

膨润土复合土工垫 在防渗工程中的应用

APPLICATION OF BENTONITE GEOCOMPOSITE MAT
IN IMPERMEABLE PROJECT

周春生 史海滨 于 健 著

中国环境科学出版社

膨润土复合土工垫在防渗 工程中的应用

周春生 史海滨 于 健 著

中国环境科学出版社·北京

图书在版编目(CIP)数据

膨润土复合土工垫在防渗工程中的应用/周春生, 史海滨, 于健著. —北京: 中国环境科学出版社, 2012.12

ISBN 978-7-5111-1197-5

I. ①澎… II. ①周…②史…③于… III. ①膨润土—复合土工膜—防渗材料—研究 IV. ①TV443

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 264332 号

责任编辑 孟亚莉
文字编辑 谷妍妍
责任校对 唐丽虹
封面设计 金 喆

出版发行 中国环境科学出版社
(100062 北京市东城区广渠门内大街 16 号)
网 址: <http://www.cesp.com.cn>
电子邮箱: bjgl@cesp.com.cn
联系电话: 010-67112765 (编辑管理部)
发行热线: 010-67125803, 010-67113405 (传真)
印装质量热线: 010-67113404

印 刷 北京中科印刷有限公司
经 销 各地新华书店
版 次 2012 年 12 月第 1 版
印 次 2012 年 12 月第 1 次印刷
开 本 880×1230 1/32
印 张 7.5
字 数 200 千字
定 价 38.00 元

【版权所有。未经许可, 请勿翻印、转载, 违者必究】

前 言

随着全球水资源危机的加剧，合理利用水资源引起了世界各国的关注。现在很多工程项目都需作防渗处理，如渠道、垃圾填埋场、人工湖、地铁、飞机场及高速公路等。在解决水资源危机的对策中，重要的是节约用水，提高水的利用率。中国工程院《中国可持续发展水资源战略的研究》中指出：“农业用水要从传统的粗放型灌溉农业向节水高效的现代灌溉农业战略目标转变，工程节水是十分重要的环节。”采用渠道防渗技术，可减少 70%~90% 的渗漏损失，同时防止土壤盐渍化，有利于改善生态环境和农业现代化建设。

内蒙古地处中国的西北部，内蒙古河套灌区是我国三大灌区之一，也是最大的一首制自流灌区，是国家和内蒙古自治区重要的商品粮、油、糖生产基地。该地区属于干旱、半干旱地区，地下水位较高，土壤盐渍化严重，气候、水文地质、土壤等方面在北方平原区均具有典型特征。河套灌区地处季节冻土区，目前的渠道衬砌方式存在使用寿命短、抗冻融性能差、施工工期长、费用高等诸多难点，因此研究膨润土防水毯（Geosynthetic Clay Liner, GCL）在该地区的适用性有重要意义。GCL 是在压实性黏土衬垫（Compacted Clay Liner）的基础上发展而来，是一种新型的土工合成材料，广泛应用于诸多领域。

作者基于 GCL 研究最新成果，依托博士论文“寒旱区 GCL 防渗性能研究及相关机理分析”开展了一系列基于 GCL 在寒旱区用于渠道防渗的适用性研究。针对不同水质特点，开展了膨润土水化膨胀特性过程的系统研究，探明了不同电解质溶液对膨润土水化膨胀特性的变化规律及冻融作用对 GCL 物理力学性质影响的变化规律，具有一定的创新性，为 GCL 在当地的应用提供了理论依据；探明 GCL 合成材料的应力变化曲线及其形变规律，提出了描述该变化过

程的高斯双峰数学模型,探求了不同环境影响因素对材料力学性质的作用特征,可为 GCL 的实际应用提供指导;基于 X 荧光光谱技术分析膨润土的结晶度及结构特征,探讨了电解质、冻融交替等过程对膨润土孔隙结构的作用特征与影响规律。本成果在灌区渠道防渗研究中具有一定的理论意义和应用价值。

本书可供水利、农学、岩土、土壤学专业的本科生、研究生以及从事相关行业的科研、教学和工程技术人员参考。由于书中涉及水利学、土壤学、矿物学、胶体化学、物理化学、流体力学、表面化学等多学科交叉内容,存在缺点与错误在所难免,恳请有关专家与读者批评指正。

周春生
2013 年 2 月于呼和浩特

摘 要

随着水资源供需矛盾的加剧,节约利用水资源引起了各行业的高度重视,农业是用水大户,实施节水灌溉工程势在必行,其中渠道衬砌防渗工程以其施工简单、造价低等优点,得到了广泛的推广与应用。我国西北地区干旱、寒冷、盐渍化严重,渠道防渗材料的选择受到一定的限制,目前该地区渠道衬砌的主要材料为混凝土板,存在费用高、抗冻胀性能差、施工工期长、衬砌失效后固体废弃物污染环境等一系列突出问题,因此筛选新型防渗衬砌新材料是当前灌区面临的重要问题,其研究具有重要的实用价值及现实意义。

本书通过室内实验和工程现场试验对复合土工膨润土垫(Geosynthetic Clay Liner, GCL)在寒旱盐渍化地区的防渗特性及相关机理进行如下研究:①测试 GCL 基本特性,结合研究区特点及 GCL 产地进行了试样筛选;②探讨了膨润土在不同电解质溶液中的膨胀特性、流变性、黏度、滤失量;③冻融循环及离子双因素耦合作用对膨润土特性及 GCL 防渗性能影响;④进行了高温、低温、高低温循环、紫外线照射、水泥砂浆浸泡、工程现场老化实验,分析 GCL 的力学性能变化;⑤用微观方法研究了膨润土的结构,通过微观结构参数(水力半径、形态指标、表面分维、孔隙率)分析膨润土结构变化。得到以下有价值的结论和成果:

(1)膨润土的水化过程是分阶段进行的,电解质类型及浓度对膨润土特性有显著影响,膨润土自由膨胀体积、膨胀后的含水率、滤失量与水化液中离子浓度、化合价呈负相关,滤饼厚度、渗透系数则相反,呈正相关;水化液为黄河水时,悬浮体剪切应力增加,触变性降低。切应力的大小与膨润土颗粒分散度、细小颗粒含量呈正相关,与水化液电解质浓度呈负相关。

(2)冻融循环改变膨润土颗粒结合方式,导致黏结性降低,分

散性增强,自由膨胀体积、膨胀后的含水量、剪切应力增加,滤失量、滤饼厚度降低;水化液为蒸馏水、黄河水时,31次冻融循环后自由膨胀体积均值增加了17.8%、32.8%。含水率均值增加了9.3%、16.8%,EC值增加了32.7%、24.9%,剪切应力增加了38.0%、37.1%;滤失量均值降低了24.3%、23.4%;滤饼厚度降低了19.4%、15.4%。渗透系数约增加了1个数量级,但仍较小,仅为衬砌前渠床土壤渗透率的0.35%~0.72%。渗出过程中有膨润土颗粒滤出,滤出液EC值降低了55.3%、48.0%。

(3) GCL 应力—应变曲线呈“M”形,有两个屈服点,分四个阶段:下层织物弹性非线性变形阶段;下层织物极限断裂阶段;上层织物弹性非线性变形阶段以及极限断裂阶段。高温、低温、高一低温循环、温度—湿度耦合、紫外线照射、水泥砂浆浸泡均导致GCL的力学性能降低,影响较大的因素为高温和紫外线照射。工程现场试验表明,试验第1年力学性能降低幅度较大,随着泥沙淤积形成覆盖层,老化速度降低。

(4) GCL 应力—应变关系可用高斯双峰拟合得到的本构方程描述,经检验,有较好的相关性。其系数与不同老化因素呈指数、对数关系,使用年限预测结果表明,30年后其残余应力值可达到30%。

(5) X 荧光光谱分析结果表明:试样有良好的结晶度及层状结构,膨润土的主要成分为 SiO_2 。黄河水水化冻融后金属氧化物的含量略有增加。膨润土 SEM 图像表明:电解质浓度及冻融循环影响膨润土孔隙分布、孔隙表面特征及孔隙的大小,可以通过膨润土微观结构的孔隙表面分维、孔隙率、水力半径和形态等微观结构参数描述。试样水力半径在 $33.18\sim 372.11\mu\text{m}$;孔隙率在 $6.21\%\sim 69.69\%$,表面分维在 $1.18\sim 1.22$,形态指标在 $0.05\sim 0.52$,孔隙主要以不规则板状孔隙结构为主。工程现场试验2年后膨润土孔隙率增加。

(6) 根据研究成果结合试验区特殊环境,提出了GCL在类似地区应用的工程措施。

关键词: 膨润土; 膨胀特性; GCL; 力学性能; 冻融循环; 微观结构

ABSTRACT

With the intensification of supply and demand of water resources, conservation of water resources were caused great importance by various industries. It has great potential to construction to water (seepage canal lining) for agricultural water users. In the northwest of China, the special conditions of drought, cold, salinity severely restricts the application of ordinary impermeable material in the area. At present, in the region the main material for channel lining is concrete slab. But it has high cost, poor performance against frost, construction period long, solid waste after the refractory lining failure caused by environmental and other outstanding series of problems. It is an important issue facing the current irrigated area to filtrate new impervious lining materials.

The following seepage properties and related mechanism was researched in the paper through the laboratory and field examination to GCL in cold, arid and saline areas: (1) The basic characteristics of GCL, fall together research region's status and GCL's producing area make sample selected; (2) The properties of bentonite in different electrolyte solution were researched including expansion properties, rheological characteristics, viscosity and filtration; (3) The effect of freezing and thawing cycle and ion double factors coupling on bentonite properties and GCL anti-seepage permeability; (4) Through the experiments of high temperature, low temperature, and high low temperature cycling, UV rays, soaking the cement mortar and construction site aging experiment, analyzed the changes of GCL's

mechanical properties; (5) The microstructure of bentonite was analyzed by microscopic methods, and micro-structural parameters (hydraulic radius, shape index, surface fractal dimension, porosity) reflected the structure's changes of bentonite, to explain GCL impervious performance change mechanism. Through the above study, the valuable conclusions and results are as follows:

(1) Bentonite hydration process is carried out in stages; the type and concentration of electrolyte solution have significant impact on the properties of bentonite. Bentonite free expansion volume, post-expansion water content, filtration and the concentration of the ions in hydration fluid were negatively correlated. Filter cake thickness and permeability coefficient were positive correlation; Bentonite suspension body rheological research shows: system thixotropic loop was anti-clockwise and it was negative thixotropy; When hydration solution was Yellow River water, the suspension shear stress increased and thixotropy decreased. Shear stress of bentonite was positively correlated with particle size and dispersion, and it was negatively correlated with the hydration liquid electrolyte concentrations.

(2) The freeze-thaw cycles changed the connection ways of bentonite particles, Led to adhesion and filtration decreased, and dispersion enhance, free swelling volume, post-expansion water content, shear stress increased; Filtration and the cake thickness decreases; When hydration solution was distilled water and the Yellow River water, the free expansion volume average respectively increased 17.8%, 32.8% after 31 freeze-thaw cycles. Moisture content increased 9.3%, 16.8%, EC value increased 32.7%, 24.9%, shear stress increased 38.0%, 37.1%; Filtration average had reduced 24.3%, 23.4%; Cake thickness decreased 19.4%, 15.4%. Permeability coefficient increased about 1 order of magnitude, but the permeability coefficient was still little. It was 0.35% ~ 0.72% that before the canal lining of soil

penetration. Bentonite particles filtered out in the process of exudation, and the filtrate EC value decreased 55.3%, 48.0%.

(3) GCL stress - strain curve was “M” type, and it had two yield points in four phases: The lower stage of nonlinear deformation of elastic polyacrylamide; The lower limit of fracture stage polyacrylamide; upper polyester or polyethylene co-host of nonlinear elastic deformation stage; Polyester or polyethylene film limit fracture stage. High temperature, low temperature, high-low temperature cycling, coupling temperature and humidity, ultraviolet radiation, soaking cement could decrease mechanical properties of GCL, especially the factors of high temperature and ultraviolet radiation. Field experiments showed that the mechanical properties of the first year decreased obviously, and the aging rate decreased with the layer sediment covering.

(4) GCL stress - strain relations could be obtained by fitting Gaussian peaks to the constitutive equation. the result had shown a good correlation. The coefficient had shown an exponential and logarithmic relationship with different aging factors. The service life prediction results showed that the value of the residual stress can reach 30% after 30 years.

(5) The X fluorescence spectroscopy results showed that the samples had a good crystallinity and layered structure, and the main component of bentonite were SiO_2 . When hydration solution was the Yellow River water, the metal oxide content slightly increased with freezing and thawing cycles increased after freeze-thaw. Bentonite SEM images showed that the changes of hydration fluid and electrolyte concentration, freeze-thaw cycles had some influence on bentonite pore distribution. The pore surface characteristics and pore size. The microstructure parameters could be described by pore surface dimension, porosity, hydraulic radius and shape of bentonite microstructure. Hydraulic radius of the selected bentonite sample was

between 33.18 and 372.11 μm . Porosity was between 6.21% and 69.69%. The surface fractal dimension was between 1.18 and 1.22, morphological index was between 0.05 and 0.52, and pore was mainly irregular. Microstructure of bentonite showed that the gap will increase after 2 years' field experiments.

(6) Combining with the research results and situation of test area, the measures of GCL engineering application were raised in the similar regions.

Key Words: Bentonite; Expansion characteristics; Geosynthetic Clay Liner; Mechanical properties; Freeze-thaw cycles; Microstructure

目 录

第 1 章 引 言.....	1
1.1 研究背景及意义.....	1
1.2 GCL 简介.....	3
1.3 膨润土特性.....	8
1.4 国内外研究现状.....	10
1.5 研究内容及技术路线.....	25
第 2 章 实验材料基本特性.....	29
2.1 实验材料结构.....	29
2.2 试样筛选.....	32
2.3 膨润土性能测试.....	37
2.4 GCL 力学性能测试.....	51
2.5 GCL 愈合能力测试.....	54
2.6 小结.....	59
第 3 章 电解质对 GCL 特性影响.....	61
3.1 膨润土水化理论.....	62
3.2 实验方法.....	64
3.3 实验结果分析.....	76
3.4 小结.....	113
第 4 章 冻融作用对膨润土特性影响.....	115
4.1 研究区概况.....	115
4.2 冻胀土体结构影响.....	116
4.3 实验方法.....	117

4.4	结果分析.....	119
4.5	小结.....	143
第 5 章	GCL 力学性能研究.....	145
5.1	土工织物老化研究方法.....	146
5.2	实验材料与方法.....	148
5.3	实验结果分析.....	152
5.4	GCL 本构模型分析.....	168
5.5	小结.....	174
第 6 章	膨润土微观结构分析.....	177
6.1	实验材料与方法.....	178
6.2	结果分析.....	182
6.3	小结.....	201
第 7 章	结论与展望.....	202
7.1	结论.....	202
7.2	展望.....	205
参考文献		207
后 记		223

第 1 章

引 言

1.1 研究背景及意义

随着全球淡水资源危机的加剧，合理利用水资源引起了世界各国的高度重视，在解决水资源危机的对策中，除扩大水源外，更重要的是节约用水，提高水的利用率。中国工程院《中国可持续发展水资源战略的研究》中指出：“农业用水要从传统的粗放型灌溉农业向节水高效的现代灌溉农业战略目标转变，工程节水是十分重要的环节。”我国是一个水资源相对贫乏的国家，虽然水资源总量为 2.81 万亿 m^3 ，居世界第 6 位，人均水资源占有量却仅为 2 097 m^3 ，不足世界人均水平的 1/4，居世界 109 位^[1]。随着人口压力的增大，工业化进程的加速，工业、生活用水激增，水资源占有与分配更加不均匀，致使用水大户农业用水更加紧张，我国农业年用水总量约占全国总用水量的 2/3，农田灌溉用水量占农业总用水量的 90%以上，占全国总用水量的 64%^[2]，因此农业节水是节水的核心。目前我国已

建成的渠道防渗工程约 55 万 km，仅占渠道总长的 18%，80%以上的渠道工程没有做防渗处理，我国 80%以上的灌溉面积依靠渠道输水灌溉，有效灌溉面积接近 0.47 亿 hm^2 。而渠系水利用系数平均不到 0.5，有一半以上的灌溉水量在渠道输水工程中损失掉，每年因渠道输水渗漏损失的水量为我国总用水量的 1/3，为农业总用水量的 45%。因此，渠道防渗在灌溉节水中具有举足轻重的作用，采用渠道防渗技术后，可减少渗漏损失的 70%~90%，极大地提高渠系水利用系数，缓解农业用水矛盾。若提高我国渠系水利用系数，每年可节约大量用水量，渠道衬砌节水效益显著^[3]。

我国所处的地理位置特殊，自然来水和径流在空间分布不均匀，形成地区之间水资源丰枯悬殊。例如，内蒙古属于干旱半干旱少水带，径流深小于 100 mm。气温低且气候干燥，年降水量在 400 mm 以下，全年降水日少于 70 d，且与绝大多数作物的需水期之间耦合程度差，成为我国缺水较为严重的地区。特殊的地理位置，量少而集中的雨水，严重影响着农作物的生长，因此节约用水是必然的选择。

随着黄河流域用水量逐年增加，供需矛盾日趋尖锐，国家对黄河用水量实行严格限制，内蒙古河套灌区水量分配指标为 40 亿 m^3 ，按照当时河套灌区的引水量，减少了 10 亿 m^3 左右。黄河内蒙古河套灌区是我国 3 大灌区之一，也是最大的一首制自流灌区，是国家和内蒙古自治区重要的商品粮、油、糖生产基地。河套灌区总土地面积 118.9 万 hm^2 ，引黄灌溉面积 57.4 万 hm^2 ，灌区共有总干渠、分干渠、支渠、斗渠、农渠等七级固定渠道 8 365 条，渠道总长度为 1.45 万 km，灌区的输水渠道距离长、级别多，输水过程中损失水量较大^[4]。一方面农业缺水，另一方面用水浪费现象又普遍存在，因此大力普及推广渠道衬砌节水技术，提高灌溉水的利用率和利用效率是进一步改善农业生产条件，加强农业基础设施建设，缓解水资源供需矛盾的有效途径。

内蒙古河套灌区地处干旱、半干旱、半荒漠草原地带，属温带高原型、大陆性气候特征。地下水位较高，土壤盐渍化严重，气候、水文地质、土壤等方面在北方平原区均具有典型特征性。河套灌区

地处季节冻土区,目前骨干渠道衬砌材料主要为混凝土板,由于地下水埋深较浅,渠道衬砌冻胀破坏严重,主要问题有:①抗冻衬砌结构比较复杂,需要设有保温层、防渗膜、垫层和混凝土板4层材料,因而成本较高,每平方米投资70~80元。②采用混凝土板衬砌,施工工序多而复杂,施工工期长。③一般情况下,河套灌区每年4月下旬开始灌溉,10月下旬至11月上旬才结束,灌区全年仅有80d的施工期,故施工期紧张。④由于受冻胀影响,混凝土板容易被破坏,造成管理维护费用高,衬砌失效后固体废弃物难处理,造成环境污染等问题。

针对河套灌区在衬砌中存在的问题,水利部门进行了多年的不同衬砌形式渠道防渗效果与抗冻胀的试验研究,不断尝试使用其他材料与技术^[5, 6],虽然取得一定效果,但仍未能彻底解决抗冻胀与抗盐碱及投资成本等技术问题,至今还很难大面积推广。复合土工膨润土垫是一种天然绿色新型防渗材料,与传统防渗材料相比有较多优势,研究该渠道衬砌新材料在该地区的适用性有重要的意义。

1.2 GCL 简介

膨润土防水毯(Geosynthetic Clay Liner, GCL)是在压实性黏土衬垫(Compacted Clay Liner)的基础上发展而来,是一种新型的土工合成材料。20世纪20年代,膨润土最早以颗粒和粉粒形式用于密封池衬垫和夯实土坝的防渗。1986年,美国在垃圾填埋场双衬里衬垫系统中采用GCL产品——Claymax,当Claymax放在双层垃圾填埋场衬垫系统第一层土工薄膜下面,在渗漏监测系统中发现监测到的渗漏液量大大减少了,Claymax可能是GCL最早的产品^[7]。大约在同一时期,德国出现了另一种GCL产品——Bentofix,它是在两块针刺土工织物之间置放膨润土颗粒,然后用针刺纤维将整个复合物连接在一起。这种最初的针刺GCL产品在20世纪80年代末已经有许多成功的应用,其应用范围有:垃圾填埋场衬垫系统^[8, 9]、运河衬垫系统、油库防漏、飞机场及高速公路的污染防护

等。20 世纪 90 年代, GCL 产品在工程上应用逐渐增多, 人们对 GCL 产品特性的理解也逐渐深刻, 在环保、岩土、钻探、工业、水利工程中的应用也日渐增多。同时, 对 GCL 的研究也逐步深入, 目前, 对 GCL 产品的试验标准也先后出台, 其中美国材料试验协会 (ASTM) 出台 12 项, 国际土工合成材料研究院 (GR) 也出台了相关标准。1996 年国家建筑材料工业局发布了国家建材行业标准《膨润土试验方法》(JC/T 593—1995), 2006 年中国建设部发布《膨润土防水毯建筑工业行业标准》(JG/T 193—2006) 以及国标 GB/T 20973—2007。

GCL 是在两层土工合成材料之间通过针刺缝合或黏合加封一层膨润土颗粒或粉末或其他透水性较小的材料, 形成一种土工复合防渗材料, 有的 GCL 产品只有一层土工膜, 即在土工膜上用水溶性黏合剂黏合一层膨润土^[10]。覆盖层土工织物可以是有纺土工织物, 也可以是无纺土工织物。按其结构组成, 可将 GCL 分为黏合、针刺、缝合等几种形式 (其结构示意图如图 1-1 所示)。上下层土工织物通常是以人工合成的聚合物, 如聚丙烯 (PP)、聚乙烯 (PE)、聚酯 (PET) 等原料。

GCL 是一种天然的环保防渗材料, 近年来在国内外被广泛应用, 与 CCL 相比, GCL 具有以下功能^[11, 12]:

(1) 有较好的自愈合性能。在有效的膨胀范围内, GCL 较小穿孔的破损可以有效地自我愈合。膨润土具有较好膨胀性, 较大的膨胀率, 在上下土工织物及针刺纤维束缚及膨胀应力的作用下, 膨润土向破损处发展, 从而具有自我修复的功能。

(2) GCL 有较好的防渗性能。GCL 产品厚度一般小于 1.0 cm, 但有较小的渗透系数, 一般 GCL 渗透系数值小于 $1.0 \times 10^{-8} \text{ cm/s}$, 所以将该材料用于防渗工程则有较小的开挖量, 同等条件下与 CCL 相比, 节约开挖投资。