

燃料组件导向管事故工况应力计算方法研究^{*}

齐欢欢, 沈平川, 吴万军, 姜乃斌, 黄旋

(中国核动力研究设计院 核反应堆系统设计技术重点实验室, 成都 610041)

摘要: 通过反应堆动力分析计算出堆芯上下板和围板的位移时程作为进行燃料组件地震加 LOCA 动力分析的输入.建立燃料组件横向排模型,进行燃料组件事故动力响应分析,得到燃料组件的变形等内容,以此作为导向管应力分析的基础.结合排模型中燃料组件的简化方法以及导向管在燃料组件中的结构分布形式,对导向管的薄膜应力以及弯曲应力的算法进行了研究,推导出导向管薄膜应力、弯曲应力的计算方法,对采用该算法进行应力分析需要注意的问题进行了阐述,给出导向管进行安全评定的方法.对导向管应力分析及评定的流程进行总结并编程实现,并以某电厂为实例进行了导向管应力分析计算.

关键词: 燃料组件; 导向管; 事故工况; 应力计算方法

中图分类号: TL352 **文献标志码:** A

doi: 10.3879/j.issn.1000-0887.2016.05.009

引 言

燃料组件是核电厂反应堆堆芯的核心部件.根据美国核管会 SRP^[1]的要求,在极限事故工况期间,燃料组件应保持结构完整,确保燃料系统的可冷却性,验证控制棒组件能否顺利插入堆芯,因此需要对燃料组件进行极限事故安全分析.

为了开展燃料组件极限事故安全分析,必须对燃料组件进行事故动力响应分析,主要包括安全停堆地震(SSE)和失水事故(LOCA).在地震或 LOCA 事故工况下,由于地震冲击波或水动力波的影响,处于堆芯的燃料组件也会产生相应的振动,相邻的燃料组件之间以及燃料组件与围板之间会发生动态的碰撞和冲击.通过燃料组件事故动力响应分析,可得到燃料组件的碰撞载荷及燃料组件变形等结果,在此基础上,对燃料组件的格架强度及导向管应力进行安全评价,验证燃料组件是否满足相关规范的要求.

诸多学者对燃料组件的事故动力分析进行了研究.谢永诚等^[2]对几十年间燃料组件事故动力响应分析和试验进行了综合性研究,形成完整的分析和评价系统;周云清等^[3]对燃料组件的多项分析模型进行研究,并在此基础上,开展燃料组件的安全分析;张重珠等^[4]采用 FAMSAP 程序对燃料组件进行了地震和失水事故响应分析;肖忠^[5]对秦山二期工程燃料组件 LOCA 和 SSE 下的事故进行了安全分析.另外,茹俊等^[6]对燃料组件格架和燃料棒夹持系统的滑移和弯曲特性进行研究,并结合分析和试验结果,实现夹持系统的力学模拟;郑继师等^[7]概

* 收稿日期: 2015-10-29; 修订日期: 2015-11-17

作者简介: 齐欢欢(1983—),女,工程师,硕士(通讯作者. E-mail: qihuan73@126.com).

要介绍了目前国外压水堆燃料组件的发展动向,但是鲜有学者在燃料组件事故动力分析之后,对导向管应力分析的算法进行研究。

本文建立燃料组件横向排模型,进行燃料组件事故动力响应分析,结合排模型中燃料组件的简化方法以及导向管在燃料组件中的结构分布形式,对导向管的薄膜应力以及弯曲应力的算法进行了研究,给出导向管薄膜应力、弯曲应力的计算方法,以及导向管进行安全评定的方法,对导向管应力分析及评定的流程进行梳理并编程实现,给出了导向管应力分析的计算实例,并对采用此算法进行应力分析需要注意的问题进行了阐述。

1 燃料组件事故动力分析

堆芯的机械设计要求必须满足第四类事故工况(包括 SSE 和 LOCA)下的安全要求。在这类工况下,地震地面运动传递给压力容器引起显著的堆芯位移,或者是由 LOCA 的脉冲压力波引起。运动的水平分量导致燃料组件的横向变形,并且相邻组件间或组件与围板间在格架处易发生碰撞。

首先建立整体反应堆的响应分析模型,并根据地震响应谱或者 LOCA 下的水动力波,计算出堆芯上下板和围板的运动参数(时间-位移曲线)作为进行燃料组件地震加 LOCA 动力分析的输入。堆芯模型应该考虑到各种可能的复杂现象,但是应该维持在可接受的范围内。一般采用一排燃料组件在一个方向上激振,每个组件由一根梁来代表,组件的质量等效到梁单元的密度中,用带间隙的弹簧模拟格架处的碰撞。带间隙的弹簧会带来求解中的非线性,这类非线性问题可通过有限元软件进行计算,比如 ANSYS,采用瞬态全积分及 Newton-Raphson(牛顿-拉夫森)迭代法进行非线性求解。在组件梁模型中,节点位于格架处,它足以代表横向变形的重要位置。反应堆冷却剂对组件动态性质的影响,是通过流固耦合单元和合适的阻尼值来代表的。

在建立上述的燃料组件排模型之后,以各种工况(地震或者 LOCA)下的堆芯上下板和围板的运动参数(时间-位移曲线)作为载荷输入条件,进行堆内一排燃料组件的动态响应分析。通过燃料组件动态响应分析,可以计算得到燃料组件格架之间的碰撞载荷、燃料组件的变形等内容,以此作为导向管应力分析的基础。

2 导向管应力分析方法研究

燃料组件与堆芯围板以及燃料组件间的横向间隙很小,在横向载荷下易发生碰撞。燃料组件的横向排模型用于模拟其在横向载荷下的动态响应,模型主要模拟了燃料组件之间的碰撞关系、燃料组件与堆芯围板的碰撞关系、燃料棒与格架的碰撞关系以及燃料组件内部的载荷分布。在燃料组件横向排模型中,单组燃料组件采用一系列梁单元模拟,燃料组件之间通过带间隙的弹簧单元连接。梁单元的几何参数如图 1 所示,梁单元由两个节点(N_p 和 N_s) 构成,从 N_p 到 N_s 为单元 y 轴,垂直于单元轴向为 x 轴, z 轴通过右手法则确定,总体坐标系与单元坐标系一致。每个节点有两个自由度,沿 x 轴的平动 U_x 和绕 z 轴的转动 R_z ,节点 N_p 与 N_s 之间的距离为 l ,单元弹性模量为 E ,截面惯性矩为 I 。

在燃料组件横向排模型的动力分析中,在上、下堆芯板和围板位置施加瞬态位移,该位移输入通过反应堆系统模型动力分析得到。通过燃料组件的横向排模型的动力分析,可得到

每个燃料组件梁单元各节点的位移结果, 假设节点 N_p 和 N_s 的位移结果分别为 (U_{x1}, R_{z1}) 、 (U_{x2}, R_{z2}) 。

以某压水堆为例, 每个燃料组件有 24 根控制棒导向管, 如图 2 所示, 它们为控制棒插入和提出提供了导向通道。两个导向管之间沿坐标轴 X 向的最大距离为 D , 导向管与中心线 Y 轴之间的最大距离为 $D/2$, 导向管的外直径为 d 。下面根据燃料组件动力分析得到的位移结果推导导向管的应力。

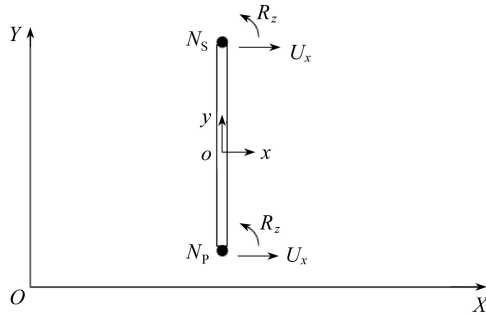


图 1 燃料组件横向动力分析采用的梁单元模型

Fig. 1 The beam element model used in dynamic analysis of fuel assemblies

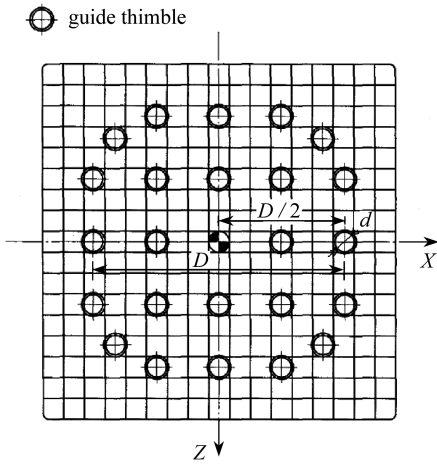


图 2 燃料组件导向管分布

Fig. 2 The guide thimble distribution in the fuel assembly

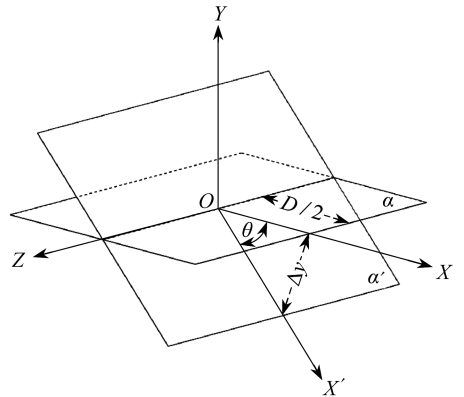


图 3 燃料组件导向管位移

Fig. 3 The guide thimble displacement in the fuel assembly

2.1 导向管薄膜应力计算方法

首先计算燃料组件导向管的薄膜应力:

1) 节点 N_p 和 N_s 的位移结果分别为 (U_{x1}, R_{z1}) 、 (U_{x2}, R_{z2}) , 两个节点绕 Z 轴的转动角度差 $\theta = R_{z2} - R_{z1}$ (见图 3)。由于燃料组件的位移均较小, 因此导向管沿轴向 (Y 轴) 的最大变形为

$$\Delta y = \theta \cdot \frac{D}{2} = (R_{z2} - R_{z1}) \frac{D}{2}; \tag{1}$$

2) 导向管沿轴向的应变为

$$\varepsilon = \frac{\Delta y}{l} = (R_{z2} - R_{z1}) \frac{D}{2l}; \tag{2}$$

3) 导向管的薄膜应力为

$$\sigma_m = E\varepsilon = \frac{\Delta y \cdot E}{l} = \frac{DE}{2l}(R_{z2} - R_{z1}). \quad (3)$$

2.2 导向管弯曲应力计算方法

下面分别计算节点 N_p 和 N_s 的弯曲应力:

1) 对于两节点单元,每个节点具有 U_x 和 R_z 两个自由度,采用经典的梁单元理论,单元刚度矩阵可表示为

$$\mathbf{K}^e = \begin{bmatrix} \frac{12EI}{l^3} & \frac{6EI}{l^2} & -\frac{12EI}{l^3} & \frac{6EI}{l^2} \\ & \frac{4EI}{l} & -\frac{6EI}{l^2} & \frac{2EI}{l} \\ & & \frac{12EI}{l^3} & -\frac{6EI}{l^2} \\ \text{Sym} & & & \frac{4EI}{l^2} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

有限元的求解方程

$$\mathbf{K}^e \mathbf{U} = \mathbf{P}, \quad (5)$$

其中, \mathbf{U} 为单元节点位移列向量, $\mathbf{U} = (U_{x1} \ R_{z1} \ U_{x2} \ R_{z2})^T$, \mathbf{P} 为单元节点载荷列向量, $\mathbf{P} = (F_{x1} \ M_{z1} \ F_{x2} \ M_{z2})^T$.

2) 将 \mathbf{K}^e , \mathbf{U} 和 \mathbf{P} 代入方程(5)

$$\begin{pmatrix} F_{x1} \\ M_{z1} \\ F_{x2} \\ M_{z2} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{12EI}{l^3} & \frac{6EI}{l^2} & -\frac{12EI}{l^3} & \frac{6EI}{l^2} \\ & \frac{4EI}{l} & -\frac{6EI}{l^2} & \frac{2EI}{l} \\ & & \frac{12EI}{l^3} & -\frac{6EI}{l^2} \\ \text{Sym} & & & \frac{4EI}{l^2} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} U_{x1} \\ R_{z1} \\ U_{x2} \\ R_{z2} \end{pmatrix}, \quad (6)$$

可求解出节点 N_p 和 N_s 的单元弯矩 M_{z1} 和 M_{z2} :

$$M_{z1} = \frac{EI}{l^2} [6U_{x1} - 6U_{x2} + l(4R_{z1} + 2R_{z2})], \quad (7)$$

$$M_{z2} = \frac{EI}{l^2} [6U_{x1} - 6U_{x2} + l(2R_{z1} + 4R_{z2})]. \quad (8)$$

3) 节点 N_p 位置的单元弯曲应力为

$$\sigma_{b1} = \frac{M_{z1} \cdot d}{2I} = \frac{E \cdot d}{l^2} [3U_{x1} - 3U_{x2} + l(2R_{z1} + R_{z2})]; \quad (9)$$

节点 N_s 位置的单元弯曲应力为

$$\sigma_{b2} = \frac{M_{z2} \cdot d}{2I} = \frac{E \cdot d}{l^2} [3U_{x1} - 3U_{x2} + l(R_{z1} + 2R_{z2})]. \quad (10)$$

值得一提的是,根据刚度矩阵可以发现计算弯曲应力采用的是经典 Euler(欧拉)梁理论,未考虑剪切变形的影响,因此对燃料组件排模型中梁单元的长细比过小的情况建议进行适当修正。

2.3 导向管薄膜加弯曲应力计算

分别计算节点 N_p 和 N_s 的薄膜加弯曲应力(保守起见,采用绝对值相加的方式):

$$\sigma_{mb1} = |\sigma_m| + |\sigma_{b1}| = \left| \frac{DE}{2l}(R_{z2} - R_{z1}) \right| + \left| \frac{E \cdot d}{l^2} [3U_{x1} - 3U_{x2} + l(2R_{z1} + R_{z2})] \right|, \quad (11)$$

$$\sigma_{mb2} = |\sigma_m| + |\sigma_{b2}| = \left| \frac{DE}{2l}(R_{z2} - R_{z1}) \right| + \left| \frac{E \cdot d}{l^2} [3U_{x1} - 3U_{x2} + l(R_{z1} + 2R_{z2})] \right|. \quad (12)$$

2.4 导向管安全评定方法

在燃料组件动力响应分析基础上开展的燃料组件安全分析主要包括两个方面:格架强度评价和燃料组件导向管应力评估。其中,在燃料组件导向管应力评估方面,根据燃料组件在第四类工况(极限事故工况)下的结构设计准则,导向管应力分析结果应满足 ASME 第三卷附录 F(采用弹性系统分析的验收准则)中的以下规定^[8]:

$$P_m \leq S, \quad (13)$$

$$P_m + P_b \leq 1.5S, \quad (14)$$

式中, P_m 为最大一次薄膜应力, P_b 为弯曲应力, S 为 $2.4S_m$ 和 $0.7S_u$ 中的最小值, S_m 为 $(2/3)S_y$ 和 $(1/3)S_u$ 中的最小值, S_y 为材料的屈服强度, S_u 为材料的拉伸强度。

3 导向管应力分析及评定流程

根据对燃料组件导向管应力计算方法的研究,结合排模型中燃料组件的简化方法以及导向管在燃料组件中的结构分布,推导出导向管薄膜应力、弯曲应力的计算方法,本节对导向管应力分析及评定的流程进行总结,如图 4 所示,并通过编程实现该算法。

4 算 例

选取某电厂作为分析对象。该电厂堆芯中燃料组件一排上的数量最多有 15 组,取数量最多的一排燃料组件作为分析对象。按照第 1 节所述方法对燃料组件进行动态响应分析得到燃料组件的变形,根据第 2 和 3 节中导向管应力计算的方法和流程,进行编程,可得到各燃料组件中导向管的薄膜应力以及薄膜加弯曲应力。计算结果如表 1 所示。

根据表 1 可知,最大的薄膜应力为 103 MPa,最大的薄膜加弯曲应力为 153 MPa。根据第 2.4 小节通过规范^[8]查得薄膜应力限值 $S = 154$ MPa,薄膜加弯曲的应力限值 $1.5S = 231$ MPa。可以发现计算得到的薄膜应力以及薄膜加弯曲应力均小于限值,从而可以评价导向管的应力结果满足规范的要求。

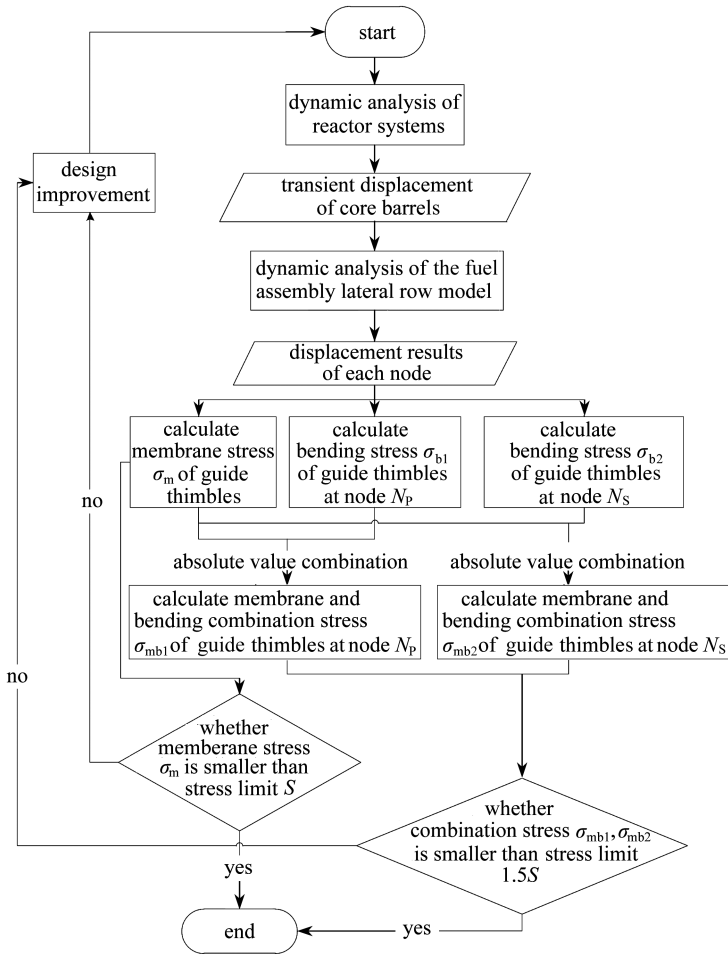


图4 燃料组件导向管应力分析及评定流程

Fig. 4 The stress analysis and evaluation process for the guide thimbles

表1 导向管应力分析结果统计

Table 1 The stress results of the guide thimbles

guide thimble position	P_m / MPa	fuel assembly position in the row model	node N_p $(P_m + P_b) / \text{MPa}$	fuel assembly position in the row model	node N_s $(P_m + P_b) / \text{MPa}$	fuel assembly position in the row model
grid 7—top nozzle	94	1	140	1	124	1
MSMG 3—grid 7	34	7	67	3	72	3
grid 6—MSMG 3	78	1	98	2	111	2
MSMG 2—grid 6	103	1	133	4	148	4
grid 5—MSMG 2	102	1	150	4	135	4
MSMG 1—grid 5	87	1	139	1	125	1
grid 4—MSMG 1	67	5	134	2	124	2
grid 3—grid 4	44	7	125	4	119	4
grid 2—grid 3	29	5	109	7	109	2
bottom nozzle—grid 2	101	1	136	1	153	1

5 结 论

本文首先进行反应堆动力分析,计算得到堆芯上下板和围板的运动参数(时间-位移曲线),以此作为燃料组件地震加 LOCA 动力分析的输入.然后建立燃料组件横向排模型,进行燃料组件事故动力响应分析,得到燃料组件的变形等结果,以便进行导向管应力分析.根据排模型中燃料组件的简化方法以及导向管在燃料组件中的结构分布形式,开展导向管的薄膜应力以及弯曲应力的算法研究,并推导出导向管薄膜应力、弯曲应力的计算方法.对此算法的适用范围进行叙述,给出导向管进行安全评定的方法.对导向管应力分析及评定的流程进行总结并编程实现,针对某电厂进行了导向管应力分析计算.

致谢 感谢中国核动力院核反应堆系统设计技术重点实验室运行基金的支持.

参考文献(References):

- [1] NRC Standrad Review Plan; NUREG-0800[S]. USA, 1996.
- [2] 谢永诚,姚伟达,姜南燕. 燃料组件在 seismic 和失水工况下的结构动力反应分析[J]. 核动力工程, 2002, **23**(S1): 139-147. (XIE Yong-cheng, YAO Wei-da, JIANG Nan-yan. Dynamic response analysis for fuel assemblies under earthquake and LOCA accidents[J]. *Nuclear Power Engineering*, 2002, **23**(S1): 139-147. (in Chinese))
- [3] 周云清,刘家正,朱丽兵. 地震加 LOCA 下的燃料组件安全分析研究[J]. 核动力工程, 2011, **32**(S1): 83-86. (ZHOU Yun-qing, LIU Jia-zheng, ZHU Li-bing. Safety analysis of fuel assembly for combined seismic and loss-of-coolant accident [J]. *Nuclear Power Engineering*, 2011, **32**(S1): 83-86. (in Chinese))
- [4] 张重珠,张忠岳. 燃料组件的 seismic 和失水事故响应——FAMSAP 程序的应用[J]. 原子能科学技术, 1993, **27**(4): 353-358. (ZHANG Chong-zhu, ZHANG Zhong-yue. FAMSAP: a code to analyze the dynamic response of PWR fuel assemblies in LOCA and seismic conditions[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 1993, **27**(4): 353-358. (in Chinese))
- [5] 肖忠. 秦山二期工程燃料组件 LOCA 和 SSE 下的事故分析[J]. 核动力工程, 2000, **21**(6): 511-514. (XIAO Zhong. Fuel assembly accident analysis under LOCA and SSE for Qinshan phase-II project[J]. *Nuclear Power Engineering*, 2000, **21**(6): 511-514. (in Chinese))
- [6] 茹俊,肖忠,蒲曾坪,雍涇,黄春兰,谷明非,粟敏. 压水堆燃料组件横向非线性特征模拟研究[J]. 核动力工程, 2013, **34**(6): 48-51. (RU Jun, XIAO Zhong, PU Zeng-ping, YONG Jing, HUANG Chun-lan, GU Ming-fei, SU Min. Modeling research on PWR fuel assembly lateral non-linear characteristics [J]. *Nuclear Power Engineering*, 2013, **34**(6): 48-51. (in Chinese))
- [7] 郑继师,甄树权,朱关仁. 国外压水堆燃料组件的发展动向[J]. 原子能科学技术, 2000, **34**(6): 557-562. (ZHENG Ji-shi, ZHEN Shu-quan, ZHU Guan-ren. Trend in the PWR fuel assembly at abroad[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2000, **34**(6): 557-562. (in Chinese))
- [8] ASME boiler and pressure vessel committee subcommittee on nuclear power. ASME boiler and pressure vessel code, section III[S]. New York: The American Society of Mechanical Engineers, 2004.

A Stress Calculation Method for Guide Thimbles in Fuel Assemblies Under Accident Conditions

QI Huan-huan, SHEN Ping-chuan, WU Wan-jun,
JIANG Nai-bin, HUANG Xuan

(*Science and Technology on Reactor System Design Technology Laboratory,
Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610041, P.R.China*)

Abstract: Through the dynamic analysis of reactor systems, the displacement-time histories of upper/lower core plates and core barrels were obtained. The time history was then treated as the input for seismic and LOCA analysis of the fuel assembly. Then the horizontal row model of the fuel assembly was built for the dynamic analysis under accident conditions. From this analysis, the displacements of the fuel assembly was got as the input for the guide thimble stress calculation. According to the simplified method for the horizontal row model and the guide thimble distribution in the fuel assembly, the calculation method for the membrane stress and bending stress was deduced. The issues in the use of this method were described. The process of stress analysis and evaluation for the guide thimbles was schemed and realized through programming. With the presented method, stress analysis and evaluation of the guide thimbles in one power plant were effectively carried out as an example.

Key words: fuel assembly; guide thimble; accident condition; stress calculation method

引用本文/Cite this paper:

齐欢欢, 沈平川, 吴万军, 姜乃斌, 黄旋. 燃料组件导向管事故工况应力计算方法研究[J]. 应用数学和力学, 2016, 37(5): 534-541.

QI Huan-huan, SHEN Ping-chuan, WU Wan-jun, JIANG Nai-bin, HUANG Xuan. A stress calculation method for guide thimbles in fuel assemblies under accident conditions[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2016, 37(5): 534-541.