



您可能感兴趣的文章、专题：

“煤矿智能化综述及关键技术”专题

“我国煤矿瓦斯防治理论技术研究进展”专题

“煤地质与煤结构”专题

“煤矿安全+智能化”专题

“深部煤层瓦斯精准抽采”专题

“中国煤科首席科学家”专题

“矿井冲击地压灾害防治技术及工程实践”专题

2020 年度《煤炭科学技术》“领跑者 5000”论文

2021《煤炭科学技术》封面文章

煤炭行业青年科学家论坛(2021 年)



移动扫码阅读

袁世冲,张改玲.化学注浆固结砂微观孔隙与力学特性研究[J].煤炭科学技术,2021,49(7):179-184. doi:10.13199/j.cnki.cst.2021.07.024
YUAN Shichong,ZHANG Gailing.Study on mechanics and micropore characteristics of chemically grouted sand[J]. Coal Science and Technology,2021,49(7):179-184. doi:10.13199/j.cnki.cst.2021.07.024

化学注浆固结砂微观孔隙与力学特性研究

袁世冲^{1,2,3},张改玲¹

(1.中国矿业大学 资源与地球科学学院,江苏 徐州 221116;2.华北有色工程勘察院有限公司,河北 石家庄 050021;3.河北省矿山地下安全技术创新中心,河北 石家庄 050021)

摘要:化学注浆是预防与治理采掘过程中导水裂隙带沟通上覆厚松散含水层诱发采煤工作面突水溃砂灾害的常用手段。为了研究化学注浆固结砂的微观孔隙、渗透与力学特性的变化规律,采用压汞试验、3D-XRM 系统、SLB-1 型三轴剪切渗透仪与单轴压缩试验手段,着重分析了化学注浆固结砂的微观孔隙特征、渗透系数、单轴抗压强度、普氏系数的变化规律。试验所选用的化学浆液为改性脲醛树脂,草酸溶液为催化剂,可以调节与控制化学浆液的胶凝时间。研究表明:试样的累计进汞曲线为 S 型,分为 4 个阶段,分别为缓慢进汞阶段、加速进汞阶段、减速进汞阶段、停滞进汞阶段,退汞率在 52.56%~99.46%,半开放孔隙居多,且孔隙间的连通性差;靠近浆液劈裂脉的位置孔隙充填率更高,抗渗性能更好;化学注浆固结砂的平均渗透系数为 7.23×10^{-6} cm/s;依据岩石的普氏系数分级方法,化学注浆固砂样可以达到坚固的状态,说明化学注浆后,松散砂样的坚硬程度得到了明显提高,可以达到很好的固砂减渗效果。

关键词:化学注浆;力学特性;微观孔隙;压汞试验;断层扫描

中图分类号:TD315

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2021)07-0179-06

Study on mechanics and micropore characteristics of chemically grouted sand

YUAN Shichong^{1,2,3},ZHANG Gailing¹

(1.School of Resources and Geosciences,China University of Mining and Technology,Xuzhou 221116,China;2.North China Engineering Investigation Institute Co.,Ltd.,Shijiazhuang 050021,China;3.Technological Innovation Center for Mine Groundwater Safety of Hebei Province,Shijiazhuang 050021,China)

Abstract: Chemical grouting is a common method to prevent and control water and sand inrush disaster in coal mining face caused by overlying thick unconsolidated aquifer connected with water flowing fractured zone. In order to study the variation law of micropore, permeability and mechanical properties of chemical grouting consolidated sand, mercury injection test, 3D-XRM system, SLB-1 triaxial shear permeameter and uniaxial compression test are mainly used. The variation law of pore characteristics, permeability coefficient, uniaxial compressive strength and Protodyakonov coefficient of chemical grouting consolidated sand are emphatically analyzed. The chemical slurry used in the experiment is modified urea formaldehyde resin, oxalic acid solution is catalyst which can adjust and control the gelation time of chemical slurry. The main conclusions are as follows: the cumulative mercury curve of the sample is S-shaped, which can be divided four stages, namely slow mercury entry stage, accelerated mercury entry stage, decelerated mercury entry stage and stagnated mercury entry stage; the mercury removal rate is between 52.62% and 99.46%, most of the pores are semi open with poor connectivity; the pore filling rate is higher and the impermeability is better near the slurry splitting vein; the average permeability coefficient of the test samples is 7.23×10^{-6} cm/s. According to the grading method of rock's Protodyakonov coefficient, the chemical grouted sand can achieve a solid state, which hardness of loose sand sample has been significantly improved after chemical grouting, and a good effect of sand consolidation and seepage reduction can be achieved.

Key words: chemical grouting; mechanical characteristics; microscopic pore; mercury intrusion experiment; tomography

收稿日期:2020-12-25;责任编辑:曾康生

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41877238)

作者简介:袁世冲(1992—),男,河北石家庄人,博士研究生。E-mail:yuanshichong@cumt.edu.cn

0 引言

化学注浆是煤矿井筒穿越富水砂层或导水裂隙带沟通上部厚松散层诱发工作面突水溃砂灾害的一种常用的防渗加固手段,可显著提高松散砂层的整体稳定性与抗渗性能,从而达到稳固砂源和切断水砂通道的目的^[1-2]。化学浆液泛指所有有机高分子类浆材,例如丙烯酰胺类、木质素类、脲醛树脂类、聚乙烯醇类等黏时变类浆液,相比于传统的无机类浆材,例如水泥、粉煤灰、改性黏土类浆液;具有低压条件下良好的渗透扩散特性及长期抗渗加固稳定性。化学注浆技术已经在神东、晋北、鲁西、两淮及陕北等多个全国重要煤炭基地的 100 多个井筒和采掘工作面中得到了应用,对严重变形破裂井壁进行了有效修复,对厚松散层开采可能造成的突水溃砂及淹井事故进行了有效防治,保障了矿井的安全和煤炭的高效开采^[3-5]。

国内外学者针对化学注浆的理论与实践进行了大量的研究,注浆理论方面的研究主要运用室内试验与数值模拟 2 种方法,注浆实践方面的研究则主要集中在现场实测、注浆效果检验与工艺创新 3 个方面。郭密文^[6]研究了高压封闭环境下改性脲醛树脂浆液在饱和松散孔隙介质中的扩散机制与模式;杨志全等^[7]、叶飞等^[8-9]建立了基于宾汉姆流体黏时变特性的渗透注浆理论模型,并推导了扩散半径与注浆压力的理论公式;OZGUREL 等^[10]对丙烯酰胺类浆液加固不同级配砂层后的力学性质及渗透性进行了系统的研究,并提出了注浆固砂体扩散加固形态的数学模型;钱自卫等^[11]采用模型试验的方法研究了不同有效粒径及细度模数的弱胶结孔隙介质,在化学注浆前后强度与渗透系数的变化;刘人太等^[12]采用模型试验和有限元模拟软件验证了高聚物改性水泥浆液在动水条件下的扩散规律;程少振等^[13]采用自主研发的基于有限元与流体体积函数的数值方法对劈裂注浆过程的浆脉形态发育特征进行了模拟研究。袁世冲等^[14]、钱自卫等^[15]运用水泥-水玻璃浆液和改性脲醛树脂-草酸浆液相配合,发挥各自优势,成功治理了金鸡滩煤矿副斜井严重破裂井壁导致的突水涌砂灾害;同时,分布式光纤、井间 CT、高密度电法等手段也被广泛运用在煤矿化学注浆的过程监测与效果检测中^[16]。

目前针对化学浆液的研究主要是针对不同被注介质性质、不同边界条件及不同注浆参数下的试验研究。对化学注浆固结体的研究还比较少,且主要

集中在固结体的宏观力学性质方面,对固结体的微观特性的研究有待加强。基于此,采用压汞试验和断层 CT 扫描 2 种方法测定了化学注浆固结砂的微观孔隙特性,同时采用 SLB-1 型三轴剪切渗透仪测试了化学注浆固结砂的抗压强度及渗透系数,并分析了孔隙度与强度的变化。为化学注浆治理突水涌砂灾害、修复破裂井壁及加固巷道围岩等提供工程依据。

1 试验过程与结果

1.1 化学浆液基本性能

试验选用的化学浆液为中国矿业大学自主研发的 ZK-Ⅲ 型孔隙溶胶,主要成分为脲醛树脂,辅以 5% 的添加剂,添加剂的主要作用是提高浆液在溶水状态下的固结强度,增强浆液固结后的塑性,草酸溶液为催化剂,可大幅度缩短凝胶时间,通过调节草酸溶液浓度可控制反应时间。

改性脲醛树脂浆液的初始黏度为 $10 \sim 20 \text{ mPa} \cdot \text{s}$,纯浆液剪切强度 $3.0 \sim 4.5 \text{ MPa}$,浆液结石体单轴抗压强度可达 7.5 MPa ,抗渗系数可达 10^{-8} cm/s 量级,胶凝时间在几秒到几分钟之间可调,主要受环境温度和草酸溶液浓度的影响,如图 1 所示。由图 1 可知,相同环境温度下草酸溶液的浓度越高,胶凝时间越短;相同草酸溶液浓度下环境温度越高,胶凝时间越短,且呈现 3 个阶段变化:第 I 阶段胶凝时间随环境温度大致呈线性递减变化;第 II 阶段随环境温度升高,化学反应加速进行,胶凝时间快速缩短;第 III 阶段胶凝时间随环境温度升高基本保持不变。

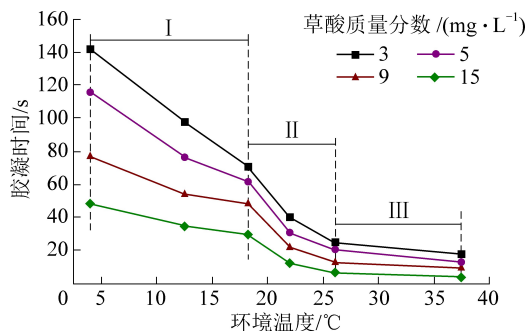


图 1 环境温度与草酸溶液浓度对胶凝时间的影响

Fig.1 Ambient temperature and concentration of oxalic acid solution effect to gelation time

1.2 试验过程控制

试验模型及试验所选用风积砂试样的基本物理性质指标在文献[14]中已经详细介绍,在此不再赘述,试验选取的过程参数见表 1。

表 1 注浆过程参数选取
Table 1 Grouting process parameters

模型直径/ cm	填筑高度/ cm	模型密度/ (g·cm ⁻³)	注浆管内径/ mm	注浆量/ kg	起始黏度/ (mPa·s)	草酸质量分数/ (mg·L ⁻¹)	脲醛树脂与 草酸体积比	注浆压力/ MPa
58	90	1.62	4	4.5	12	5	4 : 1	0~4

试验结束后将形成的化学注浆固砂体整体剥离出来,其整体形态特征如图 2 所示。由图 2 可知,固砂体整体呈圆球形,从剖面中可以观察出,发育主劈裂化学浆脉,沿其四周发育若干条分支浆脉,化学浆液沿各条浆脉向四周渗透扩散固砂。



图 2 化学注浆固砂体整体形态特征
Fig.2 Morphological characteristics of chemically grouted sand

2 试验结果与分析

2.1 压汞试验

汞对绝大多数造岩矿物具有非润湿性,当对汞施加的压力大于毛管阻力时,汞就会进去孔隙内部,当对汞施加的压力释放时,进入孔隙内部的汞会逐渐退出来,通过监测不同压力下,汞进入与退出的量,绘制压力与体积的关系曲线,即有

$$p\pi r^2 = -2\pi r\sigma\cos\alpha \tag{1}$$

式中: p 为对汞施加压力; r 为孔隙半径; σ 为汞的表面张力系数, $\sigma = 0.485\text{ N/m}$; α 为汞对材料的浸润角, $\alpha = 130^\circ$ 。

压汞试验采用 AutoPore IV 9510 型全自动压汞仪,其最大压力为 6 万磅,即 414 MPa,可测量孔径范围是 3 nm~1 000 μm ,包括 2 个低压站和 1 个高压站。

选取顺、垂直劈裂脉的不同位置的 10 个试样进行了压汞试验测试,每个试样的质量为 1.5~3.0 g 左右,选取试样位置如图 3 所示。根据试样的压汞试验数据结果绘制了典型的 2、6、9 号试样的累计进汞量和压力的关系曲线,如图 4 所示。

由图 4 中可清楚地看出,化学注浆固结砂的累积进汞曲线与压力曲线均呈现型变化,可分为 4 个

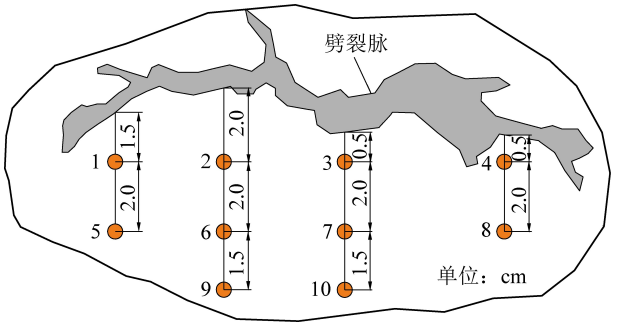


图 3 压汞试验取样位置
Fig.3 Sampling location of mercury injection test

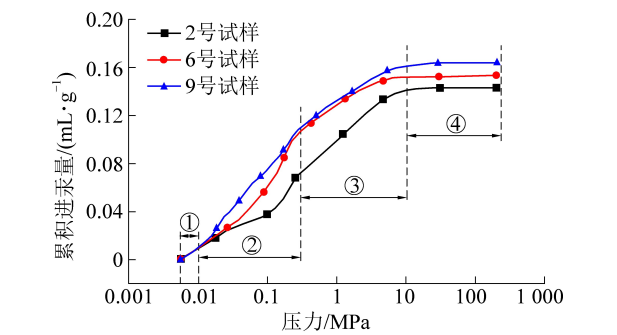


图 4 累计进汞量和压力的关系曲线
Fig.4 Relationship between cumulative mercury volume and pressure

阶段:①缓慢进汞阶段,压力范围为 0~0.01 MPa,曲线近似重合,此阶段由于压力比较小,压入汞的孔隙是最大的,说明此阶段的孔在所有样品中均存在;②加速进汞阶段,压力为 0.01~0.30 MPa,此阶段距离劈裂脉不同距离的样品发生明显的分离,距离越远,曲线的斜率也大,增速也就越快,说明不同样品的孔隙类型在此阶段有明显的差别;③减速进汞阶段,压力为 0.3~10.0 MPa,曲线呈现比较明显的上升趋势;④停滞进汞阶段,压力为 $\geq 10\text{ MPa}$,压力大于 10 MPa 后,曲线均为水平,说明孔隙已经处于饱和状态。

各个试样的退汞率曲线如图 5 所示,退汞率为 52.62%~99.46%,半开放孔居多,孔隙间的连通性差,说明注浆可以明显增强松散土层的抗渗性。

表 2 列出了距离浆液主劈裂脉不同距离的孔隙直径分布情况,其中超大孔、大孔、中孔、过渡孔、微孔的界限分类依据参考文献[17]中提出的分类方法。

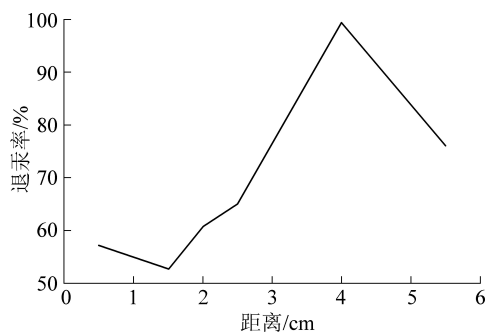


图 5 退汞率与距离的关系曲线

Fig.5 Relationship between mercury ejection rate and distance

表 2 化学注浆固砂体孔径分布结果

Table 2 Pore size distribution of chemically grouted sand

编号	距离/cm	单位进汞量/(10^{-4} mL · g $^{-1}$)				
		超大孔	大孔	中孔	过渡孔	微孔
3	0.5	566	724	418	136	13
4	0.5	508	610	425	116	8
1	1.5	407	283	595	220	19
2	2.0	450	587	348	14	0
7	2.5	749	626	279	85	9
8	2.5	1 524	215	82	17	21
6	4.0	762	512	234	20	7
10	4.0	1 652	152	28	5	0
5	4.5	1 223	334	87	39	4
9	5.5	850	415	303	72	1

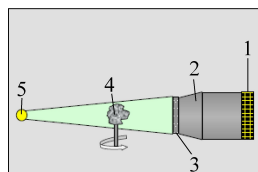
注:超大孔(>10 000 nm);大孔(1 000~10 000 nm);中孔(200~1 000 nm);过渡孔(30~200 nm);微孔(≤ 30 nm)。

随着浆液渗透距离的增加,大孔和中孔的孔隙体积明显减少,过渡孔和微孔的孔隙体积没有明显变化,超大孔的孔隙体积明显增加。可见浆液在渗透的过程中优先充填大孔和中孔,过渡孔和微孔基本没有充填。距离劈裂脉的距离为 4 cm 时,超大孔的孔隙体积最大,而大孔、中孔、过渡孔、微孔的孔隙体积较小。

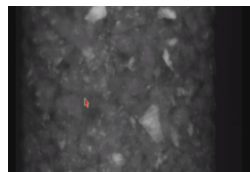
2.2 3D-XRM 试验

采用德国卡尔蔡司(Carl Zeiss)的高分辨三维 X 射线显微成像系统(3D-XRM),其原理是从阴极发射的电子束在轰击阳极靶材钨后产生宽频谱 X 射线;X 射线穿过旋转样品,在不同的角度暂停并由接收器采集二维的投影图像;投影图像通过三维分析软件被组合在一起后形成三维重构体。蔡司三维 X 射线显微镜的工作原理,如图 6 所示。

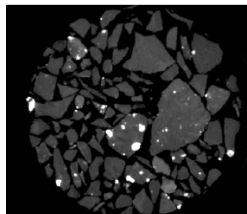
用于 3D-XRM 的取样位置如图 7 中箭头所示,在距离劈裂脉一侧通过水钻钻取直径 2.5 cm 的圆柱状样品,用于三维 X 射线扫描,获取断层切片数据,在通过 MIMICS 软件完成三维重构。



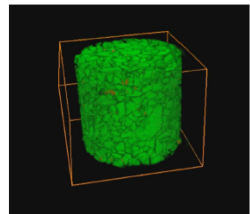
(a) 蔡司 X 射线显微镜



(b) 3D 投影



(c) 切片



(d) 三维视图

1—探测器;2—光学放大镜;3—闪烁器;4—样品;5—光源

图 6 蔡司三维 X 射线显微镜的工作原理

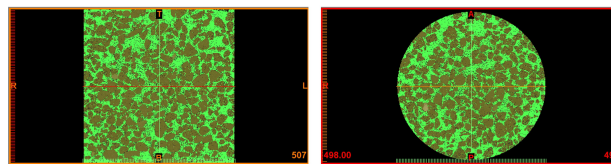
Fig.6 Zeiss 3D-XRM working principle



图 7 3D-XRM 取样位置

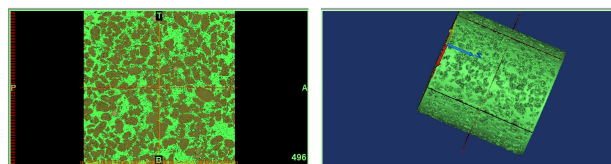
Fig.7 Sampling position of 3D-XRM

由于 X 射线穿越不同密度属性介质时,其衰减程度不一致,可以采集到不同灰度范围的图像。MIMICS 通过不同阈值选择对导入的灰度图像进行图像分割,本文就基于此来构建化学注浆固砂体的三维孔隙模型,处理界面如图 8 所示。



(a) X-Z 平面切片

(b) X-Y 平面切片



(c) Y-Z 平面切片

(d) 三维重构视图

图 8 处理界面

Fig.8 Processing interface

图 9 为经过图像分割后提取到的浆液固结体内部的孔隙、浆液与砂颗粒的特征图像。由图 9a 可看出,劈裂脉内部的浆液在向两侧渗透扩散的过程中,靠近劈裂脉的地方,浆液的充填率较高,孔隙分布稀疏,抗渗加固效果较好;远离劈裂脉的地方,浆液充填率较低,孔隙分布较多,且孔隙的尺寸差异较大,连通性较好,抗渗加固效果较差。图 9b 为提取到的浆液骨架形态特征,从图 9b 中可看出,靠近劈裂脉的地方浆液充填率高,骨架完整,远离劈裂脉的位置,浆液分布比较稀疏,骨架不完整。图 9c 为提取到的砂颗粒的三维图像。

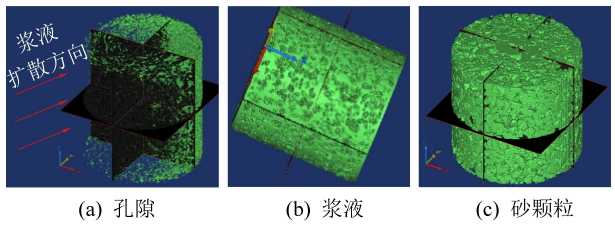


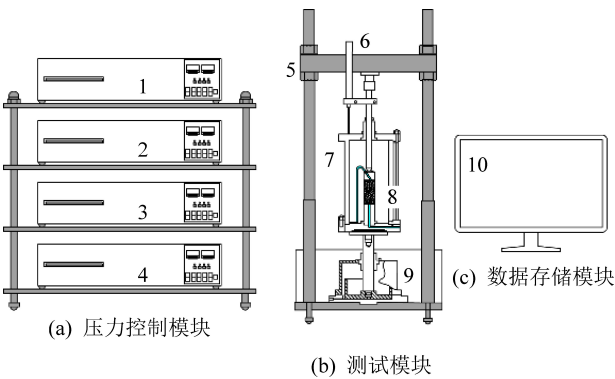
图 9 图片分割结果

Fig.9 Results of image segmentation

笔者未对其进行深入分析,只限于定性描述,进一步分析浆液渗透扩散半径上孔隙的连通性、砂颗粒的排布方式等,对从微观上解释浆液的扩散机理很有意义。

2.3 渗透试验结果与分析

采用 SLB-1 型三轴剪切渗透仪测试注浆固结砂样的渗透系数,SLB-1 型三轴剪切渗透仪由 3 个模块组成,分别为压力控制模块、测试模块及数据存储模块,如图 10 所示。该三轴仪的轴向压力控制范围为 0~20 kN,围压与反压的控制范围均为 0~1.99 MPa,测试精度为±1%,可以进行 UU、CU、CD 三轴测试及渗透试验。



1—轴压控制器;2—围压控制器;3—反压控制器一;
4—反压控制器二;5—顶梁;6—位移传感器;
7—三轴压力室;8—试样;9—升降机;10—电脑

图 10 SLB-1 型三轴剪切渗透试验仪系统组成

Fig.10 Composition principle of model SLB-1

试样渗透系数主要取决于孔隙度,及内部孔隙的几何性质,包括尺寸、形状、方向、连通性等。经典的 Carman-Kozeny 模型认为渗透系数与孔隙度 4 呈正相关,其表达式为

$$k = \frac{c\varphi^3}{(1 - \varphi)^2} \tag{2}$$

式中: k 为渗透系数; c 为 Carman-Kozeny 模型常数; φ 为孔隙度。

采用 SLB-1 型三轴剪切渗透试验仪,测试采用的围压为 200 kPa,轴压与反压一为 0,反压二为 20 kPa,剪切速率为 0.8 mm/min,距离劈裂脉不同距离试样的渗透系数测试结果见表 3。

表 3 化学注浆固砂体试样渗透系数

Table 3 Permeability coefficient of chemically grouted sand							
距离/cm	0.5	1.5	2	2.5	4	4.5	5.5
渗透系数/ ($10^{-6} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	0.73	1.16	1.98	8.26	9.08	12.72	16.68

从表 3 中可以清楚地看出,随着浆液渗透扩散距离的增加,渗透系数不断增大,且浆液渗透扩散距离在 2.5 cm 左右时,渗透系数陡然增加,与浆液对孔隙的充填情况密切相关。经过测试,密度为 1.60 g/cm³ 的纯砂样的渗透系数为 2.35×10⁻³ cm/s,得到的化学注浆固砂样渗透系数的平均值为 7.23×10⁻⁶ cm/s。可见化学注浆可以明显增强其抗渗性能,减小孔隙度及孔隙间的连通性能。

2.4 力学试验结果与分析

注入化学浆液后,砂样的渗透系数必将发生明显改变。普氏系数分级法^[18](表 4)是以岩石的加固系数进行分类的方法,被广泛应用在巷道支护、岩体开挖、定向爆破等岩土工程领域,其计算公式为

$$f = R_c / 10 \tag{3}$$

式中: f 为普氏系数; R_c 为单轴抗压强度。

表 4 普氏系数分级方法^[18]

Table 4 Protodyakonov coefficient scale ^[18]		
级别	坚硬程度	普氏系数
I	最坚固	20.0~52.0
II	非常坚固	15.0~18.0
III	坚固	8.0~12.0

3 结 论

1) 累积进汞曲线与压力曲线均呈现 S 型变化,可分为 4 个阶段,缓慢进汞阶段(0~0.01 MPa)、加速进汞阶段(0.01~0.30 MPa)、减速进汞阶段(0.3~10 MPa)、停滞进汞阶段(≥10 MPa)。

2)退汞率为52.62%~99.46%,半开放孔居多,孔隙间的连通性差,说明注浆可以明显增强松散土层的抗渗性。

3)劈裂脉内部的浆液在向两侧渗透扩散的过程中,靠近劈裂脉的地方,浆液的充填率较高,孔隙分布稀疏,抗渗加固效果较好;远离劈裂脉的地方,浆液充填率较低,孔隙分布较多,且孔隙的尺寸差异较大,连通性较好,抗渗加固效果较差。

4)化学注浆固砂样渗透系数的平均值为 7.23×10^{-6} cm/s。可见化学注浆可以明显增强其抗渗性能,减小孔隙度及孔隙间的连通性能。

5)依据岩石的普氏系数分级方法,化学注浆固砂样可以达到坚固的状态,说明化学注浆后,松散砂样的坚硬程度明显改善,可以达到很好的固砂减渗效果。

参考文献(References):

- [1] 隋旺华,刘佳维,高炳伦,等. 采掘诱发高势能溃砂灾变机理与防控研究与展望[J]. 煤炭学报,2019,44(8):2419-2426.
SUI Wanghua, LIU Jiawei, GAO Binglun, *et al.* A review on disaster mechanism of quicksand with a high potential energy due to mining and its prevention and control[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(8): 2419-2426.
- [2] 李志鹏,张连震,张庆松,等. 砂层渗透注浆加固效果模型试验研究[J]. 煤炭学报,2018,43(12):3488-3497.
LI Zhipeng, ZHANG Lianzhen, ZHANG Qingsong, *et al.* Simulation test for permeation grouting reinforcement effect of sand layer[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(12): 3488-3497.
- [3] 倪兴华,隋旺华,关云章,等. 煤矿立井井壁破裂防治技术研究[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,2005.
- [4] 刘人太. 水泥基速凝浆液地下工程动水注浆扩散封堵机理及应用研究[D]. 济南:山东大学,2012.
- [5] 张向东,张建俊. 深立井突水淹井治理及恢复技术研究[J]. 煤炭学报,2013,38(12):2189-2195.
ZHANG Xiangdong, ZHANG Jianjun. Techniques applied to water-inrush control and side-wall restoration in deep vertical shaft[J]. Coal Science and Technology, 2013, 38(12): 2189-2195.
- [6] 郭密文. 高压封闭环境孔隙介质中化学浆液扩散机制试验研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2010.
- [7] 杨志全,侯克鹏,郭婷婷,等. 基于考虑时变性的宾汉姆流体的渗透注浆机理研究[J]. 四川大学学报(工程科学版),2011,43(S1):67-72.
YANG Zhiquan, HOU Kepeng, GUO Tingting, *et al.* Study on penetration grouting mechanism based on Bingham Fluid of time-dependent behavior[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2011, 43(S1): 67-72.
- [8] 叶飞,苟长飞,陈治,等. 盾构隧道粘度时变性浆液壁后注浆渗透扩散模型[J]. 中国公路学报,2013,26(1):127-134.
YE Fei, GOU Changfei, CHEN Zhi, *et al.* Back-filled grouts diffusion model of shield tunnel considering its viscosity degeneration[J]. China Journal of Highway & Transport, 2013, 26(1): 127-134.
- [9] 叶飞,陈治,贾涛,等. 盾构隧道管片注浆幕律流型浆液渗透扩散模型[J]. 岩土工程学报,2016,38(5):890-897.
YE Fei, CHEN Zhi, JIA Tao, *et al.* Penetration diffusion model of exponential fluid for backfill grouting through segments of shield tunnel[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(5): 890-897.
- [10] OZGUREL H, VIPULANANDAN C. Effect of grain size and distribution on permeability and mechanical behavior of acrylamide grouted sand[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, 131(12):1457-1465.
- [11] 钱自卫,姜振泉,曹丽文,等. 弱胶结孔隙介质渗透注浆模型试验研究[J]. 岩土力学,2013,34(1):139-142.
QIAN Ziwei, JIANG Zhenquan, CAO Liwen, *et al.* Experiment study of penetration grouting model for weakly cemented porous media[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(1): 139-142.
- [12] 刘人太,张连震,张庆松,等. 速凝浆液裂隙动水注浆扩散数值模拟与试验验证[J]. 岩石力学与工程学报,2017,36(S1):184-193.
LIU Rentai, ZHAN Lianzhen, ZHANG Qingsong, *et al.* Numerical simulation of crack grouting process of quick setting slurry with running water and its experimental verification[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(S1): 184-193.
- [13] 程少振,陈铁林,郭玮卿,等. 土体劈裂注浆过程的数值模拟及浆脉形态影响因素分析[J]. 岩土工程学报,2019,41(3):484-491.
CHENG Shaozhen, CHEN Tielin, GUO Weiqing, *et al.* Numerical simulation of fracture grouting and analysis of influencing factors of grout vein morphology[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(3): 484-491.
- [14] 袁世冲,张改玲,郑国胜,等. 斜井穿越风积砂层水砂突涌注浆治理研究[J]. 煤炭学报,2018,43(4):1104-1110.
YUAN Shichong, ZHANG Gailing, ZHENG Guosheng, *et al.* Grouting treatment of water and sand inrush into an inclined shaft in aeolian sand layer[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(4): 1104-1110.
- [15] QIAN Ziwei, JIANG Zhenquan, GUAN Yunzhang, *et al.* Mechanism and remediation of water and sand inrush induced in an inclined shaft by large-tonnage vehicles[J]. Mine Water and the Environment, 2018, 37(4):849-855.
- [16] 施斌. 论大地感知系统与大地感知工程[J]. 工程地质学报,2017,25(3):582-591.
SHI Bin. On the ground sensing system and ground sensing engineering[J]. Journal of Engineering Geology, 2017, 25(3): 582-591.
- [17] 张改玲. 化学注浆固砂体高压渗透性及其微观机理[D]. 徐州:中国矿业大学,2011.
- [18] 张玉良,孙强,李进学,等. 高温焙烧后黏土孔隙与力学特征研究[J]. 岩石力学与工程学报,2015,34(7):1480-1488.
ZHANG Yuliang, SUN Qiang, LI Jinxue, *et al.* Pore and mechanical characteristics of high-temperature baked clay[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(7): 1480-1488.