根据自扩散系数、修正扩散系数以及菲克扩散系数的数学转换关系,得出类自扩散系数时变规律的非克扩散系数时变模型;然后利用分离变量法、变量替换法等数学方法,将建立的时变模型引入经典的单孔模型中,获得能反映孔形等几何参数变化的单孔扩散优化模型;在控制单一变量的情况下,最终完成各孔隙几何参数变化对扩散系数以及解吸曲线形态的定量分析。建立模型如式(1)所示:

$$\frac{M_t}{M_\infty} = 1 - \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left[-\frac{n^2 \pi^2}{r^2} \left(D_\infty t + \frac{2\alpha}{\beta} e^{\beta t} \cdot \sqrt{t} - \frac{2\alpha}{\beta^2} e^{\beta t} + C'\right)\right] \quad (1)$$

式中, D_∞ 为趋于平衡的扩散系数; α 和 β 为比例系数,其中 $\alpha = D_{s0} - D_\infty$; $\beta = -\psi \cdot S_{pore}/V_{pore} \sqrt{D_{s0}}$, $D_{s0}(t)$ 为自扩散系数初始值, ψ 为比例系数; C' 为积分所得的拟合常数。

2.3 孔隙空间几何特征对解吸扩散曲线形态的控制作用分析

从以往实验结果可知,孔隙连通性越好、孔隙越发达,瓦斯解吸的难度越小,故而瓦斯初期解吸速度大,而随着解吸源质量的迅速衰减,解吸速度也迅速降为零。在解吸曲线形态上,宏观表现为靠近 y 轴且远离 x 轴。反之,孔隙连通性越差的煤体,其瓦斯解吸速度慢、持续时间长,解吸特性进而表现为靠近 x 轴且解吸速度变化率较小的曲线形态。在压汞、低温液氮及低温二氧化碳等常规测试煤孔隙特征的实验中,多将孔形状分为平板孔、圆柱形孔、球形孔等特征,其中圆柱形孔是压汞 Washburn 等经典理论的基础^[30],因此常被简化考虑为多孔介质孔隙的基本形状。观察式(1)可知,对于不同的孔隙特征,其具有不同的 S_{pore}/V_{pore} 值,使得解吸曲线形态发生了变化。对于平板形孔、圆柱形孔和球形孔而言, S_{pore}/V_{pore} 值分别为 $1/r_{pore}$ 、 $2/r_{pore}$ 和 $3/r_{pore}$ 。因此可得到三种不同孔隙形状的解吸扩散曲线,如图5a所示。图中在计算解吸曲线时取微孔与介孔的分界点 2 nm 的孔径为例(根据国际孔隙分类的统一标准, 2 nm 以下为微孔, 2~50 nm 为介孔, 50 nm 以上为大孔), 扩散路径长度取 100 nm 为例,而自扩散系数的初始值和平衡值可分别取 $1 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 和 $1 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ 为例。

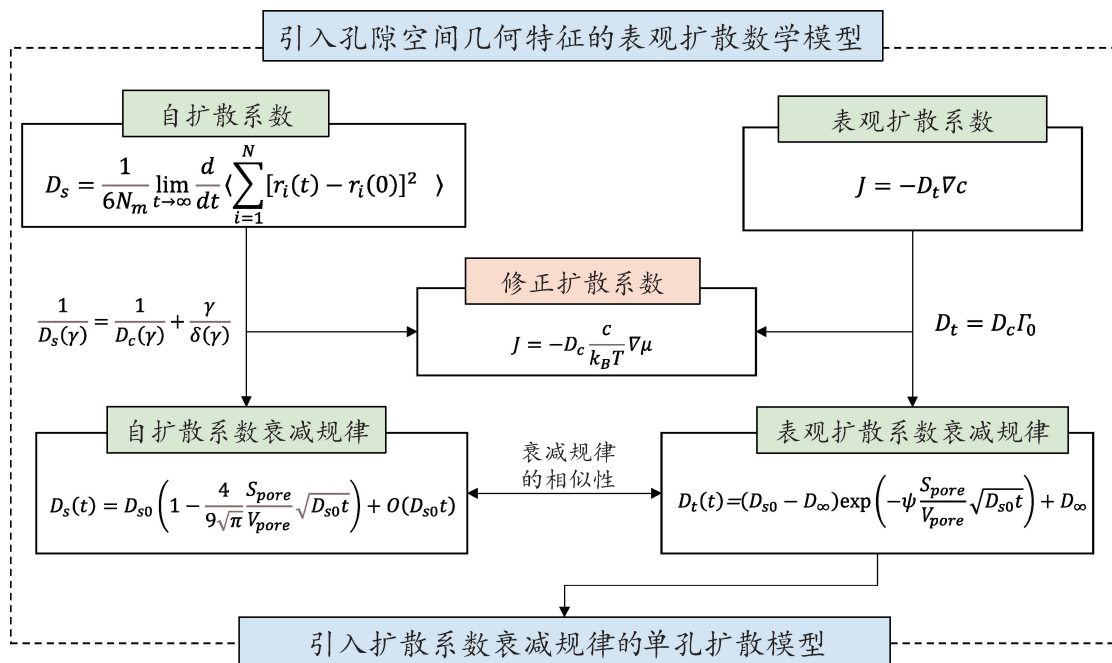


图4 含孔隙空间几何特征表现扩散模型的建构思路^①

① $D_s(t)$ 为自扩散系数, $D_{s0}(t)$ 为自扩散系数初始值; D_c 为修正扩散系数; t 为时间; S_{pore} 为孔道的比表面积; V_{pore} 为孔道的体积; $O(D_{s0}t)$ 为高阶项, 当 t 趋近于零时, 可以省去; γ 为表面覆盖度; $\delta(\gamma)$ 为关联系数, 与 γ 的取值有关; Γ_0 为热量学系数。

从图 5a 中可以发现初期解吸速度和解吸量球形孔隙 > 圆柱形孔隙 > 平板形孔隙。平板形孔隙的解吸曲线更偏向于 x 轴, 且接近为直线; 而球形孔隙的解吸曲线则更接近 y 轴, 且曲率更高; 圆柱形孔隙的解吸扩散曲线处于两者之间。图 5b、5c 和 5d 收集了文献中相似形状的解吸曲线, 分别为寺河块煤 (130~140 mm)^[31]、车集软煤 (3~6 mm)^[32] 和车集硬煤 (3~6 mm)^[32] 的解吸曲线。根据文献中对于各煤样孔隙连通性的描述, 车集软煤要大于车集硬煤, 故而开放的圆柱形孔道更多。而寺河煤样属于高变质程度无烟煤, 其孔隙极为发达, 故而孔隙连通性更好, 瓦斯分子逸散的孔道和方向更多, 孔隙形态更接近于球体。这也从侧面印证了所提出的新模型的正确性。因此, 通过解吸曲线形态的差异, 便可以得到定性的孔隙形态, 这为分析瓦斯解吸特性主控因素提供了非常有效的信息。

而以分析文献中不同粒径煤样的瓦斯解吸曲线为例^[32, 33], 又可以发现一个有趣的规律: 随着粒径的逐渐减小, 同一压力下, 瓦斯解吸曲线形态逐渐由近平板扩散的直线转化为曲率增长的近球扩散曲线。由此可以得出, 在孔隙损伤过程中, 瓦斯由平板形孔隙限制的二维扩散逐渐变为自由的三维球体扩散; 损伤过程减小了扩散路径和扩散难度, 使得扩散朝着非受限空间的自由扩散逐渐过渡, 因此初期解吸速度逐渐增大。由此可知, 解吸曲线形态的变化

与解吸模型初始建立条件的不匹配性, 造成了不同煤样对不同的解吸模型适应性各异、钻屑解吸指标敏感度千差万别的现象。

3 解吸扩散模型的未来研究方向展望

虽然笔者提出的模型为基于瓦斯解吸曲线的煤孔隙空间几何特征反演提供了方法和思路, 然而对于扩散的定量精细化描述仍有许多工作要做, 如所体现的参数影响只有理想化的孔型、比表面积以及孔体积等参数, 对于切实反应煤孔隙高度复杂的非均质性仍有提升空间, 如对于不同孔型的配比, 孔型随时间(孔压)的变化特征等仍缺乏考虑, 另外对于各种外部条件的变化, 如水分、温度等也未有表征。图 6 总结了瓦斯解吸扩散领域亟需解决的问题, 主要包含损伤破坏煤体的瓦斯扩散行为表征以及非损伤破坏煤体的瓦斯扩散行为表征两个方面, 在未来的研究中应给予关注。

3.1 损伤破坏煤体瓦斯扩散现象的数学表征

此方面主要体现在煤孔隙空间几何特征的识别、扩散外部环境条件的识别、瓦斯传质方式及转换关系的识别等领域。建立的模型需体现孔隙几何参数, 如孔长、孔径、孔形、连通度、各孔隙组配及分布等; 扩散外部环境参数, 如平衡压力、温度、浓度、水分及风速(流动边界)等; 传质方式及贡献参数, 如二维表面扩散到三维体扩散、努森扩散到菲克扩散、扩

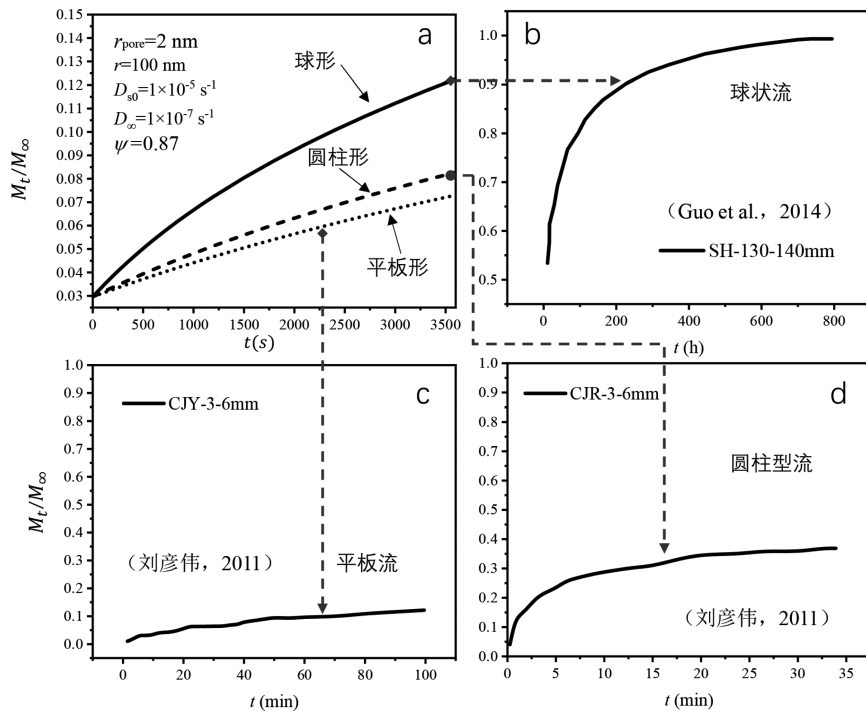


图 5 不同孔隙形状瓦斯解吸扩散曲线形态对比

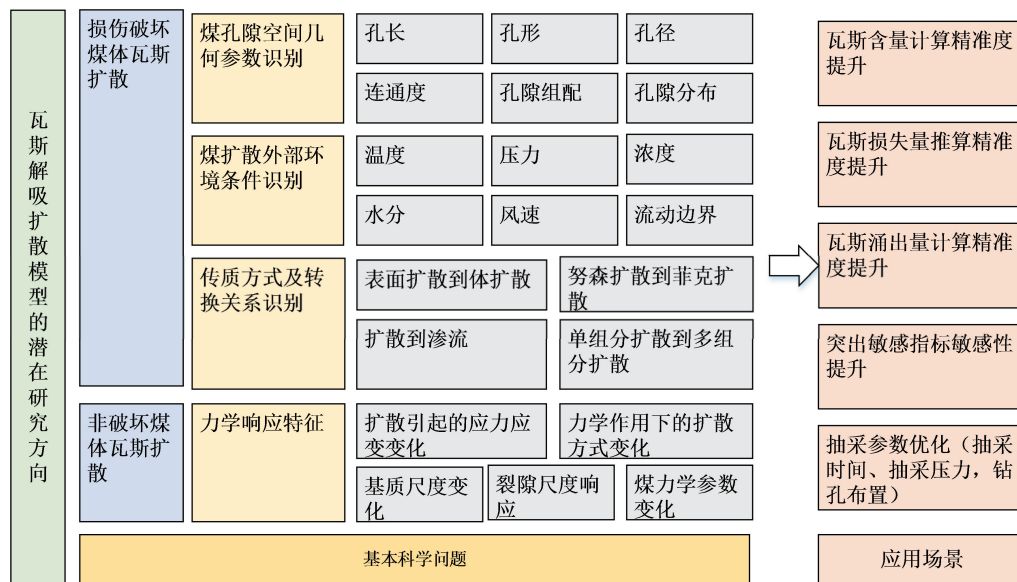


图6 瓦斯解吸扩散模型的潜在研究方向

散到渗流各过程的贡献和转换点,以及从单组分气体到多组分气体扩散的互扩散系数表征等。

3.2 非损伤破坏煤体瓦斯扩散现象的数学表征

此方面主要关注煤体弹性段的瓦斯扩散力学响应特征。目前多数模型仅关注煤体弹性段的渗流力学响应特征,而忽视力对扩散的正负反馈作用。未来研究方向应包括瓦斯扩散过程中煤体的应力应变的时效性、吸附膨胀引起的煤力学参数的时变规律、力学过程中煤基质尺度的生长和退化、力学过程中瓦斯扩散方式的转变等问题。以上参数的量化、精确化表征对工程应用场景中瓦斯含量的精准计算、瓦斯损失量的精准推算、瓦斯涌出量的精准计算、突出敏感指标的精准厘定以及瓦斯抽采参数的合理优化有着重要的意义。

参 考 文 献

- [1] IPCC. The fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Stockholm: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2014.
- [2] 赵伟. 粉化煤体瓦斯快速扩散动力学机制及对突出煤岩的输运作用. 徐州: 中国矿业大学, 2018.
- [3] 王凯, 俞启香, 缪协兴, 等. 综放采场J型通风系统治理高瓦斯涌出的研究. 中国矿业大学学报, 2004, 33(4): 365—369.
- [4] 郭立稳, 俞启香, 王凯. 煤吸附瓦斯过程温度变化的试验研究. 中国矿业大学学报, 2000, 29(3): 287—289.
- [5] Wang K, Lou Z, Guan L, et al. Experimental study on the performance of drilling fluid for coal seam methane drainage boreholes. Process Safety and Environmental Protection, 2020, 138: 246—255.
- [6] Wang K, Du F. Coal-gas compound dynamic disasters in China: a review. Process Safety and Environmental Protection, 2020, 133: 1—17.
- [7] 赵伟, 王亮, 陈向军, 等. 受限空间煤粒瓦斯吸附扩散特性及模型适配差异分析. 煤炭科学技术, 2020, 48(9): 146—151.
- [8] 程远平, 王海锋, 王亮. 煤矿瓦斯防治理论与工程应用. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2010.
- [9] Liu W, Rostami J, Keller E. Application of new void detection algorithm for analysis of feed pressure and rotation pressure of roof bolters. International Journal of Mining Science & Technology, 2017, 27(1): 77—81.
- [10] 王国法, 赵国瑞, 任怀伟. 智慧煤矿与智能化开采关键技术分析. 煤炭学报, 2019, 44(1): 34—41.
- [11] 汪皓. 突出煤层定向钻进随钻瓦斯参数动态反演及消突效果评价研究. 徐州: 中国矿业大学, 2020.
- [12] Crank J. The mathematics of diffusion. New York: Oxford University Press, 1956.
- [13] Ruckenstein E, Vaidyanathan AS, Youngquist GR. Sorption by solids with bidisperse pore structures. Chemical Engineering Science, 1971, 26(9): 1305—1318.
- [14] Clarkson CR, Bustin RM. The effect of pore structure and gas pressure upon the transport properties of coal: a laboratory and modeling study. 2. Adsorption rate modeling. Fuel, 1999, 78(11): 1345—1362.
- [15] 袁军伟. 颗粒煤瓦斯扩散时效特性研究. 北京: 中国矿业大学(北京), 2014.
- [16] 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. 煤炭学报, 2016, 41(3): 633—643.
- [17] Liu T, Lin B. Time-dependent dynamic diffusion processes in coal: model development and analysis. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 134: 1—9.
- [18] Zhao W, Cheng Y, Pan Z, et al. Gas diffusion in coal particles: a review of mathematical models and their applications. Fuel, 2019, 252: 77—100.
- [19] Deboer JH. The dynamical character of adsorption. Soil Science, 1953, 76(2): 166.
- [20] Busch A, Gensterblum Y, Krooss BM, et al. Methane and carbon dioxide adsorption-diffusion experiments on coal: upscaling and modeling. International Journal of Coal Geology, 2004, 60(2): 151—168.

- [21] Bolt BA, Innes JA. Diffusion of carbon dioxide from coal. *Fuel*, 1959, 38(3): 333—337.
- [22] 王佑安, 杨思敬. 煤和瓦斯突出危险煤层的某些特征. *煤矿安全*, 1980, 11(1): 3—9.
- [23] 杨其鑫, 王佑安. 煤屑瓦斯扩散理论及其应用. *煤炭学报*, 1986(3): 87—94.
- [24] Marecka A, Mianowski A. Kinetics of CO₂ and CH₄ sorption on high rank coal at ambient temperatures. *Fuel*, 1998, 77(14): 1691—1696.
- [25] Wang K, Zang J, Wang G, et al. Anisotropic permeability evolution of coal with effective stress variation and gas sorption; model development and analysis. *International Journal of Coal Geology*, 2014, 130: 53—65.
- [26] Mitra PP, Sen PN, Schwartz LM. Short-time behavior of the diffusion coefficient as a geometrical probe of porous media. *Physical Review B Condensed Matter*, 1993, 47(14): 8565—8574.
- [27] Skoulidis AI, Sholl DS. Molecular dynamics simulations of self-diffusivities, corrected diffusivities, and transport diffusivities of light gases in four silica zeolites to assess influences of pore shape and connectivity. *The Journal of Physical Chemistry A*, 2003, 107(47): 10132—10141.
- [28] Kärger J, Ruthven DM, Theodorou DN. *Diffusion in Nanoporous Materials*. Hoboken: John Wiley & Sons, 2012.
- [29] Zhang Y. *Geochemical kinetics*. Princeton: Princeton University Press, 2008.
- [30] Yang Q, Xue J, Li W, et al. Comprehensive evaluation and interpretation of mercury intrusion porosimetry data of coals based on fractal theory, Tait equation and matrix compressibility. *Fuel*, 2021, 298: 120823.
- [31] Guo J, Kang T, Kang J, et al. Effect of the lump size on methane desorption from anthracite. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2014, 20: 337—346.
- [32] 刘彦伟. 煤粒瓦斯放散规律、机理与动力学模型研究. 焦作: 河南理工大学, 2011.
- [33] Zhao W, Cheng Y, Jiang H, et al. Role of the rapid gas desorption of coal powders in the development stage of outbursts. *Journal of Natural Gas Science & Engineering*, 2015, 28: 491—501.

Research Progress on the Control Mechanism of Coal Pore Space Geometric Characteristics on the Shape of Gas Desorption Curves

Wang Kai^{1,2*} Zhao Wei^{1,2*}

1. *Beijing Key Laboratory for Precise Mining of Intergrown Energy and Resources, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083*

2. *School of Emergency Management and Safety Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083*

Abstract Coal pore space geometric characteristics control the specific shape of gas desorption from coal. Establishing the quantitative relationship between gas sorption-diffusion characteristics and pore space geometric characteristics is one of the most important scientific issues that should be solved about the controlling mechanism of gas desorption. Firstly, the main defects of the desorption diffusion model are thoroughly summarized. Then, a method to establish gas diffusion models that can invert the geometric parameters of pores is proposed. By using the boundary induction characteristics of the self-diffusion coefficient, a mathematical model describing the attenuation characteristics of the gas apparent diffusion coefficient is obtained, which can be further introduced into the classical unipore diffusion model, forming an unipore diffusion model containing pore geometry parameters. At last, several scientific and engineering problems that need to be solved urgently regarding the area of gas sorption-diffusion are summarized. The research process points out the direction and paths for quantitatively studying the relationship between coal pore structure and gas desorption curve shape, and it provides an important theoretical basis for further realization of accurate gas extraction and intelligent outburst prevention.

Keywords gas desorption; pore characteristics; diffusion model; self-diffusion coefficient

(责任编辑 刘敏)

* Corresponding Authors, Email: kaiwang@cumtb.edu.cn; 381zhao@cumtb.edu.cn