## 研究快讯

# 准二维电荷密度波导体磷酸钨青铜 (PO<sub>2</sub>)(WO<sub>3</sub>)<sub>2m</sub>(m=6)的磁电阻研究\*

田明亮<sup>1</sup>) 石  $\overline{\mathrm{dh}}^{1,2}$ ) 李世 $\overline{\mathrm{ch}}^{1,1}$  曹  $\mathrm{H}^{1,1}$  乐  $\mathrm{ch}^{1,1}$  张裕恒<sup>1</sup>)

<sup>1</sup>(中国科学技术大学结构研究开放实验室,合肥 230026)
 <sup>2</sup>(武汉大学物理系,武汉 430072)
 (2000年1月25日收到2000年3月27日收到修改稿)

对准二维电荷密度波导体磷酸钨青铜 PO<sub>2</sub>  $(MO_3)_m$  (m = 6)在 2—300 K 温区内的磁电阻及在 2 K 时的  $\Delta \rho / \rho_0 - B$  关系进行了实验研究.利用电子磁击穿模型对其低温端的磁阻增强行为进行了分析解释 ,理论和实验相符 合 ,并估算出高温端第一个 Peierls 能隙的大小为 3.0 meV 电子在低温下的迁移率为 0.042 m<sup>2</sup>V<sup>-1</sup>s<sup>-1</sup>.

关键词:低维导体磁电阻,电荷密度波 PACC:7145L,7270

### 1 引 言

磷酸钨青铜(PO<sub>2</sub>)<sub>4</sub>(WO<sub>3</sub>)<sub>2m</sub>系列材料属于具 有层状结构的准二维金属<sup>12]</sup>,其晶体结构是由 WO<sub>6</sub> 八面体共顶点连接构造成一个与 *ab* 面平行的 ReO<sub>3</sub> 型钙钛矿二维层块,在二维层块之间被 PO<sub>4</sub> 四面体隔开<sup>[3,4]</sup>.这类材料的最大特点是,二维层块 的厚度随参数*m* 的增加而增加,但每个单胞内的电 子数保持不变,仍为4个电子.由于 5d 导带电子位 于 WO<sub>6</sub> 二维层,每个 W 离子位置的平均电子数为 2/*m*.因此,材料的低维特性和电子结构是随参数 *m* 的增加而变化的.从目前已报道的材料看,参数 *m* 范围为 2—14<sup>[5,6]</sup>.

 $(PO_2)(WO_3)_{2m}(m=6)$ 単晶在低温  $T_{p_1}=120$ K和  $T_{p2}=62$  K分别出现两个电阻异常<sup>[6,7]</sup>,并伴随着无公度的调制结构.这两个异常被认为是由于 Peierls相变所致.  $T_{p_1}$ 和  $T_{p_2}$ 分别在电子费米面的某 些片段上打开能隙,使体系能量降低,部分电子电荷 发生凝聚而形成电荷密度波(简称 CDW )<sup>18]</sup>,但在 其他方向上仍然保留残余费米面<sup>[9,10]</sup>.因此,对准 二维金属材料, Peierls 相变是金属-金属转变,而不

#### 是像准一维体系的金属-半导体相变.

准二维 CDW 导体在低温下往往有巨大的正磁 电阻效应,如对准二维紫青铜 KMo<sub>6</sub>O<sub>17</sub>单晶样品, 在 4.2 K 和 20 T 强磁场条件下  $\Delta\rho$ (*H*) $\rho_0$  可达 2000%左右<sup>[11]</sup>.目前,人们对其巨大磁电阻效应的 根源还不能进行很好的定量解释,存在争论.本文拟 对准二维磷酸钨青铜(PO<sub>2</sub>),(WO<sub>3</sub>)<sub>2m</sub>(*m* = 6)在 2—300 K 温区内的磁电阻和在 2 K 时的  $\Delta\rho/\rho_0$ -B 关系进行实验研究,并对其巨大磁阻效应的机理进 行探讨.

#### 2 实验方法

磷酸钨青铜 PO<sub>2</sub> )( WO<sub>3</sub> )<sub>2m</sub>(m = 6)单晶样品 是由美国新泽西州立大学化学系的 Greenblatt 教授 提供<sup>[1,10]</sup>. 单晶为蓝黑色 晶体尺寸在  $1.5 \text{ mm} \times 0.6$ mm× 0.4 mm 左右. 四引线电阻测量在 *ab* 面内进 行 电极接点处镀上金膜 ,然后用导电银浆焊接. 电 流由 Keithley 220 直流电流源提供 ,电压由 Keithley 182 纳伏表测量. 稳定磁场由英国 Oxford 超导磁体 提供 ,最高磁场可达 17 T. 整个系统由计算机自动 控制 ,测量温区在 2—300 K.

<sup>\*</sup>国家自然科学基金(批准号:19874055)资助的课题.

## 3 实验结果

9期

图 1 曲线 a 和 b 分别给出了在 0 和 14 T 磁场 下的电阻与温度的关系曲线,磁场方向垂直样品的 ab 面(沿 c 方向).由曲线 a 可看出,当 T > 120 K 时,R-T 曲线具有很好的线性关系,样品表现出典 型的金属行为.当  $T_{p_1} = 120$  K 和  $T_{p_2} = 68$  K 时电阻 分别出现反常,随温度降低而增大,然后在 106 K 和 52 K 附近分别出现一个宽峰,但低温端第二个峰的 高度远比高温端的第一个峰高.以上这些结果与前 人报道的结果一致<sup>6,7</sup>].电阻在  $T_{p_1} = 120$  K 和  $T_{p_2} = 68$  K 出现的反常现象可归属于 Peierls 相变而导 致的电荷密度波失稳,两个异常分别对应于结构调 制波 矢 量  $q_1 = (0.385, 0)$  和  $q_2 = (0.310, 0.295)^{12}$ .两个电阻峰与两个逐步打开的 Peierls 能隙的最大值相对应.



图 1 曲线 a b 分别给出了在 0 和 14 T 磁场下的电阻与温度的 关系曲线  $B \perp ab$  面即 B 沿 c 方向 )

由图 1 曲线 b 可看出 ,样品在磁场下 ,当温度 低于第二个 CDW 转变温度  $T_{p_2} = 68$  K 时 ,电阻呈 现出极大的正磁阻效应.在  $T_{p_2} < T < T_{p_1}$  ,在实验 测量的精度内仅观察到微弱的正磁阻效应 ,而在  $T > T_{p_1}$ 的正常金属态 ,没有观察到任何的磁阻效应. 图 2 给出了在 14 T 磁场下样品磁阻( $\rho(B) - \rho(0) \gamma \rho_0(0)$ 与温度 T 的关系 ,磁阻的大小随温度 降低几乎呈指数增加 ,在 2 K 时  $\Delta \rho / \rho_0$  高达 65%. 插图为 T < 80 K 时电阻与温度关系的放大曲线. 图 3 给出了在 2 K 时样品的磁阻  $\Delta \rho / \rho_0$  与磁场 B 的 关系曲线  $\Delta \rho / \rho_0$  随磁场 B 的增加而单调增加 ,无 饱和现象.



图 2 在 14 T 磁场下的  $\Delta \rho / \rho_0$ -T 关系 插图为 0—80 K 温区内 在 0 和 14 T 磁场下放大的  $\rho$ -T 曲线



图 3 在 2 K 时样品的  $\Delta \rho / \rho_0$  和 B 关系曲线

## 4 结果讨论

根据正常金属体系的半经典理论,正磁电阻大 小可表示为

$$\frac{\Delta\rho(B)}{\rho_0} = \mu_e^2 B^2 , \qquad (1)$$

其中 , $\mu_{e}$  为电子的迁移率. 图 4 给出了  $\Delta \rho / \rho_{0} - B$  的 双对数关系 ,在低磁场范围内 ,曲线近似为线性 ,我 们得到  $\Delta \rho / \rho_{0} = 4.0 \times 10^{-2} B^{\alpha}$  , $\alpha = 0.95$  ,此值远小 于理论预言值 2.

对具有电子和空穴两类载流子的金属或半金属 材料,人们通常用两带模型去解释观察到的正磁阻 行为,如石墨插层化合物<sup>13]</sup>.根据 Nato 和 Tsuzuku 的两带模型<sup>14]</sup>,假设电子和空穴有相同的迁移率,  $\mu_{\rm e} \approx \mu_{\rm h}$ ,则

$$\frac{B^2}{\Delta \rho / \rho_0} = \frac{2}{\mu^2} + \left[ \frac{n_{\rm e} - n_{\rm h}}{n_{\rm e} + n_{\rm h}} \right]^2 B^2 , \qquad (2)$$



图 4 磁阻  $\Delta \rho / \rho_0$  和磁场 *B* 的双对数关系曲线 ;插图为  $B^2 / (\Delta \rho / \rho)$ 和  $B^2$  的关系

其中  $n_e$  和  $n_h$  分别为电子和空穴的密度,  $\mu = (\mu_e\mu_h)^{1/2}$ 为电子和空穴的有效迁移率. 图 4 的插图 给出了  $B^2/(\Delta\rho/\rho)$ 和  $B^2$ 的关系,曲线严重偏离理 论预言的线性关系. 这说明用以上两种通常的经典 磁阻模型不能很好解释在准二维 CDW 导体中观察 到的正磁阻效应,外加磁场对载流子密度和迁移率 两者的影响不能被忽略.

对低维强各向异性金属 ,Balseiro 和 Falicov<sup>[15]</sup> 认为 ,当磁场与电子费米面平行时 ,强磁场能够改善 费米面的' 嵌套( nesting )'特性 ,使 Peierls 相变后仍 然残存的部分费米面片段进一步被破坏 ,从而导致 能隙增大和正常电子密度减小.这一理论被用来解 释准一维 CDW 导体 NbSe<sub>3</sub> 低温下的异常大正磁阻 行为<sup>[16]</sup>. 磷酸钨青铜( PO<sub>2</sub> )<sub>4</sub>( WO<sub>3</sub> )<sub>2m</sub>( m = 6 )单 晶样品的电阻和磁电阻行为与 NbSe<sub>3</sub> 十分类似 ,

在  $T_{p_2} < T < T_{p_1}$  的高温 CDW 态没有观察到明显 的磁阻. 根据两者磁电阻和电子结构的类似性, (PO<sub>2</sub>)(WO<sub>3</sub>)<sub>2m</sub>(m = 6)单晶与 NbSe<sub>3</sub> 应该有类似 的正磁阻机制,即其大的正磁阻与磁场诱导费米面 的损失有关(磁场诱导正常电子密度减小).然而,两 者的磁阻也明显存在细节差异,如 NbSe<sub>3</sub> 中巨大磁 阻效应在低温 CDW 态 25 K 附近有个峰值,当温度 继续降低时,磁阻又变小.而对磷酸钨青铜,当 T <30 K 时,其磁阻反而有明显的增强效应.我们认为 这些差异可能与电子在磁场下带间磁击穿效应引起 的附加散射机制有关,这部分磁阻的根源是磁场诱 导电子迁移率的变化.因此,考虑到磁场对磷酸钨青 铜费米面'嵌套 "特性的修正,总的正磁阻应包括磁 击穿磁阻和磁场诱导电子的费米面损失引起的磁阻 两部分.假设图 1 曲线 b 中外延的虚线表示磁场诱导电子的费米面损失引起的磁阻贡献  $\rho_{\rm B}$  ,那么偏离 线性的超出部分被归属于磁击穿效应磁阻  $\rho_{\rm BD}$ .

根据 Falicov 等人早期提出的磁击穿理论<sup>17]</sup>, 认为电子在磁场中存在着从一个轨道的某些态转变 到其他轨道某些态的概率,且在转变过程中电子会 受到一个附加的散射,导致电阻率的增加,从而产生 正磁阻效应.当电子发生磁击穿转变的这些量子态 间的能量差很小的时候,这些电子轨道能被看成是 相互耦合的,能造成电子的带间磁击穿.对准二维 CDW 材料,由于发生相变后在费米面上打开一个小 的能隙(一般为几个 meV),电子在磁场下穿过能隙 的带间磁击穿效应将对电阻率有重要影响.人们曾 利用该模型对准二维 CDW 导体 2H-NbSe<sup>[18]</sup>和铊 紫青铜 TlMo<sub>6</sub>O<sub>16</sub>的磁阻进行了成功的解释<sup>19]</sup>.

考虑到磁击穿效应后 ,电子的弛豫时间用有效 弛豫时间 <sub>てeff</sub>表示 ,即

$$1/\tau_{\rm eff} = 1/\tau_0 + 1/\tau_{\rm m}, 1/\tau_{\rm m} = \omega_{\rm c} f(P),$$
 (3)

其中  $\tau_0$ ,  $\tau_m$  分别为电子的本征弛豫时间和磁击穿 附加散射弛豫时间.  $\omega_c = eB/m^*$  是电子在磁场下的 回旋频率, 而 B 和  $m^*$  分别为磁场强度和电子回旋 的有效质量. f(P)为与击穿事件有关的函数, P 为 击穿概率, 其表示式为

$$P = \exp(-B_0/B),$$
  

$$B_0 = K\Delta^2 m^* / \varepsilon_F \hbar,$$
(4)

其中  $B_0$  为磁击穿特征磁场 , $\varepsilon_{\rm F}$  , $\Delta$  和  $\hbar$  分别为 Feimi 能 ,发生磁击穿的两带间的能隙和普朗克常数. K 为量级为 1 的常数.利用上述的有效弛豫时间 , 磁击穿效应的磁阻  $\rho_{\rm BI}$  (B)可表示为<sup>[18]</sup>

$$\rho_{\rm BD}(B) = \frac{m^{*}}{ne^{2}\tau_{\rm eff}} [1 + (\omega_{\rm c}\tau_{\rm eff})^{2}],$$

$$\Delta \rho_{\rm BI}(B) \rho_{\rm BI}(0) = \frac{\tau_{0}}{\tau_{\rm eff}} + \frac{\tau_{\rm eff}}{\tau_{0}} (\omega_{\rm c}\tau_{0})^{2}.$$
(5)

在磁击穿过程中, Falicov 等人<sup>[17]</sup>指出,电子轨道的 耦合强度比例与 1/B, 当磁场  $B \rightarrow \infty$ 时,电子的轨道 是去耦的.因此,在磁击穿过程中,应存在两个特征 磁场,即开始击穿场 $B_0$ 和终止场 $B_0.B_0$ 由(4)式中 涉及到电子击穿的两带间的能隙决定.而 $B_1$ 为轨 道开始去耦合时的磁场. Naito 等人<sup>[18]</sup>研究认为,与 击穿事件有关的函数f(P)一般具有如下形式,

 $f = C \exp(-B_0/B [1 - \exp(-B_1/B)], (6)$ C 为一正的常数,而  $B_0$ 和  $B_1$ 分别为电子的开始击

#### 穿磁场和终止磁场.因此(5)式可表示为

$$\Delta \rho_{\rm BI} (B) \rho_{\rm BI} (0) = c \mu_{\rm e} B \exp(-B_0 / B \mathbf{I} 1)$$
  
- exp(-B\_1 / B)]+(\mu\_{\rm e} B) / (1 + c \mu\_{\rm e} B \exp(-B\_0 / B))  
(1 - exp(-B\_1 / B)]}, (7)

其中  $\mu_e = e\tau_0 / m^*$ . 假设在研究的磁场范围内电子 的费米面面积损失量与磁场有近似线性关系,那么 正常导电电子密度的减少量与磁场也有线性关系. 因此,由简单金属的 Drude 关系可得知,电子密度的 减少造成的磁阻可表示为  $\Delta \rho_{IS}(B) / \rho_{IS}(0) = AB$ , A 为一常数系数,与费米面的结构有关.在2K和B= 14 T 时,从图 1 中虚线可得到磁场诱导费米面"嵌 套"修正引起的正磁阻贡献为  $\rho_{IS}(14 \text{ T}) \sim 0.6 \text{ m}\Omega$ . cm, 而  $\rho_{IS}(0) = 0.5 \text{ m}\Omega$ . cm,则得到  $A \sim 0.0136$ . 因 此,总的磁阻可表示为

$$\Delta \rho (B) \rho (0) = c \mu_e B \exp(-B_0 / B \mathbf{I} 1)$$
  
- exp( - B<sub>1</sub> / B)]+(  $\mu_e B$ )  $\rho / (1 + c \mu_e B \exp(-B_0 / B \mathbf{I} 1))$   
- exp( - B<sub>1</sub> / B)] + 0.0136B.(8)

由(8)武去拟合图 3 的  $\Delta \rho (B) / \rho (0) - B$  关系曲 线,实验和理论基本相符合,且得到  $\mu_e$ ,*c*, $B_0$ 和  $B_1$ 的 4 个拟合参数分别为, $\mu_e = 0.042 \text{m}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$ ,*c* = 0.49, $B_0 = 0.15 \text{ T}$ , $B_1 = 5.5 \text{ T}$ .

对磷酸钨青铜(PO<sub>2</sub>)(WO<sub>3</sub>)<sub>m</sub>(m = 6)单晶样 品,由理论和实验研究可知,电子有效质量 m\*=  $0.3 m_{e}$  ( $m_{e}$  为电子的静止质量)<sup>20</sup>,费米能  $\varepsilon_{F} \sim$  $0.15 \text{ eV}^{[21]}$ . 若取 K = 1 由(4) 式计算可得电子磁击 穿的带隙为: $\Delta \sim 3 \text{ meV}$ .由于磷酸钨青铜在 120 K 和 68 K 有两个相变,分别对应两个 Peierls 能隙,这 里估算的能隙值应该对应第一个 Peierls 相变时打 开的较小的能隙.原因是第二个 Peierls 相变的能隙 大于第一个 Peierls 相变的能隙值,且磁场对费米面 的修正使第二个 Peierls 能隙变大,那么磁击穿散射 引起的磁阻效应将远小于第一个 Peierls 能隙间的 磁击穿效应.这一估计值与人们利用磁击穿理论对 准二维 CDW 材料 TlMo<sub>6</sub>O<sub>17</sub>(2 meV)<sup>19]</sup>, TaSe<sub>2</sub>(4 meV 和 NbSe (18 meV )<sup>18</sup> 实验测得的能隙值可比 较.本工作得到的高温端 CDW 态能隙值( $\Delta \sim 3$ meV )也是首次在磷酸钨青铜(PO<sub>2</sub>) (WO<sub>3</sub>), (m = 6)单晶样品中得到的能隙估计值. 当 T>34 K 时, 因热激活能  $k_{\rm B}T > 3$  meV, 电子带间的磁击穿磁阻 效应可被忽略,这也很好解释了为什么在 T < 30 K

时才可观察到明显的磁阻增强效应. Hess 等人<sup>[7]</sup>通 过霍尔系数测量,给出(PO<sub>2</sub>)<sub>4</sub>(WO<sub>3</sub>)<sub>2m</sub>(m = 6)单 晶样品的在 4.2 K 的电子迁移率为 0.3 m<sup>2</sup>V<sup>-1</sup>s<sup>-1</sup>, 比我们利用磁击穿模型得到的迁移率 0.042 m<sup>2</sup>V<sup>-1</sup> s<sup>-1</sup>大 6 倍. 但从分析来看,本文的结果应该是比较 合理的,低的电子迁移率反映了电子有较短的有效 弛豫时间,其根源是电子在磁场下因发生磁击穿而 受到了附加的散射引起.磁击穿模型拟合参数  $B_0 =$ 0.15 T,  $B_1 = 5.5$  T 均在合理的范围内,且与用磁击 穿理论对准二维 CDW 材料紫青铜 TlMo<sub>6</sub>O<sub>17</sub>实验测 得的值 0.08 T 和 3.6 T 可比较.

综上所述 本文对磷酸钨青铜(PO<sub>2</sub>)<sub>4</sub>(WO<sub>3</sub>)<sub>2m</sub> (m = 6)在 2—300 K 温区内磁电阻和在 2 K 时的  $\Delta \rho / \rho_0 - B$  关系进行了详细的实验研究 ,利用电子磁 击穿模型对其低温端的磁阻增强行为进行了分析解 释 理论和实验相符合 ,并首次估算出高温端第一个 Peierls 能隙的大小为 3.0 meV ,电子在低温下的迁 移率为 0.042 m<sup>2</sup>V<sup>-1</sup>s<sup>-1</sup>.

- M. Greenblatt, in Physics and Chemistry of Low-Dimensional Inorganic Conductors, edited by C. Schlenker, J. Dumas, M. Greenblatt and S. van Smaalen, NATO ASI Series, Series B: Physics Vol. 354 (Plenum Press, New York, 1996), p. 15; M. Greenblatt, *Chem. Rev.*, (1988), 8831.
- [2] M. Greenblatt, Int. J. Mod. Phys., B7 (1993), 3937.
- [3] P. Labbe, M. Goreaud, B. Reveau, J. Solid State Chem., 61 (1986), 234.
- [4] J. P. Giroult, M. Goteaud, P. Labbe, B. Raveau, Acta Crystallogr., B37 (1981), 2139.
- [5] C. Hess, C. Le Touze, C. Schlenker, J. Dumas, D. Groult, J. Marcus, Syn. Metals, 86 (1997, 2419.
- [6] C. Schlenker, C. Hess, C. Le Touze, J. Dumas, J. Phys.
   (France) I, 6(1996), 2061.
- [7] C. Hess, C. Schlenker, J. Dumas, M. Greenblatt, Z. S. Teweldemedhin, *Phys. Rev.*, **B54** (1996), 4581.
- [8] P. Foury, J. P. Pouget, Z. S. Teweldemedhin, E. Wang, M. Greenblatt, D. Groult, *J. Phys.* (France) N, 3 (1993), C2-133.
- [9] M. H. Whangbo, E. Canadell, P. Foury, J. P. Pouget, Science, 252 (1991), 96.
- [10] E. Wang, M. Greenblatt, I. E. Rachidi, E. Canadell, M. H. Whangbo, S. Vadlamannati, *Phys. Rev.*, **B39** (1989), 12969.
- [11] J.Duams, C. Schlenker, Int. J. Mod. Phys., B7 (1993), 4045.
- [12] P.Foury, J. P. Pouget, Int. J. Mod. Phys., B7 (1993), 3973.
- [13] L. D. Woolf, J. Chin, Y. R. Lin-liu, H. Ikezi, Phys. Rev., B30 (1984), 861.

- [15] C. A. Balseiro, L. M. Falicov, Phys. Rev. Lett., 55 (1986), 2336; Phys. Rev., B34 (1986), 863.
- [16] R. V. Coleman, G. Eiserman, M. P. Everson, A. Johnson, L. M. Falicov, *Phys. Rev. Lett.*, **55** (1985), 863.
- [17] L. M. Falicov, P. R. Sievert, Phys. Rev., 138 (1965), A88.
- [18] M. Naito , S. Tanaka , N. Miura , in Physics in High Magnetic

Fields edited by S. Chikazumi and M. Miura Springer Series in Solid State Science Vol. 24 Springer-Verlag Berlin 1981 ) p. 320.

- [19] X.K. Qin, J. Shi, H. Y. Gong, M. L. Tian, J. Y. Wei, H. Chen, D.C. Tian, Phys. Rev., B53 (1996), 15538.
- [20] C. Le Touze, L. H. Nguyen, C. Schlenker, E. Steep, M. Greenblatt, Synth. Metals, 86 (1997), 2133.
- [21] E. Canadell, M. Whangbo, Phys. Rev. B43 (1990), 1894.

# MAGNETORESISTANCE PROPERTIES IN QUASI-TWO DIMENSIONAL CHARGE-DENSITY WAVE COMPOUND ( $PO_2$ )( $WO_3$ )<sub>2m</sub>( m = 6 )\*

TIAN MING-LIANG<sup>1</sup>) SHI JING<sup>1</sup><sup>(2)</sup> LI SHI-YAN<sup>1</sup>) CAO QIANG<sup>1</sup>) YUE SONG<sup>1</sup>) ZHANG YU-HENG<sup>1</sup>)

<sup>1</sup> (Structure Research Laboratory, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

<sup>2</sup> (Department of Physics, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

( Received 25 January 2000 ; revised manuscript received 27 March 2000 )

#### Abstract

Temperature dependence of magnetoresistance in the range of 2—300 K and the  $\Delta \rho / \rho_0$ -B relation at 2 K were measured in quasi-two dimensional charge-density wave compound (PO<sub>2</sub>) (WO<sub>3</sub>)<sub>2m</sub>(m = 6). The enhancement of the magnetoresistance at low temperatures was analyzed by use of the magnetic breakdown model. The first Peierls energy gap in the charge-density wave states was estimated to be about 3.0 meV.

Keywords : megnetoresistance in two-dimensional compounds , charge-density waves PACC : 7145L , 7270

<sup>49</sup> 卷

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 19874055).