

DOI: 10.16452/j.cnki.sdkjzk.2021.01.003

文章编号:1672-3767(2021)01-0017-10

# 井筒冻结孔环形通道注浆扩散机制 及注浆封堵设计方法

周文武<sup>1</sup>, 韩承豪<sup>1</sup>, 张伟杰<sup>1</sup>, 谢超<sup>1,2</sup>, 魏久传<sup>1</sup>, 满孝全<sup>1</sup>, 徐建国<sup>3</sup>, 张广学<sup>4</sup>

(1. 山东科技大学 地球科学与工程学院, 山东 青岛 266590; 2. 山东省煤田地质规划勘察研究院, 山东 济南 250104;  
3. 兖州煤业鄂尔多斯能化有限公司, 内蒙古 鄂尔多斯 015000; 4. 鄂尔多斯市营盘壕煤炭有限公司, 内蒙古 鄂尔多斯 017000)

**摘要:**为研究井筒冻结孔环形通道注浆扩散过程, 构建了双侧向柱形边界约束下的注浆扩散理论模型, 考虑到浆液流变性推导了注浆扩散控制方程; 运用 Matlab 平台开展仿真研究, 获得注浆速率、浆液流变性影响下的注浆扩散规律, 据此提出冻结孔环形通道注浆设计方法, 指导注浆终压、浆液扩散距离等关键指标的选取。以营盘壕煤矿主井冻结孔注浆治理工程为依托开展现场试验, 基于矿井地质与水文地质条件确定主井注浆区段为+731.5~+813.5 m, 注浆终压为 6.75 MPa, 注浆孔间距为 12~14 m。注浆工程完成后经随机施工的 18 个检查孔检验, 钻孔涌水量均小于 0.01 m<sup>3</sup>/h, 表明注浆效果良好。研究成果对西部矿区类似矿井的安全建设具有一定的参考价值。

**关键词:**冻结孔; 环形通道; 注浆扩散机制; 注浆设计方法; 工程实践

中图分类号: TN929.5

文献标志码: A

## Grouting diffusion mechanism and plugging design method of annular channel in shaft freezing hole

ZHOU Wenwu<sup>1</sup>, HAN Chenghao<sup>1</sup>, ZHANG Weijie<sup>1</sup>, XIE Chao<sup>1,2</sup>,  
WEI Jiuchuan<sup>1</sup>, MAN Xiaquan<sup>1</sup>, XU Jianguo<sup>3</sup>, ZHANG Guangxue<sup>4</sup>

(1. College of Earth Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China;  
2. Shandong Coalfield Geological Planning Investigation and Research Institute, Jinan, Shandong 250104, China;  
3. Yanzhou Coal Ordos Energy and Chemical Company Limited, Ordos, Inner Mongolia 015000, China;  
4. Yingpanhao Coal Company Limited, Ordos, Inner Mongolia 017000, China)

**Abstract:** In order to study the grouting diffusion process in the circular passage of freezing hole in shaft, a theoretical model of grouting diffusion under the constraint of two-sided cylindrical boundary was established in this paper, and the governing equation of grouting diffusion was deduced considering the rheological property of slurry. The simulation research was carried out by using Matlab, and the grouting diffusion law under the influence of grouting rate and slurry rheology was obtained. Based on this, the design method of grouting in the circular passage of freezing hole was proposed to guide the selection of key indexes such as final grouting pressure and grout diffusion distance. Field experiments were carried out based on the main shaft freezing hole grouting governance project. The main shaft grouting section was determined to be +731.5~+813.5 m according to the geological and hydrogeolog-

收稿日期: 2019-07-04

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(51509148); 山东科技大学人才引进科研启动基金项目(2017RCJJ030); 山东省自然科学基金项目(BS2015NJ010)

作者简介: 周文武(1995—), 男, 山东滨州人, 硕士研究生, 主要从事矿井水害防治方面的研究。

E-mail: wenwuzhou191812@163.com

张伟杰(1984—), 男, 山东菏泽人, 副教授, 博士, 主要从事地下工程灾害防控理论与技术研究工作, 本文通信作者。

E-mail: sdzhangweijie@126.com

ical conditions of the mine; the final grouting pressure was 6.75 MPa; and the spacing between the grouting holes was 12~14 m. After the completion of the grouting project, 18 inspection holes were scholastically selected for test and the water inflow of the boreholes was less than 0.01 m<sup>3</sup>/h, indicating that the grouting effect was good. The re-search results have certain reference value for the safety construction of similar mines in western mining area.

**Key words:** freezing hole; circular passage; grouting diffusion mechanism; grouting design method; engineering practice

冻结凿井法作为井筒建设过程中穿越富水层最有效的手段,在我国西部井田建设中应用广泛<sup>[1-2]</sup>。井筒施工完毕后地层解冻,冻结孔与冻结管之间的环形通道再次开启将沟通不同位置的含水层,高压水与围岩的长期相互作用导致井筒围岩导水裂隙网络发育,地下水沿着相互连通的裂隙网络进入井筒造成突涌水灾害<sup>[3]</sup>。此外,地层冻结与解冻过程使岩层内部结构产生破坏,加剧了井筒水害,并可能引发井壁坍塌。实践表明,注浆是控制环形通道地下水涌出的主要有效方法之一<sup>[4]</sup>。

我国已成功实施了数十个井筒冻结孔环形通道注浆治理工程<sup>[5]</sup>,积累了丰富的工程经验,同时技术人员总结出多种有效的注浆技术,主要包括壁后注浆法、射孔注浆法、引流注浆法及环形截水巷道治理等技术<sup>[6-8]</sup>。其中壁后注浆技术成熟、操作方便、适应性强,在冻结钻孔处理中得到广泛应用。然而,尽管壁后注浆技术的效果已被工程实践证实,但在注浆设计阶段,注浆压力、注浆孔间距、注浆材料配比等关键注浆参数仍难以确定,其根源在于对环形通道内注浆扩散机理缺乏深刻认识。

过去数十年中,许多研究人员开展了环形通道内流体运动特征的研究,主要涉及油气勘探、地热开采和悬浮液输送等领域。尤其是石油钻井过程中,以流体在同心环形通道中的运移过程为对象,开展了大量流体运动速度及压力降研究,提出牛顿流体和非牛顿流体的相关数值解和解析解<sup>[9-13]</sup>。这些成果对分析环形通道内浆液扩散过程具有重要的启示。然而,冻结孔环形通道注浆封堵具有特殊性,涉及注浆材料、注浆工艺及环形通道基本特征等三个方面。注浆材料配比不同,浆液性质差别显著,尤其是流变性质对浆液扩散过程具有重要的控制作用<sup>[14]</sup>;注浆压力和注浆钻孔间距等指标是注浆设计和实施的关键参数,合理的参数值是注浆工艺选择的重要依据,亟待从理论上开展相关研究。

本研究在概化边界条件基础上,以典型速凝类浆液——水泥-水玻璃浆液为对象,开展了冻结孔环形通道内浆液扩散机制研究,为注浆压力、注浆孔布置方式等关键注浆参数的确定提供理论依据,形成了冻结孔环形导水通道注浆治理设计方法;在上述理论研究成果指导下,依托营盘壕煤矿开展主井井筒环形导水通道的注浆治理工业试验,取得了良好的注浆封堵效果。

## 1 冻结孔环形通道注浆扩散控制方程

### 1.1 浆液扩散物理模型

矿井水害治理中,常用的注浆材料包括水泥基材料和化学材料。近年来,为提高突涌水灾害治理效果,速凝类注浆材料得到普遍应用;其中水泥-水玻璃浆液(即 C-S 双液浆)具有初凝时间短、早期强度高及价格低廉的优点,工程实践中使用范围最为广泛。

当 C-S 双液浆注入到环形通道中,若忽略浆液自重,静水条件下浆液在环形通道内垂向扩散。本研究考虑冻结孔和冻结管轴线重合,建立同心环形通道内浆液扩散物理模型(图 1)。分析图 1 可知,注浆孔水平半径为  $r_0$ (m),环形通道外壁半径(即冻结孔内径)为  $R$ (m),内壁半径(即冻结管外径)为  $r$ (m)。浆液在环形通道中扩散范围被扩散锋面所限制,浆液锋面长度为  $z_{\text{front}}$ (m);锋面处的浆液扩散驱动压力  $p_{\text{front}}$ (Pa)。假设等于静水压力  $p_w$ (Pa),环形通道内最大注浆压力分布在注浆孔与环形通道相交处,以  $p_g$ (Pa)表示。

### 1.2 基本假设

针对速凝类浆液推导了冻结孔环形空间中浆液运动方程,并作出如下假设:

1) 浆液注入环形通道瞬间,环形通道内  $2r_0$  高度范围被浆液完全充满,此后浆液在环空内做平行于侧壁的层流运动;

2) 浆液为不可压缩、各向同性的牛顿流体;

3) 环形通道侧壁光滑无摩擦,侧壁间距相等;内、外侧壁表面无滑移边界条件成立;

4) 注浆管水平轴面与环形通道交截面处均匀分布着垂向最大注浆压力,重力及惯性力忽略不计;

5) 浆液流动扩散过程中与水不发生物理混合及化学反应。

### 1.3 浆液本构方程

考虑到压力注浆过程中,注浆压力较浆液的屈服强度要大得多,可以忽略浆液屈服强度对浆液扩散过程的影响,因此假设速凝类浆液为牛顿流体,浆液本构方程为:

$$|\tau| = \mu(T) \frac{dv}{dx}, \quad (1)$$

其中: $\tau$  为剪切应力,Pa; $\mu(T)$  为浆液黏时变函数,Pa·s; $dv/dx$  为剪切速率,m/s<sup>2</sup>; $v$  为浆液运动速率,m/s; $x$  为垂直浆液扩散方向的距离,m。

文献[15]研究表明,C-S 浆液黏度时变性方程可利用如下通式表征:

$$\mu(T) = kT^n + \mu_0. \quad (2)$$

其中: $\mu_0$  为浆液初始黏度,Pa·s; $k$  与  $n$  为浆液流变参数。

### 1.4 速凝类浆液扩散阶段划分

基于注浆孔半径为  $r_0$ ,长度为  $l$ ,注浆速率为  $q$  的条件,浆液在注浆孔内运动时间  $t_0 = (\pi r_0^2 l)/q$ 。假设速凝类浆液初凝时间为  $T^*$ ,浆液在环形通道内运移时间为  $t$ ,注浆时间为  $T$ ,则  $T = t_0 + t$ 。根据注浆时间与浆液初凝时间关系,速凝类浆液扩散形式可划分为两个阶段:当  $T \leq T^*$  时,注入浆液尚未达到初凝状态,浆液呈流动状态,则  $t = T - t_0 = T - (\pi r_0^2 l)/q$ ;当  $T > T^*$  后,前期注入浆液达到初凝状态,呈柱塞式整体运移,后期注入浆液呈流态(图 2)。在本研究的假设前提下,对于达到凝胶状态的浆液,可视为刚体,其运动过程完全取决于流态浆液的运动状态,且对注浆压力不再施加影响。因此,重点以流态浆液为对象,开展环形通道内注浆扩散过程研究。

### 1.5 浆液扩散运动方程

由于不考虑浆液重力影响,注入至环形通道中的浆液以水平注浆管水平轴面为界垂向上对称扩散,因此

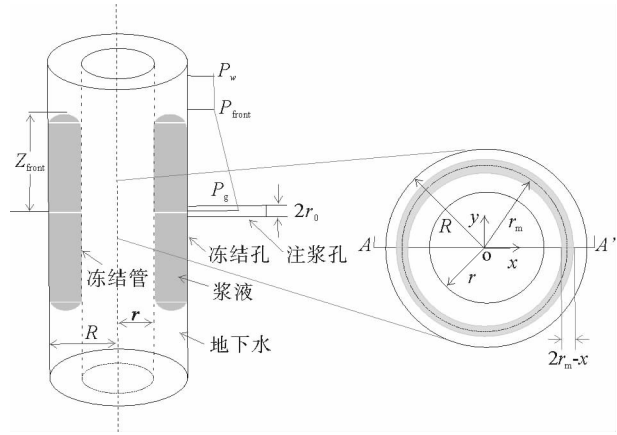


图 1 同心环形通道内注浆物理模型示意图

Fig. 1 Schematic of grouting physical model in the annular channel

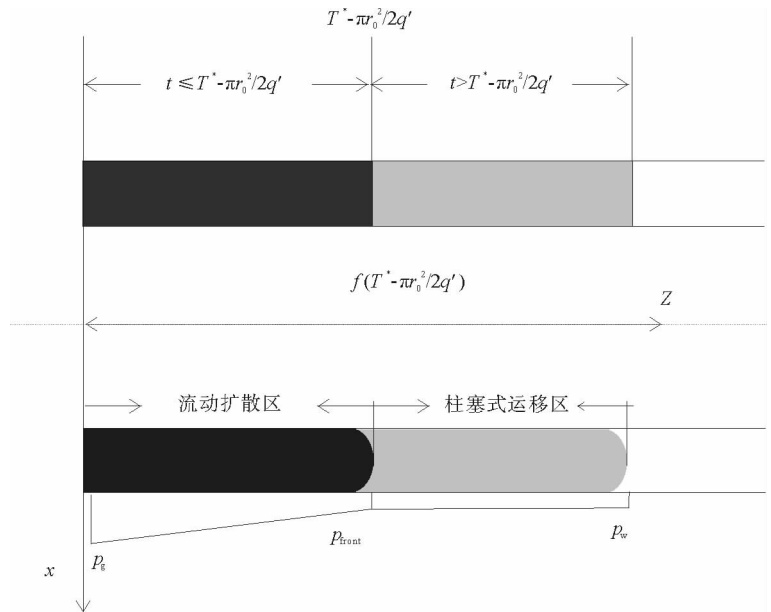


图 2 环形通道内浆液扩散过程示意图

Fig. 2 Schematic of grout diffusion process in the annular channel

仅分析浆液垂向扩散过程即可。据文献[15],当冻结孔内部环形通道狭窄时,即  $R/r \approx 1$  时,可假设环空中流体的浆液对称于环空的中间圆柱面  $r_m = (R+r)/2$ 。因此,可以冻结孔圆心为原点,以水平钻孔轴线为  $x$  轴,以浆液扩散方向(垂直向上)为  $z$  轴建立笛卡尔直角坐标系。以圆柱面  $r_m = (R+r)/2$  为对称轴取浆液环单元,根据轴对称性质,环单元边界坐标分别为  $x$  及  $R+r-x$ ;在环单元基础上建立浆液微元体进行受力分析(图3)。

分析图3,在垂向上任意扩散位置  $z$  处,浆液微元体的静力平衡方程为:

$$pA_1 - (p + dp)A_1 = \tau(A_2 + A_3) \quad (3)$$

其中:

$$A_1 = \pi(R+r-x)^2 - \pi x^2 = \pi(R+r-2x)(R+r), A_2 = 2\pi(R+r-x)dz, A_3 = 2\pi x dz,$$

式中: $R$ —冻结孔半径,m; $r$ —冻结管外半径,m; $p$ —微元体扩散驱动压力,Pa; $dp$ —驱动压力增量; $2x$ —微元体径向宽度,m; $dz$ —微元体轴向长度,m; $A_1$ —过浆断面面积,m<sup>2</sup>; $A_2$ —微元体环空内表面积,m<sup>2</sup>; $A_3$ —微元体环空外表面积,m<sup>2</sup>。

根据浆液速度剖面特征(图3),整理公式(1)、(3)并积分可得环形通道内浆液流速方程:

$$\begin{cases} v_1 = \frac{1}{\mu(T)} \left( r_m x - \frac{x^2}{2} - \frac{Rr}{2} \right) \frac{dp}{dz} & (r \leq x \leq r_m), \\ v_2 = \frac{1}{\mu(T)} \left( \frac{x^2}{2} - r_m x + \frac{Rr}{2} \right) \frac{dp}{dz} & (r_m \leq x \leq R). \end{cases} \quad (4)$$

则平均流速为:

$$\begin{cases} v_{1\text{mean}} = \frac{(R-r)^2}{12\mu(T)} \frac{dp}{dz} & (r \leq x \leq r_m), \\ v_{2\text{mean}} = \frac{(R-r)^2}{12\mu(T)} \left( -\frac{dp}{dz} \right) & (r_m \leq x \leq R). \end{cases} \quad (5)$$

选取浆液垂向上运动部分为研究对象,根据质量守恒原理,单位时间内的注浆量  $q'$  与浆液平均流动速度为:

$$q' = \pi(R^2 - r^2)v_{\text{mean}} = \pi(R^2 - r_m^2)v_{2\text{mean}} + \pi(r_m^2 - r^2)v_{1\text{mean}} \quad (6)$$

结合式(2)和式(5),并代入式(6),可得环形通道内浆液扩散驱动压力梯度控制方程,即:

$$\frac{dp}{dz} = \frac{24 \left[ k \left( \frac{\pi(R^2 - r^2)}{q'} \right)^n + \mu_0 \right] q'}{-\pi(R-r)^4} \quad (7)$$

对公式(7)在浆液扩散区间  $[z, z_{\text{front}}]$  内积分,并代入边界条件( $z = z_{\text{front}}, p = p_w$ ),则得浆液流动扩散驱动压力在环形通道中时空分布方程:

$$p(z, t) = \frac{24kq'g^n(f^{n+1} - z^{n+1})}{\pi(n+1)(R-r)^4} + \frac{24\mu_0q'(f-z)}{\pi(R-r)^4} + P_w \quad (8)$$

式中: $g = \frac{\pi(R^2 - r^2)}{q'}$ ,  $f = \frac{q't}{\pi(R^2 - r^2)}$ 。

将边界条件( $z = r_0, p = p_g$ )代入式(8),可得到注浆压力和环形通道内浆液运动时间  $t$  的关系:

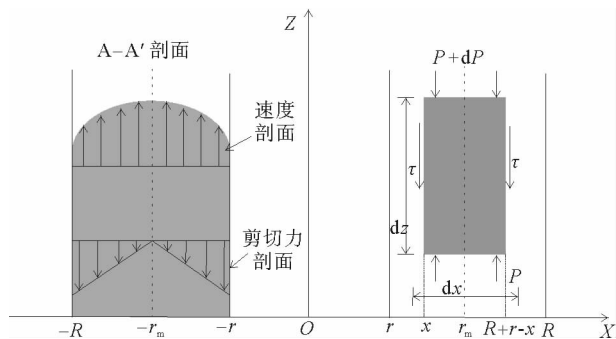


图3 浆液微元体受力分析图

Fig. 3 Force analysis of grout element

$$p_g = \frac{24fk}{(n+1)} [(t+t_0)^{n+1} - t_0^{n+1}] - 24f\mu_0 r_0 + p_w。 \tag{9}$$

式中,  $t \leq T^* - \frac{(\pi r_0^2 l)}{2q'}$ ,  $p_g$  为注浆孔处的注浆压力。

结合公式(8)、(9)得注浆压力  $p_g$  和浆液最大扩散距离  $Z$  之间的关系表达式:

$$p_g = \frac{24fk}{(n+1)} \left( \frac{\pi(R-r)^2}{q'} \right)^{n+1} [(Z-r_0)^{n+1} - r_0^{n+1}] - 24f\mu_0 r_0 + p_w。 \tag{10}$$

式中,  $Z \leq Z \left( T^* - \frac{\pi r_0^2 l}{2q'} \right)$ 。

公式(8)~(10)即描述了环形通道内速凝类浆液扩散过程。

2 冻结孔环形通道内浆液注浆扩散规律

上述研究表明,同心环形通道内浆液扩散过程的影响因素主要包括浆液流变性质(即注浆材料类型)、环形通道尺寸、注浆参数(即注浆压力、注浆速率)及地下水压力。其中同心环形通道尺寸及地下水压力是不可变因素,而注浆速率和注浆材料类型是注浆过程中可以人为调控的重要因素。本节重点分析注浆材料配比及注浆速率影响下的环形通道内注浆扩散规律。

2.1 基本计算参数

根据依托工程营盘壕煤矿主井井筒冻结孔资料(具体见 3.2 部分),选取了 C-S 浆液和恒黏度浆液(对比浆液 A)进行综合分析,研究注浆材料配比、注浆速率影响下的环形通道内浆液扩散规律。浆液性质和相关计算参数如表 1、表 2 所示。

表 1 浆液性质表  
Tab. 1 Slurry parameters

浆液类型	水泥浆水 灰比 w/s	双液体积 比 C : S	材料	初凝时间 $T^*/s$	浆液黏度时变方程 $\mu(t)/(Pa \cdot s)$
C-S 浆液	1 : 1	1 : 1	P.O32.5 硅酸盐水泥	85	$\mu(t)=0.003\ 182t^{2.23}+0.04$
		2 : 1	水玻璃模数 $M=3.0$	50	$\mu(t)=0.000\ 843t^{2.694}+0.08$
对比浆液 A		—	—	—	$\mu(t)=0.08$

表 2 计算参数表  
Tab. 2 Parameters

环形通道外径 $R/m$	环形通道内径 $r/m$	注浆孔半径 $r_0/m$	注浆速率 $q/(10^{-3}m^3/s)$
0.097	0.07	0.015	5.0、2.5、1.0

2.2 浆液扩散高度与注浆时间的关系

根据环形通道内注浆扩散理论公式,利用 Matlab 编程计算,获得注浆期间浆液扩散高度随注浆时间变化过程曲线如图 4 所示。

分析图 4 可知,浆液在环形通道内扩散高度与注浆时间成线性关系,这是由于浆液沿着环形通道单一方向扩散,且环形通道断面面积恒定的缘故。其中对于 C : S=1 : 1 浆液,当注浆时间达到初凝时刻,浆液扩散高度为 15.5 m;对于 C : S=2 : 1 浆液,当注浆时间达到初凝时间时,浆液扩散高度为 9.1 m,初凝时间之后浆液柱塞式向前扩散。

### 2.3 浆液黏度时空分布规律

选取注浆速率  $q = 2.5 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ , 通过计算获取不同时刻(15、30 和 45 s)扩散范围内不同位置处 C-S 浆液和对比浆液的黏度, 绘制浆液黏度随时间和空间的分布曲线(图 5~6)。

由图 5 和图 6 可知, 考虑黏度空间分布不均匀性时, 离注浆孔越远, 黏度越大, 黏度的增长速率也提高, 黏度空间分布与浆液黏度时间函数的趋势一致。C:S=2:1 与 C:S=1:1 相比, 浆液黏度曲线斜率较大, 而对于恒黏度浆液, 浆液黏度不随时间和空间发生变化, 表明注浆材料配比对比浆液黏度具有控制作用。

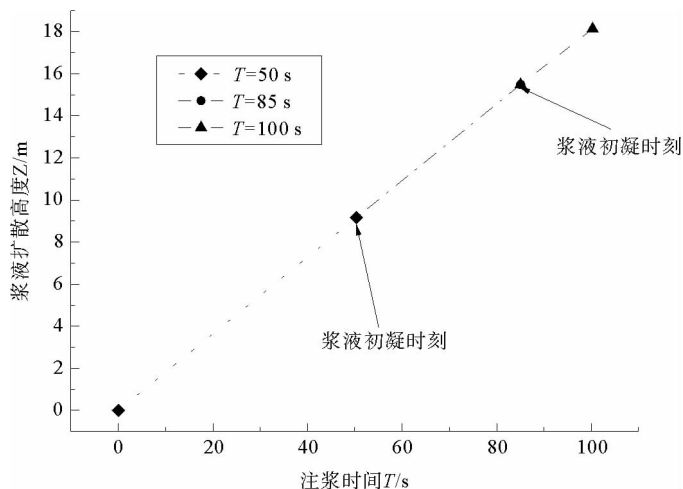


图 4 浆液扩散高度随注浆时间关系

Fig. 4 Variation of penetration length with grouting time

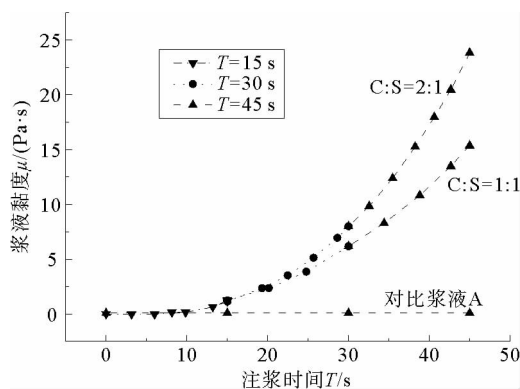


图 5 不同注浆时间下浆液黏度分布

Fig. 5 Viscosity distribution at different injection times

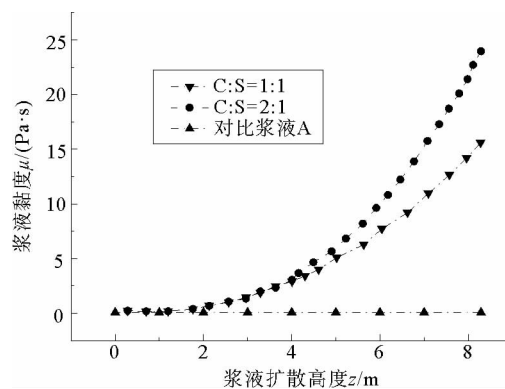


图 6 浆液黏度随扩散高度的分布

Fig. 6 Viscosity distribution along the penetration length

### 2.4 浆液驱动压力分布规律

选取不同注浆速率, 通过计算获取相同注浆时间(45 s)注浆区内扩散驱动压力的变化曲线如图 7 所示。

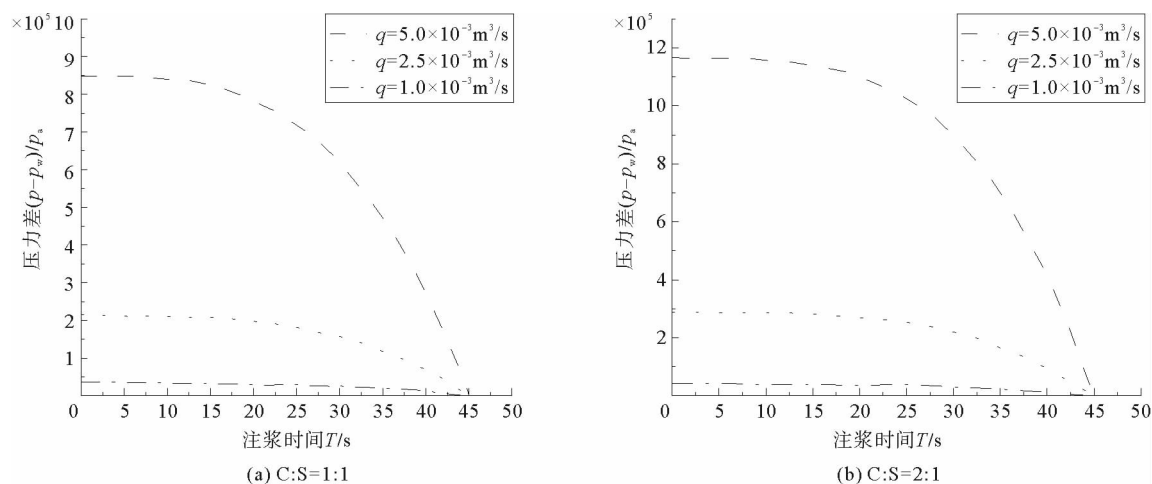


图 7 不同注浆速率条件下扩散驱动压力与注浆速率关系曲线

Fig. 7 Variation of driving pressure with injection rate under different injection rates

分析图 7 可知,对于黏时变浆液,沿着浆液扩散方向,驱动压力呈非线性衰减,且衰减速率逐渐增大,并在浆液扩散峰值处降至环形通道内静水压力。注浆速率越大,孔口管处的注浆压力越大,驱动压力衰减越快;注浆速率相同条件下,浆液流变性越强(配比  $C:S=2:1$ ),获得相同的浆液扩散距离所需要注浆压力越大,原因是浆液黏度随注浆时间非线性增长。

## 2.5 注浆压力变化特征

通过计算获得不同浆液类型时注浆压力差值( $p_g - p_w$ )随时间的变化曲线如图 8 所示,注浆压力随注浆时间变化曲线如图 9 所示。

分析图 8 可知,考虑浆液黏度时变性时的孔口注浆压力与静水压力差值( $p_g - p_w$ )随注浆时间非线性增长,呈显著的阶段性特征,即在注浆时间较小时,曲线斜率较小,即浆液单位扩散高度消耗的能量较小;随着注浆时间延长,曲线斜率增大,即浆液单位扩散高度消耗的能量增加,表明浆液内部由于黏度的快速增长造成扩散黏滞力迅速增大。而不考虑浆液黏度时变性时,( $p_g - p_w$ )与注浆时间呈线性增长。以注浆时间为 40 s,注浆速率  $q = 2.5 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$  为例,浆液具有黏度时变特征时,( $p_g - p_w$ )计算值约为恒黏度浆液的 100 倍。因此,速凝类浆液的流变性显著影响了注浆压力,在注浆过程中应重点考虑<sup>[14]</sup>。

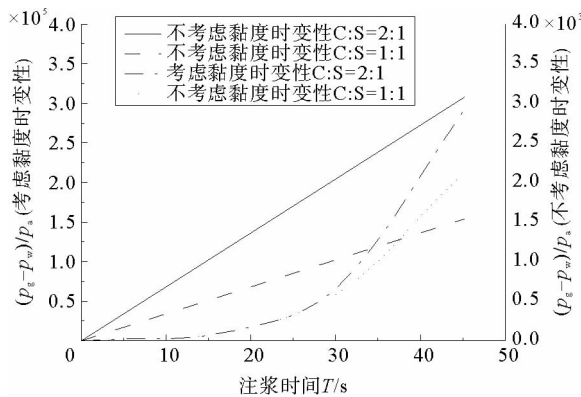


图 8 扩散驱动压力与注浆材料类型的关系曲线

Fig. 8 Variation of driving pressure with different grouts

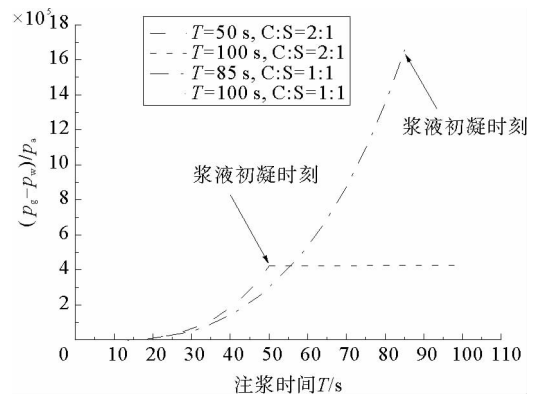


图 9 注浆压力随注浆时间变化曲线

Fig. 9 Variation of injection pressure with injection time

分析图 9 可得,对于黏时变特征不同的两种浆液,( $p_g - p_w$ )同样存在显著差异,考虑到浆液初凝时间和本研究的假设条件,可获得流态浆液注入时的注浆压力理论值:浆液  $C:S=1:1$  初凝时刻( $p_g - p_w$ ) = 1.59 MPa;浆液  $C:S=2:1$  初凝时刻( $p_g - p_w$ ) = 0.43 MPa;注浆时间超过初凝时间后,由于不考虑环形通道侧壁起伏及其对浆液的摩擦阻力,注浆压力不再升高,保持定值。

## 3 冻结孔环形导水通道注浆治理设计

### 3.1 冻结孔注浆关键指标设计

冻结孔注浆封堵过程中,注浆压力、注浆孔间距及注浆过程控制方法是注浆治理方案制定的重要指标。基于上述理论分析成果,注浆设计指标确定方法如下:

#### 1) 注浆压力

由以上分析可知,对于  $C:S=1:1$  浆液,注浆终压与静水压力差值确定为 1.59 MPa;对于  $C:S=2:1$  浆液,注浆终压与静水压力差值确定为 0.43 MPa。注浆过程中注浆终压  $P$  根据以下公式确定:

$$P = p_w + (0.5 \sim 1.59). \quad (11)$$

式中: $P$ —注浆终压,MPa; $p_w$ —地层静水压力,MPa。

此外,若冻结孔环形通道内被泥砂部分充填,浆液扩散阻力大大增加,采用水泥单液浆注浆时,注浆压力上升至较大值。为便于现场施工,水泥单液浆注浆终压同样根据公式(11)确定。

## 2) 注浆孔间距

浆液 C : S = 1 : 1 初凝前扩散距离为 15.47 m, 浆液 C : S = 2 : 1 初凝前扩散距离为 9.1 m。为控制浆液扩散距离, 现场工程采用 C : S = 1 : 1 和 C : S = 2 : 1 两种类型的双液浆对注浆扩散范围进行调节, 选择浆液扩散范围确定为 10~15 m, 由此设计注浆孔间距。

## 3) 注浆过程控制方法

根据注浆扩散控制方程, 浆液配比和注浆速率是注浆工程中可以人为调控的两个重要因素, 以此提出材料配比动态调节和注浆速率梯度控制技术用于注浆过程控制。

材料配比动态调节技术是指间歇性改变水泥浆与水玻璃的体积比, 提高浆液固化反应速率, 使先期注入的双液浆在通道内快速凝胶, 缩小浆液可流动断面面积, 可实现过水通道快速封堵, 并控制浆液扩散距离。

注浆速率梯度控制技术是指注浆前期选择较大的初始注浆速率, 当注浆压力稳定后, 梯度降低注浆速率, 利于环形通道的充分封堵并提高凝胶体与环形通道岩壁间的黏结能力。

## 3.2 工程应用

### 3.2.1 依托工程概况

营盘壕煤矿位于内蒙古鄂尔多斯乌审旗境内, 采用立井开拓方式, 设计生产能力 1 200 Mt/a, 主井井口标高 +1 247.50 m, 井筒直径(净) 9.40 m, 井筒深度 849.50 m, 井筒采用全深冻结法施工。冻结范围包括 43.58 m 的表土层和 805.92 m 的基岩, 总深度达 865.00 m。冻结钻孔共有 44 个, 直径 192 mm, 冻结管管径 140 mm; 测温管 5 个, 管径 127 mm。冻结施工过程中, 在下入冻结管之前, 采用泥浆置换技术对自孔底以上 200 m 范围进行封闭处理, 但第四系、志丹群及直罗组等含水层区段(图 10)未采取封闭措施, 冻结止水帷幕解冻后将形成环形导水通道。

### 3.2.2 注浆治理工程设计及实施

根据工程地质资料, 进行营盘壕煤矿冻结孔环形隐伏致灾通道注浆治理工程设计。

#### 1) 注浆治理区段确定

根据本矿地质资料, 直罗组与志丹群承压含水层间安定组稳定分布, 其岩性主要为粉砂岩和泥岩, 为天然隔水层。结合现场工程实际, 冻结孔环形导水空间注浆治理区段选为 +731.5~+813.5 m 深度段施工。

#### 2) 注浆终压设计

注浆治理区的地下水静水压力为 5.16 MPa, 结合治理区地质条件, 根据注浆封堵设计方法及公式(11), 确定主井注浆终压  $P = 6.75$  MPa。

#### 3) 注浆孔间距及其布置方式

根据注浆封堵设计方法, 揭露同一环形通道的相邻注浆孔间距为 10~15 m, 实际工程治理中考虑到钻孔施工方便并避开井筒内电缆及管路, 注浆孔间距选取 12~14 m。依据冻结钻孔测斜资料, 掌握钻孔空间

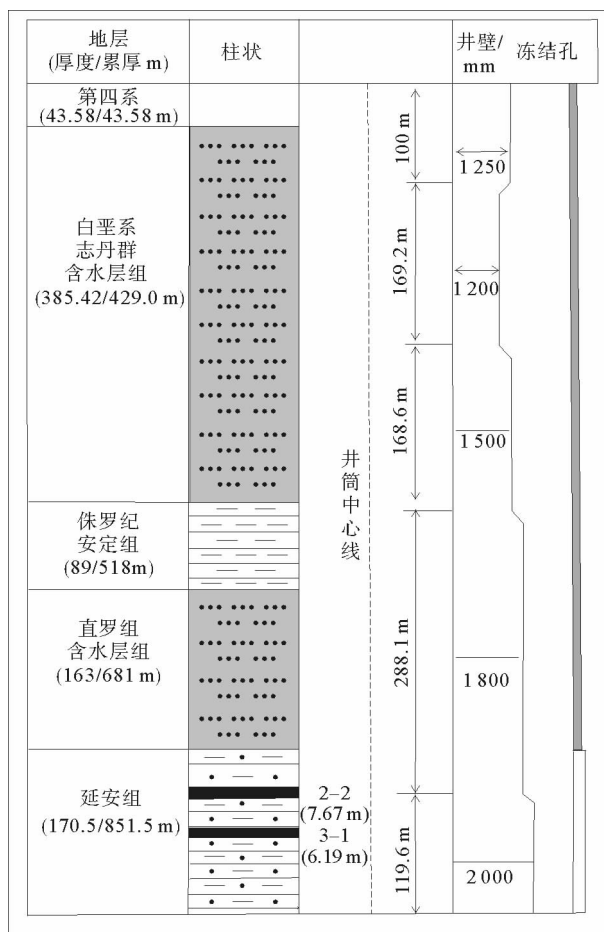


图 10 营盘壕煤矿主井井筒地层剖面图

Fig. 10 Stratigraphic section of the main shaft of Yingpanhao coal mine



轨迹,确定治理区环形通道位置,指导注浆孔方位角设计。注浆治理区共布置 6 组注浆孔,为揭露所有的冻结孔及测温孔,每一组由 49 个注浆孔组成,均匀分布在自上而下的 7 个断面内。

#### 4) 注浆结束标准制定

基于以上理论研究成果,结合多个现场工程经验,制定注浆结束标注如下:当采用浆液为水泥单液浆时,若注浆压力达到设计标准,注浆速率降到设备最低值且保持稳定 30 min,则注浆结束;当采用浆液为水泥-水玻璃双液浆时,若注浆压力达到设计值,注浆速率达到设备最低值且能够稳定 30 min,则注浆结束。

在上述治理方案指导下,营盘壕煤矿主井井筒冻结孔环形通道注浆治理工程于 2016 年 11 月 11 日至 12 月 6 日实施。

注浆结束后,分别在 +785.5、+783.5、+781.5、+779.5、+775.5、+775.5、+773.5、+737.5 等井筒深度施工检查孔 18 个,随机挑选冻结孔检查注浆封堵质量。结果表明,16 个检查孔无涌水,2 个检查孔涌水量小于  $0.01 \text{ m}^3/\text{h}$ ,达到验收要求。

## 4 讨论

1) 为了研究浆液在环形通道内的扩散规律,假设环形通道侧壁光滑无摩擦、侧壁间距处处相等,是可行的也是不可避免的<sup>[16]</sup>。但实际工程中井筒侧壁存在摩擦力且井壁间距存在差异,可能对浆液的扩散产生阻碍作用,导致理论注浆压力比实际注浆压力小,因此为了进一步提高解析结果的精确度,需要进一步开展考虑环形通道侧壁摩擦力及其充填情况下浆液运移机制的研究。

2) 浆液本构方程是剪切应力和剪切速率的函数,对于黏时变性大的浆液来说,现有试验装置只能实现表观黏度的测量,无法实现精确测定本构方程中各项之间的精确关系<sup>[14]</sup>。因此只能利用表观黏度代替浆液真实黏度<sup>[14]</sup>。本研究假设速凝类浆液本构模型为时变性牛顿流体,计算结果的精确度满足工程需要。

## 5 结论

1) 基于黏度时变浆液本构方程,建立恒定注浆速率条件下冻结孔环形通道注浆扩散理论模型,考虑地质条件和工程条件的影响,推导出黏度时变性浆液在环形通道内扩散控制方程。

2) 深入研究了浆液在环形通道内的扩散过程,得到  $C:S=1:1$ 、 $C:S=2:1$  配比下浆液扩散高度分别为 15.5、9.1 m,初凝时刻压差分别为 1.59、0.43 MPa,提出冻结孔环形通道注浆封堵设计方法,指导了注浆钻孔间距与注浆终压的选取。

3) 在环形通道注浆封堵设计方法的指导下,结合营盘壕煤矿地质与水文地质条件,确定了注浆工程施工位置、注浆终压、注浆孔布置方式及注浆结束标准。依托营盘壕煤矿开展主井冻结孔注浆治理工程,施工注浆孔 294 个,注浆结束后经 18 个检查孔检验,均达到冻结孔注浆封堵的要求,取得良好的注浆治理效果。

### 参考文献:

- [1] 刘心广,徐建国,马庆福,等.全深冻结井筒隐蔽竖向导水通道综合治理关键技术研究[J].中国煤炭,2018,44(3):57-62.  
LIU Xinguang, XU Jianguo, MA Qingfu, et al. Study on comprehensive controlling key technology of concealed and vertical water flowing channel caused by full-deep freezing shaft sinking[J]. China Coal, 2018, 44(3): 57-62.
- [2] 周霖,刘承志,张广学,等.全深冻结井筒冻结孔导水通道预注浆技术[J].煤炭科学技术,2017,45(12):88-93.  
ZHOU Lin, LIU Chengzhi, ZHANG Guangxue, et al. Pre-grouting technology of freeze hole water channels in full-deep freeze shaft[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(12): 88-93.
- [3] 杨健辉,汤秀锋,张劲松,等.深部矿井回风井冻结施工过程中管涌事故分析[J].煤炭科学技术,2016,44(3):26-32.  
YANG Jianhui, TANG Xiufeng, ZHANG Jinsong, et al. Analysis on water and soil gushing accident occurred in deep mine air returning shaft during freezing construction[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(3): 26-32.
- [4] LI D W, FAN J H, WANG R H. Research on visco-elastic-plastic creep model of artificially frozen soil under high confining pressures[J]. Cold Regions Science and Technology, 2011, 65(2): 219-225.
- [5] YAO Z S, CHENG H, RONG C X. Shaft structural design and optimization of deep freezing bedrock shaft in west area[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(5): 760-764.

- [6]任胜文.井下高压突水钻孔引流注浆封孔方法研究[J].煤炭科学技术,2019,47(6):213-218.  
REN Shengwen.Study on borehole water diversion grouting sealing method for underground high pressure water inrush[J].  
Coal Science and Technology,2019,47(6):213-218.
- [7]张建国,姜振泉,赵万里,等.破裂井壁大流量涌水治理措施[J].煤炭技术,2015,34(1):176-178.  
ZHANG Jianguo,JIANG Zhenquan,ZHAO Wanli,et al.Control measures on large flow water of broken wall of well[J].  
Coal Technology,2015,34(1):176-178.
- [8]吴璋,王晓东,武光辉,等.井筒冻结孔解冻涌水发生机制及其控制技术[J].煤田地质与勘探,2015,43(1):35-42.  
WU Zhang,WANG Xiaodong,WU Guanghui,et al.Mechanism and control technology of water inrush from shaft freezing  
holes after thawing[J].Coal Geology & Exploration,2015,43(1):35-42.
- [9]BRUNN P O,ABU-JDAYIL B.Axial annular flow of plastic fluids;Dead zones and plug-free flow[J].Rheologica Acta,2007,  
46(4):449-454.
- [10]KALYON D M,MALIK M.Axial laminar flow of viscoplastic fluids in a concentric annulus subject to wall slip[J].Rheo-  
logica Acta,2012,51(9):805-820.
- [11]EL TANI M.Grouting rock fractures with cement grout[J].Rock Mechanics and Rock Engineering,2012,45(4):547-561.
- [12]魏久传,韩承豪,张伟杰,等.基于步进式算法的裂隙注浆扩散机制研究[J].岩土力学,2019,40(3):913-925.  
WEI Jiuchuan,HAN Chenghao,ZHANG Weijie,et al.Mechanism of fissure grouting based on step-wise calculation method  
[J].Rock and Soil Mechanics,2019,40(3):913-925.
- [13]ZHANG W J,LI S C,WEI J C,et al.Grouting rock fractures with cement and sodium silicate grout[J].Carbonates and  
Evaporites,2018,32(2):221-222.
- [14]张庆松,张连震,张霄,等.基于浆液黏度时空变化的水平裂隙岩体注浆扩散机制[J].岩石力学与工程学报,2015,34(6):  
1198-1210.  
ZHANG Qingsong,ZHANG Lianzhen,ZHANG Xiao,et al.Grouting diffusion in a horizontal crack considering temporal  
and spatial variation of viscosity[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2015,34(6):1198-1210.
- [15]ZHANG Q S,ZHANG L Z,LIU RT,et al.Grouting mechanism of quick setting slurry in rock fissure with consideration of  
viscosity variation with space[J].Tunneling and Underground Space Technology,2017,70:262-273.
- [16]李术才,张伟杰,张庆松,等.富水断裂带优势劈裂注浆机制及注浆控制方法研究[J].岩土力学,2014,35(3):744-752.  
LI Shucai,ZHANG Weijie,ZHANG Qingsong,et al.Research on advantage-fracture grouting mechanism and controlled  
grouting method in water-rich fault zone[J].Rock and Soil Mechanics,2014,35(3):744-752.

(责任编辑:高丽华)