

DOI: 10.11779/CJGE202104019

土工格室条带拉伸力学特性试验研究

杨广庆^{1,2}, 左政^{2,3}, 刘英⁴, 王志杰^{1,2}, 王贺^{1,2}, 于凡¹

(1. 石家庄铁道大学土木工程学院, 河北 石家庄 050043; 2. 石家庄铁道大学省部共建交通工程结构力学行为与系统安全国家重点实验室, 河北 石家庄 050043; 3. 石家庄铁道大学交通运输学院, 河北 石家庄 050043; 4. 交通运输部公路科学研究院, 北京 100088)

摘要: 土工格室作为一种新型三维立体加筋加固岩土材料, 通过约束土体侧向变形继而提升结构承载力, 减小变形。目前国内外对土工格室的研究主要集中在工程应用和加筋机理上, 对土工格室材料特别是条带本身的拉伸力学特性研究相对较少。通过对高密度聚乙烯 HDPE, 聚丙烯 PP 和聚酯 PET 3 种原料制成的土工格室条带进行单轴拉伸试验, 研究了试样形状 (I型-哑铃形、II型-矩形) 及试样尺寸 (II型-矩形、III型-矩形) 对土工格室条带强度和变形特性的影响, 并对土工格室条带的断裂处进行了微观分析。结果表明, HDPE、PP、PET 3 种土工格室条带的伸长率均对试样形状敏感, I型-哑铃形试样伸长率小于 II型-矩形试样。HDPE 土工格室条带的抗拉强度受试样形状、尺寸影响均较小。PP、PET 土工格室条带的抗拉强度受试样形状影响较大, I型-哑铃形抗拉强度小于 II型-矩形试样。HDPE 土工格室条带断裂面较粗糙, 有明显的塑性屈服变形。PP 土工格室条带断裂面微纤束排列整齐, 小微纤杂乱分布。PET 土工格室条带断裂面较平滑。试验结果可为土工格室加筋加固机理研究提供参考。

关键词: 土工格室条带; 拉伸试验; I型-哑铃形; II型-矩形; III型-矩形

中图分类号: TU472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2021)04-0760-08

作者简介: 杨广庆(1971—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事土工合成材料性能与加筋土技术研究。E-mail: yangqq@stdu.edu.cn。

Experimental investigations on tensile mechanical properties of geocell strips

YANG Guang-qing^{1,2}, ZUO Zheng^{2,3}, LIU Ying⁴, WANG Zhi-jie^{1,2}, WANG He^{1,2}, YU Fan¹

(1. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China; 2. State Key Laboratory of Mechanical Behavior and System Safety of Traffic Engineering Structures, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China; 3. School of Traffic and Transportation, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China; 4. Research Institute of Highway, Ministry of Transport, Beijing 100088, China)

Abstract: The geocell is a new type of three-dimensional reinforced geotechnical material to restrain the lateral deformation of the soil to enhance the bearing capacity of structure and reduce its deformation. At present, the worldwide investigations on geocells are mainly focused on their engineering applications and reinforcement mechanism, while limited investigations are conducted on themselves, especially the tensile mechanical properties of the strips. The uniaxial tensile tests are conducted on the geocell strips made from high-density polyethylene (HDPE), polypropylene (PP) and polyester (PET). The effects of the shapes (Type I-dumbbell, Type II-rectangular) and sizes (Type II-rectangular, Type III-rectangular) of the specimens on the strength and deformation characteristics of geocell strips are studied, and the micro-analysis on the failure geocell strips is performed. It is determined that the elongation rates of the HDPE, PP and PET geocell strips are sensitive to the specimen shape. The elongation of Type I-dumbbell is smaller than that of Type II-rectangular. The shape and size of the specimens have some effects on the strength of the HDPE geocell strips. The strengths of PP and PET geocell strips are greatly affected by the specimen shape. The tensile strength of Type I-dumbbell is smaller than that of Type II-rectangular. The fractured surface of HDPE geocell has rough surface and obvious plastic yield deformation. The microfibril bundles on the fractured surface of the PP geocell are neatly arranged, and the microfibrils are randomly distributed. The fractured surface of PET geocell is smooth. The test results can provide reference for the study on reinforcement mechanism of the geocells.

Key words: geocell strip; tensile test; Type I-dumbbell;

Type II-rectangular; Type III-rectangular

基金项目: 国家自然科学基金项目(51378322, 51709175); 河北省博士研究生创新项目(CXZZBS2020145); 河北省高等学校科学技术研究项目(BJ2020045); 河北省自然科学基金项目(E2018210097)

收稿日期: 2020-06-29

0 引言

土工格室是以高分子聚合物为原材料, 经基材挤出或拉伸成型为条带, 通过焊接、铆接、插接、注塑等工艺在两个条带相交处构成结点, 展开后呈蜂窝状的立体网格加筋材料, 如图 1 所示。与平面加筋材料相比^[1], 土工格室通过条带与土体之间的表面摩擦力和包裹力对土体进行侧向约束, 进而提升结构承载力, 以及减小变形^[2]被广泛应用于岩土工程建设中, 如地基处理^[3]、边坡防护^[4]和挡土墙^[5]中。

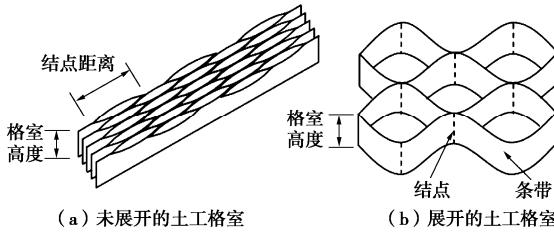


图 1 土工格室示意图

Fig. 1 Schematic of geocell reinforcement

刘蓓蓓等^[6]对土工格室加筋公路路堤的效果进行了数值计算, 结果表明土工格室能有效提高路堤整体稳定性, 且结点间距越小、条带越高, 加筋效果越明显。彭艾鑫等^[7]认为条带高度对加筋土强度的贡献远大于结点间距, 土工格室加筋可明显提高土体黏聚力, 而对内摩擦角的影响相对较小。赵明华等^[8]认为土工格室筋土界面摩阻力会对荷载进行重分配。高昂等^[9]认为土工格室能显著提高路堤承受循环荷载的能力和减小竖向累积沉降量。晏长根等^[10]通过三轴试验表明土工格室加筋后具有应变强硬化特征, 且加筋效果明显优于土工格栅等平面加筋材料, 这与 Biabani^[11]、赵明华等^[11]的研究结果保持一致。上述研究主要集中在土工格室的工程应用、作用机理等方面, 少数学者对土工格室条带进行了研究, 并取得一些成果。

因为土工格室条带在土体中受力状态主要是环向受拉, 所以对土工格室条带力学特性的研究主要是通过拉伸试验。杨利^[12]通过拉伸试验得出拉伸速率对 HDPE 土工格室条带的应力 - 应变关系、峰值强度等参数会产生不同程度的影响。李俊伟等^[13]认为拉伸速率对 HDPE 土工格室条带抗拉强度影响较大。上述文献主要研究了拉伸速率对 HDPE 土工格室条带力学性能的影响, 而针对试样形状、试样尺寸对土工格室条带的强度及变形特性的研究较少。Liu 等^[14]按照《Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics》(ASTM D638—2014)标准中推荐使用 I 型 - 哑铃形试样(如图 2(a)所示), 对 HDPE 土工格室条带进行了拉伸试验。而国内标准中《土工合成材料

塑料土工格室》(GB/T 19274—2003)、《塑料 - 拉伸性能的测定》(GB/T 1040.3—2006) 推荐使用 II 型 - 矩形试样, 如图 2(b) 所示, 由图 2 可知上述标准对试样的要求存在一定差异。

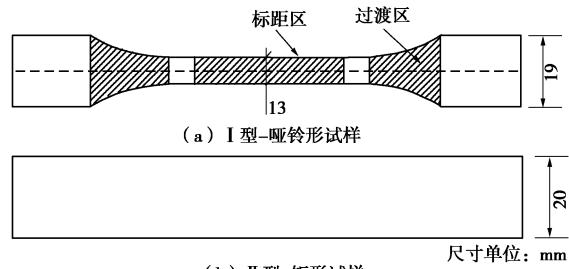


图 2 两种试样示意图

Fig. 2 Schematic of two kinds of specimens

此外, 生产土工格室条带的原材料, 除高密度聚乙烯(HDPE)外, 还有聚丙烯(PP)以及聚酯(PET)。上述文献均以 HDPE 土工格室条带为研究对象, 而对 PP、PET 土工格室条带鲜有研究。另外, HDPE、PP、PET 3 种不同材质的土工格室条带由于其成型工艺不同(HDPE 土工格室条带主要为挤出型, PP 和 PET 土工格室条带为拉伸型), 故对应宏观上条带的应力 - 应变模式也是不同的^[13], 因此需要进行深入研究。

基于以上分析, 本文在参考国内外试验标准的基础上, 选用由上述 3 种原材料制成的土工格室条带, 采用拉伸试验机进行单轴拉伸试验, 分别研究试样形状及尺寸对 3 种材料土工格室条带的强度及变形特性的影响, 并对断裂后的 3 种材料土工格室条带进行扫描电镜 SEM 微观分析。试验结果可为土工格室条带拉伸强度、整体强度及加筋加固机理的研究提供参考。

1 试验设备及材料

1.1 拉伸试验设备

拉伸试验采用 DW1210 土工合成材料电子强力试验机, 如图 3 所示。



图 3 DW1210 土工合成材料电子强力试验机

Fig. 3 DW1210 electronic strength tester for geosynthetics

试验过程中, 采用了平板式压缩夹具钳口, 并在平板间放置 PVC 条带, 以增加试样与平板间的摩擦力, 避免试样滑动或在钳口处发生破坏。

1.2 土工格室条带

选用由 HDPE、PP、PET 3 种原材料制成的土工格室条带进行拉伸试验。3 种材料的土工格室条带参数如表 1 所示。

表 1 土工格室条带参数

Table 1 Parameters of geocell strips

材料	生产 工艺	格室高度 <i>H/mm</i>	格室片厚 <i>T/mm</i>	结点距离 <i>A/mm</i>
HDPE	挤出型	50	1.1	400
PP	拉伸型	50	0.6	400
PET	拉伸型	50	0.6	400

1.3 试验方案

首先按照图 2 中 I 型—哑铃形和 II 型—矩形试样进行制样，每种试样制取数量不少于 5 个，拉伸速率为 50 mm/min。通过对 I 型—哑铃形和 II 型—矩形试样，研究试样形状对土工格室条带拉伸力学性能的影响。

由于两种试样宽度存在差异，为了更清晰地研究试样尺寸对土工格室条带拉伸力学性能的影响，根据《公路工程土工合成材料试验规程》(JTG E50—2006) 规定：窄条拉伸试验方法所用试样宽度为 50 mm。因此，在论文所用高度为 50 mm 的土工格室条带上直接进行裁剪即可得到宽度为 50 mm 的矩形试样。为与 II 型—矩形试样进行区分，将宽度为 50 mm 矩形试样命名为 III 型—矩形试样。需要注意 III 型—矩形试样除试样宽度与 II 型—矩形不同外，其余参数均与其相同，以减小其他因素对结果的影响。通过对 II 型—矩形试样与 III 型—矩形试样的抗拉强度、伸长率以及断裂模式，研究试样尺寸对土工格室条带拉伸力学性能的影响。

2 结果和讨论

2.1 HDPE 土工格室条带拉伸试验结果

HDPE 土工格室条带 3 种试样的拉伸曲线如图 4 所示。由图 4 可知，3 种试样的拉伸曲线变化趋势大致相同即在拉伸过程中均存在明显的屈服阶段，但也有一定的差异。其中，HDPE 土工格室条带 II 型—矩形试样和 III 型—矩形试样在拉伸过程中表现为初始阶段拉伸强度与伸长率基本呈线性关系，在达到峰值后出现屈服点，然后逐渐趋于平稳直至断裂。但 I 型—哑铃形试样在出现第一次拉伸屈服后又呈现出二次增长的趋势，即表现出明显的应变软化又硬化的特点。分析原因此种现象一方面与哑铃形的几何形状有关，另一方面也与 HDPE 土工格室条带的生产工艺有关。

一方面，哑铃形试样中间狭窄区域称为标距区，标距区以外圆弧部分称为过渡区，如图 2 所示。I 型—哑铃形试样在轴向力作用时，标距区首先达到材料的

屈服点，在拉伸曲线中表现为发生屈服。屈服点后进入应变软化，随着变形逐步扩展到过渡区，此时因过渡区圆弧横截面积较标距区大且复杂，即意味着欲使过渡区产生变形则需要提供更大的轴向拉力，因此在拉伸曲线上表现为二次增长即呈现出明显的应变硬化，但随着轴向拉力增长的同时，标距区所受的拉伸强度大于材料的许用强度，从而试样被拉断。

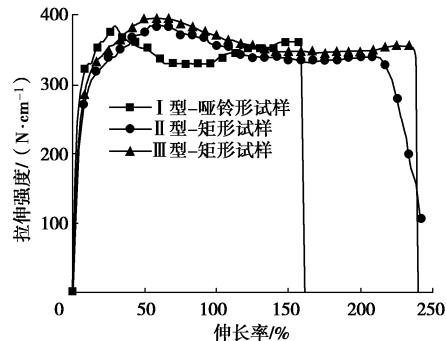


图 4 HDPE 条带 3 种试样的拉伸曲线

Fig. 4 Tensile curves of three specimens of HDPE geocell strips

另一方面，由于 HDPE 土工格室条带为挤出型，没有定向拉伸，分子链未发生变化，因此在拉伸试验中首先表现出 HDPE 应变软化的特性，但当晶态高聚物超过屈服点时，非晶区分子链发生运动并沿外力方向开始取向，从而使得分子间作用力增加。此时需增加轴向拉力，才能克服分子间的相互作用力。当轴向拉力增大后，对应的拉伸强度也相应增大，此时分子间开始发生相对位移，但达到一定位移时，分子链发生断裂，宏观上即表现为材料的破坏。基于上述分析，可知试样形状对拉伸试验的结果有明显影响。

3 种试样的抗拉强度及其对应的伸长率（下称，伸长率）从大到小均为：III 型—矩形、II 型—矩形、I 型—哑铃形。对比 3 种试样的拉伸曲线可知试样形状和尺寸对 HDPE 土工格室条带的抗拉强度和伸长率均有一定的影响。为了定量分析试样形状、尺寸对抗拉强度、伸长率的影响，提出了“强度比”与“伸长率之比”概念，即 II 型—矩形、I 型—哑铃形试样的抗拉强度、伸长率与 III 型—矩形试样对应抗拉强度、伸长率的比值，即式 (1)、(2) 所示，试验与计算结果如表 2 所示。

$$\text{强度比} = \frac{\sigma^*}{\sigma_{\text{III型-矩形}}} , \quad (1)$$

式中， σ^* 为 I 型—哑铃形试样或 II 型—矩形试样的抗拉强度 (N/cm)

$$\text{伸长率之比} = \frac{\varepsilon^*}{\varepsilon_{\text{III型-矩形}}} , \quad (2)$$

式中， ε^* 为 I 型—哑铃形或 II 型—矩形试样的伸长率。

分析表 2，HDPE 土工格室条带 II 型—矩形较 I 型

-哑铃形试样的抗拉强度和伸长率更接近III型-矩形试样。对比3种试样: I型-哑铃形与II型-矩形试样的强度比、伸长率之比分别相差2%, 38%, II型-矩形与III型-矩形试样的强度比、伸长率之比分别相差5%, 1%。分析可知试样形状对HDPE土工格室条带的伸长率影响较大, 而试样形状对II型-矩形试样与I型-哑铃形试样的强度影响较低, 仅为2%, 即选用I型-哑铃形试样与II型-矩形试样均可, 故从取样便捷的角度考虑, 建议选取II型-矩形试样。

表2 HDPE土工格室条带拉伸试验结果

Table 2 Tensile test results of HDPE geocell strips

试样形状	抗拉强度 /(N·cm ⁻¹)	强度 比/%	伸长 率/%	伸长率之 比/%
I型-哑铃形	391	93	36	61
II型-矩形	398	95	58	99
III型-矩形	421	—	59	—

此外, 对比II型-矩形和III型-矩形两种试样, 结果表明随试样宽度增大, 抗拉强度、伸长率几乎无变化。II型-矩形、III型-矩形试样宽度分别为20, 50 mm, 即宽度比为1:2.5, 但二者的强度比及伸长率之比分别为1:1.05和1:1.01。分析原因是HDPE为韧性材料即应力敏感性较低, 试样宽度对于抗拉强度及伸长率的影响较小, 因此所测II型-矩形试样与III型-矩形试样的抗拉强度、伸长率较为一致。

HDPE土工格室条带3种试样的拉伸断裂模式, 如图5所示。由图5(a)可以明显看到I型-哑铃形试样在标距区与过渡区的交界处断裂, 分析原因是标距区在屈服后, 欲使过渡区产生变形, 从而使拉力增加, 此时标距区材料因达到其许用强度而被拉断。由图5(b), (c)可以明显看到II型-矩形试样、III型-矩形试样均在标距区内出现颈缩现象, 并在形成细颈然后断裂, 这与文献[13]保持一致。此外, 在细颈扩展部位与拉伸方向约成45°角的肩型斜面, 在材料的断裂部位也可看到与拉伸方向大约成45°角的剪切断裂面。



图5 HDPE土工格室条带3种试样的拉伸断裂模式

Fig. 5 Tensile fractured modes of three specimens of HDPE geocell strips

通过扫描电镜SEM分别观察了HDPE土工格室条带试样断裂处放大250倍、1000倍、5000倍后的微观结构形态, 如图6所示。由图6可知, HDPE土工格室条带的断裂面形貌较为丰富, 表面比较粗糙, 且布满了长短不一、粗细各异的微纤维, 有明显的塑性屈服变形。分析原因是在轴向拉力作用下HDPE土工格室条带发生塑性形变, 并产生流动造成的, 具有典型的韧性断裂特征。

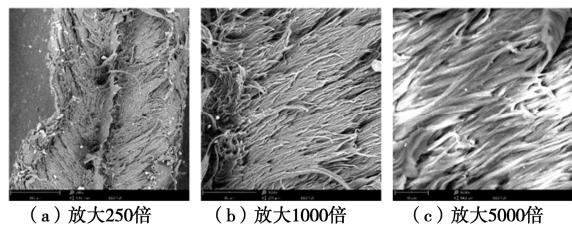


图6 HDPE土工格室条带断口的微观结构形态

Fig. 6 Microstructure of fracture of HDPE geocell strips

I型-哑铃形试样的选择^[15]主要是由于在拉伸过程中, 试样在钳口处易产生应力集中而导致在该处断裂, 从而使结果偏低。综合上述分析, 一方面由图5可知HDPE土工格室条带在拉伸过程中没有在夹具处因应力集中而发生断裂, 另一方面由图4可知HDPE土工格室II型-矩形试样强度大于I型-哑铃形试样强度, 这说明HDPE土工格室试样在试验时应力集中不明显。此外由强度比、伸长率之比分析可知试样形状对伸长率有显著影响, 而试样宽度则对于抗拉强度影响较小。另外, 较大的试样宽度可以减小应力集中对测试结果的影响^[15]。因此, 为较真实反映HDPE土工格室条带的力学特性, 且为进行试验检测时方便取样, 建议选用III型-矩形试样作为拉伸试验试样。

2.2 PP土工格室条带拉伸试验结果

PP土工格室条带3种试样的拉伸曲线、试验计算结果分别如图7、表3所示。由图7可知, 3种试样的拉伸曲线变化趋势大致相同, 均表现为拉伸强度与伸长率基本呈线性增加关系, 达到峰值后迅速降低, 试验过程中未出现明显屈服点。3种试样的抗拉强度及其对应的伸长率从大到小为: III型-矩形、II型-矩形、I型-哑铃形。对比3种试样的拉伸曲线可知试样形状、尺寸对PP土工格室条带的抗拉强度和伸长率都有一定的影响。

分析表3, II型-矩形较I型-哑铃形试样的抗拉强度和伸长率更接近III型-矩形试样。对比3种试样的强度比与伸长率之比, I型-哑铃形与II型-矩形试样的强度比、伸长率之比分别相差11%, 17%, II型-矩形与III型-矩形试样的强度比、伸长率之比分别相差9%, 11%。分析可知试样形状与试样尺寸均对PP土

工格室条带的伸长率影响较大。对强度而言,试样形状对强度的影响略大于试样尺寸的影响,因此不可忽略试样形状对试验结果的影响。

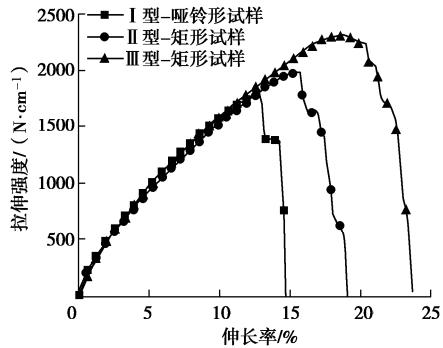


图 7 PP 土工格室条带 3 种试样拉伸曲线

Fig. 7 Tensile curves of three specimens of PP geocell strips

表 3 PP 土工格室条带拉伸试验结果

Table 3 Tensile test results of PP geocell strips

试样形状	抗拉强度/(N·cm⁻¹)	强度比/%	伸长率/%	伸长率之比/%
I型-哑铃形	1738	80	13	72
II型-矩形	1985	91	16	89
III型-矩形	2183	—	18	—

此外,对比 II 型-矩形和 III 型-矩形两种试样,结果表明试样宽度越大,抗拉强度、伸长率越大。II 型-矩形与 III 型-矩形试样宽度比为 1:2.5,但二者强度比及伸长率之比分别为 1:1.10 和 1:1.12。分析原因是由于 PP 材料存在显著的应力敏感性,即 PP 3 种试样在拉伸试验过程中,当试样标距区某点一旦产生应力集中,随即会在标距区内产生微裂纹,进而使试样快速发生断裂,这与试验前对 PP 土工格室条带取样时,试样容易沿着拉伸方向出现脆性裂纹保持一致。

PP 土工格室条带 3 种试样的拉伸断裂模式,如图 8 所示。由图 8 可知 PP 土工格室 3 种试样在拉伸破坏后,试样表面由光滑变为细丝状。分析原因是当试样受到轴向力时,材料内部经取向形成的微原纤具有特殊的密堆积,能有效阻止微原纤中的晶块产生塑性形变。当拉力继续增加时,微纤中的晶块解折叠,并且微纤与微纤间的微裂缝开始扩展,材料表面出现纤维化现象,此时微纤束之间依次分离,继而分子链中的主价键受到平行于分子链的拉力开始断裂,材料抵抗伸长率能力增加,直至大部分微纤断裂,材料即发生脆性破坏^[16],这与图 7 中拉伸曲线骤降趋势保持一致。另外在图 7 中还发现拉伸强度在降低过程中存在一些残余变形,分析原因是由于 PP 试样脆性破坏的过程中,还有少数微纤未断裂。

通过扫描电镜 SEM 分别观察了 PP 土工格室条带试样断裂处放大 250 倍,1000 倍,5000 倍后的微观结

构形态,如图 9 所示。



图 8 PP 土工格室条带 3 种试样拉伸断裂模式

Fig. 8 Tensile fractured modes of three specimens of PP geocell strips

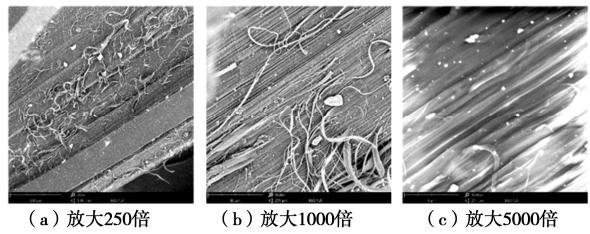


图 9 PP 土工格室条带断口的微观结构形态

Fig. 9 Microstructure of fracture of PP geocell strips

由图 9 可知,PP 土工格室条带拉伸后,部分分子链因发生沿拉伸方向的取向和延伸,故形成了一系列排列整齐的微纤束,但也有部分分子链仍以缠结无规卷曲状存在。此外分子链间在发生拉断分离后出现的小微纤也呈杂乱分布。

综合上述分析,一方面由图 8 可知 PP 土工格室条带在拉伸过程中未在夹具处因应力集中而发生断裂,另一方面由图 7 可知 PP 土工格室 II 型-矩形试样强度大于 I 型-哑铃形试样的强度,这说明 PP 土工格室试样在试验时应力集中不明显,此外由强度比分析可知试样尺寸对强度影响较小。因此,在进行室内试验时,为降低 PP 土工格室条带的应力敏感性且确保测试结果的合理性,建议选用 III 型-矩形试样作为 PP 土工格室拉伸试验的试样。

2.3 PET 土工格室条带拉伸试验结果

PET 土工格室条带 3 种试样的拉伸试验曲线、试验数据分别如图 10、表 4 所示。

由图 10 分析可知,3 种试样的拉伸曲线变化趋势大致相同,表现为在拉伸试验初期随伸长率的增长,抗拉强度近似呈线性增加,在达到一定伸长率后表现出硬化的特点。伸长率继续增加到某值时,拉伸强度

开始降低并迅速降为 0, 在拉伸试验过程中未出现明显的屈服点。3 种试样的抗拉强度、伸长率从大到小均为: III型-矩形、II型-矩形、I型-哑铃形。对比 3 种试样的拉伸曲线可以发现试样形状和尺寸对 PET 土工格室条带的抗拉强度和伸长率都有一定的影响。

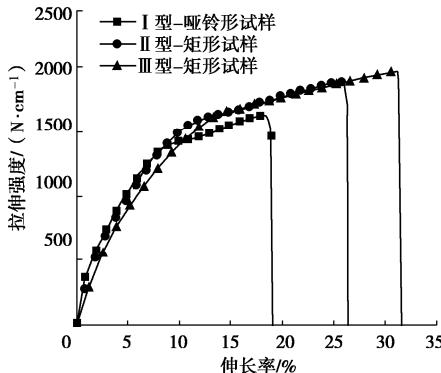


图 10 PET 土工格室条带 3 种试样形状拉伸曲线

Fig. 10 Tensile curves of three specimens of PET geocell strips

表 4 PET 土工格室条带拉伸试验结果

Table 4 Tensile test results of PET geocell strips

试样形状	抗拉强度 (N·cm⁻¹)	强度比 /%	伸长率 /%	伸长率之比 /%
I型-哑铃形	1620	82	17	50
II型-矩形	1860	94	26	76
III型-矩形	1987	—	34	—

由表 4 可知, II 型-矩形较 I 型-哑铃形试样的抗拉强度和伸长率更接近 III 型-矩形试样。对比 3 种试样的强度比与伸长率之比, I 型-哑铃形与 II 型-矩形试样的强度比、伸长率之比分别相差 12%, 26%, II 型-矩形与 III 型-矩形试样的强度比、伸长率之比分别相差 6%, 24%。分析可知试样形状与试样尺寸对 PET 土工格室条带的伸长率影响显著大于抗拉强度。对强度而言, 试样形状对强度的影响较试样尺寸的影响大, 因此不可忽略试样形状对试验结果的影响。

对比 II 型-矩形和 III 型-矩形两种试样, 结果表明试样宽度越大, 抗拉强度、伸长率越大。II 型-矩形与 III 型-矩形试样宽度比为 1:2.5, 但二者的强度比及伸长率之比分别为 1:1.06 和 1:1.32。

PET 土工格室条带 3 种试样的拉伸断裂模式, 如图 11 所示。由图 11 可知 3 种试样在标距区内均未出现明显颈缩的现象, 且断裂面较为平整。

分析上述两种情况, 是因为 PET 土工格室条带在拉力作用下, 晶区结构先发生沿拉力方向的变形, 此时变形为弹性形变。当继续受力时, 晶区破碎, 宏观上材料进入应变硬化阶段。由于 PET 的分子链由刚性的苯基、柔性的脂肪烃基组成, 且相邻的苯环不在同一个平面上, 因而使得 PET 分子链段不易旋转即分子结构刚性大, 所以具有很高的模量, 因此进入应变硬

化阶段后变形至一定程度时, 分子链突然发生断裂, 材料即发生破坏。

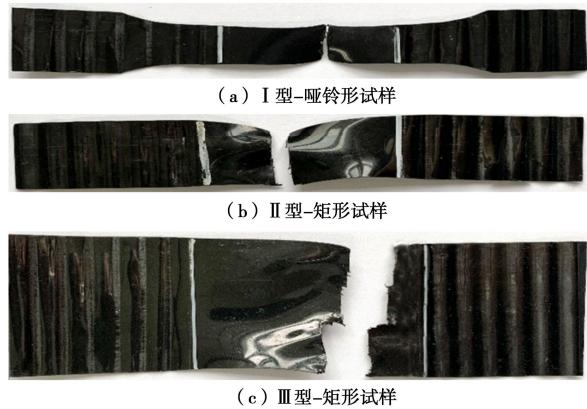


图 11 PET 土工格室条带 6 种试样的拉伸断裂模式

Fig. 11 Tensile fractured modes of three specimens of the PET geocell strips

通过扫描电镜 SEM 分别观察了 PET 土工格室条带试样断裂处放大 250 倍, 1000 倍, 5000 倍后的微观结构形态, 如图 12 所示。

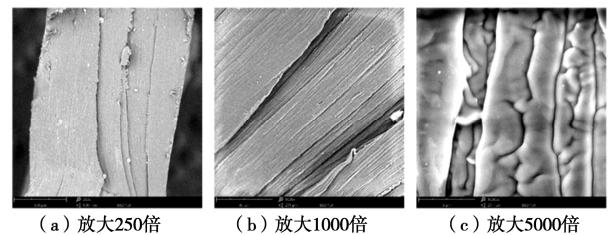


图 12 PET 土工格室条带断口的微观结构形态

Fig. 12 Microstructure of fracture of PET geocell strips

由图 12 可知, PET 土工格室条带断裂面较平滑, 主要由于其自身材质的原因。此外 PET 经拉伸取向后呈堆积片状结构, 断口截面无明显塑性屈服变形, 但是 PET 材料的破坏是介于脆性断裂和韧性断裂之间的一种破坏, 属于硬韧性的破坏。

综合上述分析, 由图 11 可知 PET 土工格室条带在拉伸过程中未在夹具处发生断裂, 且由图 10 可知 PET 土工格室 II 型-矩形试样强度大于 I 型-哑铃形, 说明 PET 土工格室试样在试验时应力集中不明显。此外由强度比分析可知试样形状对强度影响较小。因此, 在进行室内试验时, 为确保测试结果的合理性且方便取样, 建议选用 III 型-矩形试样作为 PET 土工格室拉伸试验的试样。

2.4 HDPE、PP、PET 土工格室条带试验结果对比

由 2.1 节~2.3 节中 HDPE、PP、PET 土工格室条带试样的拉伸力学特性分析可知, I 型-哑铃形和 II 型-矩形试样的抗拉强度和伸长率均小于 III 型-矩形试样。PP、PET 土工格室条带试样的抗拉强度、伸长率表现为随试样宽度增大而增大, 而 HDPE 土工格室条

带为伸长率增大，抗拉强度变化不大。

不同试样形状及尺寸的土工格室条带之所以强度不同是因为 PP 和 PET 土工格室条带破坏接近脆性破坏。条带试样在拉伸过程中，PP、PET 土工格室条带试样内部会出现银纹或空洞，银纹进一步扩展变为裂缝，并很快发生断裂，即具有较强的应力敏感性，在伸长率一定的条件下，试样动态破坏时的名义强度随着试样宽度的增加而增大。而 HDPE 土工格室条带虽然经过挤出取向，属于半晶聚合物，但伸长率 - 抗拉强度曲线仍符合结晶型聚合物，即具有一定的韧性，分子链运动发生强迫高弹形变，强度及伸长率取决于颈缩的出现时间和可延伸长度，在颈缩形成和逐渐发展的过程中，颈缩处截面积变小，真应力增大，剪切屈服进一步发展，分子之间会发生滑脱或者分子主价键发生断裂，消耗了大量的变形能和断裂能，随着颈缩的延长逐渐破坏，具有较低应力敏感性。在伸长率一定的条件下，试样动态破坏时的名义强度不随试样宽度的增加而增大。具体表现为，II 型-矩形试样的曲线与 III 型-矩形试样拟合度较高。

HDPE、PP、PET 3 种土工格室 III 型-矩形试样抗拉强度 - 伸长率对比曲线如图 13 所示。

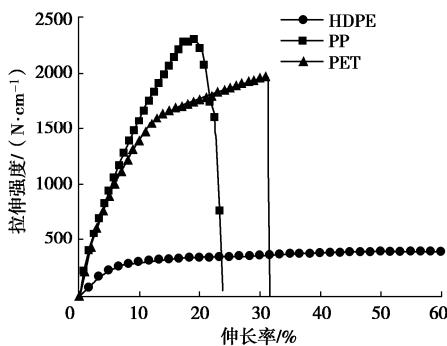


图 13 HDPE、PP、PET 土工格室条带伸长率 - 拉伸强度曲线

Fig. 13 Plot of elongation versus tensile strength of the HDPE, PP and PET geocell strips

由图 13 可知，PP 土工格室条带的伸长率在 3 种材料土工格室条带中最小，HDPE 土工格室条带伸长率最大，PET 土工格室条带伸长率介于两者之间。从强度考虑，PP 土工格室条带抗拉强度最大，PET 土工格室条带略低于 PP 土工格室条带抗拉强度，HDPE 土工格室条带强度最小。综合强度、伸长率分析可知，PP 土工格室条带具有显著的强度优势，HDPE 土工格室条带具有显著的变形优势，而 PET 土工格室条带兼具了 PP 和 HDPE 两者土工格室条带的优点，即既可满足强度的要求，又可满足变形的要求。

3 种材料土工格室条带之所以强度不同，是与生产工艺有关。PP、PET 土工格室条带的生产工艺为拉

伸型，而 HDPE 土工格室条带为挤出型。PP、PET 土工格室条带在成型过程中沿着一个方向拉伸，则其中的分子链会沿着拉伸方向作整齐、择优排列，从而使分子间作用力增加，故在拉伸方向的拉伸强度会显著提高。而 HDPE 土工格室条带为挤出型，即在成型中没有拉伸定向，故分子链未发生变化或变化很小。因此 HDPE 土工格室条带的抗拉强度明显低于 PP、PET 土工格室条带。

3 结 论

本文通过单轴拉伸试验，分别对 HDPE、PP、PET 土工格室条带的拉伸力学性能进行了一系列研究。研究了 I 型-哑铃形试样、II 型-矩形试样和 III 型-矩形试样对强度和变形特性的影响，并对土工格室条带的断裂处进行了微观分析，最后给出进行室内试验时建议选用的土工格室试样，便于今后评估和提升土工格室产品的质量以及提高土工格室加固工程质量的可靠性。主要得出以下结论：

(1) HDPE 土工格室条带在拉伸过程中有明显的屈服点。由于 I 型-哑铃形试样过渡区横截面积较标距区大且复杂，故在拉伸过程中拉伸曲线呈现出明显的二次增加趋势，此外还与 HDPE 土工格室条带的生产工艺有关。II 型-矩形和 III 型-矩形试样拉伸破坏时在细颈扩展部位与拉伸方向约成 45° 角的肩型斜面。

(2) PP、PET 土工格室条带在拉伸过程中均未出现明显的屈服点。PP 土工格室条带拉伸破坏后，试样表面由光滑变为细丝状。PET 土工格室条带拉伸断裂后断裂面较为平整。

(3) HDPE、PP、PET 土工格室条带的伸长率均对试样形状敏感，且 I 型-哑铃形伸长率小于 II 型-矩形试样。试样形状、尺寸对 HDPE 土工格室条带的强度影响较小。PP、PET 土工格室条带的强度受试样形状影响较大，且 I 型-哑铃形强度小于 II 型-矩形试样。

(4) 扫描电镜下 HDPE、PP、PET 土工格室条带试样断口的微观结构形态呈现明显差异。HDPE 土工格室条带断口形貌丰富，粗糙，有明显的塑性屈服变形；PP 土工格室条带断口呈既有排列整齐的微纤束，也有杂乱分布小微纤。PET 土工格室条带断口较整齐无明显塑性屈服变形。PET 土工格室条带兼具了 PP 和 HDPE 两者土工格室条带的优点。

(5) HDPE、PP、PET 土工格室条带的应力集中现象不明显且具有一定的表征，故为了确保测试结果的合理性，建议土工格室条带进行室内拉伸试验时选用 III 型-矩形作为拉伸试样。

参考文献:

- [1] BIABANI M M, INDRARATNA B, NIMBALKAR S. Behaviour of geocell reinforced sub-ballast under cyclic loading[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2015, **141**(1): 109 - 119.
- [2] 孙州, 张孟喜, 姜圣卫. 条形荷载下土工格室加筋砂土路堤模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2015, **37**(增刊2): 170 - 175. (SUN Zhou, ZHANG Meng-xi, JIANG Sheng-wei. Model tests on sand embankment reinforced with geocell subjected to strip loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, **37**(S2): 170 - 175. (in Chinese))
- [3] NETO J O A. Application of the two-layer system theory to calculate the settlements and vertical stress propagation in soil reinforcement with geocell[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2019, **47**(1): 32 - 41.
- [4] IMAN M, MAHMOUD G, REZA Z. Stability analysis of geocell-reinforced slopes using the limit equilibrium horizontal slice method[J]. International Journal of Geomechanics, 2017, **17**(9): 06017007.
- [5] SONG F, LIU H, MA L, et al. Numerical analysis of geocell-reinforced retaining wall failure modes[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2018, **46**(3): 284 - 296.
- [6] 刘蓓蓓, 张孟喜, 王东. 基于强度折减法的土工格室加筋路堤稳定性分析[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2018, **24**(2): 287 - 295. (LIU Bei-bei, ZHANG Meng-xi, WANG Dong. Stability analysis of geocell reinforced embankment with strength reduction method[J]. Journal of Shanghai University(Natural Science Edition), 2018, **24**(2): 287 - 295. (in Chinese))
- [7] 彭艾鑫, 张孟喜, 朱华超. 高强土工格室加筋砂土性状的三轴试验[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2017, **23**(4): 590 - 599. (PENG Ai-xin, ZHANG Meng-xi, ZHU Hua-chao. Triaxial test of high strength geocell reinforced soil[J]. Journal of Shanghai University (Natural Science Edition), 2017, **23**(4): 590 - 599. (in Chinese))
- [8] 赵明华, 陈大兴, 刘猛, 等. 考虑土拱效应影响的路堤荷载下土工格室加筋体变形分析[J]. 岩土工程学报, 2020, **42**(4): 601 - 609. (ZHAO Ming-hua, CHEN Da-xing, LIU Meng, et al. Deformation analysis of geocell-reinforced body under embankment load considering soil arch effect[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, **42**(4): 601 - 609. (in Chinese))
- [9] 高昂, 张孟喜, 刘芳, 等. 分级循环荷载下土工格室加筋路堤模型试验研究[J]. 岩土力学, 2016, **37**(8): 2213 - 2221. (GAO Ang, ZHANG Meng-xi, LIU Fang, et al. Model experimental study of embankment reinforced with geocells under stepped cyclic loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, **37**(8): 2213 - 2221. (in Chinese))
- [10] 晏长根, 顾良军, 杨晓华, 等. 土工格室加筋黄土的三轴剪切性能[J]. 中国公路学报, 2017, **30**(10): 17 - 24. (YAN Chang-gen, GU Liang-jun, YANG Xiao-hua, et al. Triaxial shear property of geocell-reinforced loess[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, **30**(10): 17 - 24. (in Chinese))
- [11] 赵明华, 龙军, 张玲, 等. 不同型式复合地基试验对比分析[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(4): 611 - 618. (ZHAO Ming-hua, LONG Jun, ZHANG Ling, et al. Comparative analysis of model tests on different types of composite foundations[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(4): 611 - 618. (in Chinese))
- [12] 杨利. 用土工格室加固的粗粒土力学特性研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2013. (YANG Li. Study on Mechanical Properties of Coarse Grained Soil Reinforced with Geocell[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013. (in Chinese))
- [13] 李俊伟, 黄宏伟. 土工格室 HDPE 条带拉伸应变率相关特性[J]. 建筑材料学报, 2008, **11**(1): 47 - 51. (LI Jun-wei, HUANG Hong-wei. Strain rate dependent tensile behavior of hdpe geocell strip[J]. Journal of Building Materials, 2008, **11**(1): 47 - 51. (in Chinese))
- [14] LIU Y, DENG A, JAKSA M. Failure mechanisms of geocell walls and junctions[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2019, **47**(2): 104 - 120.
- [15] 张雯静, 王鸿博, 傅佳佳, 等. I型-哑铃形试样在纳米纤维膜拉伸性能测试中的应用探讨[J]. 材料导报, 2013, **27**(增刊2): 16 - 19. (ZHANG Wen-jing, WANG Hong-bo, FU Jia-jia, et al. Investigation on application of dumbbell-shaped specimen in tensile property test of nanofiber membrane[J]. Materials Review, 2013, **27**(S2): 16 - 19. (in Chinese))
- [16] 刘杰. 塑料土工格栅拉伸性能及工艺研究[D]. 济南: 山东大学, 2015. (LIU Jie. The Tensile Property and Technology Research of Plastic Geogrid[D]. Jinan: Shandong University, 2015. (in Chinese))