

DOI: 10.16285/j.rsm.2020.1418

# 盐穴储气库微渗层注浆封堵试验研究

刘元玺<sup>1,2</sup>, 李银平<sup>1,2,3</sup>, 施锡林<sup>1,2</sup>, 赵 凯<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;  
3. 中国科学院武汉岩土力学研究所 环境岩土工程湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430071)

**摘 要:** 我国盐穴地下储气库大多建造在具有不同渗透性的层状盐岩地层中, 因此保证储库拥有良好的密闭性至关重要。针对盐穴井筒“裸眼段”意外跨越微渗地层而导致储气库密闭性失效的问题, 自主研发了渗漏地层注浆封堵试验平台, 并结合现场地质渗漏情况设计了注浆封堵可行性试验方案。在确定了兼具流动性和填充密实性的浆液配合比后, 开展了超细水泥封堵岩芯的试验研究。结果表明, 超细水泥可以有效填充岩芯孔隙并降低其渗透率, 注浆后岩芯孔隙率和渗透率降幅分别达到近 16%和 95%。封堵试验数据显示浆液封堵范围与注浆时间呈幂函数关系, 浆液流型满足幂律流, 而非牛顿流。该研究成果可为盐穴储气库微渗地层注浆封堵提供必要的理论和试验依据, 对类似密闭性失效井筒的二次利用具有重要意义。

**关 键 词:** 盐穴地下储气库; 微渗地层; 超细水泥; 注浆; 渗流迁移

中图分类号: TE822

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2022) 增刊 1-0023-12

## Experimental study on grouting method for plugging micro-permeable layer in salt cavern gas storage

LIU Yuan-xi<sup>1,2</sup>, LI Yin-ping<sup>1,2,3</sup>, SHI Xi-lin<sup>1,2</sup>, ZHAO Kai<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Hubei Key Laboratory of Geo-environmental Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

**Abstract:** The salt cavern underground gas storages in China are mostly built in layered salt rock strata with varying permeability. Ensuring good airtightness of the salt cavern gas storages is important. To solve the problem that the “open-hole section” of the wellbore accidentally traverses the micro-permeable layer and causes the airtightness failure of gas storage, a grouting test platform for plugging the micro-permeable layer was independently developed and a feasibility test of grouting plugging was designed based on the geological leakage situation on site. After determining the proportion of slurry with fluidity and filling compactness, an experimental study on plugging cores with ultra-fine cement was conducted. The test results show that the ultra-fine cement can effectively fill the pore and reduce the core permeability. The porosity and permeability of the cores are decreased by about 16% and 95% after the grouting tests. The plugging test data show that the plugging range is in the power function relationship with the grouting time, and the grout flow pattern satisfies the power law flow instead of the Newtonian flow. This study can provide theoretical and experimental basis for the grouting method to plug the micro-permeable layer in salt cavern gas storage, and it is critical for the secondary utilization of similar airtightness failure of the wellbore.

**Keywords:** salt cavern underground gas storage; micro-permeable interlayer; ultra-fine cement; grouting; seepage migration

## 1 引 言

建立一定规模的能源储备是国家安全和经济发展的重要保障。盐岩自身具有极低的渗透率、良好的蠕变性能和损伤自愈合等能力, 因此, 利用深

部盐矿水溶开采以形成地下空间进行油气储备已成为世界各国的首选<sup>[1]</sup>。

中国盐矿资源十分丰富, 分布范围很广。与国外厚度大、品质好的海相沉积盐岩不同, 我国现阶段探明的盐层大多属于湖相沉积, 这类盐矿具有盐

收稿日期: 2020-09-21

修回日期: 2022-02-14

基金项目: 国家自然科学基金 (No.51874273, No.51774266)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China(51874273, 51774266).

第一作者简介: 刘元玺, 男, 1995 年生, 硕士研究生, 主要从事盐穴地下储库密闭性方面的研究工作。E-mail: liuyuanxi\_whrsm@163.com

通讯作者: 李银平, 男, 1969 年生, 博士, 研究员, 主要从事能源地下储库岩石力学与工程方面的研究工作。E-mail: ypli@whrsm.ac.cn

层数量多、单层厚度薄以及不溶物含量高等特点,属于典型的层状盐岩构造<sup>[2-4]</sup>。

因此,在我国盐穴储气库工程建设过程中,为了保证建库规模和经济效益,不得已在盐矿顶部厚度较小的盐岩交互层中钻取“裸眼段”作为固井井筒和盐穴顶部的连接通道(见图1)。“裸眼段”完全裸露在外,与储存的油气以及造腔时产生的卤水完全接触,可以有效减少实际使用过程中因盐岩蠕变对井筒产生的影响。但由于湖相沉积盐岩地质条件较为复杂,夹层品质不一,“裸眼段”存在穿越一个渗透率较高的夹层的可能性,使其成为气体泄漏通道,导致储气库腔体密闭性达不到要求。

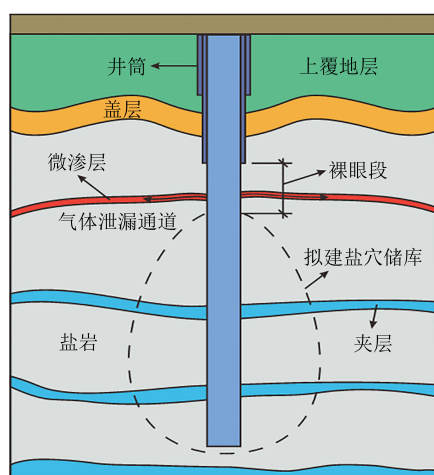


图1 井筒“裸眼段”泄漏示意图  
Fig.1 Schematic diagram of leakage in the “open hole section” of the wellbore

在中国金坛某盐穴储气库的建设过程中已经发生了类似事故。在工区已部署的井筒进行 NTL (nitrogen leak test) 密闭性测试<sup>[5]</sup>时发现,所检测的5口储库井中(Z1~Z5,位置分布见图2)有3口存在泄漏情况,分别为Z1、Z2和Z5井。测试结果显示泄漏位置位于储库井筒“裸眼段”<sup>[6]</sup>,埋深平均约为890 m。其中Z1井泄漏最为严重,经测算泄漏速率达9.66 m<sup>3</sup>/h,这导致后续的水溶造腔无法展开<sup>[7]</sup>。

对现场岩芯取样后发现(见图3),该地段孔隙、裂隙发育,裂缝长度在10~200 mm,开度范围在1~15 mm之间,同时伴随有网状结构。孔渗测试结果显示,漏失段泥岩样品孔隙率在7.52%~14.18%之间,渗透率在 $1.1 \times 10^{-4} \sim 2.12 \times 10^{-2} \mu\text{m}^2$ 之间,渗透参数远高于井筒其他位置,这证实了该处连续分布的泥岩夹层是导致井筒密封性失效的根本原因<sup>[8]</sup>。由于气体漏失速度小于渗透性漏失,因此

该夹层被定义为微渗层。如果不采取相应的工程措施进行修复,储气库建设只能终止,将导致工程前期投入被极大浪费。

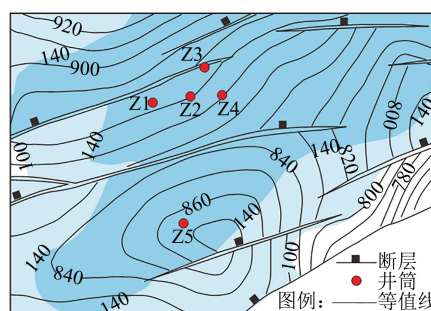


图2 井筒位置分布示意图(单位: m)  
Fig.2 Schematic diagram of wellbore location distribution (unit: m)



图3 微渗层岩芯实物图  
Fig.3 Physical map of micro-permeable layer core

注浆方法对破损地层进行加固是工程中的常用手段<sup>[9]</sup>,在隧道<sup>[10]</sup>、煤矿<sup>[11]</sup>、岩溶<sup>[12]</sup>等地下防水工程中已经有相当成功的经验<sup>[13]</sup>。目前,许多学者对注浆机制已经进行了深入研究。例如, Funchag 等<sup>[14]</sup>通过试验证明,随着浆液水化反应的进行,胶凝材料会逐渐硬化,最终会封闭岩体节理裂隙。Tani<sup>[15]</sup>根据 Bingham 流体本构关系推导了岩石裂隙注浆流动方程; Kelessidis 等<sup>[16]</sup>考虑了浆液流变性,对如何加强封堵效果和增大扩散范围做出了系统分析。但是对于低渗透率岩层封堵设计和封堵成效还缺乏相应的理论依据和试验数据支撑。

深部地层注浆施工涉及浆液在孔隙中的渗流、运移以及多孔介质变形等众多复杂力学行为<sup>[17-18]</sup>,而且施工过程大多是通过地面人员遥控来实施的,较难通过直接观测手段获取浆液扩散数据,这给注浆设计和封堵范围的预测带来了很大的困难<sup>[19-20]</sup>,针对多孔介质的注浆问题,陈鑫<sup>[21]</sup>、杨志全<sup>[22]</sup>等研究了 Bingham 型和幂律型浆液在多孔介质中的渗透扩散机制;张庆松等<sup>[23]</sup>建立了考虑扩散路径的多孔介质渗透注浆模型,但是缺少相应的试验验证,因

此，有必要建立微渗层浆液渗流试验平台，借助室内试验和理论分析，揭示浆液渗流机制。

封堵材料具有良好的性能是注浆成功的重要因素。首先封堵材料的粒径足够小，可以在压力的驱动下进入岩芯孔隙；其次配置的浆液要有一定的流动性能，这需要浆液黏度不能过高，也不能增长过快，否则不仅不利于注浆施工，还会对设备造成损害<sup>[24]</sup>；最后，浆液凝结硬化后要足够密实，可以封闭岩芯孔隙。这对封堵浆液的性能提出了较高的要求。

综合以上工程实际和理论分析，本文的目的在于利用试验手段评估注浆封堵低渗地层的可行性。在确定封堵浆液配合比后，借助自主研发的注浆封

堵试验平台开展渗流试验，通过对比封堵前后岩芯的渗透参数评估封堵成效，利用试验过程中监测到压降曲线和渗透范围曲线，得出渗流运动方程，揭示了浆液在地层中的扩散规律。

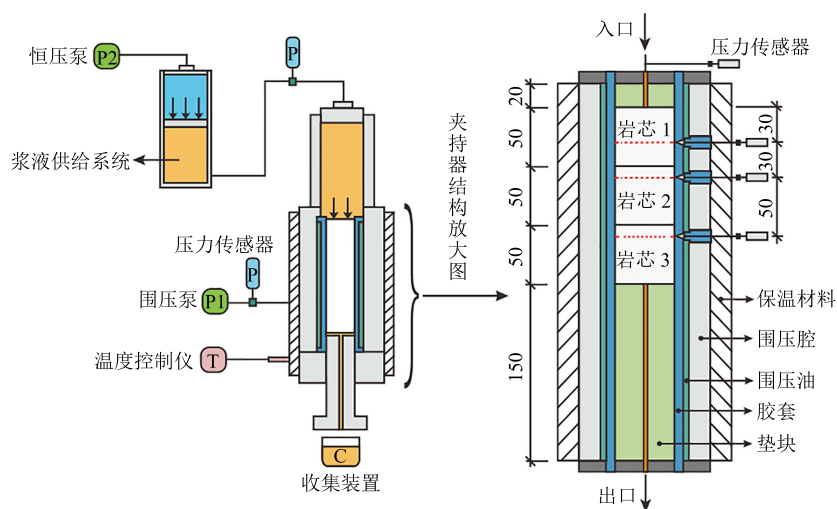
## 2 注浆封堵试验装置

### 2.1 装置组成和结构

因为地层种类和深度的限制，以及试验仪器规模的制约导致现阶段深部地层的渗流研究大多集中在理论研究和数值模拟阶段。为此中国科学院武汉岩土力学研究所自主研发了微渗层注浆封堵试验装置（见图 4），用以模拟真实的注浆过程，探究渗流机制。



(a) 实物图



(b) 结构图（单位：mm）

图 4 注浆封堵试验装置

Fig.4 Grouting device to plug the permeable formations

注浆封堵试验装置主要由岩芯夹持器、浆液供给系统、围压控制系统、压力传感器、温度控制系统和数据采集系统等组成。岩芯夹持器是试验装置的主体，用于固定岩芯、施加围压、进行封堵试验。装置施加的渗透压和围压最高可达 40 MPa 和 50 MPa，满足实际工程中的压力条件，可适用于直径 25 mm、长度 30~300 mm 的岩芯进行各类液体的渗透试验。

浆液供给系统由浆液容器和恒压泵组成，恒压泵利用高压水产生压力，可以设置恒压和恒流两种模式。温度控制系统由电加热器、温度传感器和温度控制器组成，用来模拟地层温度，使岩芯均匀受热，为持久恒温提供了可靠保障。

如何确保浆液在压力作用下从岩芯内部渗流，而非在岩芯与夹持器的贴合面扩散是试验成功的

关键。为了解决这一问题，采取以下办法：一方面，由图 4(b)试验装置结构图可见，岩芯由胶套包裹，不与金属外壳直接接触，胶套外部被油包裹，在进行注浆试验前，利用油压泵给施加围压，使胶套和岩芯紧密贴合，只要围压高于渗透压力，就可确保浆液不会沿着岩芯表面流动；另一方面，如果在试验中浆液出现沿边壁流动的现象，那么夹持器将不能保压，压力传感器也无法检测到压力。也就是说，只要传感器监测到压力变化，就证明浆液已经从岩芯中渗流而过。

### 2.2 试验装置原理

沿渗流方向设置的 4 枚压力传感器，用于监测岩芯孔隙压力变化。由于前期压降较快，测压点采用前密后疏的布置方式，间隔距离分别为 30、30、50 mm，以便监测到更准确的数据，如图 4(b)所示。

此外,测压头前端采用锥形设计,穿过胶套与岩芯表面形成包裹式紧密接触,保证仪器的灵敏程度,同时在出口安装隔离器,防止浆液或者其他物质堵塞测压管线。

在渗流面到达传感器之前,压力值为 0,渗流面一旦到达,压力值会突然升高,并开始随着时间变化。根据系统实时记录的数据,可以得到压力变化曲线图。同时根据压力突变时间点,就可以计算浆液渗流速度:

$$v = \frac{dl}{dt} \quad (1)$$

式中:  $l$  为浆液渗流范围;  $t$  为浆液渗流时间;  $v$  为在该渗流范围内,浆液的渗流速度。

### 3 注浆封堵试验设计

试验为了真实模拟水泥浆液在深部地层的渗流过程,验证注浆手段封堵微渗层的可行性,需要揭示出封堵前后岩芯的侵蚀程度和其渗透特性的变化。所以在进行试验之前,需要进行如下的准备工作:试验岩芯的加工与测试、注浆材料的选择和注浆参数的确定。

#### 3.1 试验岩芯准备与测试

试验选取灰白色砂岩作为研究对象,利用机器加工结合手工打磨的方式,将其加工为直径 25 mm、长度 50 mm 的圆柱体,共 6 块,如图 5 所示。

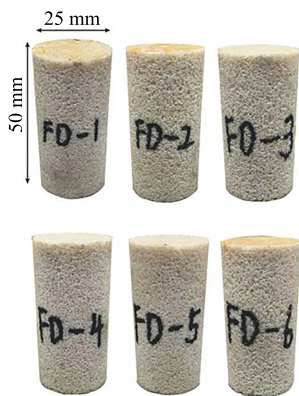


图 5 试验岩芯实物图

Fig.5 Physical image of test core

为了与封堵后岩芯进行对比,对封堵效果进行评价,在进行封堵试验之前,利用自行研制的岩芯孔隙率-渗透率一体化测试装置对岩芯的渗透参数进行测试(见图 6)。该装置以氮气作为渗透介质,采用稳态法和非稳态法两种测试模式<sup>[25-26]</sup>,测量范围为  $10 \sim 10^{-10} \mu\text{m}^2$ ,基本满足了各类岩芯的测试需

求。根据本次试验中岩芯的基本情况,渗透率以 Darcy 定律为原理,采用稳态法测定,测试结果见表 1。



图 6 岩芯孔隙率-渗透率一体化测试装置

Fig.6 Integrated test device for core porosity-permeability

表 1 岩芯渗透率和孔隙率测试结果

Table 1 Core permeability and porosity test results

| 岩芯编号 | 渗透率/ $\mu\text{m}^2$ | 孔隙率/% |
|------|----------------------|-------|
| FD-1 | 2.245                | 27.07 |
| FD-2 | 2.429                | 28.61 |
| FD-3 | 2.506                | 27.81 |
| FD-4 | 0.905                | 21.44 |
| FD-5 | 0.131                | 21.93 |
| FD-6 | 0.046                | 21.86 |
| 平均值  | 1.377                | 24.79 |

由于孔隙结构的差异性,导致岩芯渗透参数不尽相同,但基本可以归纳为:渗透率越高的试样,孔隙率越大。但是试样 FD-4 和试样 FD-6 在孔隙率差别不大的情况下,试样 FD-4 的渗透率却高出试样 FD-6 近 20 倍。这说明多孔介质的渗透率不仅与其中的孔隙数量有关,还受到孔隙结构的影响。如果多孔介质内部孔隙没有充分联通,即使孔隙数量充足也不会对流体流动起到促进作用。

为了更准确地获取岩芯孔隙结构的特征,在原始岩石上不同位置加工出 3 块边长为 10 mm 的立方体(见图 7),利用全自动压汞仪(MIP)进行了孔隙分布测试。结果显示,该砂岩岩芯孔隙分布具有较好的一致性,下面以试样 1 的曲线为例进行分析。图 8 为其进汞退汞曲线,可以看出,进汞曲线在 50 000 nm (50  $\mu\text{m}$ ) 后有峰值,在 500 nm 处有少量波动,说明砂岩孔隙大小主要分布在 50  $\mu\text{m}$  以上。

#### 3.2 封堵材料选择

根据现场调研的情况,需要封堵的地层埋深近 890 m,最高渗透率达  $0.02 \mu\text{m}^2$ ,使得封堵施工面临以下问题:

(1) 盐穴储库使用寿命长达 30 年以上，需要有长久的封堵效果。

(2) 地层裂隙很小，一般的悬浮颗粒不易进入。

(3) 泄漏位置较深，地应力和渗透压将对注浆效果产生巨大的影响。



图 7 压汞试验样品

Fig.7 Mercury intrusion test samples

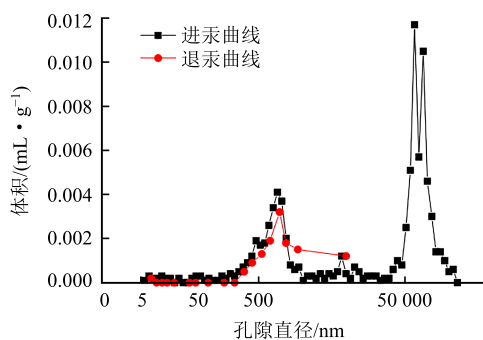


图 8 试样 1 进汞退汞曲线

Fig.8 Mercury entering and exiting curves of sample No.1

因此，为了达到良好的封堵效果，止漏浆液需要具备如下特性：

(1) 组成浆液的胶凝材料粒径要足够小，如果材料的最小粒径大于微渗层孔隙，无论注浆压力多大，浆液都不能进入地层，即封堵浆液存在“最小可灌入宽度”<sup>[27]</sup>。

(2) 在高压挤入过程中，浆液需要保持良好的流动性，黏度不能增长过快，否则会影响封堵范围。

(3) 浆液进入微渗层凝结硬化后，要足够致密，可以封闭岩芯孔隙，起到封堵效果。

结合以上分析，超细水泥基本可以满足上述要求<sup>[28-29]</sup>。因其颗粒细、比表面积大、水化反应快等特性<sup>[30]</sup>，可以在施工中提高压入量，增强封堵成效，具有持久的胶结能力<sup>[31]</sup>，尤其适合低孔隙率岩层的封堵作业<sup>[32]</sup>。经过市场调研，试验最终选用了 01 型超细水泥，该超细水泥同时添加了膨胀剂、矿渣等多种助剂，使其在固化时无收缩现象，具有较高的强度和抗渗性能，技术指标见表 2。

表 2 水泥力学强度技术指标

Table 2 Technical indicators of cement mechanical strength

| 项目    | 抗压强度/MPa |      | 抗折强度/MPa |      |
|-------|----------|------|----------|------|
|       | 3 d      | 28 d | 3 d      | 28 d |
| S2000 | ≥30      | ≥60  | ≥5       | ≥7   |

为了满足岩芯最小可灌入宽度的要求，对水泥进行了激光粒度测试，结果显示（见图 9），该类型超细水泥粒径主要分布在 1~10 μm 内。根据前人的研究结果，当封堵材料的球粒径与岩芯孔隙直径的比值为 0.33~1.50 时，具有稳定的封堵能力，且封堵效果随着材料粒径的减小而加强<sup>[33]</sup>。根据此前压汞试验所测得的数据，岩芯孔隙直径（50 μm）达到了水泥颗粒粒径近 5 倍以上，这表明该型超细水泥是可以进入岩芯孔隙的。

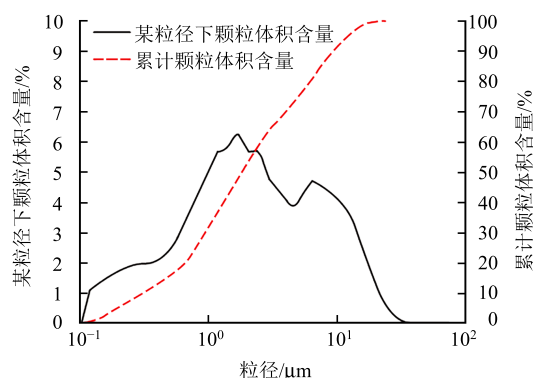


图 9 超细水泥颗粒级配曲线

Fig.9 Gradation curve of the ultra-fine cement particle

### 3.3 注浆参数确定

根据 Lombardi<sup>[34]</sup>在 1985 年提出的注浆模型，对注浆范围影响最大的两个参数分别是注浆压力和注浆时间。提高注浆压力和注浆时间都可以增大浆液的扩散范围，但是这两个参数都要在一定范围内，如果选择不当，可能会对施工产生不利的影响。

注浆时间主要由浆液的初凝时间决定，如果注浆时间超过了浆液初凝时间，浆液会产生塑性，不仅难以挤入地层，还会对注浆设备产生损害。注浆时间可根据室内配浆试验结果给出。

注浆压力是浆液扩散的驱动力，如果注浆压力太小，则浆液难以挤入地层，导致封堵范围不够。如果注浆压力过大，有可能导致地层产生新的裂缝，对于储气库的密闭性是不利的。注浆压力  $P_{in}$  推荐范围应该保持在储气库最大运行压力  $P_{max}$  与地层破裂压力  $\sigma_{max}$  之间，即

$$P_{\max} \leq P_{\text{in}} \leq \sigma_{\max} \quad (2)$$

综合以上分析,在本次试验中,将岩芯按照渗透率高低(见表1)分为2组进行注浆,分组情况和注浆参数见表3。

表3 注浆封堵试验方案  
Table 3 The plan of grouting experiment

| 试验组别 | 岩芯编号 | 注浆压力/MPa | 围压/MPa | 温度/℃ |
|------|------|----------|--------|------|
| 1    | FD-1 | 1        | 3      | 40   |
|      | FD-2 |          |        |      |
|      | FD-3 |          |        |      |
|      | FD-4 |          |        |      |
| 2    | FD-5 | 10       | 15     | 40   |
|      | FD-6 |          |        |      |

## 4 浆液配比试验

由于水泥材料的特殊性,不同产品之间存在一定差异,在选用注浆材料时,还需要进一步对浆液的黏度时变性展开测试,根据材料的水化反应特性来调整浆液配合比,用以达到最佳的注浆效果。配比试验将分为两个部分,首先确定浆液水灰比;其次,在此基础上掺入添加剂,进一步提高浆液的流动性、调整其初凝时间,使其尽可能满足注浆试验和现场应用的要求。

### 4.1 水灰比的确定

水灰比是浆液中水与水泥用量的比值,在浆液配合比设计中起着决定性的作用。随着用水量的增加,浆液的流动性和渗透性会增大,初凝时间会逐渐延长,强度会逐渐减小<sup>[35-36]</sup>。因此,需要针对不同大小的孔隙空间、注浆条件和强度要求来确定适宜的水灰比。一般在保证凝结时间和后期强度的条件下,要尽可能增大流动性,便于注浆施工。

第1组浆液配合比见表4,试验设置水灰比为自变量,采用高水灰比配浆方案(见图10)。浆液配制完成后,立即使用数显黏度计测量浆液的初始黏度(见图11),并在室温25℃下静置直至浆液初凝,记录初凝时间,结果见图12。

表4 第1组浆液配合比  
Table 4 Mixing ratio of the first group of slurry

| 编号    | 超细水泥/g | 水/g | 水灰比 |
|-------|--------|-----|-----|
| WR-01 | 350.0  | 350 | 1   |
| WR-02 | 175.0  | 350 | 2   |
| WR-03 | 117.0  | 350 | 3   |
| WR-04 | 87.5   | 350 | 4   |
| WR-05 | 70.0   | 350 | 5   |

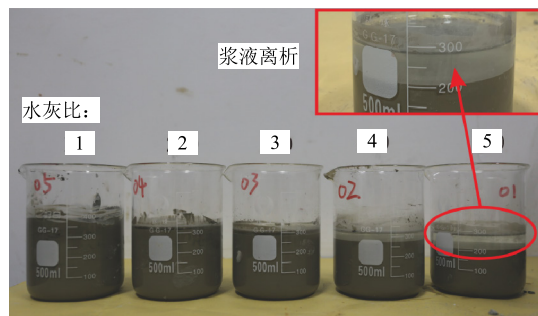


图10 不同水灰比下浆液对照试验  
Fig.10 Control experiment under different water-cement ratios



图11 水泥浆液动力黏度测试图  
Fig.11 Schematic diagram of dynamic viscosity test of cement slurry

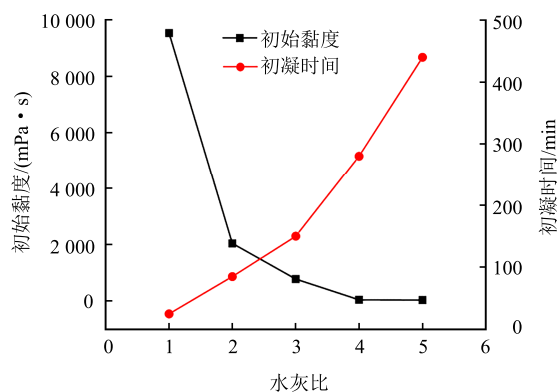


图12 不同水灰比下浆液的初始黏度和初凝时间  
Fig.12 Initial viscosity and setting time of slurry under different water-cement ratios

由图12可知,随着水灰比增大,浆液的初始黏度会迅速减小,表明其流动性有显著提高,而初凝时间则会被严重推迟。特别是在水灰比为1时,浆液的初始黏度达到了9540 mPa·s,此时浆液特别黏稠,几乎处于塑性状态,流动性极差,仅用时25 min就达到初凝。当水灰比逐渐增大至5时,浆液初始黏度降低至30.8 mPa·s,初凝时间也延长至440 min左右。但此时浆液保水性较差,会产生离析,有严重的分层现象(见图10)。如果将这类浆

液应用于封堵施工，将会使封堵地段不够密实，影响封堵效果。

对第 1 组试验对比分析后，在兼顾流动性和密实性的前提下，浆液水灰比选用 2.5 为最佳。

#### 4.2 浆液流动性能优化

在确定水灰比后，虽然浆液有较高的保水性，但过高的初始黏度（浆液初始黏度超过 1 000 mPa·s）以及过快的黏度增长速度（100 min 左右即可初凝）仍然会给注浆带来挑战。第 2 阶段试验将针对这两个问题对浆液性能做出优化。

聚羧酸减水剂是一种水泥分散剂，其特殊的分子结构不仅可以通过空间的位阻作用分散水泥颗粒，还可以通过在水泥颗粒表面的吸附行为表现出较强的缓凝作用<sup>[37]</sup>。在此，选用聚羧酸减水剂对浆液性能进行改进。

第 2 组试验设置减水剂掺量为自变量，浆液配合比见表 5。配浆试验显示（见图 13），随着减水剂掺量的增加，浆液中的气泡量有一定的增加，这是由于聚羧酸减水剂中含有一定量的降低表面张力的活性成分，具有一定的引气性，这对于增加浆液的流动性是有利的，后文中的黏度测量也印证了这一点。

表 5 第 2 组浆液配合比

Table 5 Mixing ratio of the second group of slurry

| 编号    | 超细水泥/g | 水/g | 水灰比 | 减水剂/% |
|-------|--------|-----|-----|-------|
| JS-01 | 140    | 350 | 2.5 | 0.0   |
| JS-02 | 140    | 350 | 2.5 | 0.2   |
| JS-03 | 140    | 350 | 2.5 | 0.4   |
| JS-04 | 140    | 350 | 2.5 | 0.6   |
| JS-05 | 140    | 350 | 2.5 | 0.8   |

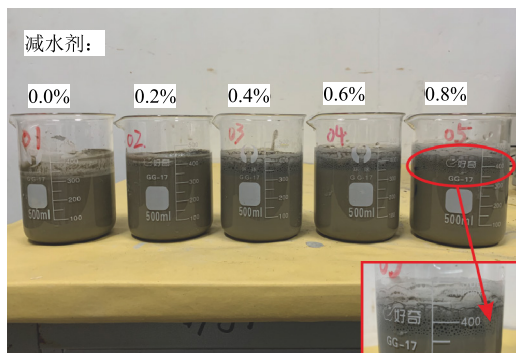


图 13 不同减水剂下浆液对照试验

Fig.13 Control experiment under different contents of water reducing agent

根据黏度计测量的每组浆液 3 h 内的黏度变化情况，绘制出不同减水剂掺量下的浆液黏度时变曲

线见图 14。可以看出，随着减水剂的逐渐加入，浆液黏度增长有了明显的放缓趋势。当减水剂掺量从 0% 增加至 0.8% 时，浆液 3 h 黏度从 2 921 mPa·s 迅速降至 110 mPa·s，流动性有了极大的提高。但浆液初凝时间随着缓凝效果的增强而推迟，减水剂掺量增至 0.8% 时，初凝时间达到近 11 h（见图 15），无法保证进入地层的浆液能尽快起到封堵作用。在兼顾流动性和初凝时间的条件下，减水剂掺量为 0.4% 的效果最好。浆液配合比和基础性能见表 6。

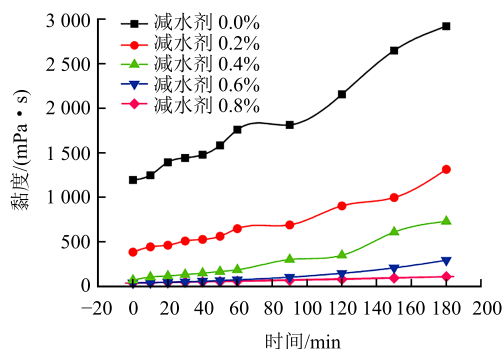


图 14 不同减水剂掺量下的浆液黏度时变曲线

Fig.14 Time-varying curves of slurry viscosity under different contents of water reducing agent

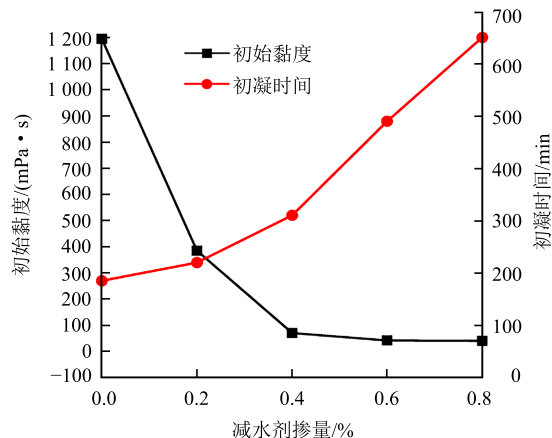


图 15 不同减水剂掺量下浆液的初始黏度和初凝时间

Fig.15 Initial viscosity and setting time of slurry under different contents of water reducing agent

表 6 浆液配合比与基础性能

Table 6 Mixing ratio and basic performance of slurry

| 水灰比 | 减水剂/% | 密度/(kg·m <sup>-3</sup> ) | 初始黏度/(mPa·s) | 初凝时间/min |
|-----|-------|--------------------------|--------------|----------|
| 2.5 | 0.4   | 1 850                    | 70           | 300      |

## 5 注浆封堵试验结果及分析

### 5.1 孔隙率和渗透率测试

图 16 为注浆试验后岩芯的状态，可以看到，整个岩芯变成了均匀的灰色，浆液水化反应的胶结

产物紧密附着在岩芯孔隙中,说明浆液对岩芯孔隙具有良好的填充效果。将岩芯在常温下静置 72 h,利用孔隙率-渗透率一体化测试装置,再次对岩芯的渗透参数进行测量,结果见表 7。

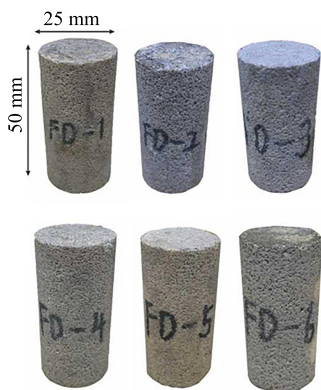


图 16 注浆封堵后岩芯实物图

Fig.16 Physical image of core after grouting and plugging

表 7 注浆后渗透参数测试结果

Table 7 Test results of permeability parameters before and after grouting

| 组别  | 岩芯编号 | 渗透率/ $\mu\text{m}^2$ | 孔隙率/% |
|-----|------|----------------------|-------|
| 1   | FD-1 | 0.030                | 20.49 |
|     | FD-2 | 0.208                | 22.35 |
|     | FD-3 | 0.132                | 22.64 |
|     | FD-4 | 0.018                | 18.98 |
| 2   | FD-5 | 0.003                | 19.76 |
|     | FD-6 | 0.004                | 19.88 |
| 平均值 | —    | 0.066                | 20.68 |

将表 7 数据与岩芯注浆前的参数(见表 1)进行对比,渗透率平均降幅达 95.13%,孔隙率平均降幅为 15.87%。说明超细水泥浆液可以有效填充并封闭孔隙,岩芯的密闭性能得到了显著提高(见图 17)。

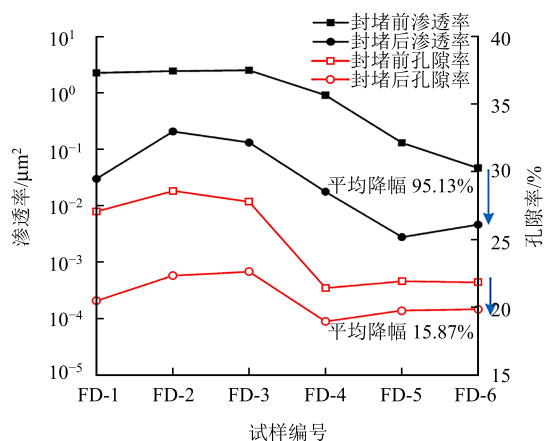


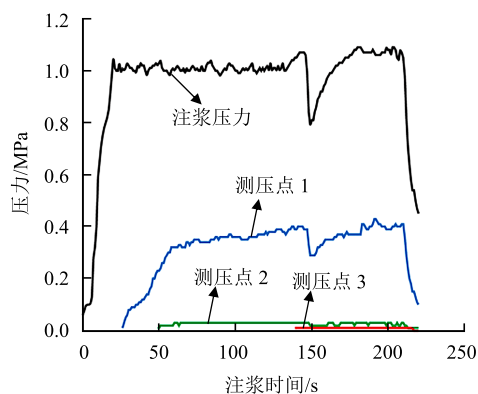
图 17 注浆封堵前后岩芯渗透参数对比

Fig.17 Comparison of core permeability parameters before and after grouting

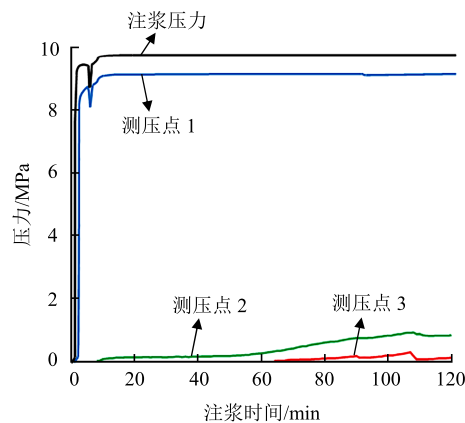
在注浆之后,试样渗透参数变化呈现一定的规律,即岩芯渗透率的降幅远高于孔隙率(见图 17)。造成这种现象的原因初步推断与岩芯孔隙结构有关。一般来说,岩石孔隙率越高,渗透率也越高,但是两者并没有完全的相关性。在低渗透率岩石中,渗透率主要受孔径大小及其相对应的孔隙比例高低共同控制<sup>[38]</sup>。如果要充分降低岩芯孔隙率,那么必须使浆液可以在所有孔隙中自由流动,所以孔隙空间应该有相当一部分是相互联通的,这部分孔隙空间称为有效空间。如果不联通的孔隙或者连通后末端封闭的无效孔隙占比过大,那么浆液将无法进入,封堵后岩芯孔隙率降幅会不理想。故只要浆液的硬化产物已经封闭了岩芯大部分的联通通道,充满了有效孔隙空间,即使在孔隙率降幅不高的情况下,渗透率也会大幅降低。

## 5.2 岩芯注浆压力曲线和渗透范围

图 18 是两组注浆试验中监测到的压力变化曲线。曲线出现的大幅度跳动是因为恒压泵切换工作活塞所致,属正常现象。第 1 组试验中,岩芯渗透



(a) 第 1 组试验



(b) 第 2 组试验

图 18 注浆封堵试验测压点压力变化曲线

Fig.18 Pressure change curves of pressure measuring points in grouting plugging test

率较高,浆液在 1 MPa 压力作用下仅用时 210 s 左右便通过岩芯。可见即使浆液存在一定黏度,在渗透率较高的岩芯中,依然有很好的流动能力,在一定的压力的作用下便可进入孔隙结构。在第 2 组试验中,岩芯渗透率普遍偏低,将注浆压力提高至 10 MPa,浆液便快速渗过了渗透率最高的 FD-4 试样(渗透率  $0.905 \mu\text{m}^2$ ),并完全充满了岩芯孔隙,这导致测压点 1 的数据几乎和注浆压力同步变化(见图 18(b))。但随后进入渗透率较低的 FD-5 试样时(渗透率  $0.131 \mu\text{m}^2$ ),渗流速度急剧放缓,浆液到达测压点 3(渗透距离为 60 mm)用时近 66 min。可见,渗流速度不仅和压力梯度有关,还受到多孔介质孔隙结构和流体黏度的影响,随着后续岩芯渗透率的急剧降低和浆液黏度逐渐增长,渗流速度也逐渐放缓。

通过两组对比试验可以看出,超细水泥浆液拥有较好的流动能力。在高渗透率岩芯中,只需略微施加渗透压便可进入孔隙结构。即使岩芯渗透率降低,通过提高注浆压力,浆液也可以在一定时间内渗入岩芯。这对现场注浆封堵施工有一定的借鉴意义。

根据测压点的监测数据,将渗透范围和渗流时间进行了拟合(见图 19),在第 2 组试验中,由于第 1 块岩芯渗透率较高,导致测压点 1 的数据和入口压力同步变化,此处没有参考意义,故选用 3 个数据点进行拟合。拟合结果表明,无论在高渗透率组还是在低渗透率组,渗透范围和渗流时间均满足幂函数关系,浆液渗流速度前期较快,后期逐渐放缓。表达式为

$$l = \alpha t^\beta \quad (3)$$

式中:  $\alpha$  为与多孔介质和流体性质有关的综合参数;  $\beta$  为渗透范围幂指数。

### 5.3 封堵试验理论分析

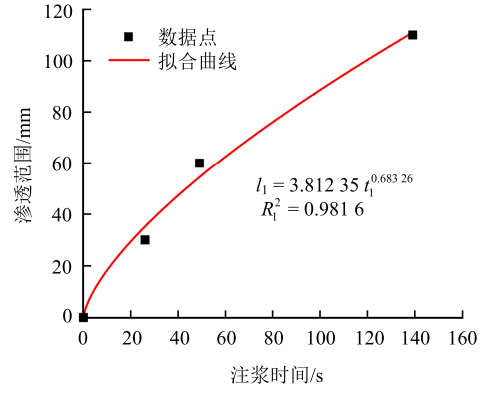
前文通过注浆试验得到了压力梯度的变化规律和渗透范围的数学模型,浆液渗流机制可以结合试验数据得到。由式(3)可知,渗透范围满足幂函数关系,将其代入式(1)可得渗流速度公式为

$$v = \frac{dl}{dt} = \alpha \beta t^{\beta-1} \quad (4)$$

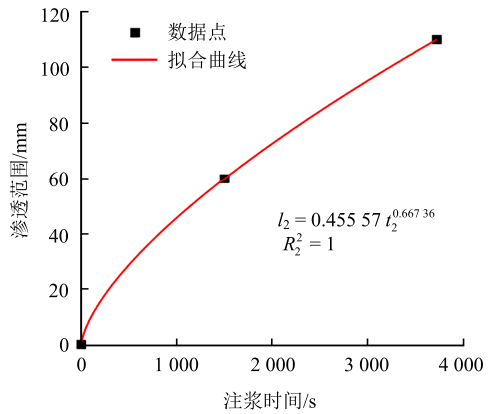
利用注浆压力  $p_0$  可计算出对应渗透范围内的压力梯度为

$$\nabla p = \frac{p_0}{l} = \frac{p_0}{\alpha t^\beta} \quad (5)$$

将浆液渗流速度和压力梯度进行拟合,拟合结



(a) 第 1 组试验



(b) 第 2 组试验

图 19 浆液渗透范围及其拟合曲线  
Fig.19 Range of slurry penetration and its fitting curve

果如图 20 所示。由图可以看出,浆液的渗流速度始终和压力梯度保持幂函数关系,拟合优度  $R^2$  分别达到了 0.997 45 和 1,两者呈现出较好的幂函数关系,因此本次浆液渗流试验的运动方程可以归纳为

$$v = \omega(\nabla p)^\psi \quad (6)$$

式中:  $\omega$  为与多孔介质、渗流介质、渗透压有关的综合物理性质参数;  $\psi$  为渗流幂指数。

根据 Darcy 定律可知

$$v = -\frac{K}{\mu} \left( \frac{\partial p}{\partial l} + \rho g \right) \quad (7)$$

式中:  $K$  为绝对渗透率;  $\mu$  为流体黏度;  $\partial p / \partial l$  为压力梯度;  $\rho g$  为流体重度。

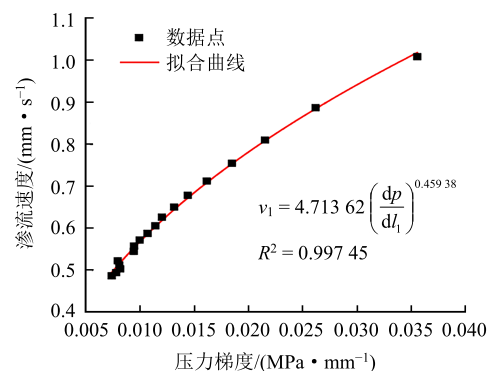
将其简化为

$$v = k \frac{\partial p}{\partial z} + b \quad (8)$$

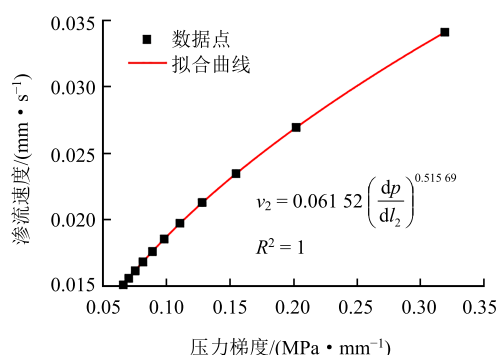
式中:  $b$  为渗流速度参数。

由式(8)可以得出,在 Dracy 渗流模式下,渗流速度和压力梯度满足线性关系,且流体均为牛顿

流体,而本次浆液的渗流模式并不满足 Darcy 定律,故试验配置的水泥浆液属于非牛顿流体<sup>[39]</sup>。



(a) 第 1 组试验



(b) 第 2 组试验

图 20 浆液渗流速度和压力梯度关系

Fig.20 Relationship between the slurry seepage velocity and pressure gradient

浆液渗流运动方程中含有幂指数,根据幂律流渗流运动方程<sup>[40]</sup>:

$$v = \left( \frac{K_e}{\mu_e} \right)^{1/n} \left( -\frac{\partial p}{\partial l} \right)^{1/n} \quad (9)$$

式中:  $K_e$  为有效渗透率;  $\mu_e$  为有效黏度;  $n$  为流变指数,当  $n < 1$  时,流体为拟塑性流体,当  $n > 1$  时,流体为膨胀性流体。

式(6)和式(9)表达形式一致,说明本试验渗流符合幂律型流体渗流规律,对预测注浆范围,评估封堵成效具有一定的参考价值。虽然不同种类的岩芯、不同的边界条件以及流体性质所表现出的渗流规律截然不同,但都可以利用该装置和分析思路进行研究,得出运动方程。

## 6 结 论

本文通过自主研发的微渗地层注浆封堵试验装置开展了超细水泥封堵微渗层的试验研究,依据试验数据和结果开展了理论分析,证实了该设备的

可靠性和实用性,并得到了以下结论:

(1) 微渗地层封堵成效和浆液性能与注浆参数紧密相关。当水灰比约为 2.5 时,浆液有较好的保水性,不会出现离析的现象。在此基础上配合 0.4% 掺量的减水剂,使得浆液流动性和初凝时间均达到了较好的平衡,可以满足注浆试验以及现场应用的要求。

(2) 封堵试验结果表明,与实际地层一致的应力和温度条件下,配比浆液能够有效封堵岩芯孔隙和裂隙。且封堵前后岩芯孔隙率和渗透率均有显著降低,表明超细水泥注浆封堵盐穴储气库微渗夹层是可行的。

(3) 利用封堵试验过程中的压降监测数据,推导了渗流速度与压力梯度之间的关系。分析得出配比浆液属于幂律流体,而非牛顿流体,且浆液封堵范围与注浆时间满足幂函数关系,数据拟合结果与理论公式拟合优度较好。该研究结果可为今后现场封堵施工提供试验和数据支撑。

## 参 考 文 献

- [1] 杨春和, 梁卫国, 魏东吼, 等. 中国盐岩能源地下储存可行性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(24): 4409-4417.  
YANG Chun-he, LIANG Wei-guo, WEI Dong-hou, et al. Investigation on possibility of energy storage in salt rock in China[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(24): 4409-4417.
- [2] 杨春和, 李银平, 屈丹安, 等. 层状盐岩力学特性研究进展[J]. 力学进展, 2008, 38(4): 484-494.  
YANG Chun-he, LI Yin-ping, QU Dan-an, et al. Research progress on mechanical properties of layered salt rock[J]. *Advances in Mechanics*, 2008, 38(4): 484-494.
- [3] 陈祥胜, 李银平, 尹洪武, 等. 多夹层盐矿地下储气库气体渗漏评价方法[J]. 岩土力学, 2018, 39(1): 11-20.  
CHEN Xiang-sheng, LI Yin-ping, YIN Hong-wu, et al. Gas leakage assessment method of underground gas storage in multi-interlayer salt mine[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(1): 11-20.
- [4] LI L, HU J, LI S, et al. Development of a novel triaxial rock testing method based on biaxial test apparatus and its application[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2021, 54(3): 1597-1607.
- [5] BEREST P, BROUARD B, DURUP J G. Tightness tests in salt-cavern wells[J]. *Oil & Gas Science and Technology-Revue de l'IFP*, 2001, 56(5): 451-469.
- [6] LI Y, CHEN X, SHI X, et al. Analysis of the plugging process of the leaking interlayer in a thin interbedded salt

- cavern gas storage of Jintan (China) by high-pressure grouting and potential applications[J]. **Journal of Natural Gas Science and Engineering**, 2019, 68: 102918.
- [7] CHEN X S, LI Y P, LIU W, et al. Study on sealing failure of wellbore in bedded salt cavern gas storage[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2019, 52(1): 215-228.
- [8] 丁双龙. 金坛盐穴储气库微渗层分布规律及物理特性研究[J]. 石油钻采工艺, 2020, 42(4): 454-458.
- DING Shuang-long. Study on the distribution laws and physical properties of the micro-infiltrated layer in the Jintan salt-cavern gas storage[J]. **Oil Drilling & Production Technology**, 2020, 42(4): 454-458.
- [9] FRANSSON Å, TSANG C F, RUTQVIST J, et al. A new parameter to assess hydromechanical effects in single-hole hydraulic testing and grouting[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2007, 44(7): 1011-1021.
- [10] 刘招伟, 张顶立, 张民庆. 圆梁山隧道毛坝向斜高水压富水区注浆施工技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(10): 1728-1734.
- LIU Zhao-wei, ZHANG Ding-li, ZHANG Min-qing. Grouting technique for high-pressure and water-rich area in Maoba syncline at Yuanliangshan tunnel[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(10): 1728-1734.
- [11] 张淑同. 破碎煤岩体注浆加固与堵水研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2006.
- ZHANG Shu-tong. Study on reinforcing of crashed coal and ponding of cracked rock in injecting resin[D]. Qingdao: Shandong Univerdity of Science and Technology, 2006.
- [12] 刘奇, 陈卫忠, 袁敬强, 等. 基于渗流-侵蚀理论的岩溶充填介质注浆加固效果评价[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(3): 572-580.
- LIU Qi, CHEN Wei-zhong, YUAN Jing-qiang, et al. Evaluation of grouting reinforcement effect for karst filling medium based on seepage-erosion theory[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2020, 39(3): 572-580.
- [13] 李术才, 张霄, 张庆松, 等. 地下工程涌突水注浆止水浆液扩散机制和封堵方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(12): 2377-2396.
- LI Shu-cai, ZHANG Xiao, ZHANG Qing-song, et al. Research on mechanism of grout diffudion of dynamic grouting and plugging method in water inrush of underground engineering[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(12): 2377-2396.
- [14] FUNEHAG J, GUSTAFSON G. Design of grouting with silica sol in hard rock: new methods for calculation of penetration length, Part I[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2008, 23(1): 1-8.
- [15] EL TANI M. Grouting rock fractures with cement grout[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2012, 45(4): 547-561.
- [16] KELESSIDIS V C, MAGLIONE R, TSAMANTAKI C, et al. Optimal determination of rheological parameters for Herschel-Bulkley drilling fluids and impact on pressure drop, velocity profiles and penetration rates during drilling[J]. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, 2006, 53(3): 203-224.
- [17] 刘建军, 刘先贵, 胡雅初, 等. 低渗透储层流-固耦合渗流规律的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(1): 88-92.
- LIU Jian-jun, LIU Xian-gui, HU Ya-reng, et al. Research on fluid-solid coupling seepage law in low permeability reservoirs[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(1): 88-92.
- [18] 徐曾和, 徐小荷. 二维应力场下承压地层中渗流的液固耦合问题[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(6): 23-28.
- XU Zeng-he, XU Xiao-he. Liquid-solid coupling problem of seepage in confined formation under two-dimensional stress field[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1999, 18(6): 23-28.
- [19] 陈祥胜, 李银平, 施锡林, 等. 深部地层长岩心侵蚀渗流装置研发与试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(11): 2254-2262.
- CHEN Xiang-sheng, LI Yin-ping, SHI Xi-lin, et al. Development of a seepage and erosion device for cores in deep strata and experimental research[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2019, 38(11): 2254-2262.
- [20] 李术才, 郑卓, 刘人太, 等. 考虑浆-岩耦合效应的微裂隙注浆扩散机制分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(4): 812-820.
- LI Shu-cai, ZHENG Zhuo, LIU Ren-tai, et al. Analysis on fracture grouting mechanism considering grout-rock coupling effect[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2017, 36(4): 812-820.
- [21] 陈鑫, 袁昌. 多孔介质中 Bingham 型浆液柱状渗透规律研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2021, 38(4): 800-809, 856.
- CHEN Xin, YUAN Chang. Law of columnar penetration of Bingham type slurry in porous media[J]. **Journal of Mining & Safety Engineering**, 2021, 38(4): 800-809, 856.
- [22] 杨志全, 卢杰, 王渊, 等. 考虑多孔介质迂回曲折效应

- 的幂律流体柱形渗透注浆机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(2): 410-418.
- YANG Zhi-quan, LU Jie, WANG Yuan, et al. Column penetration grouting mechanism for power-law fluids considering tortuosity effect of porous media[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2021, 40(2): 410-418.
- [23] 张庆松, 王洪波, 刘人太, 等. 考虑浆液扩散路径的多孔介质渗透注浆机理研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(5): 918-924.
- ZHANG Qing-song, WANG Hong-bo, LIU Ren-tai, et al. Infiltration grouting mechanism of porous media considering diffusion paths of grout[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2018, 40(5): 918-924.
- [24] 阮文军. 基于浆液黏度时变性的岩体裂隙注浆扩散模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(15): 2709-2714.
- RUAN Wen-jun. Spreading model of grouting in rock mass fissures based on time-dependent behavior of viscosity of cement-based grouts[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(15): 2709-2714.
- [25] READING F. Gas transport in porous media[M]. Netherlands: Springer, 2006.
- [26] 刘健, 陈亮, 王春萍, 等. 一种非稳态气体渗流条件下岩石渗透特性参数计算方法及应用[J]. 岩土力学, 2019, 40(5): 1721-1730.
- LIU Jian, CHEN Liang, WANG Chun-ping, et al. A new method of calculating gas permeability of rock under unsteady flow condition and its application[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2019, 40(5): 1721-1730.
- [27] 阮文军. 基于浆液黏度时变性的岩体裂隙注浆扩散模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(15): 2709-2714.
- RUAN Wen-jun. Spreading model of grouting in rock mass fissures based on time-dependent behavior of viscosity of cement-based grouts[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(15): 2709-2714.
- [28] UCHIKAWA H. Ultra-fine cements for special applications[J]. **Advanced Cement Based Materials**, 1994, 1(3): 150-154.
- [29] 万贵春, 陈铁铮, 王得金, 等. 超细水泥用于油田封堵作业[J]. 钻井液与完井液, 2002, 19(1): 21-22.
- WAN Gui-chun, CHEN Tie-zheng, WANG De-jin, et al. Superfine cement used in oil field plugging operation[J]. **Drilling Fluid and Completion Fluid**, 2002, 19(1): 21-22.
- [30] SHA F, LI S C, LIU R T, et al. Performance of typical cement suspension-sodium silicate double slurry grout[J]. **Construction and Building Materials**, 2019, 200: 408-419.
- [31] 唐玉华, 施智玲. 盐穴储气库井微渗层封堵技术[J]. 中国井矿盐, 2016, 47(3): 22-24.
- TANG Yu-hua, SHI Zhi-ling. The leaking stoppage technique of micro-infiltrated layers in salt-cavern gas storage wells[J]. **China Well and Rock Salt**, 2016, 47(3): 22-24.
- [32] 张宏, 唐瑜, 于晓明, 等. 超细水泥在长庆储气库老井封堵中的应用效果分析[J]. 石油化工应用, 2016, 35(6): 102-105.
- ZHANG Hong, TANG Yu, YU Xiao-ming, et al. The superfine cement in Changqing underground gas storage old wells of sealing effect analysis application[J]. **Petrochemical Industry Application**, 2016, 35(6): 102-105.
- [33] 梁守成, 吕鑫, 梁丹, 等. 聚合物微球粒径与岩芯孔喉的匹配关系研究[J]. 西南石油大学学报, 2016, 38(1): 140-145.
- LIANG Shou-cheng, LÜ Xin, LIANG Dan, et al. A study on matching relationship of polymer microspher size[J]. **Journal of Southwest Petroleum University**, 2016, 38(1): 140-145.
- [34] LOMBARDI G. The role of cohesion in cement grouting of rock[C]//International Congress on Large Dams. Paris: International Commission on Large Dams, 1985: 235-261.
- [35] ABRAMS D A. Design of concrete mixtures[M]. Chicago: Structural Materials Research Laboratory, Lewis Institute, 1919.
- [36] XIAO J, SHI C, WANG D, et al. Testing methods for determination of water-to-cement ratio of fresh concrete: a short review[J]. **Journal of the Chinese Ceramic Society**, 2012, 40(11): 1576-1585.
- [37] LI S, YU Q, WEI J. Effect of molecular structure of polycarboxylate water reducers on hydration of cement[J]. **Journal of the Chinese Ceramic Society**, 2012, 40(4): 613-619.
- [38] 邵维志, 解经宇, 迟秀荣, 等. 低孔隙度低渗透率岩石孔隙度与渗透率关系研究[J]. 测井技术, 2013, 37(2): 149-153.
- SHAO Wei-zhi, JIE Jing-yu, CHI Rong-xiu, et al. On the relation of porosity and permeability in low porosity and low permeability rock[J]. **Well Logging Technology**, 2013, 37(2): 149-153.
- [39] 孔祥言. 高等渗流力学[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2010.
- KONG Xiang-yan. Advanced seepage mechanics[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2010.
- [40] 杨秀竹, 雷金山, 夏力农, 等. 幂律型浆液扩散半径研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(11): 112-115.
- YANG Xiu-zhu, LEI Jin-shan, XIA Li-nong, et al. Study on grouting diffusion radius of exponential fluids[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(11): 112-115.