

表 2 考虑了能隙边的宽化后求得的能隙值与其他有关参数

试样	$2\Delta_0/k_B T_C$	G	$Q_0^{-1}(10^{-4})$
Bi(Pb)SrCaCuO(2223)	4.1	0.25	1.9
BiSrCaCuO(名义 2234)	3.8	0.33	3.7
TlBaCaCuO	4.0	0.31	0.8

是合理的。

测量超导能隙有多种方法,除常用的隧道谱方法外,还有红外光散射和拉曼散射法。隧道谱方法是目前公认的最好的测量方法。但由于高温超导体的相干长度 ξ 太短,致使测量值敏感于试样表面状态和污染情况。特别是在 T_c 附近, ξ 更小,因此至今数据比较分散。而内耗方法是测量的总体效应,对表面不特别敏感,所以不失成为测量超导能隙的有用方法之一。

[1] A. S. Nowick and B. S. Berry, *Anelastic Relaxation in Crystalline Solids*, Academic Press, New York and London, (1972), 463.
 [2] B. Luthi and W. Rehwald in *Structural Phase Transitions 1*, ed. by K. A. Muller and H. Thomas, ISBN Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York. (1981), 131.
 [3] Yening Wang et al., *Phys. Stat. Sol. (a)*, **102**(1987),

279.
 [4] Huimin Shen et al., *J. Nanjing Univ.*, **21**(1985), 459.
 [5] S. A. Gridnev et al., *Ferroelectrics*, **21**(1978), 597; **26**(1980), 669.
 [6] Liu Zhongming et al., *Phys. Stat. Sol. (a)*, **116**(1989), K199.
 [7] Wenyuan Sun et al., *J. de Phys.*, **46**(1985), C10—609.
 [8] Yening Wang et al., *J. Met. Sci. Technol.*, **7**(1991), 157.
 [9] Xuexuan Qu and Zhang Xingkui, *J. Phys. Condensed Matter*, **2**(1990), 55.
 [10] Huang Yineng et al., *Phys. Rev. B*, **46**(1992), 3290.
 [11] M. De Graef et al., 1991 MRS Fall Meeting, Abstract Book, (1991), 339.
 [12] L. H. Sun and Y. N. Wang, *Phys. Lett. A*, **154**(1991), 59.
 [13] Y. N. Huang et al., to be published.
 [14] Y. H. Kim et al., *Phys. Rev. B*, **38**(1988), 6478.
 [15] B. H. Toby et al., *Phys. Rev. Lett.*, **64**(1990), 2414.
 [16] J. Bardeen and J. R. Schreffer, *Progress in Low-Temp. Physics*, ed. C. J. Gorter, NHPC, Amsterdam, (1964), 9216—222.
 [17] J. R. Clem, *Ann. Phys. (USA)*, **40**(1966), 268.
 [18] T. Hasegawa et al., to be published in *Physical Properties of High Tc Superconductors III*, ed. D. M. Ginsberg. World Scientific Publishing. (1992).
 [19] J. R. Kirtly, *Inter. J. Modern Phys. B*, **4**(1990), 201.
 [20] R. C. Dynes et al., *Phys. Rev. Lett.*, **41**(1978), 1509.
 [21] J. Coffey, *Phys. Rev. Lett.*, **64**(1990), 1071.
 [22] E. F. Wolf et al., *Sol. State Commun.*, **77**(1991), 519.

钢铁中稀土合金化的内耗研究

戴景文

(东北工学院物理系,沈阳 110006)

介绍了我们使用葛庭燧教授发明的内耗装置^[1],研究加稀土(RE)的铁基材料的内耗,从而在原子尺度上演示和证明了钢铁中稀土合金化的结果。表明在物理学和材料科学中,内耗研究是极重要的,它是一个大有开发应用前景的研究领域。

中国物理学会理事长冯端教授指出:“内耗是一门由于中国科学家——葛庭燧教授的杰出发明、贡献,而发展成为科学的学科。”^[2]葛老被誉为“滞弹性之父”^[3]。这是葛老,也是我们国家和民族的光荣和骄傲!葛老对发展祖国内耗作出的巨大贡献,是举世瞩目的^{[3],[2]}。我生活在东北工学院这所中国冶金专业的高等学校里,对此有深深的体验:正是葛老的期望、关怀、信

任和鼓励,一直在推动我们立足自己的行业,发展“冶金内耗”。即系统地研究钢铁等金属材料的弹性能耗散谱以及这些材料在制作过程中引

1) 冯端在第三届全国固体内耗与超声衰减学术会议开幕式上的讲话(1991年11月,南京).
 2) R. Contelli 致联合国发展计划署中国分部代主席 Mr. Jan. Mattsson 的信(1992年9月7日).
 3) 王业宁在第三届全国固体内耗与超声衰减学术会议闭幕式上的讲话(1991年11月,南京).

起的内耗现象,研究了这些现象和材料属性之间的本质联系,以促进物理冶金学向原子尺度发展,实现我国内耗的冶金工业应用,从而推动我国钢铁等金属材料更好地发展。这里介绍我们用内耗方法,研究钢铁中稀土合金化的进展,借此祝贺葛老 80 寿辰。

发展含稀土的钢,对开发利用我国丰富的稀土资源十分重要。因此,它是受国家长期重视的重大课题;而稀土合金化则是发展稀土钢的核心问题。由于稀土元素和铁之间原子半径差达 35—65%,稀土的强化学活性使得它们极易与 O、S 等生成化合物;又由于 4f 电子态的改变,稀土可以呈多种“反应”态;再加上稀土原子半径大,因而较难在固相钢铁中扩散等。上述这些性质,使钢铁内本来就很少的稀土,又容易产生非平衡分布,并可能处于和材料成分及具体制作过程相关的一些非平衡状态。因此,判定钢铁内是否存在固溶稀土,研究钢铁中稀土合金化,长时期成为物理冶金研究上的难题。幸好内耗作为材料点、线、面、体等缺陷运动及其交互作用的产物,是能够提供一系列信息(即各种谱)来反映原子尺度材料微结构及其状态的极灵敏的物理量。因此,我们使用葛氏摆,较系统地研究了 Fe-P-La 及加 RE 的工业纯铁的内耗,取得钢铁中稀土合金化研究的较大进展。

一、研究铁的弹性能量耗散谱取得进展

搞清弹性能耗散谱是有效应用内耗的前提。但内耗都是联系原子尺度微观过程的现象,弄清它们要有一个过程,并且围绕内耗现象出现认识分歧和争论也是常见的。例如,我们的研究中所涉及的 $K\epsilon$ 峰^[3]、Snoek- $K\epsilon$ -Köster (SKK) 峰^[4]等。为此,我们先就铁的内耗谱进行了一些深入的研究,以奠定进一步研究的基础。这方面的主要进展如下:

1. 针对多型性转变,特别是针对含杂质而又无法制备单晶(甚至很难粗化晶粒)的铁等材料,提出了能说明 $K\epsilon$ 峰本质的“参杂表面活性元素的界面内耗效应”方法。通过晶界析出,使

Fe-P-La 及 Fe-Nb-C 合金 $K\epsilon$ 峰下降以致完全消失,这一实验事实证明了铁基材料中的 $K\epsilon$ 峰是晶界峰,并阐明了 PM 峰、SS (包括 cluster) 峰及 $K\epsilon$ 峰变化、消失等晶界内耗现象的微观机制^[5-7]。

2. 研究并发现三元、四元铁基材料中替代元素对 SKK 阻尼的强烈影响,进而阐明了 SKK 阻尼的物理机制是非螺位错拖曳间隙溶质 Cottrell 气团弦振动产生弹性能量耗散。得到的主要结果如下:

(1) 三元系中的替代原子钉扎位错,因而减短了可动位错段长度 L_0 , 产生了减弱 SKK 阻尼效应^[8,9]。

(2) 四元系中替代元素之间的相互作用,减少了钉扎位错的替代溶质浓度 C_0 (或改变其分布、状态等),从而使 L_0 增长,产生了增强 SKK 阻尼效应^[10]。

(3) 时效时间隙溶质的脱溶、沉淀以及这些沉淀的聚集、长大、再溶等,使 L_0 改变,从而控制 SKK 阻尼行为。但变形前的原有沉淀却不在对 SKK 阻尼有贡献的位错上,因而对该阻尼无影响^[11]。

3. 研究发现,间隙溶质及原沉淀对变形铁的内耗连续谱(即背景内耗)有影响:前者因束缚位错运动而降低室温区背景内耗;后者则在变形过程中产生特定的位错组态而增强测量区(室温—350℃)背景内耗,等等^[11]。

二、给出钢铁中固溶稀土的物理证据

研究加 La 的 Fe-P 合金内耗发现,除 Fe 的 PM 峰和 P 的 SS 峰及 cluster 峰外,还出现一高温内耗峰;随 La 含量从 0.584wt% 增至 0.722wt%,此峰高度增加,峰温度也从 625℃ 升至 645℃。由添加元素和晶界内耗峰的通常关系得出,它是 La 的 SS 峰^[9]。另外,稀土具有抑制变形工业纯铁高温时效的 SKK 峰温回升等作用(即减弱的 SKK 阻尼效应)^[11]。特别是在高纯 Fe-P-La-N 合金中,La 呈强的增强 SKK 阻尼效应^[10],等等。这些都是试验铁晶体

中存在固溶稀土的物理证据。

三、揭示了稀土对铁中替代元

素 P 的强作用

我们分析了 La 对 Fe-P 合金内耗的强烈影响, 得出:^[5,10] 出现升温增强 SKK 阻尼效应, 是由于 La, P 的作用形成了化合物而使固溶 P 的浓度 C_p 变小; 而从 350°C 降温测内耗时呈现的强的增强 SKK 阻尼效应, 则是由于在位错线上有 La, P 原子的作用, 使后者沿位错管道向 La 扩散, 形成 La-P 的 cluster, 导致 L_c 变长的结果。加 RE 降低 P 的 SS 峰, 甚至几乎消除 Fe-P 合金的晶界峰, 则是 RE 取代内耗源中的 P 原子形成 RE 的 SS 峰, 或 RE 同内耗源上的 P 结合, 生成 La-P 化合物而“吞没”了内耗源的结果, 即 RE 强烈影响 Fe-P 合金内耗。这表明 Fe 中 RE 和 P 之间有强相互作用。

四、演示了稀土对铁中间隙元

素 C, N 的作用

RE 明显降低仅含 0.0044wt% N 的水冷工业纯铁 C-Snoek 峰的低温支内耗; 并引起其变形丝低温支内耗进一步下降。这表明 RE 有强烈减少 Fe 中固溶 N 及加速 N 脱溶的作用。而水冷试样 C-Snoek 峰显著高的含 RE 工业纯铁, 其退火试样的 C-Snoek 峰却反而大大低于不含 RE 的 Fe。含 RE 铁 Snoek 峰时效消失快等实验结果表明, RE 也有加速 Fe 中 C 脱溶作用。实验测出的以退火为原始态的含 RE 变形 Fe 及变形后低温时效 Fe 的“附加峰”以及 RE 抑制 600°C 时效试样 SKK 峰 T_c 回升等事实表明, RE 与 C, N, Fe 形成了化合物。

上面通过测量加稀土铁的内耗, 演示了 RE 对 Snoek 峰、SKK 峰、 $K\delta$ 峰及背景内耗的影响, 演示了产生的附加峰和新内耗峰等, 即由测量内耗给出的 Fe 弹性能耗分立谱和连续谱信息, 较系统地证明了稀土在铁中固溶, 并具有

强烈控制铁中 P, N, C 的强合金化作用。这是其他手段难于做到的。这也正是内耗能够从原子尺度上系统反映材料属性和本质的意义所在。内耗揭示出 350°C 以下 Fe 中 P 的扩散以及与 La 作用等过程, 而且显示出这样明显的增强 SKK 阻尼效应, 等等。这不仅是迄今其他实验未能做到的, 也是以往难以预见的。这说明内耗是物理学和材料科学中非常重要的研究手段。

随着现代科技和经济的发展, 钢铁等传统金属材料受到日益严峻的考验和新材料的强大挑战, 必须有更大的发展。很显然, 这有赖于物理冶金学的新进展。为此, 进一步积极发展可以用“来探测物质内部的分子、原子、声子、电子等的存在状态及其运动变化”^[11] 的内耗是十分必要的。另一点不能忽视的是, 在内耗的冶金工业应用上, 目前我国明显落后于日本。日本各钢铁公司都有很好的内耗实验室和先进的内耗设备, 并承担较多的分析检验任务; 特别是对于正在发展的 IF (interstitial-free) 钢, 内耗是主要的检测指标。这说明钢铁工业及其发展需要内耗。

日本学者 K. Sugimoto 教授对我说: “我们日本人非常尊敬葛庭燧教授。因为他教给了我们很多知识。”这是我在日本参加学术交流和讲学时听到的话。这既使我感受到一名中国内耗工作者的荣幸, 也使自己感到身上的担子重。工作在冶金部门, 我们应使我国内耗的冶金工业应用, 赶上和超过日本。上面介绍的我们在铁内耗谱的研究上, 已远不是日本冶金工业应用的一 50—100°C 范围了。我们的“冶金内耗”的研究工作还刚起步, 我们将在自己研究实践的基础上继续前进。

- [1] T. S. Kê (葛庭燧), *Phys. Rev.*, 71(1947), 533.
- [2] C. Zener, *J. de Phys.*, 46(1985), C10—1.
- [3] T. S. Kê, Proc. of the 9th ICIFUAS, Inter. Acad. Pub., (1989), 113—120.
- [4] T.S.Kê, *Scripta Met.*, 16(1982), 225.
- [5] 戴景文等, 金属学报, 26(1990), 14A.
- [6] 戴景文等, 东北工学院学报, 12(1991), 177.
- [7] Ji Jingwen (戴景文) et al., Proc. of the 9th ICIFUAS, Inter. Acad. Pub., (1989), 401.

[8] 戴景文等,物理学报,34(1985),1620.
 [9] 张国福等,第三届全国固体内耗会议论文集,原子能出版社,(1992).

[10] 戴景文等,金属学报,28(1992),207A.
 [11] 戴景文等,金属学报,27(1992),408A.
 [12] 葛庭燧,物理,22(1993),待发表.

镍钛合金的内耗

朱劲松

(南京大学固体微结构物理国家实验室,南京 210008)

介绍了用葛氏扭摆研究镍钛合金在 100—1200K 之间的内耗结果. 并以此文表达对扭摆的发明者、滞弹性理论奠基人之一的葛庭燧教授 80 寿辰的衷心祝贺.

镍钛合金具有良好的物理和机械性能,因而在工业、航天、医疗、自动控制等领域得到广泛应用. 它是目前进入工业应用领域的性能最好的形状记忆合金,也是一种好的阻尼材料. 镍钛合金的相变有着丰富的内容,它涉及无公度、公度、马氏体相变等. 相变对性能有重大影响,因而相变的研究有着重要的科学与实用意义.

内耗是一个结构敏感的量,用内耗技术研究材料相变、缺陷和结构对性能的影响等显示出许多的优越性. Hasiguti^[1]等和 Postnikov^[2]曾在较大温区内对镍钛合金的内耗进行了测量,并给出了一些解释,但由于实验数据较少未能深入研究. 本文报道了在 100—1200K 温区范围内用葛氏扭摆测量镍钛合金低频内耗的结果,并对国内有关的工作也适当加以介绍.

用丝状近等原子比镍钛合金 (49.86at% Ni-50at% Ti, $M_s = 308\text{K}$, $M_f = 280\text{K}$, $A_s = 320\text{K}$, $A_f = 350\text{K}$) 进行研究. 100K 到 400K 之间的内耗测量是在倒装的葛氏扭摆中进行的,同时对频率、电阻、变形量进行测量. 而高温段的内耗是用真空葛氏扭摆测量. 两摆在测量前抽真空达 10^{-4}Torr 然后充以氦气. 测量频率为 0.5Hz 左右,升降温速率为 1—2K/min,测量振幅为 $1-5 \times 10^{-5}$. 试样经 1073 K 保温后淬入水中.

图 1 为镍钛试样在 100—400K 温区的内耗、模量、电阻和变形量随温度变化曲线. 在降

温曲线上,在 A_1, A_2, B 点分别为 200K、300K、320K 附近出现的三个内耗峰. 升温曲线上的 C 点 (340K 左右) 和 A_1 点出现两个内耗峰值. 图 2 为镍钛合金在 400—1200K 时的内耗、模量与温度的关系. 图中的 N 点处 (650K 左右) 有一很小凸起,而在 K 点 (降温 950K) 和 H 点 (升温 1000K) 处,则分别有一叠加在高内耗背景上的峰值并伴有模量的变化. 下面对实验结果作进一步的分析和讨论.

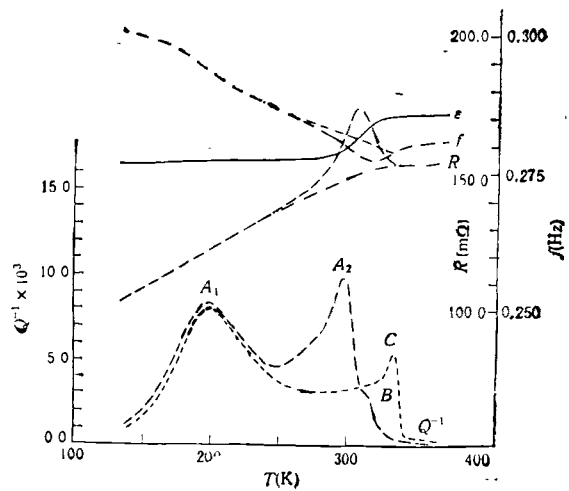


图 1

1. 200K 的弛豫峰

在 200K 时观察到的内耗峰, 伴随有模量亏损, 其峰温随频率增加而增加, 是一典型的弛豫峰, 其激活能为 0.43eV. 淬火试样经 770K