

·环境矿物学·

集成回填材料的渗透特性研究

范 香¹, 易发成², 杜金阳³, 朱宝龙²

(1. 西南财经大学天府学院工程管理研究所, 四川 绵阳 621000; 2. 西南科技大学, 四川 绵阳 621000;
3. 四川仁智石化科技有限责任公司, 四川 绵阳 621000)

摘 要: 本文在前人基础上改进渗透装置, 通过自制多功能膨胀渗透仪在氮气加压为 1.0 MPa 条件下, 测得沸石-膨润土-硫铁矿、凹凸棒石-膨润土-硫铁矿两组混合物在不同膨润土含量、压制载荷、压实密度、出水时间等条件下的渗透系数。实验结果表明: 集成回填材料的渗透系数随时间的变化不大, 基本满足达西定律。同一干密度和含水率条件下, 不同混合物随着膨润土含量的增加, 其渗透系数降低。膨润土含量占沸石混合物或者凹凸棒石混合物比例不小于 60% 时, 二者混合物的渗透系数均满足高放废物处置中回填材料渗透系数小于 7×10^{-10} m/s 的要求。但同等条件下, 由于沸石为非粘性矿石, 其具有孔隙大、渗透性好等特点, 因此天然地下水在沸石混合物中比在凹凸棒石混合物中渗透得快。同一干密度和含水率条件下, 不同混合物压实制样的载荷越大, 其渗透系数越小, 反之越大。压制载荷在 50~100 MPa 间时, 混合物的渗透系数变化不大。通过进行混合物不同配比、不同影响因素对渗透特性影响的研究, 为我国新型缓冲回填材料在未来地下工程中施工提供一定的理论依据。

关键词: 膨润土; 沸石; 凹凸棒石; 渗透系数

中图分类号: P579

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2017)01-0096-08

The permeability characteristics of integrated backfill materials

FAN Xiang¹, YI Fa-cheng², DU Jin-yang³ and ZHU Bao-long²

(1. Tianfu College of SWUFE Project Management Institute, Mianyang 621000, China; 2. Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621000, China; 3. Sichuan Renzhi Petrochemical Technology Co., Ltd., Mianyang 621000, China)

Abstract: In this study, the authors improved osmosis device on the basis of previous researches. Through the self-made multifunctional osmotic swelling meter in a nitrogen pressure of 1.0 MPa, and under different conditions of content, coefficient of load, compacted density, and water breakthrough time pressing, the authors obtained the permeability coefficient of zeolite-bentonite-pyrite mixture and attapulgite-stone-bentonite-pyrite mixture for two groups of samples. The results showed that the permeability of the integrated backfill material changed little with time, and was basically consistent with Darcy's law. Under the same dry density and water content rate conditions, with the increase of the content of bentonite, the permeability coefficient of different mixed minerals decreased. When bentonite content proportion in zeolite mixture or attapulgite stone minerals was not less than 60%, the permeability coefficient satisfied the requirement of less than 7×10^{-10} m/s permeability coefficient in high-level radioactive disposal of backfill material. Under the same conditions, because the zeolite is characterized by non-sticky property, large porosity, and good permeability, the water in the zeolite mixture permeated faster than that of the mixture. In the same dry density and water content rate, the greater

收稿日期: 2016-08-01; 接受日期: 2016-11-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(A3120080126)

作者简介: 范 香(1984-), 讲师, 结构工程专业, E-mail: 920391362@qq.com; 通讯作者: 易发成, 教授, 主要从事岩石、回填材料的阻滞性能研究, E-mail: 504539179@qq.com。

the compaction of the loads of different mixtures, the smaller the permeability coefficient, and vice versa. From loads of 50~100 MPa, the permeability coefficient changed little. Thus, the study of the permeability characteristics of the mixture of different ratios and different influence factors, could provide a theoretical basis for the construction of a new type of cushion backfill material in the future.

Key words: bentonite; zeolite; bump; permeability coefficient

Fund support: The Block Feature Study of Nuclide Inorganic Non-metallic Materials (A3120080126)

在核废料的深地质处置方法中,为保障放射性废物深部地质处置库的安全性,回填材料作为一种缓冲材料填充高放废物固化体与围岩之间。根据高放废物对回填材料的要求,Pusch (1980, 1981)经过分析、比较和相关实验认为以蒙脱石为主要成分的膨润土因其结构和成分的优势是最合适的材料。在环境工程领域中,回填材料的渗透性质不仅直接关系到固体废物填埋场的工程设计,而且在研究污染物在土壤中的迁移转化以及评价地下水的污染程度等理论工作中也具有重大意义。Westsik(1983)和 Ivan Dananaj(2006)等比较了钠基膨润土与钙基膨润土渗透性的差异,认为钙基膨润土比钠基膨润土更适合作为回填材料。Hodges (1982)提出了利用高压实的膨润土降低渗透性的方案,并对含砂-膨润土混合物的渗透系数进行了研究,认为砂的加入显著降低了缓冲材料的阻水性能。国内对回填材料的渗透性研究起步较晚,周抗寒等(1995)研制了多功能膨胀渗透仪,并利用该装置对高压实膨润土进行渗透性试验,发现用于高活度放射性废物深地质处置的压实膨润土,其渗透系数低于 10^{-11} m/s。刘月秒等(1998)认为主要有两种测量粘土样品的渗透系数方法:第 1 种是固结法,样品放入固结仪内,测量不同时间内排出的水量;第 2 种是渗透试验法,这是在特殊容器内测得样品在给定注入水压作用下通过的水量。近年来国内外学者对回填材料的研究从单一矿物(蒙脱石为主)逐渐走向混合物,瑞典、美国、加拿大、日本等已初步确定膨润土-石英砂混合物的配比,并已投入了地下试验(International Atomic

Energy Agency,1990; Victoria *et al.*, 2006)。我国张虎元等(2011)测得在低压实(20 MPa)条件下膨润土与砂混合物的渗透性能。然而膨润土或者膨润土与石英砂的混合物,均是利用膨润土的极低渗透性以及较好的吸附性。砂对放射性核素没有吸附性,砂增加过多对回填材料的吸附性能、膨胀性能都会有影响。因此,本文结合回填材料的各种性能(低渗透性、良好的膨胀性能、热传导好等),以新疆阿尔泰膨润土(Na^+)、新疆沸石、安徽明光凹凸棒石、四川江油黄铁矿为原料按一定的配比组合成混合物样品,在前人的基础上自制多功能膨胀渗透仪,测试研究了混合物样品中各成分比例对渗透性能的影响,以期确定我国新型缓冲回填材料配比,为我国今后加大工业试验和地下试验室原位施工提供资料。

1 实验材料与方法

1.1 样品

实验所用原材料:新疆阿尔泰膨润土(Na^+)、新疆沸石、安徽明光凹凸棒石、四川江油黄铁矿以及天然地下水。

在西南科技大学核废物与环境安全国防重点学科实验室,利用 X 射线衍射仪对原材料进行了成分测试。新疆阿尔泰膨润土主要矿物为 Na-蒙脱石,含量较高,并含有少量 α -石英,其工程指标见表 1。膨润土具有良好的阳离子交换能力和膨胀性能,是本次实验重要的基材(侯莉,2008)。

新疆沸石主要为板状、片状、针状。主要矿物成

表 1 新疆阿尔泰膨润土物化工程指标

Table 1 Physical-chemical and engineering indexes of Xinjiang bentonite							
胶质价(mL/15 g)	膨胀容(mL/g)	膨润值(mL/3 g)	pH 值	吸蓝量(Meq/100 g)	CEC(Meq/100 g)	液限(%)	塑限(%)
>100	28	42	8.8	139	82	82.3	27
风干含水率(%)	容重(g/cm ³)	比重	干密度(g/cm ³)	孔隙率(%)	孔隙比	塑性指数	导热系数(W/m·℃)
14.47	2.23	2.52	1.89	24.10	0.32	51.1	0.21

分为丝光沸石、斜发沸石、叶沸石、石英,并含少量蒙脱石等。由于沸石的 CEC 值(97.97 Meq/100 g)远远超过新疆膨润土矿(82 Meq/100 g),表明该沸石的阳离子交换吸附性能明显优于新疆膨润土,但沸石具有多孔的特点,隔水性差,需要添加膨润土来提高其隔水性,阻止地下水进入废物容器罐,防止放射性核素随地下水的迁移、扩散。

凹凸棒石是一种以层链状过渡结构的含水富镁硅酸盐为主的粘土矿物。其晶体结构属 2:1 型粘土矿物。主要矿物成分为凹凸棒石、白云石、硅质矿物及蒙脱石。凹凸棒石的阳离子交换量为 29.53 Meq/100 g,比膨润土和沸石的小,孔隙率较大,导热系数最大,这主要是由于其中的硅质含量较高。根据易发成等(2002)研究,凹凸棒石对某些核素(如铯)的吸附性能较膨润土的好,但其在最大干密度 0.842 g/cm^3 时渗透系数为 $1.80 \times 10^{-9} \text{ m/s}$,需要添加膨润土来降低其渗透系数。然而回填材料放到地下几千米,核素释放出来的能量很难从废物罐中散发出来,而硫铁矿有很好的导热性能可以解决这个问题。因此,有必要根据不同矿物材料在性能上的互补性,按一定的配比组合,从而较好的发挥三种材料的优越性能,达到优化集成。本文实验设计各混合物组成含量见表 2。

表 2 实验混合物各组成部分的含量表 %

Table 2 Mineral component content of the mixture

矿物名称	沸石	凹凸棒石	膨润土
Z ₅ B ₅	50		50
Z ₄ B ₆	40		60
Z ₃ B ₇	30		70
Z ₂ B ₈	20		80
Z ₀ B ₁₀	0		100
A ₅ B ₅		50	50
A ₄ B ₆		40	60
A ₃ B ₇		30	70
A ₂ B ₈		20	80
A ₀ B ₁₀		0	100

注:上述混合物中编号为 Z₅B₅ 代表沸石、膨润土各占沸石和膨润土混合物总质量的 50%,在此基础上加 10% 的硫铁矿作为添加剂,其中 A—凹凸棒石,B—膨润土,Z—沸石,P—硫铁矿,其余配比以此类推。

1.2 设备

由于回填材料的渗透性极低,目前尚没有一种通用的实验设备可以测定这种极低渗透性的介质。

清华大学环境工程系周抗寒等(1995)开发了一套多功能膨胀渗透仪用于测定高压实膨润土的渗透系数。本文根据已开发的多功能膨胀渗透仪,在该套仪器的基础上进行改进测量,可以同时测定 5 个试样的渗透系数,操作简单,周期短,实验误差相对比较小,主要仪器设备如表 3,其他还有:烘箱及干燥器、天平喷水设备、盛土盘、量筒、推土器、铝盒、环刀、修土刀、凡士林、砝码、百分表、耐压橡胶管数米,锥形瓶,注射针头。渗透装置由多功能膨胀渗透仪、氮气瓶、压力稳定指示仪、高压水罐、渗透仪与渗出液收集装置几部分构成(图 1)。高压水罐设计 1 个进气口,连接管路为耐压橡胶管 5 个出水口(图 2a、2b),以便能够同时测定多组样品,减小实验周期。实验前锥形瓶里放入少量蒸馏水,渗透仪与橡皮塞之间连接注射针头,出水后每隔一段时间除了试管的刻度,同时用电子天平称量锥形瓶连同橡胶塞和渗出液的总质量,称量时连同橡胶塞一起称。结果证明,本实验采用的操作方法简单易行,精度高。

1.3 原理与方法

本文实验在常温 20℃ 下进行,采用常水头法计算其渗透系数。主要参数的计算公式为:

表 3 主要仪器及设备用表

Table 3 Main instruments and equipment

编号	仪器或设备名称	规格	厂家	备注
①	FA1604 电子天平	精度为 0.000 1 g	上海天平仪器厂	单位体积击实功约 592.2 kJ/m ³
②	自动脱模机	DTM-2 型	南京土壤仪器厂生产	
③	压力储水罐	自制,图 2、3	西南科技大学军工厂	罐内装入 2 000 L 天然山泉
④	多功能膨胀渗透仪	自制	西南科技大学军工厂	不锈钢
⑤	搅合工具	金属盘,土铲		

$$K_T = QL / Aht \quad (1)$$

其中 K_T 为一定温度(℃)下的渗透系数(m/s), Q 为一定时间内的渗流量(m³), L 为试样高度(m), t 为渗透时间(s), h 为常水头(m), A 为试样横截面积(m²)。

$$\rho_d = \rho_0 / (1 + w_0) \quad (2)$$

其中 ρ_d 为干密度(精确至 0.01 g/cm³), ρ_0 为容重(g/cm³), w_0 为风干含水率(%)。

$$n = 1 - \rho_d / G_s \quad (3)$$

其中 n 为孔隙率(精确至 0.01 %), ρ_d 为干密度

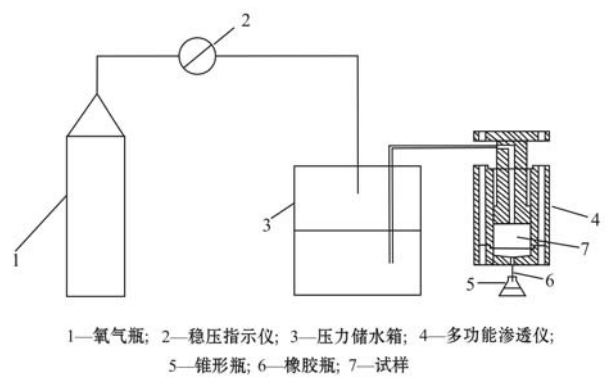


图 1 渗透装置示意图
Fig. 1 Schematic diagram of permeation setting

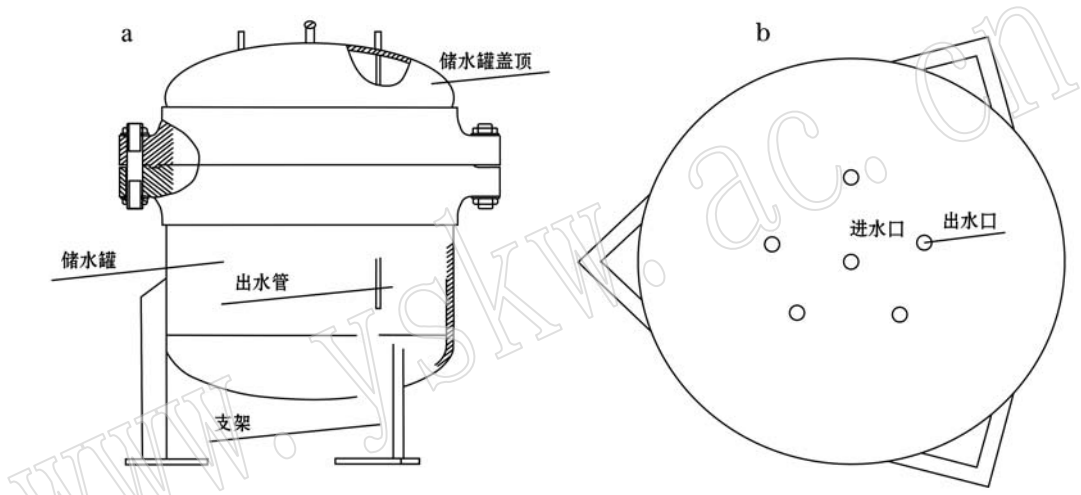


图 2 压力储水罐立面(a)和顶面(b)示意图
Fig. 2 Schematic diagram of pressure storage tank elevation (a) and the top (b)

1999)在风干含水率下制样,预制含水率约为 15%, 预制干密度约为 1.70 g/cm³,在千斤顶上压制载荷为 50 MPa 压实,共测定了在氮气加压 1.0 MPa 左右下沸石-膨润土-硫铁矿混合物(ZB)、凹凸棒石-膨润土-硫铁矿混合物(AB)共 10 个混合物(2 组混合

(g/cm³), G_s 为比重。

2 实验结果与分析

目前针对一般岩土渗透特性的研究报道较多, 但有关高压实膨润土渗透性的研究国内尚未开展。侯莉(2008)将加压条件氮气控制为 0.17 MPa,本次氮气加压控制在 1.0 MPa,这样可以缩短前期渗水的时间。

2.1 矿物成分对渗透性能的影响

本实验制样依据土工试验方法标准(GB/T50123-

物,每组 5 个样品)的渗透系数,实验结果见表 4 和图 3。

由表 4、图 3 看出,在同一干密度、含水率、压制载荷下,随着沸石、凹凸棒石占混合物含量的增加,集成回填材料的渗透系数逐渐增加。当沸石含量为

表 4 加压下 ZB 和 AB 混合物的渗透参数

Table 4 The infiltration parameters of ZB and AB under pressure

混合物名称	干密度(g/cm ³)	压制密度(g/cm ³)	孔隙率(%)	含水量(%)	20℃ 下渗透系数(10 ⁻¹¹ m/s)
Z ₅ B ₅	1.68	1.98	21.98	16.3	10.721
Z ₄ B ₆	1.69	1.99	21.02	15.4	8.366
Z ₃ B ₇	1.70	2.01	20.21	15.9	3.978
Z ₂ B ₈	1.67	2.02	20.06	15.5	0.964
Z ₀ B ₁₀	1.66	2.08	20.11	15.3	0.016
A ₅ B ₅	1.65	1.97	22.01	15.5	5.646
A ₄ B ₆	1.70	2.08	20.03	15.1	3.765
A ₃ B ₇	1.69	2.13	19.57	15.4	1.841
A ₂ B ₈	1.72	2.03	20.09	15.2	0.365
A ₀ B ₁₀	1.71	2.06	20.12	15.6	0.015

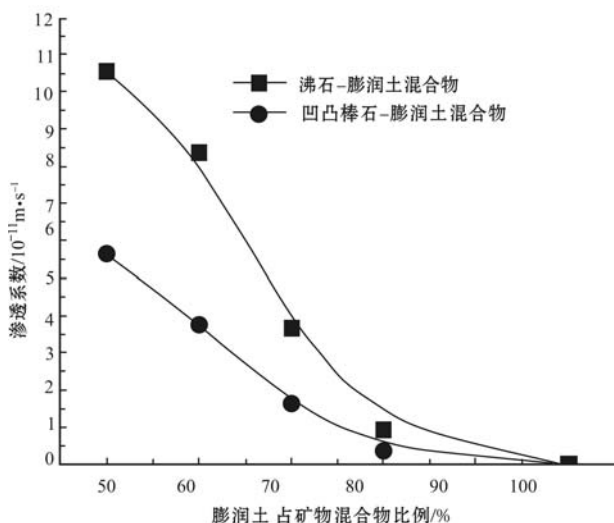


图 3 不同比例矿物的渗透系数(20℃)

Fig. 3 Coefficients of permeability of different proportions of minerals(20℃)

30%~40%时,渗透系数在一个数量级上。但当沸石的含量占混合物的50%时,其渗透系数为 $10.72 \times 10^{-11} \text{ m/s}$,此外,笔者通过单一沸石渗透实验测得其渗透系数达到 $2.41 \times 10^{-5} \text{ m/s}$,因此预计混合物沸石含量大于50%时,渗透系数迅速增大,这是由于沸石的较大的孔隙率造成的。因此在集成回填材料中沸石的含量不能超混合物总量的40%。

凹凸棒石含量20%~50%时,其渗透系数均为一个数量级,凹凸棒石占50%时最大渗透系数为 $0.565 \times 10^{-10} \text{ m/s}$,满足回填材料对渗透性能的要求(小于 $7 \times 10^{-10} \text{ m/s}$)。与沸石相比,同一条件下,凹凸棒石-膨润土的渗透系数比沸石-膨润土混合物的要小。显然沸石与膨润土混合物要比凹凸棒石与膨润土混合物的渗透速度快,这是因为沸石具有非粘性、孔隙大、渗透性好的特征。此外,本次实验中添加10%硫铁矿粉构成的三组分集成材料渗透系数与不添加硫铁矿的渗透系数存在一定的差异。有添加剂的 A_2Z_8 混合物渗透系数($0.365 \times 10^{-11} \text{ m/s}$)比无添加剂 A_2Z_8 的混合物的渗透系数($0.0485 \times 10^{-11} \text{ m/s}$)要大得多,因为添加硫铁矿增大了颗粒骨架之间的孔隙度,从而提高了渗透性能(范香等,2010)。然而作为处置放射性废物的回填材料,必须要阻止地下水进入废物罐,其渗透性越差就越好,在实际工程中要合理控制添加剂以及矿物成分比例的使用。

2.2 压实密度对渗透系数的影响

根据要求制作沸石-膨润土-硫铁矿混合物

(Z_3B_7)、凹凸棒石-膨润土-硫铁矿混合物(A_3B_7)两组共10个配比的混合物,分别在压制载荷为10 MPa、25 MPa、50 MPa、75 MPa、100 MPa下压实成型,通过氮气加压控制在1.0 MPa测得的渗透系数。实验结果见表5。

由表5及图4可以看出,相同含水率的样品,制样载荷越大,所得的压制密度越大,其原因在于沸石的孔隙率比凹凸棒石的大,与膨润土混合后压实,更多的蒙脱石填充在沸石所构成的骨架中,致使其密度比凹凸棒石的大(李虎杰等,2006)。含水率为15%时,AZ和BZ混合物在50 MPa以内就能压制成所需的密度,当压制载荷超过50 MPa后随压制载荷的增加,而混合物的压实密度增加地却很慢,当压制密度为 1.95 g/cm^3 甚至会损坏压制磨具,因此压制成密度为 1.95 g/cm^3 的回填材料在实际的过程中容器壁强度将是一个很大的挑战,故建议回填材料的压实密度在 $1.7 \sim 1.85 \text{ g/cm}^3$ 左右(范香,2010)。

由表5及图5可知,同一干密度和含水率条件下,压实制样的荷载越大,渗透系数越小,反之越大。当压制载荷越大,混合材料中的膨润土被压得紧密,当膨润土遇水膨胀时其孔隙变小,水在土中很难穿过,这样在实际工程中有效的阻滞地下水的入侵。在同等条件下,压制力为100 MPa和10 MPa相差10倍,其渗透系数相差20倍;而压制载荷为50 MPa和100 MPa时,其渗透几乎差不多,说明压制载荷在50 MPa以上就能把混合材料压密实,这与范香(2010)的结果一致。

2.3 出水时间对渗透系数的影响

根据上一组 Z_3B_7 实验观察渗透系数随时间的变化情况发现,实验从开始加压到出水为20天左右,远远缩短了实验周期,当水从锥形瓶出来开始计数,共记录1 d、2 d、...、20 d后出水的量,其渗透与时间的关系如图6。

由图6可以看出每天的渗透系数基本变化不大,这符合水在粘性土渗流为层流,满足达西定律(Japan Nuclear Cycle Development Institute, 2000)。曲线中5 d时渗透系数增大,因为一开始土的孔尚未全部打开,流水4~5 d后,由于土的孔隙逐渐增大,故渗透系数增大。但在10 d后,渗透系数略有所下降,这是因为本次实验的基材是新疆膨润土,其中含有 Na^+ 离子,该种离子与本次实验采用的天然地下水中的 Cl^- 、 CO_3^{2-} 、 SO_4^{2-} 离子结合,变成了盐类化合

表 5 加压下 ZB 和 AB 的渗透参数

Table 5 The infiltration parameters of ZB and AB under pressure

混合物名称	压制载荷(MPa)	干密度(g/cm ³)	压制密度(g/cm ³)	孔隙率(%)	含水量(%)	20℃下渗透系数(10 ⁻¹¹ m/s)
Z ₃ B ₇	10	1.68	1.27	25.16	15.21	42.7
Z ₃ B ₇	25	1.71	1.49	23.47	15.25	18.6
Z ₃ B ₇	50	1.70	1.78	22.12	14.90	3.67
Z ₃ B ₇	75	1.66	1.94	21.89	15.19	2.91
Z ₃ B ₇	100	1.69	2.01	20.21	15.54	2.11
A ₃ B ₇	10	1.72	1.41	23.34	15.41	29.9
A ₃ B ₇	25	1.69	1.64	23.04	15.25	12.1
A ₃ B ₇	50	1.70	1.84	22.12	15.50	1.87
A ₃ B ₇	75	1.74	2.01	20.86	15.27	1.37
A ₃ B ₇	100	1.69	2.00	20.23	15.36	1.15

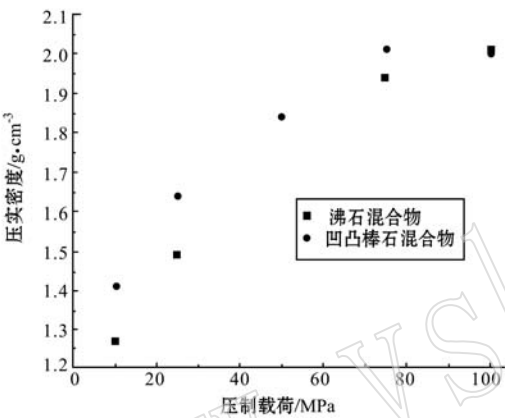


图 4 混合物压制载荷与压实密度的关系
Fig. 4 Relationship between density and compaction load of mixed mineral

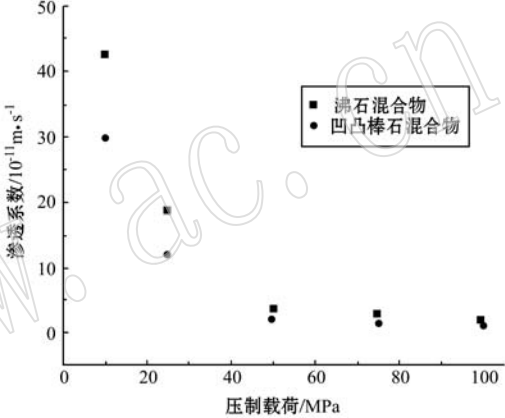


图 5 20℃下混合物压制载荷与渗透系数
Fig. 5 Compaction load and permeability of mixed minerals at 20 ℃

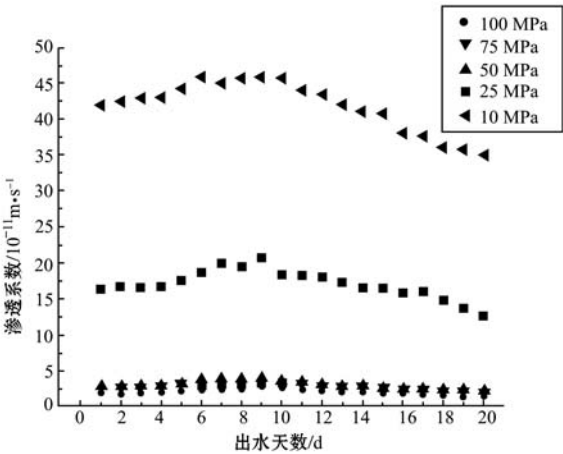


图 6 出水天数对 Z₃B₇ 渗透系数的影响
Fig. 6 The effect of days on Z₃B₇ permeability coefficients

到影响,渗透系数降低。这说明粘性土的渗透不仅受到流体的容重和粘滞性的影响,而且受到水-土-电解质之间的相互作用的影响(肖红宇, 2006)。然而从某种程度来说,回填材料在地质中时间越长,水在其中的渗透能力会有所下降,这对回填材料阻滞地下水入侵废物罐有好处。

3 结论

本文在氮气加压为 1.0 MPa 条件下,在改进前人渗透装置的基础上,利用自制多功能膨胀渗透仪对不同配比的沸石/凹凸棒石-膨润土-硫铁矿混合物进行了渗透实验。

(1) 同一干密度和含水率条件下,随着膨润土含量的增加,不同混合物中的渗透系数降低。不管是沸石混合物还是凹凸棒石混合物,膨润土含量占

物,堵塞了土的毛细管孔,从而水在里面的流动受

混合物比例均不能小于 60%，其集成回填材料的渗透系数才能满足高放处置中回填材料渗透系数小于 7×10^{-10} m/s 的要求。但同等条件下，凹凸棒石混合物比沸石混合物中渗透系数要小的多。

(2) 相同含水率的样品，制样载荷越大，所得到压制密度越大；在同含水率、压制载荷下，沸石混合物比凹凸棒石混合物的压实干密度大。

(3) 同一干密度和含水率条件下，不同混合物压实制样的荷载越大，渗透系数越小，反之越大。在同等条件下，压制力为 100 MPa 和 10 MPa 相差 10 倍，其渗透系数相差 20 多倍；而压制载荷为 50 MPa 和 100 MPa 时，其渗透几乎差不多。

(4) 混合物样品的渗透系数随时间的变化不大，即水在凹凸棒石混合物和沸石混合物中的传导符合达西定律。

References

- Fan Xiang. 2010. Study on the engineering properties of backfill materials[D]. Southwest University of Science and Technology, 80~81. (in Chinese with English abstract).
- Fan Xiang, Yi Facheng and Zhu Baolong. 2010. Study of compressive properties of integrated backfill material[J]. China Non Metallic Mining Industry Herald, 2: 35~38(in Chinese with English abstract).
- Hodges F N. 1982. Development of a backfill for confinement of high level nuclear waste scientific basis for nuclear waste managements [J]. Material Research Society, 23: 641~649.
- Hou Li. 2008. Study on optimization integration and performance of backfill materials[D]. Southwest University of Science and Technology, 17~19(in Chinese with English abstract).
- International Atomic Energy Agency. 1990. Sealing of underground repositories for radioactive wastes[R]. Technical Reports Series, 319.
- Ivan Dananaj, Jana Frankovska, Ivan Janotka, *et al.* 2006. The influence of smectite content on microstructure and geotechnical properties of calcium and sodium bentonites[J]. Applied Clay Science, 28: 223~232.
- Japan Nuclear Cycle Development Institute. 2000. Second Progress Report on Research an Development for the Geological Disposal of HLW in Japan Support 2 Repository[J]. Desing and Engineering Technology, JNCTN 14102000-003.
- Li Huijie, Yi Facheng, Hou Lanjie, *et al.* 2006. Study on the performance of several kinds of non metallic mineral buffer backfill materials[J]. China Mining Industry, 10: 102~104 (in Chinese with English abstract).
- Liu Yuemiao, Chen Ruzhang and Liu Shufen. 1998. Determination of the performance of buffer/backfill materials for high level radioactive waste repository[J]. Radiation Protection, 18(4): 290~295 (in Chinese with English abstract).
- Pusch R. 1980. Permeability of highly compacted bentonite[J]. SKBF KBS Teknisk Rapport, Stockholm, Sweden, 36: 16~80.
- Pusch R. 1981. Unsaturated and saturated flow in swelling clay[J]. Proc. the10th Internal Conf. SM & FE, 14: 369.
- Victoria V M, Julio A and Fernando H. 2006. Selection and characterization of a reference sealing material: the Spanish case[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 25(4): 768~780.
- Westsik J H. 1982. Permeability, swelling and radionuclide retardation Properties of candidate Backfill materials, Scientific basis for nuclear waste managements[J]. Material Research, 22: 329.
- Xiao Hongyu. 2006. Cohesive soil infiltration model and its elastoplastic damage model[D]. Kunming University of Science and Technology, 4: 7~10(in Chinese with English abstract).
- Yi Facheng, Li Yuxiang, Qian Guangren, *et al.* 2002. The adsorption of on low-level radionuclide Sr and Cs comprehensive in attapulgite[J]. Mineral Resources, 1: 16~20(in Chinese with English abstract).
- Zhang Huyuan, Zhao Tianyu, Lu Yiting, *et al.* 2011. Expansion under the condition of mixed type buffer and backfill permeability of[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 3: 3 049~3 055(in Chinese with English abstract).
- Zhou Kanghan, Li Guoding, Yu Ke, *et al.* 1995. Development of a multifunctional expansion and penetration apparatus and the permeability test of compacted bentonite[J]. Environmental Science, 5: 38~40(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 范 香. 2010. 回填材料的工程性能研究[D]. 西南科技大学, 80~81.
- 范 香, 易发成, 朱宝龙. 2010. 集成回填材料的压缩性能研究[J]. 中国非金属矿工业导刊, 2: 35~38.
- 侯 莉. 2008. 回填材料的优化集成及其性能研究[D]. 西南科技大学, 17~19.
- 李虎杰, 易发成, 侯兰杰, 等. 2006. 几种非金属矿缓冲回填材料性能研究[J]. 中国矿业, 10: 102~104.

刘月秒, 陈如璋, 刘淑芬. 1998. 高放废物地质处置库缓冲/回填材料的性能测定[J]. 辐射防护, 18(4): 290~295.

肖红宇. 2006. 粘性土渗透模型及其弹塑性损伤模型研究[D]. 昆明理工大学硕士学位论文.

易发成, 李玉香, 钱光人, 等. 2002. 凹凸棒石黏土对中小放核素

Sr, Cs 的吸附研究[J]. 矿产综合利用, (1): 16~20.

张虎元, 赵天宇, 卢一亭, 等. 2011. 膨胀条件下混合型缓冲回填材料的渗透特性[J]. 岩石力学与工程学报, 3: 3 049~3 055.

周抗寒, 李国鼎, 俞 珂. 1995. 多功能膨胀渗透仪的研制及压实膨润土的渗透性试验[J]. 环境科学, 5: 38~40.

《岩石矿物学杂志》荣获“2016 中国国际影响力优秀学术期刊”称号

2016 年 11 月,《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社、中国学术文献国际评价研究中心和清华大学图书馆正式联合发布《中国学术期刊影响因子年报》,我刊入选“2016 中国国际影响力优秀学术期刊”。对中国学术期刊进行国际影响力综合分析研究的该项评选自 2012 年开始。2016 年度的评选依据《中国学术期刊国际引证年报》(2016 版)统计的期刊影响力指数(CI),对中国(大陆)正式出版的具有 CN 刊号、连续 3 年及以上正常出版的刊物进行排序。科技期刊要求国际他引影响因子不小于 0.056、国际他引总被引频次不小于 69、JMI 指数大于 0.333、可被引文献比不小于 0.5。在全部 4 727 种(其中科技期刊 3 489 种,人文社科期刊 1 238 种)备选期刊中依序分别按 TOP5% 和 TOP5%~10% 各选出 175 种科技期刊、60 种人文社科期刊,列入“中国最具国际影响力学术期刊”和“中国国际影响力优秀学术期刊”的名单。

