

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2013.04.004

基坑长短桩支护理论研究及有效应用

赵永清¹, 贺建清¹, 陈春鸣², 王磊¹

(1. 湖南科技大学 土木工程学院, 湖南 湘潭 411201; 2. 东莞理工学院城市学院 城市与环境科学系, 广东 东莞 523419)

摘要: 对支护桩短桩借助冠梁把部分受力传递到临近加长防护桩上, 从而实现短桩被充分再利用的过程进行了分析和研究, 提出了长短桩支护法, 从而避免了短桩的废弃, 进而达到了节约成本并保障施工工序顺利衔接的目的。通过实际工程案例验证了此方法的可行性和有效性, 此方法也可用于断桩处理中。

关键词: 长短桩; 基坑支护; 断桩; 冠梁

中图分类号: TU473

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2013)04-0018-05

The Theoretical Research and Effective Application of Long-Short Piles in Foundation Pit Support

Zhao Yongqing¹, He Jianqing¹, Chen Chunming², Wang Lei¹

(1. School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan Hunan 411201, China; 2. Department of City and Environment Science, City College of Dongguan University of Technology, Dongguan Guangdong 523419, China)

Abstract: Analyzes and researches the process which realizing the short pile's reusing through passing partial working force on to near enhanced soldier pile with the aid of crown beam, and proposes the long-short piles support method to reduce the disposing of short pile and achieves cost savings and smooth transition of working procedure. The actual project case verifies the feasibility and effectiveness of this method, which can also be used in broken piles disposing.

Keywords: long-short piles; foundation pit retaining and protecting; broken pile; crown beam

0 引言

随着我国经济的发展和城镇化建设步伐的加快, 城市建筑快速向高空和地下发展。从20世纪70年代末开始, 北京、上海、广州等城市陆续建起了一大批高层建筑, 时至今日, 我国高层建筑的总数已达数千幢。其中著名的有, 492 m高的上海环球金融中心, 2009年封顶的高达610 m的广州塔, 等。近年来, 我国许多大城市在建或已建大型地下设施, 如北京、上海、天津、广州等地的地下铁道。

高层建筑的建造、大型地铁设施的施工以及大量地下空间的开发, 必然有许多基坑工程。然而, 基坑在开挖过程中及开挖后容易出现工程安全事故,

这就要求对基坑支护方式进行慎重分析和研究, 确保基坑安全稳定。基坑开挖时, 对不能放坡或因受场地限制不能采用搅拌桩支护, 开挖深度为6~10 m时, 可采用排桩支护。排桩支护可采用钻孔灌注桩、人工挖孔桩、预制钢筋混凝土板桩或钢板桩等^[1-3]。钻孔灌注桩、人工挖孔桩在施工过程中会受众多因素(如地质结构、成孔工艺等)的影响而出现断桩。有些断桩是在浇筑前几米时出现, 怎样充分利用好这些断桩, 而不将其作废桩或补桩处理, 是值得研究的课题。事实上, 不少学者和工程技术人员已将断桩作短桩处理, 并使之与邻近的支护桩发生联系。文献^[4-9]通过准确的受力分析来正确地处置短桩和

收稿日期: 2013-04-30

作者简介: 赵永清(1985-), 男, 湖南永州人, 湖南科技大学硕士生, 主要研究方向为基坑工程, E-mail: 404360397@qq.com

邻近长桩的关系,使之共同承受土压力作用,本文将在这方面作些探讨。

1 理论分析

1.1 短桩支护设计

基坑支护过程,当支护桩长度 l 达不到设计要求,但相差不多时,为使此短支护桩还能保证基坑稳定,在桩顶加冠梁以提供一个支撑力 T , T 待求。假定地质土为砂质土,平均重度为 γ 、平均内摩擦角为 φ ,基坑开挖深度为 h ,基坑顶外荷载为 p 并符合朗肯土压力分布规律^[10],取单位长度,于是可建立图1所示的计算模型。

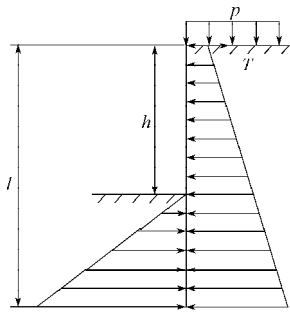


图1 短支护桩计算模型

Fig. 1 Calculation model for short soldier pile

受现场各种因素的影响,桩长最终未达到设计要求,但与设计长度相差不多时,可运用以上模型,并取支护桩桩底为力矩矩心,假设此时支撑力为 T_1 ,根据力矩平衡有

$$\frac{1}{6}\gamma k_p(l-h)^3 + T_1 l = \frac{1}{2}pk_a l^2 + \frac{1}{6}\gamma k_a l^3, \quad (1)$$

式中: k_p 为被动土压力系数, $k_p = \tan^2\left(45^\circ + \frac{\varphi}{2}\right)$;

k_a 为主动土压力系数, $k_a = \tan^2\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right)$ 。

由式(1)解得

$$T_1 = \frac{1}{2}pk_a l + \frac{1}{6}\gamma k_a l^2 - \frac{1}{6l}\gamma k_p(l-h)^3. \quad (2)$$

对基坑短支护桩水平方向受力作平衡分析时,假定支撑力为 T_2 ,从而有

$$\frac{1}{2}\gamma k_p(l-h)^2 + T_2 = pk_a l + \frac{1}{2}\gamma k_a l^2. \quad (3)$$

由式(3)解得

$$T_2 = pk_a l + \frac{1}{2}\gamma k_a l^2 - \frac{1}{2}\gamma k_p(l-h)^2. \quad (4)$$

当 T_1 与被动土压力 E_p 反向时,说明此桩虽比设计长度小,但此桩尚在安全范围内,只是降低了安全储备,其他防护桩仍可安原设计图纸施工。

当 T_1 与 E_p 同向时, T 可按式取值:

$$\begin{cases} T = T_1, & \text{当 } T_2 \text{ 与 } E_p \text{ 反向时;} \\ T = \max(T_1, T_2), & \text{当 } T_2 \text{ 与 } E_p \text{ 同向时。} \end{cases} \quad (5)$$

支护桩最大弯矩处即结构断面剪力为0处^[11],假定离基坑坑底距离 u 处剪力为0,则有

$$\frac{1}{2}\gamma k_p u^2 + T - pk_a(h+u) - \frac{1}{2}\gamma k_a(h+u)^2 = 0, \quad (6)$$

可化为 $A_1 u^2 + B_1 u + C_1 = 0$, (7)

式中: $A_1 = \frac{1}{2}\gamma(k_p - k_a)$;

$B_1 = -k_a(p + \gamma h)$;

$C_1 = T - pk_a h - \frac{1}{2}\gamma k_a h^2$ 。

由式(7)解得

$$u = \frac{-B_1 \pm \sqrt{B_1^2 - 4A_1 C_1}}{2A_1},$$

经定性分析,两解中只取

$$u = \frac{-B_1 + \sqrt{B_1^2 - 4A_1 C_1}}{2A_1}. \quad (8)$$

因此,离基坑坑底距离 u 处最大弯矩为

$$\begin{aligned} M_{\max 1} = & \frac{1}{2}pk_a(h+u)^2 + \frac{1}{6}\gamma k_a(h+u)^3 - \\ & \frac{1}{6}\gamma k_p u^3 - T(h+u), \end{aligned} \quad (9)$$

基坑坑底处弯矩为 $\frac{1}{2}pk_a h^2 + \frac{1}{6}\gamma k_a h^3 - Th_0$. (10)

求出弯矩后,结合支护桩间距 d ,可对支护桩进行截面及配筋计算。考虑节约施工成本,支护桩可分段配筋,其分界面为基坑坑底。基坑坑底以下控制弯矩由式(9)确定,坑底以上控制弯矩可由式(10)确定。

1.2 冠梁设计

在冠梁设计时,根据作用力与反作用力的关系可知,短桩(支护桩)作用于冠梁的力应为 Td 。为安全起见,并借鉴悬臂式排桩围护计算时的布鲁姆方法,使短桩作用于冠梁的力增大至 $1.2Td$,且与短桩临近的两支护桩需在原设计上加长,才能承受由短桩传过来的额外外力。即在冠梁设计时,两长桩作为冠梁的2个支座,冠梁计算长度 $L=2d$ 。取冠梁截面宽和高分别为 a 和 b ,则冠梁承受的侧面土压力 $q=(p+\gamma b)k_a b$ 。于是可建立图2所示的计算模型。

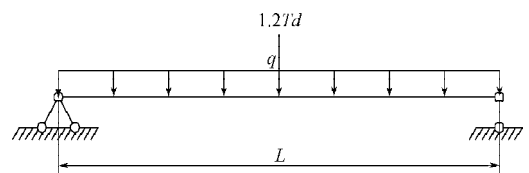


图2 冠梁设计计算模型

Fig. 2 Calculation model for crown beam design

冠梁最大弯矩

$$M_{\max 2} = \frac{1}{8}qL^2 + \frac{3}{10}TLd = \frac{1}{2}(p+\gamma b)k_a bd^2 + \frac{3}{5}Td, \quad (11)$$

冠梁最大剪力即支座反力

$$V_{\max} = 0.5qL + 0.6Td = (p+\gamma b)k_a bd + 0.6Td. \quad (12)$$

求出最大弯矩及最大剪力后, 再按 GB50010—2010《混凝土结构设计规范》^[12]对冠梁进行配筋计算。

根据作用力与反作用力的关系, 冠梁对加长支护桩的作用力应为 $V_{\max} = (p+\gamma b)k_a bd + 0.6Td$, 而最大剪力 V_{\max} 第一项 $(p+\gamma b)k_a bd$, 在长桩支护计算中土压力的计算时已考虑, 故应略去不计, 即冠梁对长桩的额外作用力是 $0.6Td$ 。考虑到支护桩施工时往往是隔孔施工, 使得一个长桩临近两桩均为短桩, 这样, 在计算长桩的支护设计时, 冠梁对长桩的额外作用力变为 $1.2Td$ 。因实际工程案例只有一个短桩, 故在下述分析时取 $0.6Td$ 。

1.3 长桩支护设计

在长支护桩设计时, 需考虑由临近短桩经冠梁传来的额外作用力 $0.6Td$, 只有这样才能在保证自身稳定、安全的同时, 还能保证临近短桩的稳定和安全。假定地质土为砂质土, 平均重度为 γ 、平均内摩擦角为 φ , 基坑顶外荷载为 p , 假设长桩的入土深度为 t , 并符合朗肯土压力分布规律, 取单位长度, 则冠梁传来的额外作用力为 $0.6T$, 于是可建立图 3 所示的模型。

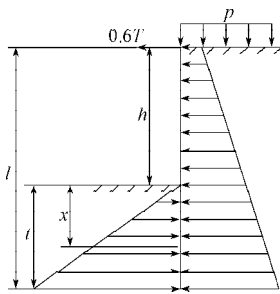


图3 长支护桩计算模型

Fig. 3 Calculation model for long sldier pile

以长桩桩底为矩心, 根据力矩平衡有

$$\frac{1}{6}\gamma k_p t^3 = \frac{1}{2}pk_a(h+t)^2 + \frac{1}{6}\gamma k_a(h+t)^3 + 0.6T(h+t). \quad (13)$$

通过非线性方程数值解法中的二分法或用 Matlab 编程^[13], 可求出式 (13) 中长桩的入土深度 t 。

为安全起见, 借鉴悬臂式排桩围护计算时的布鲁姆法, 使 t 增大至 1.2 倍, 则长支护桩的长度 $l=h+1.2t$ 。

设离基坑坑底 x 米处的弯矩为 M_x , 则有

$$M_x = \frac{1}{2}pk_a(h+x)^2 + \frac{1}{6}\gamma k_a(h+x)^3 + 0.6T(h+x) - \frac{1}{6}\gamma k_p x^3, \quad (14)$$

将 M_x 对 x 求导, 并令导数为 0, 有

$$\frac{1}{2}\gamma(k_p - k_a)x^2 - (pk_a + \gamma k_a h)x - \frac{1}{2}\gamma k_a h^2 - pk_a h - 0.6T = 0,$$

简化为

$$A_2x^2 + B_2x + C_2 = 0, \quad (15)$$

$$\text{式中: } A_2 = \frac{1}{2}\gamma(k_p - k_a);$$

$$B_2 = -pk_a - \gamma k_a h;$$

$$C_2 = -\frac{1}{2}\gamma k_a h^2 - pk_a h - 0.6T.$$

由式 (15) 解得

$$x = \frac{-B_2 \pm \sqrt{B_2^2 - 4A_2C_2}}{2A_2},$$

经定性分析, 取

$$x = \frac{-B_2 + \sqrt{B_2^2 - 4A_2C_2}}{2A_2}. \quad (16)$$

因此, 基坑下部入土段最大弯矩在离基坑坑底 x 米处, 其值为

$$M_{\max 3} = \frac{1}{2}pk_a(h+x)^2 + \frac{1}{6}\gamma k_a(h+x)^3 + 0.6T(h+x) - \frac{1}{6}\gamma k_p x^3. \quad (17)$$

基坑坑底以上段最大弯矩位于基坑坑底位置, 其值为

$$M_{\max 4} = \frac{1}{2}pk_a h^2 + \frac{1}{6}\gamma k_a h^3 + 0.6Th. \quad (18)$$

求出上下两段最大弯矩后, 可结合支护桩间距 d , 对支护桩进行截面及配筋计算。考虑节约施工成本, 支护桩采取分段配筋, 其分界面为基坑坑底。基坑坑底以下控制弯矩由式 (17) 确定, 坑底以上控制弯矩由式 (18) 确定。

2 工程实例

京九铁路和邯济铁路的交汇地聊城火车站, 于 2009 年实施改造工程, 主要包括聊城火车站站场、站台、雨棚等项目。其中聊城站改造工程旅客地道出入口基坑支护桩设计具体参数如下: 路基填土为渗水砂质土, 平均重度 $\gamma=18 \text{ kN/m}^3$ 、平均内摩擦角 $\varphi=34^\circ$, 最大开挖深度 $h=7.5 \text{ m}$ 。在基坑开挖前采取井点降水法, 以消除地下水对基坑开挖的影响。根据现场实际施工情况, 防护桩顶外荷载为列车荷载 $p=59.1 \text{ kN/m}^2$, 基坑开挖设单排防护桩, 原设计防护桩的直径

$D=1.2$ m, 桩间距 $d=1.6$ m, 桩长 $l=16$ m, 采用C30混凝土。考虑受力特点及经济性, 采取分段环向均匀布置配筋, 基坑底面以上控制弯矩为 $829 \text{ kN} \cdot \text{m}$, 布置 $30 \Phi 25$ HRB335 钢筋, 基坑底面以下控制弯矩为 $1\ 719 \text{ kN} \cdot \text{m}$, 布置 $40 \Phi 25$ HRB335 钢筋。

因突降大雨, 建设指挥部考虑施工安全, 其中一根支护桩在成孔过程中, 临时决定提前浇筑混凝土, 此时离设计长度还有 1 m, 于是形成了短桩。这在工程中是不允许的, 除非有加强措施, 使基坑支护在理论上安全, 并且得到相关部门认可, 方可浇筑混凝土。因受现场地质条件及列车运行的影响, 否定了在支护桩桩顶附近施加预应力锚杆支护方式, 采取加冠梁的方法。利用冠梁给此桩的支撑力代替锚杆的拉锚力, 使此根短支护桩达到安全、稳定。此短桩作用于冠梁的作用力经冠梁传递给临近支护桩, 从而加长了临近支护桩的长度, 形成了独特长短桩加冠梁支护方式。

经理论分析和计算, 设计防护桩的直径依旧是 $D=1.2$ m, 桩间距 $d=1.6$ m, 采用C30混凝土, 短桩桩长 $l=15$ m。基坑底面以下控制弯矩为 $1\ 511 \text{ kN} \cdot \text{m}$, 布置 $40 \Phi 25$ HRB335 钢筋; 基坑底面以上弯矩为 $694 \text{ kN} \cdot \text{m}$, 布置 $30 \Phi 25$ HRB335 钢筋。短桩作用于冠梁的作用力为 $34.56 \text{ kN} \cdot \text{m}$, 冠梁 $a \times b$ 为 $800 \text{ mm} \times 600 \text{ mm}$, 承受控制弯矩值为 $43 \text{ kN} \cdot \text{m}$, 控制剪力值为 36.3 kN 。纵向受力筋里外两侧均配置为 $3 \Phi 25$, 箍筋为 $\Phi 8@300$, 其余配置按规范要求^[12]。长桩桩长 $l=17.1$ m, 基坑底面以下控制弯矩为 $1\ 845 \text{ kN} \cdot \text{m}$, 布置 $41 \Phi 25$ HRB335 钢筋, 基坑底面以上控制弯矩为 $909 \text{ kN} \cdot \text{m}$, 布置 $30 \Phi 25$ HRB335 钢筋。本工程在采取此方法后, 已取得良好效果, 到工程结束都未发生安全事故, 也未延误工期, 保障了旅客地道出入口基坑的安全开挖和施工。

3 结语

1) 本文为因天气或即将塌孔等客观原因不得不提前成桩的情况提供了一种较经济、实用且能最大限度不影响施工进度长短桩处理技术的理论依据。

2) 对于一些特殊的断桩处理, 如: 混凝土浇筑现场出现混凝土土泵故障, 待问题解决继续浇筑时, 已浇筑的少量混凝土部分发生初凝导致支护桩出现断桩。此时采取此方法亦能取得较好的经济效益, 且达到同等的安全要求。

3) 当基坑周围地质适合锚杆施工时, 此法也可较方便地用于确定锚杆的锚固力大小, 即 $1.2Td$ 。

参考文献:

- [1] 杨跃, 张智钧, 唐炳全, 等. 现代高层建筑[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2011: 5-6.
Yang Yue, Zhang Zhijun, Tang Bingquan, et al. Modern Tall Building Construction[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2011: 5-6.
- [2] 陈忠汉, 程丽萍. 深基坑工程[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999: 1-4.
Chen Zhonghan, Cheng Liping. Deep Excavation Engineering[M]. Beijing: China Machine Press, 1999: 1-4.
- [3] 罗文林, 韩焯, 刘焱炜. 北京地区基坑支护技术现状研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(增刊1): 1534-1537.
Luo Wenlin, Han Xuan, Liu Chengwei. Studies on Present Status of Retaining Structures for Deep Excavation in Beijing [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(S1): 1534-1537.
- [4] 李竹, 郑刚, 王海旭. 带水平支撑长短桩组合排桩工作性状模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(增刊1): 440-446
Li Zhu, Zheng Gang, Wang Haixu. Model Tests on Work Behaviors of Retaining Piles with Different Lengths and Horizontal Support[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(S1): 440-446
- [5] 郑刚, 程雪松. 长短桩组合排桩悬臂支护工作机理试验研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(增刊1): 410-415.
Zheng Gang, Cheng Xuesong. Experimental Study on Cantilever Contiguous Retaining Piles with Different Lengths [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(S1): 410-415.
- [6] 徐佩林, 傅红玉, 陈林. 长短间隔悬臂现浇薄壁管桩基坑支护设计与施工[J]. 施工技术, 2011, 40(13): 24-27.
Xu Peilin, Fu Hongyu, Chen Lin. Design and Construction Technology of Foundation Support with Long-Short Cantilever Cast-in-Place Thin-Wall Concrete Pipe Pile[J]. Construction Technology, 2011, 40(13): 24-27.
- [7] 张世民, 魏新江, 秦建堂. 长短桩在深厚软土中的应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(增刊2): 5427-5432.
Zhang Shimin, Wei Xinjiang, Qin Jiantang. Research on Application of Long-Short Piles to Deep-Thick Soft Soil Area[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(S2): 5427-5432.
- [8] 张颂南. 长短桩技术在有邻近堆土建筑中的应用[J]. 岩土工程技术, 2012, 26(3): 125-127.
Zhang Songnan. The Application of Composite Long-Short Pile Foundation in High Fill Soil Building[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2012, 26(3): 125-127.

- [9] 何艳平, 王冠英, 张思锋. 长短桩组合桩基础设计的分析与应用[J]. 建筑科学, 2009, 25(5): 89-91.
He Yanping, Wang Guanying, Zhang Sifeng. Analysis and Application of the Design of Combination Pile Foundation with Long and Short Piles[J]. Building Science, 2009, 25(5): 89-91.
- [10] 高大钊, 袁聚云. 土质学与土力学[M]. 北京: 人民交通出版社, 2008: 145-148.
Gao Dazhao, Yuan Juyun. Soil Mechanics and Soil Science [M]. Beijing: The People's Communications Press, 2008: 145-148.
- [11] 孙训方, 方孝淑, 关来泰, 等. 材料力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002: 105.
Sun Xunfang, Fang Xiaoshu, Guan Laitai, et al. Mechanics of Materials[M]. Beijing: Higher Education Press, 2002: 105.
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB50010—2010混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010: 39-42, 54-58.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. GB50010—2010 Code for Concrete Structure Design[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010: 39-42, 54-58.
- [13] 马昌凤, 林伟川. 现代数值计算方法[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 147-151.
Ma Changfeng, Lin Weichuan. Modern Numerical Calculation Method[M]. Beijing: Science Press, 2008: 147-151.

(责任编辑: 邓光辉)

(上接第 17 页)

- [26] 彭新文, 吕秀阳. 葡萄糖在稀硫酸催化下的降解反应动力学[J]. 化学反应工程与工艺, 2008, 24(6): 523-528.
Peng Xiwen, Lü Xiuyang. Decomposition Kinetics of Glucose Catalyzed by Dilute Sulfuric Acid[J]. Chemical Reaction Engineering and Technology, 2008, 24(6): 523-528.
- [27] 彭新文, 吕秀阳. 5-羟甲基糠醛在稀硫酸催化下的降解反应动力学[J]. 化工学报, 2008, 59(5): 1150-1155.
Peng Xiwen, Lü Xiuyang. Decomposition Kinetics of 5-Hydroxymethylfurfural Catalyzed by Dilute Sulfuric Acid [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering(China), 2008, 59(5): 1150-1155.
- [28] 常春, 马晓建, 李洪亮, 等. 高温稀酸条件下木屑降解动力学研究[J]. 太阳能学报, 2009, 30(8): 1713-1717.
Chang Chun, Ma Xiaojian, Li Hongliang, et al. Kinetic Study on Sawdust Decomposition Under High Temperature and Dilute Acid Conditions[J]. Acta Energlae Solaris Sinica, 2009, 30(8): 1713-1717.
- [29] Van Soest P J. Symposium on Nutrition and Forage and Pastures: New Chemical Procedures for Evaluating Forages [J]. J. Anim. Sci., 1964, 23(3), 838-845.
- [30] 上海烟草集团公司. YC/T 347—2010烟草及烟草制品中性洗涤纤维、酸性洗涤纤维、酸洗木质素的测定: 洗涤剂法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010: 1-3.
Shanghai Tobacco Group Co., Ltd. YC/T 347-2010 Tobacco and Tobacco Products-Determination of Neutral Detergent Fiber Acid Detergent Fiber and Acid Detergent Lignin: Van Soest Method[S]. Beijing: China Zhijian Publishing House, 2010: 1-3.
- [31] 国家饲料质量监督检验中心. GB/T 23881-2009 饲用纤维素酶活性的测定: 滤纸法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009: 1-3.
China National Feed Quality Control Center. GB/T 23881—2009 Determination of Feed Cellulase Activity: Filter Paper Assay Method[S]. Beijing: China Zhijian Publishing House, 2009: 1-3.
- [32] Qi X, Watanabe M, Aida TM, et al. Catalytical Conversion of Fructose and Glucose into 5-Hydroxymethylfurfural in Hot Compressed Water by Microwave Heating[J]. Catal. Commun., 2008, 9(13): 2244-2249.
- [33] Watanabe M, Aizawa Y, Iida T, et al. Glucose Reactions With Acid and Base Catalysts in Hot Compressed Water at 473K [J]. Carbohydr. Res., 2005, 340(12): 1925-1930.
- [34] 卢崇兵. 高温液态水中金属氯化物催化下葡萄糖分解反应动力学[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
Lu Chongbing. Decomposition Kinetics of Glucose Catalyzed by Metal Chlorides in High Temperature Liquid Water[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010.
- [35] 宋春财, 胡浩权. 生物质秸秆在水中热化学液化研究 [J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2002, 34(5): 59-62.
Song Chuncai, Hu Haoquan. Thermochemical Liquefaction of Biomass in High Pressure Water[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2002, 34(5): 59-62.

(责任编辑: 申剑)