

耐火材料热机械应力分析中的两类关键问题研究

王志刚^{1,2}, 李楠², 孔建益¹, 李友荣¹

(1. 武汉科技大学机械传动与制造工程湖北省重点实验室, 湖北 武汉, 430081;

2. 武汉科技大学耐火材料与高温陶瓷省部共建国家重点实验室培育基地, 湖北 武汉, 430081)

摘要:针对耐火材料热应力分析中的两类关键问题,从几何结构建模和材料的力学行为两方面,对有限元分析中特殊结构的建模方法和材料本构关系的选择进行了研究,为准确模拟耐火材料的热机械应力状态奠定了基础。

关键词:耐火材料;热应力;有限元;本构模型

中图分类号:TQ050.4⁺5 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-3090(2008)01-0037-05

耐火材料炉衬和构件是高温工业容器不可缺少的隔热保护材料,其使用状况直接决定了高温容器的寿命。耐火材料在服役过程中产生的热应力是其破坏的主要原因之一。因此,分析高温容器在服役环境下耐火材料的热应力大小及分布,是研究如何提高其使用寿命的重要手段。目前,国内外在利用有限单元法等数值模拟技术对耐火材料的热应力进行分析方面已做了大量的工作。在通过优化结构几何形状和边界条件(特别是加热制度),改善高温容器的热应力分布情形,提高耐火材料使用寿命方面,取得了较好的效果^[1~8]。实际上,有限单元法等数值分析方法能否准确模拟耐火材料服役时的真实应力状态,取决于所建立的有限元模型与实际状况的相近程度。本文从几何结构建模和材料力学行为两方面,对耐火材料热应力分析中的两类关键问题,即特殊结构的建模方法和材料的本构关系进行了研究,为准确模拟耐火材料的热机械应力状态做了有益的探讨。

1 耐火材料热应力分析的思路

炉衬系统模拟的目的是获取炉衬系统中各元件在不同操作条件下产生的热应力分布状态,为设计在该种特定操作条件下长寿命的耐火材料提供依据,并获取关于热应力的产生机理及热应力与耐火材料破坏之间的关系等方面的信息。

一个能作为设计依据的精确热机械分析是相

当复杂的。因为不同的载荷条件、材料模型、炉衬的热机械行为以及复杂的非线性力学和数值分析方法都使得精确分析变得非常困难。控制炉衬结构应力水平需要对结构和材料性能进行综合优化配置,使系统在完成设定功能的同时具有最低的破坏可能性。

炉衬系统的结构由下述几个方面决定:容器的几何形状、耐火砖的几何形状和尺寸和组装炉衬不同部分的方法(砖缝、膨胀缝,这些组装方法决定了耐火砖之间和耐火砖与外壳之间的相互作用)。

炉衬结构的性能由耐火材料的非线性性能和热机械规律确定。有限元是进行耐火材料研究的必要工具,通常可分为两步:第一步是计算炉衬系统稳态或瞬态的热响应(温度分布);第二步是利用获得的温度分布评估炉衬系统中的热应力场和应变场。利用有限元对炉衬结构进行分析的一般过程如图1所示。

通常,对炉衬系统进行模拟时尽可能采用简单的模型来描述耐火材料炉衬,因为这样不仅可以节约计算时间,而且可以相当容易地分析和解释模拟结果,同时在开发模型和修改模型时更加灵活。因此,在开始模拟时总是利用轴对称模型,将容器壁认为是整体回转体,将水平层认为是带有环形砖缝的整体圆盘。这种简化模型的主要缺点是,简化的砖缝网络使其不可能正确地反映单个砖的破坏形式及应力分布。不过,如果模型简

收稿日期:2007-09-12

基金项目:湖北省自然科学基金资助项目(2005ABA020);湖北省教育厅资助项目(B20061104)。

作者简介:王志刚(1973-),男,武汉科技大学教授,博士。E-mail:wzhigang@wust.edu.cn

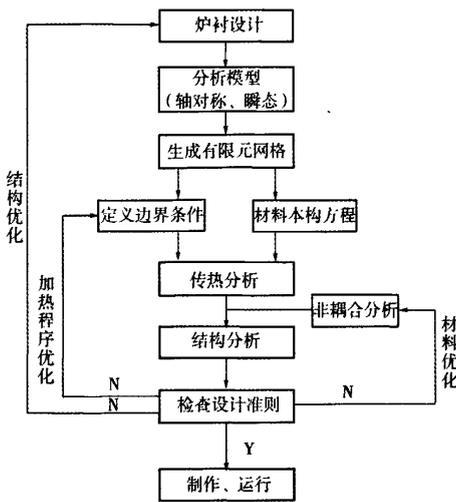


图1 利用有限元对炉衬结构进行分析的一般过程

化合理,可以正确反映砖与砖之间以及砖与外壳之间的相互作用,得到的结果可以作为进一步作精确三维分析的边界条件。如有必要,可以在二维模型计算的基础上进一步作三维分析,以提高计算精度。

以上所述只是耐火材料热应力分析的总体思路和框架,如果要准确地模拟其服役期间的真实状态,还必须注意两类热应力分析的关键问题。

2 热应力分析的关键问题

2.1 特殊结构的建模方法

2.1.1 砖缝结构的建模

在许多高温炉衬系统中(转炉、钢包等),为了减小耐火材料所受的热应力和炉壳所受的膨胀应力,通常采用砌炉时在耐火砖之间预留膨胀间隙的方法,让耐火砖在膨胀值未达到预留的膨胀间隙时彼此自由。膨胀间隙的大小非常重要,太小,起不到调节应力的作用;太大,有可能使砖结构不稳定或使大量的钢水渗入炉衬中。现场施工中,通常是经验设置,缺乏必要的理论依据。采用有限单元法,对炉衬系统进行热应力分析,掌握不同膨胀缝隙时的应力分布状况和砖结构的稳定性,对于确定适当的膨胀间隙具有重要意义^[9]。

目前,对砖缝进行建模时,主要采用连续模型和间断模型两种方式。连续模型将耐火砖和用火泥填充的膨胀缝看作连续体;间断模型将砖体和砖缝看作离散结构,更接近实际的砌筑状况,但所花费的计算时间较长。

实际使用中的高温容器大多为回转体,在其轴向和环向设有膨胀缝。为简化计算,有限元建模时通常利用其结构的对称性,将三维模型转

化为二维模型进行分析。建模时,可以同时考虑轴向和环向膨胀缝,也可以单独进行计算。

单独分析轴向和环向膨胀缝时,可分别取高温容器件的横截面和纵截面,采用间隙单元在砖缝处建模。同时考虑轴向和环向膨胀缝时,可采用连续模型和间断模型两种方式。连续模型中,对于轴向膨胀缝,利用具有分段线性刚度的间隙模型进行处理。间隙闭合之前,其刚度很小;间隙刚刚闭合时,由于耐火砖接触表面不光滑,耐火砖不可能完全接触,其刚度不可能达到砖的刚度。先假设一个表面粗糙度,当膨胀量达到预设膨胀缝与表面粗糙度之和时,其刚度才达到砖的刚度(见图2)。

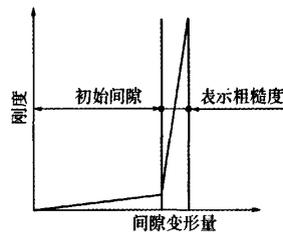


图2 间隙模型的刚度

由于采用了二维轴对称模型,在环向上认为结构是连续的,而实际上结构中存在环向膨胀缝。为了解决这一问题,通常采用一种与炉衬在环向上的平均行为等价的膨胀缝模型。该模型采用模量衰减系数 β 模拟环向膨胀缝闭合以前的行为(见图3)。模量衰减系数的选择必须保证在环向膨胀缝闭合以前炉衬应力接近单个耐火砖的应力,而环向膨胀缝闭合以后炉衬应力应与连续系统的应力类似。

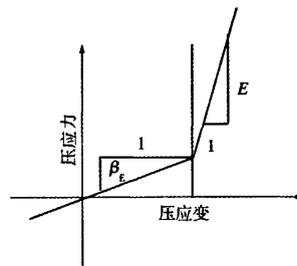


图3 等价膨胀缝模型

间断模型中,将两个方向的膨胀间隙统一归结为环向间隙,利用有限单元法对接触问题的求解方法进行计算。具体计算时,首先利用连续模型计算温度分布,然后将计算的温度以体载荷的形式施加到结构上,并指定接触面和目标面。当接触面和目标面之间的间隙大于零时,为开式接

触;小于零时为闭式接触。接触渗透性是由间隙值表示的,当接触点穿透目标面时,接触便发生了。

2.1.2 金属锚固件结构的建模

许多结构中耐火材料与金属壳体之间联接采用金属锚固件。金属锚固件一方面在结构上起到加强耐火材料与金属壳体之间的联接强度,另一方面也可以降低金属壳体与耐火材料之间和内部温度梯度,从而减小热应力。但由于锚固件在同一结构中往往数量众多,给数值计算时的几何建模造成巨大困难。因此,在实际有限元计算中,不可能对数以千百计的锚固件逐个进行建模处理。

对于带有金属锚固件的金属与耐火材料的复合结构,通常在 3 个尺度上分别建模,利用逆方法,用一个等价的二层壳单元来模拟耐火材料、金属壳体和金属锚固件组成的复合结构的力学行为,首先在局部尺度上取一部分真实结构(金属壳体、耐火材料及锚固件)建立三维的有限元模型。考虑耐火材料受压时呈弹塑性、受拉时呈弹脆性的特点,采用模糊裂纹模型,利用四点弯曲试验时的边界条件进行计算。通过四点弯曲试验结果,修正所建模型,然后在中间尺度上定义双层壳单元。第一层为弹性各向同性材料,模拟金属壳体;第二层为弹性可破坏材料,用来模拟含锚固件的耐火材料。该双层壳单元的力学行为应与三维结构(耐火材料、锚固件及金属体)的力学行为等价。利用比较的方法,在相同的边界条件下,使用三维实体模型和用所定义的二层壳单元定义模型计算出的应力场相同,这样来确定二层壳单元的特性参数(见图 4、图 5)。最后,利用定义的二层壳单元,在整体尺度下,对所分析的对象建模分析。这样就可以利用较少的单元和自由度数实现对含

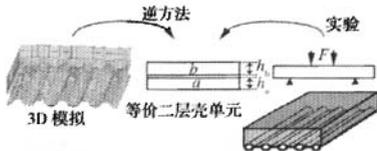


图 4 等效壳单元的定义

有较多金属锚固件结构的数值模拟。

2.2 材料的本构方程

材料的本构方程是用来描述其物理现象的数学表达式。通常,要求本构方程应尽可能简单,且所需的力学参数也要尽可能少,但又必须包括造成其非线性行为的原因,诸如损伤、塑性、蠕变等。合适的材料的本构方程是数值模拟准确性的保

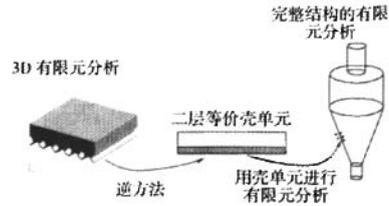


图 5 金属锚固件的处理方式

证^[10]。

在使用过程中,耐火材料产生的应变由 3 部分组成:弹性应变 ϵ^e 、非弹性应变 ϵ^m 以及热膨胀应变 ϵ^{th} ,即

$$\epsilon = \epsilon^e + \epsilon^m + \epsilon^{th}$$

式中: $\epsilon^{th} = \alpha I(T - T_0)$ 。 α 为热膨胀系数; I 为单位张量; T 为材料温度,K; T_0 为环境温度,K。

根据计算中是否考虑应变中的非弹性项,耐火材料的本构模型大致可分为以下几类。

2.2.1 热弹性模型

耐火材料最简单的本构方程是基于线性热弹性理论,其应力张量与应变张量的表达式为

$$\sigma = K(\epsilon_v - \epsilon_v^{th})I + 2Ge$$

式中: σ 为应力张量; K 为体积模量,MPa; G 为剪切模量,MPa; E 为弹性模量,MPa; ν 为泊松比; ϵ_v 为体积应变; ϵ_v^{th} 为热膨胀产生的体积应变; I 为单位张量; e 为整体应变张量中的偏张量部分。

热弹性本构模型的优点是简单且计算时间短,它可以作为有限元分析的第一步,大致了解结构中热应力的分布状态。由于模型中没有考虑耐火材料的非弹性和非线性行为,因此计算出的结果不够精确,通常在温度较高的区域对产生的热应力估计过高。

2.2.2 热弹塑性模型

热弹塑性本构模型在线性热弹性模型的基础上,考虑耐火材料的非弹性和非线性行为,其应力张量的表达式为

$$\sigma = K(\epsilon_v - \epsilon_v^{th} - \epsilon_v^m)I + 2G(e - e^m)$$

该模型考虑了材料除损伤以外的所有非线性行为,计算出的应力值比较精确,但没有考虑材料不可逆的损伤行为,而且,模型中需要采用的材料参数要消耗大量的时间。实验获知,本模型可用于对炉衬结构的评价和作初步的结构优化。

2.2.3 损伤模型

损伤模型利用应力软化描述耐火材料损伤以后刚度的降低情形,可以准确界定耐火材料的主要热机械性能——易破坏的弹性行为。但由于没有考虑材料高温下的粘塑性现象,对耐火材料的

物理性能的描述还不完全。本构模型可以用于炉衬系统整体结构的优化。

2.2.4 考虑损伤和相变的粘塑性模型

本模型中,利用一个标量 d 来描述耐火材料的损伤和相转变对材料性能的影响。应力与应变之间的关系为

$$\sigma = (1-d)[K(\epsilon_v - \epsilon_v^h - \epsilon_v^i) I + 2G(1-d)(e - e^h)]$$

该模型不仅考虑了耐火材料的热弹性、热粘塑性和其他非线性特征,还考虑了耐火材料在使用过程中的损伤和相转变现象。正是由于模型的完善性,同时也增加了模型实现的难度。因为模型中涉及的材料参数必须通过大量的实验才能获得,而且这些参数并不具有普适性,不同成分以及不同制造工艺的材料必须通过同样的实验获取该材料的相关参数。因此该模型在实现上是很困难的,需建立在大量实验数据的基础上。在实际使用中,仅用于耐火材料元件或结构简单的特殊炉衬结构。

另外,有些研究者为了避免纠缠于建立耐火材料复杂的本构方程,而直接利用人工神经网络技术来模拟耐火材料在使用过程中的各种非线性行为,并将之集成到有限元计算软件中,对相应的炉衬系统进行应力分析。不过,该模型与上述考虑损伤和相转变的粘塑性模型一样,必须针对特定材料进行大量实验,然后编制具有特定的输入输出关系的人工神经网络程序,利用取得的实验数据对其进行训练,达到设定的收敛准则以后,才可用于耐火材料炉衬结构的应力分析。

综上所述,在模拟耐火材料炉衬时,为了得到与实际情况相吻合的结果,必须考虑耐火材料本身的热机械行为特征。为了确定耐火材料的行为规则,实验数据库的积累建立是非常必要的。在建立耐火材料的行为规则时,应该充分考虑造成其非线性的原因,还应尽量简单,以方便用户使用。如果考虑更加复杂的化学和力学现象之间的作用(诸如矿物相转变等),那么耐火材料的本构模型将会更加精确。但是,目前还没有有足够的实验数据来建立描述耐火材料非线性力学行为的本构模型。在实际计算中,通常选用热弹塑性模型作为耐火材料的本构关系,可以满足工程分析的精度。

不过,由于耐火材料的非线性行为与其微观结构有着密切的关系,而材料本构关系是建立在唯象学基础上的,因此,单纯从宏观尺度无法描述其复杂的力学行为,必须引入微观力学方法,建立

微观结构变化与宏观力学行为的关系。目前,笔者正在进行该方面的研究^[1]。从材料的微观结构出发,利用细观力学方法,研究不同载荷和温度条件对耐火材料微观结构和性能的影响,探寻耐火材料非线性力学行为和宏观破坏的内在机理,并利用材料的代表体积单元能够起到从微观到宏观过渡的特点,将之运用到有限元分析中,综合材料宏观和微观两个尺度上的信息,实现耐火材料的跨尺度模拟,为耐火材料的优化设计提供有力的依据。

3 结语

耐火材料在服役过程中产生的热应力是影响其寿命的主要因素。在利用有限元等数值模拟技术进行分析计算时,必须处理好两类关键问题,即特殊结构的建模方法和材料本构模型的选取。本文详细叙述了含砖缝和金属锚固件结构的有限元建模方法,列举了耐火材料的各种本构关系,比较了各自的适用范围,指出了利用本构关系描述耐火材料复杂力学行为的局限性,提出了引入微观力学方法的发展方向。本文阐述的对这两类关键问题的处理方法有助于对耐火材料炉衬系统进行正确的热机械应力分析。

参 考 文 献

- [1] Wang Zhigang, Li Nan, Kong Jianyi, et al. Calculation of temperature and stress distribution for ladle lining[J]. *Refractories Applications and News*, 2004, 9(3): 27-30.
- [2] Wang Zhigang, Li Nan, Kong Jianyi, et al. Research on thermomechanical stress of long nozzle and improvement measures[J]. *Refractories Applications and News*, 2005, 10(1): 13-17.
- [3] Wang Zhigang, Li Nan, Kong Jianyi, et al. ICRM' 2005[C]. Guangzhou: Guangdong People's Publishing House, 2005: 531-537.
- [4] Wang Zhigang, Li Nan, Kong Jianyi, et al. Proceedings of the fourth international symposium on refractories[C]. Beijing: International Academic Publishers World Publishing Corporation, 2003: 205-211.
- [5] 王志刚, 李楠, 孔建益, 等. 长水口热机械应力研究[J]. *耐火材料*, 2004, 38(2): 118-120.
- [6] 王志刚, 李楠, 孔建益, 等. 钢包底工作衬的热应力分布及结构优化[J]. *耐火材料*, 2004, 38(4): 271-274.
- [7] 王志刚, 李楠, 孔建益, 等. 钢包底温度场和应力场模拟[J]. *冶金能源*, 2004, 23(4): 16-19.

- [8] 王志刚,李楠,孔建益,等.降低长水口颈部应力的研究[J].炼钢,2004,20(4):44-47.
- [9] 王志刚,李楠,孔建益,等.炉衬系统热应力分析中几类特殊结构的建模方法[J].工业炉,2004,26(3):28-30.
- [10] 王志刚.耐火材料的热机械行为研究[D].武汉:武汉科技大学,2005.
- [11] Wang Zhigang, Li Nan, Kong Jianyi, et al. Prediction of properties of Al_2O_3 -C refractory based on micro-structure by an improved generalized self-consistent scheme[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2005, 36B(10): 577-582.

Two key issues in thermomechanical stress analysis of refractories

Wang Zhigang^{1,2}, Li Nan², Kong Jianyi¹, Li Yourong¹

(1. Hubei Key Laboratory of Mechanical Transmission and Manufacturing Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China; 2. Hubei Refractories and High-temperature Ceramics Key Laboratory, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China)

Abstract: In light of the two key issues in the thermomechanical stress analysis of refractories, this paper studies the modeling of special structure and the selection of constitutive relations of materials in the final element analysis from the perspectives of geometric structure modeling and mechanical performance of materials. The study paves the way for accurately simulating the thermomechanical stress state of refractories.

Key words: refractory; thermal stress; finite element; constitutive model

[责任编辑 彭金旺]



王志刚,男,1973年出生,武汉科技大学机械设计及理论专业硕士研究生毕业,武汉科技大学材料学专业博士研究生毕业。武汉科技大学机械自动化学院教授、机械工程系主任、冶金设备研究所所长、硕士研究生导师,湖北省机械工程学会青年分会常务理事。先后发表学术论文59篇,其中被EI检索17篇,被SCI检索1篇。参与国家自然科学基金课题“基于加权相空间重构的早期故障特征提取理论研究”1项,主持和参与省部级科研课题9项,获省、部级科技奖共6项,其中代表性奖项有:“耐火材料内衬和构件的热机械应力研究及应用”获2006年湖北省科技进步一等奖;“提高地下卷取机承载能力研究”获2005年湖北省科技进步二等奖;“1700热连轧粗轧机组负荷分配研究”获2003年湖北省科技进步二等奖;“可逆式轧机主动传动万联轴器疲劳设计负荷研究与应用”获2002年湖北省科技进步二等奖;“带钢板矫正机全自位辊系研制”获2001年湖北省科技进步三等奖;“基于谐波小波分析的低速重载轴承故障诊断方法研究及应用”获2007年湖北省科技进步三等奖。2002年被评为“武汉科技大学十佳青年教师”;2005年被评为“武汉科技大学学科科研新星”。主要研究方向为冶金设备的动力学行为及其故障诊断、耐火材料热应力与热机械行为等。

耐火材料热机械应力分析中的两类关键问题研究

作者: [王志刚](#), [李楠](#), [孔建益](#), [李友荣](#), [Wang Zhigang](#), [Li Nan](#), [Kong Jianyi](#), [Li Yourong](#)

作者单位: [王志刚, Wang Zhigang \(武汉科技大学机械传动与制造工程湖北省重点实验室, 湖北, 武汉, 430081; 武汉科技大学耐火材料与高温陶瓷省部共建国家重点实验室培育基地, 湖北, 武汉, 430081\)](#), [李楠, Li Nan \(武汉科技大学耐火材料与高温陶瓷省部共建国家重点实验室培育基地, 湖北, 武汉, 430081\)](#), [孔建益, 李友荣, Kong Jianyi, Li Yourong \(武汉科技大学机械传动与制造工程湖北省重点实验室, 湖北, 武汉, 430081\)](#)

刊名: [武汉科技大学学报 \(自然科学版\)](#) 

英文刊名: [JOURNAL OF WUHAN UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY \(NATURAL SCIENCE EDITION\)](#)

年, 卷(期): 2008, 31(1)

参考文献(11条)

1. [Wang Zhigang; Li Nan; Kong Jianyi](#) Calculation of temperature and stress distribution for ladle lining 2004(03)
2. [Wang Zhigang; Li Nan; Kong Jianyi](#) Research on thermomechanical stress of long nozzle and improvement measures 2005(01)
3. [Wang Zhigang; Li Nan; Kong Jianyi](#) [查看详情](#) 2005
4. [Wang Zhigang; Li Nan; Kong Jianyi](#) [查看详情](#) 2003
5. [王志刚; 李楠; 孔建益](#) [长水口热机械应力研究](#)[期刊论文]-[耐火材料](#) 2004(02)
6. [王志刚; 李楠; 孔建益](#) [钢包底工作衬的热应力分布及结构优化](#)[期刊论文]-[耐火材料](#) 2004(04)
7. [王志刚; 李楠; 孔建益](#) [钢包底温度场和应力场模拟](#)[期刊论文]-[冶金能源](#) 2004(04)
8. [王志刚; 李楠; 孔建益](#) [降低长水口颈部应力的研究](#)[期刊论文]-[炼钢](#) 2004(04)
9. [王志刚; 李楠; 孔建益](#) [炉衬系统热应力分析中几类特殊结构的建模方法](#)[期刊论文]-[工业炉](#) 2004(03)
10. [王志刚](#) [耐火材料的热机械行为研究](#) 2005
11. [Wang Zhigang; Li Nan; Kong Jianyi](#) Prediction of properties of Al2O3-C refractory based on microstructure by an improved generalized self-consistent scheme 2005(10)

本文读者也读过(4条)

1. [王志刚](#), [李楠](#), [孔建益](#), [李友荣](#). [WANG Zhi-gang, LI Nan, KONG Jian-yi, LI You-rong](#) [耐火材料热应力分析中的材料本构模型研究](#)[期刊论文]-[工业炉](#)2008, 30(4)
2. [郭贵宝](#), [赵文广](#), [宋希文](#), [安胜利](#). [GUO Gui-bao, ZHAO Wen-guang, SONG Xi-wen, AN Sheng-li](#) [碳复合材料中锰对碳结构形成的作用机理研究](#)[期刊论文]-[包头钢铁学院学报](#)2000, 19(1)
3. [侯阳来](#), [王玺堂](#), [李云宝](#), [李钰](#). [Hou Yanglai, Wang Xitang, Li Yunbao, Li Yu](#) [Al2O3-SiC-C浇注料的应力-应变行为](#)[期刊论文]-[武汉科技大学学报 \(自然科学版\)](#) 2009, 32(4)
4. [魏耀武](#), [李楠](#), [陈晓霞](#). [Wei Yaowu, LI Nan, Chen Xiaoxia](#) [MgO-CaO系耐火材料的研究与应用](#)[期刊论文]-[武汉科技大学学报 \(自然科学版\)](#) 2007, 30(2)

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_whkjdxxb200801009.aspx