

文章编号: 1004-4353(2016)03-0246-06

几何参数对预应力波纹钢腹板箱梁桥 受力性能的影响分析

陈凌秀, 房贞政

(福州大学土木工程学院, 福建 福州 350002)

摘要: 对实际工程中某三跨波纹钢腹板体外预应力连续箱梁桥建立有限元模型, 通过改变腹板参数, 探讨几何参数对桥梁整体受力性能的影响。分析表明, 随着波纹钢腹板折叠角的增大, 波纹钢板的抗弯刚度逐渐减小, 当折角在 $10^\circ \sim 40^\circ$ 范围内变化时, 波纹钢板的抗弯刚度变化最为明显; 波纹钢腹板水平面板宽度 b 增大会提高箱梁的抗弯刚度, 但 b 值太大会影响波纹钢腹板的整体受力性能; 增加波纹板的厚度能显著提高箱梁的抗剪性能, 并在一定程度上能够提高箱梁的抗弯刚度, 但板厚增加到 20 mm 时, 其对提高箱梁的抗剪性能和抗弯性能的贡献逐渐趋小; 波纹钢腹板的倾角不宜太大, 宜小于 25° 。

关键词: 几何参数; 预应力波纹钢腹板箱梁; 连续梁桥; 受力性能

中图分类号: TU398⁺.9

文献标识码: A

Effects of geometric parameters on mechanical characters of pre-stressed box-girder bridge with corrugated web

CHEN Lingxiu, FANG Zhenzheng

(College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350002, China)

Abstract: The finite element model of three-span pre-stressed box-girder continuous bridge with corrugated web are built to respectively analyze the effects of geometric parameters on mechanical characters by changing the parameters of pre-stressed box-girder bridge with corrugated web. The results show that the increment of the angle of the corrugated plate can reduce the vertical stiffness of bridge, stiffness of bridge changes obviously within the range of $10^\circ \sim 40^\circ$; if the value of the horizontal fold of the corrugated plate b is too large, it will weaken the corrugated plate's whole property under the load; increasing the thickness of the corrugated web can significantly improve the shear performance and add to the stiffness of the box-girders within certain range, but when it reached to 20 mm, the effect will be weaken; the angle of the web would be within 25° .

Keywords: geometric parameters; pre-stressed box-girder bridge with corrugated web; continuous girder; mechanical characters

预应力波纹钢腹板箱梁桥是近年来出现的一种新型组合结构桥梁。由于用波纹钢板替代混凝土成为箱梁的腹板, 能够减轻桥梁的自重, 增加预应力的导入效率, 而且在建筑造型、结构性能和施工上具有其独特的优点, 因此该结构桥梁具有很大的发展潜力^[1-2]。在此类桥梁中, 预应力波纹钢

腹板连续箱梁桥腹板倾斜角度、波纹钢腹板形状等因素对箱梁受力性能的影响较大。文献[3-5]研究了几何参数对波纹钢腹板箱梁桥挠度和扭转刚度的影响, 并未考虑体内预应力钢筋的影响。波纹板几何参数的变化会改变波纹板的刚度, 进而影响桥梁预应力的导入作用, 因此分析不同波纹板

收稿日期: 2016-06-07

作者简介: 陈凌秀(1984—), 女, 讲师, 研究方向为组合结构。

几何参数对桥梁整体受力性能的影响十分必要。

本文以三跨波纹钢腹板连续箱梁桥——日本锅田高架桥为工程背景^[6],采用大型结构通用分析软件 ANSYS 建立全桥空间有限元模型,通过改变波纹板的几何参数,研究几何参数对波纹钢腹板箱梁受力性能的影响。

1 典型工程背景

锅田高架桥全长 1 763 m,由 9 跨、18 跨、6 跨连续混凝土箱梁桥及其 3 跨连续波纹钢腹板组合箱梁桥组成(47 m+91.5 m+47 m)。混凝土箱梁桥的各跨跨度在 40.5~50.0 m 范围内,波纹钢腹板箱梁桥中间跨的跨度为 91.5 m(如图 1 所示),梁高为 3.2 m,采用预应力波纹钢腹板箱梁截面,并设置体外索。

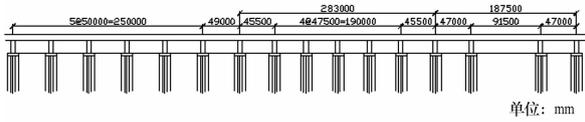


图 1 锅田高架桥立面布置图

波纹钢腹板段梁桥截面为单箱单室,箱梁截面如图 2 所示。波纹钢腹板的形状如图 3 所示。

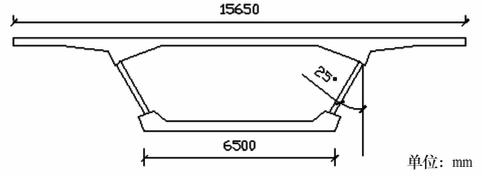


图 2 锅田高架桥截面图

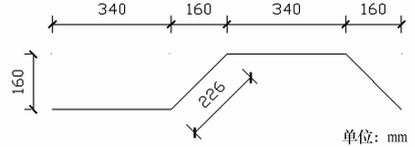


图 3 锅田高架桥波纹钢腹板形状图

1.1 单元选取与网格划分

有限元模型中混凝土顶、底板采用实体单元模拟,波纹钢腹板采用壳体单元模拟,体内预应力筋采用 Link 8 单元模拟,体外索采用 Link 10 单元模拟。模型的单元材料特性见表 1。

表 1 单元材料的特性

结构部位	单元类型	材料	弹性模量/MPa	泊松比	密度/(kg/m ³)
箱梁	Solid 65	C50 号砼	3.5×10^4	0.167	2 500
波纹钢板	Shell 63	Q345 钢材	1.95×10^4	0.3	7 800
预应力筋	Link 8	钢绞线	1.95×10^4	0.3	7 800
体外索	Link 10	钢绞线	1.95×10^4	0.3	7 800

1.2 边界条件

有限元模型的边界约束条件为:中间固定铰支承处,约束 U_x 、 U_y 、 U_z 、 Rot_y 、 Rot_z 向位移;两端支承处,约束 U_x 、 U_y 、 Rot_y 、 Rot_z 向位移。横向为 x 轴,竖向为 y 轴,纵向为 z 轴。

带有边界条件的全桥有限元模型如图 4 所示。通过反复改变预应力波纹钢腹板箱梁的各个参数值,建立多个有限元模型进行有限元分析;通过反复改变单元的尺寸来检验、分析结果的收敛性和有效性。

通过 ANSYS 分析,得知锅田高架桥应力较大的截面为跨中截面和支座处截面,因此本文在参数分析时只考虑支座、跨中截面在自重和各自最不利荷载作用下的受力性能。

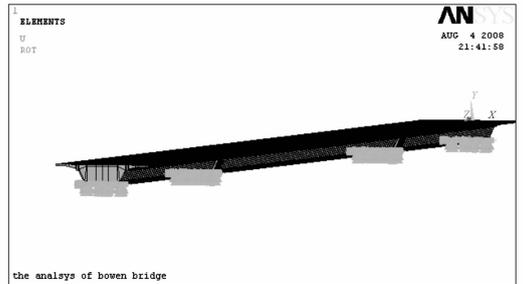


图 4 带有边界条件的全桥有限元静力分析模型三维视图

2 波纹钢腹板形状对箱梁受力性能的影响

由图 5 可知,波纹钢腹板的形状系数包括水平面板宽度 b 、斜向面板的水平投影长度 d 、折叠角度 α 、波高 h 、斜向面板宽度 c 。

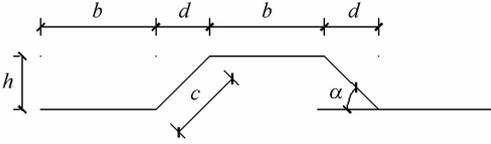


图 5 波纹板的形状

2.1 波纹钢腹板折叠角对箱梁应力的影响

保持板厚 $t = 20 \text{ mm}$, 水平面板宽 $b = 340 \text{ mm}$, 斜向面板宽 $c = 226 \text{ mm}$ 不变, 变化波纹钢腹板的折角, 折叠角 α 从 15° 变化到 60° . 表 2 和表 3 列出了箱梁应力随波纹板折角变化的结果.

表 2 箱梁纵向弯曲应力随波纹板折角变化结果

有限元模型	折叠角 $\alpha / (^\circ)$	中间支座处的纵向弯曲应力/MPa	跨中截面的纵向弯曲应力/MPa
CASE-1	15	21.26	21.42
CASE-2	20	21.56	20.82
CASE-3	25	21.19	21.60
CASE-4	30	20.58	26.05
CASE-5	35	15.99	26.84
CASE-6	40	15.47	27.02
CASE-7	45	17.27	26.97
CASE-8	50	17.28	27.61
CASE-9	55	16.93	27.55
CASE-10	60	17.95	27.84

表 3 箱梁剪应力随波纹板折角变化结果

有限元模型	折叠角 $\alpha / (^\circ)$	中间支座处的腹板剪应力/MPa	跨中截面腹板剪应力/MPa
CASE-1	15	69.47	41.65
CASE-2	20	68.25	41.30
CASE-3	25	68.00	40.95
CASE-4	30	59.45	46.90
CASE-5	35	61.13	44.80
CASE-6	40	59.63	41.65
CASE-7	45	51.43	39.90
CASE-8	50	62.03	46.20
CASE-9	55	62.27	47.60
CASE-10	60	74.75	46.90

由图 6 可以看出, 随着折角的变大, 跨中截面处波纹钢腹板箱梁纵向弯曲应力逐渐增大, 特别是折角在 $10^\circ \sim 40^\circ$ 范围内变化时最为明显. 这表明折角变大, 波纹钢腹板箱梁的抗弯刚度有所降低. 而支座处箱梁顶的纵向弯曲应力却随折角的增大而减小, 其原因为折角变大, 相当于减小了上翼缘的宽度, 提高了翼缘的局部刚度.

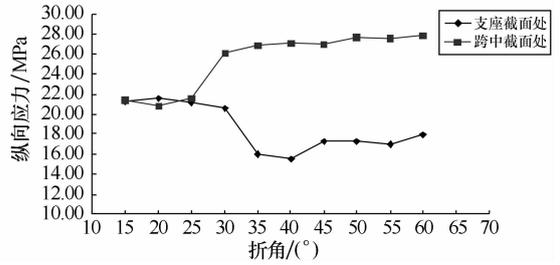


图 6 纵向弯曲应力随波纹钢腹板折角变化图

由图 7 可以看出, 随着折叠角的变大, 支座截面处腹板的剪应力出现先减小后增大的变化, 在折角为 45° 时, 达到最小值. 而跨中截面处腹板的剪应力随折角的变化不大, 但也在折角为 45° 时, 达到最小值.

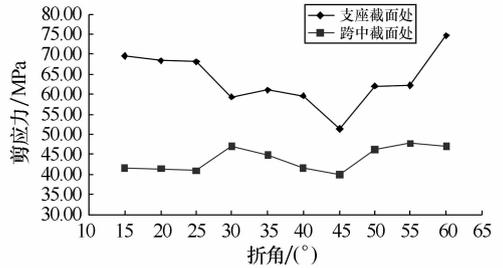


图 7 腹板剪应力随波纹钢腹板折角变化图

2.2 波纹钢腹板水平面板宽度对箱梁应力的影响

将波纹钢腹板水平面板宽度 b 从 140 mm 变化到 540 mm , 且保持波纹板的厚度 $t = 20 \text{ mm}$ 和折叠角 $\alpha = 45^\circ$ 不变. 表 4 和表 5 分别列出了箱梁纵向弯曲应力和剪应力随波纹板水平面板宽度变化的结果.

表 4 箱梁纵向弯曲应力随波纹板水平面板宽度变化结果

有限元模型	b / mm	中间支座处的纵向弯曲应力/MPa	跨中截面的纵向弯曲应力/MPa
CASE-1	140	19.10	27.30
CASE-2	240	18.80	27.04
CASE-3	340	17.27	26.97
CASE-4	440	19.26	27.20
CASE-5	540	19.65	27.50

表 5 箱梁剪应力随波纹板水平面板宽度变化结果

有限元模型	b / mm	中间支座处腹板剪应力/MPa	跨中截面腹板剪应力/MPa
CASE-1	140	63.64	39.55
CASE-2	240	57.66	39.55
CASE-3	340	55.11	39.90
CASE-4	440	63.52	40.60
CASE-5	540	63.68	40.25

由图 8 和图 9 可以看出,波纹板水平面板宽度 b 对支座截面受力的影响较大,但对跨中截面几乎没有影响.其主要原因是在跨中截面处由于体外索在此的偏心距最大,因此对结构产生的预加力大,抵消了波纹钢腹板水平面板宽度变化对桥梁受力的影响.随着波纹钢腹板水平面板宽度 b 的增加,支座截面处的纵向弯曲应力和剪应力都出现先减小后增大的变化,且宽度在 340 mm 左右时达到最小值.这主要是因为,在固定板厚和折叠角值之后,随着板宽的增加,波纹板的抗弯刚度逐渐增大,因此箱梁的纵向弯曲应力逐渐减小;但板宽过大时,波纹板的受力整体性减弱,特别是波纹钢腹板的抗扭刚度降低,使得箱梁的纵向弯曲应力又逐渐增大;因此,在板厚和折叠角值固定的情况下,水平面板宽度 b 有其最优的范围,不宜太大.

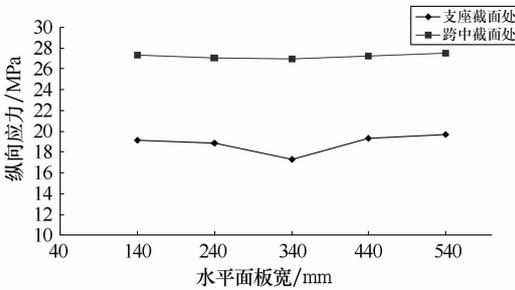


图 8 纵向弯曲应力随水平面板宽度变化图

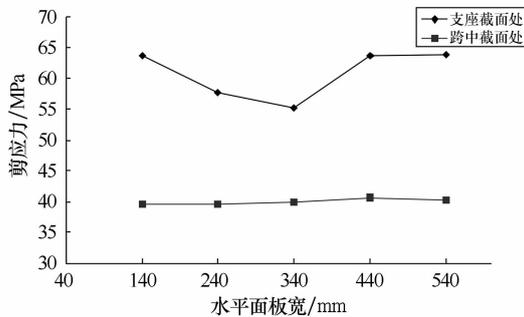


图 9 腹板剪应力随水平面板宽度变化图

2.3 波纹钢腹板厚度对箱梁应力的影响

保持其他参数不变,只变化波纹钢腹板的厚度,以此通过计算箱梁桥的弯曲应力和腹板剪应力,分析波纹钢腹板厚度对箱梁受力性能的影响.表 6 和表 7 分别列出波纹钢腹板箱梁纵向弯曲应力、剪应力随波纹钢腹板厚度变化的结果.

由图 10 和图 11 可以看出,梁桥的纵向弯曲应力、剪应力均随着板厚的增大而逐渐减小,当板

厚在 5~20 mm 范围内变化时,箱梁的应力减小幅度大,而当板厚大于 20 mm 时,应力减小幅度不大.这说明增加波纹板的厚度能显著提高箱梁的抗剪性能,并在一定程度上提高箱梁的抗弯刚度,但当板厚大于 20 mm 时,增加板厚对提高箱梁的抗剪、抗弯性能并不显著,因此设计时应结合计算结果和经济性选择适宜的厚度.

表 6 箱梁纵向弯曲应力随波纹钢腹板厚度变化结果

有限元模型	波纹板厚 t /mm	中间支座处的纵向弯曲应力/MPa	跨中截面纵向弯曲应力/MPa
CASE-1	5	26.51	28.47
CASE-2	10	22.89	27.12
CASE-3	15	21.70	26.86
CASE-4	20	20.92	26.97
CASE-5	25	20.40	26.20
CASE-6	30	19.94	26.13
CASE-7	35	19.60	26.10
CASE-8	40	19.33	26.10

表 7 箱梁剪应力随波纹腹板厚度变化结果

有限元模型	波纹板厚 t /mm	中间支座处腹板剪应力/MPa	跨中截面处腹板剪应力/MPa
CASE-1	5	179.64	143.15
CASE-2	10	104.36	74.55
CASE-3	15	74.24	51.10
CASE-4	20	55.11	39.90
CASE-5	25	48.34	36.05
CASE-6	30	41.14	33.57
CASE-7	35	35.81	31.61
CASE-8	40	31.67	29.96

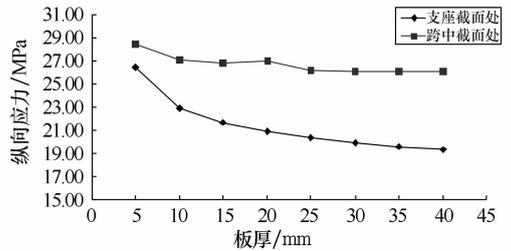


图 10 纵向弯曲应力随波纹板厚度变化图

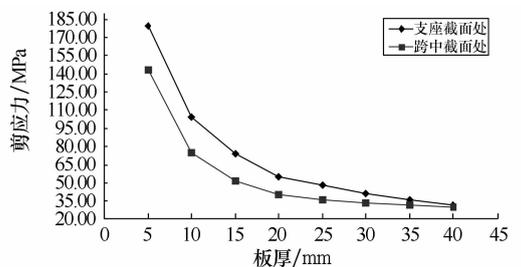


图 11 剪应力随波纹板厚度变化图

3 波纹钢腹板倾斜角对箱梁受力性能的影响

钢腹板倾斜放置形成梯形箱梁断面,这样可以增大行车部分桥面的宽度,减小底板的宽度,在不增加混凝土用量的前提下更容易适应使用要求,也更美观.在实际桥梁设计中,腹板倾斜角度的取值一般通过经验或工程类比来获得,具有很大的随意性.

将波纹钢腹板与竖向倾斜角度 θ (图 12)从 0° 变化到 40° ,在该过程中钢腹板顺时针旋转,底板的宽度随之发生变化.表 8 和表 9 分别列出箱梁纵向弯曲应力和箱梁剪应力随箱梁腹板倾斜角的变化结果.

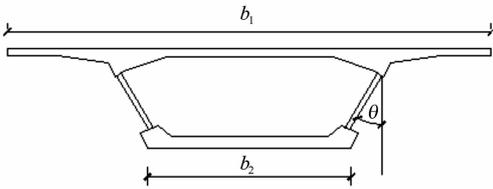


图 12 波纹钢腹板混凝土截面图

表 8 箱梁纵向弯曲应力随箱梁腹板倾斜角的变化结果

有限元模型	倾斜角 $\theta/(^\circ)$	中间支座处的纵向弯曲应力/MPa	跨中截面纵向弯曲应力/MPa
CASE-1	0	17.76	22.35
CASE-2	5	17.65	23.07
CASE-3	10	17.56	23.86
CASE-4	15	17.47	24.73
CASE-5	20	17.38	25.75
CASE-6	25	17.27	26.97
CASE-7	30	17.10	28.43
CASE-8	35	17.36	29.38
CASE-9	40	17.38	31.09

表 9 箱梁剪应力随箱梁腹板倾斜角的变化结果

有限元模型	倾斜角 $\theta/(^\circ)$	中间支座处腹板的剪应力/MPa	跨中截面处腹板的剪应力/MPa
CASE-1	0	70.34	45.50
CASE-2	5	69.47	44.45
CASE-3	10	67.25	43.40
CASE-4	15	65.56	42.35
CASE-5	20	61.90	40.95
CASE-6	25	55.11	39.90
CASE-7	30	54.95	38.85
CASE-8	35	50.30	37.45
CASE-9	40	45.63	36.40

从图 13 可以看出,箱梁跨中截面处的纵向弯曲应力随着波纹钢腹板倾斜角的增大逐渐增大.这是因为随着倾斜角的增大,箱梁的截面面积减小,使得箱梁截面的抗弯刚度降低.而支座截面处的箱梁纵向弯曲应力随着倾斜角的增大逐渐减小,但变化并不明显.

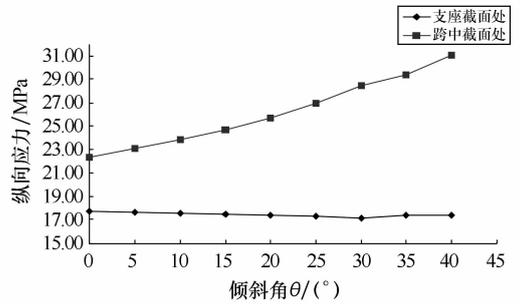


图 13 箱梁纵向弯曲应力随腹板倾斜角变化图

从图 14 可以看出,随着波纹钢腹板倾斜角的增大,支座截面处的剪应力和跨中截面处的剪应力都逐渐减小,其中支座截面处的剪应力的减小速率相对较大,特别是当倾斜角小于 25° 时,跨中截面处的剪应力减小得并不明显.因此波纹钢腹板的倾斜角不宜太大,小于 25° 较为适合.在实际工程中,波纹钢腹板倾斜角的增大将减小底板的宽度,从而减少混凝土的用量,降低造价,但这也增大了施工的难度,因此工程设计时应综合考虑静力、动力方面的因素,选择最适合的倾斜角度进行施工.

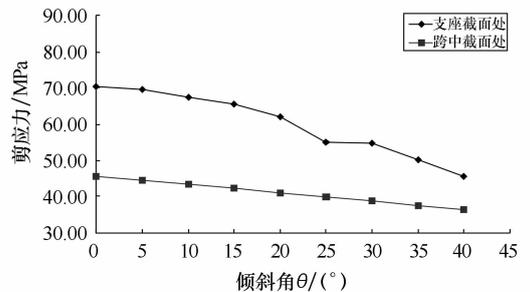


图 14 箱梁剪应力随腹板倾斜角变化图

4 结论

本文通过建立多个有限元模型,探讨了波纹钢腹板的倾斜角度以及波纹钢腹板的形状等参数对波纹钢腹板箱梁受力性能的影响.结果表明:
1)随着波纹钢腹板折叠角的增大,波纹钢板的抗

弯刚度逐渐减小;折叠角在 $10^{\circ} \sim 40^{\circ}$ 范围内变化时,波纹钢腹板的抗弯刚度变化最为明显. 2) 随着波纹钢腹板水平面板宽度 b 的增加,箱梁的抗弯刚度逐渐增大;但当水平面板宽度 b 取值太大时,箱梁的整体受力性能会受到影响,因此设计时应根据波纹钢腹板的整体受力性能来选择最优的板宽. 3) 增加波纹板的厚度能显著提高箱梁的抗剪性能,并在一定程度上能够提高箱梁的抗弯刚度,但板厚增加到 20 mm 时,其对提高箱梁的抗剪性能和抗弯性能的贡献会逐渐趋小. 4) 支座截面处的腹板剪应力随着倾斜角的增大逐渐减小,且倾斜角小于 25° 时腹板剪应力减小得最为明显,而跨中截面处的弯曲应力只是略有增加,因此波纹钢腹板的倾斜角宜小于 25° .

参考文献:

- [1] 陈宝春,黄卿维. 波纹钢腹板 PC 箱梁桥应用综述[J]. 公路,2005,7(7):45-53.
- [2] 李淑琴,万水,张长青. 波纹钢腹板设计与制造[M]. 北京:人民交通出版社,2011.
- [3] 闫鹏. 波纹钢腹板 PC 组合弯箱梁桥力学性能研究[D]. 西安:长安大学,2011.
- [4] Yang Xialin, Lin Minniu, Zhang Rongling. Study on web parameters of prestressed concrete composite box girder with corrugated steel web[J]. Advanced Materials Research, 2011; 255-260, 1087-1091.
- [5] 牛黎明. 波纹钢腹板 PC 组合箱梁桥腹板几何参数研究[D]. 兰州:兰州交通大学,2010.
- [6] 许莉,房贞政,陈凌秀. 几何参数对预应力波纹钢腹板连续箱梁屈曲荷载的影响研究[J]. 华中师范大学学报(自然科学版),2010,44(4):590-594.

(上接第 211 页)

- [9] Tanaka T, Shiramoto S, Miyashita M, et al. Tumor targeting based on the effect of enhanced permeability and retention (EPR) and the mechanism of receptor-mediated endocytosis (RME) [J]. Int J Pharm, 2004,277(1/2):39-61.
- [10] Zhang L F, Eisenberg A. Multiple morphologies of crew-cut aggregates of polystyrene-b-poly (acrylic acid) block-copolymers [J]. Science, 1995, 268 (5218):1728-1731.
- [11] Yu K, Eisenberg A. Bilayer morphologies of self-assembled crew-cut aggregates of amphiphilic PS-b-PEO diblock copolymers in solution[J]. Macromolecules, 1998,31(11):3509-3518.
- [12] Eisenberg A, Liu F. Preparation and pH triggered inversion of vesicles from poly(acrylic Acid)-block-polystyrene-block-poly (4-vinyl Pyridine) [J]. J Am Chem Soc, 2003,125(49):15059-15064.
- [13] Croy S R, Kwon G S. Polymeric micelles for drug delivery[J]. Current Pharmaceutical Design, 2006, 12(36):4669-4684.
- [14] Kataoka K, Harada A, Nagasaki Y. Block copolymer micelles for drug delivery: design, characterization and biological significance[J]. Advanced Drug Delivery Reviews, 2001,47(1):113-131.
- [15] Achilleos M, Legge T M, Perrier S. Poly(ethylene glycol)-based amphiphilic model conetworks: synthesis by RAFT polymerization and characterization[J]. Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry, 2008,46:7556-7565.
- [16] Zhu W P, Xie W H, Tong X W, et al. Amphiphilic biodegradable poly (CL-b-PEG-b-CL) triblock copolymers prared by novel rare earth complex: synthesis and crystallization properties [J]. Eur Polym J, 2007,43(8):3522-3530.
- [17] Moghimi S M, Hunter A C, Murray J C. Long-circulating and target-specific nanoparticles: theory to practice[J]. Pharmacol Rev, 2001,53(2):283-318.
- [18] Danhier F, Lecouturier N, Vroman B, et al. Paclitaxel-loaded PE-Gylated PLGA-based nanoparticles: in vitro and in vivo evaluation[J]. J Control Release, 2009,133(1):11-17.
- [19] JIN H J, LU J, WU X. Development of a new enzyme-responsive selfimmolative spacer conjugate applicable to the controlled drug release [J]. Bioorg Med Chem, 2012,20(11):3465-3469.
- [20] Brouwer P H. The relationship between Zeta potential and ionic demand and how it affects wet-end retention [J]. Tappi Journal, 1991,48(1):170-179.
- [21] 戴明华,王恩多,谢雍,等. 青霉素酰化酶活性中心的定点突变[J]. 生物化学与生物物理学报,1999, 31(5):558-562.