

酸 (DNA) 的分子结构而言,可能产生所谓的激子超导电性。

21 世纪是个充满理想与幻想的时代,让我们进一步探索自然界的秘密,去揭示生命的奥秘。

参 考 文 献

- [1] A. Salam, *Phys. Lett.*, **B288**(1992), 153.
- [2] A. Salam, *J. Mol. Evol.*, **33**(1991), 105.
- [3] 尤广建, 经典物理与现代物理, 陕西人民教育出版社, (1993), 239—245.
- [4] 高崇寿、曾谨言, 粒子物理与核物理讲座, 高等教育出版社, (1990), 156—172.

- [5] A. Salam, *Chemical Evolution: Origin of Life*, Edited by Cyril Ponnampuruma and Julian Chela-Flores, Proceeding of the Trieste Conference on Chemical Evolution and the Origin of Life, 26—30 October 1992, 101—117, A. Deepak Publishing 1993, Hampton, Virginia USA.
- [6] 张裕恒、李玉芝, 超导物理, 中国科学技术大学出版社, (1991), 373.
- [7] W. Wenqing, S. Xiangrong, Y. Hongshun et al., presented to Conference on the Structure and Model of the First Cell, Trieste, Italy, 29 Aug. 1994.
- [8] 章立源, 超导体, 科学出版社, (1992), 30—53; 115—116.

关于发展“冶金内耗”¹⁾

戴景文

李尚诣

(东北大学理学院, 沈阳 110006)

(冶金工业部科技司, 北京 100711)

摘要 冶金内耗,旨在系统地研究钢铁等金属材料的弹性能量耗散谱,以实现内耗在冶金工业的广泛应用;研究内耗与金属属性及制做过程的本质联系,以促进物理冶金学进一步向原子层次发展。它是一门把滞弹性物理同金属材料及其科学发展紧密结合起来的应用内耗。文章从金属材料发展中的理论—实践的联系状况,从材料性能和金属内耗两者的物理本质,以及从滞弹性物理学和金属材料及其科学的发展和需要等方面,讨论了发展“冶金内耗”。

关键词 内耗,冶金

Abstract The internal friction in metallurgy is an applied research field closely combining the physics of anelasticity and the development of metallic materials and metal science. Its objective is to achieve the wide application of internal friction to the industry of metallurgy by systematical studies of the dissipation spectrums of elastic energy in iron, steels, and other metals, and to further the development of physical metallurgy to atomic level by studying the nature of the relationship between the internal friction and the properties of metals and their production process. The present paper discussed the developing internal friction of metallurgy based on the state of the association between the theory and the practice in the development of metallic materials, on the nature of the properties and the internal friction of metals, and on the advancement and requirement of the physics of anelasticity and metallic materials and metal science.

Key words internal friction, metallurgy

1 金属材料及其科学发展的要求

金属是对人类社会发展和现代物质文明产

生巨大影响的重要材料。在人类史上,曾以铜、铁等金属划分时代;而在当代,冶金则是经济、

1) 1994年11月9日收到初稿,1995年1月23日收到修改稿。

军事和科学技术的支柱或基础产业,受到各国的重视。值得注意的是,迄今金属等传统材料的发展,却是“依赖于经验的长期累积和不断的炒菜式的实验,在其中理论指导并不起太大作用”^[4]。按“实践—理论—实践”的事物认识过程,这表明金属材料的理论尚须进一步发展到能够有效指导实践的阶段。

新的研究工具和实验方法的发明和应用,往往能够极大地深化人们对于各种物理性质及其规律的认识。一般认为,冶金上最重要的微观分析手段是电子显微镜,这种广泛使用了半个多世纪的大型设备,已能看到晶格原子像。然而,试样的高度破损及二维化以及制样时的强外场作用等,是它难以逾越的障碍。在电镜下观测 Ti-H 合金分解时我们发现,同样比较 Ti 基体大 23% 的 Ti-H 化合物 (*fcc* 结构,其 *a*、*b*、*c* 分别为 4.21 Å, 4.21 Å 和 4.68 Å), 在电镜样品的薄区 (即样品中靠近孔洞处) 析出,则由于位错被释放掉而未观测到诱发位错环,但在厚区,却有大量位错环绕在析出相的周围 (见图 1)^[4]。仅千埃量级以下的电镜试样厚度的波动,就能使试样相析出诱发的位错组态出现这样明显的差异,更何况电镜样品结果与实际材料之间呢? 此外,原位升、降温观测表明,原制的 Ti-0.23wt% H 试样里 Ti-H 化合物很少 (升温溶解-衍射花样完全消失后,都在基体留下位错,因而清晰地保持原析出物的痕迹)。值得注意的是,体枳比小、H 溶解度很低的 α -Ti 样品,在真空度很高的电镜观测室加热再冷下来时, Ti-H 化合物不但没有减少,反而明显增多;而且,出现结构、晶格参数未变的新形状 (图 1(a) 里端头呈圆化六角形的粗棒和图 1(b) 内被位错缠绕的长针) Ti-H 析出物。这些表明在电镜制备试样的条件下, α -Ti 中溶解 H 十分稳定且其溶解度显著增大,不可否认,大型观测、分析手段的应用,导致材料科学出现很大的发展;但描写金属材料本质的物理冶金学,它仅依靠这些手段所深入的微结构,实际上还只能达到微观相粒子及很有限的线、面缺陷;还很难有效地进入原子层次,这

是影响金属材料及其科学发展的重要原因。这说明,当前尚待进一步发展出既能研究原子尺寸微结构及其动力学又被冶金界广泛采用的有效手段。

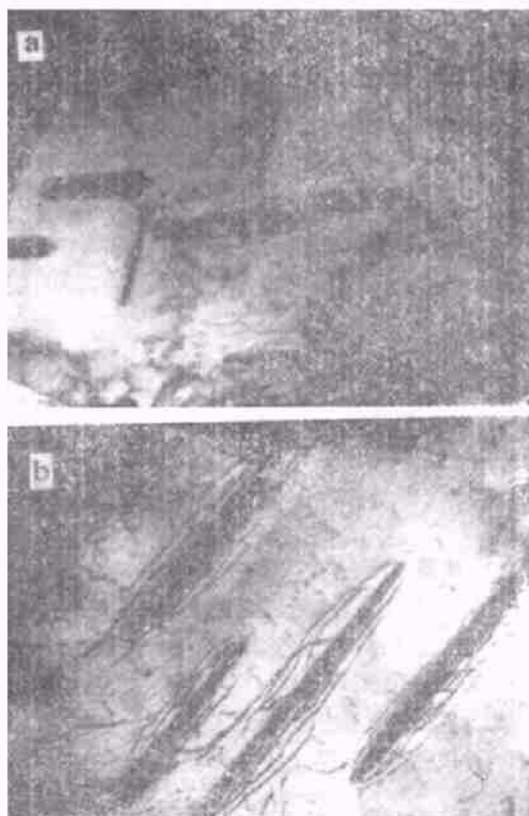


图 1 Ti-0.23wt% H 合金中 Ti-H 化合物 TEM 像 $\times 130000$
(a) 薄区; (b) 厚区

2 冶金工业及其发展与内耗

在建立于原子光谱,中子、电子光学、核能谱及其技术上的大型现代分析研究手段的广泛应用,仍然存在需要、但却难以认识的冶金问题的情形下,提出做了大量研究的机械能耗散谱,40 年代就已成为专门学科的内耗和葛庭燧教授发明的扭摆,能不能发展成为冶金业广泛应用的更有效手段问题,显然是人们要探索的方向之一。这需要看看冶金工业应用内耗的情况。

在日本,内耗已不只是一种研究手段,它的

所有钢铁公司都有内耗实验室，都有先进的内耗设备；而且对于汽车等行业用钢(包括正在发展的无间隙，interstitial free 钢，烤烘硬化，bake hardening 钢等)，内耗已(或正在)成为必须检测的材料指标。因此，在西欧、北美等发达国家，研究直接用于检测实际生产钢材的内耗装置，现已成为颇热门的课题^[3]。值得注意的是，科学家们还积极尝试，把内耗发展成为评定金属材料的腐蚀行为、不可逆疲劳损伤等和测定脆韧转变温度、裂纹扩展速度及分析计算位错密度和残留微观内应力等手段。

早在 40—50 年代，科学家就开始尝试，用内耗研究金属材料中发生的生产上有意义的过程^[4,5]。随着内耗研究的深入和金属材料发展，实际生产金属材料的内耗和具体钢性能的内耗研究越来越活跃^[5-7]。特别是我国完成的“钢铁中稀土合金化的内耗研究”，这是用内耗直接研究解决复杂冶金工程课题的成功尝试。稀土合金化是发展稀土钢的核心问题，早在 70 年前就开始了这方面研究^[8]。但由于稀土元素和铁之间的原子半径差达 35—65%，稀土又极易与钢里的 O、S 等生成化合物；再加上 4f 电子态容易改变，稀土可以呈多种“反应”态；而且稀土原子半径大，因而较难在固相钢铁中扩散等等。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生产工艺相关的一些非平衡状态。因此，研究钢铁中稀土合金化，长期是物理冶金研究上久攻不下的难题。为此，东北大学通过测量加稀土铁及其合金的内耗，演示了稀土对 Snoek 峰、SKK 峰，K ϵ 峰及背景内耗的影响和加稀土产生的“附加峰”和新内耗峰等，从而给出了钢铁中存在固溶稀土的物理证据，揭示了稀土对铁中替代元素 P 的强作用和稀土对间隙元素 C、N 的作用^[6-11]。即由测量内耗给出的弹性能量耗散分立谱和连续谱的信息，“首次以系列材料，从原子尺度上证明了稀土…以固溶状态存在，并为稀土在一般钢中的合金化作用提供了令人信服的理论依据”(工作[9]根据图 2 的内耗结果，给出了 Fe 合金中稀土、P 的图 3 分

布)。稀土钢著名专家陈继志教授，在评论稀土(处理)钢基础研究时特别指出：“内耗结果是有份量的”等等。这些表明，冶金工业及其发展需要内耗。

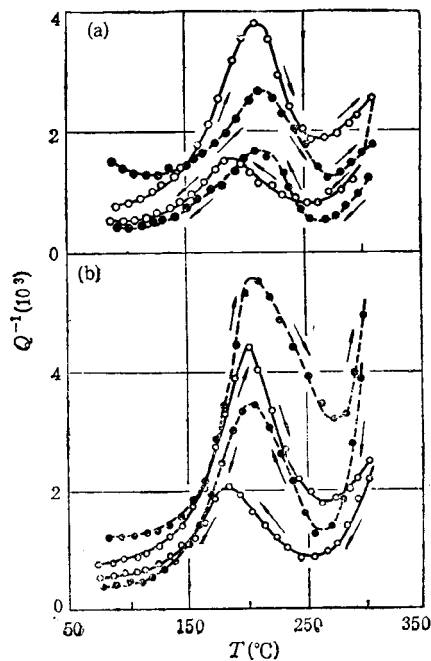


图 2 Fe-P-N—○—, Fe-P-La-N—●— 合金的 SKK 峰

(a) 合金 Fe-0.032% P-N, Fe-0.038% P-0.777% La-N
(b) 合金 Fe-0.064% P-N, Fe-0.062% P-0.722% La-N

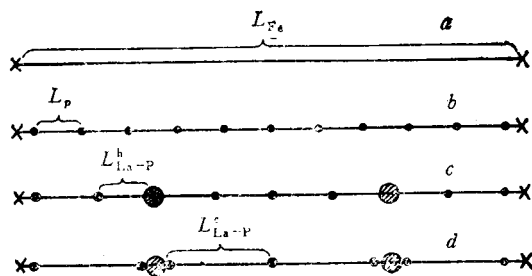


图 3 研究合金位错线上的 La, P 原子分布
—位错线, ×钉扎点 ● P 原子, ○ La 原子
(a) 纯铁, (b) Fe-P 合金, (c, d) 测内耗前后的 Fe-P-La 合金

3 金属内耗研究的近期动态

虽然内耗是宏观物理量，但都直接源于原子尺度的微结构的运动和状态变化；这样，搞清各个内耗现象的机制，往往都需要经过深入的

研究过程。因此, 尽管科学家们很早就开始了内耗实际应用的探索; 但在很长的时期里, 内耗研究还主要是揭示内耗现象及其变化的规律和机制^[12, 13](对于“在固体材料的弹性能量耗散研究上具有悠久传统”的中国以及美国、西欧等, 情况则更是如此)。然而应该看到的是, 由于金属材料及其科学不断发展的需要, 近期的、特别是前苏联、日本等国家的金属内耗研究, 已出现面向冶金实际的发展趋势。这一点, 从分析国际很有影响的刊物——《金属文摘》(Metal Abstracts) 很容易看得出来。

为了准确地反映面越来越宽的涉及金属的内耗文献, 到现在《金属文摘》已经把内耗分成 18 个子目。按文献的题目和它们摘录的内容, 可以把这些子目归纳成以下七个方面: (1) 基本内耗现象及其理论; (2) 冶金的影响; (3) 机械处理影响; (4) 热(处理)效应影响; (5) 电、磁场等场影响; (6) 化学作用影响; (7) 内耗实验技术、设备、方法等等。这些说明, 除基本内耗现象研究外, 有关冶金的、机械的、热、电、磁、基本粒子等物理的和化学的作用或处理影响的研究, 已经在涉及金属的内耗中, 成为独立的、范围广泛的重要部分。

为了了解金属内耗的发展动态, 笔者查阅、分析了《金属文摘》1975—1993 年的钢铁内耗文献。并把查出的不锈钢除外的 380 篇有关钢的内耗研究, 归纳为 12 个部分; 这些部分以及各自包括的文章数目(写在括号里)是: (一) 基本内耗现象(91), 包括内耗谱、普遍性的内耗及其理论(29)、点缺陷内耗(10)、位错内耗(22)、晶界内耗(8)、磁内耗(6)、相变内耗(9)、背景内耗(7); (二) 实际钢、铁基材料内耗(50); (三) 合金化内耗(42); (四) 内耗, 微结构(21); (五) 内耗与微观过程(22); (六) 内耗, 钢铁行为、过程及工艺(46); (七) 内耗, 材料中元素状态的研究(10); (八) 内耗, 材料性能及其本质(56), 其中钢铁的(回火, 高、低温、氢等)脆性(11), 疲劳(6), 强度与强化(6), 塑性(6), “力性”及其它(27); (九) 内耗, 检测、分析手段(18); (十) 内耗, 测量方法(9); (十一) 内耗, 影响因素(9);

(十二) 内耗, 与其它物理量的关系(6)等等。从最近十九年的有关钢铁的内耗研究可以看出: 传统的基本内耗现象研究, 不到 25%; 而有关元素和杂质、产生偏聚的表面与界面、沉淀粒子、形成的相互作用复合体 (formation of interaction complexes) 等微结构的影响, 扩散、偏聚、脱溶、结构不稳定、回复、再结晶、时效、脆-韧转变等微、宏观过程内耗, 以及表面的、机械的、热的、机械-热的、化学的、场的处理等对内耗影响的研究, 则达到 34.7%; 实用钢铁材料的内耗, 用内耗研究钢铁中元素的存在状态, 研究回火脆, 氢脆, 高温与低温脆性、疲劳、强度与塑性、耐磨性及其它性能等材料属性及其本质等工作, 已超过 30%。而且, 在内耗与其它物理量的关系, 影响内耗的诸因素, 内耗测试、特别是它的实用检测手段、方法的研究等, 已受到重视并取得了进展; 以至内耗能够作为钢铁中的溶质含量、韧-脆转变、裂纹扩展、不可逆疲劳损伤、位错密度计算、微观应力分析、腐蚀等分析评定成熟的或尝试性的很有价值的手段! 这些方面的研究, 也已在 11% 以上等等。这就是说, 近 20 年来的钢铁领域的内耗工作, 四分之三是在实用材料, 在它们的属性及其本质, 在材料的微、宏观过程及工艺等材料科学和冶金工程问题上; 而传统的纯基本内耗问题的研究, 还不到四分之一。这些反映了有关冶金方面内耗研究的状况和发展趋势, 表明这是冶金业和滞弹性物理发展的需要; 也预示着冶金和滞弹性物理学存在的发展机会。

4 发展冶金内耗

4.1 依据

葛在“固体内耗的概况和新近发展”一文中引证了 A. S. Nowick 在第八届国际固体内耗与超声衰减学术会议总结发言, “当内耗方法能够应用到基本问题时, 它才是最成功的”^[14]这说明应用对内耗发展的重要性。金属材料由于它的重要性, 使用的广泛性和良好的成形性, 使它成为内耗研究最丰富、最深入、积累最多的领

域;也应该是发展内耗应用首当其冲的领域.显然,任何研究的或实用的金属材料性能都是在具体条件下微结构运动及状态变化的宏观效应或结果.因此研究、搞清材料微结构及其动性,将是了解金属材料属性、进行材料改性或发展新材料及有效使用它们的根本途径.金属材料的内耗,是其内部的点缺陷(包括溶质原子)、线缺陷、面(包括晶界、畴界、相界等)缺陷、体缺陷(包括第二相粒子)以及它们之间的交互作用而具有的吸收其机械能的一种材料属性,是一种信息丰富的谱.而微小的应力就能使内耗源开动的事实又告诉人们,内耗源都是材料里的高能区;因而内耗对结构的、冶金学的、力学的、对热、电、磁等各种因素的影响非常敏感,这使内耗能够成为异常灵敏的探测器.图4所示结果就是一个很好的例证^[15].由图4看出,轻微的手指校正变形竟导致 Fe-1.0wt%Nb-0.1wt% C 合金丝的高度达 7×10^{-2} 的内耗峰完全消失;

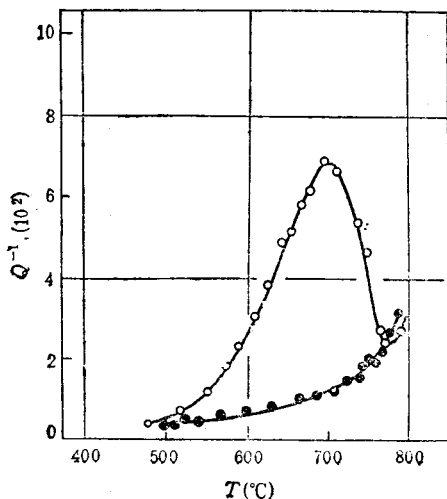


图4 Fe-Nb-C 合金内耗
1.退火试样;2.试样 1#经过手校正

内耗对金属材料显现出这样高的灵敏性,这是其它手段难于达到的.还须指出的是,图2、图3的内耗结果和给出的铁中固溶的稀土、P原子分布,也是其它手段未能、也难能给出的;而且由它们得出的:在第三种元素(稀土)作用的条件下,铁中P能够在300°C以下温度沿位错管道扩散,这是以往尚未认识、甚至是预见不到的.又如,Snoek峰是bcc晶体中间隙溶质最

明确的表征,直至ppm甚至更低浓度,其峰高与 α -Fe中固溶C、N量有可以测量的线性关系;它又和SKK峰有线性关系,而后者对间隙溶质甚至比Snoek峰更灵敏(这是容易理解的),内耗甚至可以探测晶界上ppm量级固溶的C^[16]等等;显然,内耗是研究和测定钢铁里固溶C、N最好的手段.由这些和上面讨论的“冶金工业发展与内耗”及“金属内耗研究的近期动态”等,可以充分说明内耗在冶金业中有重要价值和具有独特的功效.分析金属性能、金属的内耗现象及理论不难得出,能够“探测物质内部分子、原子、声子、电子等存在状态及其运动变化”的内耗装置,是一种将成为冶金上广泛应用的、能够进一步促进金属材料及其科学更好发展的极其难得的有效工具.随着粉末冶金、表面冶金、机械合金化等工艺的出现和发展,即使是单纯从制备金属材料角度看,“冶金”的含义已不只是熔炼或熔态下的过程了.由于研究固态下发生的影响金属性能的过程,在“物理冶金学”里,“冶金”已有更宽的含义.加之下面将要谈到的“研究内容、方向”,“特殊性及普遍性”,宜将这一要进一步发展的有关金属的内耗称做“冶金内耗”(internal friction in metallurgy).

4.2 研究内容、方向

虽然近期冶金内耗的研究增多,也出现在冶金工程课题应用上取得成功的结果;但很多这类工作还很不深入.由于在内耗认识上,存在着“对于一些‘众所周知’的现象……有时有‘向后退了’的感觉”和“旧问题的更新”^[14];内耗的冶金应用,至今仍然还处在探索的阶段.目前,内耗的冶金工业应用还只是开始;除日本外,包括发明Ké氏摆的中国等国家,都还没有进入工业应用的阶段.而且日本在冶金工业用内耗,也只是从-50°C到100°C区域;即使是Snoek峰,其应用也十分有限.从出售的生产钢检测内耗仪提供定C、N量的“设备公式”和用户用这类公式看,目前内耗工业应用尚有盲目性.我们知道,Snoek峰及其高度和间隙溶质量的关系,受材料的晶粒度^[17]、位错密度、

试样取向^[10]、所含(包括间隙)元素及其浓度和相关的组织^[11]以及有外场^[12]等因素很强影响;因此,必须弄清具体条件下上述诸关系,并精心制备适用于特定材料的标准曲线,才能够定出间隙浓度。可见,即使是 Snoek 峰的工业应用,也尚须做深入的工作。根据内耗发展的现状和金属材料及其科学发展的需要,冶金内耗的研究方向和内容可包括:

4.2.1 基础研究

(1) 铁等金属材料弹性能量耗散谱的研究:系统研究、查清铁等金属材料的点、线、面、体缺陷(包括团簇等)及它们相互作用的弹性能量耗散谱及变化规律,建立内耗与材料结构等参量的定量关系,为内耗的冶金工业广泛应用奠定基础。“要任何一个内耗峰有用的话,必须了解它的详细机理”,但目前多数内耗现象的机制尚不清楚或不够清楚,这是迄今限制内耗应用的主要原因。这既是滞弹性物理学(physics of anelasticity)发展自身面临的课题,也是冶金内耗必须解决的主要问题之一。

(2) 内耗与冶金材料属性的研究:包括研究内耗与冶金材料的强、延性等静态及韧性、磨损、疲劳、应力失稳与失效等动态结构属性,内耗与材料腐蚀及高温氧化,内耗与氢脆、回火脆、K 状态等物理冶金中的传统问题,以及内耗与现代冶金材料发展中出现的有深远影响的问题的内在联系及本质等。这是开拓性工作,是通过内耗来发展物理冶金学的主要方面。

(3) 内耗与冶金工艺或物理效应的研究:研究内耗与材料的冶金(包括机械的、表面化学的、合成与复合、热力学和动力学等)工艺、与电(包括离子注入、电场、电流等)、磁(包括磁取向、磁化、磁场等)、光(如激光、红外等)、超声等物理处理的关系。探索材料属性、结构和工艺之间的本质(即物理的)联系;从而为冶金工艺建立物理学基础。

4.2.2 冶金工程问题研究

在冶金内耗的目标中,最终和最主要的目标,是促进金属材料更好地发展。因此,服务于冶金工业发展的需要,密切联系冶金生产实际

和积极吸收和解决冶金企业问题,特别是直接参加那些当前国家建设中的重要冶金工程课题。这是让内耗更好地为国民经济服务,使科学技术更快地转化为生产力和冶金内耗得到迅速发展的重要途径。结合我国冶金工业当前面临的任务和发展计划,可以提出如下冶金工程内耗课题:

(1) 汽车板无间隙(亦可包括烘烤等)钢的内耗研究。无间隙钢是当今国际冶金界瞄准汽车业发展的用钢需要,正在积极发展的钢种,是一项十分活跃的冶金工程课题。显然,可以发展出多种灵敏地测定钢铁中间隙元素的内耗方法,也能建立多种评定“无间隙”的内耗标准,以及确定在何种状态(或组织)下的“无间隙”钢,才具有合乎要求的或最好的性能等等。内耗将是发展 IF 钢的最有效的分析、研究手段。

(2) 硅钢工程的内耗研究。硅钢因工艺复杂和极强的工艺敏感性,被称为冶金工业之粹。而且在同样获得或寻求改善硅钢性能上,热轧硅钢(尽管行将消失)和冷轧硅钢的组织、结构要求,却有明显不同;而 90 年代的纳米晶硅钢的差异则更大。通常前者要靠粗化晶粒来降低铁损;相反晶粒很细的冷轧硅钢、特别是纳米晶硅钢,却有更低的铁损等等。可见,研究搞清工艺、组织、结构、成份与组份等各种因素对硅钢性能影响的本质,将是驾驭硅钢、获得其最佳综合效益的根本途径。从铁内耗谱上明显的宽范围磁效应和滞弹性物理学会得出:融探测材料组织、结构及力学、热、电、磁效应等为一体的内耗,将是实现这个目标的理想工具。

(3) 高温工程材料的内耗研究。高温下金属的晶界是薄弱的;而且,高温合金中的强化相的失稳,往往也是界面问题。此外,微量元素显示出的大幅度提高高温材料的抗氧化和耐热蚀等能力,都是影响微结构(或微量杂质)或界面的结果。从我们描述的界面内耗机制^[14]将会得出,晶界内耗源将同高温材料的性能有密切关系。用内耗研究高温材料性能的本质,将会得到有价值的资料。这是很有意义的研究。

(4) 复合材料及表面冶金的内耗研究。自

70年代以来,复合材料和表面科学迅速发展成为异常活跃的科学课题。前者也是材料研究今后发展的重要方向之一;后者不但取得了许多重要成就,并不断提出各种新课题。例如,在我们较熟悉的表面冶金(包括表面镀、渗、注入及各种表面处理等)中,C、N、RE(稀土)共渗为什么会数倍提高渗层性能?含Ti钢板具有良好的抗搪瓷“鳞爆”性能,是不是因为确有H“陷阱”,那么又是怎样的“陷阱”呢等等;显然,这些都是与表面组分的或表面与母体材料间的微结构及其状态和动性密切相关的课题。此外,这两大类问题里,复合材料的纤维或弥散化合物粒子、或金属间化合物、或陶瓷等与金属基体之间的结合,表面冶金中的表层与母材之间的附着等等,它们即是这些材料和技术中的关键,又都是很明显的界面问题。由此可见,复合材料和表面冶金将是内耗研究的十分重要的领域。

(5) 钢铁中稀土、铈、钒、钛等我国富有元素作用及机理的内耗研究等等。

除了上面这些外,根据冶金部门的具体要求或各个冶金厂的具体情况,还可以列出种种更具体的冶金工程内耗课题,它是内容十分广泛的领域。随着冶金内耗的发展,将会有新的、越来越多的“冶金工程”内耗研究。将会出现:内耗在冶金工业上,在冶金工程课题和金属科学研究上,广泛使用并发挥突出作用的局面。

4.3 特殊性 & 普遍性

从冶金内耗包含的内容可以看出,它和传统的金属内耗(internal friction in metals)或晶体内耗(internal friction in crystalline solids)有明显的差异。后者主要是研究、揭示金属及各种晶体材料的内耗现象和机制。而冶金内耗虽然也包括涉及的内耗现象的变化规律及其机理的研究,但除了这部分研究带有服从应用需要的特点外;研究内耗与材料性能、与制造工艺的关系及其本质和研究冶金工程问题,则是它更主要的内容。而且,它的主要目标不是揭示内耗现象及其本质自身,而是用内耗解决冶金和金属科学问题。在另一方面,冶金内耗的主要研究客体不是较为简单的纯净材料,

而是影响因素甚多的钢、合金等实际材料;要研究的主要课题,也不是纯基础研究的一个个单一问题,而是复杂的实际问题乃至直接的工程课题;而且,将从定性向定量发展等等。这些说明,冶金内耗是和传统的“金属内耗”有质的区别、且难度更大的一种内耗。热力学的平衡状态在自然界是很少的;而且,由于物体运动及相互作用或外界条件的变化,原来的平衡态也将向新的平衡过渡。而绝大部分的实际材料则都处于非平衡状态。因此,状态的变化、失稳是普遍的,这说明除固有的内耗如斯诺克峰(Snoek peak)、甄纳峰(Zener peak)、晶界峰(Kê peak)、磁阻尼(magnetic damping)、相变(phase-transformation)内耗等等外,过程内耗是广泛的。有意义的是,研究和使用的具有希望性能的各种材料,又都是经过不同的工艺处理获得的;因此,内耗来源于或受控于制做工艺是一种普遍现象。冶金内耗是一门把内耗与冶金工程,把滞弹性物理学与冶金学连接起来的、研究普遍自然现象的交叉学科。

发展冶金内耗是金属材料、金属科学和滞弹性物理学发展的需要,它的意义是重大的。而内耗和金属材料发展的历史又告诉我们,这是一项难度很大的任务。因此,这项对我国有特殊意义的工作,须有足够的投入和国家的有力支持。内耗高度灵敏且信息丰富,但它的每一个变化都与材料内的微结构改变或发生了具体的微观和宏观过程决定地相关;这些是内耗必然发展成为重要的科学手段的本质因素,又决定了它的成熟是一个伴随滞弹性物理和材料科学不断深化的过程。认识是无止境的,必然有阶段性;只要掌握和明确分清内耗认识的层次,并恰当地做到在具体意义上的足够清楚,冶金内耗必将一步一步达到它的目标!

参 考 文 献

- [1] 冯端,物理,21(1992),2.
[2] 官波、戴景文、赖祖涵等,待发表
[3] G. Borst, *Steel Res.*, 61-3 (1990), 2.
[4] T. S. Kê (葛庭燧), *Phys. Rev.*, 74 (1948), 914.
[5] L. J. Dijkstra, *Trans. AIME*, 185 (1949), 252.
[6] У. И. Саррак, С. О. Суборова, Г. Н. Грикуров, *ФММ* No. 10 (1992), 182.
[7] В. Г. Строндин, И. А. Варуиш В. И. Юдовский, *ФХОМ* No. 2 (1991), 126.
[8] Gillett H. W. and Mark E. L., *Bur Miner Bull.* 199 (1922), 57.
[9] 戴景文、张国福、赖祖涵等,金属学报,28(1992),A207.
[10] 戴景文、吴玉琴、李广义等,金属学报,27(1991),A408.
[11] 戴景文、耿殿奇、吴玉琴,金属学报,16(1990),A14.
[12] A. S. Nowick and B. S. Berry, *Anelastic Relaxation in Crystalline Solids*, Academic Press, New York and London, 1972.
[13] R. De Batist, *Internal Friction of Structural Defects in Crystalline Solids*, North-Holland Publishing Company, etc, 1972.
[14] 葛庭燧,物理,18(1988),65.
[15] 戴景文、孙玉杰、刘艳美,金属学报,30(1994),A210.
[16] Wang Yenng (王业宁), Zhu Jinsong (朱劲松), *J. de Phys.*, 40 (1981), C5-457.
[17] G. Lagerberg and Ake Josefsson., *Acta Met.*, 3 (1955), 236.
[18] E. W. Kung, *Acta Met.*, 3 (1955), 126.
[19] Y. Yamada. *Trans. ISIJ.*, 16 (1976), 417.
[20] D. B. Fischbach. *Acta Met.*, 10 (1962), 319.

CVD 金刚石膜研究近期进展与应用¹⁾

吕 反 修

(北京科技大学材料科学系,北京 100083)

摘要 简要地总结了 CVD 金刚石膜技术近期研究与开发情况,讨论了金刚石膜工具的热学应用、光学应用及电子学应用的现状、进展及发展趋势。金刚石膜工具的应用是近期具有最大市场的应用。但随着在沉积技术和异质外延技术的进一步突破,金刚石膜光学和电子学应用将比工具应用具有更加光明的市场前景。

关键词 CVD 金刚石膜,进展综述,研究现状与工业应用

Abstract Recent progress in the research and development of CVD diamond film technology is briefly summarised. The present status of fundamental research and commercialisation in the application fields of cutting tools, heat management, optics and electronics are discussed. Tool applications and heat sinks are the largest market at present and in the near future. With further breakthroughs in deposition technology and hetero-epitaxy, applications in diamond film optics and electronics will have an even bright future in the market.

Key words progress, research and commercialisation, CVD diamond films

金刚石无与伦比的硬度尽人皆知,但金刚石所具有的其他极为优异物理化学性质恐怕就鲜为人知了。金刚石(碳)和同族元素硅、锗一样是优良的半导体材料。金刚石禁带宽度为 5.45eV,大于所有已知的半导体材料,此外还具有最高的击穿场强度 (10^6 — 10^7 V·cm⁻¹)、最大的电子饱和速度 (2×10^7 cm·s⁻¹) 和最低的介电常数 (5.66),因此可以用于制作在高温和

强辐射条件下工作的电子器件,或用于高频率、高功率固体微波器件,性能远远优于硅、锗、砷化镓及其他化合物半导体材料。纯净的金刚石电阻率很高 ($>10^{16}$ Ω·cm),但出人预料的是室温热导率却是所有已知物质中最高的 (~ 20 W/cm·K),比铜还高 5 倍!这一性质使

1) 1994 年 12 月 5 日收到初稿,1995 年 3 月 27 日收到修改稿。