

竹子作为抗拉筋材加固软土路堤的应用研究

党发宁¹, 刘海伟¹, 王学武²

(1. 西安理工大学岩土工程研究所, 陕西 西安 710048; 2. 山西省水利水电工程建设监理公司, 山西 太原 030000)

摘要: 目前, 加筋土工程所采用的土工合成材料不是价格较高, 就是无法满足环保要求。为了响应国家关于建设节约型社会的倡导, 从寻找经济环保加筋材料的角度出发, 简要介绍了竹子的物理力学特性和防腐方法, 并在有限元软件 ABAQUS 中建立竹筋格栅路堤的三维模型, 分析土体固结和竹筋强度衰减对路堤安全系数的影响。发现在竹筋格栅完全失效之前, 土体固结作用已经可以将路堤的安全系数提高到满足规范要求, 从而验证在路堤工程中用竹子代替传统土工合成材料作为抗拉筋材, 力学指标和耐久性指标都能满足设计要求。

关键词: 竹子; 软土路堤; 固结; 有限元强度折减法; 耐久性

中图分类号: TU472.34

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2013)S2-0044-05

作者简介: 党发宁(1962-), 男, 陕西省富平县人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土工程数值分析, 计算力学等方面的研究与教学工作。E-mail: dangfn@mail.xaut.edu.cn。

Application of bamboo as tensile reinforcement to strengthening of embankment of soft soils

DANG Fa-ning¹, LIU Hai-wei¹, WANG Xue-wu²

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Shanxi Province water Conservancy and Hydropower Engineering Construction Supervision Company, Taiyuan 030000, China)

Abstract: At present, the geosynthetic materials for reinforced soil engineering have higher price, and are unable to meet the requirements of environmental protection. Actively responding to the call of constructing a conservation-minded society, from the perspective of searching for economic and environmental reinforced materials, the physical and mechanical properties and antiseptic method of bamboo are introduced. A three-dimensional model for Bamboo bar grille embankment is established in ABAQUS. The soil consolidation and bamboo reinforcement strength attenuation effect on the safety factor of embankment are analyzed. It is found that the effect of soil consolidation can raise the safety factor of embankment so as to satisfy the requirements of regulation. The application of bamboo instead of the traditional geotextile materials as the tensile reinforcement is feasible in reinforced engineering, and the mechanical and durability indices can meet the design requirements.

Key words: bamboo; embankment of soft soil; consolidation; FEM strength reduction method; durability

0 引言

近年来国民经济快速发展, 我国的基础设施建设及各项民生建设日新月异。但随之而来的负面效应同样明显, 雾霾笼罩天数不断增加, 影响范围不断扩大, 严重程度不断加深, 环境污染已成为全国瞩目又亟待攻关的难题。

自 2009 年 12 月哥本哈根气候变化大会以来, “低碳”理念已经被全球大多数国家接受并推崇, 各行各业人士都在思考和寻找与己有关的低碳减排方法。岩土工程界也一直探索在保证工程质量和耐久性的前提下, 用绿色环保材料代替传统建材。

近几年, 加筋土的应用范围和规模显著加大, 在

公路、水运、铁路、水利、市政、煤矿、林业等工程建设中都能看到它的身影, 社会效益醒目。但是大部分土工合成材料不仅价格昂贵, 还根本不能满足环保要求。而早在距今五六千年的陕西半坡村仰韶文化遗址中, 有许多简单房屋的墙壁和屋顶是利用草泥修筑而成; 在甘肃省玉门一带, 还保留有用砂、砾石和红柳或芦苇压叠而成的汉长城遗址^[1]。老祖宗这种选用抗拉性能较为突出的植物作为加筋材料的方法, 能否满足现代工程稳定性和耐久性的要求, 值得我们深思

基金项目: 国家自然科学基金项目(50879069); 水利部公益性行业科研专项(201201053-03); 陕西省黄土力学与工程重点实验室重点科研计划项目(09JS103)

收稿日期: 2013-06-07

和探索。如果可行，不但大大缩减了工程成本，而且对加筋土技术的可持续发展有着非凡的意义。

本文从“返璞归真”的角度出发，选取我国山区分布很广、最常见的植物竹子作为抗拉筋材，通过有限元数值模拟，探讨其运用于软土路堤加固的可能性。

1 竹子的工程力学性质

中国是竹类植物的起源中心，也是竹子资源最丰富的国家^[2]，素有“竹子王国”的美称。竹材具有生长快、产量高、成材早、材性好、用途广等很多优良特性。“咬定青山不放松，立根原在破岩中。千磨万击还坚劲，任尔东西南北风。”这是诗人郑燮歌颂竹子的著名诗篇，从中我们也可以看出竹材具有强度高、弹性好、性能稳定、密度适中、硬度大等特点，能广泛用于建筑工程。

1.1 竹子的物理力学参数

竹子力学性质主要为顺纹抗拉强度、顺纹抗压强度、顺纹剪切强度，以及顺纹静曲强度和弹性模量等^[3]。它的力学强度随着含水率的增高而降低，但如果竹子处于绝对干燥条件时，强度下降明显。就强度和成本而言，竹子被认为是自然界中效能最高的材料^[4-6]。Mously 对埃及的 3 个竹种的力学性质分析结果表明：竹材的抗弯强度、弹性模量、抗拉强度和抗压强度与山毛榉木材相当，竹杆的抗拉强度和压缩强度高，在建筑结构材料中尤其是空间桁架，可以代替木材和金属使用。

研究表明，竹龄与竹子的物理力学强度和机械性能有较密切的关系^[7]。一般就毛竹而言，密度、顺纹抗拉强度、径向和弦向抗弯强度等随竹龄的增加而增加，5~6 年达到最大值，干缩性随竹龄增加逐渐减少。2002 年吕韬等学者^[8]在西南交通大学土工实验室对 5~6 年生，胸高直径 50 mm 以上，竹壁厚度 4 mm 以上的毛竹的抗拉强度、直剪摩擦试验及弹性模量进行了测定。测得的抗拉强度及弹性模量都很高,综合考虑选取竹材的各种力学强度如表 1 所示。

表 1 竹子的力学强度

Table 1 Mechanical strength of bamboo							
指标	顺纹				横纹		抗弯
	抗拉	抗压	挤压	劈裂	径向抗压	弦向抗压	
强度/MPa	150	65	59	2.3	10.6	20	1157
弹性模量/GPa	1.16~1.19				—		

1.2 竹子的防腐

由图 1 可以看出竹子由不均匀分布的多种化学成分组成，除纤维素、半纤维素、木素等主要成分外，还含有较多的营养物质，其中蛋白质为 1.5%~6.0%，糖类为 2%左右，淀粉类为 2.02%~5.18%，脂肪和蜡质为 2.18%~3.55%。因此在储存、运输和使用过程中，竹子很容易发生菌腐、霉变和虫蛀，严重影响它的力学强度。为了提高竹子的有效利用率，延长其使用寿命，最大程度挖掘它的资源潜力，竹子的防腐工作显得尤为重要。

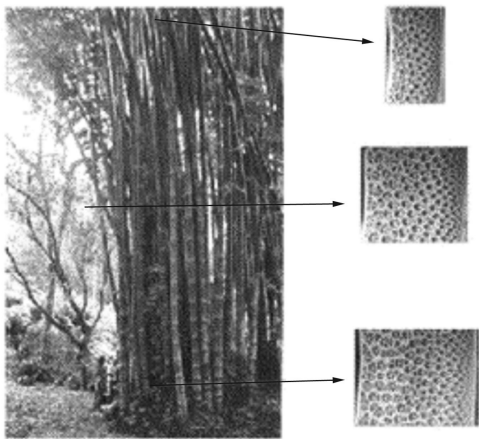


图 1 竹截面微观结构

Fig. 1 Microstructure of bamboo

随着科技的发展，已有许多国家对竹材的防腐处理方法进行了研究。据日本报导，由苯酚和甲醛缩合成为甲阶酚醛树脂，是一种低分子和低黏度的水溶性制剂，在对竹材进行防腐处理时渗透性良好，经热处理或酸处理后就变成一种不溶于水的三元结构高分子化合物，无味无毒，也不会渗出和挥发，具有永久性防腐的性能。南京林业大学采用 0.2%辛硫磷溶液浸渍竹制品 3 min，竹蠹虫 2~3 d 死亡，药效维持一年以上。此药剂低毒，药效较长，应用于生产是比较理想的防蛀剂。加 1%的添加剂（硼砂：硼酸=1：1）于 5%新洁尔灭溶液防止竹制品霉变，也取得较好的效果^[9]。

在竹子制作成竹筋的过程中，只要选取正确的防腐方法，必能有效保证竹筋的各项力学性能和耐久性。

2 Biot 固结理论

Biot 固结理论的基本假设为：①材料各向同性；②应力应变关系在最后平衡条件下具有可逆性；③应力应变关系是线性的；④小应变；⑤孔隙中的水是不可压缩的；⑥水中可以包含气泡；⑦水在多孔骨架中的流动遵从 Darcy 定律。得到以位移和孔隙压力表示的弹性问题的平衡微分方程为：

$$\left. \begin{aligned} -G\nabla^2 w_x - \frac{G}{1-2\nu} \cdot \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_y}{\partial y} + \frac{\partial w_z}{\partial z} \right) + \frac{\partial u}{\partial x} &= 0, \\ -G\nabla^2 w_y - \frac{G}{1-2\nu} \cdot \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_y}{\partial y} + \frac{\partial w_z}{\partial z} \right) + \frac{\partial u}{\partial y} &= 0, \\ -G\nabla^2 w_z - \frac{G}{1-2\nu} \cdot \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_y}{\partial y} + \frac{\partial w_z}{\partial z} \right) + \frac{\partial u}{\partial z} &= -\gamma, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中， ∇^2 为拉普拉斯算子， $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ 。

以位移和孔隙压力表示的连续方程为

$$-\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_y}{\partial y} + \frac{\partial w_z}{\partial z} \right) + \frac{K}{\gamma_w} \nabla^2 u = 0 \quad (2)$$

数值方法和计算技术的发展，尤其是有限元方法使 Biot 固结理论得到了很好的应用。用有限元求解 Biot 固结方程，首先是由 Sandhu 等人提出，对位移取二次插值模式，对孔压取线性模式，应用变分原理推出了 Biot 固结理论的有限单元方程。Christian 等人应用虚功原理也推出了 Biot 固结理论的有限元方程。国内沈珠江首先把 Biot 固结理论的有限元法应用于固结分析。有限元的应用也促进了土的本构理论的研究和发展。在增量有限元法的固结分析中，可以引入比较复杂的本构模型，可以考虑土的材料非线性或弹塑性等因素的影响，更好地反映工程实际情况^[10]。

3 计算模型及计算参数的选取

3.1 软土加筋路堤的计算模型

(1) 模型尺寸

图 2 为建立在软土地基上的加筋填土路堤工程。坐标原点定义在路堤底面的中心处。其中路面宽度为 18 m，路堤高 6 m，坡比为 1：1，路堤底面宽度为 30 m；地基表面宽度为 50 m，深度 12 m；模型沿 z 方向延伸 50 m。初步拟定在路堤中铺设三层竹筋格栅，第一层铺设在路堤底面，在其之上分别间隔 1 m 铺设第二层和第三层格栅。格栅横肋与纵肋宽度之比为 1：2，分别为 0.5 m 和 1 m。

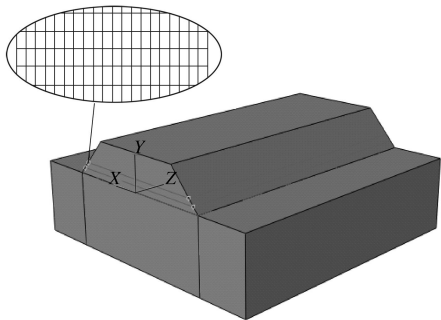


图 2 路堤工程实体模型

Fig. 2 Model of embankment

(2) 单元的选取

由于需要对以上的路堤和地基模型进行固结模拟，因此在 ABAQUS 中对其剖分选用孔压单元 (C3D8P)^[11]。与常规的应力位移分析中的实体单元相比，孔压单元在某些节点上增加了孔压自由度。一阶孔压单元的节点同时具有位移自由度和孔压自由度。二阶孔压单元角点有位移自由度和孔压自由度，边中节点一般只有位移自由度而无孔压自由度。一阶单元孔压自由度的插值函数与位移自由度的相同，即线性插值函数。而在二阶单元中孔压采用的不是二次插值函数，而是所谓的双线性 (bilinear)。出于结果输出的考虑，中间节点的孔压值为角点孔压的插值。在输出变量时，孔压单元不但能输出应力和应变 (此时的应力为有效应力)，还能输出流体速度和孔隙水压力。

竹筋格栅选用三维杆单元 (T3D2) 进行模拟。杆单元是只能承受拉、压轴向荷载的细长构件，它们不能承受弯矩。

(3) 单元大小

单元剖分时，路堤和路基沿各边每隔 1 m 布置一个种子，格栅则每隔 0.25 m 布置一个种子。剖分完成后，共有 38000 个孔压单元，19000 个杆单元。如图 3 所示。

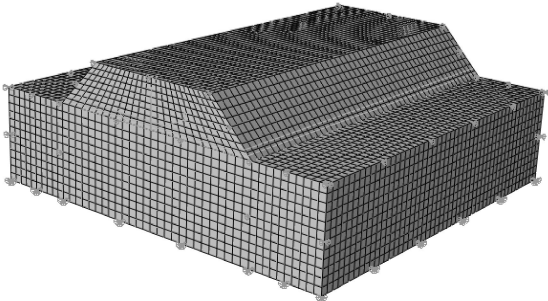


图 3 路堤工程单元剖分

Fig. 3 Element of embankment

(4) 边界约束

在模型 x 和 z 方向的断面上分别施加法向约束，在模型底面施加 3 个方向的全约束。在固结计算中，将路堤与路基的临空面定义为透水边界。

3.2 材料参数的选取

计算中材料的具体参数见表 2。

表 2 有限元计算参数表

Table 2 Parameters for finite element calculation

材料	E /MPa	μ	c /kPa	φ /($^{\circ}$)	γ /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	k /($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
路堤填土	15	0.30	10	20	18	1×10^{-7}
软土路基	5	0.35	10	15	18	5×10^{-9}
竹筋格栅	1100	0.20	—	—	19	—

4 计算结果及分析

4.1 固结作用对素填土路堤稳定性的影响

(1) 利用 ABAQUS 中的单元生死功能, 将路基表面以上的单元全部“移除”, 进行平衡初始地应力的计算, 目的是将地基自重产生的竖向位移清零, 从而减小其对后续计算的影响。

(2) 激活第一步中“杀死”的单元, 定义土体的初始孔隙比为 0.8, 设定路堤和路基的静力固结时间为一年 (31536000 s), 开始进行固结模拟。

(3) 待这一年的固结计算完成后, 在 ABAQUS 中利用有限元强度折减法找到路堤塑性区发展的拐点, 认定此时对应的折减系数为安全系数, 以此判断固结一年后素土路堤的稳定性。

对于另外 11 个相同的模型, 重复以上 3 步, 并将第二步中的固结时间改为 2 年, 3 年, ……12 年, 分别求出固结相应时间后路堤的安全系数, 从而得到路堤稳定性随着固结时间增长的变化趋势, 见下图 4。

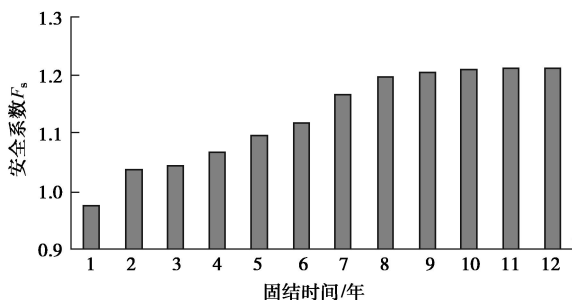


图 4 固结时间 - 安全系数柱状图

Fig. 4 Histogram of consolidation time-safety factor

4.2 竹筋强度衰减对路堤稳定性的影响

利用 ABAQUS 软件中的 embedded 功能, 将三层竹筋格栅嵌入路堤土体中, 使二者变形协调。不考虑土体的固结作用, 分析 12 年中随着竹筋强度的逐年衰减, 加筋路堤在自重条件下稳定性的变化。具体计算步骤如下:

(1) 同样为了将地基自重产生的竖向位移清零, 首先也得进行平衡地应力的计算, 操作和结果与 4.1 节中素填土路堤固结计算的第一步相同。

(2) 考虑到竹子为植物加筋材料, 埋在土中受到腐蚀、降解和虫蛀等不利因素的影响, 强度逐年减小, 在 ABAQUS 中用每年折减材料的弹性模量的方法来模拟这一衰减过程, 定义竹筋格栅在土体中埋设 12 年后完全失效。

(3) 继续利用有限元强度折减法求出不同强度的竹筋格栅对应的路堤安全系数, 将它们绘制于图 5 中。

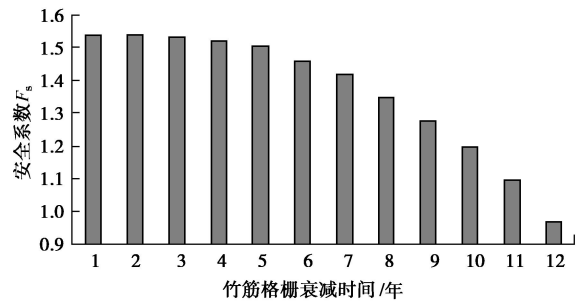


图 5 安全系数随着竹筋衰减的变化

Fig. 5 Variation of safety factor with intensity attenuation of bamboo reinforcement

观察图 5 可以看出: 在路堤中加入三层竹筋格栅后, 整体稳定性有了很大的提高, 在第一年中安全系数达到了 1.538, 在 1~5 年中, 由于竹筋强度下降的不多, 因此路堤的安全系数变化较为平缓, 仍然在 1.5 以上。可是在第 6 年以后, 安全系数呈直线下降, 竹筋对路堤稳定性提高的作用越来越小, 在第 12 年时, 竹筋完全失效导致路堤的安全系数回到 0.975。

4.3 探讨竹筋格栅在路堤工程中应用的可能性

通过以上计算可以看出, 竹筋格栅对于路堤稳定性的提高作用明显。可是路堤工程的设计使用年限很长, 而竹筋相较于土工合成材料的抗腐蚀性较弱, 那么铺设竹筋格栅的路堤能够保持长久稳定吗? 如果答案肯定, 则可认为竹筋代替土工合成材料应用于路堤工程是可以实现的。

图 6 反映了土体固结和竹筋强度衰减对路堤安全系数的影响。通过计算得出素土路堤在固结 12 年的过程中, 安全系数逐渐增大的变化曲线, 再分析得出竹筋以格栅形式铺设于路堤内, 12 年中随着竹筋强度衰减, 路堤整体的安全系数不断降低。土体通过自身固结作用 8 年后安全系数已经达到 1.197, 此时竹筋路堤的安全系数为 1.352, 大于 1.2, 在接近第 10 年时, 两条曲线产生交点, 此时路堤的安全系数为 1.21, 充分说明在竹筋格栅完全失效之前, 土体固结作用已经

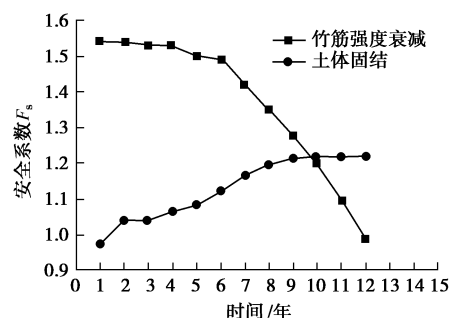


图 6 路堤安全系数随时间变化的曲线

Fig. 6 Variation of safety factor of embankment with time

可以将路堤的安全系数提高到满足规范要求,在之后的若干年,就算竹子完全腐蚀,路堤也能够达到自稳。因此竹子作为抗拉筋材铺设于路堤中既能满足提高稳定性的要求,也能在土体自稳前保证其不发生破坏,可以说用其代替土工合成材料作为拉筋完全可能。

5 结 语

在环境日益恶劣,人们越来越崇尚“低碳”生活的今天,发现或发明“绿色”建筑材料意思深远。我国是产竹大国,国内外学者通过试验发现竹子具有很高的弹性模量和抗拉强度,这恰恰能满足土工加筋材料的力学指标。大批秦汉时期的竹简文物陆续出土,也说明选用科学的防腐方法,必能大大延长竹筋的使用寿命。经济、适用、环保的防腐方法还有待进一步研究。利用 ABAQUS 有限元软件数值模拟竹筋运用于软土路堤,比较土体固结和竹筋强度衰减对路堤安全系数的影响,最后得出在竹筋完全失效之前,路堤通过固结能够达到稳定状态。表明利用竹筋格栅加固路堤在满足稳定性要求的同时,也能达到路堤设计使用年限的要求。用竹子代替传统加筋材料在加筋土工程中值得推广。

参考文献:

- [1] 中国大百科全书总编辑委员会——土木工程编辑委员会. 中国大百科全书——土木工程[M]. 北京: 中国大百科全书出版社, 1961. (China Encyclopedia Editor Committee- Civil Engineering Editorial Board. Encyclopedia of China- Civil engineering[M]. Beijing: Encyclopedia of China Publishing House, 1961. (in Chinese))
- [2] 彭镇华, 江泽慧. 绿竹神气——中国一百首咏竹古诗词精选[M]. 北京: 中国林业出版社, 2005. (PENG Zhen-hua, JIANG Ze-hui. The charm of bamboo[M]. Beijing: China Forestry Publishing, 2005. (in Chinese))
- [3] 林金娜. 竹塑复合材料及其土工网研究[D]. 福建农林大学, 2004. (LIN Jin-na. Study on bamboo plastic composite and its geotextile[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2004. (in Chinese))
- [4] Khosrow Ghavami. Bamboo as reinforcement in structural concrete elements[J]. Cement & Concrete Composites, 2005, 27: 637 - 649.
- [5] LO Tommy Y, CUI H Z, TANG P W C, et al. Strength analysis of bamboo by microscopic investigation of bamboo fibre[J]. Construction and Building Materials, 2008, 22: 1532 - 1535.
- [6] LO Tommy Y, CUI H Z, LEUNG H C. The effect of fiber density on strength capacity of bamboo[J]. Materials Letters 2004, 58: 2595 - 2598.
- [7] 刘亚迪, 桂仁意, 俞友明, 等. 毛竹不同种源竹材物理力学性质初步研究[J]. 竹子研究汇刊, 2008, 27(1): 50 - 54. (LIU Ya-di, GUI Ren-yi, YU You-min, et al. A preliminary study on the physical and mechanical properties of different provenances of Moso bamboo[J]. Journal of Bamboo Research, 2008, 27(1): 50 - 54. (in Chinese))
- [8] 吕 韬, 焦涛, 孙金坤. 高填方土质边坡中竹筋的应用研究[J]. 土木工程学报, 2010, 43(7): 91 - 96. (LÜ Tao, JIAO Tao, SUN Jin-kun. Application of bamboo reinforcement in high fill slopes[J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(7): 91 - 96. (in Chinese))
- [9] 唐永裕. 竹材资源的工业性开发利用[J]. 竹子研究汇刊, 1997, 16(2): 26 - 33. (TANG Yong-yu. The industrial development and utilization of bamboo timber resources in China[J]. Journal of Bamboo Research, 1997, 16(2): 26 - 33. (in Chinese))
- [10] LADE P V, DUNEAN J M. ElastoPlastic stress-strain theory for cohesionless soil[J]. Geotech Engrs Div Proe, ASCE, 1975, 101(10): 1037 - 1053.
- [11] 费 康, 张建伟. ABAQUS 在岩土工程中的应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010. (FEI Kang, ZHANG Jian-wei. Application of ABAQUS to geotechnological engineering[M]. Beijing: China Water Power Press, 2010. (in Chinese))

(本文责编 明经平)