

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2018.12.022

不同类型聚乙烯土工网的拉伸特性对比

乔建刚^{1,2}, 刘伟璐^{1,2}, 李士宣^{1,2}

(1. 河北工业大学土木与交通学院, 天津 300401; 2. 天津市交通工程绿色材料技术研究中心, 天津 300401)

摘要: 原材料的拉伸参数对聚乙烯土工网的使用性能有重要影响, 为了提高聚乙烯土工网的边坡防护适用性能, 采用电子织物强力机对单层网、复合毯、三维网垫 3 种类型聚乙烯土工网进行大量自动加载试验, 分析在等速率下材料伸长率与荷载相互关系, 得到材料纵、横向伸长率-荷载变化规律, 确定了不同伸长率的平均拉伸力、断裂平均用时等数值。结果表明, 纵、横向断裂拉伸力平均值从大到小依次为复合毯、三维网垫、单层网; 断裂平均用时从大到小依次为单层网、复合毯、三维网垫。复合毯作为一种新材料相较于传统单层网和三维网垫有很好的抗拉优势, 实现了充分发挥土工网整体作用, 避免了材料浪费, 应多加推广使用。

关键词: 聚乙烯土工网; 拉伸特性; 断裂破坏

中图分类号: TQ32 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2018)12-0115-05

Comparison of Tensile Properties of Different Types of Polyethylene Geonets

Qiao Jiangang^{1,2}, Liu Weilu^{1,2}, Li Shixuan^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China;

2. Tianjin Traffic Engineering Green Materials Technology Research Center, Tianjin 300401, China)

Abstract: The tensile parameters of the raw materials have an important influence on the performance of polyethylene geonet. In order to improve the applicable performance of the slope protection of polyethylene geonets, a large number of automatic loading tests were carried out on the single layer geonet, composite blanket and three-dimensional geomat, using the electronic fabric strength machines. The relationship between elongation and load of materials at equal rates was analyzed to obtain the elongation-load variation law determines, which also got the average tensile force and the average time at different elongation at break in longitudinal and transverse directions of materials. The results showed that the average tensile strength of longitudinal and transverse fractures was composite blanket, three-dimensional geomat and single-layer geonet; the average time of fracture was single-layer geonet, composite blanket and three-dimensional geomat. As a new material, the composite blanket had good tensile strength compared with the traditional single-layer geonet and three-dimensional geomat, and it realized the full effects of the geonet, also avoided material waste and should be promoted and used.

Keywords: polyethylene geonet; tensile property; fracture failure

聚乙烯是由碳原子和氢原子以共价键结合形成的聚合物, 是现代工业应用最为广泛的五大树脂材料之一。其中含有较少支链的线性聚乙烯为高密度聚乙烯, 其结晶度高, 树脂密度大, 化学物理稳定性优良。聚乙烯土工网是由高密度聚乙烯料经挤出机配以旋转机, 通过特定工艺生产加工而成的^[1]。按照组成材料的形式不同可将土工网分为单层土工

网、三维土工网垫、复合毯等。土工网主要通过与其他植物结合, 在边坡浅层区域形成表层加筋体保护层, 从而提高边坡植物生长环境、增强土体抗剪性, 实现固土护坡^[2]。邓从等^[3]在对不同覆盖措施对坡面土壤侵蚀影响的研究中指出, 土工网可以减少雨水对坡面的侵蚀从而减流、减沙。M. O. A. Bazne 等^[4]通过考虑土工网层数、长度等条件的室内实验

基金项目: 交通运输部科技项目 (2018-04-063)

通讯作者: 乔建刚, 博士, 教授, 主要研究方向为道路交通安全 E-mail: qiaojg369@126.com

收稿日期: 2018-09-12

引用格式: 乔建刚, 刘伟璐, 李士宣. 不同类型聚乙烯土工网的拉伸特性对比 [J]. 工程塑料应用, 2018, 46(12):115-119, 124.

Qiao Jiangang, Liu Weilu, Li Shixuan. Comparison of tensile properties of different types of polyethylene geonets[J]. Engineering Plastics Application, 2018, 46(12):115-119, 124.

和模拟实验,发现土工网可以提高低压软粘土承载力。B. J. Nareeman 等^[5]通过土工网-粉土直剪实验和固结实验,指出土工网可以有效降低地基沉降,且放置在一定倾角上可更好地提高土体的抗剪强度。N. Yarahmadi 等^[6]通过在蠕变实验下测量不同条件的不同土工网的厚度,得到其面内流动能力和材料厚度的关系。王广月等^[7]指出三维土工网在一定程度上可提高边坡的整体稳定性。肖成志等^[8]指出三维土工网可有效降低坡脚雨水流速。上述报道虽均指明了聚乙烯土工网在应用上的优势,但都没有从材料角度分析聚乙烯土工网材料的拉伸特征。由于拉伸强度是土工材料的重要特性指标之一^[9-10],因此对土工网的拉伸特性进行研究很有必要。

笔者采用电子织物强力机对单层网、复合毯、三维网垫3种类型聚乙烯土工网进行大量自动加载试验,分析在等速率下材料的拉伸特性。

1 实验部分

1.1 主要材料

选取山东宏祥新材料股份有限公司生产的三种常用的聚乙烯土工网试样,分别为三层复合毯、EM4 三维网垫、CE111 单层网材料进行拉伸试验。其中复合毯是上下两层菱形双向拉伸平网,中间一层褶皱双向拉伸网经缝边工艺复合而成;三维网垫是由上部一层菱形凹凸网,中间两层双向拉伸平丝网,底部一层拉伸网在交接点处经热熔后粘结而成;单层网则是挤塑编织而成。相关参数见表1。

表1 土工网型号及各参数

项目	复合毯	三维网垫	单层网
幅宽/m	2.5	2.5	2
网孔尺寸/mm	$(15 \times 10) \pm 1$	$(10 \times 10) \pm 1$	$(8 \times 6) \pm 2$
厚度/mm	23 ± 2	15 ± 2	2 ± 1
单位面积质量/(g·m ⁻²)	512.5	398.1	218.6

1.2 主要仪器与设备

电子织物强力机:YG(B)026H型,温州大荣纺织有限公司。

1.3 试验条件及要求

对三种试样的纵、横向分别取长、宽均为 (200 ± 1) mm的5块试样。试验前将样品放置在 (20 ± 2) °C室温下至少24 h,并在该环境下进行试验。采用松式夹持试样法对三种材料进行宽条拉伸试验。参考JT/T 513-2004, GB/T 19470-2004, GB/T 18744-2002对单层土工网和三维网垫的拉伸速率要求,试验的等速拉伸速率均取200 mm/

min,且保证放置材料长度方向与试验机外加荷载方向平行,试样夹持长度为100 mm。其中材料的峰值拉伸力为材料的断裂拉伸力,材料的全部层断裂后停止实验。

通过对每种试样的纵、横向分别进行5组平行试验,观察拉伸实验的现象、分析材料拉伸过程中的破坏特征,且分别采集对应的伸长率-拉伸力曲线,同时对3种材料在伸长率为2%,5%,10%,20%,50%,断裂条件,断脱条件下的拉伸力值取平均值,得到其相应的曲线。

2 结果与讨论

2.1 复合毯拉伸试验

在拉伸起始试样先随夹具向上移动,开始整体伸长变形,然后试样的上下双向拉伸平网层达到屈服后开始持续撕裂至全部断开,最后剩中间一层褶皱双向拉伸平网继续断裂。其中纵向受拉的试样褶皱区先被拉直,随后沿弯曲褶皱线开始破坏;横向受拉试样的褶皱层沿垂直拉伸作用的水平网线方向一根一根断开,大多在距夹具较近处发生破坏,其破坏照片见图1。



(a) 纵向拉伸破坏; (b) 横向拉伸破坏
a—纵向拉伸破坏; b—横向拉伸破坏

图1 复合毯纵、横向拉伸破坏照片

复合毯的单次试验纵、横向拉伸曲线见图2。从图2可以看出,复合毯纵、横向拉伸过程中材料在达到最大拉伸应力点前,伸长率-拉伸力均呈线性特性;越过该点,纵向受拉的试样随伸长率增大拉伸力减小,横向受拉试样的拉伸力值则整体呈大幅度波动减小,且出现多处应力峰值点。而横向部分曲线并未从原点开始,可能是材料夹持的平整度不

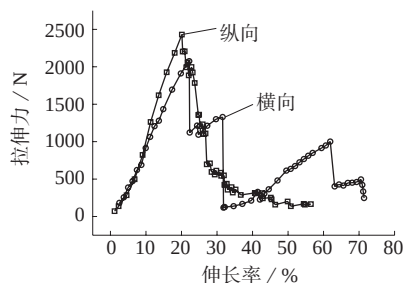


图2 复合毯纵、横向拉伸曲线

好,引起没有拉伸力却存在伸长率变化。

图3为复合毯的纵、横向伸长率-平均拉伸力曲线。从图3可知,随着伸长率增大,纵、横向拉伸应力均先增大后减小,这主要是因为组成材料的褶皱层最后断裂,且纵向拉伸的褶皱线方向垂直于拉伸方向,受力面积小。聚乙烯材料在高速拉伸下,分子链段运动跟不上外力作用,出现了脆性行为;横向受拉褶皱线方向平行于施加的拉伸作用力方向,多条褶皱线增加了试样实际受拉面积,分子链得以位移、重排列,出现了韧性行为^[11]。其中纵向断裂最大拉伸力平均值为2483.74 N,伸长率为22.94%;横向断裂拉伸力平均值为2018.11 N,伸长率为40.25%,拉伸力相差较小,伸长率相差较大。主要因为褶皱层网孔为方形网孔,拉伸力方向垂直于边长方向,按照理论计算应相等,故拉断的拉伸力差值较小。褶皱层和拉伸方向的关系导致纵向不能较好的延伸。

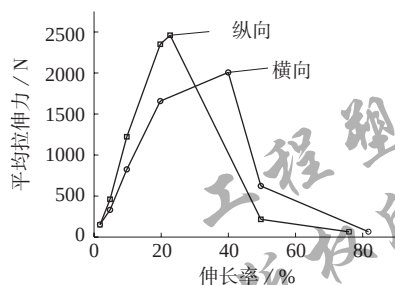


图3 复合毯纵、横向伸长率-平均拉伸力曲线

以 X 为伸长率、 Y 为平均拉伸力, R^2 为拟合程度,拟合得到的对应的曲线方程见式(1)~(2)。

$$Y_{\text{纵向}} = 40.232 + 242.942 \times \exp\{-2 \times [(X - 21.385) / 17.610]^2\}, R^2 = 0.98224 \quad (1)$$

$$Y_{\text{横向}} = 153.851 - 17.429X + 10.000X^2 - 0.298X^3 + 0.002X^4, R^2 = 0.97261 \quad (2)$$

2.2 三维网垫拉伸试验现象

三维网垫的纵、横向试样同样在拉伸开始均由整体伸长变形至逐渐被拉成细丝状,然后试样表层凹凸层达到屈服开始一根一根断裂,可以听到明显的断裂声。试样中间双向拉伸丝网沿着水平网格线开始断裂,只剩下底部一层菱形平网继续伸长。其中纵向受拉的试样沿网孔两个对角方向伸长,最终达到极限状态后大多从节点部位开始断裂;横向受拉的试样沿受拉的网孔两侧网肋中间开始断裂,断裂线方向和拉伸作用力方向成一定角度,可能是初始预应力加载略有不均所致。破坏照片见图4。

三维网垫的单次试验纵、横向拉伸曲线见图5。



(a) 纵向拉伸破坏; (b) 横向拉伸破坏
图4 三维网垫拉伸破坏照片

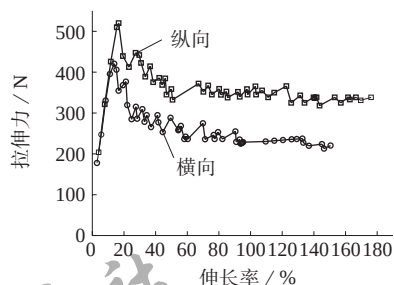


图5 三维网垫纵、横向拉伸曲线

从图5可看出,纵、横向伸长率-拉伸力变化均是驼峰式软化性破坏。拉伸力呈先线性变化,达到峰值后在上下波动中减小。主要是因为聚乙烯作为黏弹性材料,在拉伸过程中会产生一些拉丝现象,能够吸收更多的拉伸能量,阻碍分子链断裂^[12]。同时三维网垫为复合材料,图上曲线前期显示是材料整体的拉伸应力,后期则显示的只是剩余未断裂层的拉伸力,故随着剩余层数和网孔的减少,材料可抵抗拉伸作用的力值也减小。

图6为三维网垫纵、横向伸长率-平均拉伸力曲线。从图6可知,纵向断裂平均拉伸力为489.45 N,伸长率为16.09%,横向断裂平均拉伸力为446.7 N,伸长率为16.05%,差值均较小,说明试样两个方向受力比较均匀。通过实验现象分析可能是材料的凹凸层与底层平层为焊接连接,拉伸作用使焊接点先剥离,只剩下底部平层菱形双向拉伸网,菱形网孔受力相当,故二者断裂拉伸力值较小。

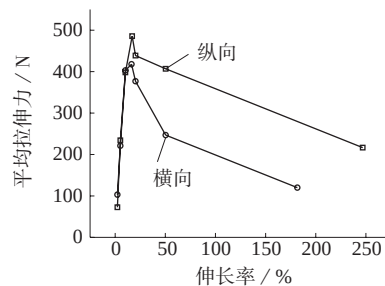


图6 三维网垫纵、横向伸长率-平均拉伸力曲线

拟合得到的对应的曲线方程见式(3)~(4)。

$$Y_{\text{纵向}} = (X - 1.347) / [0.009 + 0.001 \times (X - 1.347) + 1.400E^{-5} \times (X - 1.347)^2], R^2 = 0.94993 \quad (3)$$

$$Y_{\text{横向}} = (X - 0.624) / [0.013 + 6.674E^{-4} \times (X - 0.624) + 5.846E^{-5} \times (X - 0.624)^2], R^2 = 0.93287 \quad (4)$$

2.3 单层网拉伸试验

单层网试样纵、横向在受拉伸作用初期,随变形增大,网肋部分纤维因被拉成丝状后崩断,随纤维崩断数目增多,变形累积到一定程度后,试样突然“断裂”破坏。同时均有被拉伸的网边先断裂,随后向中间延伸。有时也会出现试样夹持试样的中间部位先断裂,可能是试样夹持力不均匀或不足导致,因此夹持试样时要注意保证平整、均匀。拉伸破坏照片见图7。



(a) 纵向拉伸破坏; (b) 横向拉伸破坏
图7 单层网拉伸破坏照片

单层网的单次试验纵、横向拉伸曲线见图8。从图8可看出单层网达到屈服点前纵、横拉伸关系均先线性增长,达到屈服点后,拉伸应力继续增长,但增长速率变缓,直到达到最大拉伸应力后,材料拉伸应力迅速减小。主要因为单层网为单层平面结构且存在较多网孔,随着网孔边缘一根根网肋颈缩断裂^[13],剩余网肋在拉伸力下产生了局部应力集中可继续抵抗外部拉伸。故后期随伸长率度增长,拉伸力增长速率减小。

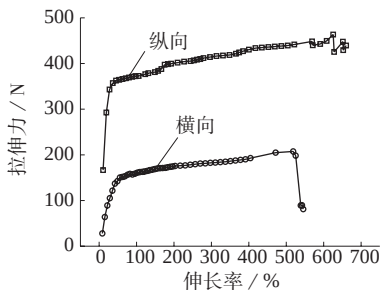


图8 单层网纵、横向拉伸曲线

图9为单层网纵、横向伸长率-平均拉伸力曲线。从图9可知,随着伸长率增大,两个方向拉伸力变化趋势相同,纵向断裂拉伸率为432.37%,横向断

裂拉伸率为440.13%;说明材料整体延展性分布均匀。但二者的断裂拉伸力值相差较大,纵向断裂拉伸力平均值为438.52 N,横向断裂拉伸力平均值为201.6 N,通过实验现象分析主要是纵向受拉时夹具间网孔呈两个三角形,横向受拉时网孔为两个梯形,三角形较梯形受力稳定^[14-15]。且相同拉伸长度下,纵向受拉的网孔孔数多且竖向网肋间距小,整体产生的抵抗拉伸作用大;横向受拉网孔孔数少且竖向网肋间距大,整体产生的抵抗拉伸作用小,故纵向断裂拉伸力大于横向。

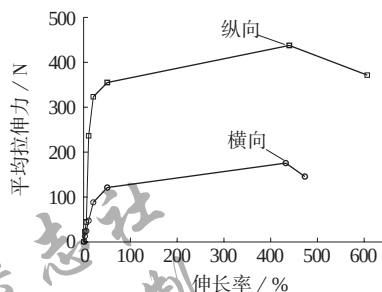


图9 单层网纵、横向伸长率-平均拉伸力曲线

拟合得到的对应的曲线方程见式(5)~(6)。

$$Y_{\text{纵向}} = 387.660 - 386.287 / [1 + (X / 9.205)^{2.602}], R^2 = 0.95907 \quad (5)$$

$$Y_{\text{横向}} = 75.436 \times \ln(1.170 \times \ln X), R^2 = 0.84923 \quad (6)$$

2.4 三种土工网纵、横向拉伸对比

(1) 伸长率-平均拉伸力值。

图10、图11分别为三种土工网纵、横向伸长率-平均拉伸力曲线。由图10、图11可知,随着伸长

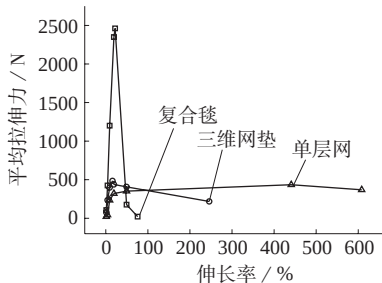


图10 三种土工网纵向伸长率-平均拉伸力曲线

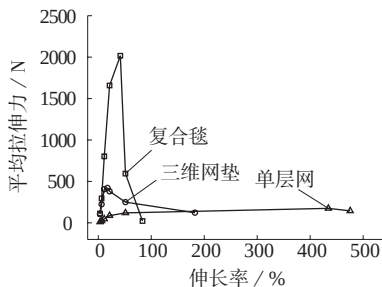


图11 三种土工网横向伸长率-平均拉伸力曲线

率增大,三种试样纵、横向拉伸力均表现先增加后减小。其中纵、横向断裂拉伸力平均值从大到小依次为:复合毯、三维网垫、单层土工网。这主要是组成材料的叠加层不同,复合毯和三维网垫层数多于单层网,故拉伸力值大于单层网。同时复合毯因为是纺织绳将三层叠加缝合,上下平层双向拉伸网虽先被拉断,但中间褶皱层在后期可以较好地抗拉。三维网垫则因为凹凸层与底平层为粘焊,出现了较早的层间剥离,底部平网又不能单独较好地起到抗拉作用,降低了材料整体抗拉性,故断裂拉伸力值低于复合毯。

(2) 断裂用时。

图 12 为三种土工网纵、横向断裂平均用时对比。从图 12 可看出纵、横向拉伸断裂平均用时从大到小依次为单层网、复合毯、三维网垫。说明单层网的材料延性较好,这主要是组成的另外两种材料的单层网强度较低,破坏时分先后层顺序,不能较好地发挥材料的整体性,降低了材料整体延展性。故在生产中应重视对复合土工网材料的单层强度的检测与加强。

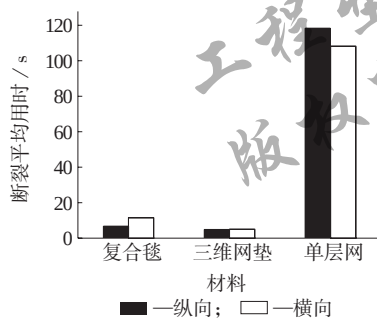


图 12 三种土工网纵、横向断裂平均用时

3 结论

(1) 复合毯和三维网垫材料的纵向拉伸力和横向拉伸力差值尽管都较小,但纵向大于横向。说明这两种材料抗拉均匀,应在实际使用中尽量将材料纵向为主受力方向铺设,充分发挥其早期抗拉作用,单层网也一样。

(2) 复合毯材料的纵、横向断裂平均拉伸力和断裂平均用时均大于三维网垫和单层网。可能是三维网垫层间的粘焊作用在拉伸过程中剥离降低材料的整体抗拉性。应加强对三维网垫材料粘焊点的检测。同时加强对复合毯褶皱层抗弯的检测。

(3) 复合毯作为一种新材料相较于传统单层土工网和三维网垫有很好的抗拉优势,实现了充分发挥土工网整体作用,避免了材料浪费。

参考文献

- [1] 刘宝钊,孔繁兴. 塑料土工网的生产及应用[J]. 塑料科技, 2006, 34(3):28-30.
Liu Baozhao, Kong Fanxing. Production and application of plastic geonet[J]. Plastics Science and Technology, 2006, 34(3):28-30.
- [2] 张道华. 土质边坡生态防护技术研究分析[J]. 贵州大学学报:自然科学版, 2012, 29(3):108-111.
Zhang Daohua. Study on ecological protection technology of soil slope[J]. Journal of Guizhou University: Natural Sciences, 2012, 29(3):108-111.
- [3] 邓从,陈为峰,王文中,等. 表土堆置体不同覆盖措施坡面流失特征[J]. 水土保持学报 2018, 32(2):92-96.
Deng Cong, Chen Weifeng, Wang Wenzhong, et al. Research on characteristics of slope loss in topsoil-bank with different coverage measures[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(2):92-96.
- [4] Bazne M O A, Vahedifard F, Shahrokhbabadi S. The effect of geonet reinforcement on bearing capacity of low-compacted soft clay[J]. Transportation Infra-structure Geotechnology, 2015, 2(1):47-63.
- [5] Nareeman B J, Fattah M Y. Effect of soil reinforcement on shear strength and settlement of cohesi-ve-frictional soil[J]. International Journal of Geomate Geotechnique Construction Materials & Environment, 2012, 3:308-313.
- [6] Yarahmadi N, Gratchev I, Jeng D S. The effect of thickness reduction on the hydraulic transmissivity of geonet drains using rigid and non-rigid flow boundaries[J]. Geotextiles & Geomembranes, 2017, 45(2):48-57.
- [7] 王广月,王云,孙国瑞. 三维土工网防护边坡整体稳定性分析[J]. 防震减灾学报, 2017, 37(6):863-870.
Wang Guangyue, Wang Yun, Sun Guorui. Analysis of the overall stability of the three dimensional geonet protected slop[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2017, 37(6):863-870.
- [8] 肖成志,孙建诚,李雨润,等. 三维土工网垫植草护坡防坡面径流冲刷的机制分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(2):453-458.
Xiao Chengzhi, Sun Jiancheng, Li Yurun, et al. Mechanism analysis of ecological slop protection against runoff erosion by grass jetting on 3D geomat[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(2):453-458.
- [9] 肖衡林,王钊,张晋锋. 三维土工网垫设计指标的研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(11):1800-1804.
Xiao Henglin, Wang Zhao, Zhang Jinfeng. Study on the design indexes of three dimensional geomat[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(11):1800-1804.
- [10] 郑大为,韩慧娟,刘英. 土工格栅拉伸速率试验分析[J]. 工程塑料应用, 2014, 42(3):90-93.

- Han Miao. The PdCo catalyst prepared in ORR by electrostatic spinning method[D]. Dalian:Dalian University of Technology, 2015.
- [5] Shin Y M, Hohman M M, Brenner M P, et al. Experimental characterization of electrospinning:The electrically forced jet and instabilities[J]. *Polymer*, 2001, 42(25):9 955–9 967.
- [6] Fong H, Liu W D, Wang C S, et al. Generation of electrospun fibers of nylon 6 and nylon 6–montmorillonite nanocomposite[J]. *Polymer*, 2002, 43(3):775–780.
- [7] Hutmacher D W. Scaffolds in tissue engineering bone and cartilage[J]. *Biomaterials*, 2000, 21(24):2 529–2 543.
- [8] Williamson M R, Coombes A G A. Gravity spinning of polycaprolactone fibres for applications in tissue engineering[J]. *Biomaterials*, 2004, 25(3):459–465.
- [9] Zhang Y, Ouyang H, Lim C T, et al. Electrospinning of gelatin fibers and gelatin / PCL composite fibrous scaffolds[J]. *Journal of Biomedical Materials Research*, 2005, 72B(1):156–165.
- [10] 鲁手涛,徐海荣,刘黎明,等. 聚己内酯药物控释材料的研究进展 [J]. *合成树脂及塑料*, 2018(4):94–98.
- Lu Shoutao, Xu Hairong, Liu Liming, et al. Research progress of PCL based materials for drug controlled release[J]. *China Synthetic Resin and Plastics*, 2018(4):94–98.
- [11] 赵新飞. 组织工程用纳米纤维膜支架力学模型分析 [D]. 杭州: 浙江理工大学, 2016.
- Zhao Xinfei. Mechanical model analysis of nanofiber membrane scaffold for tissue engineering[D]. Hangzhou:Zhejiang Sci-Tech University, 2016.
- [12] 刘大彪,何玉明,胡鹏,等. 单纤维微拉伸力学性能测试与分析 [J]. *实验力学*, 2012(1):61–69.
- Liu Dabiao, He Yuming, Hu Peng, et al. On the mechanical properties in micro-tensile testing of single fiber[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2012(1):61–69.
- [13] 原波,王珺,韩平畴,等. 聚己酸内酯纳米纤维的拉伸试验及表面表征 [J]. *高分子材料科学与工程*, 2008(11):126–129.
- Yuan Bo, Wang Jun, Han Pingchou, et al. Tensile testing and surface characterization of electrospun PCL nanofibers[J]. *Polymer Materials Science & Engineering*, 2008(11):126–129.
- [14] 原波. 高分子纳米纤维及其结构支架的力学性能研究与计算建模 [D]. 上海: 复旦大学, 2009.
- Yuan Bo. Experimental testing to computational modeling of polymeric nanofibers——An investigation involving a single-strand nanofiber to a nanofibrous scaffold[D]. Shanghai:Fudan University, 2009.
- [15] Ng S Y. Nanomechanical characterization of a single electrospun nanofiber[D]. Singapore:Natl Univ Singapore, 2006.
- [16] Chen T, Dvorak G J, Yu C C. Size-dependent elastic properties of unidirectional nano-composites with interface stresses[J]. *Acta Mechanica*, 2007, 188(1–2):39–54.
- [17] Park S K, Gao X. Bernoulli–Euler beam model based on a modified couple stress theory[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2006, 16(11):2 355–2 359.

(上接第 119 页)

- Zheng Dawei, Han Huijuan, Liu Ying. Test analysis on tensile rate of geogrid[J]. *Engineering Plastics Application*, 2014, 42(3):90–93.
- [11] 陈光岩,邹育刚,吕士瀛,等. 不同牌号聚乙烯应力–应变曲线简析 [J]. *弹性体*, 2012, 22(4):66–68.
- Chen Guangyan, Zou Yugang, Lyu Shiyang, et al. Analysis of the stress-strain curves for different grades of PE and the structure connection[J]. *China Elastomerics*, 2012, 22(4):66–68.
- [12] 王章凯,熊玉竹,刘振宇,等. 弯曲疲劳对不同厚度聚合物材料力学性能的影响 [J]. *塑料工业*, 2013, 41(10):66–69.
- Wang Zhangkai, Xiong Yuzhu, Liu Zhenyu, et al. Effect of bending fatigue on mechanical properties of polymer materials with different thicknesses[J]. *China Plastics Industry*, 2013, 41(10):66–69.
- [13] 吴兴征,栾茂田. Netlon 土工网格 CE131 拉伸特性的实验研究 [J]. *大坝观测与土工测试*, 2000, 24(2):39–42.
- Wu Xingzheng, Luan Maotian. Experimental study on tensile characteristics of netlon geonet CE131[J]. *Dam Observation and Geotechnical Tests*, 2000, 24(2):39–42.
- [14] 韩光,唐洪祥,王大国,等. 土工网格结构形状对内力传递及加筋作用的影响 [J]. *辽宁工程技术大学学报: 自然科学版*, 2008, 27(A01):130–132.
- Han Guang, Tang Hongxiang, Wang Daguo, et al. Effects on internal force transmission and reinforcement roles of structure and shape of geogrid[J]. *Journal of Liaoning Technical University:Natural Science Edition*, 2008, 27(A01):130–132.
- [15] 杨光煦. 土工网格与土体的界面效应及其在堤防与路堤工程中的应用 [C]// 王钊,陆士强. 全国第五届土工合成材料学术会议论文集. 香港: 现代知识出版社, 2000:168–181.
- Yang Guangxu. Interface effect of geotechnical grid and soil and its application in embankment and embankment engineering[C]// Wang zhao, Lu shiqiang. Proceedings of the fifth national conference on geosynthetics.Hong Kong:Modern Knowledge Press, 2000:168–181.