

平板柱脚对钢柱转动约束性能的试验研究

王先铁, 郝际平, 申宇杰, 罗古秋

(西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055)

摘 要:对于平板柱脚轴心受压柱,《钢结构设计规范》将柱脚当作铰接看待,不考虑其转动约束作用。研究表明,钢结构平板柱脚具有较大的转动刚度。为研究钢结构平板柱脚对钢柱的转动约束作用,对10个采用平板柱脚的H型钢柱进行了试验研究,分析了锚栓数量、底板厚度及柱子长细比等因素对柱脚转动约束性能的影响,得到了柱脚弯矩-转角曲线和柱脚转动刚度。提出了平板柱脚转动刚度计算公式,得出了柱子计算长度系数的近似计算公式。

关键词:平板柱脚;约束;试验研究;转动刚度;计算长度系数

中图分类号:TU 311.2

文献标志码:A

文章编号:1006-7930(2013)03-0361-06

钢结构柱脚是上部结构与基础连接的传力枢纽,柱脚节点的受力性能对结构、构件有重要影响。钢结构平板柱脚以其良好的经济性、施工便利性等优点,广泛应用于钢结构中的支柱、门式刚架的刚架柱、摇摆柱及有侧力的框架柱等构件。其一般做法为将钢结构端板焊于柱子端部,并通过四个或两个锚栓将钢结构端板与基础连接,如图1所示。

对于平板柱脚轴心受压柱,《钢结构设计规范》(GB50017—2003)^[1]将柱脚当作铰接看待,不考虑其转动约束作用,而实际上柱脚和基础的连接具有一定的转动刚度,属于半刚性连接。本文对平板柱脚进行了试验研究,得出了柱脚转动刚度计算公式,并研究了柱脚转动刚度对柱子计算长度的影响,可为《钢结构设计规范》(GB50017—2003)修订和工程应用提供参考^[2]。

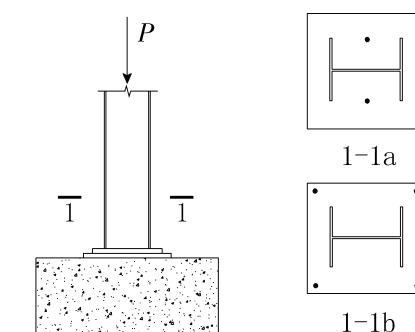


图1 平板柱脚构造示意图

Fig. 1 Conceptual view of plated column base

1 试验研究

1.1 试件设计

试件由带有端板的宽翼缘H型钢柱组成,钢柱下部设混凝土独立基础。根据锚栓数量不同,试件分为两组,锚栓数量分别为2个和4个,每组试件分别采用三种不同的底板厚度和三种不同的长细比。对应的几何长度分别为3 600 mm、4 800 mm、6 000 mm。为考察柱子长细比对柱脚转动刚度的影响,绕强轴的长细比分别取为48、64、80;为了考察柱脚底板厚度对柱脚转动约束性能的影响,选用20 mm、25 mm、30 mm三种底板厚度。共10个试件,其中2个锚栓和4个锚栓的试件各为5个,详细尺寸见表1。型钢、底板材性试验数据见表2~3。混凝土强度等级为C25,按《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T50081—2002)^[3]要求制作边长为150 mm的立方体试块,自然养护28 d后,测得其平均抗压强度为29.05 MPa。

收稿日期:2012-12-05 修改稿日期:2013-05-05

基金项目:《钢结构设计规范》修订课题;国家自然科学基金资助项目(51108369);陕西省教育厅专项科研项目(11JK0942)

作者简介:王先铁(1979-),男,湖南常德人,副教授,博士后,主要研究方向为钢管混凝土结构与钢结构。

表 1 试件设计参数表
Tab. 1 Specimen design parameters

锚栓 数量	试件编号	钢柱		顶板尺寸/mm	底板尺寸/mm
		截面/mm	长细比		
2	S25-3600-2 *	H175×175×7.5×11	48	−25×225×225	−25×270×275
	S25-4800-2	H175×175×7.5×11	64	−25×225×225	−25×270×275
	S25-6000-2	H175×175×7.5×11	80	−25×225×225	−25×270×275
	S20-6000-2	H175×175×7.5×11	80	−25×225×225	−20×270×275
	S30-6000-2	H175×175×7.5×11	80	−25×225×225	−30×270×275
4	S25-3600-4 *	H175×175×7.5×11	48	−25×225×225	−25×270×275
	S25-4800-4	H175×175×7.5×11	64	−25×225×225	−25×270×275
	S25-6000-4 *	H175×175×7.5×11	80	−25×225×225	−25×270×275
	S20-6000-4	H175×175×7.5×11	80	−25×225×225	−20×270×275
	S30-6000-4	H175×175×7.5×11	80	−25×225×225	−30×270×275

注:1. S25-3600-2 表示底板厚度为 25 mm,柱高为 3 600 mm、两个锚栓的试件,余同;
2. 加“*”标试件试验结果因不满足要求而未采用。
3. 钢柱下部混凝土基础尺寸为 1 200 mm×600 mm×600 mm.

1.2 试验方案

试验在西安建筑科技大学结构与抗震实验室完成,试验装置如图 2a 所示.采用钢压梁固定底部基础.为使柱顶绕强轴转动,但不能绕弱轴转动,在柱顶布置单刀口支座.在柱子中部设置侧向支撑(如图 2b),以防止其绕弱轴发生整体失稳,并限制柱子绕弱轴的弯曲变形.考虑到实际工程中轴压柱一般应用于门式刚架结构,并参考已有试验研究成果,采用在柱顶施加偏心压力的方式^[4].

测试内容包括柱子应变、柱子中部侧向挠度、柱底截面转角等.为测量柱底绕强轴的弯矩,在距柱脚底板

表 2 H 型钢材性试验结果

Tab. 2 Material properties of H-shapes

$E/N\cdot mm^{-2}$	$f_y/N\cdot mm^{-2}$	$f_u/N\cdot mm^{-2}$	$\delta/\%$
199 000	284.90	464.60	32.38

表 3 底板材性试验结果

Tab. 3 Material properties of soleplates

厚度/mm	$E/N\cdot mm^{-2}$	$f_y/N\cdot mm^{-2}$	$f_u/N\cdot mm^{-2}$
20	204 000	271.71	435.10
25	194 000	220.02	389.15
30	208 000	250.01	387.12

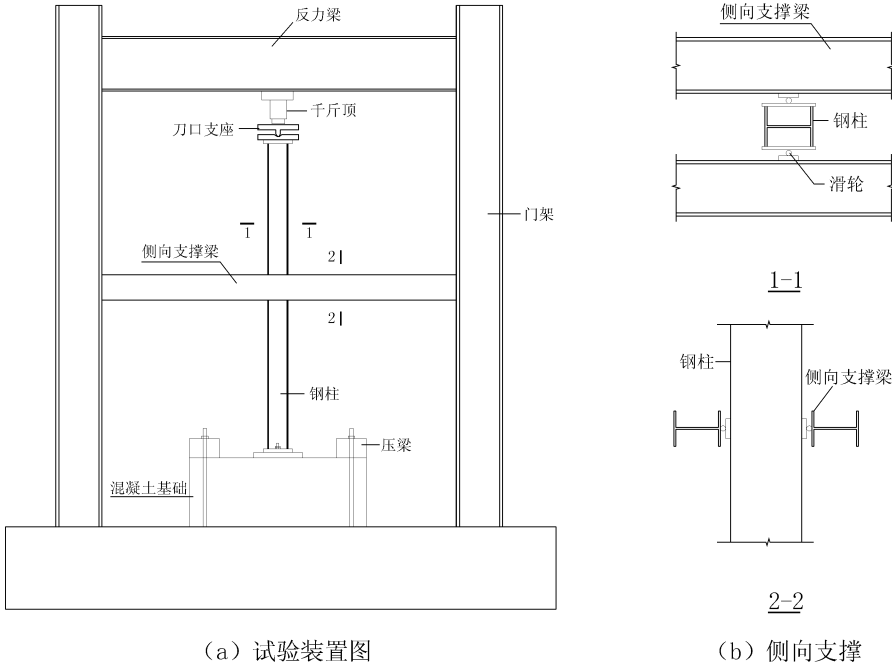


图 2 试验装置
Fig. 2 Test setup

高 25 mm 处的柱截面布置应变片,如图 3a 所示;在柱子中部布置应变片用于试件物理对中,如图 3b 所示。在柱中部垂直于翼缘方向布置一个位移计,用于测量柱中部挠度。为准确测量柱脚转角,设计如图 4 所示装置将柱底截面处水平位移放大,通过放大以后的位移及 L 值确定柱脚转角。试验过程中利用 TDS-602 数据采集系统自动采集应变片及位移计数据。

首先进行几何对中,然后进行物理对中。试验采用 200 t 液压千斤顶进行单向静力加载,荷载分级施加,在极限荷载的 0%~50% 时,荷载级差取极限荷载的 10%,在极限荷载的 50%~80% 时,荷载级差取极限荷载的 5%,达极限荷载的 80% 后,每级荷载调整为极限荷载的 2%,接近破坏时连续加载。

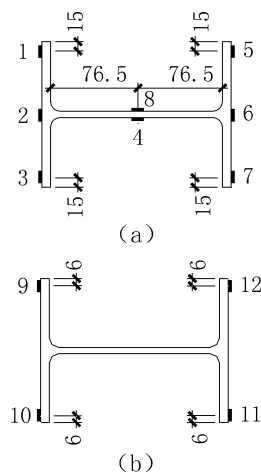


图 3 应变片布置图(单位:mm)

Fig. 3 Arrangement of strain gauges

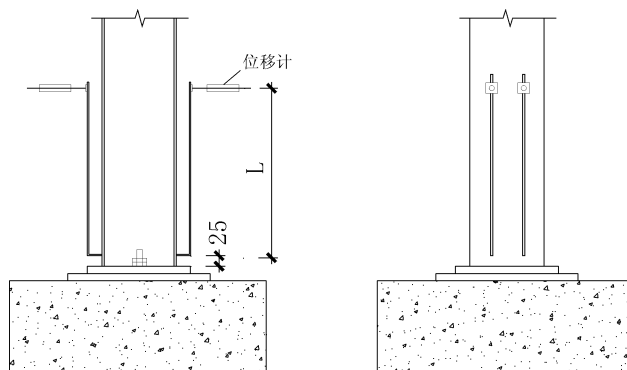


图 4 转角位移计布置图(单位:mm)

Fig. 4 Arrangement of displacement gage of rotational angles

2 试验结果及分析

2.1 破坏过程与破坏形态

试验试件首先在柱子上部绕强轴弯曲,随着试验荷载持续增大,柱子上部同时绕弱轴弯曲,单向刀口支座发生明显的转动。试件由于绕强轴的弯曲变形过大而达到极限承载力。除试件 S30-6000-4 底板弯曲翘起外,其余试件一直与基础保持良好接触,柱子无明显扭转现象。试件典型变形如图 5 所示。



图 5 试件典型变形图

Fig. 5 Typical deformation figure of specimen

2.2 试验结果及分析

(1)试验结果。试验结果如表 4 所示。试件 S25-4800-4 的柱脚转动刚度比 S25-4800-2 大 1.91%,试件 S30-6000-4 的柱脚转动刚度比 S30-6000-2 大 2.75%。可以看出,增加锚栓数量会增大柱脚转动刚度,但增加幅度不明显。试件 S25-6000-2 的柱脚底板厚度比 S20-6000-2 大 5 mm,柱脚转动刚度仅增加 0.84%;试件 S30-6000-2 的柱脚底板厚度亦比 S25-6000-2 大 5 mm,柱脚转动刚度增加 2.56%。由此可

见,柱脚底板厚度越大,转动刚度越大,但增大的幅度较小.由长细比为64和80的试件试验结果可知,长细比越大,计算长度系数越小.试件S20-6000-2和S25-6000-2对应的柱子计算长度系数分别为0.730、0.729,试件S25-6000-2和S30-6000-2对应的柱子计算长度系数分别为0.729、0.727,可以看出,增大柱脚底板厚度,会增加柱脚转动刚度,进而减小柱子计算长度系数,但其影响程度较小.

(2)典型试件柱脚节点弯矩-转角曲线.由试验结果可知,各试件柱脚节点弯矩-转角曲线基本趋势一致.以试件S25-6000-2为例,图6所示为试件S25-6000-2柱脚节点弯矩-转角曲线.初始阶段,弯矩-转角呈线性关系;随着荷载增加,弯矩逐渐增大,转角亦明显增大,钢柱逐渐进入塑性阶段,弯矩-转角呈非线性关系.

2.3 转动刚度计算

文献[5]假设底板压力均匀分布,提出了柱脚转动刚度的计算公式:

$$\frac{M}{\theta} = \frac{E_c B D^2}{12} \quad (1)$$

式中: B 、 D 分别为柱脚底板的宽度和长度; E_c 为混凝土的弹性模量.实际上,柱脚底板压力并非均匀分布,而是集中在一定宽度范围内(图7a),因此,式(1)高估了转动刚度.图7(a)中的 c 一般取 $1.5t_p$, t_p 为柱脚底板厚度.文献[6]将承压区简化为图7(b)所示的分布形式,提出了平板柱脚的转动刚度设计公式:

H形截面柱绕强轴受弯时,

$$K_{ax} = \frac{E_c z^2}{6} \sqrt{l_e b_e} \quad (2)$$

式中: $b_e = t_f + 2c$, t_f 为柱翼缘厚度, $c = \min(t_p, 2t_f)$, t_p 为底板厚度; $l_e = b$; E_c 为混凝土的弹性模量.

H形截面柱绕弱轴受弯时,

$$K_{ay} = \frac{E_c b^2}{18} \sqrt{b b_e} \quad (3)$$

欧盟钢结构规范^[7]对柱脚刚度的规定为:

$$S_j = \frac{E_c z^2}{\bar{\mu} \sum_i \frac{1}{k_i}} \quad (4)$$

式中: E_c 为混凝土的弹性模量; z 为柱子截面高度; k_i 为第 i 部分的刚度系数; $\bar{\mu}$ 为初始转动刚度与转动刚度的比值.轴心受压柱的 μ 取1,式(4)变为:

$$S_j = E_c z^2 k_{13} = \frac{E_c z^2}{1.257} \sqrt{l_e b_e} \quad (5)$$

式中: $l_e = b + 2c$, $b_e = t_f + 2c$, c 取 $1.5t_p$, t_p 为底板厚度.

直接由式(2)得到的柱脚转动刚度比试验值低,因此,取 $c = 1.5t_p$ 进行计算,与按式(5)结果一并列于表5.可以看出,式(5)计算值明显高于试验值,而直接由式(2)和式(3)算得的刚度值要低于试验值,偏于保守.对式(2)进行修正,取 $c = 1.5t_p$ 计算,转动刚度值可以适当提高.因此,建议轴压柱平板柱脚转动刚度按式(6)和式(7)计算.

表4 试验结果

Tab. 4 Test results

构件编号	试验荷载 P_E/kN	转动刚度值 $/\text{kN} \cdot \text{m} \cdot \text{rad}^{-1}$	计算长度 系数 μ
S20-6000-2	950.2	21 388.5	0.730
S25-6000-2	950.4	21 568.4	0.729
S30-6000-2	890.3	22 121.3	0.727
S20-6000-4	1 010.1	27 090.5	0.724
S30-6000-4	950.4	22 730.4	0.727
S25-4800-2	1 040.4	22 223.4	0.735
S25-4800-4	1 010.1	22 647.2	0.734

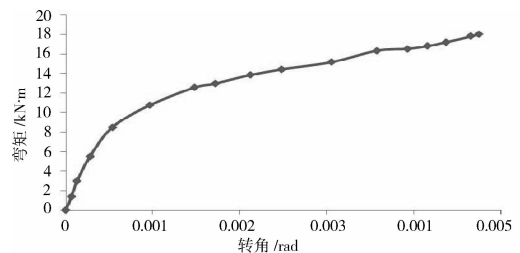


图6 典型试件弯矩-转角曲线

Fig. 6 Moment-rotational curve of typical specimen

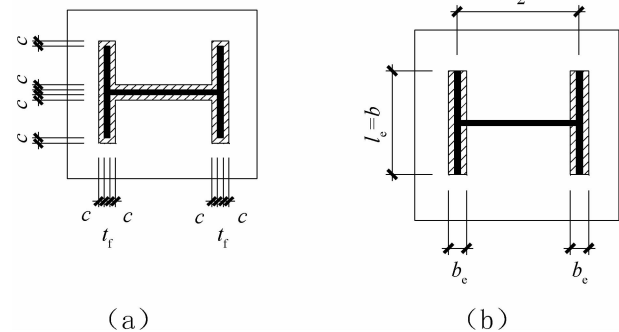


图7 柱脚底板压力分布

Fig. 7 Distribution of pressure of column base soleplate

$$K_{\theta x} = \frac{E_c z^2}{6} \sqrt{l_e b_e}$$

(6)

$$K_{\theta y} = \frac{E_c b^2}{18} \sqrt{b b_e}$$

(7)

式中: $b_e = t_f + 3t_p$; t_p 为底板厚度; $l_e = b$; E_c 为混凝土弹性模量.

表 5 试验值与计算值比较

Tab. 5 Comparison of test results with calculated results

构件编号	试验值 /kN·m·rad ⁻¹	计算值/kN·m·rad ⁻¹			试验值/计算值		
		式(2)、式(3)	$c=1.5t_p$	式(5)	式(2)、式(3)	$c=1.5t_p$	式(5)
S20-6000-2	21 388.5	13 340.2	15 740.1	78 962.1	1.60	1.36	0.27
S25-6000-2	21 568.4	13 853.4	17 323.5	89 050.4	1.56	1.25	0.24
S30-6000-2	22 121.3	13 853.1	18 773.3	98 828.3	1.60	1.18	0.22
S20-6000-4	27 090.5	13 340.3	15 740.4	78 962.3	2.03	1.72	0.34
S30-6000-4	22 730.4	13 853.4	18 773.2	98 828.2	1.64	1.21	0.23
S25-4800-2	22 223.4	13 853.2	17 323.2	89 050.2	1.60	1.28	0.25
S25-4800-4	22 647.2	13 853.3	17 323.4	89 050.1	1.63	1.31	0.25
2	6 667	2 437	2 850	—	2.74	2.34	—
3	5 102	2 437	2 850	—	2.09	1.79	—
4	5 650	2 437	2 850	—	2.31	1.98	—
5	7 633	2 437	2 850	—	3.13	2.68	—
6	8 403	2 437	2 850	—	3.45	2.94	—
7	5 203	2 437	2 850	—	2.14	1.83	—
11	6 493	2 437	2 850	—	2.66	2.28	—
12	4 566	2 437	2 850	—	1.87	1.60	—
14	6 536	2 797	3 340	—	2.34	1.96	—
15	8 333	2 797	3 340	—	2.98	2.49	—

注:试件 2~15 的数据来自文献[8],均为绕弱轴受弯试件.

2.4 柱子计算长度系数

根据弹性稳定理论,上端铰接下端有转动约束的轴心受压杆临界状态由下式给出:

$$\tan \phi = \frac{\phi R}{\phi^2 + R}$$

(8)

其中 $kl = \varphi$, R 为刚度系数, $R = \frac{k_{\theta}}{EI}$, 体现转动弹簧对杆件的约束程度.

$$\text{而 } kl = l \sqrt{\frac{P}{EI}} = l \sqrt{\frac{\pi^2 EI / (\mu l)^2}{EI}} = \frac{\pi}{\mu}.$$

$$\mu = \frac{\pi}{kl} = \frac{\pi}{\phi}$$

(9)

由式(8)解出 φ 后,轴心受压柱计算长度系数由式(9)给出,计算结果列于表 6. 由表 6 可知,式(6)、式(7)计算值与试验值吻合较好,公式计算值稍大于试验值,偏于安全.

表 6 计算长度系数比较

Tab. 6 Comparison of coefficients of effective lengths

试件编号	刚度系数 R		φ		计算长度系数 μ	
	试验	式(6)、(7)	试验	式(6)、(7)	试验	式(6)、(7)
S20-6000-2	22.23	16.36	4.30	4.26	0.730	0.737
S25-6000-2	22.42	18.01	4.31	4.28	0.729	0.734
S30-6000-2	22.99	19.52	4.32	4.29	0.727	0.732
S20-6000-4	28.16	16.36	4.34	4.26	0.724	0.737
S30-6000-4	23.63	19.52	4.32	4.29	0.727	0.732
S25-4800-2	18.48	14.41	4.27	4.23	0.735	0.742
S25-4800-4	18.84	14.41	4.28	4.23	0.734	0.742
2	32.38	13.84	4.35	4.22	0.722	0.744
3	24.78	13.84	4.33	4.22	0.725	0.744
4	27.44	13.84	4.34	4.22	0.724	0.744
5	37.07	13.84	4.38	4.22	0.717	0.744
6	40.81	13.84	4.39	4.22	0.715	0.744
7	25.56	13.84	4.33	4.22	0.725	0.744
8	10.03	13.84	4.13	4.22	0.760	0.744
11	31.53	13.84	4.37	4.22	0.719	0.744
12	22.17	13.84	4.31	4.22	0.729	0.744
14	31.74	16.22	4.36	4.25	0.720	0.739
15	40.47	16.22	4.39	4.25	0.715	0.739

注:试件 2~15 数据来自文献[8].

3 结 语

本文对10个平板柱脚试件进行了试验研究,得到了平板柱脚试件的极限承载力、柱脚转动刚度及柱计算长度系数,结论如下:

(1) 平板柱脚对柱子的转动约束作用明显,在设计中可以考虑其有利作用。

(2) 底板厚度越大,柱脚转动刚度越大;锚栓数量越多,柱脚转动刚度越大,但对转动刚度的影响很小;柱子长细比越大,柱脚转动刚度越大。

(3) 基于试验结果,提出了柱脚转动刚度计算公式。

(4) 提出了柱脚转动刚度与柱子计算长度系数之间的关系,柱子计算长度系数计算结果与试验结果吻合较好。除个别杆件计算长度系数大于0.75,其余均小于0.75。

参考文献 References

- [1] GB50017-2003. 钢结构设计规范[S]. 北京:中国计划出版社,2003.
GB 50017-2003. Code for design of steel structures [S]. Beijing:China Planning Press, 2003.
- [2] 申宇杰. 平板柱脚对轴压柱转动约束的研究[D],西安:西安建筑科技大学,2011.
SHEN Yu-jie. Study on rotational constraints of plated column base to axially loaded column [D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2011.
- [3] GB/T 50081-2002 普通混凝土力学性能试验方法标准[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2003.
GB/T 50081-2002 Standard for test method of mechanical properties on ordinary concrete [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2003.
- [4] 陈绍蕃. 平板柱脚的转动刚度和柱的计算长度[J]. 建筑钢结构进展, 2009, 11(1): 1-8.
CHEN Shao-fan, Rotational stiffness of plated column base and effective length of columns[J]. Progress in steel building structures, 2009, 11(1): 1-8.
- [5] GALAMBOS T V. Influence of partial base fixity on frame stability[J]. J. struct. Div., P. 1960, 84(ST5): 85-108.
- [6] 陈绍蕃. 钢结构设计原理[M]. 3版. 北京:科学出版社, 2005.
CHEN Shao-fan. Principal of steel structure design[M]. 3rd ed. Beijing: Science Press, 2005.
- [7] PrEN 1993-1-8:2002. Eurocode 3: Design of steel structures. Part 1. 8: Design of joints[S]. Brussels: [s. n.], 2002.
- [8] BEAULIEU D. A study of the stabilizing action of a simple column base connection [C] // 3rd International coll. on stability of metal structures, 1983, Toronto: 21-35.

Experimental research on rotational constraints of plated column base to steel column

WANG Xian-tie, HAO Ji-ping, SHEN Yu-jie, LUO Gu-qiu

(School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

Abstract: In the Code for Design of Steel Structures, the plated column base of steel column is considered as ideal hinged constraint, but the rotational restraint of the column base is not. The research results show that the plated column base of steel column has considerable rotational constraint. To research the rotational constraint of column base, experimental research was conducted for 10 H-section columns with plated column bases of steel column. The moment-rotation curves of the column bases, the rotational rigidity of the plated column bases were obtained. The formulas of the rotational rigidity of the plated column base of steel column were proposed according to the experimental results, and the approximate formula of the effective length factor was obtained.

Key words: plated column base; restraint; experimental research; rotational stiffness; effective length factor

Biography: WANG Xian-tie, Associate Professor, Ph. D., Xi'an 710055, P. R. China, Tel: 0086-15902942969, E-mail: wangxiantie@163.com