

DOI: 10.16285/j.rsm.2017.10.023

γ 辐照老化对高庙子天然钠基膨润土力学强度和变形特性影响研究

刘 鹏^{1,2,6}, 刘俊新^{1,2,3}, 冒海军³, 杨仲田⁴, 刘 伟⁴, 巫尚蔚⁵, 王文清⁶

(1. 西南科技大学 土木工程与建筑学院, 四川 绵阳 621010; 2. 西南科技大学 工程材料与结构冲击振动四川省重点实验室, 四川 绵阳 621010; 3. 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; 4. 中国辐射防护研究院 中核高放废物地质处置评价技术重点实验室, 山西 太原 030006; 5. 重庆大学 资源及环境科学学院, 重庆 400044; 6. 中交隧道工程局有限公司华南分公司, 广东 广州 510000)

摘 要: 为探究高放核废物深地质处置缓冲材料的长期稳定性, 以内蒙古高庙子(GMZ)天然钠基膨润土为研究对象, 揭示了 γ 辐照老化作用对高压实天然钠基膨润土样品力学强度和变形特性的影响。采用钴源在室温下对该膨润土进行不同累积剂量的辐照作用, 分析了辐照前、后膨润土的矿物成分变化, 并开展了三轴剪切以及膨胀变形试验。结果表明: γ 辐照老化作用引起膨润土部分矿物成分的变化, 蒙脱石微观结构稳定性降低并转化为更稳定的硅酸盐和硅铝酸盐矿物; 膨润土经过辐照作用后剪切强度有所增长且随辐照剂量增大, 矿物成分发生了变化, 同等围压下膨润土的剪切峰值强度逐渐提高; 随着围压的增大, 强度增长的幅度逐渐变缓, 辐照剂量对强度的影响减弱, 表明围压对膨润土强度的增长有一定的抑制作用; 由于辐照后蒙脱石的含量减少, 膨润土的膨胀变形性能相应减弱, 即膨胀力、自由膨胀应变、有荷膨胀应变等指标降低。

关键词: 辐照老化; 钠基膨润土; 蒙脱石; 力学强度; 膨胀性能

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 7598 (2017) 07 - 2949 - 08

Influences of γ -rays irradiation on strength and deformation behaviors of Gaomiaozi Na-bentonite

LIU Peng^{1,2,6}, LIU Jun-xin^{1,2,3}, MAO Hai-jun³, YANG Zhong-tian⁴, LIU Wei⁴,
WU Shang-wei⁵, WANG Wen-qing⁶

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Southwest University of Science and Technology, Mianyang, Sichuan 621010, China; 2. Key Laboratory of Shock and Vibration of Engineering Materials and Structures of Sichuan Province, Mianyang, Sichuan 621010, China; 3. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 4. Key Laboratory on Geological Disposal of High-Level Radioactive Waste of China National Nuclear Corporation, China Institute for Radiation Protection, Taiyuan, Shanxi 030006, China; 5. College of Resources and Environment Science, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 6. Southern China Branch of CCCC Tunnel Engineering Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510000, China)

Abstract: Natural Na-bentonite, from Gaomiaozi (GMZ), Inner Mongolia, was tested to study the long-term stability of buffer/backfilling material for high-level radioactive waste geological disposal. This paper analyzed the effects of γ -rays irradiation on the strength and deformation characteristics of densely compacted Na-bentonite sample. The bentonite was irradiated by cobalt source at different cumulative irradiation doses in laboratory. The mineral composition changes into some more stable silicate and aluminosilicate minerals after irradiation. Then the triaxial shear test and swelling test show that the stability of the microstructure of montmorillonite decreases, and the shear strength and the peak shear strength of bentonite increase with the irradiation dosage under the same confining pressure, due to the change in the mineral composition. With the increase of confining pressure, the strength trend increases gradually slowly, and the effect of irradiation dose on the strength turns to be weakened. It indicates that the confining pressure inhibits the strength increase of bentonite sample. Due to reduction of montmorillonite after irradiation, the swelling deformation property is weakened. The performance is the decrease of the expansion force, free swelling strain, load swelling strain and other indicators.

收稿日期: 2016-12-21

基金项目: 十三五国家重点研发计划(No. 2017YFC0804600); 四川省科技支撑计划项目(No. 2016GZ0157); 西南科技大学研究生创新基金资助(No. 16ycx078)。

This work was supported by the National Key R&D Program of China during the 13th Five-Year Plan Period (2017YFC0804600), the Supporting Program for Sci & Tech Research of Sichuan Province (2016GZ0157) and the Postgraduate Innovation Fund Project by Southwest University of Science and Technology (16ycx078).

第一作者简介: 刘鹏, 男, 1990年生, 硕士研究生, 主要从事岩土工程与高放废物地质处置方面的研究工作。E-mail: liupeng_luis@163.com

通讯作者: 刘俊新, 男, 1976年生, 博士(后), 教授, 主要从事岩土体工程力学性能及岩土介质密闭性动态评价方面的研究。E-mail: ljx0614@126.com

Keywords: irradiation aging; Na-bentonite; montmorillonite; mechanical strength; swelling property

1 引言

我国于 20 世纪 80 年开始高放废物地质处置选址工作,经多年研究探索,国内外学者们一致认为,膨润土是相对比较合适的高放深地质处置库缓冲/回填材料,并选定内蒙古高庙子膨润土矿床作为我国高放废物处置库缓冲/回填材料的首选矿床^[1]。膨润土作为高放废物深地质处置库一道重要的人工屏障,即缓冲层的基材,它起着化学屏障和机械屏障的双重作用,能够阻止地下水渗流、核素迁移以及支撑废物容器、均匀地层岩体压力^[2]。

膨润土在高压实情况下力学性能与膨胀性能对处置场的长期安全性极为关键,许多学者对此开展了研究。沈珍瑶等^[3]就不同含水率的高压实膨润土的单轴与三轴试验,得到高压实膨润土具一定力学强度和良好的延展性。温志坚^[4]、朱国平^[5]等从不同方面研究了膨润土无侧限单轴抗压强度和弹性模量随含水率、干密度等参数的变化规律。在膨润土膨胀性能研究方面,国内外学者发现,膨润土具有很好的可压缩性和膨胀变形性,能够使得因废物罐变形产生的应力在整个处置库系统内部充分消散。Villar 等^[6]对压实 FEBEX 膨润土的膨胀变形特性进行了研究;Komine 等^[7]研究了荷载条件下击实日本 Kunigel-V1 膨润土试样的膨胀特性。国内也有很多学者进行了类似研究,刘月妙^[8]、叶为民^[9]、牛文杰^[10]和秦冰^[11]等研究了含水率、湿密度以及干密度等因素对压实膨润土的膨胀变形性能的影响。但由于试验研究条件的限制,上述研究并未对核废物近场处置环境下膨润土力学强度和膨胀性能进行系统研究。

在高放处置库近场环境,放射性物质在衰变过程中辐射出 α 、 β 、 γ 射线,对缓冲/回填材料性能会产生影响。国外很多学者曾对辐照后膨润土的离子交换能力、吸附性以及膨胀性能进行了研究^[12-13],而国内由于实验室对处置库进场环境模拟条件的制约,关于辐照对膨润土的影响方面的研究相对较少。刘伟等^[14]对高庙子钠基膨润土辐照后的吸附性和稳定性能进行了初步研究,但未分析辐照对压实膨润土的力学强度和膨胀变形性的影响。膨润土作为高放废物深地质处置库重要的缓冲/回填材料,起着支撑废物容器、均匀地层岩体压力的作用,从处置场的长期安全性考虑,需要开展模拟压实膨润土近场辐照后力学强度和膨胀变形特性研究。

通过模拟处置库近场强辐射环境,对高庙子

(GMZ) 压实天然钠基膨润土进行不同强度的辐照处理,通过 X 射线衍射试验并对辐照前后矿物成分变化进行对比分析,同时开展三轴剪切和膨胀性能试验,对膨润土的力学强度变化和膨胀变形特性演变规律展开了研究。研究结果可以为辐照作用对天然钠基膨润土的膨胀性能的影响提供必要参数,也为深地质处置缓冲/回填材料的比对、选择及加工等提供重要的技术数据。

2 试验概述

2.1 试验材料

材料为内蒙古兴和县高庙子天然钠基膨润土,经干燥、粉碎后制得的粒度小于 0.074 mm(200 目),表观密度为 0.46 g/cm³ 的白色粉末,采用甘肃北山地区地下水调节其含水率约为 17%。

表 1 高庙子钠基膨润土物理性质参数

Table 1 Physical properties of GMZ Na-bentonite

颗粒组成 /mm	含水率 /%	土体的相 对密度	干密度 /(g/cm ³)	液限 /%	塑限 /%
<0.075	17	2.65	1.7	86.5	28.5

2.2 样品制备与老化

为满足试验需压制标准三轴试样和膨胀试样,制样前先采用冷冻混合法配置得到含水率为 17% 的膨润土粉末,然后按照干密度为 1.7 g/cm³ 计算每种样品所需膨润土的质量,采用手动液压式压力机制成试验样品,得到 $\phi 39.1$ mm \times 80 mm 三轴试样和 $\phi 61.8$ mm \times 20 mm 膨胀力试样(见图 1)。



(a) 三轴试样

(b) 膨胀力试样

图 1 试样图片

Fig.1 Sample image

将制备完成的三轴和膨胀试样用锡箔纸包裹(保持样品含水率)密封完好,放入密闭辐照容器内(尺寸 $\phi 130$ mm \times 360 mm,壁厚不大于 2 mm),然后在钴源房内进行 γ 辐照老化(中辐院完成)。辐

照累积剂量分别为 0.5、1.0、1.5、2.0、2.5、3.0 MGy，每种剂量样品包括 12 个三轴样品和 12 个膨胀样品，合计 144 个，同时制备一组不加辐照的对照组三轴与膨胀试样各 12 个。



图 2 包锡箔纸试样

Fig.2 Foil package samples

辐照结束后取出试样并称量计算含水率为 16.4%~17.3%。为了更好地探究辐照对天然钠基膨润土的影响，利用 D8 Advance X 射线衍射仪对辐照前后的膨润土试样进行了矿物成分分析。采用 SJ-A.G 型轻型应变控制式三轴仪，分别进行了围压为 0、300、600、900 kPa 的三轴剪切试验，每级围压下进行 3 个平行样试验，试验时采用变形控制，剪切应变速率为 0.08 mm/min，考虑到土体为非饱和且土且密实程度较高，在设定围压作用下的固结变形很小，所以在本次试验过程中采用不固结不排水试验。膨胀试验所用的装置为固结仪，采用平衡荷重法开展膨胀力试验；采用了 0、400、800、1 600 kPa 的荷载作用下有侧限膨胀的方法开展膨胀率试验，试验仪器均依托于中国科学院武汉岩土力学研究所。

3 X 衍射结果与分析

如图 3 所示为经过 X 射线衍射仪测得各辐照剂量下的衍射图谱对比图。从图中可以看出，未经辐照的膨润土试样蒙脱石衍射峰较为明显，经辐照处理后各衍射图谱峰位都有不同程度的下降，且峰值位置向后推移，根据试验原理中布拉格定律公式为

$$d = \frac{n\lambda}{\sin \theta} \quad (1)$$

式中： d 为平行原子平面的间距； n 为反射级数； λ 为入射波波长； θ 为入射光与晶面之夹角^[15]。从上述公式关系可以发现，随着衍射角的增大，衍射峰的 d 值变小，蒙脱石衍射峰值降低且最高峰值位置向后推移，峰面积减小，蒙脱石含量降低，同时发

现，伊利石峰值对应峰面积少量增大，伊利石含量增大。

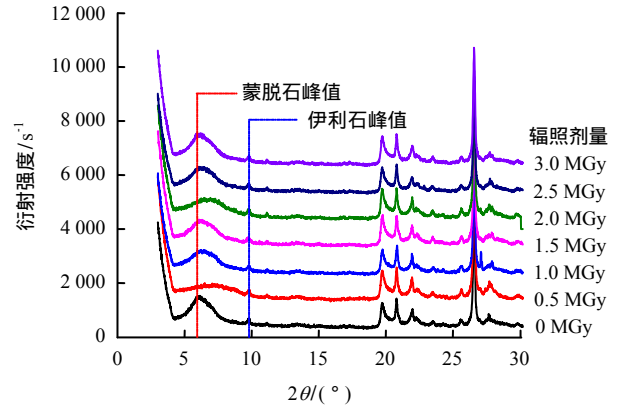


图 3 矿物成分分析衍射图谱

Fig.3 Diffraction pattern of mineral composition analysis

根据试验衍射图谱计算得到蒙脱石辐照前、后各矿物成分的含量（见表 2），结果表明，在未经辐照时蒙脱石含量在 40%以上，经过辐照之后蒙脱石含量都有不同程度的减少，同时其他矿物成分，如伊利石、钠长石等都有一定增加。杨仲田等^[16]在研究膨润土稳定性时就发现，在辐照条件下蒙脱石有向伊利石转化的趋势。本文研究结果与其一致。

表 2 辐照前、后天然钠基膨润土矿物成分含量统计表（单位：%）

Table 2 Statistical table of mineral composition content of modified sodium Na-bentonite before and after irradiation (unit: %)

剂量/MGy	蒙脱石	钠长石	石英	斜长石	斜发沸石	伊利石
0.0	43.07	10.11	27.50	8.15	5.53	5.63
0.5	35.73	17.41	15.09	13.74	3.66	14.37
1.0	33.29	13.97	22.67	13.11	2.83	14.14
1.5	35.25	11.76	30.15	11.32	3.30	8.22
2.0	25.24	14.59	31.66	12.56	3.67	12.30
2.5	32.72	14.13	30.04	8.94	3.26	10.92
3.0	33.54	11.59	28.21	16.59	3.39	6.67

对比分析可以发现，蒙脱石微观结构发生了一定变化。从试验衍射图谱中衍射峰位置和矿物成分的变化可以看出，在辐照之后膨润土中蒙脱石含量减小，并向其他矿物成分发生了转化。其原因是辐照作用释放出大量能量，使得膨润土中蒙脱石结构发生了变化。蒙脱石本身是硅酸盐的产物，在碱性试验环境条件下膨润土经过长时间辐照作用，部分层间水（多于两层的）吸收辐照能分解出^[17]，造成了某些层间塌陷，并产生了还原性物质，导致了晶格的重新排列和碱性阳离子的吸附，从而引起蒙脱石主层电荷的改变，形成蒙脱石-伊利石混层矿物，进而转变为更加稳定的硅酸盐和硅铝酸盐类弱

膨胀性矿物，如伊利石、绿泥石、石英、云母和沸石等。

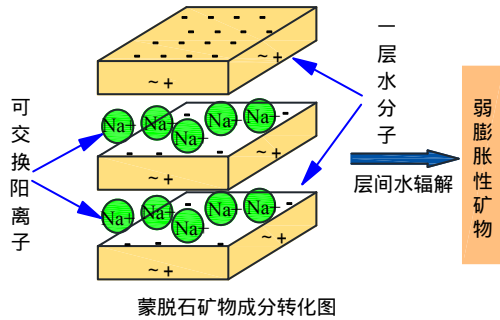


图4 矿物成分结构转化图

Fig.4 Transformation of mineral composition

4 三轴试验结果与分析

4.1 膨润土应力-应变关系

图5为未经辐照的钠基膨润土三轴试样的轴向应力-应变关系曲线。可以看出，不同围压条件下曲线达到强度峰值之前均有不同程度的弹性阶段和屈服阶段，且随着围压的增大，到达强度峰值，此时的轴向应变也相对增大；围压为0、300 kPa下，强度峰值后出现应力跌落，曲线表现出典型的应变软化；随着轴向应变的增加形成明显的台阶，进入残余塑性阶段；而围压为600 kPa时，虽然到达强度峰值后曲线有所下降，但下降速率相对较低，曲线软化阶段逐渐消失，当围压增大到900 kPa时，软化阶段基本消失，曲线趋于平缓，塑性阶段凸显，表现为应变硬化。

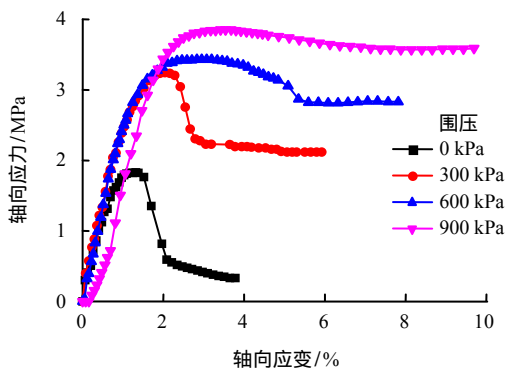


图5 不同围压下对照组膨润土轴向应力-应变关系曲线

Fig.5 Axial stress-strain curves of control group of bentonite under various confining pressures

从试验后试样破坏形态看（见图6），围压为0 kPa呈现典型的张拉破坏特征，表现为脆性破坏，随着围压增大到300 kPa和600 kPa，试样破坏形态开始变为单一的剪切破坏，到围压为900 kPa时，

试验呈“V”网型鼓胀破坏。压实改性膨润土峰值强度总体随围压的增大而增大，压密阶段也随围压的增大变得更加明显，峰值强度点向后推移，残余强度逐渐增大，峰后曲线斜率（即软化模量）逐渐增大，坡度变缓，表现出压实天然钠基膨润土由脆性向塑性转变的趋势。

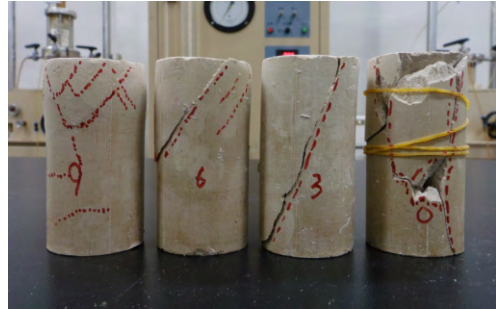


图6 对照组膨润土破坏形态图

Fig.6 Morphology of bentonite in control group

辐照作用后钠基膨润土的应力-应变形态及其随着净围压变化规律总体上与未经辐照的钠基膨润土相似（见图7），但辐射剂量对应力-应变曲线形态也有一定影响。对比发现，辐照后部分曲线在围压为300 kPa时就表现出一定的塑性特性，且屈服显现更加明显，峰值强度也有相应提高。随着辐照剂量的增大，塑性特征不断显现，当围压为600 kPa和900 kPa时曲线都呈应变硬化型，高围压下压实天然钠基膨润土脆性向塑性转变特征尤为明显。

4.2 强度变化对比分析

如图8为蒙脱石和强度随辐照剂量变化的曲线，分析曲线发现，随着辐照剂量的增加，蒙脱石含量有着不同程度的降低，同时峰值强度基本单调增加。说明辐照作用对膨润土力学强度有显著影响。在围压为0 kPa时，对比强度峰值发现，不同剂量作用后试样强度增长幅度分别为28.42%、37.54%、39.95%、46.98%、43.77%、49.45%，基本呈线性增长；同理，对试样施加一定围压后，强度也均呈线性增长，但对比发现，施加围压后强度增长幅度却比围压为0 kPa时要小得多。以辐照剂量3.0 MGy为例，不同围压条件下（0、300、600、900 kPa）强度峰值相比未经过辐照试样强度增长了49.45%、22%、13.62%、13.49%，强度增长的趋势不断减弱，说明施加围压情况下一定程度上抑制了辐照作用对膨润土剪切强度的影响。结合图7应力-应变曲线可以看出，高压时（围压900 kPa）经过辐照的膨润土试样曲线均呈应变硬化型，且辐照剂量对于强度的影响变弱，同时说明辐照条件下，围压在某种程度上对强度的增长有一定抑制作用。

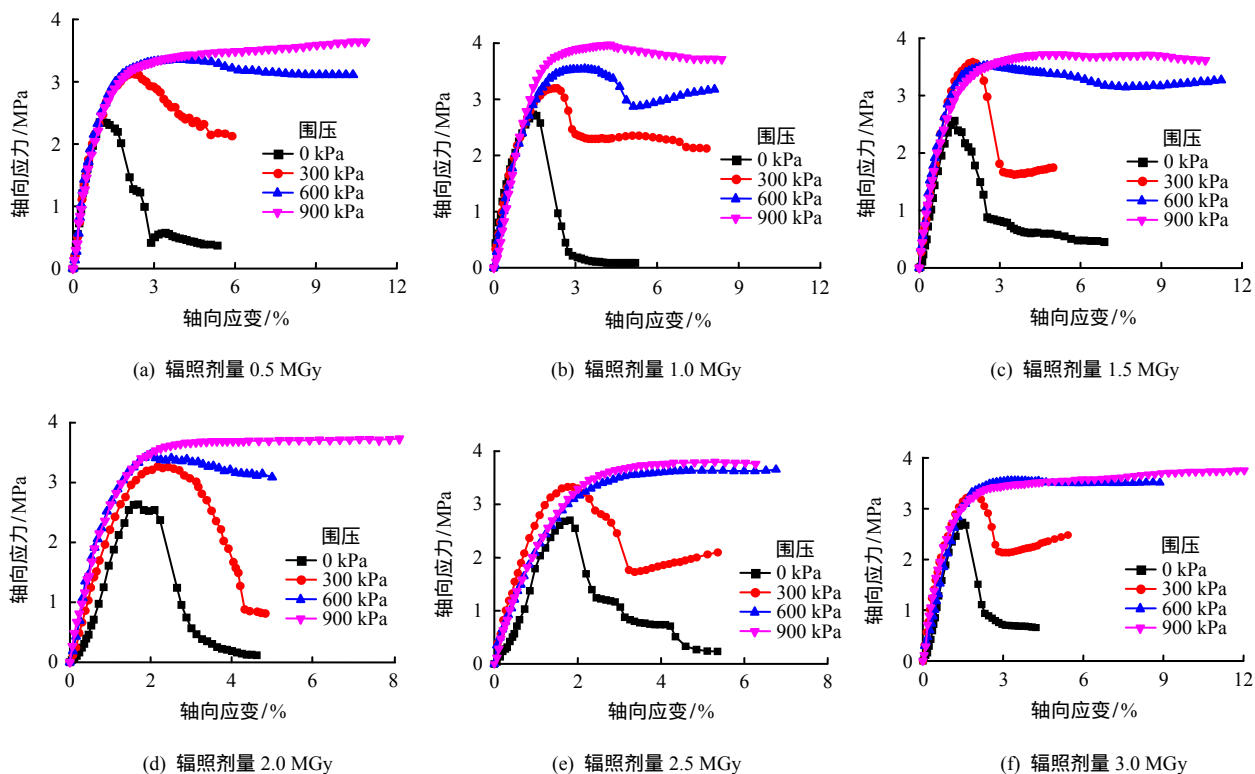


图 7 辐照组膨润土轴向应力-应变关系曲线

Fig.7 Axial stress-strain curves of bentonite in irradiation group

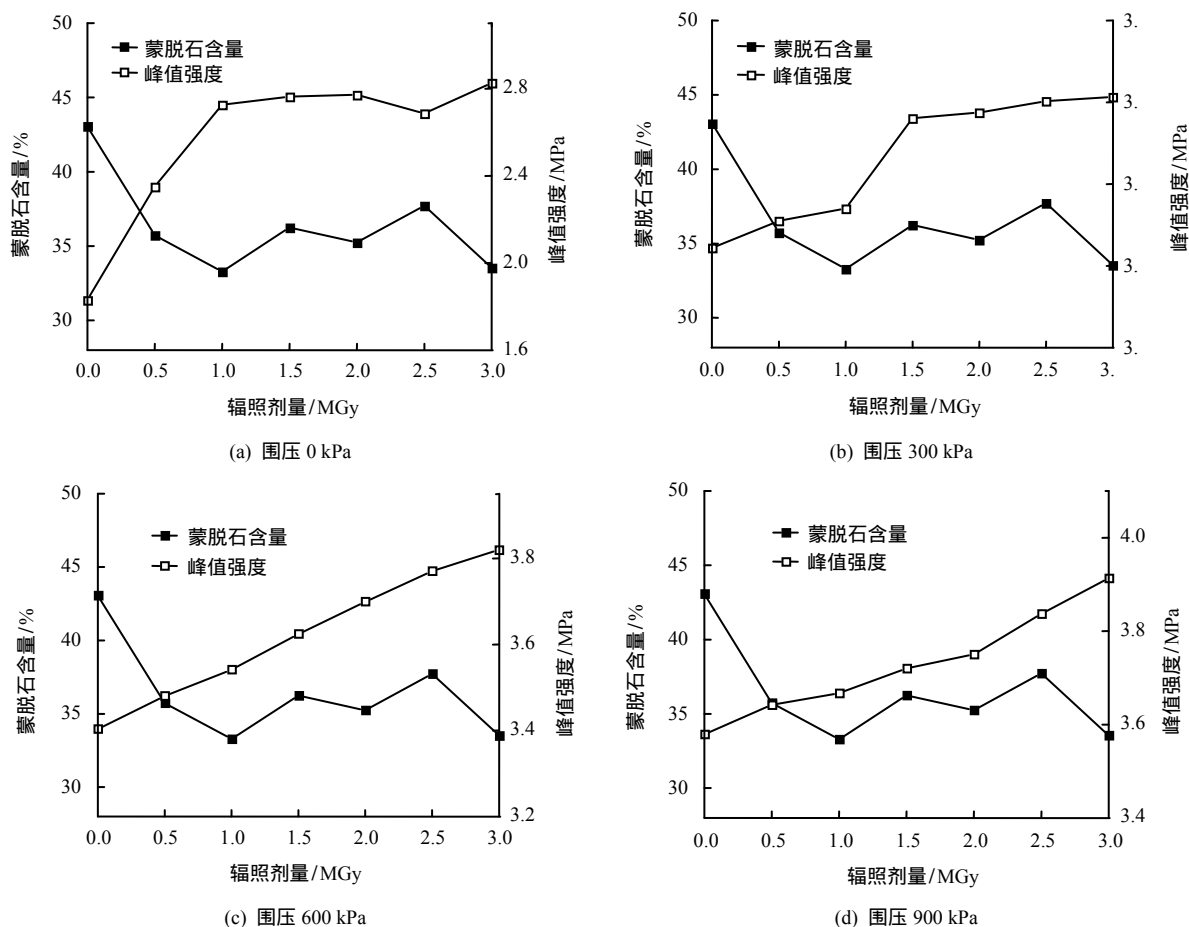


图 8 同等围压下蒙脱石含量与峰值强度随辐照剂量变化关系

Fig.8 Relationships between montmorillonite content and change of peak intensity with irradiation dose

结合 X 衍射试验结果分析,由于辐照作用使得天然钠基膨润土的矿物组成成分在碱性环境下发生了变化,蒙脱石转化为更为稳定的伊利石和蒙脱石混合层、伊利石以及长石等,因此,辐照后的膨润土抗剪强度有所增强。而围压对矿物成分变化的影响具有相对抑制作用,当围压增大到一定程度时,这种矿物成分转变引起的强度变化将会显著降低。

可见,辐照作用对天然钠基膨润土抗剪强度有着不可忽略的影响,且随辐照剂量增大,同等围压下膨润土的剪切峰值强度逐渐提高;特别是在相同辐照条件下,围压较小时,强度增长幅度很大,而围压增大到一定程度时,强度的增长受到围压的抑制作用。

5 膨胀试验与结果分析

辐照作用对天然钠基膨润土膨胀变形的影响,在此只针对竖向膨胀力(以下均称膨胀力)和膨胀变形进行研究探讨,开展的膨胀试验包括膨胀力试验、自由膨胀-压缩和加载膨胀-压缩试验。

5.1 膨胀力试验结果对比分析

试验得到的膨胀力结果如图 9 所示。从图中可以看出,辐照作用后压实天然钠基膨润土的膨胀力整体上呈递减趋势的,说明辐照对膨润土有着不可忽视的作用。辐照剂量为 0 MGy(即未经辐照)时,膨胀力最大为 2.085 MPa,而辐照剂量为 3.0 MGy 时膨胀力最大为 1.37 MPa,辐照后膨胀力减小幅度高达 34.29%。对膨胀力进行拟合得到

$$P = G^2 - 0.423G + 2.025 \quad (2)$$

式中: P 为膨胀力(MPa); G 为辐照剂量(MGy)。

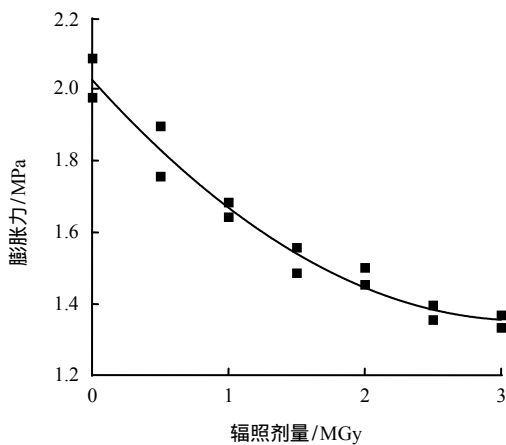


图 9 膨胀力随辐照剂量变化曲线

Fig.9 Curves of swelling power with irradiation dose

分析拟合曲线可以看出,随着辐照强度的增加,

膨胀力逐渐减小,且减小的趋势不断变弱。

5.2 无荷膨胀变形特性分析

不同辐照剂量作用后膨润土无荷膨胀应变随时间的变化规律(即应变曲线)如图 10 所示。由图中未经辐照(0 MGy)曲线可见,无荷条件下压实天然钠基膨润土的应变曲线整体呈指数增长的形态,试验开始阶段,水迅速浸入膨润土中,土的微观结构发生变化,但由于侧向环刀的限制,因此,产生了竖向膨胀。当水分被土体吸收,土的结构趋于稳定时,膨胀力的递增趋势就减缓,直至土体达到饱和。整个过程中,蒙脱石晶层表面和层间阳离子克服层间范德华力和氢键发生水化,形成水合阳离子引起内部体积膨胀,自由水分子不断向黏土粒子-水体系中黏土粒周围聚集,在蒙脱石层间域内形成一层或多层水分子层,引起黏土微粒剧烈膨胀。

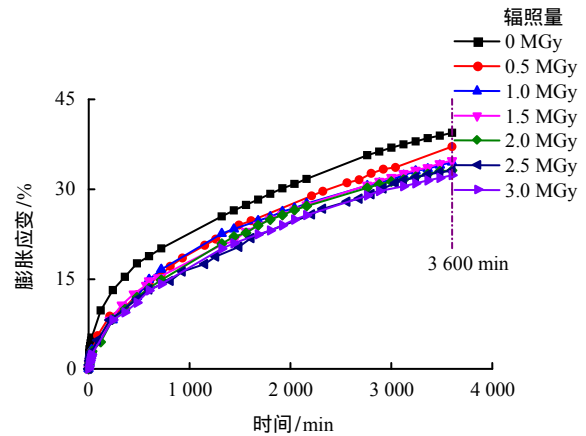


图 10 不同辐照剂量下自由(无荷)膨胀应变-时间曲线
Fig.10 Free expansion strain-time curves under different irradiation doses

对比分析可以得到,辐照后膨润土膨胀应变曲线变化趋势与未辐照曲线基本相同,随时间呈单调增长。随着辐照剂量的增加,相同时间下的膨胀应变有不同程度的降低,且在经过 3 600 min 吸水膨胀后,应变降幅依次为 5.9%、12.51%、11.80%、16.03%、16.12%、17.96%,经剂量 3.0 MGy 辐照后的应变降幅最大。结合图 11 可以看出,随辐照剂量的增加,应变增长的速度逐渐下降,由此可以推断,随着辐照剂量的增加,其对膨胀应变的影响逐渐下降,当辐照剂量增大到一定程度时,膨胀应变将接近一个恒值。

5.3 有荷膨胀变形特性分析

有荷条件下膨润土膨胀应变与辐照剂量的变化关系如图 12 所示,同等上覆荷载下,随着辐照剂量增大,膨润土膨胀应变呈线性减小的关系,可见辐

照老化对膨润土膨胀性能有一定影响，且辐照剂量为 3.0 MGy 时最低。图中直线斜率即为有荷膨胀应变系数，物理意义是膨润土随辐照剂量增加膨胀应变降低率，荷载为 400 kPa 时膨胀系数为 1.0，而荷载为 800 kPa 和 1 600 kPa 时膨胀系数有所降低，分别为 0.43 和 0.54，说明辐照条件下膨胀系数与试验上覆荷载大小有关，而上覆荷载增大，膨胀应变系数将相应减小。

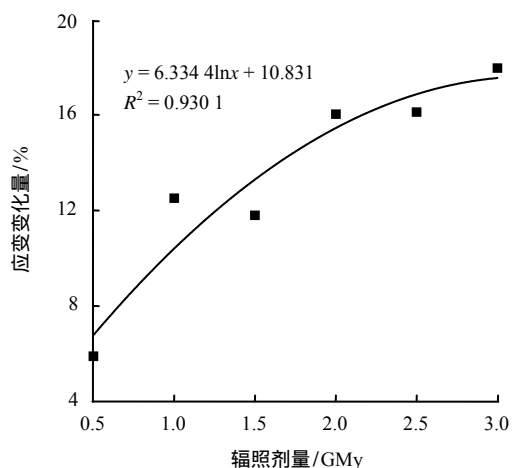


图 11 膨胀应变变化量随辐照剂量变化曲线

Fig.11 Variation of swelling strain with irradiation dose

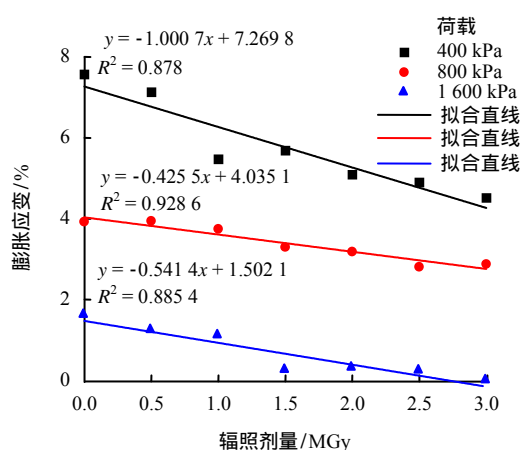


图 12 有荷条件下膨胀应变随辐照剂量变化曲线

Fig.12 Variation of expansion strain with irradiation dose under loading

膨胀力和膨胀应变发生变化的原因有多种，主要由两方面决定：一是土体中含有的具有膨胀性能的黏土矿物蒙脱石晶体自身的吸水膨胀；二是土体颗粒单元之间平均间距的变化^[18]。

分析发现，辐照作用引起了膨润土矿物成分发生了变化，进而影响其膨胀性能。由 X 衍射结果可以发现，相比原始试样蒙脱石 d 值在辐照后有所减小，衍射峰的峰值位置也相对下降，说明辐照引起

了蒙脱石晶体微观结构的变化，使得结晶面层一般的两层水分子层转变为几乎不含水分子层，并向其他更稳定的弱膨胀性硅酸盐类矿物转化，从而导致了膨润土膨胀性能整体降低。

6 结 论

(1) γ 辐照老化作用引起 GMZ 压实天然钠基膨润土部分的矿物成分的转变，膨润土在碱性条件下发生了水化反应，蒙脱石结晶层附近水分子层及主层电荷变化，其向伊利石和蒙脱石混合层、伊利石、绿泥石、云母和沸石等更稳定的硅酸盐类矿物进行了转化。

(2) 辐照作用对膨润土剪切强度有一定程度的影响。主要是辐照作用可改变膨润土中矿物成分，部分蒙脱石转化成相对更稳定的硅酸盐类矿物，辐照后强度相对增大，且等围压下随着辐照剂量的增大强度基本呈线性增长。但随着围压的增大，强度增长速率和增长幅度逐渐变小，发现施加围压在一定程度上抑制了辐照作用对膨润土剪切强度的影响。

(3) 压实天然钠基膨润土膨胀性能在一定辐照作用下会发生变化，这主要是膨润土中有效膨胀矿物成分-蒙脱石在辐照条件下转化为弱膨胀性矿物导致的。随着辐照剂量的增加，膨胀力和膨胀应变均单调递减；相同时间下无荷膨胀应变降低率随辐照剂量增大有降低趋势，推测当辐照剂量增大到一定值时膨胀应变将趋于稳定；有荷膨胀应变与辐照剂量呈线性递减关系，同时膨胀系数与试验上覆荷载有关，上覆荷载一定程度上抑制了辐照对膨胀应变的影响。

参 考 文 献

- [1] WANG Ju, SU Rui, CHEN Wei-ming, et al. Deep geological disposal of high-level radioactive wastes in china[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(4): 649 - 658.
- [2] 刘月妙, 王驹, 曹胜飞, 等. 中国高放废物地质处置缓冲材料大型试验台架和热-水-力-化学耦合性能研究[J]. *岩土力学*, 2013, 34(10): 2756 - 2762.
LIU Yue-miao, WANG Ju, CAO Sheng-fei, et al. A large-scale THMC experiment of buffer material for geological disposal of high level radioactive waste in China[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(10): 2756 - 2762.
- [3] 沈珍瑶, 董威, 李国鼎. 高压实膨润土力学性能研究[J].

- 岩土工程技术, 1998(4): 45 - 46.
- SHEN Zhen-yao, DONG Wei, LI Guo-ding. Study of mechanical properties for high compaction expansive soil[J]. **Geotechnical Engineering Technique**, 1998(4): 45 - 46.
- [4] 温志坚, 神德敬. 高庙子钠基膨润土静力学性能初析[J]. 世界核地质科学, 2005, 22(4): 211 - 214.
- WEN Zhi-jian, JINTOKU Takash. Preliminary study on static mechanical property of GMZ Na-bentonite[J]. **World Nuclear Geoscience**, 2005, 22(4): 211 - 214.
- [5] 朱国平, 刘晓东, 杨婷. 高庙子膨润土三轴剪切力学性能研究[C]//第二届废物地下处置学术研讨会论文集. 北京: 中国原子能出版社, 2008.
- ZHU Guo-ping, LIU Xiao-dong, YANG Ting. The study of three axis shear mechanical properties of Gaomiaozi bentonite[C]//Proceedings of the Second Symposium on Waste Underground Disposal. Beijing: China Atomic Energy Press, 2008.
- [6] VILLAR M V, LLORET A. Influence of temperature on the hydro-mechanical behaviour of a compacted bentonite[J]. **Applied Clay Science**, 2004, 26(1 - 4): 337 - 350.
- [7] KOMINE H, OGATA N. Experimental study on swelling characteristics of compacted bentonite[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1994, 31(4): 478 - 490.
- [8] 刘月妙, 徐国庆, 刘淑芬, 等. 我国高放废物处置库缓冲/回填材料压实膨胀特性研究[J]. 铀矿地质, 2001, 17(1): 44 - 47.
- LIU Yue-miao, XU Guo-qing, LIU Shu-fen, et al. Study on compactibility and swelling property of buffer/backfill material for HLW repository[J]. **Uranium Geology**, 2001, 17(1): 44 - 47.
- [9] 叶为民, SCHANZ T, 钱丽鑫, 等. 高压实高庙子膨润土 GMZ01 的膨胀力特征[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增刊 2): 3861 - 3861.
- YE Wei-min, SCHANZ T, QIAN Li-xin, et al. Characteristics of Swelling Pressure of Densely Compacted Gaomiaozi Bentonite GMZ01[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(Supp.2): 3861 - 3861.
- [10] 牛文杰, 叶为民, 陈宝. 高压实膨润土的非饱和渗透膨胀模型[J]. 岩土力学, 2009, 30(2): 88 - 92.
- NIU Wen-jie, YE Wei-min, CHEN Bao. Experimentally derived model for suction-induced permeability, swell and microstructure behaviour of unsaturated compacted bentonite[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(7): 88 - 92.
- [11] 秦冰, 陈正汉, 刘月妙, 等. 高庙子膨润土的胀缩变形特性及其影响因素研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(7): 1005 - 1010.
- QIN Bing, CHEN Zheng-han, LIU Yue-miao, et al. Swelling-shrinkage behaviour of Gaomiaozi bentonite[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2008, 30(7): 1005 - 1010.
- [12] PENTE A S, GIREESAN P, BAJPAI R K, et al. Heat and radiation induced alterations in sorption and swelling characteristics of bentonite clays from north-west India[C]//International Conference on Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement. Nantes, France: [s. n.], 2010.
- [13] PLÖTZE M, KAHR G, STENGELE R H. Alteration of clay minerals—gamma-irradiation effects on physicochemical properties[J]. **Applied Clay Science**, 2003, 23(23): 195 - 202.
- [14] 刘伟, 梁栋, 赵帅维, 等. 高庙子膨润土在电子辐照和高温老化后热稳定性研究[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2014, 32(5): 59 - 64.
- LIU Wei, LIANG Dong, ZHAO Shuai-wei, et al. Investigation on thermal stability of Gaomiaozi bentonite using electron beam irradiation and high temperature aging technique[J]. **Journal of Radiation Research and Radiation Processing**, 2014, 32(5): 59 - 64.
- [15] 谭罗荣. 孔令伟. 特殊岩土工程地质学[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- TAN Luo-rong, KONG Ling-wei. Special geotechnical engineering geology[M]. Beijing: Science Press, 2006.
- [16] 杨仲田, 梁栋, 刘伟. 高庙子天然钙基膨润土和改性钠基膨润土的热和辐射稳定性[J]. 化工新型材料, 2013, 41(4): 112 - 113.
- YANG Zhong-tian, LIANG Dong, LIU Wei. Stability of GMZ natural Ca-bentonite and modified Na-bentonite under thermal and electron irradiation aging[J]. **New Chemical Materials**, 2013, 41(4): 112 - 113.
- [17] 叶为民, 黄伟, 陈宝, 等. 双电层理论与高庙子膨润土的体变特征[J]. 岩土力学, 2009, 30(7): 1899 - 1903.
- YE Wei-min, HUANG Wei, CHEN Bao, et al. Diffuse double layer theory and volume change behavior of densely compacted Gaomiaozi bentonite[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(7): 1899 - 1903.
- [18] HOLMBOE M, NORRFORS K K, JONSSON M, et al. Effect of γ -radiation on radionuclide retention in compacted bentonite[J]. **Radiation Physics and Chemistry**, 2011, 80(12): 1371 - 1377.