

128 × 128 元碲化铟红外焦平面 探测器热 - 应力耦合分析

李鹏飞, 张立文, 孟庆端, 余 倩

(河南科技大学电子信息工程学院, 河南 洛阳 471023)

摘要:考虑探测器在热冲击过程中由于传导降温非均匀引起的温度梯度分布,借助 ANSYS 软件对温度梯度影响下的碲化铟探测器进行热 - 应力耦合分析。依据热分析结果得到了热冲击下探测器的降温时间曲线,以此为基础进行热 - 应力耦合分析得到了探测器的应力分布,并以温度、时间为参考量将热冲击过程中 InSb 芯片上应力最大值变化与传统均匀降温方式下的应力最大值变化进行对比,结果表明器件内部存在温度梯度时,InSb 芯片上的应力增加呈现出先快后慢现象,明显不同于均匀降温的线性增加;且应力增加主要集中在热冲击初始 0 ~ 0.5 s 时间段,如此短时间段内应力的急剧增加将严重影响探测器的可靠性。最后对传导降温方式下应力变化可能引起 InSb 芯片失效的原因进行了初步探讨,这对预测裂纹的发生提供了一定的帮助。

关键词:碲化铟;焦平面探测器;热 - 应力耦合;有限元

中图分类号:TN215 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2013.09.14

Thermal-stress coupling analysis on 128 × 128 InSb infrared focal plane array detector

LI Peng-fei, ZHANG Li-wen, MENG Qing-duan, YU Qian

(School of Electronic and Information Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, China)

Abstract: When infrared focal plane array detector (IRFPA) is loaded by thermal shock, the temperature non-uniform in the cooling process leads to temperature gradient distribution inside the device. With the couple-field function of ANSYS, the stresses inside IRFPA influenced by temperature gradient are studied. According to the thermal analysis results the time-temperature curve is obtained. Based on the thermal analysis results, the thermal-stress coupling analysis is carried out, and the stress distribution in IRFPA is obtained. From temperature and time, the varied trends of Von Mises stress maximum in InSb chip of thermal conductive mode are compared with that of the model assuming uniform temperature distribution over the entire structure. The results show when there is the temperature gradient in IRFPA, the Von Mises stresses increase rapidly at first then slowly, which is obviously different from the Von Mises stresses changes in the model assuming uniform temperature distribution over the entire structure. The stress increase occurs within a beginning time of 0 ~ 0.5 s, the sharp stress increase in such a short period will severely affect the reliability of the detector. Furthermore, the reasons of InSb chip possible failure are analyzed. That will be helpful to forecast the potential fracture site in InSb chip.

Key words: InSb; IRFPA; thermal-stress coupled; ANSYS

1 引言

碲化铟(InSb)红外焦平面探测器是集红外探测、光电转换与信号读出于一体的光电传感器。碲化铟红外焦平面探测器具有灵敏度高、工艺成熟、成本低效益好等优点^[1],广泛应用于航空航天、国防、

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金(No. 61107083; 61205090)资助。

作者简介:李鹏飞(1986-),男,硕士研究生,主要研究方向为红外焦平面探测器结构优化。E-mail:lpfhly@163.com

收稿日期:2013-01-29

气象、工业和医用成像等军、民用领域^[2-4]。但热冲击下极低的成品率使得大面阵红外焦平面探测器仅在高级军用装备领域得到了运用,如弹道导弹防御系统、红外成像制导弹系统、军用遥感卫星等,造成这一局面的根本原因是红外焦平面探测器的特定结构和低温工作环境。红外焦平面探测器通常采用倒装焊技术把光敏元阵列和硅读出电路通过钢柱互联混成,为提高量子效率和响应率,混成后的 InSb 芯片厚度需要背减薄到少子扩散长度以下,并在其背表面生长减反/钝化膜;为抑制背景噪声、提高信噪比和灵敏度,InSb 红外焦平面探测器通常工作于液氮温度(77K)。红外焦平面探测器工作时,需要通过制冷器快速地从室温(300K)降到液氮温度,在这个过程中,探测器各材料线膨胀系数的不同致使材料彼此收缩不同,将会在探测器中引起热应力/应变,导致钢柱断裂、相邻材料间分层开裂或者光敏元芯片碎裂。

为解决这一问题,中国科学院上海技术物理研究所何力、龚海梅研究组借助有限元简化模型分析了结构和材料参数对碲镉汞探测器热失配应力分布的影响,通过平衡复合结构的方法优化了焦平面结构,降低了探测器的热失配应力^[5-7]。河南科技大学的孟庆端课题组^[8-11]提出了利用小面阵等效大面阵进行结构建模的思想,探索了结构和材料参数对 InSb 面阵探测器应力/应变分布的影响。但上述研究均假定探测器在降温过程中的温度是均匀的,没有考虑探测器热冲击过程中热量传递非均匀性引起的温度梯度分布。实际上,探测器是通过获取制冷器提供的冷量以热传导的方式从底部开始降温的,由于各材料的导热系数和比热不同,各材料的降温快慢会有差别,致使不同材料或同一材料的不同部位温度不同,由此引起器件结构内部存在温度梯度。又因材料线膨胀系数对温度非常敏感,当器件内部温度梯度显著时,不同材料或同一材料的不同部分彼此收缩不同,势必会在结构内产生热应力,相对于假设结构处于同一温度的情形,更易引起各材料间应力/应变失配增大,甚至导致探测器芯片碎裂。韩国学者 Sham. M L^[12]曾采用直接热-力耦合的方法对倒装焊封装工艺过程中内部存在温度梯度

的倒装焊器件进行应力分析,通过与未考虑器件内部存在温度梯度的应力分布作对比,他指出考虑器件结构内存在温度梯度时的应力分布能够更准确的反映器件在实际中所处的应力状态。InSb 红外焦平面探测器属于倒装焊结构^[13],但与常规的倒装焊器件有差别,最显著的差别在于探测器工作于低温环境、芯片较薄且易碎裂,因此有必要对探测器内部存在温度梯度的情形进行分析,找出导致探测器芯片碎裂的根源。

在此背景下,为了明晰热冲击过程中由于传导降温的非均匀性引起的温度梯度对红外焦平面探测器应力/应变分布的影响,本文采用 ANSYS 有限元分析软件模拟探测器实际的热冲击过程,采用热-应力耦合方法对热冲击过程中结构内部存在温度梯度的探测器进行仿真计算。鉴于探测器的失效方式主要表现为 InSb 芯片碎裂,这里以 InSb 芯片为分析对象,将热冲击过程的应力变化与均匀降温方式下的应力变化进行对比,同时对可能导致 InSb 芯片碎裂的原因进行探索。

2 间接热-应力耦合仿真

2.1 间接热-应力耦合理论

对于温度冲击下的探测器来说,由于温度场和应力场相互作用能力不强,属于单向耦合关系,应力场的分析依赖于温度场的分析,故这里采用 ANSYS 有限元分析软件的间接热-应力耦合方法进行分析。

间接热-应力耦合分析,需要分两步进行。第一步进行热分析,包括建模、划分网格、施加载荷、求解等步骤。第二步进行热-应力耦合分析,首先需要将第一步中使用的热单元转换为结构单元并定义相应的材料参数,然后读取热分析结果中温度梯度显著时的时间点,将该时间点上的温度作为热载荷与位移约束一起施加到有限元模型上,并设置载进步进行分析。热-应力耦合分析是应用变分原理通过构建热弹性本构方程来解决应力方程和热流守恒方程之间耦合的,这需要定义与温度相关的力学和热学参数,计算时采取如下的热-应力耦合矩阵方程,同时读取温度场的载荷和应力场上的约束进行计算^[14]:

$$\begin{bmatrix} [M] & [0] \\ [0] & [0] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\ddot{u}\} \\ \{\ddot{T}\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [C] & [0] \\ [0] & [C'] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\dot{u}\} \\ \{\dot{T}\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [K] & [0] \\ [0] & [K'] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{u\} \\ \{T\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{F\} \\ \{Q\} \end{Bmatrix}$$

{u} 和 {T} 分别代表位移矢量和温度矢量; [M] 为结构质量矩阵, [C] 和 [C'] 代表结构阻尼矩阵和比热容矩阵; [K] 和 [K'] 为结构刚度矩阵和传导矩阵; {F} 为总的节点力矩阵和单元压力矢量; {Q} 为总的生热载荷和对流表面热流矢量。

2.2 模型的建立与仿真计算

基于孟庆端建立的 128 × 128 元等效结构模型^[10], 建立热冲击下 128 × 128 元探测器热 - 应力耦合结构模型, 如图 1 所示。模型从上到下依次为 InSb 芯片 (厚度 10 μm)、钢柱和底充胶相间排布 (厚度 10 μm)、N 电极 (厚度 4 μm)、硅读出电路厚度 (300 μm) 和简化为铜块的冷台 (厚度 200 μm), 其热学参数如表 1, 力学参数见文献[10]。

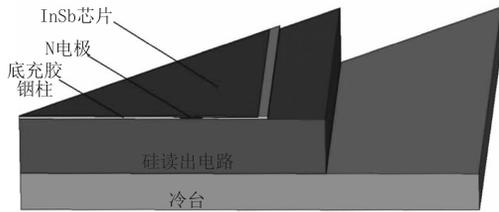


图 1 128 × 128 元探测器有限元模型

Fig. 1 finite element model of the 128 × 128 infrared focal plane array

表 1 各材料热学参数

Tab. 1 thermal property parameters of various materials

材料名称	导热系数 W/(m · °C)	比热 J/(kg · °C)
InSb 芯片	18	200
钢柱	81.8	230
底充胶	0.23	1000
N 电极	310	128
Si 读出电路	149	700
铜冷台	401	390

进行热分析时, 钢柱选择具有 3 个方向热传导能力的 8 节点 SOLID70 热单元, 其余选用 20 节点的 SOLID90 热单元, SOLID90 单元有较高的求解精度且有适当的温度协调形状能很好的模拟复杂的边界。加载时将模型底部铜块施加 77 K 恒温载荷, 将探测器焊接工艺结束时的温度 (370 K) 设为初始温度, 在探测器与空气接触的表面上施加对流载荷, 对流换热系数为 10 W/(m² · °C), 时间设定为探测器启动时间 3 s, 并选择瞬态热分析。分析结束后读取 InSb 芯片上表面对称中心点的各时间点温度并绘制时间 - 温度曲线, 如图 2 所示。从图中可以看出: 在热传导降温方式下探测器降温主要集中在前 1 s,

在 0 ~ 0.5 s 降温最为迅速。很显然这与图 2 中的均匀降温方式下温度变化曲线有显著差别, 均匀降温方式下, 降温时间假设为 71 s, 降温主要集中在后 10 s, 每秒降温约 22.3 K。热分析结束后, 进行器件的应力场分析, 首先需要进行单元转换, SOLID70 热单元转变为与之对应的 8 节点结构单元 SOLID185, SOLID90 热单元转变为与之对应的 20 节点结构单元 SOLID186, 然后读取热分析结果中温度梯度显著时的时间点, 将此时的温度梯度作为温度载荷与位移约束一起施加到有限元模型上, 设置载荷步进行热 - 应力耦合分析。模型在划分网格时, 为了与均匀降温下的仿真结果进行对比, 两者进行了相同的网格划分。

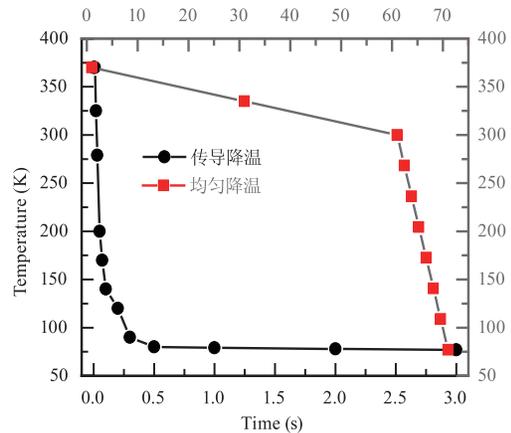


图 2 两种降温方式温度曲线

Fig. 2 temperature curve of the two cooling modes

3 仿真结果分析

为了提高探测器的量子效率, 通过钢柱互联混成后的 InSb 芯片厚度需要背减薄到少子扩散长度以下, 经背减薄后的 InSb 芯片较薄 (10 μm), 受结构缺陷和工艺损伤的影响其材料性能已经发生了很大的变化, 导致其断裂强度降低, 热冲击下极低的成品率成为制约探测器批量生产中的主要因素, 因此这里重点分析 InSb 芯片上的应力变化。图 3 给出了两种降温方式下 InSb 芯片上 Von Mises 应力最大值随温度的变化趋势, 可以看到在两种降温方式下 InSb 芯片上的 Von Mises 应力最大值随着温度的降低而增加, 但是具体变化不同。在降温初段 (370 ~ 350 K) 两种方式下应力增加曲线基本重合, 表明二者应力增幅一致; 在降温中段 (350 ~ 120 K) 热传导降温方式下温度 - 应力曲线始终位于均匀降温方式下的温度 - 应力曲线上方, 并且两曲线垂直距离先增大后减小, 在 210 K 处二者有最大的增幅差值 0.6 MPa; 在降温末段 (120 ~ 77 K), 热传导降温方式下应力变化曲线仍然位于均匀降温方式下的应力

变化曲线上方,但应力增加斜率逐渐降低,二者应力增幅差值逐渐缩小,在降温结束时两种方式下的 Von Mises 应力有相同的最大值 7350 MPa。

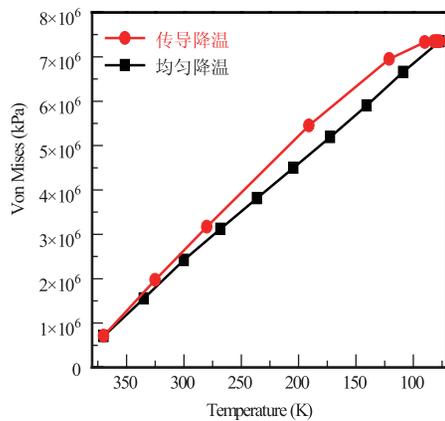


图 3 两种降温方式下 InSb 芯片上 Von Mises 应力最大值随温度的变化趋势

Fig. 3 the trend of Von Mises stress maximum varied with time under two cooling modes of InSb

对比两种降温方式下 InSb 芯片应力增加历程,可以看到在整个降温过程中均匀降温方式下的应力增加趋于一条直线,而热传导降温方式下应力增加表现为先快后慢,造成这种情况的原因除了两种降温方式本身的差异外还有热传导方式下温度梯度分布所引起的差异。这是因为在传导降温方式下, InSb 芯片是从与其接触的钢柱和底充胶处获得冷量,由于钢柱和底充胶的导热系数不同,相同时间内二者向 InSb 芯片传递的冷量不同,所以在 InSb 芯片与钢柱接触面处、InSb 芯片与底充胶接触面处、钢柱和底充胶之间以及 InSb 芯片的不同部位引起了温度梯度分布,同时由于各材料线膨胀系数对温度的依赖性,温度梯度的存在导致 InSb 芯片与底充胶、InSb 芯片与钢柱间以及 InSb 各部位收缩不同,由此造成了降温前阶段应力随温度下降迅速增加的情形。而在降温后阶段由于各材料温度趋于相同,温度梯度不太显著,由温度梯度引起的线膨胀失配减小,相应的由热失配引起的应力也同时减小,以至于在降温结束时由温度梯度引起的应力失配逐渐消失,使 InSb 芯片上的应力和均匀降温方式下 InSb 芯片上的应力有相同的最大值。

若将两种降温方式下应力变化和降温时间结合起来考虑,可以看到热传导降温方式下的应力增加在整个降温过程中显得更加急速,尤其是在器件温度快速下降的 0 ~ 0.5 s 时间段, InSb 芯片上应力急剧增加,几乎达到了整个冲击过程的应力最大值;而此时间段的均匀降温,由于其温度下降仅为 0.6 K

左右,其应力增幅约为 0.2 MPa,如图 4 所示。模拟实际热冲击过程的热传导降温方式下的应力迅速增加将严重影响 InSb 芯片的可靠性,因为 InSb 芯片在制作过程中受工艺影响容易造成材料损伤和结构缺陷,甚至会在 InSb 芯片内部引起微裂纹,加上经背减薄后的芯片厚度仅为 10 μm,短时间内经受大幅度的应力变化,容易导致各部分晶体收缩不均匀,使晶体内部的某些界面(如第二相质点、孪晶、晶界等)和微裂纹的附近出现应力集中现象,当集中的应力增加致使该局部区域发生滑移时,就在该区域产生位错^[15],同时位错活动决定着裂纹的扩展行为^[16],裂纹的扩展最终导致探测器芯片碎裂失效。

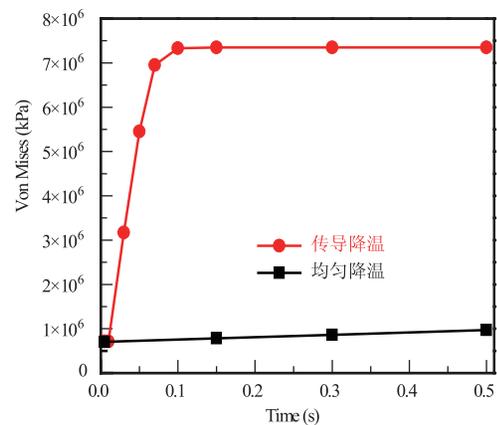


图 4 两种降温方式下 InSb 芯片 Von Mises 应力最大值在 0 ~ 0.5 s 时的变化

Fig. 4 InSb Von Mises Stress maximum varied in 0 ~ 0.5 s under two cooling modes

通过将两种降温方式下 InSb 芯片上 Von Mises 应力最大值相对于温度和时间的变化进行对比分析,可以看到实际降温过程中 InSb 芯片上应力并不是随温度下降呈线性增加的,而是受温度梯度的影响表现为应力增幅逐渐增大后又逐渐减小。并且探测器通过传导降温时, InSb 芯片上应力增加主要集中在热冲击开始的 0 ~ 0.5 s 时间段,短时间内的应力陡增将对 InSb 芯片带来严重考验,若假设降温是均匀的将会低估了热冲击对 InSb 芯片可靠性的影响,因此考虑器件内部存在温度梯度分布、模拟实际热冲击过程对探测器进行热 - 应力分析是有必要的。

4 结论

为明晰探测器在热冲击下的碎裂机理,通过考虑由冷量传递非均匀性引起的梯度分布来模拟探测器的实际降温过程,借助 ANSYS 有限元分析软件对温度梯度影响下的探测器进行了热 - 应力耦合分析。根据热分析结果绘制了传导降温下的时间 - 温

度曲线,需要指出的是探测器的降温过程不是均匀的,降温速率具有先快后慢的特点。根据热 - 应力分析结果,从两个方面将 InSb 芯片上的应力变化与均匀降温方式下的应力变化作对比,结果表明热传导降温下的 InSb 芯片受温度梯度的影响,芯片上应力增加迅速,尤其在热冲击开始的 0 ~ 0.5 s 时间段,短时间内就累积了很大的应力,由于 InSb 芯片自身存在缺陷和微裂纹,短时间内过大的应力容易引起位错并造成芯片碎裂。所以采用热 - 应力耦合的方式对探测器进行应力分析,不但可以真实反映探测器实际的应力变化情况,而且对预测 InSb 芯片可能失效的位置也具有指导意义。

参考文献:

- [1] Chen Boliang, Sun Weiguo, Liang Pingzhi, et al. Development and application of staring InSb infrared focal plane array assembly[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2002, 31(5): 419 - 423. (in Chinese)
陈伯良, 孙维国, 梁平治, 等. InSb 凝视红外焦平面组件研制和应用[J]. *红外与激光工程*, 2002, 31(5): 419 - 423.
- [2] P Treado, I Levin, E Lewis. Indium antimonide focal plane array for near-infrared imaging microscopy[J]. *Applied Spectroscopy*, 1994, 48(5): 607.
- [3] L Shkedy, T Markovitz, Z Calahorra, et al. Megapixel digital InSb detector for midwave infrared imaging[J]. *Optical Engineering*, 2011, 50(6): 1 - 8.
- [4] Gong Haimei, Liu Dafu. Developments and trends in spaceborne infrared detectors[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(1): 18 - 24. (in Chinese)
龚海梅, 刘大福. 航天红外探测器的发展现状与进展[J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(1): 18 - 24.
- [5] Hu Xiaoning, Zhang Haiyan, Li Yanjin, et al. Thermal stress analysis of HgCdTe focal plane arrays on si substrates[J]. *Laser & Infrared*, 2006, 36(11): 1020 - 1022. (in Chinese)
胡晓宁, 张海燕, 李言谨, 等. 硅基面阵焦平面器件结构热应力分析[J]. *激光与红外*, 2006, 36(11): 1020 - 1022.
- [6] Li Yanjin, He Li, Yang Jianrong, et al. Study On thermal mismatch stress of HgCdTe infrared focal plane array[J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2008, 27(6): 409 - 412. (in Chinese)
李言谨, 何力, 杨建荣, 等. 碲镉汞红外焦平面器件热失配应力研究[J]. *红外与毫米波学报*, 2008, 27(6): 409 - 412.
- [7] Fan Guangyu, Gong Haimei, Li Yanjin, et al. Temperature-cycling-reliability of IRFPA device[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(4): 607 - 610. (in Chinese)
范广宇, 龚海梅, 李言谨, 等. 红外焦平面器件温度循环可靠性研究[J]. *红外与激光工程*, 2010, 39(4): 607 - 610.
- [8] Meng Qingduan, Tian Wei, Lü Yanqiu, et al. Analysis of structural stress in 8 × 8 InSb array detector[J]. *Open Electrical and Electronic Engineering*, 2011, 5(1): 24 - 28.
- [9] Meng Qingduan, Lü Yanqiu, Lu Zhengxiong, et al. Stress in InSb infrared focal plane array detector analysis with ANSYS[J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2010, 29(6): 431 - 434. (in Chinese)
孟庆端, 吕衍秋, 鲁正雄, 等. InSb 红外焦平面探测器结构应力的 ANSYS 分析[J]. *红外与毫米波学报*, 2010, 29(6): 431 - 434.
- [10] Meng Qingduan, Zhang Xiaoling, Zhang Liwen, et al. Structural modeling of 128 × 128 InSb focal plane array detector[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(19): 190701. (in Chinese)
孟庆端, 张晓玲, 张立文, 等. 128 × 128 InSb 探测器结构模型研究[J]. *物理学报*, 2012, 61(19): 190701.
- [11] Meng Qingduan, Yu Qian, Zhang Liwen, et al. Mechanical parameters selection in InSb focal plane array detector normal direction[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(22): 226103. (in Chinese)
孟庆端, 余倩, 张立文, 等. InSb 面阵探测器法线方向力学参数选取研究[J]. *物理学报*, 2012, 61(22): 226103.
- [12] M Sham, J Kim, J Park. Thermal performance of flip chip packages: Numerical study of thermo-mechanical interactions[J]. *Computational Materials Science*, 2008, 43: 469 - 480.
- [13] R Antoni. Infrared detectors: an overview[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2002, 43: 187 - 210.
- [14] ANSYS Theory Reference[R]. Chapter 11: Coupling, ANSYS, 2010.
- [15] Wang Yanhua, Ceng Peng, Wang Zhifang, et al. Growth study of large High-quality InSb single crystal[J]. *Infrared*, 2009, 30(8): 9 - 13. (in Chinese)
王燕华, 程鹏, 王志芳, 等. 大直径高质量锑化铟单晶的生长研究[J]. *红外*, 2009, 30(8): 9 - 13.
- [16] Qian Caifu, Li Huifang, Cui Wenyong. Mode I crack tip plastic zone, dislocation-free zone and their effects on crack propagation[J]. *Chinese Journal of Material Research*, 2007, 21(6): 599 - 603. (in Chinese)
钱才富, 李慧芳, 崔文勇. I 型裂纹尖端塑性区和无位错去及其对裂纹扩展的影响[J]. *材料研究学报*, 2007, 21(6): 599 - 603.