

中文引用格式:丁仰卫,杨海龙,鲁义,等. 磷石膏基自产气膨胀浆体自膨胀扩散特性研究[J]. 中国安全科学学报,2025,35(7): 82-90.

英文引用格式:DING Yangwei,YANG Hailong,LU Yi,et al. Study on spontaneous expansion and diffusion characteristics of phosphogypsum based self-produced gas expansion slurry [J]. China Safety Science Journal,2025,35(7):82-90.

磷石膏基自产气膨胀浆体自膨胀扩散特性研究^{*}

丁仰卫¹高级工程师,杨海龙¹,鲁义^{**2}教授,刘蔚廷²,谷旺鑫²,夏楚淇²

(1 山东鲁泰控股集团有限公司 鹿洼煤矿,山东 济宁 272350;

2 湖南科技大学 资源环境与安全工程学院,湖南 湘潭 411201)

中图分类号:X937;TD75

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.07.1208

基金项目:国家自然科学基金资助(52374200, 52274196, 52174180);国家重大人才工程青年项目(2022QB06801)。

【摘要】 为提高磷石膏基自产气膨胀浆体的注浆效率和准确性,分析磷石膏基自产气膨胀浆体密度随时间的变化,基于流体力学理论和浆体密度时变模型,建立浆体在自产气膨胀阶段的渗流扩散压力数学模型。通过自行搭建的磷石膏基自产气膨胀浆体相似模型试验系统,研究裂隙网络中磷石膏基自产气膨胀浆体在自膨胀阶段的渗流压力变化,修正浆体渗流扩散压力数学模型,验证修正后的渗流扩散压力数学模型的合理性。研究表明:浆体密度随时间变化趋势符合负指数幂特征;在自膨胀过程中,浆体扩散面积越来越大,浆体扩散面积的增幅越来越小;监测点的渗流压力的理论结果与试验结果的相对误差不超过10%,证明修正后的渗流扩散压力数学模型具有合理性。

【关键词】 磷石膏基自产气膨胀浆体; 自膨胀; 扩散特性; 浆体密度; 相似模型试验

Study on spontaneous expansion and diffusion characteristics of phosphogypsum based self-produced gas expansion slurry

DING Yangwei¹, YANG Hailong¹, LU Yi², LIU Weiting², GU Wangxin², XIA Chuqi²

(1 Luwa Coal Mine, Shandong Lutai Holding Group Co., Ltd., Jining Shandong 272350, China;

2 College of Resources, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan Hunan 411201, China)

Abstract: In order to improve the grouting efficiency and accuracy of phosphogypsum based self-produced gas expansion slurry, the change in density of phosphogypsum based self-produced gas expansion slurry with time was analyzed. Based on fluid mechanics theory and the time-varying model of slurry density, a mathematical model of the seepage diffusion pressure of the slurry during the self-produced gas expansion stage was established. Through a self-built phosphogypsum based self-produced gas expansion slurry similar model experiment system, the seepage pressure variation of phosphogypsum based self-produced gas expansion slurry in the fracture network during the self expansion stage was studied, and the mathematical model of the seepage diffusion pressure of the slurry was modified to verify the rationality of the modified mathematical model of seepage diffusion pressure. The results show that the trend of slurry

* 文章编号:1003-3033(2025)07-0082-09; 收稿日期:2025-03-14; 修稿日期:2025-05-18

** 通信作者:鲁义(1986—),男,江西新干人,博士,教授,主要从事煤自燃与瓦斯灾害防治方面的研究。E-mail: luyijx@163.com。

density over time follows a negative exponential power characteristic. During the self expansion process, the diffusion area of the slurry increases and the increase in diffusion area of the slurry becomes smaller and smaller. The relative error between the theoretical and experimental results of the seepage pressure at the monitoring point does not exceed 10%, proving the rationality of the modified mathematical model for seepage diffusion pressure.

Keywords: phosphogypsum-based self-produced gas-expanded slurry; self expansion; flow characteristics; slurry density; similar model experiment

0 引言

注浆防灭火是防止采空区遗煤自燃的常用技术之一^[1],起到降温及隔绝氧气的双重作用^[2],注浆防灭火效果主要受浆体材料及注浆工艺的影响。传统注浆材料普遍存在防灭火效果差,覆盖不均匀等问题^[3],无法完全适应采空区复杂多变的环境,导致煤自燃防治效果不佳。众多学者为解决上述问题,相继研发出多种新型矿用防灭火材料,如三相泡沫^[4]、凝胶材料^[5]、无机固化泡沫^[6]、胶体泡沫等^[7]。其中,磷石膏基自产气膨胀浆体以磷石膏为基料,加以碳酸氢钠、粉煤灰、水泥等材料,以一定水灰比混合搅拌制成,具有较好的隔热性和稳定性^[8]。

然而,磷石膏基自产气膨胀浆体在采空区中的流动扩散特性仍未合理确定,导致注浆时存在一定的盲目性,注浆质量不高。对于泡沫浆体材料来说,如何提高注浆效率、充分发挥材料效能、提升注浆的准确性,是实现该材料在现场应用中高效灭火的关键因素^[9]。时国庆^[10]、奚志林^[11]等通过运用计算流体动力学理论建立三相泡沫在采空区渗流的数学模型,并模拟三相泡沫在综放工作面采空区的渗流过程,得出三相泡沫渗流范围的理论值及三相泡沫渗流特性的主要影响因素。奚弦^[12]基于工业固废基复合浆泡材料的流变方程,得到复合浆泡材料在裂隙中的扩散规律及影响扩散效果的因素。鲁义等^[13]通过分析倾斜裂隙通道中泡沫受力和运动,得到不同裂隙倾角下屈服应力和塑性黏度的关系方程式,建立了倾斜裂隙通道流动物理试验模型。王涛等^[14]基于无机固化泡沫浆液黏度时变模型,研究了浆液的扩散形态和压力分布模型,建立了浆液在水平漏风单裂隙中逆风流动扩散理论模型、在恒定漏风速率水平裂隙扩散数值模型。与此同时,许多学者通过总结现场实践经验得到浆体材料在裂隙中的流动扩散特征^[15-16]。综上所述,目前对浆体在采空区中流动特性的研究已经取得了一定进展,但现有

模型通常以密度恒定的材料为对象,关于自膨胀浆体材料在裂隙中的扩散特性的研究很少。

鉴于此,笔者拟基于流体力学理论,研究浆体在自发膨胀阶段的密度变化,并基于浆体的密度时变模型,推导得到磷石膏基自产气膨胀浆体在自产气膨胀阶段的渗流扩散压力数学模型,并通过自行搭建的磷石膏基自产气膨胀浆体注浆试验平台,研究裂隙网络中磷石膏基自产气膨胀浆体在自膨胀阶段的渗流压力变化,修正浆体渗流扩散压力数学模型,验证修正后的渗流扩散压力数学模型的合理性,以期浆体的实际应用提供理论指导。

1 浆体自膨胀扩散理论模型

在注浆过程中,传统注浆材料由注浆压力驱动扩散,而磷石膏基自产气膨胀浆体的扩散过程分为静压注浆和自膨胀2个阶段。在静压注浆阶段,浆体通过注浆系统注入裂隙之中^[17]。由于注浆过程很短,该阶段浆体密度可视为常数。因此,磷石膏基自产气膨胀浆体在该阶段的扩散特征与传统的注浆材料相一致。

相对常规泡沫浆体在采空区中的运移特征,磷石膏基自产气膨胀浆体在注入采空区后,由于材料内部不断发生反应,从而导致浆体的密度在流动过程中随时间不断发生变化,该阶段为磷石膏基自产气膨胀浆体的自膨胀阶段。该阶段的磷石膏基自产气膨胀浆体在静压差和自膨胀压力的双重作用下,经由裂隙通道渗流扩散;当浆体在裂隙空间中达到压力平衡后停止扩散,进入凝结固化状态。其自膨胀扩散如图1所示。

为简化推导过程,进行如下假设:

- 1) 磷石膏基自产气膨胀浆体为各向同性连续介质流体。
- 2) 磷石膏基自产气膨胀浆体仅沿裂隙扩散,不向煤岩体孔隙中渗透。
- 3) 磷石膏基自产气膨胀浆体的密度在静压注入之后开始变化,忽略反应生成气体的逸出。

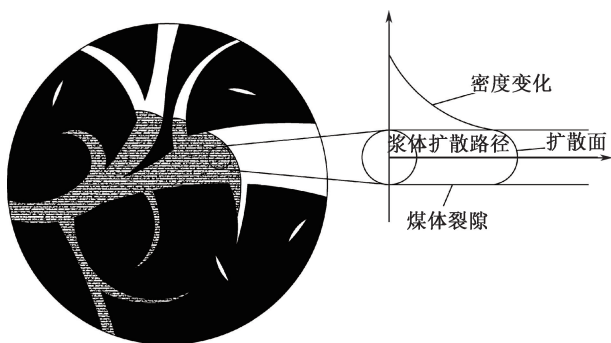


图1 自膨胀扩散

Fig. 1 Self expansion diffusion schematic

4) 裂隙壁面为刚性材料,在浆液压力作用下不发生变形。

由于漏风裂隙网络中材料扩散行为难以精准量化表征,因此,主要分析磷石膏基自产气膨胀浆体在单一裂隙内的扩散特征。磷石膏基自产气膨胀浆体扩散过程中,密度从进入裂隙开始变化,假设浆体在注浆口处的密度是恒定的,只考虑浆体密度随时间的变化。

将制备好的磷石膏基自产气膨胀浆体倒入量筒中,记录初始体积与初始质量,随后每隔 5 s 记录一次浆体的体积和质量,计算得到磷石膏基自产气膨胀浆体密度随时间变化的散点数据,如图 2 所示。试验结果表明:磷石膏基自产气膨胀浆体初始密度为 1440 kg/m^3 ,动力黏度为 $5.7 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。通过非线性拟合可以看出,不同时间磷石膏基自产气膨胀浆体的密度变化近似分布在一条曲线上,浆体密度随时间的变化符合下式,拟合得到磷石膏基自产气膨胀浆体密度的指数衰减率 $\beta = -0.19$,即得到浆体密度时变模型。

$$\rho_t = \rho_0 t^\beta \quad (1)$$

式中: ρ_t 为磷石膏基自产气膨胀浆体 t 时刻的密度, kg/m^3 ; ρ_0 为磷石膏基自产气膨胀浆体初始密度, kg/m^3 。

对于倾角为 0° 的平面裂隙,磷石膏基自产气膨胀浆体通过注浆管注入后,在裂隙壁之间径向流动,由于裂隙壁之间的半径相对较窄,其扩散行为近似于二维流动(浆体的垂直速度 $v_z = 0$)。以注浆口为原点,设置圆柱坐标系来研究浆体的扩散特性,如图 3 所示。

磷石膏基自产气膨胀浆体通过注浆管注入后,时间变化量为 Δt ,在 Δt 内浆体扩散半径为 Δr ,在堆积扩散过程中,其总质量保持不变,满足下式:

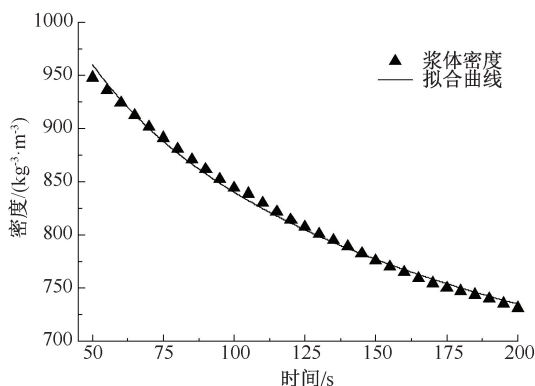


图2 浆体自膨胀阶段密度变化

Fig. 2 Density change during self expansion stage of slurry

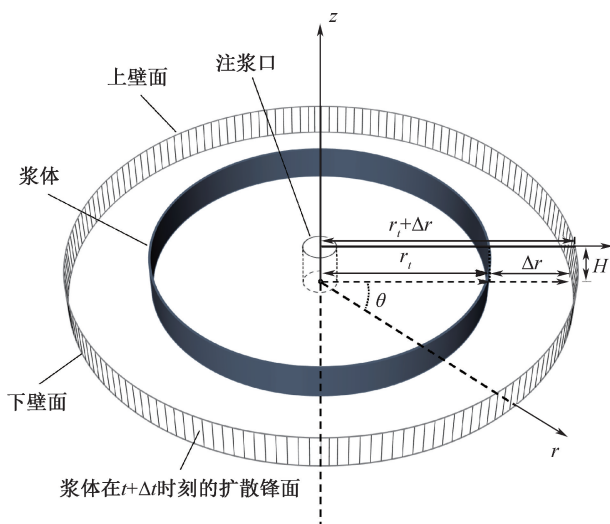


图3 浆体在平面裂隙中自膨胀

Fig. 3 Self expansion of slurry schematic in plane cracks

$$\frac{\Delta r}{\Delta t} = \frac{r_t \left[\left(1 + \frac{\Delta t}{t} \right)^{-\frac{\beta}{2}} - 1 \right]}{\Delta t} \quad (2)$$

式中 r_t 为浆体在 t 时刻的扩散半径, mm。

当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时,由 Taylor 展开可得,

$$\left[\left(1 + \frac{\Delta t}{t} \right)^{-\frac{\beta}{2}} \right] = 1 - \frac{\beta}{2} \frac{\Delta t}{t} + o(\Delta t) \quad (3)$$

式中 $o(\Delta t)$ 满足 $\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{o(\Delta t)}{\Delta t} = 0$, 表示高阶无穷小项。

于是式(2)可进一步整理为:

$$\frac{\Delta r}{\Delta t} = \frac{-\beta r_t}{2t} \quad (4)$$

当 $\Delta t \rightarrow 0, \Delta r \rightarrow 0$ 时,式(4)可整理为:

$$\frac{dr}{dt} = \frac{-\beta r_t}{2t} \quad (5)$$

径向平均流速等于半径随时间的变化率,即:

$$\bar{v} = \frac{-\beta r_t}{2t} \quad (6)$$

当磷石膏基自产气膨胀浆体半径由 r_0 扩散至 r_t 时,满足下式:

$$r_t = \frac{r_0}{t^{\frac{\beta}{2}}} \quad (7)$$

式中 r_0 为 $t=0$ 时的磷石膏基自产气膨胀浆体初始半径,mm。

结合式(7)和式(6)可得 t 时刻磷石膏基自产气膨胀浆体的径向流动速度:

$$v_t = \frac{-\beta r_0}{2t^{1+\frac{\beta}{2}}} \quad (8)$$

值得注意的是,该流动速度为磷石膏基自产气膨胀浆体与空气交界面处的平均流速,也是磷石膏基自产气膨胀浆体在 t 时间内的最大平均流速。

考虑到材料在裂隙中流动时的对称性(浆体的切向速度 $v_\theta = 0$),连续性方程为:

$$\frac{\rho v_r}{r} + \frac{\partial(\rho v_r)}{\partial r} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (9)$$

式中 v_r 为磷石膏基自产气膨胀浆体的径向流动速度,m/s。

结合式(9)和式(1)可得:

$$\frac{v_r}{r} + \frac{\partial(v_r)}{\partial r} = -\frac{\beta}{t} \quad (10)$$

式(10)对 r 求导有:

$$\frac{\partial^2 v_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial r} - \frac{v_r}{r^2} = 0 \quad (11)$$

在圆柱坐标系中,浆体沿径向动量方程为:

$$f_r - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} = \mu \left(\nabla^2 v_r - \frac{2}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} - \frac{v_r}{r^2} \right) + \mu \frac{\partial(\text{div}(v))}{\partial r} = a_r \quad (12)$$

其中,

$$\nabla^2 v_r = \frac{\partial^2 v_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_r}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} \quad (13)$$

$$\text{div}(v) = \frac{v_r}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \quad (14)$$

$$a_r = v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} - \frac{v_\theta^2}{r} + \frac{\partial v_r}{\partial t} \quad (15)$$

式中: f_r 为浆体的径向质量力; a_r 为浆体的径向加速度; μ 为浆体的运动黏度。

由于不考虑切向速度 v_θ 和垂直速度 v_z ,忽略质

量力和惯性力,式(12)可整理为:

$$\frac{1}{\delta} \frac{\partial p}{\partial r} = \frac{\partial^2 v_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} - \frac{v_r}{r^2} \quad (16)$$

式中 δ 为材料的动力黏度。

结合式(16)和式(11)可得:

$$\frac{1}{\delta} \frac{\partial p}{\partial r} = \frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} \quad (17)$$

磷石膏基自产气膨胀浆体与上、下壁相接的区域的速度为0,即当 $z = \frac{H}{2}$ 或 $z = -\frac{H}{2}$ 时, $v_r = 0$,通过对 z 进行积分并整理得到下式:

$$v_r = \frac{1}{2\delta} \frac{\partial p}{\partial r} \left(z^2 - \frac{H^2}{4} \right) \quad (18)$$

式中 H 为裂隙上壁面至下壁面高度,mm。

再次通过对 z 进行积分并整理后,可得到磷石膏基自产气膨胀浆体在裂隙中的径向平均流速:

$$\bar{v}_r = \frac{1}{H} \int_{-H/2}^{H/2} v_r dz = -\frac{\frac{\partial p}{\partial r} H^2}{12\delta} \quad (19)$$

结合式(19)和式(6)可得:

$$\frac{\partial p}{\partial r} = \frac{6\delta\beta r}{tH^2} \quad (20)$$

式(20)对 r 积分有:

$$p = \frac{3\delta\beta r^2}{tH^2} + C \quad (21)$$

由于注浆压力与浆体和空气界面处的大气压力相同,即 $p_{r_t} = p_0$,故有

$$p_{r_t} = \frac{3\delta\beta r_t^2}{tH^2} + C = \frac{3\delta\beta r_0^2}{t^{1+\beta}H^2} + C = p_0 \quad (22)$$

最终可得:

$$p - p_0 = \frac{3\delta\beta r^2}{tH^2} - \frac{3\delta\beta r_0^2}{t^{1+\beta}H^2} = \frac{3\delta\beta}{H^2} \left(\frac{r^2}{t} - \frac{r_0^2}{t^{1+\beta}} \right) \quad (23)$$

其中, $r_0 \leq r \leq r_t$ 。

2 浆体自膨胀扩散特性研究

2.1 浆体自膨胀扩散相似模型试验系统

自膨胀扩散相似模型试验系统如图4所示,该系统包括升降注浆装置、注浆试验台、监测系统及采空区裂隙模块。升降注浆装置为300 mm×300 mm×400 mm的容器,底部配置出口及控制阀门,顶部通过悬吊机构与起重机连接。通过调节装置高度控制浆体的注浆压头,可实现不同浆体压头的精准控制。注浆试验台采用有机玻璃材质制成,正面中心线底

部设置注浆口,模型尺寸:长为 1 200 mm、宽为 800 mm、高为 400 mm。采空区裂隙模块的相似尺寸选择主要参考现场封堵区域(长为 60 m,宽为 40 m,高为 2.5 m),相似比为 1 : 50,孔隙率通过体积填充法控制为 0.35。为模拟出采空区的多孔裂隙,采用特制陶粒作为采空区充填材料,陶粒导热率低,具有良好的保温隔热性,蓄热效果良好,更贴近真实采空区情况。监测系统中共设置微型土压力计 9 个,监测点分布如图 5 及表 1 所示,用于监测浆体在扩散路径上的渗流压力。坐标系定义如下:以注浆口为原点 ($X=0,Y=0$), Z 轴正向与充填介质高度方向一致。



图 4 试验系统
Fig. 4 Testing system

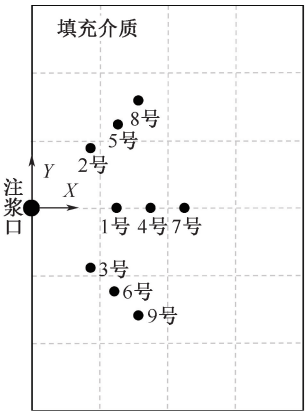


图 5 监测点分布
Fig. 5 Distribution of monitoring points

表 1 监测点布置坐标值

Table 1 Coordinate values of monitoring points		
监测点序号	X/mm	Y/mm
1	250	0
2	177	177
3	177	-177
4	350	0
5	247	247

续表 1

监测点序号	X/mm	Y/mm
6	247	-247
7	450	0
8	318	318
9	318	-318

2.2 浆体自膨胀扩散特性

由于磷石膏基自产气膨胀浆体自膨胀扩散特性,通过可升降注浆装置向采空区裂隙模块注入 5 L 浆体,以注浆口为圆心形成半径约为 250 mm 的扩散面后即停止注浆,静压注浆阶段注入压力约为 20 kPa。以静压注入阶段的最终半径为起点,通过高速摄影机记录浆体在 XY 平面的自膨胀扩散过程,如图 6 所示。由图 6 可知:随着时间的增加,浆体在 XY 平面上呈现出弧形扩散,扩散面积越来越大,但增幅逐渐减小,这是因为磷石膏基自产气膨胀浆体密度和自膨胀压力逐渐降低,浆体扩散速度呈现减小的趋势;此外浆体发生水化反应并持续生成桥接晶体结构,增加了扩散的阻力^[18]。

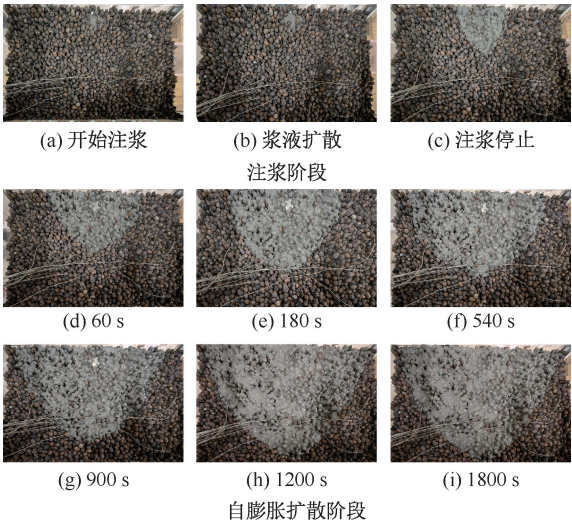


图 6 浆体在 XY 平面的自膨胀扩散形态
Fig. 6 Self expansion and diffusion morphology of slurry in XY plane

3 浆体自膨胀扩散试验结果分析

3.1 监测点渗流压力变化分析

在磷石膏基自产气膨胀浆体自膨胀过程中,通过试验模型内的土压力计,以 1 s 采样间隔持续监测各坐标点的浆体渗流压力,全程监测历时 1 200 s。各测点首次捕获有效渗流压力的时刻及对应压力值见表 2。

表 2 各监测点有效渗流压力初始记录时间及对应压力值

Table 2 Initial recording time and corresponding pressure values of effective seepage pressure at each monitoring point

监测点名称	时间/s	渗流压力/kPa
1 号	2	15.471
2 号	2	15.983
3 号	2	15.781
4 号	36	0.097
5 号	37	0.193
6 号	38	0.202
7 号	510	0.013
8 号	507	0.011
9 号	522	0.018

由表 2 可知:1—3 号监测点初次采集到的有效渗流压力值平均为 15.745 kPa,4—6 号监测点初次采集到的有效渗流压力值平均为 0.164 kPa,7—9 号监测点初次采集到的有效渗流压力值平均为

0.014 kPa。可以发现,各监测点最初监测到的渗流压力呈现逐渐减小的趋势,这是由于随着扩散距离的增加,浆体的密度随时间呈指数降低,能量持续损耗,流动速度也逐渐减慢,从而导致浆体的扩散趋势逐渐放缓,最终使监测点测量到的渗流压力逐渐减小。通过绘制 1—9 号监测点的渗流压力随时间的变化,以进一步分析浆体在自膨胀阶段的渗流扩散特征。各监测点渗流压力变化情况如图 7 所示。

从图 7 可以看出,位于浆体初始扩散半径起点的 1 号、2 号和 3 号监测点所记录的渗流压力在数据记录之初就比较高,但随着时间的增长,这 3 个监测点的压力均在整个试验过程的前 200 s 内迅速下降至 4 kPa 以下。这说明浆体在自发膨胀阶段初期,其内部剧烈的化学反应在短时间内释放出大量气体,从而产生较大的内压促使迅速扩散,但随着时间增加,其内部逐渐缓和的化学反应使产气量不断减少,且扩散距离的增加也使密度减小,多种因素的

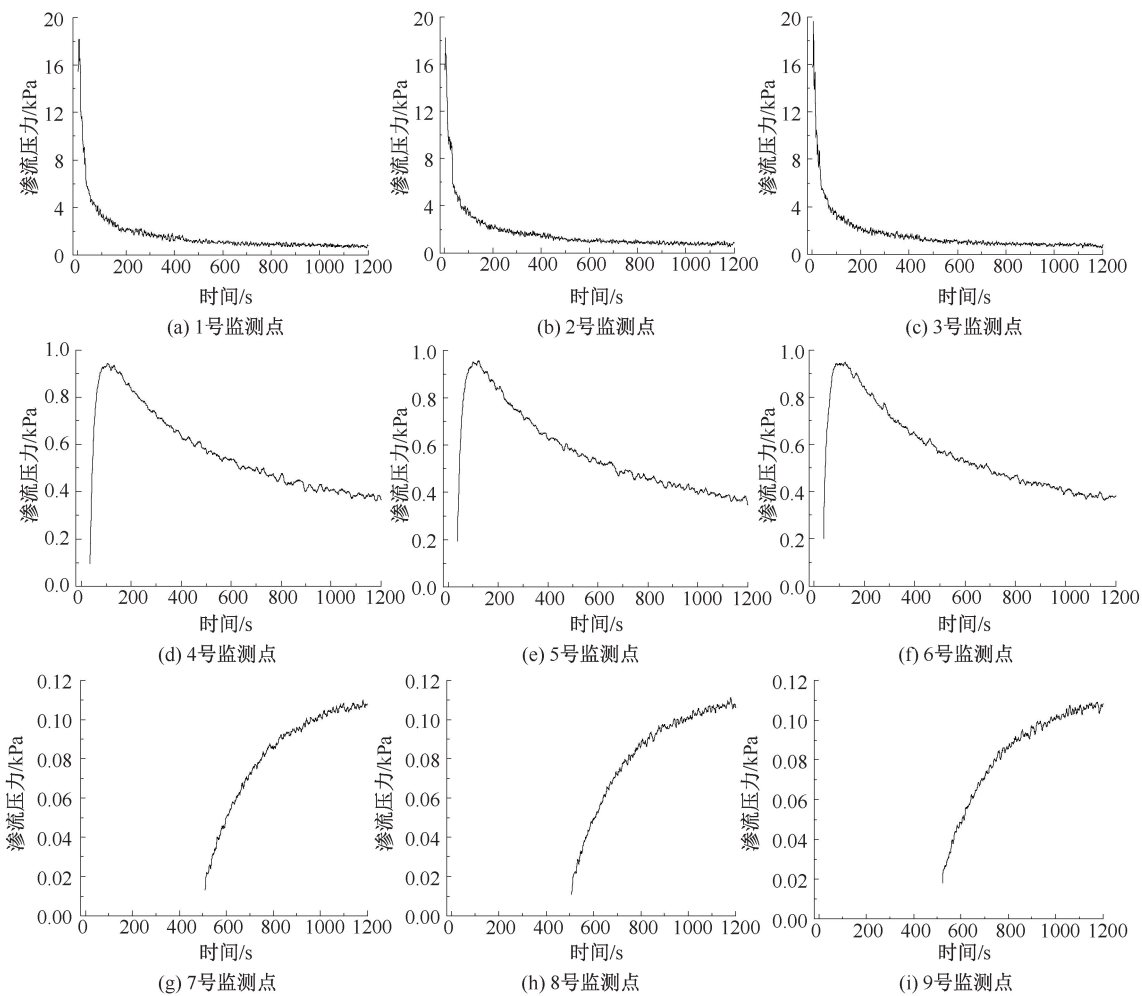


图 7 各监测点渗流压力变化情况

Fig. 7 Changes in seepage pressure at each monitoring point

作用下导致记录到的压力随时间的增加不断降低。相对于前3个监测点,4号、5号和6号监测点的渗流压力在数据记录前期有明显的升高趋势,这是由于在这个扩散距离,浆体的膨胀作用和初始的流动阻力较小,且浆体在做扩散运动的过程中需要一定的压力差以克服填充介质阻力和孔隙压力。随着扩散的进行,浆体逐渐填充了监测点周围的空隙,形成渗透通道,使流动阻力减小。在4号、5号和6号监测点的测量范围内,浆体的膨胀会逐渐达到平衡状态,但浆体整体上还在扩散,此时,4号、5号和6号监测点所记录的压力与前3个监测点一样,会不断下降至趋于0。较大不同的是,7号、8号和9号监测点的渗流压力在整个试验过程中始终处于缓慢上

升的状态,且最终不超过0.12 kPa,这说明在这个扩散距离,浆体密度相对于初始的1 440 kg/m³已经下降至十分小的程度,此时浆体的扩散锋面仅直接观察已经难以发现明显变化,浆体内部颗粒的水化反应亦使其趋近凝结。

3.2 渗流压力公式修正

由式(23)可知:磷石膏基自产气膨胀浆体到达监测点的时间主要由浆体初始半径、密度的指数衰减率和扩散距离共同决定。为验证浆体渗流压力公式的精度,选取2号、5号和8号监测点的首组有效数据(记录时间和扩散距离),经计算获得预测值并与试验结果进行对比验证,如图8所示。

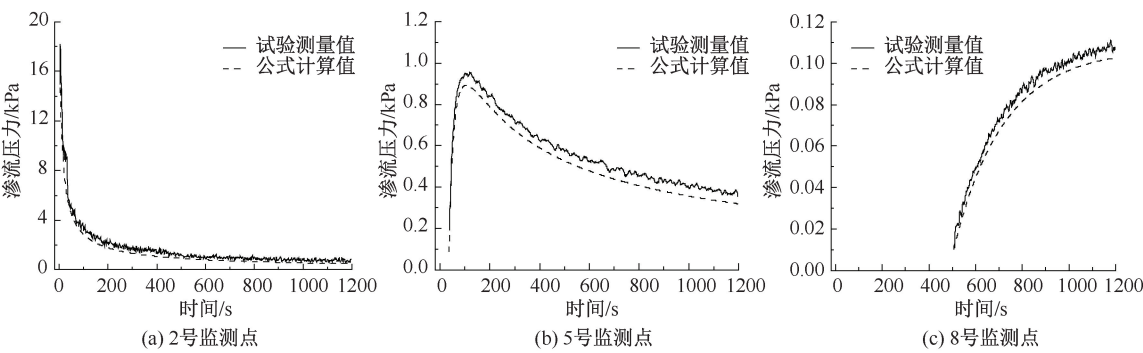


图8 2号、5号和8号监测点渗流压力预测值与试验值对比

Fig. 8 Comparative of predicted values and experimental values of seepage pressure at monitoring points of 2 #, 5 #, and 8 #

可以发现,预测结果偏小,这主要是由于浆体反应产生的气体与自膨胀扩散对微型土压力计产生冲击,导致其发生移动,使得结果存在微小的偏差。通过处理2号、5号和8号监测点渗流压力的预测值和试验值,得到如下拟合公式:

$$E = 0.000\ 2t^{-0.07} \tag{24}$$

式中 E 为预测值和试验值的误差, kPa。

结合浆体渗流压差计算式可得2号、5号和

8号监测点渗流压力、时间和扩散距离的关系,如下式:

$$p - p_0 = \frac{3\delta\beta}{H^2} \left(\frac{r^2}{t} - \frac{r_0^2}{t^{1+\beta}} \right) + 0.000\ 2t^{-0.07} \tag{25}$$

其中, $r_0 \leq r \leq r_i$ 。

将1号、3号、4号、6号、7号和9号监测点的首次有效数据代入式(25),计算出渗流压力预测值,进而与试验值进行对比,结果见表3。

表3 其余监测点渗流压力预测值与试验值对比

Table 3 Comparative of predicted values and experimental values of seepage pressure at other monitoring points

监测点	1号	3号	4号	6号	7号	9号
首次数据记录时间/s	2	2	36	38	510	522
初始半径 r_0 /mm	250	250	250	250	250	250
扩散距离/mm	250	250	350	350	450	450
公式预测值/kPa	14.292	14.292	0.088	0.192	0.012	0.017
试验结果/kPa	15.471	15.781	0.097	0.202	0.013	0.018
相对误差/%	7.621	9.435	9.278	4.950	7.692	5.556

由表 3 可知:渗流压力预测值与试验值具有良好的一致性,相对误差均控制在 10% 以内,验证了预测公式的合理性。

4 结 论

1) 通过非线性拟合,得到磷石膏基自产气膨胀浆体密度时变方程,推导并修正了浆体在自发膨胀阶段的渗流扩散压力数学模型。

2) 利用自行搭建的磷石膏基自产气膨胀浆体相似模型试验系统进行浆体的自膨胀扩散试验,发现随着时间的增长,浆体内部颗粒逐渐水化凝结,浆体扩散面积越来越大,浆体扩散面积的增幅越来越小。

3) 磷石膏基自产气膨胀浆体在裂隙结构中自产气膨胀时,监测点渗流、压力的理论结果与试验结果的最大相对误差不超过 10%,证明渗流扩散压力方程具有合理性。

参 考 文 献

[1] 张嘉勇,吕祖欣,崔啸,等. 正断层影响下采空区注 CO₂ 防灭火数值模拟研究[J]. 中国安全科学学报,2025,35(4): 9-17.
ZHANG Jiayong, LYU Zuxin, CUI Xiao, et al. Numerical simulation of CO₂ injection for fire prevention in a goaf affected by normal fault influence[J]. China Safety Science Journal,2025,35(4): 9-17.

[2] 安敬鱼,牛会永,邓军,等. 矿井火灾原因综合分析及防治技术[J]. 矿业工程研究,2015,30(3): 40-44.
AN Jingyu, NIU Huiyong, DENG Jun, et al. Comprehensive causes and treatment technology of mine's fire[J]. Mineral Engineering Research,2015,30(3): 40-44.

[3] 李方琳,张雷林,韦健. 防灭火凝胶泡沫的制备与阻化特性研究[J]. 矿业安全与环保,2022,49(3): 34-38.
LI Fanglin, ZHANG Leilin, WEI Jian. Study on preparation and characteristics of gel foam for preventing fire[J]. Mining Safety & Environmental Protection,2022,49(3): 34-38.

[4] 秦波涛,蒋文婕,史全林,等. 矿井粉煤灰基防灭火技术研究进展[J]. 煤炭科学技术,2023,51(1): 329-342.
QIN Botao, JIANG Wenjie, SHI Quanlin, et al. Research progress on fly ash foundation technology to prevent and control spontaneous combustion of coal in mines[J]. Coal Science and Technology,2023,51(1): 329-342.

[5] 聂士斌,邢时超,韩超,等. 防治煤矿火灾的凝胶材料制备及其性能研究[J]. 中国安全科学学报,2020,30(9): 115-120.
NIE Shibin, XING Shichao, HAN Chao, et al. Preparation and properties of gel materials for coal mine fire prevention[J]. China Safety Science Journal,2020,30(9): 115-120.

[6] 马砺,杜素,张照允,等. 采空区大掺量粉煤灰无机固化泡沫制备及特性研究[J]. 煤田地质与勘探,2023,51(2): 243-251.
MA Li, DU Su, ZHANG Zhaoyun, et al. Preparation and characteristics of inorganic curing foam with large-volume fly ash in goaf[J]. Coal Geology & Exploration,2023,51(2): 243-251.

[7] 史全林,杨红旗,李洪彪. 成膜型胶体泡沫的制备及灭火降温特性研究[J]. 中国安全科学学报,2022,32(10): 121-126.
SHI Quanlin, YANG Hongqi, LI Hongbiao. Research on preparation of film-forming colloidal foam and its fire extinguishing and cooling characteristics [J]. China Safety Science Journal,2022,32(10): 121-126.

[8] 吴芳华,施式亮,鲁义,等. 磷石膏基自产气膨胀浆体防灭火性能研究[J]. 中国安全科学学报,2024,34(3): 148-154.
WU Fanghua, SHI Shiliang, LU Yi, et al. Fire prevention and extinguishing performance of phosphogypsum based self-produced gas expansion slurry[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(3): 148-154.

[9] 潘恩宝. 煤矿井下防火技术方案的应用研究[J]. 能源与节能,2021(7): 177-178.
PAN Enbao. Study on application of underground fire prevention technology scheme for coal mines[J]. Energy and Energy Conservation,2021(7): 177-178.

[10] 时国庆,王德明,仲晓星. 三相泡沫在综放工作面采空区渗流特性的数值模拟研究[J]. 煤炭学报,2011,36(8): 1 329-1 333.
SHI Guoqing, WANG Deming, ZHONG Xiaoxing. Mathematical simulation study on characteristics of three-phase foam

- seepage in goaf[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(8): 1 329–1 333.
- [11] 奚志林, 王德明, 时国庆. 三相泡沫在采空区中渗流特性的数值模拟[J]. 中国矿业大学学报, 2009, 38(3): 341–345.
- XI Zhilin, WANG Deming, SHI Guoqing. Numerical simulation of the seepage characteristics of three-phase foam in the gob[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2009, 38(3): 341–345.
- [12] 奚弦. 工业固废基复合浆泡材料的研制及堵漏防灭火特性研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2022.
- XI Xian. Study on the preparation and fire prevention characteristics of industrial solid waste based composite slurry foam materials[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2022.
- [13] 鲁义, 王涛, 田兆君, 等. 倾斜煤岩裂隙通道中水泥基泡沫流变特性研究[J]. 硅酸盐通报, 2017, 36(9): 2 929–2 934.
- LU Yi, WANG Tao, TIAN Zhaojun, et al. Rheological properties of cement based foam in inclined coal fracture channels[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2017, 36(9): 2 929–2 934.
- [14] 王涛, 鲁义, 施式亮, 等. 漏风裂隙内无机固化泡沫浆液扩散特性研究[J]. 中国安全科学学报, 2019, 29(10): 24–30.
- WANG Tao, LU Yi, SHI Shiliang, et al. Research on diffusion properties of inorganic solidified foam slurry in air leakage fracture[J]. China Safety Science Journal, 2019, 29(10): 24–30.
- [15] 杨柳华, 李金仓, 尹升华, 等. 充填料浆中气泡作用机理及其流变特性演变规律[J]. 煤炭学报, 2024, 49(4): 1 894–1 905.
- YANG Liuhua, LI Jincang, YIN Shenghua, et al. Mechanism of bubble action in backfill slurry and the evolution of its rheological properties[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(4): 1 894–1 905.
- [16] 题正义, 秦洪岩, 乔宁, 等. 大倾角综放采空区注浆防灭火浆液扩散模拟研究[J]. 中国安全科学学报, 2016, 26(1): 51–57.
- TI Zhengyi, QIN Hongyan, QIAO Ning, et al. Simulation of slurry diffusion involved in fire prevention in large dip angle fully mechanized caving gob by grouting[J]. China Safety Science Journal, 2016, 26(1): 51–57.
- [17] 李晓龙, 金笛, 王复明, 等. 一种理想自膨胀浆液单裂隙扩散模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(5): 1 207–1 217.
- LI Xiaolong, JIN Di, WANG Fuming, et al. Diffusion model of an ideal expansible grout in single fracture[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(5): 1 207–1 217.
- [18] 鲁义. 防治煤炭自燃的无机固化泡沫及特性研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2015.
- LU Yi. Study on the inorganic solidified foam and its characteristics for preventing and controlling spontaneous combustion of coal[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2015.



作者简介: 丁仰卫 (1979—), 男, 山东汶上人, 本科, 高级工程师, 主要从事矿井通风与防灭火方面的工作。E-mail: dyw791220@163.com。