

模袋注浆技术中模袋材料力学性能研究

李怀剑^{1,2*}, 孔令弟^{1,2}, 王骁男^{1,2}, 赵松松^{1,2}

¹山东高速集团有限公司建设管理分公司, 山东 济南

²山东高速岚临高速公路有限公司, 山东省临沂市临沭县白旄镇华南社区, 山东 临沂
Email: 1536196815@qq.com,*3044727919@qq.com

收稿日期: 2021年1月24日; 录用日期: 2021年2月16日; 发布日期: 2021年2月25日

摘要

模袋注浆技术因施工简便、处理范围可控、节省材料等优势已广泛应用于多种软土地基处治加固工程中。在该技术中, 模袋材料抗拉性能直接决定了帷幕墙的防渗效果。为研究常用模袋材料的抗拉性能, 本文选择了三种不同模袋材料开展了拉伸强度试验, 得到了不同材料的破坏模式、抗拉强度和伸长率。提出了圆柱形和球形模袋简化力学模型, 并据此分别建立了模袋拉伸强度与内部注浆压力之间的数学关系。研究结果可为相关工程中模袋材料选择和设计计算提供参考。

关键词

模袋注浆, 抗拉强度, 力学模型

Mechanical Property of the Geotextile Bag Used in Bag Grouting Technology

Huajian Li^{1,2*}, Lingdi Kong^{1,2}, Xiaonan Wang^{1,2}, Songsong Zhao^{1,2}

¹Shandong High Speed Group Co., Ltd. Construction Management Branch, Jinan Shandong

²Shandong Expressway Lanlin Expressway Co., Ltd., Liyi Shandong
Email: 1536196815@qq.com,*3044727919@qq.com

Received: Jan. 24th, 2021; accepted: Feb. 16th, 2021; published: Feb. 25th, 2021

Abstract

The bag grouting technology was commonly used in the soft foundation reinforcement because of the advantages of simple construction, controllable grouting and material economy. In the case of

*通讯作者。

the bag grouting, the tensile strength of the mold bag is in direct relation to the seepage prevention effect of the curtain grouting. To investigate the tensile strength of the mold bag, the tensile strength tests were performed by using three different mold bags, by which the failure mechanisms, the tensile strength of mold bag and the elongations were obtained. The functional relations between the tensile strength of mold bag and the grouting pressure were developed based on the proposed mechanical models of the columniform and spherical mold bags. The results of this paper can be used for the selection of mold bag and design of the grouting pressure of bag grouting technology.

Keywords

Bag Grouting, Tensile Strength, Mechanical Model

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

我国矿产资源分布广泛且储量丰富,近年来随着经济的不断发展,各种矿产资源的需求量也在不断攀升。矿产资源持续大量开采的同时,也在地下遗留了大量的采空区。由采空区引起的地表塌陷、坑洞等灾害对交通、水利、建筑等基础设施建设和安全运营带来严重安全隐患[1] [2] [3] [4]。目前,工程上常采用压力注浆技术填充采空区空洞,起到充填裂缝作用和支撑作用,以达到减小地表沉降目的。目前常用的注浆技术包括模袋注浆和袖阀管注浆等[5] [6] [7] [8],与其他技术相比,模袋注浆技术通过导管向模袋内注入浆液并使浆液在模袋内凝固形成结石体,内部含结石体的模袋便可起到帷幕墙或围堰的作用,实现注浆可控的目的。该技术可以缩短充填料凝结时间,有效提高工程的加固处治效果,节省注浆材料,被广泛应用于水利、岩土、矿山等众多工程领域[6] [9] [10] [11]。

模袋注浆技术中土工模袋一般由高分子聚合物纤维编织而成,具有透水不透浆的特点[12],相较于传统的围堰模袋,模袋注浆技术对模袋的性能有更高的要求:1) 帷幕注浆技术中模袋旋转折叠后随钻机下放至钻孔一定深度,为保证模袋的准确定位,对成孔尺寸和质量具有较高要求。一般来说,孔径越大越利于模袋放入,但也容易出现塌孔,成孔质量难以控制。因此,在保证强度和抗渗性能满足要求的前提下模袋厚度不应过大;2) 模袋下放定位后要进行高压注浆充填,随着模袋内注浆量的增加,模袋内部压力也会逐渐增大,因此模袋抗拉强度应大于注浆压力;3) 模袋有着较好的抗拉性能和延展性能,以保证注浆过程中模袋不会脆性开裂。目前学者对于模袋材料的研究主要集中于内部注浆材料配比对整体性质的影响[13] [14] [15],针对不同模袋材料的抗拉性能与延展性能研究较少,且缺少不同模袋材料用于模袋注浆技术中可行性的相关研究。

为研究不同模袋材料的力学性能和延展性,本文选用三种不同材料模袋开展抗拉强度试验,基于力学平衡关系建立圆柱形和球形注浆模袋简化力学模型,推导得出注浆压力与模袋抗拉强度之间的函数关系,用于指导类似工程设计。

2. 模袋抗拉强度试验

2.1. 模袋材料

根据调研,目前常用的模袋材料主要包括压烫土工布、细纺麻布和帆布,各材料参数汇总至下表1中。

Table 1. The commonly used mold bags and material parameters**表 1.** 常用模袋材料及参数

模袋材料类型	每平方米质量(g)	厚度(mm)	渗透效果
压烫土工布	200	1	少量渗浆, 渗水
细纺麻布	332	1	不渗浆, 渗水性差
帆布	488	0.9	不渗浆, 渗水性差

压力注浆过程中土工模袋容易在在缝接处胀裂导致漏浆, 因此本文模袋材料抗拉强度试验包括无缝制材料(原材料)试验和缝制加工材料试验两种。对于缝制加工试验样品, 缝制时采用手提电动缝纫机、209 缝纫线与双层缝制工艺, 两层缝制线距离约为 0.2~0.5 mm, 样品缝制过程和试验样品见下图 1 所示, 图 1(b)中上排为缝制后拉伸试样, 下排为未缝制普通试样。



Figure 1. The sewing process of the geotextile and the samples used in the tensile strength test. (a) The sewing process of the geotextile (b) The test samples

图 1. 模袋材料拉伸强度试验试样。(a) 土工布缝制过程 (b) 拉伸试样

2.2. 试验方法

模袋材料抗拉强度试验方法参考《土工布拉伸试验方法宽条样法》GBT 15788-1995 中推荐方法[16], 两种样品(缝制和未缝制)加持后露出尺寸均为 20 cm (长) × 20 cm (宽), 上下加持宽度均为 10 cm, 每种样品进行三组平行试验, 取平均值作为最终试验结果。试验过程中采用特定夹具夹持样品, 试验加载速度为 20 mm/min。

3. 试验结果与分析

3.1. 荷载 - 位移曲线

3.1.1. 压烫土工布试验结果

对于压烫土工布原料, 在加载过程中土工布逐渐伸长, 中间位置向内侧收缩。随着荷载的进一步增加, 在土工布两边开始出现裂缝并向内侧延伸, 土工布发生局部断裂破坏。而对于缝制压烫土工布, 破坏时土工布裂缝出现在土工布缝制位置处, 随荷载增加由外向内发展, 缝线出现断裂。由于缝线位置处的应力集中, 土工布呈锯齿形破坏。

下图 2(a)和图 2(b)为压烫土工布原料和缝制压烫土工布在抗拔试验中典型荷载 - 位移曲线。可以看出, 在峰前阶段, 随着土工布拉伸长度的增加, 拉伸荷载近似呈线性递增。当拉伸长度达到约 26 mm 时, 拉伸荷载达到峰值点, 随后荷载迅速衰减, 土工布发生破坏, 造成拉伸荷载迅速衰减的主要原因是由于

土工布边裂缝的产生和快速发展。对比图 2(a)和图 2(b)可以看出,压烫土工布原料破坏伸长量和峰值拉拔荷载接近于对应缝制压烫土工布量值,表明土工布缝制连接对压烫土工布抗拔特性和拉伸强度影响较小。

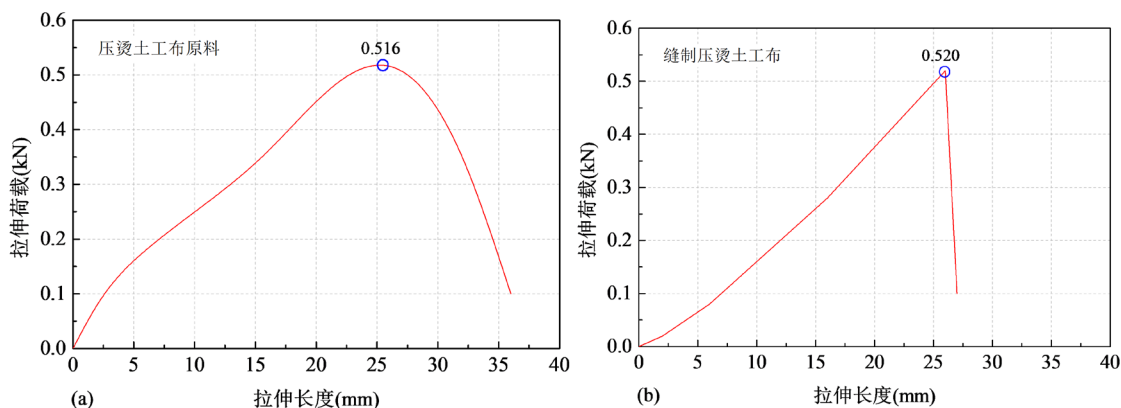


Figure 2. Typical load-displacement curves of the pressing geotextiles

图 2. 典型压烫土工布荷载 - 位移曲线

3.1.2. 细纺麻布试验结果

细纺麻布原料破坏时并未出现明显的贯穿裂缝,而是呈现较为明显的类似于延性破坏特征。具体表现为:细纺麻布原料在拉伸时经历了较大的变形,破坏时整个样品均呈撕裂状但并未产生明显的裂缝和碎布块。与亚麻布原料破坏形式不同,细纺麻布缝制样品破坏时在接缝位置产生贯穿式裂缝,由于缝线位置处在拉伸时易产生应力集中,接缝两侧细纺麻布呈现较为明显的撕裂状态。

图 3 为细纺麻布拉伸试验中得到的两种样品典型荷载 - 位移曲线。在位移初期阶段,拉伸荷载随伸长量增加呈缓慢增长,表明该阶段细纺麻布在荷载作用下主要以拉伸变形为主,其抗拉强度并未充分发挥,因此实测拉伸荷载较小。该阶段荷载 - 位移曲线特征也表明细纺麻布具有较好的延展性。超过该阶段后,细纺麻布抗拉强度开始逐渐发挥,荷载随拉伸量增加迅速增大。当伸长量为 18 mm 左右时,细纺麻布原料达到荷载峰值,为 2.351 kN。而对于缝制细纺麻布,当样品伸长量为 23 mm 时样品破坏,破坏荷载为 0.756 kN,约为细纺麻布原料峰值荷载的 32.1%。因此,对于该类材料,在应用时应着重考虑样品搭接方式和缝制工艺,以提高材料整体抗拉强度。超过峰值荷载后,荷载随拉伸量增加迅速衰减,但并未出现断崖式破坏,表明该材料在破坏后也具有一定延展性。

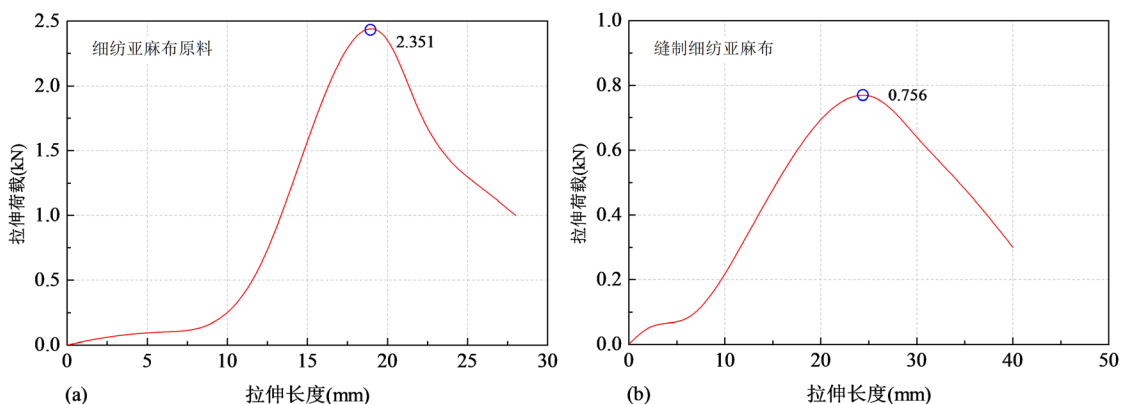


Figure 3. Typical load-displacement curves of the finespun linens

图 3. 典型细纺麻布荷载 - 位移曲线

3.1.3. 帆布试验结果

对于帆布原料, 破坏时裂缝出现在夹持位置处, 裂缝由边缘向内侧逐渐扩展。帆布夹持位置处在夹持压力作用下容易产生应力集中导致剪切破坏。而对于缝制帆布样品, 破坏时裂缝出现在缝制搭接位置处。

典型帆布原料和缝制帆布荷载 - 位移曲线汇总至下图 4 中。对于帆布原料, 拉伸荷载随拉伸位移近似呈线性递增, 在拉伸量接近于 22 mm 时达到荷载峰值, 约为 4.6 kN。随后荷载随位移增加呈“断崖式”衰减, 根据破坏形式可知, 造成荷载迅速衰减的主要原因是由于夹持位置处裂缝的产生和迅速发展导致。对于缝制帆布样品, 在拉伸量接近于 13.5 mm 时, 拉伸荷载达到最大值 1.730 kN, 随后荷载迅速衰减。通过对比可知, 缝制后帆布材料抗拉强度约为缝制前的 37.6%。

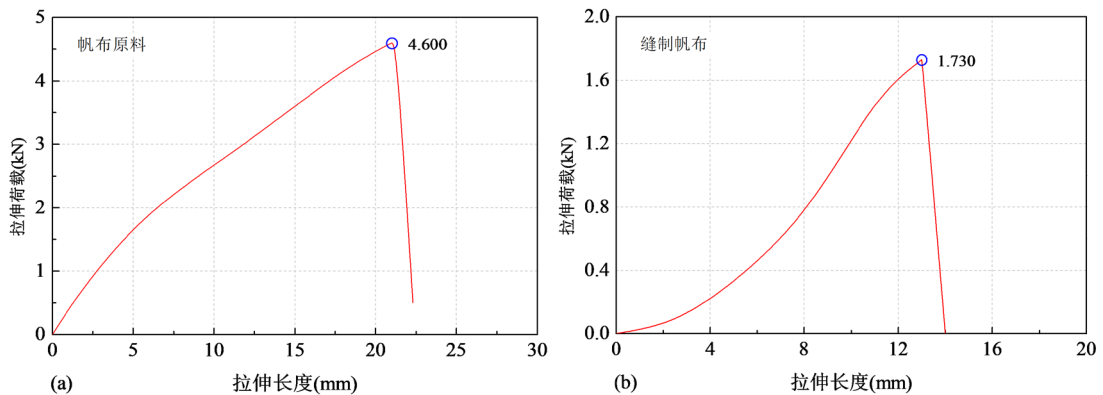


Figure 4. Typical load-displacement curves of the canvas

图 4. 典型帆布荷载 - 位移曲线

3.2. 模袋材料伸长率

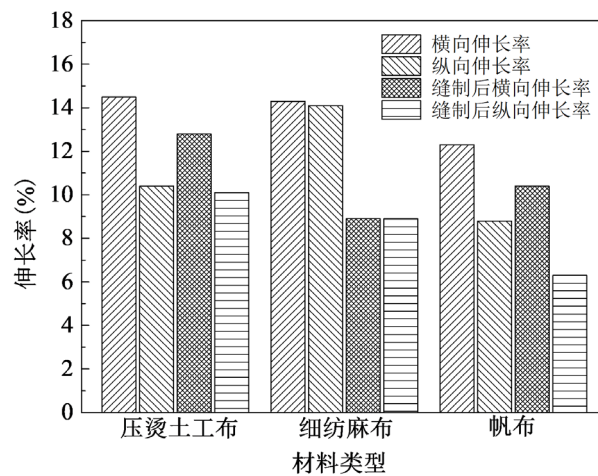


Figure 5. The summary of the results of elongation

图 5. 不同类型材料伸长率汇总

上图 5 为不同类型模袋材料原材料和缝制后样品横向和纵向伸长率。根据上图可以看出, 各样品缝制后伸长率均小于对应原材料伸长率。压烫土工布和亚麻布伸长率稍大于帆布材料。相比于其他两种材料, 细纺麻布材料横向伸长率与纵向伸长率几乎一致, 该材料在受力后变形较为均匀, 表明该类材料在

承受拉力荷载时应力沿试样横向和纵向分布较为均匀分布。

4. 模袋内部压力计算公式

以上结果为实测模袋原材料抗拉强度，在实际应用时模袋通常设置为球形和圆柱形，还需根据实测模袋抗拉强度计算确定模袋内部峰值围压强度，所采用的力学模型如下图6所示。

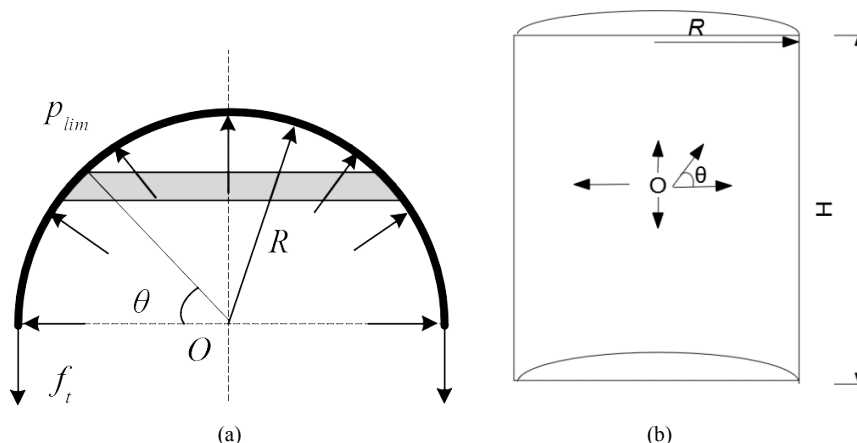


Figure 6. The mechanical model. (a) The mechanical model of the spherical mold bag; (b) The mechanical model of the columniform mold bag

图 6. 力学模型。(a) 球形模袋受力模型；(b) 圆柱形模袋力学模型

图中模袋半径为 R ，模袋材料抗拉强度假设为 f_t ，模袋达到抗拉强度峰值时承受峰值围压为 p_{lim} ，根据应力平衡条件可以得出：

$$2\pi R \cdot f_t = \int_0^{\pi/2} p_{lim} \cdot 2\pi R \cdot \cos \theta \cdot R \sin \theta d\theta = \pi R^2 p_{lim} \quad (1)$$

整理可得：

$$p_{lim} = \frac{2f_t}{RK_0} \quad (2)$$

上式中， K_0 为安全系数，取值为 1.5。

假设模袋内注浆后形成圆柱形复合体(见图6)，根据模袋内部受力与模袋受力平衡条件可以得出：

$$(2H + 4R) \times f_t = 2H \int_0^{\pi/2} p_{lim} R \sin \theta d\theta \quad (3)$$

化简整理得：

$$p_{lim} = \frac{(2H + 4R)f_t}{2HRK_0} \quad (4)$$

上式中 H 为注浆后模袋高度， θ 为积分过程夹角。

根据资料调研，工程中常用模袋半径一般为 1 m，注浆后模袋最大高度一般不超过 4 m。将以上两种常用参数和拉伸试验中得到的材料抗拉强度分别带入式(2)和(4)中可求得不同材料内部极限围压分别为：

圆形：压烫土工布 $p_{lim} = 2.2$ MPa；亚麻布 $p_{lim} = 5.5$ MPa；帆布 $p_{lim} = 11.7$ MPa。

圆柱形：压烫土工布 $p_{lim} = 1.65$ MPa；亚麻布 $p_{lim} = 4.1$ MPa；帆布 $p_{lim} = 8.8$ MPa。

5. 结论

本文通过压烫土工布、细纺麻布和帆布三种常用模袋材料抗拉强度试验得到了各材料的抗拉强度、破坏形式和伸长率，推导了球形和圆柱形注浆模袋抗拉强度计算公式，得出主要结论如下：

- 1) 三种材料的抗拉强度分别为：帆布 > 细纺亚麻布 > 压烫土工布；缝制后压烫土工布抗拉强度变化不大，但帆布和细纺亚麻布模袋较缝制前抗拉强度明显减小。
- 2) 各材料缝制后伸长率均小于对应原材料伸长率；压烫土工布和亚麻布伸长率稍大于帆布材料。细纺麻布材料横向伸长率与纵向伸长率几乎一致，材料受力变形较为均匀。
- 3) 建立了球形和圆柱形注浆模袋受力模型，提出了模袋内部注浆压力与材料抗拉强度之间的函数关系，可用于不同材料类型模袋峰值注浆压力设计计算。

参考文献

- [1] 李旺雷, 程鹏达. 压密式注浆在地基防渗堵漏中的应用[C]//中国建筑学会施工与建材分会防水技术专业委员会、中国防水技术网. 地下空间工程防水与渗漏治理技术研讨会论文集. 中国建筑学会施工与建材分会防水技术专业委员会、中国防水技术网: 中国建筑学会施工与建材分会防水技术专业委员会, 2012: 82-91.
- [2] 陈剑, 魏义山, 江红, 何卫, 王树英, 胡钦鑫. 地铁暗挖隧道断层破碎带突水涌砂原因分析及处治技术[J]. 隧道建设, 2017, 37(7): 857-863.
- [3] 夏权斌, 刘成勇, 李有华, 赵学勇, 杨秀云, 沈庆双. 模袋灌浆法在云洞水库地下暗河处理中的应用[J]. 人民长江, 2019, 50(S2): 163-166.
- [4] 张浩, 施成华, 彭立敏, 雷明锋. 模袋袖阀管压密注浆的注浆压力理论计算方法研究[J]. 岩土力学, 2020(4): 1-10.
- [5] 田锦州. 充填采场巷道模袋式快速成型密闭墙施工技术研究[J]. 煤炭工程, 2014, 46(11): 33-35.
- [6] 巢伟才. 膜袋袖阀管注浆在岩溶路基加固中的应用[J]. 建材与装饰, 2017(49): 233-234.
- [7] 帅建兵. 模袋袖阀管注浆技术在暗挖地铁车站超前注浆中的应用[J]. 施工技术, 2019, 48(6): 125-128.
- [8] 刘芳. 土工膜袋袖阀管注浆技术在岩溶路基加固中的应用[J]. 交通世界, 2020(6): 49-50.
- [9] 吴姗, 郭利杰, 侯国权. 进路充填袋式挡墙快速封闭安全隔离技术研究[J]. 矿业研究与开发, 2020, 40(12): 52-56.
- [10] 牛泽斌. 新型密闭墙构筑技术试验研究[J]. 山东煤炭科技, 2020(11): 78-80+83+93.
- [11] 孔令磊, 杨润来, 刘昊槟, 张小燕. 外海深基坑管涌封堵技术[J]. 水运工程, 2019(S1): 67-70.
- [12] 符平, 王廷勇, 郑亚平, 赵卫全, 杨晓东. 土工模袋灌浆研究与应用[J]. 水利与建筑工程学报, 2004, 2(1): 11-13.
- [13] 邱长林, 闫玥, 闫澍旺. 泥浆不均匀时土工织物充填袋特性[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(5): 760-763.
- [14] 李辉, 易富, 管茂成, 姜旭桐, 张佳. 改良模袋充灌特性及界面摩擦特性的试验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2020, 49(4): 773-780.
- [15] 杨春山, 莫海鸿, 魏立新, 陈俊生, 赵建国. 土工模袋砂界面摩擦特性试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2018, 14(1): 26-32.
- [16] GB/T 15788-1995. 土工布拉伸试验方法宽条样法[S]. 北京: 国家技术监督局, 1995.