

抗滑桩联合土工格室的岸坡加固机理及计算模型*

李亚生^{1,2}, 周翠英^{1,2}, 张惠明²

(1. 中山大学工学院, 广东 广州 510275;

2. 中山大学岩土工程与信息技术研究中心, 广东 广州 510275)

摘要: 土工格室是为改善土体或填筑材料在结构和功能方面的特性而设计的一种三维立体网状侧向约束加筋体系。在边坡岸坡的加固中, 土工格室一直被作为坡面的防护材料来使用, 限制了其应用与发展。根据土工格室的这一特点, 在岸坡加固中, 探讨了抗滑桩联合土工格室的岸坡加固新模式, 分析其作用机理, 包括土工格室的紧箍作用及其梁板效应、水平摩擦及抗拉拔作用、抗剪作用等; 根据土工格室复合结构层的特点, 将其看作具有一定刚度的梁板, 建立了抗滑桩联合土工格室加固岸坡的计算模型, 并进行了求解和参数讨论。最后, 将模型应用于实际工程中, 验证了该加固模式和力学模型的适用性。

关键词: 岸坡; 抗滑桩; 土工格室; 加固机理; 计算模型

中图分类号: TU433 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2011) 05-0034-06

Reinforcement Mechanism and Calculation Model of Geocell with Anti-Slide Pile on Bank Slope

LI Yasheng^{1,2}, ZHOU Cuiying^{1,2}, ZHANG Huiming²

(1. School of Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;

2. Research Center for Geotechnical Engineering and Information Technology, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: Geocell is a kind of three-dimensional net support system designed to improve the capability of soil by lateral restrains. It is generally used as superficial reinforcing material to support slope that restricts its application. On the basis of its characteristic, a new reinforcement model of geocell with anti-slide pile is put forward. The reinforcement mechanism of model is analyzed in whose practice areas include lateral restrains, board effect, horizontal friction, anti-pull and Anti-shearing. Then, the geocell reinforced mat can be simplified to be a kind of elastic board. The calculation model of geocell with anti-slide pile is built for solution and the parameters of the model are studied. Finally, the model is applied to actual project to validate its' applicability.

Key words: slope; anti-slide pile; geocell; reinforcement mechanism; calculation model.

土工格室是 20 世纪 70 年代末 80 年代初, 美国工程师团 (U. S. Army Corps of Engineers) 在对

各种网格多孔状加固形式研究基础上, 为改善土体或填筑材料在结构和功能方面的特性, 而开发出的

* 收稿日期: 2011-03-22

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目 (41030747); 国家自然科学基金面上资助项目 (40672194); 国家 863 高技术计划资助项目 (2007AA11Z112); 教育部博士学科点基金资助项目 (20060558060, 20090171110044); 广东省自然科学基金重点资助项目 (06104932, 013188); 广东省科技计划资助项目 (2010A030200007); 广东省高层次人才计划资助项目 (5221001); 广州市科技支撑计划资助项目 (4205234); 中山大学后备重点课题 (1132169)

作者简介: 李亚生 (1977 年生), 男, 博士研究生; 通讯作者: 周翠英; E-mail: ueit@mail.sysu.edu.cn

三维立体网状侧向约束加筋体系—土工格室侧向约束体系 GCS (Geocell Confinement System)^[1]。从最初利用铝箔和浸透树脂的纸作为格室材料, 发展成为由高分子聚合物宽条带经强力焊接而成^[2]。其特点是伸缩自如, 施工方便, 使用时只需张开格室填充土石材料并压实即可形成具有一定厚度的加筋垫层。通过改变格室的深度, 格室板块组合等, 可获得刚性或半刚性的板块, 它广泛应用于软基处理、边坡防护、挡土墙的修建、桥头跳车的处理、沙漠路基处理、滩头处理及机场建设等^[3-4]。与此同时, 对土工格室的理论研究也逐步开展, 并取得了一些成果, 比较典型的有: Bathurst 等^[5]根据 Henkel 和 Gilbertd 的橡皮膜理论进行了土工格室和土相互作用的研究, 得出了土体视黏聚力增加的结论; Rqjagopalk^[6]作了进一步的实验分析, 证实了该结论的正确性; 国内的顾良军, 杨晓华, 林法力^[7-8]开展了土工格室结构层抗变形性能模型试验及拉伸性状试验, 对土工格室结构层的性能有了进一步认识; 俞永华等^[9]对土工格室的桥头楔形柔性搭板作用性状进行了有限元仿真研究; 赵明华等^[10]进行了土工格室+碎石桩复合地基的承载机理分析及其试验研究; 孙希珩等^[11]对土工格室在土质边坡防护中的应用进行了探讨。但目前对土工格室的研究还远远落后于工程实践。码头岸坡等边坡的加固模式及其研究, 一直以来都是岩土工程界关注的焦点^[12-14], 对岸坡的加固中, 土工格室一直被作为坡面的防护材料来使用和研究^[15-17], 抗滑加固功能即全部由抗滑桩、预应力锚索等来承担, 这限制了土工格室的应用。鉴于此, 结合珠海一杂件码头的实际情况, 提出了一种联合抗滑桩的土工格室加固岸坡新方法, 分析了联合抗滑桩的土工格室作用机理, 探讨了其计算模型和方法, 通过应用验证了该模型的适用性。

1 岸坡加固机理

采用抗滑桩联合土工格室加固岸坡, 即在传统抗滑桩加固岸坡的基础上, 于坡顶或一定深度处的土中水平铺上一层或多层土工格室, 并将其和抗滑桩相交处固定连接, 以此利用土工格室和抗滑桩、土的相互作用联合加固岸坡, 其加固模式如图 1 所示, 土工格室示意图如图 2 所示。

土工格室不同于一般的平面加筋材料, 其为三维立体结构, 和土体等的相互作用比一般的加筋材料更为复杂, 一般认为其有强大的当量侧向约束力、网兜效应及应力扩散和柔性筏基效应。联合

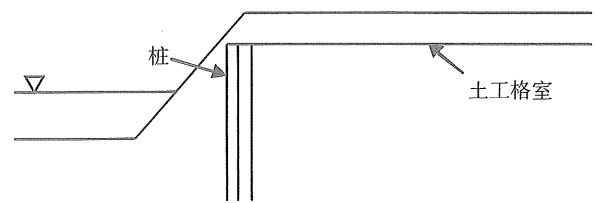


图1 联合抗滑桩的土工格室加固岸坡模式
Fig. 1 Reinforcement pattern of geocell with anti-slide pile on bank slope

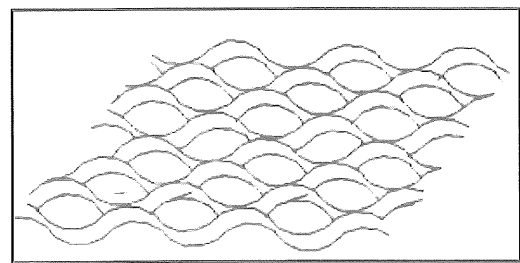


图2 土工格室示意图
Fig. 2 Sketch map of geocell

抗滑桩的土工格室加固岸坡机理体现在以下方面。

1.1 土工格室的紧箍作用及其梁板效应

土工格室里铺填的土石材料, 在被夯实及其上土体压力和载荷的作用下, 产生侧向膨胀, 对土工格室的侧壁向外挤压, 从而导致格室侧壁对其内土石材料产生侧向约束力和竖向摩擦力, 如图 3 所示。侧向约束力的极限值主要由格室材料的抗拉强度和焊缝强度控制, 由于土工格室的上两项强度都很高, 因而在上部荷载的作用下, 其可以提供很大的侧向约束力和竖向摩擦力。

侧向约束力的实际值由格室内土石材料的变形及格室材料的模量等决定, 对土体来说, 这相当增加了一个附加的侧向压力 $\Delta\sigma_3$, 根据 Bathurst 等^[5]对 Henkel 和 Gilbertd 橡皮膜理论 (The Rubber

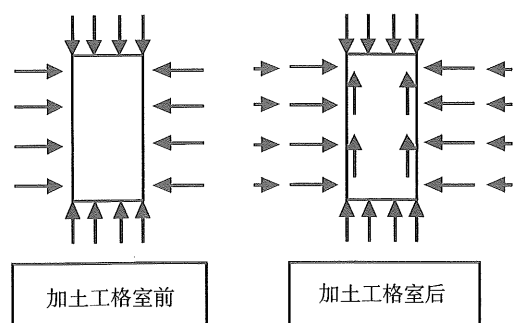


图3 土工格室的侧向约束力及竖向摩擦力
Fig. 3 Lateral constraint force and vertical frictional force of geocell

Membrane Theory) 的分析, 可得

$$\Delta\sigma_3 = \frac{2M\varepsilon_c}{d_0} \cdot \frac{1}{1-\varepsilon_c}, \quad \varepsilon_c = \frac{(1-\sqrt{1-\varepsilon_a})}{1-\varepsilon_a} \quad (1)$$

式中, M 为土工格室材料模量, kN/m ; d_0 为格室初始直径; ε_c 为格室允许的径向应变; ε_a 为格室的轴向应变。

对土工格室加固的该层土体, 由于附加侧向压力 $\Delta\sigma_3$ 的存在, 相当于改善了其性能, 以黏聚力的增量形式表示, 称之为“视黏聚力”, 其可表示如下

$$\Delta c = \frac{\Delta\sigma_3}{2} \text{tg}\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right) \quad (2)$$

式中, φ 为土石材料的内摩擦角,

上述的作用机理, 使土工格室里面的土石材料, 相对格室外的土体更致密, 其和土工格室材料作为一整体, 具有一定的抗压、抗弯、抗拉、抗剪能力, 可当做梁板考虑。

格室侧壁对土石材料的竖向摩擦力最大值与格室材料和土石材料间的摩擦角及侧向压力相关, 表示如下

$$\tau = (\sigma_3 + \Delta\sigma_3) \cdot \text{tg} \varphi \quad (3)$$

式中, $\sigma_3 + \Delta\sigma_3$ 为侧向总压力, φ 为格室材料与其内土石材料间的摩擦角。

竖向摩擦力使竖向载荷部分地传递给土工格室, 再由土工格室及其相邻致密的土体向外传递, 这也是土工格室复合结构层可当作梁板考虑, 分散竖向载荷并向远处传递的原因。部分岸坡的重力及载荷传到坡后远处的土体中, 部分岸坡的重力及载荷通过土工格室传到抗滑桩上, 再通过桩传到桩底的持力层中, 这相当于减少了岸坡的高度, 即“削坡”, 同时, 增加了抗滑桩的轴向压力, 有利于提高其抗弯能力。

1.2 土工格室复合结构层的水平摩擦及抗拉拔作用

土工格室层以上的土体, 一般比较薄, 相对格室层基本没滑动的趋势, 可认为其和格室层间不存在摩擦力, 而土工格室层以下的土体, 相对土工格室层, 有向坡前滑动的趋势, 这必然导致格室层对其有向坡后的摩擦力, 由此增加了抗滑力 (矩), 该摩擦力可表达为

$$f = c + \sigma_1 \text{tg} \varphi \quad (4)$$

式中, c 为格室层与其下土体间的黏聚力, σ_1 为格室层对下面土体的竖向应力, φ 为格室层与其下土体间的摩擦角, 因为格室层中, 主要是格室内的土石材料和其下土体接触, 格室片材只占很小的比

例, 因此, 其黏聚力和摩擦角, 其实就是土石材料和土体间的黏聚力和摩擦角。

抗滑桩在岸坡土体的作用下, 上部有向坡前挠曲的趋势, 对格室有拉拔力, 反之, 格室对其有抗拉拔的作用, 该作用力改善了抗滑桩的内力分布, 提高了其抗滑能力, 显示出基于抗滑桩的土工格室作用模式有一定的优越性。

土工格室复合结构层的锚固抗拔力即由 (潜在) 滑动面后土体对其摩擦力提供。

1.3 土工格室复合结构层的抗剪作用

在岸坡的滑动面或潜在滑动面处, 水平横铺的土工格室复合结构层会受滑坡推力的剪切作用, 该反力即为格室复合结构层的抗剪作用力, 其极限值与格室复合结构层的抗剪模量相关。

2 联合抗滑桩的土工格室加固岸坡模型

由以上对土工格室加固机理的分析可知, 土工格室复合结构层可把其上的土压及载荷分散传递到坡后远处及坡前的桩上, 从内部作用看, 是由于格室的紧箍作用, 导致格室和其内土石材料紧密结合, 并通过竖向的摩擦力, 将竖向载荷向外扩散。从整体上看, 可将土工格室和其内土石材料视为有一定抗压、抗拉、抗弯及抗剪能力的均质等代梁板, 根据梁板理论建立其计算模型。

2.1 模型的建立

把土工格室复合结构层铺设于岸坡中, 沿岸坡方向一般比较长, 岸坡及格室均处于平面应变状态, 可把岸坡及格室复合结构层当作一维地基梁考虑, 取单位宽度计算。将土工格室和桩的连接点处作为原点, 取坐标轴如图 4, 根据弹性地基梁的理

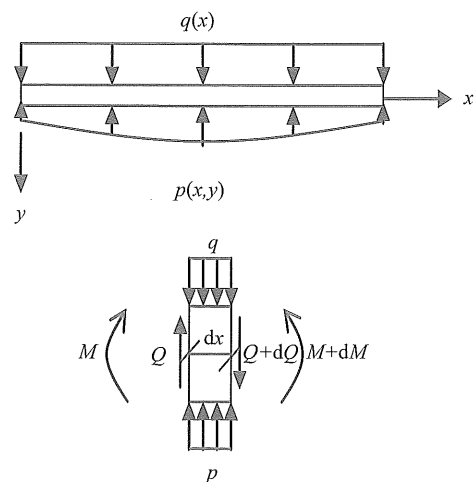


图 4 土工格室复合结构层的力学模型

Fig. 4 Mechanical model of composite geocell layer

论, 可建立微分方程。沿梁长 x 方向取微分段梁 dx 进行分析, 其上作用分布荷载 q 和地基反力 p , 根据微分梁单元竖向 (y 方向) 力及力矩的平衡, 则

$$\sum Y = 0, Q - (Q + dQ) + p \cdot dx - q \cdot dx = 0$$

得

$$\frac{dQ}{dx} = p - q \quad (5)$$

$$\sum M = 0, -M - Q \cdot dx - p \cdot dx \cdot \frac{dx}{2} +$$

$$(M + dM) + q \cdot dx \cdot \frac{dx}{2} = 0$$

略去二阶微量, 整理后得

$$\frac{dM}{dx} = Q \quad (6)$$

而梁的挠曲微分方程为

$$EI \frac{d^2 y}{dx^2} = -M \quad (7)$$

将 (7) 式进行二阶微分, 再将式 (5)、(6) 代入, 最后可得

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} + p = q \quad (8)$$

对整根梁, 即有

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} + p(x, y) = q(x) \quad (9)$$

式中, E 为格室复合结构层的变形模量, I 为惯性矩, EI 为抗弯刚度, $q(x)$ 为上面土层等对格室层的载荷, $p(x, y)$ 为格室层下面土体单位面积的地基反力。

将土体当作线弹性体考虑, 根据土工格室横放的特点, 其与土接触处均为同一高度, 可认为其下各处土的反力系数是一样的, 也就是, 土的反力和 x 无关, 而格室层之上的土压力为定值, 由此

$$p(x, y) = ky, \quad q(x) = q$$

k 为地基反力系数。

(9) 式可化简为

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} + ky = q \quad (10)$$

式 (10) 的一个特解为 $y = q/k$, 而微分方程

$EI \frac{d^4 y}{dx^4} + ky = 0$ 的通解为

$$y = e^{\beta x} (c_1 \cos \beta x + c_2 \sin \beta x) + e^{-\beta x} (c_3 \cos \beta x + c_4 \sin \beta x)$$

所以式 (10) 的通解为

$$y = e^{\beta x} (c_1 \cos \beta x + c_2 \sin \beta x) + e^{-\beta x} (c_3 \cos \beta x + c_4 \sin \beta x) + \frac{q}{k} \quad (11)$$

式中, $\beta = \sqrt[4]{k/4EI}$ 。

根据基于抗滑桩的土工格室受力特点, 可确定边界条件如下:

I. 土工格室和抗滑桩的连接处, 由于桩群在该处与土工格室强力连接, 桩的弹性模量很大, 可考虑无竖向位移, 无转动: 即挠度 $y=0$, 转角 $\theta=0$;

II. 土工格室另一端在坡后远处, 为自由端, 弯矩 $M=0$, 剪力 $Q=0$ 。

由边界条件 II, $x \rightarrow \infty$,

$$M = -EI \frac{d^2 y}{dx^2} = 0, \quad Q = -EI \frac{d^3 y}{dx^3} = 0, \quad \text{得}$$

$c_1=0, c_2=0$, 即式 (11) 为

$$y = e^{-\beta x} (c_3 \cos \beta x + c_4 \sin \beta x) + \frac{q}{k} \quad (12)$$

再由边界条件 I, $[y]_{x=0} = c_3 + q/k = 0, [\theta]_{x=0} =$

$$[-\frac{dy}{dx}]_{x=0} = \beta (c_3 - c_4) = 0, \quad \text{得}$$

$$c_3 = c_4 = -q/k$$

最后可求得:

$$y = \frac{q}{k} [e^{-\beta x} (-\cos \beta x - \sin \beta x) + 1] \quad (13)$$

由公式 (13), 即可求得土工格室复合结构层的挠度变形, 也就是加了土工格室复合结构层后岸坡在该处的沉降, 格室下面土体单位面积上的地基反力可由 $p(x, y) = ky$ 求得, 土工格室层和其下土体的摩擦力即可由式 (4) 求得, 此时 $\sigma_1 = p(x, y) = ky$ 。由于土工格室复合结构层的存在, 土工格室上的载荷从 q 减少为 $p(x, y)$, 体现了土工格室紧箍作用及其梁板效应, 也即“削坡”效应。

2.2 计算参数的确定

在模型求解中, 主要参数有 k, E, I , 而 β 可由前三者计算得到, 所以, 只确定前三者即可。其中, k 为土的地基反力系数, 可由现场试验、荷载板试验、室内三轴试验或室内固结试验成果获得, 在试验条件不足时, 也可根据经验估计确定; I 为土工格室复合结构层的惯性矩, 由其几何尺寸可确定 $I = \frac{bh^3}{12}$, b 为土工格室复合结构层宽度, 这里取单位宽度 $b = 1 \text{ m}$, h 为土工格室复合结构层高度; E 是土工格室结构层的复合模量, 目前这方面的研究很少, 谢永利等^[18]通过室内试验, 将加了土工格室后的复合结构层与不加格室的土进行比较后得到其模量的提高幅度为: 填料为粉性黄土时, 模量提高到 1.5 倍左右, 填料为砂砾土时, 模量提高到 2~3 倍, 甚至更大。黏聚力越小, 内摩擦角

越大的材料,提高的幅度越大,在实际应用中,对不同的土体应据此估算不同的提高系数。

3 工程应用

本实例为珠海市洪湾港区一期工程,该工程位于珠海市南屏镇洪湾工业区珠江口西岸,设计岸线总长约391 m,其中150 m岸线曾处理过作为件杂泊位,2005年8月,件杂泊位150 m岸线发生深层滑坡,随后进行了岸坡的加固处理。

用本文提出的加固模式进行处理:沿150 m岸线坡顶处打下几排管桩,土工格室也沿岸线铺满,其与管桩相交处用混凝土浇筑套固,垂直岸坡方向铺到坡后35 m处,格室底铺设砂垫层,格室里充填碎石,并用中粗砂填缝,格室上填筑地基土1.3 m,容重 18 kN/m^3 ,即 $q=23.4 \text{ kPa}$,格室下面地基土的反力系数取 $k=k \cdot b=5 \text{ MPa}$,格室结构层取其内部碎石材料弹性模量的3倍计算,即 $E=150 \text{ MPa}$,格室层高0.2 m, $I=0.008 \text{ m}^4$, $\beta=1.01 \text{ m}^{-1}$ 。用本文模型的公式计算,和实测值进行对比,如图5所示。

可见计算值和实测值符合得较好。计算值稍偏小,究其原因,是由于填土后一段时间再测量,实测值中,还包括土的固结沉降部分,而本文的计算,是加载后的瞬时沉降,不包括固结沉降部分。

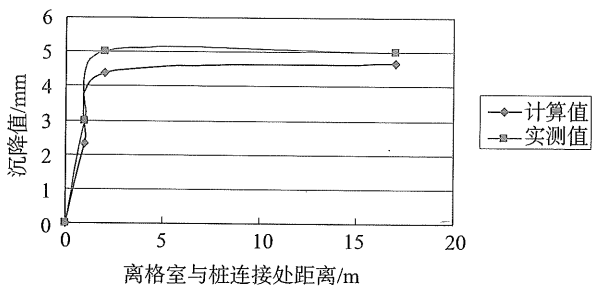


图5 计算值和实测值对比图

Fig. 5 Compared figure of measured values and calculated values

4 结论

1) 本文在土工格室的工程应用基础上,针对其在边坡加固的应用中,主要被作为坡面防护材料使用的现状,根据其性能特征,提出了一种新型的土工格室加固岸坡方法:即联合抗滑桩的土工格室加固岸坡新模式。

2) 分析了土工格室在该加固模式中的作用机理,即土工格室的紧箍作用及其梁板效应;土工格室复合结构层的水平摩擦及抗拉拔作用;土工格室

复合结构层的抗剪作用。并通过对其作用机理的分析阐述了该加固模式的优越性。

3) 根据土工格室复合结构层的性能,将其视为有一定抗压、抗拉、抗弯及抗剪能力的均质等代梁板考虑,根据梁板理论建立其核心计算模型。其后根据边界条件对该模型进行求解,并由实际的工程例子验证了该模型的可行性。

4) 土工格室在工程的应用,尤其是岸坡加固中的应用,其使用模式及理论分析还需进一步研究;涉及到土工格室一些参数的取值,也有待进一步研究,但初步的研究表明,联合抗滑桩的土工格室加固岸坡模式,是岸坡加固中值得采取的新加固模式。

参考文献:

- [1] 李俊伟. 土工格室加筋软岩巷道底板试验研究及理论分析[D]. 上海: 同济大学, 2006.
- [2] 王协群, 王陶, 王钊. 土工格室加筋地基的承载力[J]. 长江科学院院报, 2004, 21(2): 12-17.
- [3] 刘宗耀, 杨灿文, 王正宏, 等. 土工合成材料工程应用手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1994.
- [4] 《地基处理手册》编写组. 地基处理手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1988.
- [5] BATHURST R J, KARPURAPU R. Large scale triaxial tests on geocell reinforced granular soils[J]. Geotechnical Testing Journal, 1993, 16(3): 296-303.
- [6] RAJAGOPAL K, KRISHNASWAMY N R, MADHAVI L G. Behaviour of sand confined with single and multiple geocells[J]. Geotextiles and Geomembranes, 1999(17): 171-184.
- [7] 顾良军, 杨晓华. 土工格室结构层拉伸性状试验研究[J]. 公路交通科技, 2007, 24(1): 39-42.
- [8] 杨晓华, 林法力. 土工格室结构层抗变形性能模型试验[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2006, 26(3): 1-4.
- [9] 俞永华, 谢永利, 杨晓华. 桥头楔形柔性搭板作用性状的仿真[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2004, 24(6): 29-32.
- [10] 赵明华, 杨明辉, 吴亚中, 等. 土工格室+碎石桩复合地基承载机理及其试验研究[J]. 公路交通科技, 2005, 22(11): 6-9, 29.
- [11] 孙希珩, 慕长江, 杨晓华. 土工格室在兰烟线土质边坡防护中的应用[J]. 路基工程, 1999, 85(4): 56-57.
- [12] 周翠英, 刘祚秋, 尚伟, 等. 膨胀土和软岩边坡加固优化设计的几个关键问题——以东深供水改造工程中BⅢ_2边坡为例[J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2003, 42(3): 127-128.

(下转第49页)

- Polym Phys, 2007, 45: 2167 – 2176.
- [7] LIAO R, YANG B, YU W, et al. Isothermal cold crystallization kinetics of polylactide/nucleating agents [J]. J Appl Polym Sci, 2007, 104: 310 – 317.
- [8] TSUJI H, KAWASHIMA Y, TAKIKAWA H, et al. Poly (*L*-lactide)/nano-structured carbon composites: Conductivity, thermal properties, crystallization, and biodegradation [J]. Polymer, 2007, 48: 4213 – 4225.
- [9] PAN P, ZHU B, DONG T, et al. Poly (*L*-lactide)/layered double hydroxides nanocomposites: preparation and crystallization behavior [J]. J Polym Sci Part B: Polym Phys, 2008, 46: 2222 – 2233.
- [10] PAN P, LIANG Z, CAO A, et al. Layered metal phosphonate reinforced poly (*L*-lactide) composites with a highly enhanced crystallization rate [J]. ACS Appl Mater Interfaces, 2009, 1: 402 – 411.
- [11] NAM J Y, OKAMOTO M, OKAMOTO H, et al. Morphology and crystallization kinetics in a mixture of low-molecular weight aliphatic amide and polylactide [J]. Polymer, 2006, 47: 1340 – 1347.
- [12] KAWAMOTO N, SAKAI A, HÖRIKOSHI T, et al. Nucleating agent for poly (*L*-lactic acid) – An optimization of chemical structure of hydrazide compound for advanced nucleation ability [J]. J Appl Polym Sci, 2007, 103: 198 – 203.
- [13] SCHMIDT S C, HILLMYER M A. Polylactide stereocomplex crystallites as nucleating agents for isotactic polylactide [J]. J Polym Sci Part B: Polym Phys, 2001, 39: 300 – 313.
- [14] YAMANE H, SASAI K. Effect of the addition of poly (*D*-lactic acid) on the thermal property of poly (*L*-lactic acid) [J]. Polymer, 2003, 44: 2569 – 2575.
- [15] ANDERSON K S, HILLMYER M A. Melt preparation and nucleation efficiency of polylactide stereocomplex crystallites [J]. Polymer, 2006, 47: 2030 – 2035.
- [16] TSUJI H, TAKAI H, SAHA S K. Isothermal and non-isothermal crystallization behavior of poly (*L*-lactic acid): Effects of stereocomplex as nucleating agent [J]. Polymer, 2006, 47: 3826 – 3837.
- [17] JOÃO F M. Structural evolution of the amorphous phase during crystallization of poly (*L*-lactic acid): A synchrotron wide-angle X-ray scattering study [J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 2007, 353 (26): 2567 – 2572.
- [18] SAWAI D, TAKAHASHI K, SASASHIGE A, et al. Preparation of oriented β – form poly (*L*-lactic acid) by solid-state coextrusion: effect of extrusion variables [J]. Macromolecules, 2003, 36 (10): 3601 – 3605.
- [19] 葛骏. 可生物降解高分子 PLLA/PHB 混合薄膜的结晶性及表面粗糙度的研究 [D]. 广州: 中山大学物理科学与工程技术学院, 2011.

(上接第 38 页)

- [13] 刘祚秋, 温少荣, 周翠英, 等. 桩、土、刚性承台相互作用下桩基内力计算新方法 [J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2004, 43(4): 33 – 37.
- [14] 张泽鹏, 朱凤贤, 黄放军, 等. 复杂地质条件下高边坡加固设计与综合治理研究——以梅河高速公路某高边坡治理为例 [J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2006, 45(4): 44 – 48.
- [15] RIMOLDI P, RICCIUTI A. Design method for three-dimensional geocells on slope [C] // Fifth International Conference on Geotextiles, Geomem-branes and Related Products. Singapore: [s. n.], 1994: 999 – 1002.
- [16] 晏长根, 杨晓华, 谢永利, 等. 土工格室对黄土路堤边坡抗冲刷的试验研究 [J]. 岩土力学, 2005, 26(8): 1342 – 1344, 1348.
- [17] 杨晓华, 王文生. 土工格室生态护坡在黄土地区公路边坡防护中的应用 [J]. 公路, 2004, 8: 179 – 182.
- [18] 谢永利, 俞永华, 杨晓华. 土工格室在处治路基不均匀沉降中的应用研究 [J]. 中国公路学报, 2004, 17(4): 7 – 10.