

# 铁基非晶态因瓦合金的声子谱研究

鲜于泽 卢志超

东北工学院物理系, 沈阳 110006

李际周 叶春堂 李竹起 康健

中国原子能科学研究院, 北京 102413

沈保根

中国科学院物理研究所, 北京 100080

1993年3月1日收到

用非弹性中子散射实验方法研究了非晶态  $\text{Fe}_{90-x}\text{Co}_x\text{Zr}_{10}$  ( $x = 10, 40$ ) 和  $\text{Fe}_{80-y}\text{Cr}_y\text{P}_{15}\text{C}_7$  ( $y = 4, 8$ ) 合金的广义声子谱, 在低能区域 ( $\hbar\omega \leq 20\text{meV}$ ) 观察到了与因瓦效应相关的声子谱软化现象. 初步讨论了这种动力学方面的反常行为. 结果表明, 声子谱软化可能与在因瓦合金中存在增强的电子-声子相互作用有关.

PACC: 6350; 6570

## 一、引言

因瓦效应一直是凝聚态物理学界普遍关注, 且十分活跃的研究领域. 其中晶格动力学方面的研究对从微观角度和动态角度理解因瓦效应的机理起着重要作用. Endoh 等人曾用非弹性中子散射方法系统地研究了铁基晶态因瓦合金  $\text{Fe}_{65}\text{Ni}_{35}$ <sup>[1]</sup>,  $\text{Fe}_3\text{Pt}$ <sup>[2]</sup> 和  $\text{Fe}_{70}\text{Mn}_{30}$ <sup>[3]</sup> 的声子色散关系, 在这些合金中均发现了低频声学模式在磁相变温度  $T_C$  或  $T_N$  以下变软. 这种与温度有关的声子软化现象与用超声波法测得的弹性软化<sup>[4,5]</sup>是一致的. 这类软化现象被认为起因于因瓦合金中存在增强的电子-声子相互作用<sup>[1]</sup>. 但还远未达到完全清楚地理解这种微观机制. 由于合金的电子结构与成分密切相关, 因此研究因瓦合金的声子色散关系随成分的变化更有意义. 但是, 多数晶态合金在因瓦成分附近存在马氏体相变, 从而使问题复杂化. 非晶态因瓦合金没有上述问题. 虽然对非晶态合金而言, 由于长程无序而不存在类似晶态合金的声子色散关系, 但其声子谱同样可以反映出许多动力学方面的特征. 本文用非弹性中子散射方法测量了非晶态  $\text{Fe}_{90-x}\text{Co}_x\text{Zr}_{10}$  和  $\text{Fe}_{80-y}\text{Cr}_y\text{P}_{15}\text{C}_7$  合金的广义声子谱, 初步讨论了与因瓦效应相关的动力学反常行为.

## 二、实验

非晶态  $\text{Fe}_{90-x}\text{Co}_x\text{Zr}_{10}$  ( $x = 10, 40$ ) 和  $\text{Fe}_{80-y}\text{Cr}_y\text{P}_{15}\text{C}_7$  ( $y = 2, 4$ ) 合金是用真空单辊

急冷装置在氩气氛中制备的,薄带厚度为 20--30 $\mu\text{m}$ ,宽度为 1--2 $\mu\text{m}$ ,X射线衍射鉴定样品为非晶态结构。

用差动变压器法<sup>[6]</sup>测量了样品的热膨胀曲线,测量精度为0.5 $\mu\text{m}$ ,升温速度为100K/h。

热中子非弹性散射实验是在中国原子能科学研究院重水反应堆旁的飞行时间谱仪上完成的。将非晶带材剪碎,压入圆筒形薄壁铝容器中,单色入射中子能量为 18.25meV,飞行距离为 2m,散射角范围为 30°—90°,测量温度为室温。

### 三、结果与讨论

图 1 为非晶态  $\text{Fe}_{90-x}\text{Co}_x\text{Zr}_{10}$  和  $\text{Fe}_{80-x}\text{Cr}_x\text{P}_{13}\text{C}_7$  合金的热膨胀曲线。如图 1 所示,非晶态  $\text{Fe}_{76}\text{Cr}_8\text{P}_{13}\text{C}_7$  和  $\text{Fe}_{72}\text{Cr}_8\text{P}_{13}\text{C}_7$  合金在居里温度以下均有热膨胀反常现象,但前者更明显,即因瓦效应更强一些。非晶态  $\text{Fe}_{80}\text{Co}_{10}\text{Zr}_{10}$  合金在居里温度以下的热膨胀系数为负,显示出显著的因瓦特征,而非晶态  $\text{Fe}_{58}\text{Co}_{40}\text{Zr}_{10}$  合金几乎没有热膨胀反常现象,亦无因瓦效应。

图 2 和图 3 为扣除背底后从散射中子大角平均(30°—90°)推导出的广义声子谱,其中多声子过程已用自洽方法给予修正。从图 2 中可见,在低能范围(10—17meV),因瓦效应较强的非晶态  $\text{Fe}_{76}\text{Cr}_8\text{P}_{13}\text{C}_7$  合金的声子谱比因瓦效应较弱的  $\text{Fe}_{72}\text{Cr}_8\text{P}_{13}\text{C}_7$  合金平均软大约 1meV。从图 3 中可以看到更明显的结果:在低能范围(0—17meV),有因瓦效应的非晶态  $\text{Fe}_{80}\text{Co}_{10}\text{Zr}_{10}$  合金比无因瓦效应的  $\text{Fe}_{58}\text{Co}_{40}\text{Zr}_{10}$  合金的声子谱平均软 1.5 meV。如果考虑替代元素的质量对广义声子谱的影响,由于 Co 原子比 Fe 原子重,广义声子谱应该随 Co 含量的增加而变软,但实验事实却相反。所以,我们认为广义声子谱的软化与因瓦效应有关。可以将上述结果与晶态因瓦合金的软化现象<sup>[1-3]</sup>进行对比分析。晶态因瓦合金从无因瓦效应的顺磁态( $T_c$  以上)过渡到有明显因瓦效应的铁磁态( $T_c$  以下)时,从非弹性

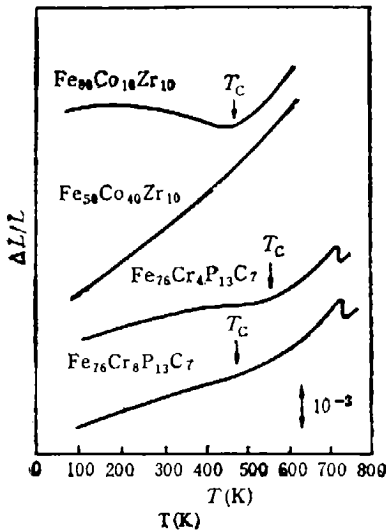


图 1 非晶态合金热膨胀曲线

中子散射实验测得的声子色散曲线上可以看到声频支横模(低频声子)有明显的软化现象。上述非晶态因瓦合金中与成分有关的软化现象同晶态因瓦合金中与温度有关的软化现象本质上是一致的,都是从无因瓦状态过渡到因瓦状态时出现声子软化行为。Endoh 等人<sup>[4]</sup>认为声子软化可归因于在因瓦合金中存在增强的电子-声子相互作用,而这种增强的电子-声子相互作用又与因瓦合金的费密能级附近有很高的电子态密度有关,但具体机制尚不清楚。目前的结果则为这种微观机制提供了较为直接的实验证据,因为非晶态合金成分的变化直接影响其 d 电子态密度,因而瓦合金在费密能级附近具有大的电子态密度已有实验证据和理论解释<sup>[7]</sup>。由上述简单分析,我们认为“增强的电子-声子相互作用”

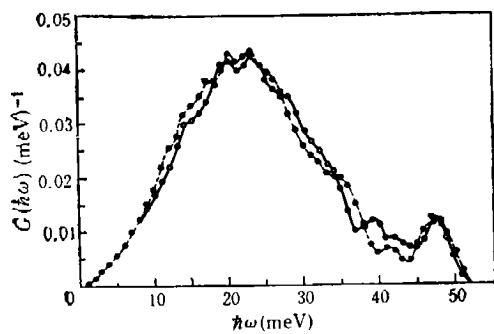


图2 非晶态  $\text{Fe}_{80-y}\text{Cr}_7\text{P}_{13}\text{C}_7$  合金的广义声子谱  
 ● 为  $\text{Fe}_{76}\text{Cr}_4\text{P}_{13}\text{C}_7$ ; ○ 为  $\text{Fe}_{78}\text{Cr}_2\text{P}_{13}\text{C}_7$

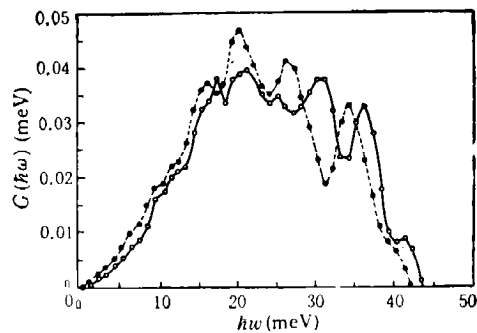


图3 非晶态  $\text{Fe}_{90-x}\text{Co}_2\text{Zr}_{10}$  合金的广义声子谱  
 ● 为  $\text{Fe}_{80}\text{Co}_{10}\text{Zr}_{10}$ ; ○ 为  $\text{Fe}_{90}\text{Co}_0\text{Zr}_{10}$

机制可以用来解释因瓦合金的声子软化现象。目前的实验结果还表明铁基因瓦合金的声子软化行为与合金的长程序无关,从而提供了“增强的电子-声子相互作用”机制可能只与局域电子结构相关的重要线索。进一步的理论分析和计算工作有待完成。

- [1] Y. Noda and Y. Endoh, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **57**(1988), 4225.
- [2] K. Tajima, Y. Endoh, Y. Ishikawa and W. G. Stirling, *Phys. Rev. Lett.*, **37**(1976), 519.
- [3] Y. Endoh, Y. Noda and M. Iizumi, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **50**(1981), 469.
- [4] G. Hausch and H. Warlimont, *Acta Metallurgica*, **21**(1973), 401.
- [5] G. Hausch, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **37**(1974), 819.
- [6] M. Takahashi, Y. Ueda, K. Sudo and Y. Naruse, *J. Jap. Inst. Metals*, **44**(1980), 1145.
- [7] E. P. Wohlfarth *Phys. Lett.*, **3**(1962), 17.

# PHONON DENSITIES OF STATES IN Fe-BASED AMORPHOUS INVAR ALLOYS

XIAN YU-ZE LU ZHI-CHAO

*Department of Physics, Northeast University of Technology, Shenyang 110006*

LI JI-ZHOU YE CHUN-TANG LI ZHU-QI KANG JIAN

*Institute of Atomic Energy, Beijing, China 102413*

SHEN BAO-GEN

*Institute of Physics, Academia Sinica Beijing 100080*

(Received 1 March 1993)

## ABSTRACT

Generalized phonon densities of states (PDOS) for amorphous  $\text{Fe}_{90-x}\text{Co}_x\text{Zr}_{10}$  ( $x = 10, 40$ ) and  $\text{Fe}_{80-y}\text{Cr}_y\text{P}_{10}\text{C}_8$  ( $y = 4, 8$ ) alloys have been deduced from inelastic neutron scattering experiments. And the softening phenomena of the PDOS in the energy region below 17 meV have been observed for the amorphous Invar alloys. The anomalies in the dynamics of Invar alloys were discussed, and preliminary results show that the phonon softening of the amorphous Invar alloys may closely connected with the enhanced electron-phonon interaction in Invar alloys.

**PACC:** 6350; 6570