

地下水封石油洞库工程的灌浆参数模拟分析

温毓繁, 余雷, 孔琼菊

(江西省水利科学研究院, 江西南昌 330029)

摘要:以某深埋地下水封石油洞库为研究对象,针对裂隙岩体,采用离散单元法,选用 UDEC 软件,将浆液设定为宾汉姆流体模型,研究了各灌浆参数的变化对浆液渗透范围的影响。研究表明:增大灌浆压力,浆液的渗透范围显著增大,但在高灌浆压力阶段,更多的灌浆压力用于克服围岩的变形;岩体裂隙越密,浆液的渗透范围越大,但变化不明显;增加裂隙隙宽,浆液的渗透范围不断增加,最后趋向平稳;增加浆液的动力黏度,浆液的渗透范围不断减小,最后趋向平稳。

关键词:灌浆;裂隙; UDEC(Universal Distinct Element Code); 渗透范围; 地下水封石油洞库

中图分类号:TV543; TE822

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2017)02-0168-05

The simulation of grouting parameters of underground petroleum storage caverns project

WEN Yufan, YU Lei, KONG Qiongju

(Jiangxi Province Water Conservancy Science Research Institute, Nanchang 330029, China)

Abstract: Taking a deep - buried underground petroleum storage caverns as the research object, the effect of different grouting parameters on the penetration distance of slurry were studied for fractured rock mass by using discrete element method and UDEC software, and setting the slurry to be a Bingham fluid model. Research results showed that: increasing the grouting pressure can increase the penetration distance of the slurry, but at the stage of high filling pressure, more grouting pressure was used to overcome the deformation of the surrounding rock; the larger the fracture density, the larger penetration distance of the slurry, but the changes was small. The penetration distance of the slurry increased with the increase of the crack width, and finally tended to be stable. The penetration distance of the slurry decreased with the increase of the slurry viscosity and tended to be stable.

Key words: grouting; fracture; UDEC(Universal Distinct Element Code); penetration distance; underground petroleum storage caverns project

1 研究背景

随着能源安全问题越来越受到国家的重视以及地下水封储油技术在国外的迅速发展,我国近几年加快了国家战略石油储备库的建设速度,特别是开发利用地下空间新建了一批地下水封石油洞库。然而国内建设大型地下水封洞库经验的缺乏和研究的滞后,在一定程度上制约了地下水封储油技术的发展和应用^[1]。

水封储油洞库的储油原理是:选择有稳定地下水位的岩体,人工开挖出一定容积的洞室,岩体中的渗透

水压力大于洞库内的储油压力,由于水压大于油压,保证了地下水往洞库内渗透,而石油不能向洞库外渗透,从而保证石油的安全存储^[2]。由于油品比水轻且互不相溶的特性,渗水沿洞壁汇集到洞库底部,而油品浮于水垫层之上,只需定期抽出渗水即可^[3]。由于裂隙的存在,地下水会不断通过裂隙渗流进入洞库,同时当出现极端干燥气候,地下水位过低,裂隙水压不足以封住库内石油时,库内的石油将通过裂隙向外漏油,污染当地地下水;所以对裂隙进行灌浆封堵,既可以减小洞库的涌水量,降低洞库的运营成本,也可以降低洞库向外漏油的可能性,提高洞库的安全性^[4]。所以对围岩

裂隙进行灌浆封堵非常有必要。

在注浆技术发展方面,法国人 Charles Berlghy 最早使用注浆方法修复冲沙闸,用锤击法将黏土浆液灌入土层^[5];1856 年至 1858 年间,英国人 Kinippe 第一次将水泥作为注浆材料^[6];1920 年,德国人 Joosten 第一次将水玻璃和氯化钙作为注浆材料,化学注浆开始运用于工程^[7]。中国在 20 世纪 50 年代初掌握了注浆技术,60 年代开始推广化学注浆方法。在近 30 年来,包括在材料品种、自动控制、设备器材、施工技术、检测手段等方面,注浆技术得到了重大发展。

注浆的效果与浆液的扩散范围有密切的关系。但由于注浆工程是个隐蔽性工程,而且是个复杂的系统工程,影响浆液的扩散范围的因素很多,现有的理论公式还不能对注浆的效果做出准确的预测。在注浆理论方面,主要有 3 大理论计算公式,分别为牛顿型浆液球形扩散公式^[8]、柱面扩散公式^[9]和袖套管法理论^[10],但是这 3 大理论均将浆液假定为牛顿流体,实际上浆液为宾汉姆流体,这导致理论计算结果与实际灌浆效果相比存在较大的误差。而在本文的计算中,将浆液设定为宾汉姆流体,将更能反映实际的灌浆效果。

2 计算原理

浆液在裂隙中的运动规律和水在裂隙中的运动规律非常相似,但浆液的黏度随时间变化而相应的变化。在本文的研究中,浆液将不按牛顿流体模型而使用宾汉姆流体模型。宾汉姆流体的流变曲线与坐标原点不相交,是一种典型的塑性流体^[11]。塑性流体在静止状态下其内部的颗粒会形成一定的结构,具有一定的抗剪切力。

当塑性流体所受的剪切力较小时,浆液的性质与固体相似,即其具有弹性。当塑性流体的结构被剪切力破坏后,浆液将具有与牛顿流体相似的性质^[12]。一般将大部分黏土浆液以及一些黏度较大的化学浆液按塑性流体计算。塑性流体的流变方程^[13]表示为:

$$\tau = \tau_B + \mu \frac{dV}{dZ} \quad (1)$$

式中: τ_B 为宾汉姆流体的剪切屈服强度,Pa; τ 为剪切应力,Pa; μ 为宾汉姆流体的塑性动力黏度,Pa·s 或 MP·s。浆料的颗粒直径、配比、配制时间、浆液的种类可以影响公式中的参数 τ_B 、 μ 。可以根据下面的经验公式计算分析普通硅酸盐水泥浆的 τ_B 、 μ 值:

$$\tau_B = \exp\left(\frac{1.6}{W^{0.6}} + 5 \times 10^{-9} \frac{T^3}{W^2}\right) - 1 \quad (2)$$

$$\mu = \mu_0 \exp\left[(1.1 + 8 \times 10^{-9} T^3)/W^2\right] \quad (3)$$

式中: W 为水灰比; μ_0 为介质水的动力黏度 Pa·s; T 为水化时间, min^[8]。

离散单元法是 1971 年提出的一种新的数值计算方法。在离散单元法中,一般是将岩体假定成离散块体的集合体,同时裂隙、节理、断层等结构面当作是这些离散体之间相互作用的接触面^[14]。Universal Distinct Element Code (UDEEC) 是一款基于离散单元法的计算分析软件,其中流体的流动是由相邻流体域的压力差决定的,其中流动域中流体压力的大小由流动域中心压力的大小决定。浆液的渗透阶段按岩体裂隙网络渗流研究的基本理论——立方定律分析计算^[15],公式如下:

$$q = \frac{qe^3 J}{12\mu} \quad (4)$$

式中: q 为单宽流量, $m^3/(s \cdot m)$; J 为水力比降; μ 为流体动力黏度, Pa·s; e 为接触的水力隙宽, m; g 为重力加速度, m/s^2 。所谓离散介质模型即忽略岩块的透水性,认为流体只是在裂隙中流动。该模型可以较好地描述裂隙岩体的非均匀各向异性,特别是当岩块很致密,可以忽略岩块渗透性,渗流主要集中在裂隙当中,因此具有拟真性好、精度高等优点。

3 灌浆模型设计与参数选取

由于浆液的渗透范围一般在 2 ~ 10 m 之间,为了提高模拟的精度,所建的模型范围局限于灌浆洞附近。模型共 5 组,长和高均为 16 m 的平面模型,灌浆洞均处于模型的正中间,灌浆洞直径为 7 cm。每组模型中均由两组相互垂直的裂隙切割而成,但模型中裂隙间距逐渐增大,其裂隙间距分别为: 0.4、0.6、0.9、1.2、1.5 m。

根据地质勘探结果,拟定岩石及裂隙的物理力学参数,岩石的物理力学参数如表 1,裂隙的物理力学参数如表 2。

表 1 岩石物理力学参数

体积模量/MPa	剪切模量/MPa	凝聚力/kPa	密度/($kg \cdot m^{-3}$)	内摩擦角/($^\circ$)
16.7	10.5	4500	2640	43.2

表 2 裂隙物理力学参数

法向刚度/($GPa \cdot m^{-1}$)	切向刚度/($GPa \cdot m^{-1}$)	内摩擦角/($^\circ$)	黏聚力/kPa
10	1	30	450

4 边界条件

所选模型约处于地下 100 m 处,地下水位距离洞库 20 m,所以在模型四侧施加围岩压力与裂隙水压,围岩压力大小为 $2.6 \times 10^6 \text{ N/m}^2$,裂隙水压为 0.2 MPa。

5 计算工况

本文主要分析灌浆压力、裂隙间距、裂隙隙宽、浆液动力黏度共 4 个灌浆参数对浆液扩散距离的影响,在模拟研究灌浆压力、裂隙间距时,浆液动力黏度为 $0.5 \text{ Pa} \cdot \text{s}$,密度为 1200 kg/m^3 ,裂隙隙宽为 0.0005 mm ,灌浆压力分别为 0.6、1.0、1.4、1.8、2.2、2.6 MPa,共 6 个工况;在模拟裂隙隙宽时,将灌浆压力设定为 1.4 MPa,浆液动力黏度为 $0.5 \text{ Pa} \cdot \text{s}$,密度为 1200 kg/m^3 ,模拟的裂隙隙宽分别设定为 0.0001、0.0002、0.0003, ..., 0.001 m,共 10 个工况;在模拟浆液动力黏度时,灌浆压力为 1.4 MPa,浆液密度为 1200 kg/m^3 ,裂隙隙宽为 0.0005 m,模拟的浆液动力黏度为:0.1、0.2、0.3, ..., 1.0 $\text{Pa} \cdot \text{s}$,共 10 个工况。

6 结果分析

6.1 灌浆压力对浆液渗透范围的影响

在灌浆压力模拟过程中,假定灌浆压力恒定不变及灌浆稳定后停止灌浆。共模拟了 6 组灌浆压力,分别为 0.6、1.0、1.4、1.8、2.2、2.6 MPa。对结果进行整理,得出灌浆压力与浆液扩散范围的关系曲线图如图 1,限于篇幅,给出裂隙间距为 0.6 m,灌浆压力为 0.6 ~ 2.6 MPa 的浆液扩散成果图,如图 2 ~ 7。

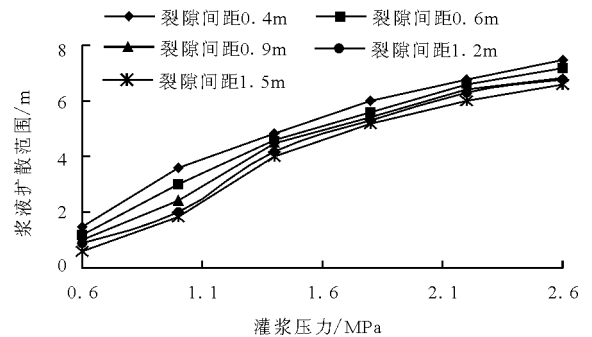


图 1 灌浆压力与浆液扩散范围的关系曲线图

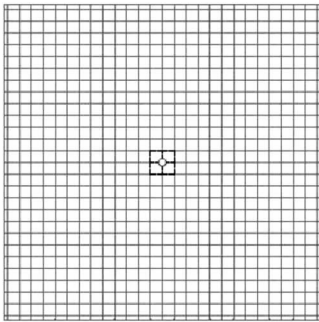


图 2 浆压力为 0.6MPa 时浆液扩散图

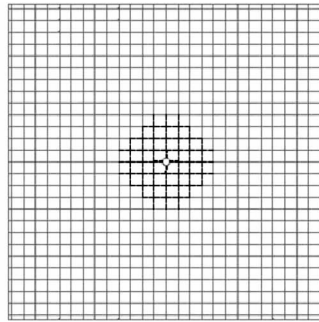


图 3 浆压力为 1.0MPa 时浆液扩散图

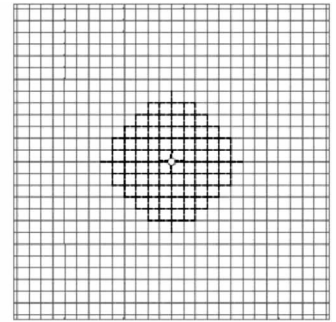


图 4 浆压力为 1.4MPa 时浆液扩散图

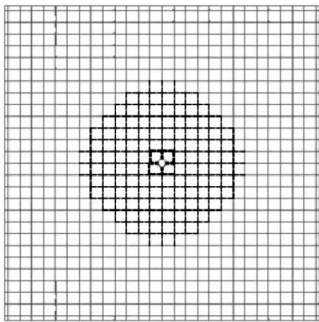


图 5 浆压力为 1.8MPa 时浆液扩散图

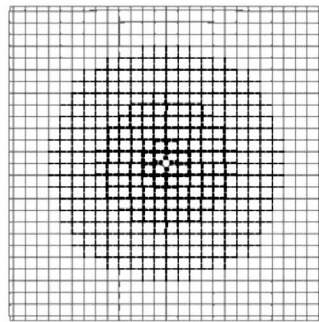


图 6 浆压力为 2.2MPa 时浆液扩散图

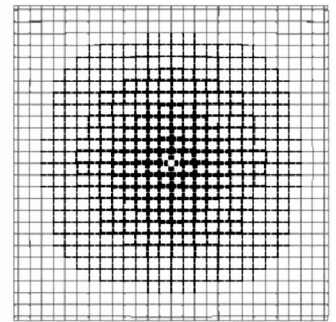


图 7 浆压力为 2.6MPa 时浆液扩散图

分析图 1 浆压力与浆液扩散范围关系曲线可得:

(1) 在所有裂隙间距中,压力为 2.6 MPa 时的浆液渗透范围远大于灌浆压力为 0.6 MPa 的浆液渗

透范围,前者是后者的 5 至 11 倍,浆液的渗透范围与灌浆压力成正相关关系;在所有裂隙间距中,灌浆压力越大,浆液的渗透范围越大。

(2)统计灌浆压力为0.6MPa至2.6MPa共6级灌浆压力下,所有裂隙间距模型(共5组数据,分别为裂隙间距0.4、0.6、0.9、1.2、1.5 m)的浆液渗透范围的平均值依次为1.04、2.90、4.42、5.5、6.41、6.97 m,每增加一级压力(第一级压力为0.6 MPa,下一级压力递增0.5 MPa),浆液较上一级增加的渗透范围依次为:1.86、1.52、1.08、0.91、0.56 m,数据呈递减规律,这表明:当灌浆压力处于较大阶段,再增加一级灌浆压力,浆液所能增加的渗透范围较小(同灌浆压力较小阶段相比);在高灌浆压力阶段,更多的灌浆压力将用于克服围岩的变形。

(3)对比各裂隙间距模型的灌浆压力与浆液扩散范围曲线,各曲线的斜率大小相差不大,即在同一级灌浆压力下增加相同的灌浆压力,浆液的渗透范围增加值相近;在同一级灌浆压力下增加相同的灌浆压力,岩体裂隙的密度对浆液的渗透范围净增加值影响较小。

6.2 裂隙间距对浆液渗透范围的影响

利用图 1 数据重新拟合,得到裂隙间距与浆液扩散范围的关系曲线如图 8 所示,裂隙间距分别为0.5、0.7、0.9、1.1、1.3、1.5 m。统计所有灌浆压力下各裂隙间距的浆液扩散范围依次为5.03、4.70、4.42、4.24、4.03 m,呈缓慢递减的趋势。从图 8 得,在一定的灌浆压力下,浆液的渗透范围随裂隙间距的增大变化不大,但总体趋势是随着裂隙间距的增大,浆液的渗透范围呈缓慢的减小趋势,即裂隙越多,浆液的渗透范围越远。

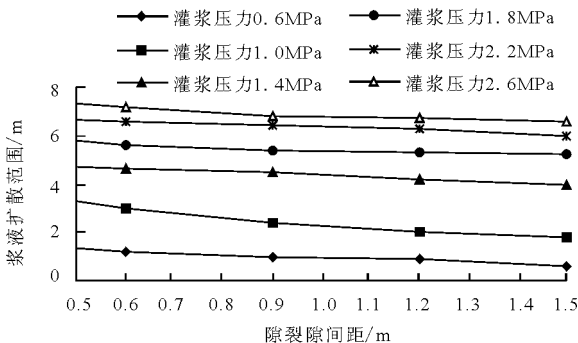


图 8 裂隙间距与浆液扩散范围关系曲线

根据图 1 浆压力与浆液扩散范围的关系曲线图与图 8 隙间距与浆液扩散范围关系曲线拟合灌浆范围与压力、间距之间近似数值关系函数,得到如下函数:

$$R = nP^{0.85}D^{-0.295} \quad (5)$$

式中: R 为浆液最大渗透范围,m; n 为与裂隙隙宽、浆液黏度、裂隙渗透性有关的参数; D 为裂隙间距,m; P 为灌浆压力,MPa。

从公式(5)可知,浆液扩散范围随灌浆压力增大而增大,于灌浆压力的0.85次方呈正比关系,可见灌浆压力对浆液的渗透范围的影响比较大。浆液扩散范围随裂隙间距的增大而减小,即裂隙越稀疏,浆液渗透范围约小,浆液扩散范围与裂隙间距的0.295次方呈反比关系;同灌浆压力相比,裂隙间距对浆液渗透范围的影响较小。

6.3 裂隙隙宽对浆液渗透范围的影响

在模拟研究裂隙隙宽的大小对浆液渗透范围的影响中,假定灌浆压力是恒定不变及灌浆稳定后停止灌浆,模拟的裂隙隙宽为0.0001~0.001 m共10组参数,将结果进行整理,拟合出裂隙隙宽与浆液扩散范围的关系曲线如图 9 所示,统计所有裂隙间距模型在隙宽为0.0001、0.0003、0.0005、0.0009m时的浆液扩散平均值,依次为3.20、3.74、4.42、4.48、4.59 m,浆液扩散范围呈增长趋势,当在裂隙隙宽处于较小阶段时,浆液的渗透范围增长较快,当裂隙隙宽增加到一定程度时,浆液的渗透范围增长缓慢,趋于平稳。

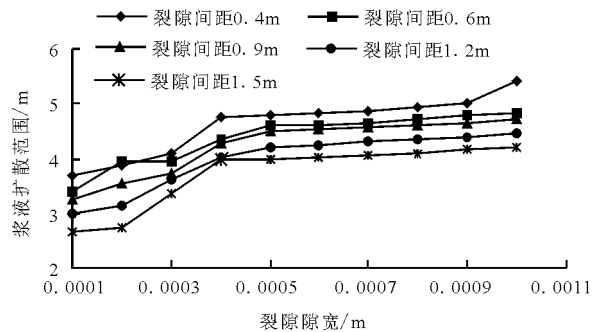


图 9 裂隙隙宽与浆液扩散范围的关系曲线

6.4 浆液黏度对浆液渗透范围的影响

在模拟浆液黏度对浆液扩散距离的影响中,假定灌浆压力是恒定不变及灌浆稳定后停止灌浆,模拟的浆液动力黏度为:0.1 Pa·s至1.0 Pa·s共10组参数,将结果进行整理,拟合出浆液动力黏度与浆液扩散范围的关系曲线如图 10。

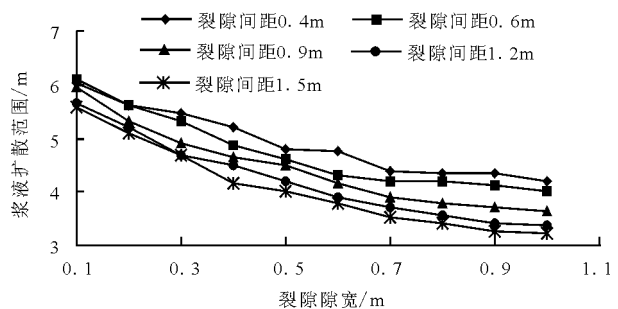


图 10 浆液动力黏度与浆液扩散范围的关系曲线

从图 10 看出,浆液渗透范围与浆液动力黏度呈反相关关系。浆液渗透范围随着浆液动力黏度增大而不断减小。当浆液动力黏度增加到一定程度时,浆液的渗透范围增长缓慢,趋于平稳,这表明随着浆液动力黏度的增加灌注难度不断增大。

7 结 论

通过运用离散元程序 UDEC,将浆液设定成宾汉姆流体,模拟各灌浆参数对浆液渗透范围的影响,可以得出以下结论:

(1) 灌浆压力越大,浆液的渗透范围越大,浆液扩散范围同灌浆压力的 0.85 次方呈正比关系;在高灌浆压力阶段,增长趋势变缓。在高灌浆压力阶段,更多的灌浆压力用于克服围岩的变形;

(2) 岩体裂隙越多,浆液的渗透范围呈缓慢的增长趋势,浆液扩散范围与裂隙间距的 0.295 次方呈反比关系;

(3) 浆液的渗透范围随着裂隙隙宽的增加而不断增加,但当裂隙隙宽增大到一定程度时,浆液的渗透范围趋于平稳;

(4) 浆液动力黏度越大,浆液的灌注难度越大,浆液的渗透范围不断减小,最后趋向平稳。

参考文献:

- [1] 杨森,于连兴,杜胜伟. 地下洞库作为国家原油储备库的可行性分析[J]. 油气储运,2004,23(7):22-24.
- [2] 杜国敏,耿晓梅,徐宝华. 国外地下水封岩洞石油库的建设与发展[J]. 油气储运,2006,25(4):5-6.
- [3] 王者超,李术才,吕晓庆,等. 地下水封石油洞库施工期

围岩完整性参数敏感性分析[J]. 岩土力学,2011,32(S2):488-495.

- [4] 刘贯群,韩曼,宋涛,等. 地下水封石油洞库渗流场的数值分析[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版),2007,37(5):819-824.
- [5] 孙文标,李红行,董新照,等. 注浆封孔材料的性能及其膨胀机理研究[J]. 有色金属(矿山部分),2010,62(6):73-74+77.
- [6] 张民庆,彭峰. 地下工程注浆技术[M]. 北京:地质出版社,2008.
- [7] 孔一凡,姬阳瑞. 动压巷道锚注加固技术应用研究[J]. 煤炭科学技术,2006,34(8):32-35.
- [8] 任长吉,黄涛. 裂隙岩体渗流场与应力场耦合数学模型的研究[J]. 武汉大学学报(工学版),2004,37(2):8-12.
- [9] 孙玉杰,邬爱清,张宜虎,等. 基于离散单元法的裂隙岩体渗流与应力耦合作用机制研究[J]. 长江科学院院报,2009,26(10):62-66+70.
- [10] 张霄. 地下工程动水注浆过程中浆液扩散与封堵机理研究及应用[D]. 济南:山东大学,2011.
- [11] 孔一凡,姬阳瑞. 动压巷道锚注加固技术应用研究[J]. 煤炭科学技术,2006,34(8):32-35.
- [12] 杨米加,陈明雄,贺永年. 注浆理论的研究现状及发展方向[J]. 岩石力学与工程学报,2001,20(6):839-841.
- [13] 孟凡龙,蒋承林,赵文斌. 煤层瓦斯测压中注浆封堵钻孔围岩裂隙的分析[J]. 煤矿安全,2010,41(1):87-90.
- [14] 冯学敏,陈胜宏. 含复杂裂隙网络岩体渗流特性研究的复合单元法[J]. 岩石力学与工程学报,2006,25(5):918-924.
- [15] 许光祥,张永兴,哈秋龄. 粗糙裂隙渗流的超立方和次立方定律及其试验研究[J]. 水利学报,2003,34(3):74-79.