基于膨胀混凝土约束作用下悬索桥索塔力学性能研究

何霁耀[1]，金子秋[2,3]

（1.甘肃建投建设有限公司，甘肃 兰州 730050；2.西部土木工程防灾减灾教育部工程研究中心，甘肃 兰州 730050；3.兰州理工大学 甘肃省土木工程防灾减灾重点实验室，甘肃 兰州 730050）

【摘要】 为了研究大型悬索桥索塔在使用膨胀混凝土时的力学性能，本文以甘肃某大型单跨简支钢桁加劲梁悬索桥为研究对象，就钢管膨胀混凝土下的索塔各构件及整体力学性能进行了分析。结果表明：索塔格栅处应力集中区出现在顶面的加载区域；横梁最大剪应力出现在与左塔接触的顶部及右塔接触的底部区域；索塔塔柱钢管最大竖向应力出现在靠近横梁上下端及第二层塔基上部区域。同时得出，相较于上部荷载作用，膨胀混凝土的约束作用对钢管轴向应力作用更大。

【关键词】 悬索桥；膨胀混凝土；索塔；力学性能；应力集中

【中图分类号】 U443.38；U448.25　【文献标志码】 A　【文章编号】 1671－3702（2019）02－0031－05

Mechanical Properties' Study on Expansive Concrete Filled Steel Tube Pylon of Suspension Bridge

HE Jiyao[1]，*JIN Ziqiu*[2,3]

（1.*Gansu Jiantou Construction Co.，Ltd.，Lanzhou Gansu* 730050，*China*；2.*Western Engineering Research Center of Disaster Mitigation in Civil Engineering of Ministry of Education，Lanzhou University of Technology，Lanzhou Gansu* 730050，*China*；3.*Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation in Civil Engineering of Gansu Province，Lanzhou University of Technology，Lanzhou Gansu* 730050，*China*）

Abstract：In order to study the mechanical properties of large suspension bridge's pylon with expansive concrete，one large single span simply supported steel truss stiffening girder of suspension bridge in Gansu province was studied in this paper，and the component and whole mechanical behavior of the pylon with expansive concrete filled steel tube were analyzed. The results showed that the stress concentration regions of pylon grid appeared at the top of the load area，the beam's maximum shear stress appeared at the top of left pylon and the bottom of right pylon which contacted with beam，the maximum vertical stress appeared at the pylon steel columns' top and bottom which contacted with beam，and it also appeared at the top of the tower foundation's second layer. We also drew the conclusion that the expansive action played a major role to steel pipe's axial stress compared with the upper load.

Keywords：suspension bridge；expansive concrete；pylon；mechanical properties；stress concentration

0 引　言

随着西部大开发战略的继续发展，大型桥梁在西部地区相继兴起。由于钢管混凝土结构具有良好的力学性能[1]，使得其在桥梁设计中被广泛应用。但随着钢管混凝土体积的增加，混凝土在钢管内部的收缩徐变效应相应增大，造成索塔各个构件在内力上进行了重新分布[2]，从而影响到整个索塔的受力状态。国内外专家就此问题进行了大量研究[3-6]，但研究也局限在小尺寸构件的试验研究及理论推导方面，对于大管径钢管

基金项目：甘肃省自然科学基金B类项目（2017GS10844）
作者简介：何霁耀，男，工程师，研究方向为房屋建筑施工及管理。

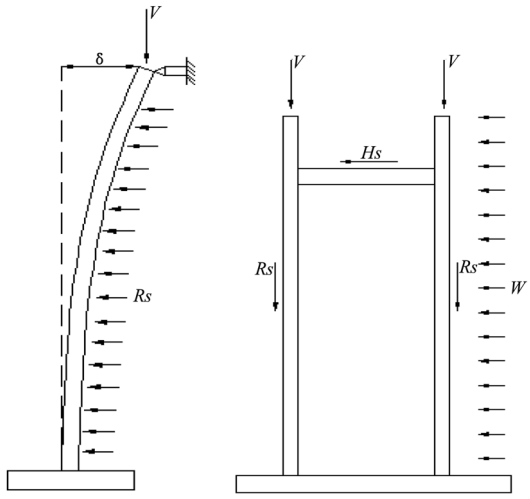
(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

混凝土构件膨胀力学性能研究较少。本文就大型悬索桥选用大型钢管膨胀混凝土后索塔的力学性能进行了分析，为以后在桥梁设计时选用大型钢管膨胀混凝土提供参考。

1　工程概况

1.1　机理分析

在荷载的作用下，以空间结构形式受力的悬索桥索塔会产生顺桥及垂直桥向的内力。索塔顺桥向在施工阶段及施工后受主要荷载影响不同，施工阶段可以看作为一个上端自由、下端固定的柱式结构，主要受风荷载及自重荷载作用；施工完成后，塔顶索塔水平方向的约束因主缆而增加，致使索塔上端出现水平弹性支撑，下端依然为固定形式，受力则变成主缆给予的竖向力与活载产生的水平力。悬索桥索塔受力特点如图1所示。



（a）顺桥向受力示意图　（b）横桥向受力示意图

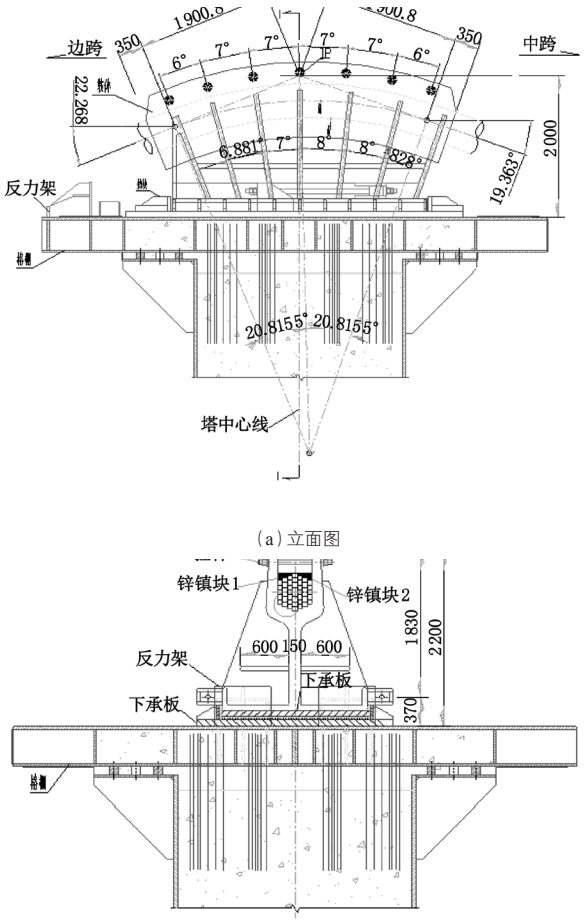
图1　索塔受力示意图

1.2　工程概况

甘肃某悬索桥为单跨简支钢桁加劲梁悬索桥。全长797 m，索塔设有18根灌注桩，桩径为2 m，桩长为35 m，依照端承桩设计。塔柱钢管材质Q345-D，尺寸为：柱长3 000 mm，柱径50 mm。屈服强度f_y=325 MPa，弹性模量E_s=206 GPa。核心混凝土为C40膨胀混凝土。塔柱高60.5 m（自承台顶）。塔柱顶构造示意图如图2所示。

2　模型建立

钢管膨胀混凝土构件受外加荷载能力由钢管与核心膨胀混凝土的刚度比确定。若将钢管与混凝土的粘结力忽略，则可将其认为单向受压构件，故其本构模型符合统一强度理论。



（a）立面图

（b）I-I剖面图

图2　塔柱顶构造示意图（单位：mm）

2.1　本构模型

本文选用的本构模型为钟善桐教授提出的统一理论模型。钟善桐教授[7]认为钢管混凝土在各种荷载作用下的工作性能随材料的物理参数、几何参数和截面形式及应力状态的改变而改变；变化时是相关的、连续的，计算方法也是统一的。其具体关系式如式（1）～（10）所示。

$$\sigma_c=\sigma_u\left[A\varepsilon/\varepsilon_0-B\left(\varepsilon/\varepsilon_0\right)^2\right];\ \varepsilon_i\leqslant\varepsilon_0 \tag{1}$$

其中：

$$\sigma_u=f_{ck}\left[1+\left(30/f_{cu}\right)^{0.4}\times\left(-0.0626\xi^2+0.4848\xi\right)\right] \tag{2}$$

$$\varepsilon_0=\varepsilon_c+3\,600\alpha^{1/2} \tag{3}$$

$$\varepsilon_c=1\,300+10f_{cu} \tag{4}$$

$$\left.\begin{aligned}A&=2-K\\B&=1-K\end{aligned}\right\} \tag{5}$$

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

$$K=(-5\alpha^2+3\alpha)(50-f_{cu}/50)+(1-\alpha^3+2.15\alpha)(f_{cu}-30/50) \quad (6)$$

$$p=K/(0.2+\alpha) \quad (7)$$

$$f_{ck}=0.8f_{cu} \quad (8)$$

$$\xi=\alpha f_y/f_{ck} \quad (9)$$

$$\alpha=A_s/A_c \quad (10)$$

式中：σ_c 为混凝土应力，MPa；σ_u 为混凝土极限应力，MPa；ε_c 为混凝土应变；ε_0 为核心混凝土极限压应变；ε_t 为应变强度；f_{ck} 为混凝土抗压强度标准值，MPa；f_{cu} 为混凝土立方体抗压强度，MPa；f_y 为钢筋屈服点，MPa；ξ 为套箍系数；A_s 为钢管截面面积，mm^2；A_c 为核心混凝土截面面积，mm^2；α 为含钢率；K 为弹性体积模量，N/mm^2；p 为紧箍力，N；A，B 为反映钢管和混凝土所起的作用系数；

钢管三向应力状态的本构关系关系如式(11)～(12)所示。

$$\sigma_{\theta s}=\frac{E_s}{1-u_s^2}(\varepsilon_{\theta s}+u_s\varepsilon_{zs}) \quad (11)$$

$$\sigma_{zs}=\frac{E_s}{1-u_s^2}(\varepsilon_{zs}+u_s\varepsilon_{\theta s}) \quad (12)$$

式中：E_s 为钢材弹性模量，N/mm^2；u_s 为钢材泊松比；$\sigma_{\theta s}$，σ_{zs} 为钢管环向应力与纵向应力，MPa；$\varepsilon_{\theta s}$，ε_{zs} 为钢管环向应变与纵向应变；应力强度 σ_i，MPa，表达式如式(13)所示。

$$\sigma_i=(\sigma_{zs}^2+\sigma_{\theta s}^2-\sigma_{zs}\sigma_{\theta s})^{1/2} \quad (13)$$

2.2　荷载分析

考虑桥梁活载主要受风荷载及桥面人群及汽车等移动荷载[8]，将活载其分为 3 种组合：组合Ⅰ包含温度、汽车、人群；组合Ⅱ包含温度、汽车、人群、行车风(26 m/s)；组合Ⅲ包含温度、百年风。

其荷载组合计算如表 1 所示，索塔施工阶段荷载如表 2 所示。

表 1　索塔荷载组合计算结果表

项目	塔底轴力/kN	顺桥向塔底弯矩/(kN·m)	垂直桥向塔底弯矩/(kN·m)	顺桥向极限承载力/kN	横桥向极限承载力/kN	安全系数
组合Ⅰ	80 496.7	70 147.8	8 697.0	217 808.9	299 917.7	2.0
组合Ⅱ	81 015.5	66 732.7	15 568.7	224 276.7	279 158.2	1.95
组合Ⅲ	68 254.5	44 399.7	30 821.7	251 360.0	233 524.4	2.24

表 2　索塔施工阶段荷载表

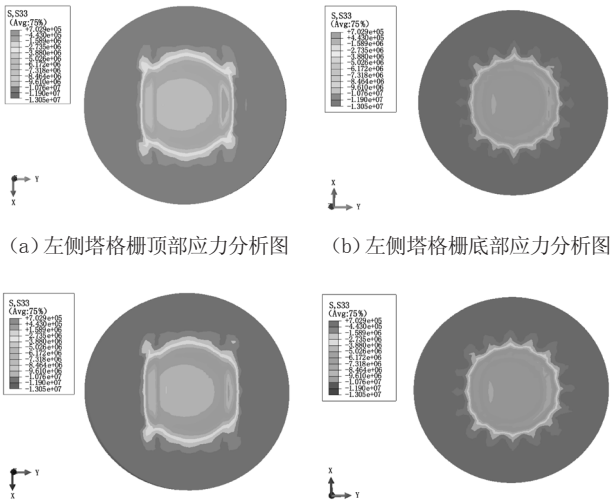
项目	施工阶段	塔顶竖向力/kN	塔底容许应力/MPa	塔顶容许水平位移/m
左塔	成桥	40 309.22	13.4	0.409 4
	塔缆水平位移释放	40 311.97	13.4	0.409 3
	拆除合拢段	39 343.64	13.4	0.428 6
	拆除两端梁段	30 274.89	13.4	0.669 4
	拆除中央梁段	7 072.38	13.4	4.096 5
	拆除跨中	6 388.71	13.4	4.575 0
右塔	成桥	39 213.83	13.4	0.431 3
	塔缆水平位移释放	39 216.41	13.4	0.431 2
	拆除合拢段	38 268.94	13.4	0.451 2
	拆除两端梁段	29 335.22	13.4	0.702 9
	拆除中央梁段	6 734.98	13.4	4.320 5
	拆除跨中	6 069.81	13.4	4.835 1

3　模型分析

3.1　索塔格栅应力分析

由图 3 分析可知，索塔格栅处应力集中区出现在顶面的加载区域，最大压应力 11.6 MPa。考虑偏心荷载作用，索塔格栅顶部钢管混凝土处，相对于索鞍底部压应力区域，出现了应力偏移现象。同时分析发现，索塔格栅外边缘处没有出现约束现象，但由于受到鞍底部荷载作用，出现了 0.7 MPa 的拉应力区。

索塔格栅底部呈现出环形应力现象，是由于钢管刚度较核心区混凝土刚度大，造成其应力值大于混凝土区域，从而使得索塔格栅底部呈现出环形应力区。



(a) 左侧塔格栅顶部应力分析图　(b) 左侧塔格栅底部应力分析图

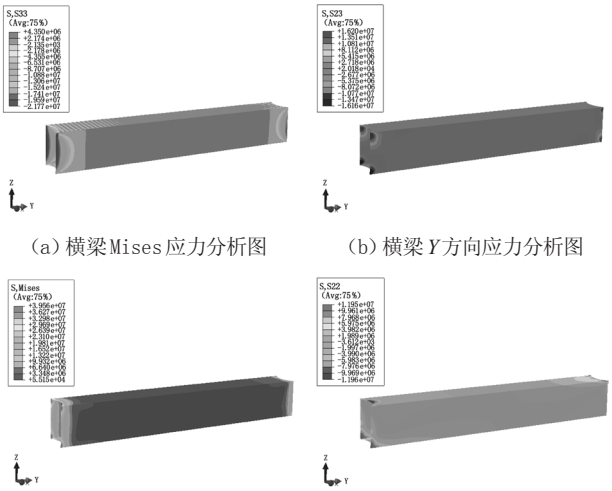
(c) 右侧塔格栅顶部应力分析图　(d) 右侧塔格栅底部应力分析图

图 3　塔栅应力分析图

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

3.2　索塔横梁应力分析

对图4分析可知，索塔横梁相当于简支钢桁加劲梁结构，对其进行Mises应力分析发现，最大应力出现在其两端四角区域［见图4(a)］。考虑塔柱的偏心效应，出现应力不均匀现象，在索塔横梁两端1.5 m范围内压应力为2 MPa左右，其余部位呈现4.5 MPa的拉应力［见图4(a)］；索塔横梁在左端处底部及右端顶部区域出现Y方向最大拉应力［见图4(b)］，但最大剪应力出现区域却与之相反，出现在索塔横梁左端顶部与右端底部区域［见图4(c)］；横梁Z方向由于为轴压方向，受力较为均匀［见图4(d)］。



(a)横梁Mises应力分析图　(b)横梁Y方向应力分析图

(c)横梁YOZ平面内剪应力分析图　(d)横梁Z方向应力分析图

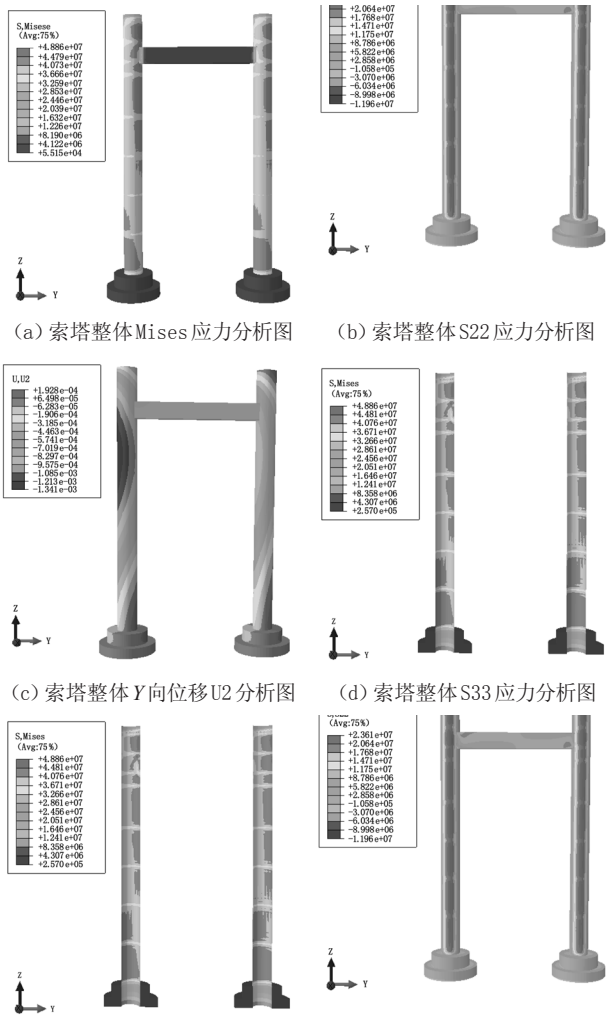
图4　索塔横梁应力分析图

3.3　索塔整体应力分析

对图5分析发现，索塔钢管处最大竖向应力出现在靠近横梁两端及第二层塔基上部区域。如图5(a)所示，钢管最大竖向位移出现在顶端5 m范围内，约为5 mm左右；由图5(b)、(c)可以看出Y向最大位移出现在左塔中上部位置，其值为1.9 mm左右。考虑偏心荷载及核心混凝土约束力的作用下，索塔底部出现8.8 MPa的拉应力［见图5(d)］。同时分析发现，加强环有利于减小混凝土膨胀应力，在加强环区域，钢管截面积增大，但应力小于无加强环区域［见图5(e)］。

同时从图5(b)、(f)分析可知，索塔最大轴向位移出现在钢管顶部区域，索塔整体Y向位移则出现在左侧索塔中上部区域。

综上分析，在核心混凝土膨胀约束作用下，索塔受到上部荷载作用时，其索塔钢管环向最大拉应力达到23.6 MPa，环向最大压应力达到3.5 MPa。但若不考虑上部荷载作用，索塔钢管环向最大拉应力为20 MPa左右，由此可以得出，钢管环向应力受核心混凝土膨胀约束作用影响较大。



(a)索塔整体Mises应力分析图　(b)索塔整体S22应力分析图

(c)索塔整体Y向位移U2分析图　(d)索塔整体S33应力分析图

(e)索塔整体1/2剖面Mises应力分析图　(f)索塔整体轴向位移U3分析图

图5　索塔整体应力分析图

4　结　论

本文通过对甘肃某悬索桥钢管膨胀混凝土索塔进行分析研究，通过分析荷载最大值及最不利状况下，索塔的极限承载力及各构件的应力分布、变形状况得出如下结论。

1)索塔格栅处应力集中区出现在顶面的加载区域；

2)横梁最大剪应力出现在与左塔接触的顶部及右塔接触的底部区域；

3)索塔塔柱钢管最大竖向应力出现在靠近横梁上

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

下端及第二层塔基上部区域。

4）相较于上部荷载作用，膨胀混凝土的约束作用对钢管轴向应力作用更大。

参考文献

[1] 魏晓军.大管径钢管膨胀混凝土塔柱力学性能研究[D].兰州：兰州理工大学，2013.

[2] 周茗如，魏晓军，郭中宇.大管径钢管膨胀混凝土自应力试验研究[J].施工技术，2014，8(15)：50—53.

[3] 胡曙光，丁庆军.钢管混凝土[M].北京：人民交通出版社，2007.

[4] 杨有福，韩林海.混凝土密实度对矩形钢管混凝土短柱力学性能影响研究[J].工业建筑，2004，41(8)：62—65.

[5] 王腾，杨鑫，周茗如，等.钢管混凝土构件自应力及承载力分析研究[J].混凝土，2015，37(9)：126—129.

[6] Behavior of concrete and concrete—filled circular steel tubular stub columns at constant high temperatures[J].Cent. South Unvi. Techn01，2006，26(1)：25—38.

[7] 钟善桐.钢管混凝土中钢管与混凝土的共同工作[J].哈尔滨建筑大学学报，2001，34(1)：6—10.

[8] 哈尔滨建筑工程学院，中国建筑科学研究院.钢管混凝土结构技术规程：CECS 28：2012[S].北京：中国计划出版社，2012.

（上接第 30 页）

4.2.2　钻孔偏斜的常见对策

①对钻机设备定期检修、维护，确保其正常运行；②钻进中多检查钻杆垂直度，发现偏差立即纠正，防斜孔、扩孔发展；③根据地质，及时调整钻机作业参数，发现地质不均匀时（如坚硬孤石或硬度不等的地层切面），可换用自重大、钻杆刚度大的钻机减少钻头滑移偏斜，并减慢钻速；发现钻头偏移后可反复扫钻纠偏；若纠偏无效及时停钻将孔回填好，探明情况后在原位重钻或更改孔位。

4.2.3　漏浆的常见对策

①保持孔内外水压平衡，用黏土将孔周回填密实；易漏浆部位用优质泥浆或增大泥浆密度护壁；②遇大孔隙地质时，回填黏土和片石封堵漏径，待封堵完成再继续钻进；③加大护筒埋深，使护筒穿过不良土质层；④注意控制孔外水体冲刷，必要时封堵冲刷路径。

4.2.4　钢筋笼体变形及浮移的常见对策

①确保笼体制作质量，主筋须焊接成直线，当桩体较长，合理分段；笼体内每隔 2 m 加焊一个 φ20 水平加强箍筋可防起吊中笼体发生弯曲、扭曲等变形；②吊放时要确保笼体初始位置准确，笼体中心线与孔心重合，下放缓慢，边放边纠；另固定好笼体的悬挂设备，按设计规范要求装好笼外垫块和操作吊放；③灌注混凝土时，严格控制灌注速度和导管埋深，按要求施工；孔内混凝土首灌要慢，笼底埋入混凝土 2~3 m 后再适当提升灌注速度。

4.2.5　断桩的常见对策

①严把原材料质量关，混凝土配合比、骨料最大粒径合理，每根桩留组试块，在开灌、中间和结束时各做 1 次坍落度测定；②混凝土中导管埋深须控制，导管不得拔离混凝土；③灌注中断，若因导管堵塞，孔内混凝土还没初凝，则提出导管快速清堵，然后重新下放导管底口至原灌注面上 10 cm 处，加设球胆，计算导管长度和料斗容积，待混凝土灌满导管和料斗瞬间，释放导管和料斗，利用重力将导管压入原混凝土，完成湿接桩，若中断后混凝土已过初凝，断桩位置高于地下水位且深度小于 4 m，可先抽清孔内泥浆，安排人员在钢筋笼保护下穿戴安全设备下至断桩处，凿毛混凝土断面和清洗断桩处钢筋，然后继续浇筑混凝土；断桩位置较深或处低于地下水位下，可用小直径钻头在断面处钻孔，小孔深满足要求后重清理桩孔，再在小孔中置入一段小钢筋笼，埋深为笼体半长，然后继续浇筑混凝土。

5　结　语

咸塘港桥 120 根桩经成桩检测均为 I 类桩，由此表明，只要选择合理的施工工艺、掌握工艺质量控制要点、不断完善质量问题的对策，就能有效避免施工过程中的质量问题进一步扩大，从而保证桩基工程整体的施工质量达到设计与规范要求。

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net