

# 成都平原浅层天然气高瓦斯隧道抽排性能评价

苏培东<sup>1</sup>, 何坤宸<sup>1</sup>, 黎俊麟<sup>2</sup>, 李有贵<sup>1</sup>

(1. 西南石油大学 地球科学与技术学院, 四川 成都 610500; 2. 四川省公路规划勘察设计研究院, 四川 成都 610041)

**摘要:** 针对浅层天然气工区高瓦斯隧道盾构施工难的问题, 借助工程实例, 采用理论分析、数值模拟和现场试验的方法, 分析了成都平原浅层天然气抽排性能的影响因素, 确定了研究区的有效抽排半径和抽排时间。结果表明, 当裂隙渗透率为 39 mD、瓦斯压力为 0.31 MPa 时, 研究区浅层天然气高瓦斯工区的有效抽排半径为 5 m、抽排时间为 60 min, 与煤层瓦斯的抽排参数差异巨大; 抽排负压对抽排流量影响较大, 对有效抽排半径影响较小; 抽排流量和有效抽排半径与地层初始渗透率的变化呈现正相关关系。

**关键词:** 瓦斯隧道; 瓦斯抽排; 数值模拟; 现场试验; 砂岩地层

中图分类号: U452.1<sup>+</sup>

文献标志码: A

## Evaluation of Drainage Performance of High-gas Tunnel in Chengdu Plain Shallow Natural Gas Area

SU Peidong<sup>1</sup>, HE Kunchen<sup>1</sup>, LI Junlin<sup>2</sup>, LI Yougui<sup>1</sup>

(1. School of Geoscience and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China; 2. Sichuan Highway Planning, Survey, Design and Research Institute, Chengdu 610041, China)

**Abstract:** Aiming at the difficulty of shield construction of high-gas tunnel in the shallow natural gas work area, with the help of engineering examples, the influencing factors of drainage performance of shallow natural gas in Chengdu Plain were analyzed by using theoretical analysis, numerical simulation and field test, and the effective radius and drainage time in the study area were determined. The results show that when the fracture permeability is 39 mD and the gas pressure is 0.31 MPa, the effective pumping radius of high-gas area of shallow natural gas in the study area is 5 m, and the pumping time is 60 min, which is greatly different from the coal seam gas. The negative pressure of pumping has a great effect on the discharge, but a little effect on the effective pumping radius. The

discharge and effective pumping radius are positively correlated with the change of initial permeability of formation.

**Keywords:** gas tunnel; gas drainage; numerical simulation; field test; sandstone stratum

随着地下交通的快速发展, 在云南、新疆、上海、浙江、四川等地都相继出现了隧道高瓦斯问题<sup>[1]</sup>。这一问题的出现对优质环保、经济高效的现代化盾构技术构成了挑战<sup>[2]</sup>, 促使众多学者从掘进<sup>[3]</sup>、通风<sup>[4]</sup>、监测<sup>[5-6]</sup>、盾构电气防爆改造<sup>[7-8]</sup>、超前地质预报<sup>[9]</sup>等角度对瓦斯工区中的盾构技术进行改进。然而, 以上改进措施通常具有高成本、低效益、治标不治本等缺点, 因此瓦斯抽排技术由于其成本低、设备简单、源头治理等优势逐渐进入大众视野。

浅层天然气中的有害气体一般浓度高、渗透性强, 传统的通风、监测对盾构工法来说效果不佳, 瓦斯还是会沿着盾构机出渣处、管片间等通道渗透, 造成瓦斯燃烧和爆炸<sup>[10-12]</sup>。抽排工法作为一种通过机械制造负压抽排地层中有害气体的主动治理措施, 可以有效排放工区的有害气体, 为盾构施工提供保障。2015 年, 我国首次采用抽排手段降低巷道施工风险, 实现了高瓦斯煤矿盾构作业, 证明了在高瓦斯工区可采用抽排手段为盾构施工提供保障。随后, 部分学者进一步围绕煤系高瓦斯隧道的抽排参数进行了有限的研究<sup>[13-15]</sup>, 而对浅层天然气隧道的瓦斯抽排技术的研究还较少。处于浅层天然气工区的高瓦斯隧道与煤系高瓦斯隧道有所不同。对于煤系地层, 瓦斯主要以吸附态赋存在煤层中<sup>[16]</sup>, 其富集规律有重点可寻。在煤层中执行抽排措施时, 由于煤层的低渗透性和瓦斯的赋存特点, 抽排时间较长, 抽排的影响半径也较小。对于浅层天然气而言, 瓦斯以

收稿日期: 2022-08-30

基金项目: 四川省应用基础研究计划(19YYJC1060); 四川兴蜀工程勘察设计集团有限公司科研项目(MT2021-016)

第一作者: 苏培东, 教授, 工学博士, 主要研究方向为地质灾害防治与治理。

E-mail: spdong@126.com



论文  
拓展  
介绍

游离态赋存在岩层孔隙、裂隙中<sup>[17]</sup>,瓦斯分布的空间(预测)问题进一步突出,随机性更强。在浅层天然气工区中实施抽排措施时,抽排影响半径增加、时间缩短。因此,浅层天然气隧道的抽排参数、抽排效果与煤系隧道有着明显的区别,从工程安全和效益的角度应单独进行研究。

作为川西的冲积平原,成都平原浅层中天然气含量丰富,这些气体一般通过断裂构造运移到浅部砂岩中,形成富集带。当地下工程穿越这些区域时,盾构工法被严重制约。依托成都轨道交通19号线(下文简称19号线)新码头街站—红莲村南站(新红区间)工程实例,在对研究区浅层天然气赋存规律充分认识的基础上,通过数值模拟和现场抽排试验,充分考虑工程效益,对成都平原浅层天然气高瓦斯工区瓦斯抽排性能的影响因素、最优抽排半径和抽排时间进行了系统研究,以为相关工程的高瓦斯区段的治理提供理论依据。

## 1 研究区概况

成都平原经过三叠系有机碎屑岩的巨厚沉积发育

了丰富的浅层天然气。由于浅层天然气主要以游离态赋存在岩层中,研究区浅部地层中以泥岩为代表的致密岩无法储存大量浅层天然气,这些气体通过断裂构造运移到砂岩层段进行储存,因此对地下工程施工造成了严重的威胁。19号线途经双流区、武侯区、天府新区,线路整体位于川西坳陷区南部、成都凹陷低缓构造带东侧<sup>[18-19]</sup>。19号线新红区间位于苏码头背斜核部穿越苏码头气田,工区内发育有龙家埂逆断层和李红塘逆断层,瓦斯地质条件在成都平原具有代表性。新红区间地表以第四系人工填土和粉质黏土为主,围岩为白垩系下统天马山组—侏罗系上统蓬莱镇组( $K_1t-J_3p$ )泥岩、砂岩,地层产状近水平,不涉及煤系地层。受区域性构造作用,岩体节理裂隙较发育,延伸长0.5~5.0 m不等,断层附近岩体较破碎,岩心以短柱状为主。

前期勘察表明,苏码头气田的天然气通过龙家埂、李红塘逆断层及其伴生裂隙网络向浅部运移<sup>[20]</sup>,并在19号线新红区间的K100+990.0—K101+656.5里程段形成了浅层天然气富集区(高瓦斯区段)。该区间的现场瓦斯检测结果表明,埋深越大、距断层越近,瓦斯体积分数越高,而且砂岩为浅层天然气的主要储集岩体(见图1)。

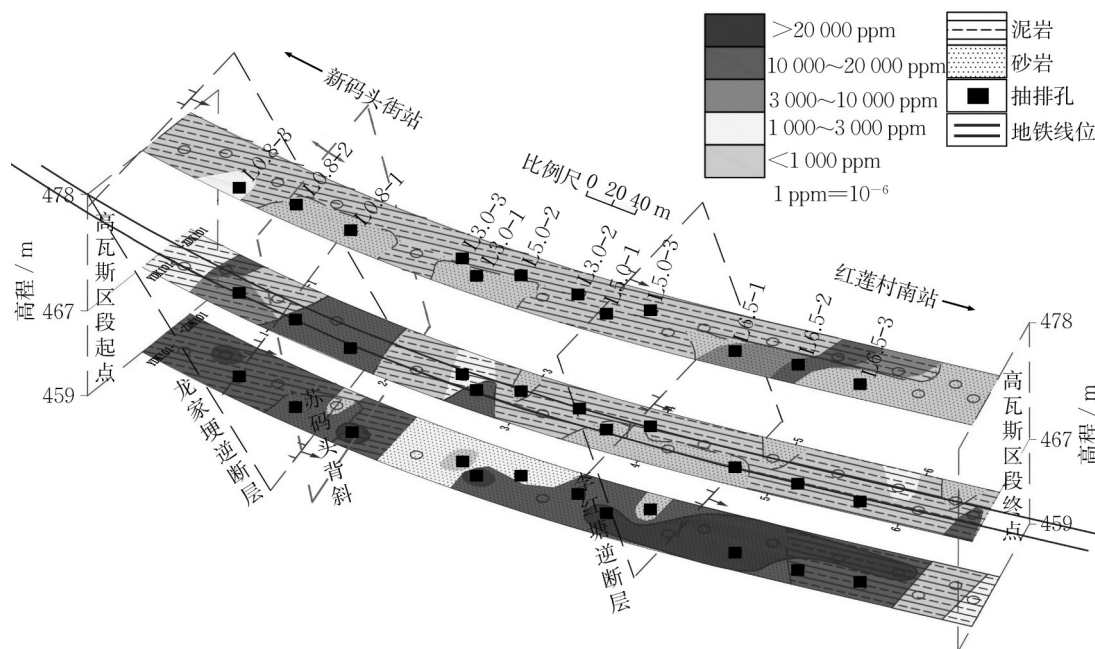


图1 新红区间瓦斯体积分数分布<sup>[1]</sup>

Fig.1 Distribution of gas volume fraction in Xinhong section<sup>[1]</sup>

## 2 瓦斯抽排理论和试验方法

### 2.1 瓦斯抽排数学模型

在钻孔抽排瓦斯的过程中,砂岩基质孔隙中的

瓦斯首先扩散到裂隙中,再进一步渗流到钻孔中。因此,砂岩地层中瓦斯的运移场可以分为2种:砂岩基质孔隙中的扩散场和裂隙系统中的渗流场,在这2个场之间存在着大小为 $Q_s$ 的质量交换(见式(2))。

由于工区中的瓦斯压力较小,其变化对岩体有效应力的影响可以忽略,因此不考虑渗流场和岩体应力场之间的耦合作用。为了方便求解,作出如下假设:①瓦斯流动遵从连续性原理;②将运移过程中瓦斯视为理想气体,不考虑温度对气体状态的影响,考虑气体的压缩性和滑脱效应;③地层为各向同性的线弹性材料。

### 2.1.1 扩散场控制方程

浅层天然气在砂岩中的赋存方式以游离态为主,单位体积砂岩基质孔隙中赋存的瓦斯质量表达式如下所示:

$$p_m V = \frac{m_m}{M_c} RT \xrightarrow{V=\phi_m} m_m = \phi_m \frac{M_c}{RT} p_m \quad (1)$$

式中: $m_m$ 为单位体积岩石基质中赋存的瓦斯质量,kg; $\phi_m$ 为岩石基质孔隙率,%; $M_c$ 为甲烷分子物质的量; $R$ 为理想气体常数, $J \cdot (mol \cdot K)^{-1}$ ;  $T$ 为温度,K; $p_m$ 为岩石基质压力,MPa。在瓦斯抽排过程中,砂岩基质孔隙中的游离瓦斯将作为质量源向外扩散到裂隙中,使得渗流持续进行,砂岩基质孔隙与裂隙系统质量交换的通量计算式如下所示:

$$Q_s = \frac{M_c}{RT} D \delta_s (p_m - p_f) = \frac{\partial m_m}{\partial t} \quad (2)$$

式中: $D$ 为瓦斯扩散系数, $m^2 \cdot s^{-1}$ ;  $\delta_s = 3\pi^2/L^2$ 为岩石基质形状因子, $m^{-2}$ ,其中 $L$ 为裂隙间距,m; $p_f$ 为裂隙系统中的瓦斯压力,MPa。将式(1)对 $p_m$ 求导,再将 $\frac{\partial m_m}{\partial p_m}$ 代入式(2),整理可得扩散场的控制方程,如下所示:

$$\frac{M_c}{RT} D \delta_s (p_m - p_f) = \frac{\partial m_m}{\partial t} \xrightarrow{\frac{M_c}{RT} = \frac{\partial m_m}{\phi_m \partial p_m}} \frac{\partial p_m}{\partial t} = \frac{D \delta_s (p_m - p_f)}{\phi_m} \quad (3)$$

### 2.1.2 瓦斯渗流控制方程

在 $\Delta t$ 内,多孔介质流体场的任意控制体积中流体质量的变化是流入该体积和流出该体积的流体质量差加上该控制体积本身产生或吸收的质量 $Q^{[21]}$ ,依据质量守恒定律得到抽排过程中瓦斯运移控制方程,如下所示:

$$\frac{\partial(\phi_f \rho_f)}{\partial t} = -\nabla \cdot (\rho_f v) Q (1 - \phi_f) \quad (4)$$

$$v = -\frac{k_c}{\mu} \nabla p_f \quad (5)$$

式中: $\phi_f$ 为裂隙系统孔隙率,%; $\rho_f$ 为裂隙系统瓦斯密度, $kg \cdot m^{-3}$ ;  $v$ 为瓦斯渗流速度, $m \cdot s^{-1}$ ;  $k_c$ 为裂隙有效渗透率,mD( $1 \text{ mD} = 0.987 \times 10^{-3} \mu m^2$ );  $\mu$ 为气体

动力黏度,甲烷的动力黏度为 $1.08 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot s$ 。

将 $v$ 代入式(4)中可以得到瓦斯渗流的控制方程,如下所示:

$$\phi_f \frac{\partial p_f}{\partial t} + p_f \frac{\partial \phi_f}{\partial t} = \nabla \cdot \left( \frac{k_c}{\mu} p_f \nabla p_f \right) + \frac{1}{\tau} (p_m - p_f) (1 - \phi_f) \quad (6)$$

## 2.2 现场瓦斯抽排试验

现场瓦斯抽排试验地点选取在新红高瓦斯工区内,共布置4组不同间距的抽排孔及监测孔对钻孔抽排瓦斯效果进行测试,监测孔与抽排孔的间距 $l$ 分别为0.8、3.0、5.0、6.5 m,每组共进行3次试验,防止地层偶然性对抽排效果产生的影响;每次钻孔相隔10.0 m以上,防止试验之间相互影响。抽排孔及监测孔均深入工区砂岩层中,套管下至需抽排的砂岩层段,防止抽排过程中密封失效。抽排仪器参数如表1所示。为了防止地下水的干扰,抽排仪器采用电导式液位继电器、气密性气水分离装置实现自动降水抽排。测定瓦斯有效抽排半径的依据为监测孔内瓦斯体积分数的变化。当监测孔施钻完成后,封孔12 h,使用SL-808A瓦斯检测仪进行循环检测,当监测孔内的瓦斯体积分数在抽排一定时间后无明显下降,则认为该距离在瓦斯有效抽排半径之外。

表1 抽排设备参数

Tab.1 Parameters of pumping equipment

设备名称	型号	极限压力/Pa	功率/kW	转速/(r·min <sup>-1</sup> )
防爆式真空泵	2XZF-15B	0.004	1.5	1400

## 3 瓦斯抽排数值模拟

依据新红区间下伏白垩系天马山组砂岩物性参数建立二维数值模型,如图2所示。模型几何尺寸为20 m×20 m,钻孔位置位于全域中心,钻孔直径为 $d$ ,方向垂直于地面,场地的边界为压力边界。模型网格划分采用三角形网格划分,考虑到钻孔附近地层瓦斯压力梯度较大,对此处进行了网格加密。

根据所取岩芯样品及气样进行相关试验,工区砂岩地层及瓦斯气体基本物性参数如表2所示。

### 3.1 有效抽排半径

在抽排负压 $P_c = 15 \text{ kPa}$ 、瓦斯压力为0.31 MPa的条件下,模拟新红区间砂岩地层浅层天然气压力、流速的变化特征,以此研究特定条件下成都平原浅层天然气高瓦斯区间有效抽排半径,结果如图3所



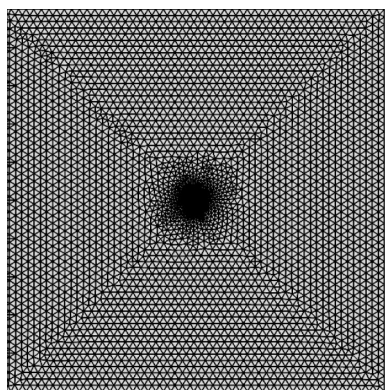


图2 几何模型及网格划分

Fig.2 Geometric model and mesh generation

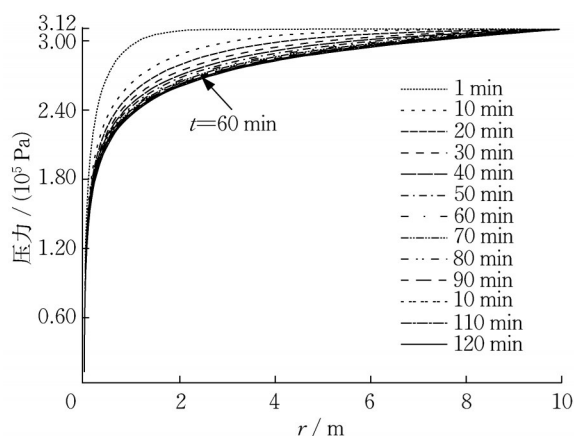
表2 瓦斯抽排模型的物理参数

Tab.2 Physical parameters of gas drainage model

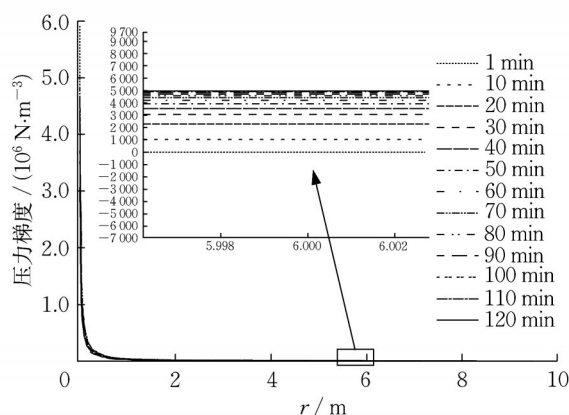
参数名称	数值	单位
地层基质孔隙率	6.86	%
地层裂隙度	7.6	%
裂隙渗透率	$0.39 \times 10^{-13}$	$\text{m}^2$
岩体视密度	2.48	$\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$
甲烷动力黏度	$1.08 \times 10^{-5}$	$\text{Pa} \cdot \text{s}$
甲烷摩尔质量	16	$\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$
标况下甲烷摩尔体积	22.4	$\text{L} \cdot \text{mol}^{-1}$
气体状态常数	8.413 51	$\text{J} \cdot (\text{mol} \cdot \text{K})^{-1}$
地层温度	293	K
初始大气压力	0.1	MPa
地层瓦斯初始压力	0.31	MPa

示。从图3可以看出,距离抽排孔越近的地方,压力越小、梯度越大、渗流速度越大。随着与抽排孔间距

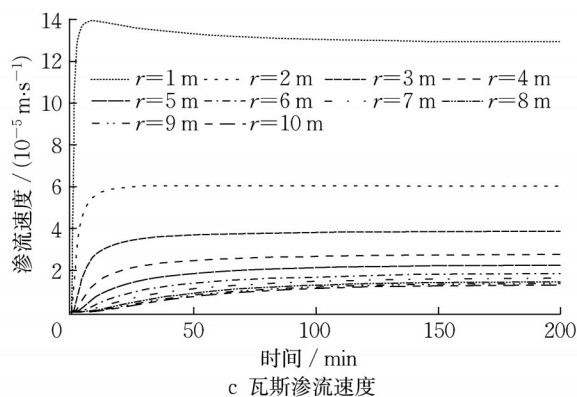
$r$ 的增加,压力梯度和渗流速度非线性减少,并且在 $r=6\text{ m}$ 附近3个参数同时趋于收敛。



a 不同时刻地层瓦斯压力



b 不同时刻地层瓦斯压力梯度



c 瓦斯渗流速度

图3 瓦斯压力、渗流速度计算结果

Fig.3 Calculation results of gas pressure and seepage velocity

图3a显示,瓦斯压力曲线在0~2 m内斜率最大,该范围内瓦斯压力平均值较初始值降低55.75%,2~5 m内瓦斯压力平均值较初始值降低7.50%。当抽排影响至6 m时砂岩地层中瓦斯压力曲线已呈收敛态势,压力值为地层原始压力值的96.8%。图3b显示抽排孔周围压力梯度在0~2 m

内剧烈变化。在2~5 m内相对平稳,相较于 $\frac{dp}{dr}_{r=0}$

而言, $\frac{dp}{dr}_{r=5}$ 已衰减99.5%,而当 $r>6\text{ m}$ 时压力梯度

呈现直线变化,其值相对于 $\frac{dp}{dr}_{r=0}$ 而言已接近于零。

图3c显示了距离抽排孔不同位置处的瓦斯渗流速度随着时间的变化,各曲线的形态基本相似。从图3可以看出,随着与抽排孔距离的增加,渗流速度在最初下降幅度最大,5 m后降幅逐渐变缓,6 m后开始趋于一个稳定值。与 $v_{r=1\text{m}}$ 相比, $v_{r=5\text{m}}$ 衰减85.3%, $v_{r=6\text{m}}$ 衰减88.5%。综上,在砂岩地层中距离抽排孔5~6 m内的压力梯度和渗流速度已经相对较弱,为了保证抽排的有效性,当地层裂隙渗透率为39 mD、瓦斯压力为0.31 MPa时,成都平原的有效抽排半径为5 m。

### 3.2 抽排时间

在相同条件下模拟新红区间砂岩地层中瓦斯渗流参数随时间的变化特征,以此研究特定条件下成都平原抽排工程的抽排时间。图4为瓦斯抽排过程中时间为1、50、60、100、120 min时的地层瓦斯压力

等值线图。从图4可以看出,受抽排负压影响,随着时间的增加抽排的影响范围逐步扩大,但是扩大的速率逐步变缓。对比不同时刻的瓦斯压力等值线图可以看出,60 min以后抽排的影响范围基本不再扩大,图3a也说明60 min后抽排孔周围各区域的瓦斯压力不再降低,而趋于一个定值。图3c显示,随着时间的增加,离抽排孔近的区域瓦斯渗流速度先升高后降低。这可能是砂岩的渗透率较大,抽排开始时近区域比远区域的压力下降更快,导致压力梯度增加,流速增加;随着压力在地层中的传递,抽排孔附近压力下降趋势减缓,梯度减小,从而流速降低。图3c还表明,抽排前20 min瓦斯渗流速度变化最为剧烈,在60 min以后各个截面处的渗流速度不再变化,瓦斯渗流场达到平衡。

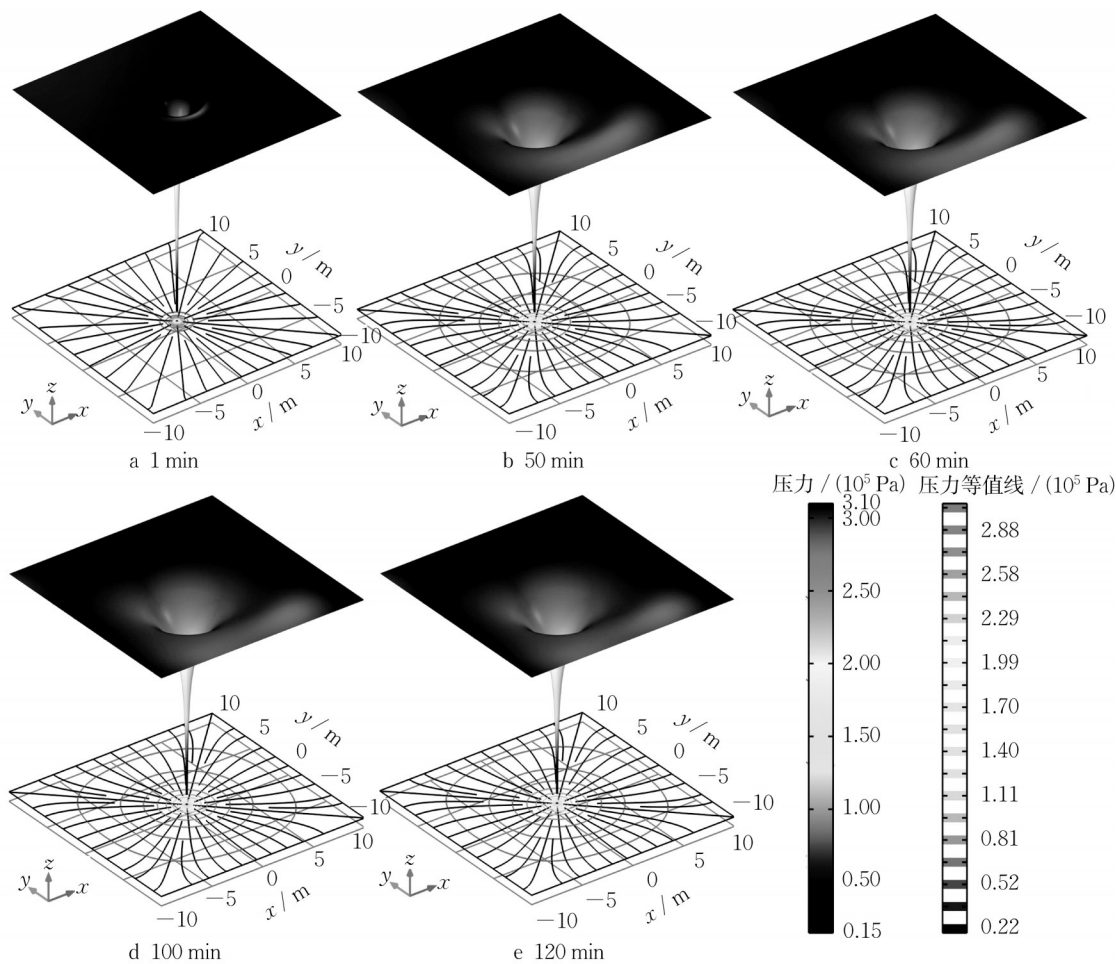


图4 各时刻瓦斯压力等值线图

Fig.4 Contour map of gas pressure at each moment

根据抽排孔处的渗流速度,绘制了抽排孔流量变化特征曲线(见图5c)。图5c显示,抽排孔体积流量随着时间的增加而减小,在前20 min体积流量衰减较快,60 min后体积流量呈低斜率的线性衰减。对

比抽排孔体积流量 $q_{t=1\text{min}}=0.0109\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ , $q_{t=60\text{min}}=0.00452\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 衰减了58.5%,抽排孔中体积流量已衰减大半,并趋于一个常数。同时,由抽排区域瓦斯减少情况(见图5b)可知,随着时间的增加,瓦斯体

积下降总量逐渐增加,下降速率却逐步降低。由图 5b 可知,瓦斯体积下降总量  $V_{t=60\text{ min}}=6.4\text{ m}^3$ ,  $V_{t=200\text{ min}}=8.1\text{ m}^3$ ,即 60 min 完成了 200 min 下降总量的 79.0%。以上数据都说明,在瓦斯压力为 0.31

MPa、地层裂隙渗透率为 39 mD 的条件下,抽排 60 min 后砂岩地层中瓦斯的渗流达到平衡,地层中的瓦斯体积分数达到最低值,继续抽排瓦斯体积分数将不会大幅降低,已经接近地层的抽排极限。

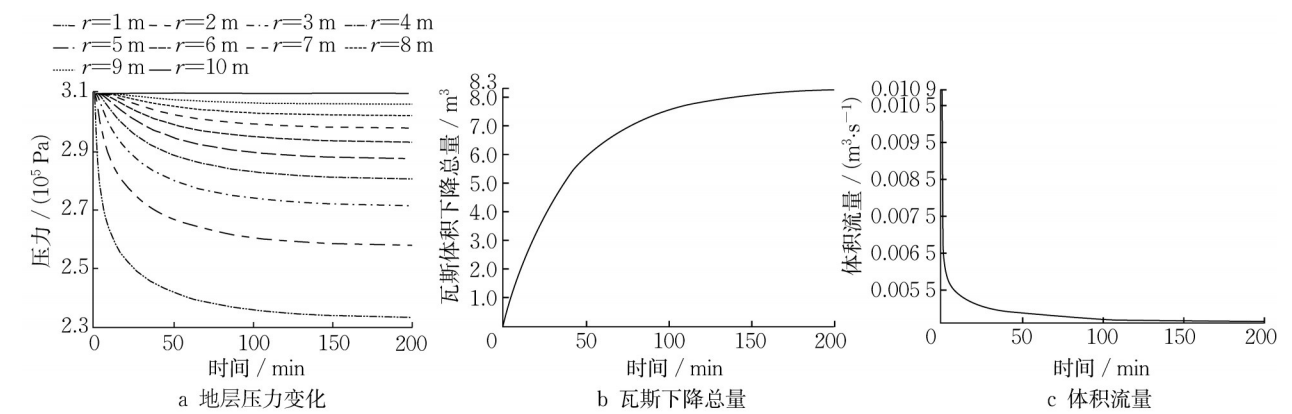


图 5 抽排孔体积流量特征曲线  
Fig.5 Characteristic curve of volume flow rate for drainage hole

综合上述评价依据,从工程效益考虑,当地层裂隙渗透率为 39 mD、瓦斯压力为 0.31 MPa 时,判定成都平原浅层天然气高瓦斯工区抽排时间为 60 min,有效抽排半径约为 5 m。根据 Zhang 等<sup>[22]</sup>的研究,经过 180 d 的抽排后煤层的有效抽排半径仅为 1.1~1.2 m,采用水力冲洗技术增大煤层渗透率后,有效抽排半径也仅增大到 3.6~3.8 m。因此,对比煤层瓦斯抽排,成都平原浅层天然气瓦斯的抽排半径更大,抽排时间也极大缩小。根据瓦斯压力分布、瓦斯渗流速度变化等,对研究区浅层天然气的抽排效果进行了划分,结果如表 3 所示。

表 3 不同半径抽排效应评价  
Tab.3 Assessment of pumping effect with different radii

抽排半径/m	瓦斯压力	瓦斯流动性	达到抽排效果所需时间	综合评价
0~2	大幅降低	强	短时间内	有利抽排区
2~5	小幅降低	中	一定长度时间	有效抽排区
5~7	微弱降低	弱	较长时间	较难抽排区
>7	基本无影响	微弱	没有有效抽排时间	无效抽排区

3.3 抽排性能的影响参数

3.3.1 抽排负压对抽排性能的影响

保持其他条件不变,在抽排时间  $t=60\text{ min}$  时,模拟不同负压对成都平原浅层天然气抽排性能的影响。以端点和  $r=10\text{ m}$  创建数据集。结果表明:抽排负压越小,同一位置降压越大(见图 6b、c),当抽排负压小于 15 kPa 后,降压幅度越来越小,并趋于一个常数。图 6a 显示不同抽排负压下瓦斯压力的收敛半径

都在 5 m 左右,有效抽排半径并未因抽排负压的变化而发生较大变化。这可能是因为浅层天然气在砂岩的赋存方式以游离态为主,当砂岩的物性参数不变时,压力梯度降至瓦斯在砂岩中渗流的启动梯度后不再下降,压力收敛范围也就不会发生较大变化。相反,抽排体积流量随着抽排负压的变化有较大的变化。由图 6d 可知,抽排体积流量随着抽排负压的增大而减小,当抽排负压从 15 kPa 下降到 1 kPa 时,体积流量大约增加了 30.4%。因此,抽排负压越小,抽排效率越高,但有效抽排半径基本不受影响。

3.3.2 地层初始渗透率对抽排性能的影响

取抽排时间  $t=60\text{ min}$ ,模拟不同初始渗透率下,研究区含气层中各个抽排参数的变化,如图 7 所示。图 7a 显示,裂隙渗透率  $K_0=0.05\text{ mD}$  时,压力特征曲线在 0.48 m 处开始收敛; $K_0=0.5\text{ mD}$  时,压力特征曲线在 1.85 m 处开始收敛; $K_0=5\text{ mD}$  和 50 mD 时,收敛位置为 5 m 和 8 m 处。可以看出,随着砂岩渗透率的提高,压力特征曲线的收敛位置越远,有效抽排半径越大。这也说明了浅层天然气的有效抽排半径主要与地层的物性参数有关,受抽排负压的影响并不大。从图 7b 看出,随着渗透率的增大,抽排体积流量也在增加,读取  $t=60\text{ min}$  时各个渗透率下的体积流量可以得到  $q_{K_0=0.05\text{ mD}}=1.200\ 0\times 10^{-5}\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $q_{K_0=0.5\text{ mD}}=0.940\ 0\times 10^{-4}\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $q_{K_0=5\text{ mD}}=0.000\ 7\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $q_{K_0=50\text{ mD}}=0.006\ 0\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 。可以看出,渗透率的变化与抽排效果有着近线性的正相关性。因此,砂岩地层渗透率越大,瓦斯压力降低就越



快,曲线收敛点距离抽排孔中心就越远,体积流量和有效抽排半径也就越大。

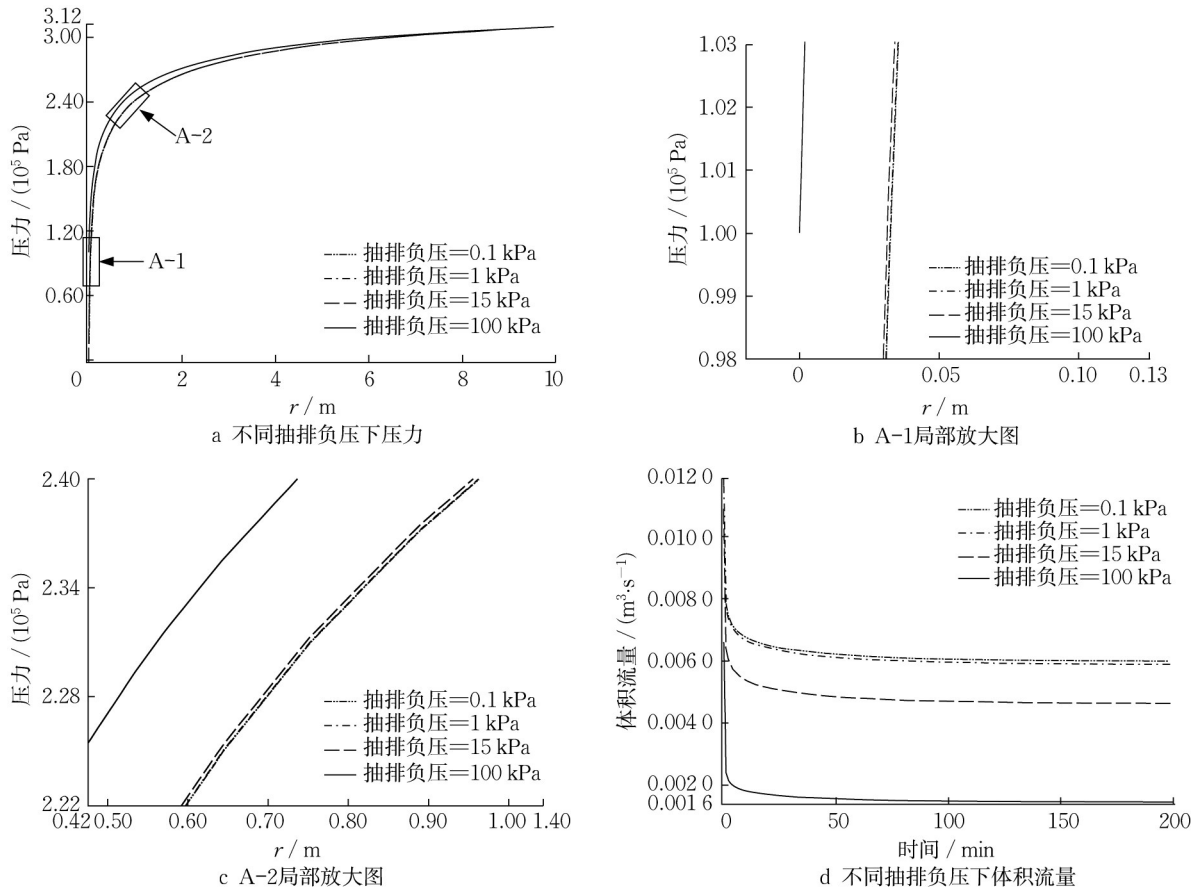


图6 不同负压下的瓦斯抽排参数计算结果

Fig.6 Calculation results of gas drainage parameters under different negative pressures

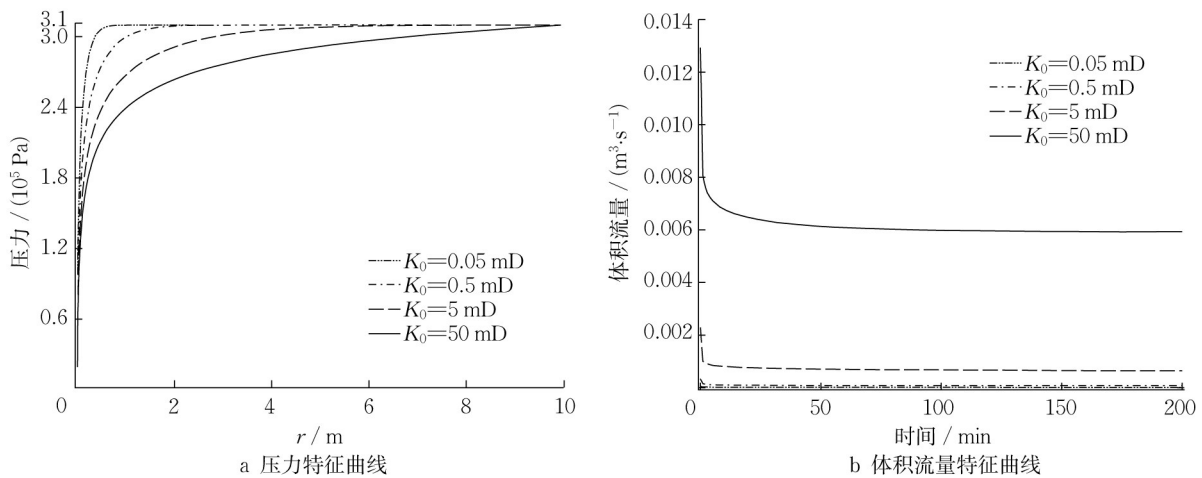


图7 不同初始渗透率下瓦斯抽排参数计算结果

Fig.7 Calculation results of gas drainage parameters under different initial permeabilities

## 4 工程验证

依据前述试验方法,在新红区间进行了现场抽排试验(见图8)。抽排机性能参数如表1所示,其中

抽排压力设置为15 kPa。试验中各个抽排孔的位置和试验参数如图1和表4所示,试验结果如图9所示。图9中,CPZKA-B为监测孔编号,A表示 $l$ ,B表示所监测的抽排孔孔号。

表4 抽排孔试验参数

Tab.4 Experimental parameters of drainage hole

工况	孔号	孔深/m	覆盖层厚度/m	水位/m	泵深/m
抽排孔( $l=0.8$ m)	L-0.8-1	20	5.8	4.8	17
	L-0.8-2	20	6.4	4.5	17
	L-0.8-3	21	5.4	6.2	17
抽排孔( $l=3.0$ m)	L-3.0-1	20	5.2	13.2	17
	L-3.0-2	20	5.6	12.6	17
	L-3.0-3	20	5.6	13.5	17
抽排孔( $l=5.0$ m)	L-5.0-1	20	5.4	6.7	17
	L-5.0-2	20	5.9	7.2	17
	L-5.0-3	25	5.6	4.2	19
抽排孔( $l=6.5$ m)	L-6.5-1	20	6.6	11.2	17
	L-6.5-2	20	6.2	12.5	17
	L-6.5-3	20	5.8	12.1	17

通过图9a可以看出,在距离抽排孔0.8 m的位置,随着抽排的进行,地层中瓦斯迅速降低,在2~3 min后可将监测孔瓦斯体积分数降低至零。在 $l=3.0$  m的位置,要将地层中瓦斯体积分数降低至零,所需时间增加至15~17 min(见图9b)。此外, $l=3.0$  m的曲线还显示,在抽排试验开始的1 min内监测孔中瓦斯体积分数没有变化(在 $l=5.0, 6.5$  m的



图8 现场试验照

Fig.8 Field test photo

曲线中也有相同的现象),这是因为试验开始时会使用气水分离装置降低抽排孔周围水位,在这期间并未对瓦斯进行抽排,所以监测孔中瓦斯体积分数几乎没有变化。在 $l$ 增加至5.0 m后,监测孔内瓦斯体积分数在气水分离装置启动1~5 min后迅速降低,在60 min以后瓦斯体积分数达到最低值( $<200$  ppm)并保持不变。根据模拟结果可知,这主要是因为60 min后地层中瓦斯压力不再降低而趋于常数,所以地层中瓦斯体积分数维持在一个最小值。当 $l=6.5$  m时,从CPZK6.5-1号监测孔中观察到,在抽排试验开始的3~5 min孔内瓦斯体积分数呈上升

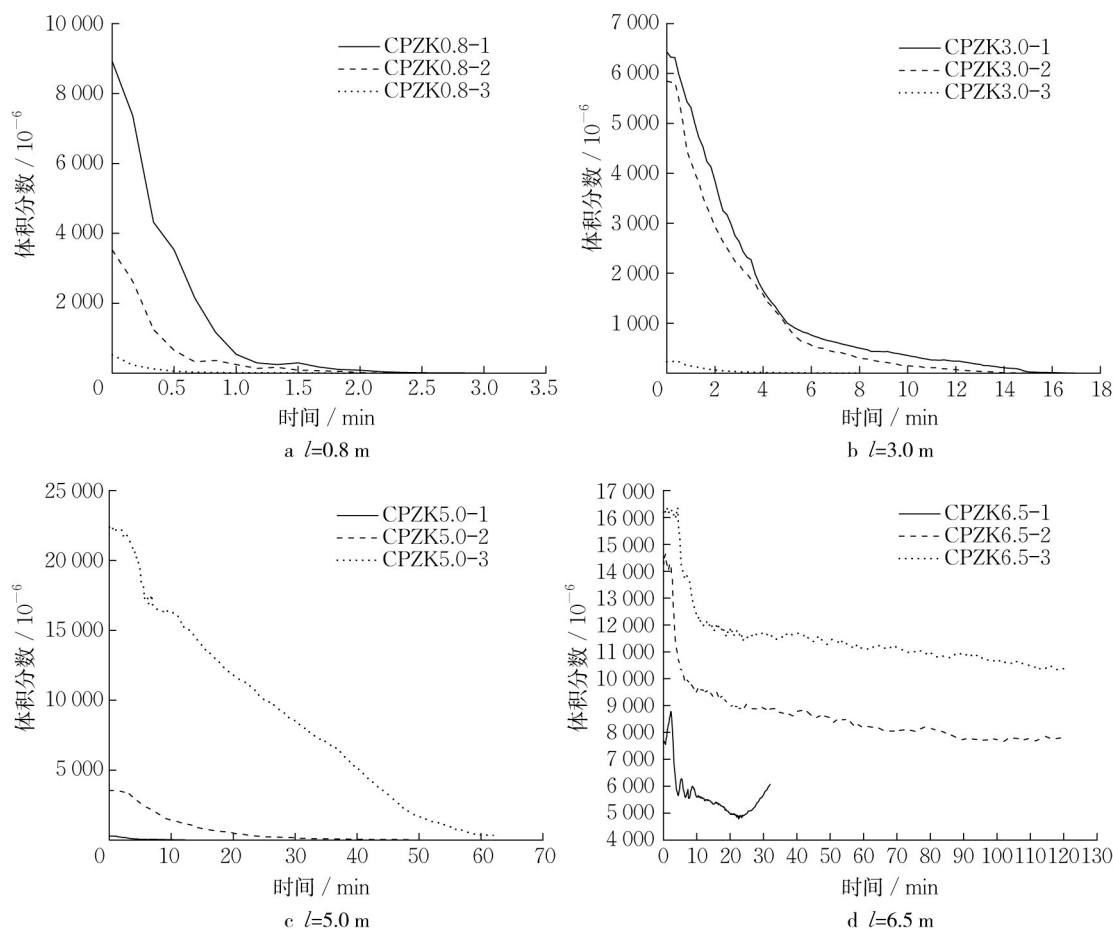


图9 现场瓦斯抽排试验结果

Fig.9 Field gas drainage test results



趋势,该现象可能是气水分离装置启动后,地下水位下降,使原本被地下水封堵的游离气逸出,导致监测孔内瓦斯体积分数暂时升高,对试验结果影响不大,在后续较长的抽排过程中该监测孔内瓦斯体积分数下降不明显,需要较长的时间才可使监测孔内瓦斯体积分数降低至10 000 ppm内,无实际工程意义。

综合以上对新红区间现场瓦斯抽排试验的分析可知:在3.0 m范围内抽排试验效果明显,可以在短时间内将地层瓦斯体积分数降至低值,基本不受初始瓦斯体积分数的影响,间距为5.0 m的抽排试验可以在60 min内将地层瓦斯体积分数降至最低,当抽排范围达到6.5 m时抽排效果不佳。将试验中不同半径下的抽排效果与模拟所得结果进行对比(见表3),发现两者具有较好的一致性,并且抽排时间和抽排半径的结果也接近,说明现场试验与数值模拟吻合较好。

## 5 结论

(1)运用理想气体状态方程和质量交换通量公式推导了扩散场的控制方程,基于流体连续性方程和气体状态方程推导了渗流场控制方程。

(2)运用数值模拟方法分析了新红区间的瓦斯抽排过程,相较于煤层气,浅层天然气的抽排半径更大、抽排时间更短。同时,确定了当裂隙渗透率为39 mD、地层瓦斯压力为0.31 MPa、研究区浅层天然气的有效抽排半径为5.0 m时,抽排60 min后研究区地层中瓦斯体积分数达到最低,继续抽排瓦斯体积分数将不会下降。

(3)抽排负压对成都平原浅层天然气有效抽排半径影响不大,但能提高抽排量;研究区砂岩地层渗透率的差异对抽排效果有着显著的影响,其值的变化与抽排流量和有效抽排半径的变化呈现正相关关系。

(4)现场瓦斯抽排试验证明,当抽排半径在5.0 m以内时,抽排泵能将地层中瓦斯抽排至较低值;当抽排半径上升至6.5 m时,抽排效果不佳。该现场试验结果与模拟结果有较好的相关性。

### 作者贡献声明:

苏培东:提供技术、材料和经费支持,并确立研究思路,负责论文的审核。

何坤宸:调研整理文献,设计论文框架,起草论文,修订论文。

黎俊麟:提出研究选题,参与现场试验的数据采集和整理。

李有贵:现场试验的实施,对论文的修订提出建设性意见。

### 参考文献:

- [1] 苏培东,黎俊麟,徐正宣,等.非煤系地层浅层天然气赋存规律及瓦斯隧道工程防护方案[J].中国铁道科学,2021,42(2):88. SU Peidong, LI Junlin, XU Zhengxuan, *et al.* Occurrence regularity of shallow natural gas in non-coal strata and protection scheme of gas tunnel engineering [J]. China Railway Science, 2021, 42(2): 88.
- [2] 陈湘生,李克,包小华,等.城市盾构隧道数字化智能建造发展概述[J].应用基础与工程科学学报,2021,29(5):1057. CHEN Xiangsheng, LI Ke, BAO Xiaohua, *et al.* Innovations in the development of digital and intelligent construction of urban shielded tunnels [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2021, 29(5): 1057.
- [3] 林文书,林建平,刘文斌.盾构瓦斯隧道掘进技术[J].隧道建设,2010,30(6):5. LIN Wenshu, LIN Jianping, LIU Wenbin. Shield tunnelling technology in gas-containing stratum [J]. Tunnel Construction, 2010, 30(6): 5.
- [4] 陈向红,张鸿儒,陈曦.考虑结构自重影响水下隧道通风竖井的水平振动特性研究[J].岩石力学与工程学报,2013,32(S2):3726. CHEN Xianghong, ZHANG Hongru, CHEN Xi. Research on horizontal vibration properties of underwater ventilation shaft of tunnel considering effect of self-weight of structure [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(S2): 3726.
- [5] 王国斌,利奕年.某公路瓦斯隧道综合勘察技术应用[J].岩土力学,2011,32(4):1273. WANG Guobin, LI Yinian. Application of comprehensive survey technique to gas tunnel of highway [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(4): 1273.
- [6] 左延红,程桦,程堂春.分数阶微分算子在煤矿监测数据融合处理中的应用[J].煤炭学报,2020,45(2):819. ZUO Yanhong, CHENG Hua, CHENG Tangchun. Application of fractional differential operator in coal mine detection data fusion processing [J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(2): 819.
- [7] 祝和意.高瓦斯盾构隧道施工控制关键技术分析[J].隧道建设,2016,36(11):1366. ZHU Heyi. Analysis of key construction control technologies for shield tunnel with high gas concentration [J]. Tunnel Construction, 2016, 36(11): 1366.
- [8] 杜文,伍军,王勇.双线铁路瓦斯长隧道快速施工设备配套及防爆改装探索[J].现代隧道技术,2011,48(2):164. DU Wen, WU Jun, WANG Yong. Outfit and explosion-proof remold of construction equipment for a double-track railway tunnel with gases [J]. Modern Tunnelling Technology, 2011, 48(2): 164.
- [9] 李术才,刘斌,孙怀凤,等.隧道施工超前地质预报研究现状及发展趋势[J].岩石力学与工程学报,2014,33(6):1090.

(下转第156页)