

文章编号:1673-2049(2006)04-0015-04

风压加速 II 型混凝土梁渗透碳化深度分析

屈文俊¹, 赵红晓²

(1. 同济大学 建筑工程系, 上海 200092; 2. 平顶山工学院 土木工程系, 河南 平顶山 467001)

摘要:在已有的风压加速混凝土碳化计算模型的基础上, 根据风压 p 与时间 t 、深度 x 的关系, 构造了 p - x - t 关系数据模型, 并给出了构造算例的数值解, 为风压下混凝土碳化计算提供了一条简便途径。为了验证风压对混凝土碳化的加速作用, 进行了 II 型混凝土梁的碳化试验, 依据理论分析和试验结果, 得出风的漩涡和壕沟效应可以加速混凝土的碳化; 另外, 由风压作用产生的二次风流场也可以加速混凝土碳化, 由此进一步完善了风压加速混凝土碳化的理论。

关键词:碳化分析; 风压; 渗透; 壕沟效应; 混凝土梁; 迎风面

中图分类号: TU528.1

文献标志码: A

Analysis of Filter Carbonization Depth of II Type Concrete Beam with Wind Pressure Acceleration

QU Wen-jun¹, ZHAO Hong-xiao²

(1. Department of Architectural Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Department of Civil Engineering, Pingdingshan Institute of Technology, Pingdingshan 467001, Henan, China)

Abstract: The p - x - t relational model was established based on the calculating model of concrete filter carbonization accelerated by wind pressure and relationship between wind pressure and time or depth. The carbonization depth was calculated in examples. A simple way was provided to calculate the concrete carbonization depth. In order to validate the effect of concrete carbonization accelerated by wind pressure, II type concrete beam carbonization experiment was carried out. According to the theoretical analysis and experimental results, it is concluded that the wind swirl and the fosse moat effect can also accelerate the concrete carbonization. Besides, wind pressure can generate secondary air field, which can also accelerate the concrete carbonization. The principle of concrete carbonization accelerated by wind pressure is perfected.

Key words: carbonization analysis; wind pressure; filter; fosse moat effect; concrete beam; windward side

0 引言

在大气环境下, 混凝土结构往往因混凝土的碳化诱发钢筋锈蚀而最终导致其耐久性失效。古谢诺夫通过对前苏联巴库地区钢筋混凝土高压输电塔的耐久性检测发现, 长期受强风影响面的碳化深度为

其他面碳化深度的1.5~2.0倍^[1], 遗憾的是他注意到这一自然现象, 却没有进行深入研究。笔者在对贵州省贵阳铁路分局川黔线上一座使用了34 a的混凝土桥梁进行调研时发现, 受风压影响较大面的碳化深度为一般面碳化深度的1.15倍, 并在文献[2]中对这一结果进行了简单描述。为了进一步证明风压

收稿日期: 2006-11-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(50178050)

作者简介: 屈文俊(1958-), 男, 河南辉县人, 教授, 博士生导师, 工学博士, E-mail: quwenjun@online.sh.cn。

对混凝土碳化的加速作用,在耐侯实验室进行了为期21 d的风压加速混凝土碳化的试验,结果表明,迎风面混凝土的碳化深度为背风面的1.12倍,迎风面角区碳化深度亦大于背风面角区碳化深度。混凝土Ⅱ型截面3个内侧面的混凝土碳化深度平均为无风作用面的1.25倍。对于这些现象,笔者力求做出合理的解释。

1 计算模型

利用文献[3]中建立的计算模型公式即

$$\frac{\partial \rho(\text{CO}_2)}{\partial t} = \frac{k}{\mu} m_0 \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} \tag{1}$$

式中: k 为渗透参数; m_0 为气体质量密度(本文中为大气中 CO_2 的质量密度); μ 为气体的粘性系数; $\rho(\text{CO}_2)$ 为混凝土中 CO_2 的质量浓度(简称 CO_2 浓度)。

由式(1)可见, CO_2 在混凝土中渗透引起的碳化可以转化为求解混凝土中 CO_2 的浓度分布,从而再确定碳化深度^[4]。混凝土内部压力 p 与进深 x 、时间 t 及外界风压大小有关,求解的关键在于建立正确可解的 p - x - t 关系模型。

2 渗透碳化深度分析

2.1 试验

Ⅱ型梁尺寸及风压作用方向如图1所示,采用两个L型梁对接(图1),接口处用硅胶密封。风加速Ⅱ型混凝土梁碳化试验参数见表1。根据风压对Ⅱ型梁的作用,确定试件各面的体型系数,如图2所示。试件共两根,一根置于风洞中,另一根置于无风压作用的装置内,采用间歇式对混凝土施加风压作用。风加速Ⅱ型混凝土梁碳化试验数据见表2^[5]。

表1 风压加速Ⅱ型混凝土梁碳化试验参数
Tab.1 Carbonization Test Parameters of Ⅱ Type Concrete Beam with Wind Pressure Acceleration

抗压强度/ MPa	水灰比	渗透系数/ ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	试验 周期/d	风压作用 时间比例/%	水泥用量/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
16.2	0.7	6.12×10^{-14}	21	49.2	300

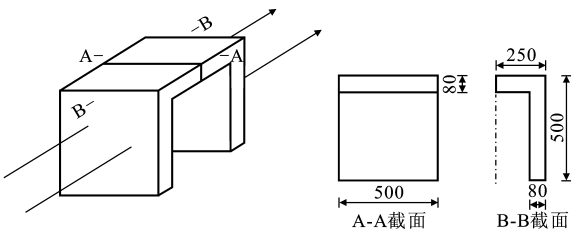


图1 Ⅱ型混凝土梁形状及尺寸(单位:mm)
Fig.1 Dimensions and Shape of Ⅱ Type Concrete Beam(Unit:mm)

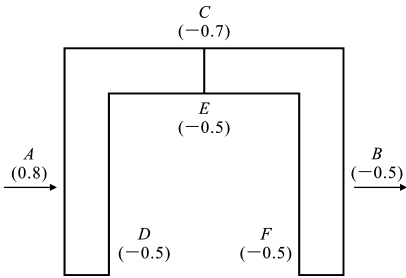


图2 Ⅱ型混凝土梁受风压作用的各面体型系数
Fig.2 Figure Coefficients of Ⅱ Type Concrete Beam in Every Face with Wind Pressure

根据风加速T型梁碳化试验结果可知,风压作用下的Ⅱ型梁碳化深度,包括侧风面和背风面,由于漩涡作用,碳化深度都将大于无风压作用下混凝土的碳化深度,对于Ⅱ型梁内部碳化深度如何确定,则需要根据试验结果进行分析。

表2 风压加速Ⅱ型混凝土梁碳化试验结果
Tab.2 Carbonization Test Results of Ⅱ Type Concrete Beam with Wind Pressure Acceleration

测点 位置	迎风面 A	背风面 B	外侧面 C	内侧面 D	内侧面 E	内侧面 F	无风压 作用面 G
碳化深度/mm	24.07	21.53	23.51	26.11	26.42	26.92	21.22
标准 差/mm	3.26	2.01	2.85	3.18	3.07	2.65	2.89
变异 系数	0.137	0.084	0.121	0.122	0.116	0.098	0.136

以不受风压作用面碳化深度21.22 mm为基准,各面碳化深度比值为

$$x_A : x_B : x_C : x_D : x_E : x_F : x_G = 1.134 : 1.015 : 1.108 : 1.23 : 1.245 : 1.269 : 1$$

2.2 迎风面渗透碳化深度

由碳化深度与 CO_2 浓度及碳化时间的关系 $x \sim \sqrt{\rho t}$ 可知,实验室中Ⅱ型截面迎风面在15% CO_2 浓度下碳化21 d相当于大气环境下($\rho=0.03\%$,不计风压影响)碳化28.77 a,风压作用时间占总时间的49.2%,相当于大气中风压作用14.15 a。本文中利用风压加速混凝土碳化的计算模型计算混凝土碳化深度,并与试验数据进行比较分析。

利用式(1)计算迎风面风压作用下混凝土试件的渗透碳化深度。初始条件: $v=5.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $\omega=$
 $\frac{1}{1600} v^2=18.9 \text{ Pa}$, p - x - t 关系采用 $p=\frac{cx^6}{t^2}+\frac{mx^4}{t^2}+p_0$ 模型^[6]。边界条件①: $p(x=0,t \text{ 为任意值})=-18.9$,求得 $p_0=-18.9 \text{ Pa}$ 。设风压在 $x \leq 50 \text{ mm}$

范围内下降为 0,时间为 10 a,则得边界条件②: $p(x=50,t=10)=0$,即 $\frac{50^6c}{22^2}+\frac{50^4m}{10^2}=18.9$ 。

对 p - x - t 关系式两次求导得

$$\frac{\partial p}{\partial x}=\frac{6cx^5}{t^2}+\frac{4mcx^3}{t^2}\tag{2}$$

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2}=\frac{30cx^4}{t^2}+\frac{12mcx^2}{t^2}\tag{3}$$

将式(3)代入式(1),并对时间 t 积分得

$$\rho(\text{CO}_2)=-\frac{30km_0cx^4}{t\mu}-\frac{12km_0cx^2}{t\mu}+d\tag{4}$$

为了计算简单,设系数 d 为常数,则当 $x=0$ 时, $\rho(\text{CO}_2)$ 应该为外界大气浓度,即 $\rho(\text{CO}_2)=\rho_0=6.0\times 10^{-4}\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,求得 $d=6.0\times 10^{-4}$ 。

CO_2 浓度在混凝土内部呈非线性分布,通常为简化计算,假定 CO_2 浓度按线性降低,在完全碳化处 $\rho(\text{CO}_2)=0\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$;而在外界风压作用下,碳化反应速度可能没有 CO_2 扩散速度快,部分碳化区将变长,如果不考虑部分碳化区,仅考虑 CO_2 浓度的变化,则可假设完全碳化处 $\rho(\text{CO}_2)=0.3\rho_0$ 。根据试验结果比较分析,14.15 a迎风面与无风压作用面碳化深度之差为 2.85 mm,即渗透碳化深度为 2.85 mm。

$$\rho(\text{CO}_2)|_{t=14.15,x=2.85}=0.3\rho_0\tag{5}$$

由式(4)、(5)得

$$0.3\times 6.0\times 10^{-4}=-\frac{30km_0cx^4}{t\mu}-\frac{12km_0cx^2}{t\mu}+6.0\times 10^{-4}\tag{6}$$

再由边界条件②和式(6)解得 $c=1.215\ 360\ 112\times 10^{-7}$, $m=-1.440\ 028\ 124\times 10^{-6}$,则 p - x - t 关系表达式为

$$p=\frac{1.215\ 360\ 112\times 10^{-7}x^6}{t^2}-\frac{1.440\ 028\ 124\times 10^{-6}x^4}{t^2}-18.9\quad p\leq 0\tag{7}$$

此时 p - x - t 关系如图 3 所示,其曲线由前至后代表风压作用 10、50、100 a 的 p 和 x 的关系

$$p=-0.000\ 216\ \frac{x^4}{t}+1.025\times 10^{-3}\ \frac{x^2}{t}+6.0\times 10^{-4}\tag{8}$$

例如,求 100 a 的渗透碳化深度,把 $t=100$ 代入式(8),得到 $x_1=4.06$, $x_2=-4.06$, $x_3=-3.43\text{i}$, $x_4=3.43\text{i}$,其中只有 $x_1=4.06$ 为合适的解。由式(8)可得

$$x=(2.369\ 6+\sqrt{5.623+1.945t})^{0.5}\tag{9}$$

渗透碳化深度与时间的关系如图 4 所示。

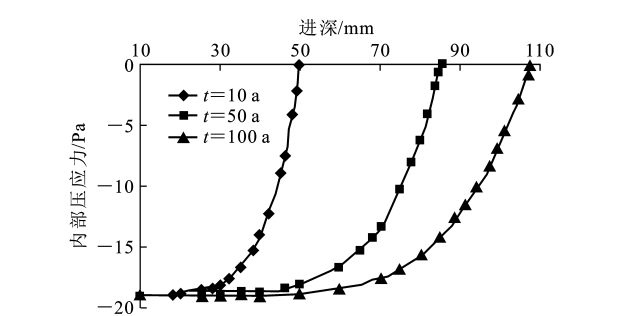


图 3 p - x - t 关系
Fig. 3 Relation of p , x and t

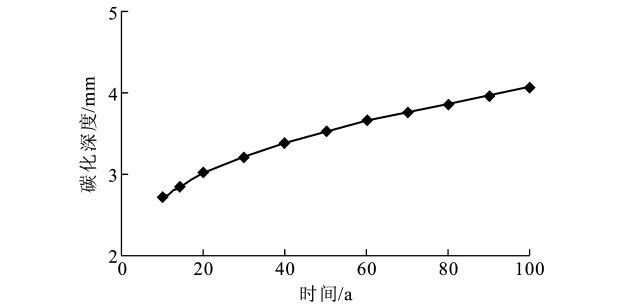


图 4 渗透碳化深度与时间的关系

Fig. 4 Relation of Filter Carbonization Depth and Time

风压作用下迎风面混凝土渗透碳化深度的计算值见表 3,其中扩散一列为利用文献[3]建立的 CO_2 扩散传质方程求得的。

表 3 风压加速迎风面混凝土碳化深度

Tab. 3 Windward Side Concrete Carbonization Depth with Wind Pressure Acceleration

时间/a	碳化深度/mm		时间/a	碳化深度/mm	
	扩散	渗透		扩散	渗透
10	12.95	2.72	60	35.05	3.66
20	19.40	3.02	70	38.25	3.78
30	24.52	3.22	80	41.35	3.88
40	28.10	3.39	90	42.85	3.98
50	32.22	3.54	100	44.40	4.06

2.3 试验结果分析

先做迎风面 A 和无风面 G 的检验,假定它们的平均值相等,然后做假设检验

$$J_A=\frac{|x_1-x_2|}{\sqrt{\sigma_1^2/l+\sigma_2^2/n}}\tag{10}$$

式中: x_1 为所要做的迎风面 A 的平均碳化深度, $x_1=24.07$; x_2 为无风压作用面 G 的平均碳化深度, $x_2=21.22$; l 为迎风面 A 样本个数, $l=183$; σ_1 为迎风面 A 碳化深度标准差, $\sigma_1=3.26$; σ_2 为无风压作用面 G 碳化深度的标准差, $\sigma_2=2.89$; n 为无风压作用面 G 样品个数, $n=209$ 。把试验结果代入式(10)得到迎风面的 $J_A=9.1>2.326$,即拒绝假设,在

99%的置信区间内,认为它们的碳化深度值不等;同理 $J_C=7.00$, $J_D=14.22$, $J_E=14.30$, $J_F=18.20$ 均大于2.326,即迎风面 A、外侧面 C、内侧面 D、内侧面 E、内侧面 F 的碳化深度与无风压作用面 G 的碳化深度值不等,因此在实验室提供的风速、风压作用时间和风压作用方式等条件下,矩形混凝土梁各面碳化深度不一致,风压对混凝土碳化的影响是不能被忽略的。只有背风面 B 的 $J_B=1.26<2.326$,即不能拒绝原假设,但是从总体来看,风压对碳化深度的影响是不可忽略的。

对于迎风面而言,风压作用在该面的中心处形成的压力最大,依次向外压力逐渐减小,该面的混凝土孔隙主要受风压作用,由中心向四周的风对孔隙内气体的影响趋势是随压力变小而逐渐变小的,漩涡影响逐渐变大,该面碳化深度为24.07 mm,大于无风压作用面的碳化深度21.22 mm,两者差值为2.85 mm。侧风面和背风面上的平均作用力为吸力,其渗透碳化深度是由两部分组成的,由于混凝土表面存在负压力梯度,二氧化碳在负压力梯度作用下向介质内部扩散速度减慢;而正是由于负压力作用及角区脱落漩涡的影响,在该处表面形成大量不规则漩涡,在漩涡作用下,碳化速度没有明显减慢。该处碳化深度分别为21.53、23.51 mm,仍然大于无风压作用面碳化深度21.22 mm,符合理论分析。

对于内侧面 D、E、F 的碳化深度,由于壕沟作用,均远大于无风压作用面 G 的碳化深度,因此对于混凝土结构,像试验中的梁,如果尺寸比较小,内部的压力必定和下边流动边的压力相等,可以肯定必有风压存在于壕沟内,在壕沟内部必然会有风流场,所以在风的压力和风的漩涡作用下,内部 3 个边的碳化深度将大于其壕沟外的边,试验已经证实这一点。外部风压作用消失以后,壕沟内部的风流场并不能随即消失,因此,内部的风流场将持续一段时间,形成二次风流场,继续加速内部混凝土的碳化,所以,在交替风压作用下,壕沟内面混凝土的碳化深度将大于壕沟外面混凝土的碳化深度。

3 结 语

(1)大气中服役的混凝土结构物,尤其是混凝土保护层直接外露的桥梁等结构物,受风压影响,造成构件各表面碳化速度不等,引起耐久性不等。

(2)风压作用可加速混凝土的碳化,对于迎风面和侧风面,碳化深度均大于无风压作用的混凝土的碳化深度。

(3)壕沟效应、二次风流场和漩涡作用均可以加速混凝土的碳化。

(4)混凝土背风面碳化情况比较复杂,从本文研究的结果看,背风面碳化深度是否大于无风压作用面与结构的尺寸有关,其具体的关系有待于进一步研究^[7-12]。

(5)在求解过程中看到,由于理论研究并不完善以及实测数据的缺乏,部分公式带有一定的假设性,该模型与实际相符合的程度还需要进一步确认。

参考文献:

References:

- [1] 莫斯克文 B M. 混凝土和钢筋混凝土的腐蚀及其防护方法[M]. 倪继森,译. 北京:化学工业出版社,1988.
MOSIKEWEN B M. The Corrosion and Defending Methods About Concrete and Reinforced Concrete [M]. Translated by NI Ji-miao. Beijing: Chemical Industry Press, 1988.
- [2] 屈文俊,张 誉,车惠民. 既有混凝土结构的碳化预测[J]. 建筑结构,1999,36(4):31-34.
QU Wen-jun, ZHANG Yu, CHE Hui-min. Carbonization Predicting on Existing Concrete Structures[J]. Building Structure, 1999, 36(4): 31-34.
- [3] 屈文俊,张 誉. 构件截面混凝土碳化深度分布的有限元分析[J]. 同济大学学报:自然科学版,1999,27(4):412-416.
QU Wen-jun, ZHANG Yu. Finite Element Analysis About Concrete Carbonization Depth at the Section [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 1999, 27(4): 412-416.
- [4] 屈文俊,白文静. 风压加速混凝土碳化计算模型[J]. 同济大学学报:自然科学版,2003,31(11):1 280-1 284.
QU Wen-jun, BAI Wen-jing. Calculating Model of Concrete Carbonization Accelerated by Wind Pressure [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2003, 31(11): 1 280-1 284.
- [5] 郭 猛. 风加速混凝土碳化的试验研究[D]. 上海:同济大学,2005.
GUO Meng. The Experimental Study on Carbonization of Concrete Accelerated by Wind[D]. Shanghai: Tongji University, 2005.
- [6] 陈道普. 风对混凝土碳化速度影响的研究[D]. 上海:同济大学,2006.
CHEN Dao-pu. The Study on the Influence on Carbonization Speed of Concrete by Wind[D]. Shanghai: Tongji University, 2006.

- mation on Earthquake Engineering, 1999, 15(3): 52-62.
- [5] 刘伯权,潘元. 框架-抗震墙结构抗震墙抗弯刚度的优化研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2005, 22(1): 55-57.
LIU Bo-quan, PAN Yuan. Study on Optimum Bending Rigidity of Seismic Wall in Frame-Shear Wall Structure[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(1): 55-57.
- [6] 沈蒲生,刘杨. 水平地震作用下框支剪力墙结构的变形研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2005, 22(1): 58-63.
SHEN Pu-sheng, LIU Yang. Distortion Research of Shear Wall Structure Supported on Frame Under Earthquake Actions[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(1): 58-63.
- [7] 张永健,黄平明. 考虑剪力滞效应的简支箱梁自振特性[J]. 建筑科学与工程学报, 2005, 22(2): 40-42.
ZHANG Yong-jian, HUANG Ping-ming. Free Vibration Characteristics of Simply Supported Box Girder with Effect of Shear Lag[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(2): 40-42.
- [8] 沈蒲生,孟焕陵. 框筒结构梁柱截面基于剪力滞最小的合理高度[J]. 建筑科学与工程学报, 2005, 22(3): 16-19.
SHEN Pu-sheng, MENG Huan-ling. Reasonable Section Height of Beam and Column Based on the Minimum Shear Lag in Framed Tube Structures[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(3): 16-19.
- [9] 陈政清. 斜拉索风雨振现场观测与振动控制[J]. 建筑科学与工程学报, 2005, 22(4): 5-10.
CHEN Zheng-qing. On-Site Observation of Wind-Rain Induced Vibration of Stay Cables and Its Control[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(4): 5-10.
- [10] 郭军庆,王雪韵,雷自学,等. 加芯混凝土框架柱轴压比限值试验研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2005, 22(4): 45-49.
GUO Jun-qing, WANG Xue-yun, LEI Zi-xue, et al. Experimental Research on Limit Value of Axial Compression Ratio for Concrete Frame Columns with Central Reinforcement[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(4): 45-49.
- [11] 周绪红,周期石. 水平荷载作用下交错桁架结构的内力和侧移计算[J]. 建筑结构学报, 2004, 25(4): 66-71.
ZHOU Xu-hong, ZHOU Qi-shi. Calculation of Internal Forces and Drift of Staggered Truss Structure Under Lateral Loads[J]. Journal of Building Structures, 2004, 25(4): 66-71.
- (上接第18页)
- [7] 刘伯权,潘元. 框架-抗震墙结构抗震墙抗弯刚度的优化研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2005, 22(1): 55-57.
LIU Bo-quan, PAN Yuan. Study on Optimum Bending Rigidity of Seismic Wall in Frame-Shear Wall Structure[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(1): 55-57.
- [8] 沈蒲生,刘杨. 水平地震作用下框支剪力墙结构的变形研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2005, 22(1): 58-63.
SHEN Pu-sheng, LIU Yang. Distortion Research of Shear Wall Structure Supported on Frame Under Earthquake Actions[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(1): 58-63.
- [9] 张生录,惠会清. 钢筋混凝土灌注桩试桩静载试验[J]. 建筑科学与工程学报, 2005, 22(2): 66-68.
ZHANG Sheng-lu, HUI Hui-qing. Plate Loading Test of Reinforced Concrete Pile[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(2): 66-68.
- [10] 贺拴海,任伟. 纤维增强塑料加固混凝土结构研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2005, 22(3): 20-24.
HE Shuan-hai, REN Wei. Research on Reinforced Concrete Structure with FRP[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(3): 20-24.
- [11] 马玉平,马昕,崔建涛. 高强度混凝土试验研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2005, 22(3): 67-69.
MA Yu-ping, MA Xin, CUI Jian-tao. Experimental Research on High-Strength Concrete[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(3): 67-69.
- [12] 贺拴海,吕颖钊. 考虑材料耐久性的在役混凝土结构可靠度研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2005, 22(1): 71-75.
HE Shuan-hai, LU Ying-zhao. Reliability Research of Existing Reinforced Concrete Structures[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(1): 71-75.