

# 双孔微剪切测定铝合金焊接接头的局部本构特性

Determination of Local Constitutive Properties of Welded Joints in Aluminium Alloy Using Double Holes Microshear Test

朱 亮, 任国松, 龙 林, 车洪艳

(兰州理工大学 甘肃省有色金属新材料省部共建国家重点实验室, 兰州 730050)

ZHU Liang, REN Guo-song, LONG Lin, CHE Hong-yan

(State Key Laboratory of Gansu Advanced Non-ferrous Metal Materials, Lanzhou 730050, China)

**摘要:** 铝合金焊接接头存在着力学性能不均匀性, 准确测定出不同区域的局部力学性能, 对评定整体接头性能和改善焊接工艺是十分必要的。研究了一种双孔微剪切测定局部材料本构性能的新方法。在被测材料的小区域两侧开两小孔, 剪切刀具从其中一孔对被测区域的材料加载直到破坏, 记录加载过程中的载荷位移曲线。建立这种方法的有限元模型, 根据实验的载荷位移曲线, 利用反向有限元计算方法得到局部材料的真应力应变曲线。从而测定了铝合金焊接接头热影响区的塑性变形的本构特性分布。测定结果表明, 在热影响区的完全固溶区, 材料的屈服应力较小, 而加工硬化指数较高; 在过时效区屈服应力和加工硬化指数都比较低。

**关键词:** 双孔微剪切; 铝合金焊接接头; 局部本构特性; 有限元模拟

中图分类号: TB407 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2007)10-0018-05

**Abstract:** Welded joints in aluminum alloy exhibit heterogeneity of mechanical properties. Local properties determination within the different constituents is necessary to improve the material processing, and to numerically evaluate the component performance such as crash simulation. The present work is concerned with a new approach for determining local material constitutive properties of welded joints in aluminum alloy. In this method, drill the double holes in the two sides of the point to be determined in welded joints, load material bridge by an indenter until it is broken, record the response between applied load and indenter displacement. We can call this method as double holes microshear test. According to the load-displacement curve obtained experimentally from the double holes microshear test, the true stress-strain curve of local material was calculated by means of the inverse methodology of finite element computation. The distribution of true stress-strain curves within heat-affected zone was consequently determined for aluminium alloy welded joints. The determination results show that, in the dissolution zones the yield stresses are lower but the work hardening exponent is higher, and in over aging zones both the yield stresses and the work hardening exponent are lower.

**Key words:** double-hole microshear; welded joints in aluminium alloy; local constitutive property; finite element simulation

铝合金焊接接头不同程度地存在着力学性能不均匀性, 常规的拉伸实验只能得到接头的整体强度及变形性能, 但无法评价接头不同区域的局部力学性能, 如热影响区和焊缝金属的强度及变形特性。这些局部性能的信息对改善焊接工艺, 提高接头的整体性能有明显的必要性<sup>[1,2]</sup>; 另外, 在对这种焊接接头进行实验研究和有限元模拟时, 需要测定焊接接头各区域的局

部强度和局部本构特性<sup>[3]</sup>。为了寻求能准确评定材料局部力学性能的方法, 已进行了许多研究。用硬度实验方法, 来确定载荷与压痕位移曲线, 推测材料的强度和应变强化特性, 已开展了很多研究<sup>[4]</sup>, 这种方法尽管简单, 考虑到球状压头与被测材料之间的摩擦力, 被测材料在受压时所受的水静压力, 其结果精确度受到限制。类似材料局部强度测定方法还有平面压头的硬度

实验<sup>[5]</sup>。从焊接接头上切取袖珍试样,用拉伸实验测定焊接接头的局部拉伸性能,对实验研究非均匀的和各向异性材料的局部力学性能,这是一个可信的方法,但是制备试样复杂<sup>[6]</sup>。微剪切实验也用来评定焊接接头的局部强度<sup>[7,8]</sup>。这些方法都有各自的局限性,都没有被普遍接受。本研究提出了一种双孔微剪切实验方法,无需制备小试样,在被测试样区域打两通孔,直接进行剪切实验,测定了焊接接头的局部强度。本研究对铝合金焊接接头进行了双孔微剪切实验,并结合反向有限元计算方法<sup>[9]</sup>,测定了焊接接头的局部真应力应变曲线。

## 1 双孔微剪切实验

图 1 为双孔微剪切实验示意图。

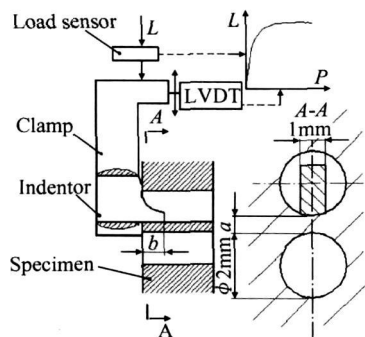


图 1 实验方法

Fig. 1 Experiment method

采用图 1 所示实验方法,对铝合金焊接接头进行双孔微剪切实验。在试样上选定被测材料区域,并在其两侧钻两小孔,两孔间的小桥为被测材料。考虑到实验的可操作性和准确性,小孔直径选择为 2mm,压头进入孔长度  $b$  为 0.65mm,两孔间的小桥厚度  $a$  的范围为 0.3~0.4mm,实验时,通过专用的压头在上孔内表面施加向下的力,使两孔之间的材料发生剪切变形直到断裂。载荷传感器和位移传感器自动记录压头上的力和位移量。在加载过程中,变形集中在两孔间小桥区域,对应的载荷-位移曲线只反映被测区域的力学性能。变形区域大小由压头尺寸决定,实验中压头宽度为 1mm,压头与孔接触部分的弧度和孔相吻合。实验前对孔间距  $a$  的实际尺寸进行测量。由此可得到小桥受剪切面积  $(2.3a - 0.18) \text{ mm}^2$ ,载荷除以剪切面积得到名义剪应力,位移除以 0.5mm (剪切孔半径与压头宽度一半的差) 得到名义剪应变。

双孔微剪切实验在 6063 铝合金对接焊接接头上进行,接头用 TIG 焊焊接而成,板厚为 2mm,焊接热

输入为 538J/mm,填充金属(焊丝)为 ER4043。实验测试在焊接试样的上表面进行,当然如果是厚板,可选择已垂直于焊缝的横截面上。根据热影响区力学性分布的位置精度要求,选择距焊道不同距离的被测点,在每个被测点的两侧,沿垂直于焊道的方向钻两孔,这样可使两孔间小桥的材料性能尽量相同。被测材料的区域选择及剪切孔分布如图 2 所示。相邻两组孔之间的距离要在 5mm 以上。

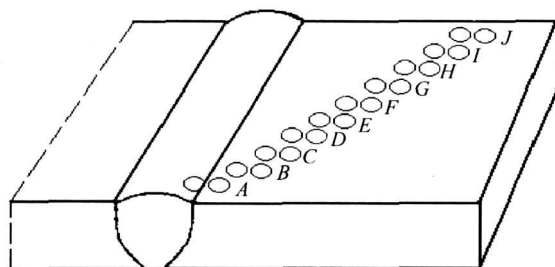


图 2 焊接接头剪切孔分布

Fig. 2 The distribution of shear holes in welded joints

双孔微剪切装置借助于万能实验(SHIMADZU-10T A)加载,加载速度为 1mm/min。施加在剪切压头上的力,由载荷传感器测量,位移由差动变压器(LVDT)测量,用记录仪记录载荷位移曲线。

## 2 反向有限元计算

### 2.1 有限元模型的建立

双孔微剪切方法测定的是材料的局部力学性能,按照圣维南原理,被测材料中的应力和应变只集中在压头附近的区域,远处的应力和应变趋近于零。因此,在有限元模型中,可以只取被测材料试样的一部分来建立模型,同时考虑到对称性,取试样的一半进行有限元建模,如图 3 所示。有限元计算表明,当模型的外形尺寸为  $4 \text{ mm} \times 2 \text{ mm} \times 7 \text{ mm}$ ,在加载过程中,模型边界的应力和应变趋近于零。用 ABAQUS 商业软件建立有限元模型,网格类型为 C3D8,共有 7230 个单元。实验压头、双孔直径和小桥尺寸根据实验的实际测量值选择。实验压头设置为刚性壳,设置参考点,以恒定速度在参考点加载。在给有限元计算输入材料的性能时,将被测材料的真应力应变曲线作为材料性能输入。有限元计算可得到载荷位移曲线,利用与实验相同的处理方法转换成剪应力剪应变曲线。

为了验证有限元模型的精确性,首先对 6063 铝合金母材做拉伸实验,测得其真应力应变曲线作为材料性能赋予双孔微剪切的有限元模型,进行有限元计算,同时在 6063 铝合金母材上进行双孔微剪切实验。对

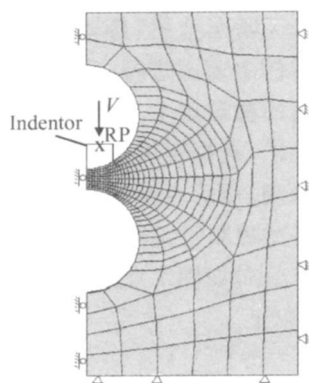


图 3 有限元模型  
Fig. 3 Finite element model

模拟和实验的剪应力剪应变曲线进行比较。网格单元尺寸对有限元模拟结果有一定的影响,当调整模拟区域最小网格单元尺寸为  $0.067\text{mm} \times 0.05\text{mm} \times 0.05\text{mm}$  时,有限元分析结果与实验结果基本一致,如图 4 所示。

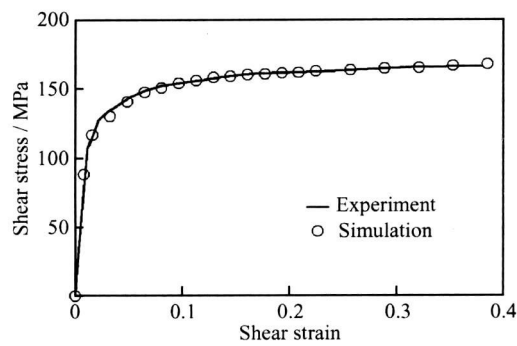


图 4 实验与模拟曲线对比  
Fig. 4 The comparison between experiment and simulation curve

通过有限元模型模拟得到剪应力剪应变曲线为正向过程,反之,通过双孔微剪切实验得到的载荷位移曲线反推出反应材料性能的真应力应变曲线为反向过程<sup>[9]</sup>。反向过程是用来获得未知材料力学性能的有效方法,本研究主要采用这种方法。

2.2 由剪应力剪应变曲线得到真应力应变曲线

一般认为焊缝、热影响区和母材具有相同的弹性性能,在本研究中均取弹性模量为  $70\text{GPa}$ ,泊松比为  $0.31$ ,但它们具有不同的屈服强度和加工硬化指数。铝合金屈服后塑性变形的加工硬化过程符合幂函数规律,即

$$\sigma = \sigma_y (1 + \epsilon_p / \epsilon_0)^n \tag{1}$$

其中:  $\epsilon_p$  是塑性应变;  $\sigma_y$  是屈服应力;  $\epsilon_0$  是屈服应变;  $n$  是材料的加工硬化指数。由式(1)可知,  $\sigma_y$  和  $n$  得到材料塑性流变的本构关系,真应力应变曲线就可以确

定。双孔微剪切实验得到局部的名义剪应力剪应变曲线,利用上述有限元模型的反向计算,可以确定对应的  $\sigma_y$  和  $n$ 。

首先确定屈服应力  $\sigma_y$ 。在有限元模型中,材料性能输入弹性模量  $E$ ,屈服应力  $\sigma_y$  和相对应的零塑性应变,其中的屈服应力  $\sigma_y$  可以参考母材数值,然后进行有限元计算,可得到剪应力剪应变曲线,在其上确定屈服点。屈服点的确定,可用  $1\%$  塑性剪应变的条件来确定。用同样的方法在微剪切实验曲线上确定屈服点,把输出的有限元模拟曲线和实验曲线屈服段进行比较,根据二者曲线差值,对  $\sigma_y$  进行调整,重新进行有限元计算。 $\sigma_y$  不同,所得到模型计算屈服剪应力或高或低于实验的屈服剪应力,最后利用插值方法,得到对应实验剪切屈服点的屈服应力。

其次确定加工硬化指数  $n$ 。利用已经确定的屈服应力  $\sigma_y$ ,再假设一个加工硬化指数  $n$ ,代入(1)式,得到真应力应变曲线,将其作为材料模型赋予有限元模型中进行计算,将得到的模拟曲线与实验曲线比较。当模拟曲线高于实验曲线的时候,减小  $n$  值,当模拟曲线低于实验曲线的时候,增加  $n$  值。这样,在实验曲线附近,可得到对应不同  $n$  值的剪应力剪应变曲线,通过插值的方法可得到对应实验曲线的  $n$  值。图 5 是对应焊接接头试样上 A-J 测量点的真应力应变曲线。把上述所得到的真应力应变曲线作为材料模型输入到有限元模型中进行正向计算,得到剪应力剪应变曲线,与对应的实验曲线有很好的吻合性,如图 6 所示。

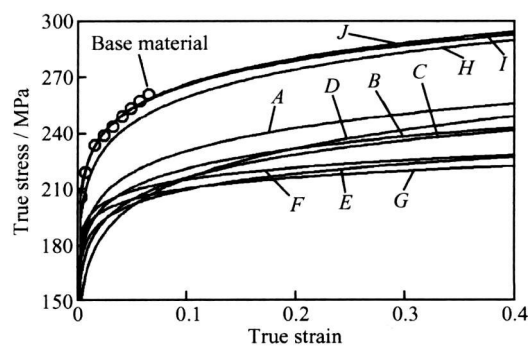


图 5 焊接接头真应力应变曲线  
Fig. 5 True stress-strain curve in welded joints

3 结果与讨论

材料流变过程的本构特性通常用拉伸实验得到的工程应力应变曲线来转换,由于拉伸试样产生颈缩现象,只能得到最大载荷以前的真应力应变曲线。一般认为最大载荷处所对应的应变与加工硬化指数接

近,所以只能得到应变量相对较小的应力应变曲线。双孔微剪切实验可以获得大应变下的真应力应变曲线,这也是这种方法的优势所在。图5中圆圈是由拉伸实验所得母材的真应力应变曲线,所对应的最大应变只有0.067。图5中J所对应的实线是利用双孔

微剪切实验所得到的在对接接头J点的真应力应变曲线。对接接头J点可以认为是在6063铝合金母材部分,可以看出,两个曲线在前端比较吻合,这说明双孔微剪切实验结合有限元方法得到真应力应变曲线是准确的。

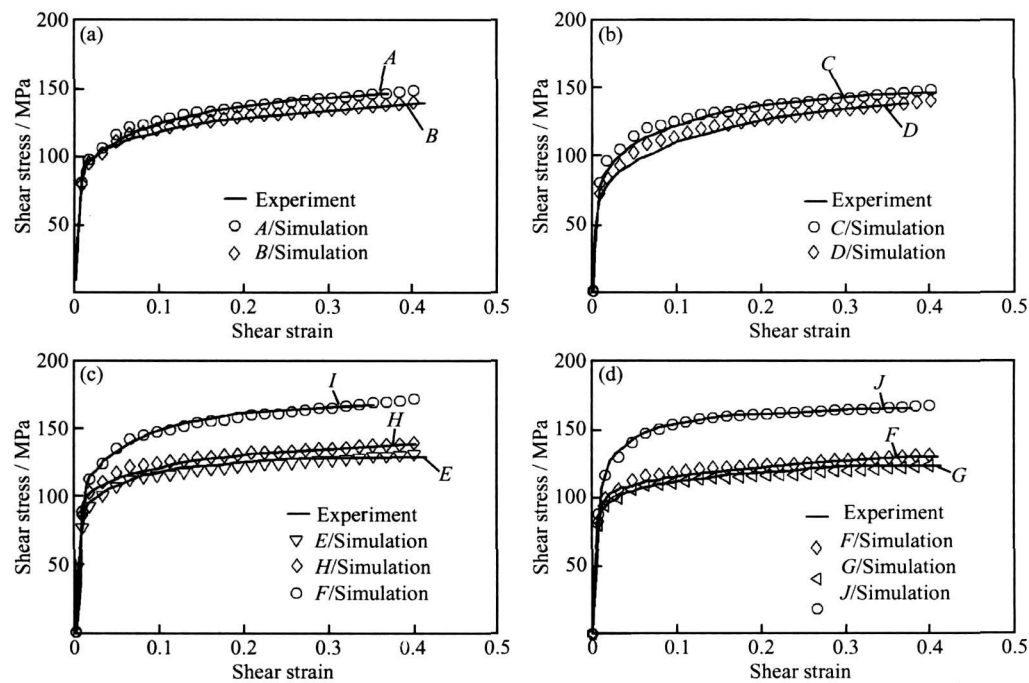


图6 焊接接头微剪切实验和模拟比较 (a) A, B 点; (b) C, D 点; (c) E, H, I 点; (d) F, G, J 点;  
Fig. 6 The comparison between microshear test and simulation in welded joints  
(a) A, B point; (b) C, D point; (c) E, H, I point; (d) F, G, J point

由图5可以看出,6063 铝合金焊接接头热影响区塑性变形的本构特性有较大差异。根据图5的结果,可以得到应力应变曲线上的屈服应力和加工硬化指数在热影响区的分布,如图7中的圆圈和三角所示。通常我们只能用硬度对热影响区的性能进行描述。图7中的虚线为显微硬度分布,测量硬度时载荷为50g。焊接接头上屈服应力分布与加工硬化指数分布是具有不同特点。硬度分布与屈服应力和加工硬化指数有一定的相关性,由图7可以看出,在屈服应力与屈服应力和加工硬化指数低地方,硬度值也比较低。这种现象是可以理解的,硬度指标与材料塑性流变阻力有关,由屈服应力和加工硬化指数共同决定。在距熔合线3~6mm 范围内,屈服应力  $\sigma_y$  相对较低,而加工硬化指数  $n$  出现最高值;在距熔合线7~10mm 范围内,屈服应力  $\sigma_y$  和加工硬化指数  $n$  同时出现最低值,这与焊接接头经过热循环的组织变化有关。时效硬化铝合金经历热过程后,其性能的变化取决于基体中溶质元素的含量,沉淀相的尺寸及分布密度,经过T6 人工时效后 Al-Mg-Si 铝合金,基体中分布着高密度的针状  $\beta''$  相,

使这种合金获得较高的强度。但  $\beta''$  相是一种热力学不稳定的强化相,在焊接热循环的作用下会发生分解或聚集长大,当温度超过 250℃ 时尺寸小的  $\beta''$  相,就开始分解,尺寸较大的  $\beta''$  相容易发生长大,成为尺寸较大的棒状  $\beta'$  相<sup>[10]</sup>。文献[11]研究表明,在熔合线到峰值温度为 480℃ 的 HAZ 区域,  $\beta''$  相已全部恢复,变成了完全固溶区;到 250℃ 到 480℃ 的区域,  $\beta''$  相已转变为棒状  $\beta'$  相。在这个过程中,如果富集有  $\beta''$  相分解产生的

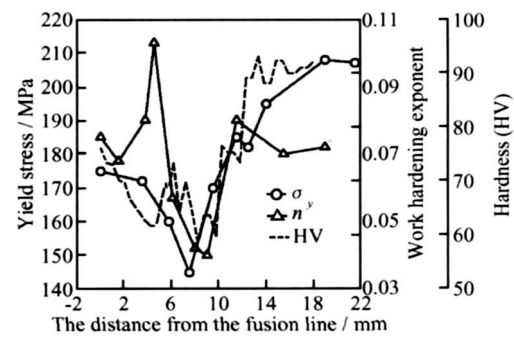


图7 焊接接头  $\sigma_y$ , HV 和  $n$  的分布  
Fig. 7 The distribution of  $\sigma_y$ , HV and  $n$  in welded joints

溶质元素, 棒状 $\beta$ 相将长的更大更快, 成为通常所说的过时效。在本实验中, 在距熔合线约 6mm 的区域内, 属于完全固溶区, 在焊接后发生部分时效, 强化相尺寸相对较小, 组织为较小的 $\beta$ 相。从图 7 可以看出, 这种组织的屈服应力 $\sigma_y$ 较小, 而加工硬化指数 $n$ 较高。在距溶合线 7~10mm 的范围属于过时效区, 强化相为粗大的棒状 $\beta$ 相, 使该区域的屈服应力 $\sigma_y$ 和加工硬化指数 $n$ 都较低。

## 4 结论

(1) 提出了双孔微剪切实验, 用来评定铝合金焊接接头的局部力学性能分布。

(2) 建立双孔微剪切实验的有限元模型, 根据实验的载荷位移曲线, 利用反向有限元计算方法可得到局部材料的真应力应变曲线。与常规拉伸实验相比, 双孔微剪切实验可得到较大应变范围的真应力应变曲线。

(3) 对 6063 铝合金焊接接头热影响区的塑性变形的本构特性分布进行了测定。发现在完全固溶区材料的屈服应力较小, 而加工硬化指数较高; 在过时效区屈服应力和加工硬化指数都较低。

### 参考文献

- [1] NICOLAS M, DESCHAMPS A. Precipitate microstructures and resulting properties of Al-Zn-Mg metal inert gas weld heat-affected zones[J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2004, 35:1437-1448.
- [2] 朱亮, 陈剑虹. 力学性能不均匀焊接接头的强度预测[J]. 焊接学报, 2005, 26(3): 13-16.
- [3] ZHANG Z L, DEGARD P J, MYHR Q R. From microstructure

to deformation and fracture behaviour of aluminium welded joints: a holistic modelling approach[J]. Computational Materials Science, 2001, 21: 429-435.

- [4] NAYBI A, ABDI R EL, BARTIER O, et al. New procedure to determine steel mechanical parameters from the spherical indentation technique[J]. Mechanics of Materials, 2002, 34: 243-254.
- [5] SCIBETTA M, LUCON E, CHAOUADI R, et al. Instrumented hardness testing using a flat punch[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2003, 80: 345-349.
- [6] LAVAN D A. Microtensile properties of weld metal[J]. Experimental Techniques, 1999, 23(3): 30-34.
- [7] 史耀武, 周宁宁, 张新平, 等. 微剪切实验及对焊接接头力学性能的评价[J]. 焊接学报, 1994, 15(4): 235-240.
- [8] ZHANG X P, DORN L. Estimation of the local mechanical properties of pipeline steels and welded joints by use of the microshear test method[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 1998, 75: 37-42.
- [9] ASIF HUSAIN, SEHGAL D K, PANDEY R K. An inverse finite element procedure for the determination of constitutive tensile behavior of materials using miniature specimen[J]. Computational Materials Science, 2004, 31: 84-92.
- [10] ESMAEILI S, LLOYD D J, POOLE W J. A yield strength model for the Al-Mg-Si-Cu alloy AA6111[J]. Acta Materialia, 2003, 51: 2243-2257.
- [11] MYHR O R, GRONG O, FJARFEG, et al. Modelling of the microstructure and strength evolution in Al-Mg-Si alloys during multistage thermal processing[J]. Acta Materialia, 2004, 52: 4997-5008.

基金项目: 国家重大基础研究前期研究专项(2004CCA04900)

收稿日期: 2006-12-07; 修订日期: 2007-03-25

作者简介: 朱亮(1964-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事焊接工艺及设备、材料断裂机理及材料变形行为研究, 联系地址: 兰州理工大学材料科学与工程学院(730050)。

## 简 讯

德国 Fraunhofer 材料力学研究所(IWM)与兰州理工大学, 在“铝合金车身动载下变形破坏机制及计算模拟”研究方面开展了密切的合作。2006 年先后进行了两次学术研讨会, 德国 Fraunhofer 材料力学研究所的 G J Blauel 教授、Gumbsch 教授和 D Z Sun 博士, 德国奔驰公司的 Ostermann 教授和 Feucht 博士, 兰州理工大学的陈剑虹教授、朱亮教授、乔及森博士, 在兰州理工大学进行为期 8 天的学术研讨会, 就以下方面重点进行了讲述及讨论: (1) 德国汽车和铁路交通工业中铝合金轻型高性能结构的应用; (2) MIG 和激光焊接 Al-6000 结构的整体和局部材料的表征; (3) 撞击模拟的材料模型(变形, 损伤, 失效); (4) 用于 PAM-Crash, Abaqus 有限元分析的结构模型; (5) 薄板材料成形模拟的新方法; (6) 铝的 MIG 焊接接头的微观结构, 变形和残余应力演变的模拟; (7) 验证撞击模拟分析的部件试验; (8) TiAl 合金的断裂机理; (9) 力学性能不均匀结构局部性能的测量; (10) 薄壁管动载荷下的变形行为。该合作研究得益于国家重大基础研究前期专项(2004CCA04900)的支持。