

交流科技资料《84》情01号

赴美考察材料磨损报告

李诗卓

访美考察学习报告

万晓景

赴美访问及参加国际低温材料会议的报告

李依依

中国科学院金属研究所

一九八四年二月

赴美考察材料磨损报告

李诗卓

一九八三年四月九日,我得到机会接受联合国工业发展组织(UNIDO)资助,赴美国考察材料磨损及其试验方法,历时半年。在安排考察计划时得悉第四届国际材料磨损会议将在 Washington D.C.召开,因此把参加这次学术会议作为考察的起点。会议后开始对三所大学和四个研究所进行访问,并在 Notre Dame 大学的冶金工程及材料科学系及 Climax Mo Company (Ann Arbor, Michigan) 停留近五个半月。参加了一部份实验研究。这次访问的重点是了解美国一些大学和研究所从事材料磨损研究使用的测试方法,通过与科学家们的交流和阅读资料弄清楚美国在材料磨损领域中关心的问题 and 从事工作的项目。下面分三个部份介绍考察中的见闻及个人的收获和体会

一、第四届国际材料磨损会议简介

国际材料磨损会议是每隔两年召开一次的国际性学术讨论会,这个会议是由美国机械工程学会 (ASME)、材料试验学会 (ASTM)、金属学会 (ASM) 润滑工程学会 (ASLE) 资助的一个跨学科跨行业的交流会,为了推动工作,建立了下列人员为主体的常务委员会,他们是: W.A. Glaeser (Battelle Inst.), K.C. Ludema (Michigan Univ.), A.W. Ruff (N.B.S.), S. Bahadur (Iowa State Univ.), R. Bayer (IBM New York), S.K. Rhee (Bendix, Michigan)。参加本届会议的有美、英、西德、法、瑞典、波兰、日本、荷兰、加拿大、苏联、印度等十几个国家的科学家,计代表二百余人。一九七七年在美国召开了首届会议,一九七九年在 Michigan 州的 Dearborn 市召开第二次会议,一九八一年在 San Francisco 召开第三届会议。

从八一年起我国开始派人参加材料磨损会议。今年参加会议的,除一机部的三人代表团及我院兰州化物所一人外,加上在美进修的三名学者共有七人。会议分为金属磨损、磨损、磨料磨损、陶瓷、聚合物及复合材料、涂层磨损及磨损研究的发展动向等七个部分进行的。全体大会举行半天,分别由美、英、日及西德的四位知名学者代表本国作了磨损研究的发展动向报告。分组会议共三天,由于报告较多,所以每晚七时到十时,均有活动。这次大会上计划宣读的论文 107 篇,这些报告分布如下:

大会邀请报告,关于磨损研究的发展趋势	四篇
金属磨损	二十四篇
陶瓷磨损	十二篇
磨蚀	十一篇
磨料磨损	十二篇

磨料磨损基础研究

八篇

高分子及复合材料

十三篇

涂层磨损

七篇

摩擦学上的新进展

十篇

从这次大会宣读的论文看来, 材料磨损工作在以下四个方面有了较新的研究成果

1、磨料磨损 数学模型的提出及单元过程的研究, 在实验上有较完善的单颗粒试验机及在SEM下对磨损过程进行原位动态观察 (In-situ)。在合金组织结构(碳化物尺寸等)对耐磨性影响和磨屑形貌分析方面都进行了大量实验观测。各国科学家们已经不满足于对某些部件耐磨性能的提高和某些材料耐磨性的评价, 而把更多的精力集中到磨损机理即磨屑脱离母体表面的发生和发展过程以及影响因素的研究上来。这方面比较突出的代表是英国的 M.A. Moore 及西德的 Zum. H. Gahr 教授的研究, 他们的理论在一定程度上得到实验现象的验证。

另外一个令人感兴趣的问题是磨粒的尺寸效应, 主要的注意力集中在了解临界尺寸大小以及对尺寸效应的解释。从粘着磨损到磨料磨损过渡时细微磨粒在其中起重要作用, 即所谓跃变尺寸的确定, 这对于磨料磨损的机理的了解起重要作用。磨料磨损的论文占大会论文的五分之一

2、粘着磨损 发生在干摩擦或边界润滑条件下的滑动摩擦磨损是一种重要的金属磨损形式。本届会议集中在所谓转移层(Transfer layer)的观察上, D.A. Rigney 教授及本届大会主席巴特利研究所的 W.A. Glaeser 合作利用扫描电镜及透射电镜对干摩擦金属表面上形成的转移层以及转移层中出现裂纹和形成磨屑的机制进行了研究。他们认为从“粘着”发展到转移层是滑动磨损的关键过程, 这种观点和 MIT 的 N.P. Suh 教授提出的磨损脱层理论有明显的区别。在磨损的脱层理论中只注意了相对表面在剪切力作用下, 表层及亚表层中位错运动的规律以及磨屑从表面以片状形式脱落的过程。转移层理论除了考虑表面力学因素外还特别关心表面及环境的化学因素, 因此较为全面, 但这方面的研究尚处在实验观察阶段, 还未出现类似磨损脱层理论那样完整的模型和表达式。

3、磨蚀: 这是近年来磨损领域中较引人注意的一个分支, 多年来从事摩擦学研究的科学家们把主要的精力集中在摩擦、磨损及润滑三者的相互作用关系上, 即从传统的机械学的角度进行工作。随着能源的进一步开发和高效利用, 使不少设备和部件在受到流动介质冲刷下出现的早期失效问题日益突出。本届会议关于磨蚀的研究有了较大的发展, 从常温下的单粒冲蚀机理研究到高温下的实验观察, 除一般的金属材料磨蚀外还有陶瓷材料的冲蚀。这些工作的背景大都是煤的气化和液化, 不少实验是直接为合理的选材和决定设计参数而开展的, 比较有代表性的工作是加州大学伯克利分校的劳伦兹实验室, 在 Alan Levy 领导下进行的。他发展了磨蚀中的成片理论 (Platelet) 同时开展氧化磨蚀方面的研究。但是, 塑性材料低攻角下观察到的磨蚀产物在一定程度上证明 Levy 的成片理论不足以解释显微切屑状的磨损产物形成机理。

4、耐磨涂层及复合材料的磨损

本届会议对于耐磨涂层, 以及特殊的复合材料作了较多介绍。

对涂有 TiN, TiN/TiC 的钻头在钻孔过程中出现的磨损以及涂层厚度及工艺对耐磨

性能的影响进行了比较系统的观察,得到的数据证明这种超硬涂层在提高刀具寿命上是十分有效的,在其它方面还有堆焊Fe-Cr-C硬面层、激光熔化添加在铝及钛合金表面上的碳化物硬粒子及不锈钢表面离子注入改善摩擦、磨损性能技术、表面强化处理对防止微动磨损所起的作用和硬面表层对钢磨损、磨蚀及疲劳行为的影响等。

除了传统的钢材及均质的高分子材料外,为达到特定的功能而对碳环氧、玻璃纤维环氧复合材料的耐磨性能、热固塑料为基的短纤维复合材料的磨料磨损及断裂性能,无机填料的硫化橡胶及加填料的聚四氟乙烯磨损都作了报导。粉末冶金的材料如烧结黄铜铝的粉冶制品,碳化物及硬质合金的磨损也有介绍。

二、访问和参观中的见闻

这次访问对三所大学及四个研究所在材料磨损方面从事的工作以及使用的设备作了一般性了解,大体情况如下:

1、Notre Dame 大学冶金工程及材料科学系

在原系主任 N. F. Fiore 教授领导下,得到能源部资助开展磨料磨损机理研究及冲蚀过程的实验观察。为了弄清楚发生在单元过程中的现象, T. H. Kosel 等人设计了单颗粒试验机对高铬白口铸铁及粉末冶金的钴基合金中母体和第二相被钻石棱锥、氧化铝、氧化硅粒子犁削及微切削时表现的行为作过细微观察。更进一步设计和制造了在 SEM 下进行磨损原位观察的装置,他们明确指出钻石棱锥和实际磨粒(氧化铝、氧化硅)对材料表面造成的损坏是不同的。硬粒子相在磨粒磨损中的行为以及工程材料中耐磨碳化物的体积百分率对相对耐磨性的影响都进行过实验,有关的论文已陆续发表在公开杂志上。

另一项关于冲蚀机理的研究是以纯镍、铁素体不锈钢为对象开展的。在 $180\mu\text{m Al}_2\text{O}_3$ 冲蚀下,不同攻角时产生冲蚀的机理是不相同的,经过细心的操作,收集了不同攻角下的冲蚀磨屑用 SEM 观察形貌。他们认为 Alan Levy 的成片脱落的挤压—锻造理论,是不全面的,在 20° 攻角时观察到一定数量的微切削型磨屑,它带有明显的卷曲形状或出现明显的剪切带特征。这些结果正整理成论文,我国浙江大学一名进修学者参加了这项试验。

2、OSU 冶金系

D. A. Rigney 教授领导下的金属磨损研究组,主要从事于摩擦状态下发生在摩擦界面及近表层的组织结构变化工作。他们的研究集中在转移层的形成以及磨损的发生与转移层的关系方面。主要的研究手段是 TEM 及 SEM。为了弄清环境对材料磨损的影响,在实验室安装了一台真空针盘试验机 和带小环境室的环块磨损试验机。工作的初始阶段是以铜镍摩擦付为对象,对粘着,转移层出现,裂纹萌生以及磨屑形成的过程作过细致观察,目前已开始不锈钢转移层的研究。和著名的磨损脱层理论不同的是 D. A. Rigney 教授提出转移层的出现不仅和摩擦付的材料以及相对运动表面的受力情况有关,而且必须考虑化学因素,磨损的出现与转移层的剥离有关。

3、Battelle 研究所摩擦学及疲劳研究组

这是一个在材料科学及工程研究上很著名的研究单位,它的课题来源中有不少涉及军方的计划,因此不公开向参观人员介绍所从事的工作,只让我们对设备作一般性了解。除了常用的环块试验机,干砂橡胶轮磨料磨损试验机等典型设备外,他们还有一台可供

弹流润滑以及油膜厚度测量的滚子试验机,一台由拉力试验机改造而成的模拟单缸机对缸套活塞环磨损以及油膜厚度测定的类似台架的设备。该实验室内也有一台能用SEM作原位观察的针盘式磨损试验机,以及一些煤粉碎设备(实验室用的)和利用表面形貌

仪测量磨损的设备。由于设备齐全所以该单位承担了各类型的磨损课题,但其研究重点仍然是摩擦学中受到注意的带润滑的工作条件而不是磨料磨损。

4. Climax Molybdenum Company 研究所:

这个研究所仅有120名工作人员,主要从事钼的综合利用,其中以在钢、铁中加钼以提高其耐磨和耐腐蚀性能为主。因此在这个单位的磨料磨损测试方面研究占了很重要的地位,他们共发展了三个较标准的测试方法(针样对砂布带、湿砂磨损、凿损-磨式破碎机),在建立标准方法的同时他们对铬-钼钢和白口铸铁进行了大量研究,包括耐磨性能与组织结构关系的研究。在磨损方法的研究上他们注意方法的重复性和模拟性,把从试验机上得到的磨损数据和现场取得的实际效果对比,最后向美国材料试验协会推荐这些方法。Climax公司的工作偏重于应用研究,注意数据的积累以及标准化,为此他们规定了两种标准钢材(高耐磨性及低耐磨性)在每次试验中都带上这种样品,并以它的数据为准对各次取得的结果进行校正,以求在同一标准上对比各种材料,数据的处理均用计算机进行。

5. Cabot Corp

这是一家从事镍钴基合金的研究所和工厂。为了推广其产品,他们的工作主要是围绕对耐磨性能的评价进行的。考虑到镍、钴合金的价格高而影响到它们的应用,故该研究所内重点发展了粉末冶金及堆焊工艺,并在石油化工阀门及蒸汽轮机叶片导缘的易冲蚀部分堆焊钴-铬-钨合金,这样便可以用少量的高价优质材料达到提高部件使用寿命目的。为了评价这些表面硬化层的耐磨性,他们建立了一套超音气蚀-冲蚀联合作用的设备,在纯水介质中进行实验。此外还有测定擦伤的小型试验设备和磨损实验室中常见的橡胶轮试验机、针盘磨损机、环块磨损机及干砂冲蚀试验机。通过对各种成分钴基合金耐磨性能的测试他们总结了钴在合金抗磨性上所起作用,并撰写成论文。

6. Lawrence Lab

加州 Berkeley 分校的 Lawrence Lab 是一所由数千人组成的著名科研单位。由于时间关系只访问了该实验室中分子及材料科学分部内由 Alan Levy 博士领导下从事冲蚀研究的小组,他们虽然从事了多年冲蚀机理研究,但主要工作背景仍然是煤的汽化、液化中材料损坏及其防止。为此,在该室的主持下召开过两次煤汽化液化中材料的磨损及腐蚀问题的学术讨论会,并出版了专刊。在发展冲蚀成片理论的同时 Alan Levy 还领导一个氧化-冲蚀交互作用的研究课题,被研究的对象是镍基高温合金,温度从室温到 920°C。在 Al_2O_3 粒子的冲蚀后用 SEM 观察氧化皮及冲蚀痕的形貌并测量深度,我所满永发同志参加这项研究,工作正进行中。

在该实验室内还有一台油-煤混合输送中出现冲蚀的小型台架,可以测定管道及泵的冲蚀,并进行一些材料耐磨性能的评价工作。

整个参观中我见到或自己动手操作过的磨损试验机计有以下几种:

环块式摩擦磨损试验机 (改型的 Timken 机)
干砂冲蚀试验机 (室温-920°C, 0-60 M/sec)
气蚀-冲蚀试验机 (超音, 1 KW)
针盘试验机 (SEM 下及真空中)
接触疲劳试验机 (对辊、三辊式)
缸套活塞环试验设备
高应力凿损 (gouging) 试验机

擦伤试验机 (galling)
单点划痕试验机
干砂橡胶轮磨料磨损机
湿砂橡胶轮试验机 (Fargo)
针-砂带磨粒磨损试验机
交叉柱摩擦磨损试验机
腭式凿损机 (jaw crusher)

三、收获和体会

1、美国材料磨损研究的现状

参加第四届国际材料磨损会议和参观访问四个研究单位及三所大学后, 对美国材料磨损研究方面的现状仅窥其一斑, 因此只能从个人收获和体会的角度出发谈谈对美国材料磨损研究的一些看法。

这次材料磨损会议中宣读的论文仍以金属磨损为主, 其次是高聚材料, 陶瓷材料及耐磨涂层, 在各类磨损中磨料磨损及其基础的研究占首位。人们普遍关心的问题是材料的磨损机理及对耐磨性的评价, 但材料耐磨性是材料在一定使用条件下表现出来的系统参数, 它不是材料的固有性能, 因此评定耐磨性的方法在一定程度上将根据材料应用的环境而定。

①、材料耐磨性能及其评价方法

在美国各磨损实验室中使用的方法大体可以分为三种类型:

(i) “标准方法”即 ASTM 规定的实验室用标准, 如类似于 Timken 环块试验机、样品尺寸较小的 Falex 摩擦磨损试验机, 干砂橡胶轮磨料磨损试验机。在这些设备上可以进行耐磨试验, 但为了得到可与其它实验室相比较的数据, 还必须遵循一套试验方法, 按这种方法得到的数据具有足够的稳定性, 因此可以作为材料研制单位筛选使用。

在形成标准方法之前大都由从事磨损实验研究的科技人员充分了解设备性能, 影响设备操作稳定性的各项因素, 并选择一种组织均匀的标样在不同的实验室内以同样的方法测定数据, 经过定期交流和讨论修正和统一后再向 ASTM 推荐。

Climax 钼公司在七十年代初曾建立了一台针-砂布带磨料磨损试验机, 他们反复选择试验参数, 最后确定以石榴石 (Garnet) 砂布为软磨料, Al_2O_3 为硬磨料在样品直径为 6.35 mm, 负载为 15 磅下试验, 以每分钟 20 转自转并在砂布带来回运行 28 次 (共行 488.25 吋) 的失重为其耐磨的标志。另一台湿砂橡胶轮磨料磨损试验机亦在该实验室内作过系统研究最后确定了一种评定材料耐磨性的方法。这些试验都写成专门报告由 ASTM 推荐, 并被该会以 STP 报告发表

这些试验方法在实践中不断完善, 最后将会成为 ASTM 的标准。例如: 模拟矿山球磨破碎一类磨损-凿损 (gouging) 的腭式破碎机, 在 Climax 公司已经使用了近十年并积累了大量数据, ESCO 公司在此基础上改进设备把原来的单定板-单动板的试样配对改为双定板-双动板, 这样在一次试验中就可以取得多一倍的数据。在我访美后期便参加了 Climax 公司按 ESCO 公司图纸加工的另一台腭式破碎机型的凿损试验设备的“标准”方法试验, 先按照公司中沿用的内部标准方法以破碎约 1 吨矿石造成腭板磨损

为计算耐磨性的依据，以标样与试样失重比为准，要求重复性在 3% 以内。在破碎矿石实验过程中严格规定了运行时间，卸料口间隙及其调节办法等，遗憾的是在我离开该公司时，仍未达到期望的重复性指标。

在建立标准试验方法时除了对方法本身的稳定性给予关注外，另一个问题是方法的模拟性。为此科学家们除了从实验室内积累大量数据外还将被试验过的材料送到有关的现场进行考核，在长时间的运行中收集数据，将现场数据和实验室数据进行比较，求出其对应关系。以 Climax 的湿砂磨损试验机，针样磨料磨损试验机而言，分别在砂浆泵球磨机上找到对应关系，证实了这种试验方法的模拟性。因此利用这类试验机及选定的试验方法在一定条件下评价出的材料耐磨性对相应的使用条件是可靠的。

(ii)、专用设备 为研究某些问题而建立的专用试验机

除了由公司定型生产并已形成标准试验方法的通用设备外，为了研究某些发生在磨损过程中的基本规律，在各大学及国家研究所内还设计了一些特殊磨损设备。较有代表性的是单颗粒试验机、SEM 下原位观测用的针盘试验机、真空或保护气氛下的针盘机及高温下的冲蚀设备等。这类设备主要用于磨损机理的研究，其试验方法也因条件而异。有些设备也可以用来评定一些材料和耐磨工艺。为了弄清楚发生在磨粒磨损中的单元过程，科学家们设计和制造了划痕式的单颗粒试验机，这种设备亦可以用来对气相沉积超硬膜一如氮化钛（主要用于刀具上以提高其使用寿命）与底材的结合情况进行评价。在 ASTM 的倡议下，1979 年前后曾召开过专门的会议讨论涂层耐磨性的评价及涂层与底材结合强度测定问题，均有专刊出版（ASTM-STP640）。在 Notre Dame 大学进修期间我曾就这一问题进行试验，利用该校的单颗粒试验机在变动法向载荷下多划划痕，并在 SEM 下测定超硬层在划痕中发生断裂的情况和它能承受的临界负荷值，研究涂层厚度与临界载荷之间的关系。最后对超硬层与底材结合情况作了定量评价。

(iii) 台架性试验—为特定的工程项目建立的专用设备

实验室内通用的磨损试验机往往是一些典型设备，它只能在个别参数（如负荷，运动方式、速度等）上达到使用条件下的数值，不可能对材料在实际使用中遇到的各种变化作出全面甚至几个参数的模拟。为了满足某些工程项目设计和选材的需要不得不开展一些台架试验。这次访问过程中曾见到过几种小型台架，如 Battelle 研究所内关于缸套活塞环试验设备、Ford 汽车公司研究所内的轴承试验台、Lawrence Lab. 中见到的煤油混合输送系统对管道及泵过流部件造成冲蚀的小型台架、Climax 公司中的小 磨式破碎磨损测定设备在一定程度上也带有台架试验性质。试验所涉及的规模和现场十分近似，只不过尺寸缩小，这些试验设备大都设置在研究所内，它们有明确的任务背景。如果实验操作涉及的面广一些，则取得的数据更符合实际使用条件，这是解决生产实际中出现磨损问题，即合理设计、选材必不可少的一类设备。

应该指出的是在美国的一些实验室中使用的试验机偏重于小型，和一机多用、或一次试验中尽可能多地得到实验数据。一般的摩擦磨损试验机都附有摩擦系数及磨损时温度变化的测定装置，对运转速度、载荷范围均可按要求选择。数据的积累和处理都使用计算机（主要是微型机）。除了进行磨损试验，他们十分注意对磨痕及磨屑进行形貌和成份分析，因此广泛采用电子光学表面分析仪器，不少磨损研究有专用的 SEM 或 STEM

X—光衍射仪、图象分析仪甚至 Auger 能谱仪。

②、材料磨损机理研究中的几个引人注意的问题

除了在第四届国际材料磨损学术会议上介绍的一些论文外，通过参观访问及阅读有关资料，提出以下几个方面的问题供进一步探索。多年来从事材料研究的科技人员都希望能在材料组织结构、机械及物理性能与其耐磨性能之间建立一定联系，首先想到的是材料的硬度和多相合金中硬粒子相（主要是碳化物）的影响，对这个问题进行了较系统的实验观测，从宏观的统计到单元磨料作用下软母体及硬粒子相对几种典型磨粒型削、切削作用下的表现。在承受冲击载荷的部件上除了材料的硬度外，它的韧性也是一项十分重要的指标。Climax 公司研究白口铸铁耐磨性时一方面用他们自己研制的两种磨损试验机测定碳化物含量，分布与耐磨性能的关系，另一方面测定铸铁的断裂韧性。通过实验证明白口铸铁中大块碳化物的体积是一个十分重要的显微结构参数，断裂韧性以及耐磨性受大块碳化物的强烈影响，最佳耐磨性及断裂韧性是在碳化物体积为 $7-45\%$ 之内。断裂韧性及耐磨性的乘积对于比较不同的组织时是一个有用的参数。这方面的研究正向建立数学表达式的方向努力。

磨粒磨损中另一个引人注目的问题是磨粒尺寸、形状及品种对材料耐磨性的影响。人们早就发现在针—砂纸盘以及干砂冲蚀试验中磨粒的尺寸效应，而且对这种彼此相似的效应提出过十多种解释。有人还从单颗粒划痕的角度根据磨粒顶尖的曲率变化计算出粒子尺寸影响的表达式。值得注意的是磨粒尺寸对金属磨损的影响存在三个区域：

a. 磨粒尺寸大于临界尺寸时磨损率几乎不随尺寸变化；b. 磨粒尺寸小于临界尺寸而大于跃变尺寸时，随其尺寸的减小而磨损率下降；c. 磨粒尺寸小于跃变尺寸时磨损率高，但磨屑呈大块片状，此时主要是粘着磨损。这方面的研究主要是在纯金属或单相均质材料上进行的，近年来人们已注意到一些多相的工程材料或复合材料。使用的磨损试验机除了针盘（砂布）及冲蚀设备外，还使用干砂及湿砂橡胶轮设备。我在 T.H. Kosel 教授的建议下，利用这次访问，从事了 Al_2O_3 、 SiO_2 两种磨粒，在 $20\ \mu m$ 到 $400\ \mu m$ 范围内对两种钴—铬—钨双相合金耐磨性能影响的实验观察，得到一些反常的效应。虽然对磨痕作了较系统的形貌观察（SEM），但定性的描述难以解释出定量耐磨试验中测得的反常效应。这方面的研究日益受到从事磨料磨损科技人员的重视。

表面处理提高材料耐磨性是深受注意的一个领域，近年来文献记载的在磨损研究一些重要领域的相对比重及发展趋势上表面处理一直处于首位或第二位。表面处理工艺除了工业上已广泛应用的表面淬火，通过化学热处理得到的各种渗层技术外，受人注意的新工艺有离子注入、表面激光处理（熔合金层）和正在机械加工行业中推广应用的汽相沉积超硬涂层。这种带有涂层的刀具在美国已经有商品上市，为了弄清楚超硬涂层在提高刀具寿命上所起的作用，科学家们测定了发生在切削过程中涂层与其被加工的材料摩擦系数和粘着行为，分析了发生在刀具各部位可能出现的磨损类型，即粘着磨损、磨粒磨损、扩散磨损、氧化磨损等。已经得到的结果说明由于超硬的碳化物或氮化物膜层在高温下较稳定，而且与钢材有较低摩擦系数和较高的抗粘着能力，因此，切削过程中抑制了一部分粘着磨损和减少了刀刃部分因摩擦而产生的高温，从而使氧化磨损及扩散磨损得到改善。目前一些私人公司正发展各种复合的超硬涂层及以物理气相沉积为主的

低温沉积工艺。配合这些新工艺开展了耐磨试验和磨损机理研究。这类涂层的工艺一般是各公司的专利,很难得到详细情况,但从磨损机理的研究上各研究所或大学开展的工作及其报导中仍可了解到一些动向。

2、美国在材料磨损研究方面的课题组织及分工情况

组织美国材料磨损研究的重要部门,大体可以分为政府的和私人的两大类,以军方、能源部、科学基金会为首的单位每年均对各大学及研究所投资数百万美元,组织一些机理性科研项目。以能源部为例(DOE)它投资于能源开发和利用上出现材料磨损问题研究,如煤的汽化、液化中遇到的冲蚀问题、矿石开采中出现的磨料磨损等。以这类问题为背景要求各大学开展一些机理研究,这些项目的成果是以研究论文形式表现出来,近期内一般不会在生产上出现直接的增产节约效果。因此,教授学者们把主要的精力放在规律性的探索,而不是针对某一特定部件或材料的耐磨性提出具体的解决办法。但是这类应用基础研究对于发展材料磨损理论和研制新的耐磨材料和工艺是不可缺少的。

另一类对发展耐磨材料及工艺起重要推动作用的是生产实际中提出的课题,其中包括军方为解决其具体问题而制定的科研项目计划,有不少来源于市场需要。以汽车工业称著的美国,在提高其产品竞争能力、减少油耗方面进行的研究工作不少就直接涉及到材料磨损。如对轴承性能的评价、缸套活塞环的磨损、以及油膜厚度的测定等均进行专门研究,并为设计部门提供计算程序和选材依据。这类研究主要集中在公司的研究所内,它们的注意力首先是测试方法的可靠性及模拟性,而不仅着眼于新现象的观察和机理的追求,因为只有在大量试验的基础上积累数据才有可能为实际问题提供必要的条件,因此投资是较多的。其研究成果除了撰写的技术报告外,主要是为设计和制造新耐磨部件提供材料、工艺以及设计依据。

一些大型的研究所除了从事实际问题的解决外亦关心机理性研究,他们往往根据研究人员的专长分工对磨损中的某一领域进行深入探索,形成自己的特点。并通过举行专业性学术会议提高其学术地位和扩大影响,以便承担国家更多的科研课题。但小型公司所属的研究所主要为本公司产品的推销和发展服务,例如 Cabot 公司的研究就紧紧围绕 Co、Ni 基合金制品及其硬面材料和工艺从事磨损试验, Climax 公司则把重点放在 Mo 的开发和利用上,并发展出著名的 Cr—Mo 系铸钢及铸铁。这些工作在生产中得到应用的原因不能不联系到他们从事的一些应用性和开发性研究。

访美考察学习报告

万晓景

一、概况

由联合国工业发展署资助派我赴美考察学习半年

考察时间：1983年3月16日～1983年9月30日

考察领域：金属与合金的氢脆（金属中氢）

考察目的：

- 1）、学习了解金属氢脆研究的最新成就，考察研究方向，和新的实验技术。
- 2）、了解金属氢脆研究如何与国民经济相联系，并考察科学研究的一般方法与规律。
- 3）、提出建议：如何促进我们金属氢脆研究赶上世界先进水平。

考察内容：

- 1）、在美国Minnesota 大学腐蚀中心考察学习 3月16日～8月14日除一般考察学习外，集中时间做一件氢脆的研究工作。
- 2）、按原定计划在美国几个主要大学作短期考察，了解金属氢脆研究的一般情况。考察的单位和接待人有芝加哥西北大学 Meshii 教授；匹兹堡Carnegie-Mellon 大学I.M. Bernstein, A.W. Thompson 及J.C. Williams 教授；费城宾州大学Mc Mahon 和 Laird 教授，共为期一个月，8月28日～9月27日。
- 3）、参加在洛杉矶召开的第五届液态金属与非晶态国际会议，8月14日～8月20日，
- 4）、修改并补充研究生课程“合金热力学”的教学内容。

二、研究工作

在明尼苏达大学化工与材料科学系的腐蚀中心与R.A. Oriani教授及Gerberich 教授进行了为期约五个月的研究工作及一般考察。参加了两个研究组（腐蚀研究组及疲劳研究组）的一切学术活动。为了使考察工作更加深入，在两位教授的共同组织下进行了氢对Ti-30Mo合金力学性能影响的研究工作，由于时间过短工作没有完全结束。选择这项课题是出于以下一些考虑：Oriani 教授是氢脆理论中晶格脆性理论的提出者，想通过Ti-30Mo合金深入探讨晶格脆性理论的实验证明；其次是Gerberich教授正在全面系统地研究Ti-30Mo合金的性能。Ti-30Mo是一种具有较好抗腐蚀性能的合金，目前用在化工石油工业上，近来又把这种材料用作放射性废料的永久贮存容器。因此进行Ti-30Mo合金氢脆研究不仅具有理论意义，而且有实际工业应用价值。

课题主要研究结果如下:

- a. X光衍射结果表明, 溶解状态的氢增加 Ti—30Mo 合金的点阵常数, 点阵常数正比于氢的浓度 (原子%), 由点阵常数与氢浓度关系的直线斜率可算得 H 在合金中的偏克分子体积为 $1.247 \text{ cm}^3/\text{mole}$
- b. 拉伸结果表明 H 对 Ti—30Mo 合金的屈服强度无影响, 但严重降低合金的延伸率, 实验表明 H 能降低合金的弹性模量, 而弹性模量 E 与 H 浓度的平方根成直线关系。
- c. 用改变形变速率的方法研究了氢与位错的交互作用, 结果表明 Ti—30Mo β 钛合金对形变速率十分敏感, 形变速率敏感系数 m^* 随 H 浓度增加而增加, 表明 H 促进位错运动使之产生软化。
- d. 对充 H 的 Ti—15Mo 样品的离子探针研究结果表明, H 使 Ti—15Mo 样品二次离子流强度增加, 表明 H 降低原子间结合力, 这与 H 降低合金的弹性模量 E 是一致的。上述结果可作为晶格脆性理论的一个实验证明。

三、访问考察中还参加了洛杉矶液态金属与非晶态国际会议。代表中国科学院金属研究所参加了在洛杉矶召开的第五届国际液态金属及非晶态会议, 在会上作了两篇学术报告 (Poster Presentation) “Fe—Mn, Fe—S 液态金属表面成分研究” 及 “无定型硒晶化过程动力学研究” 非晶态金属是近十年来蓬勃发展起来的新材料领域, 非晶态材料具有高的抗腐蚀、低磁损、高韧性及良好的电学性能, 近年来美国日本已开始将非晶态材料用在 20 KVA 变压器的磁心及其它磁性材料上, 据说其磁损比一般变压器钢低 40%。

在会上共宣读了 300 篇报告, 有机会与很多名流学者交谈讨论, 收获很大。最感兴趣的是: 高压下金属与非金属转换、用 X 光漫散射、中子衍射、穆斯鲍尔谱仪等研究非晶态及液态金属的结构, 以及非晶态金属电子结构的电子计算机模拟计算、液态金属合金热力学等。基本了解了国际上在这一领域中的研究概况, 已向有关部门提出了如何加强这方面的研究工作的建议 (略)。

四、氢脆研究的几个侧面

考察四所大学金属氢脆的情况, 分几个方面综述如下,

1、氢陷阱理论:

氢在不同金属及合金中的陷阱理论对了解材料的氢损伤是十分重要的, 大量研究结果已经表明形成某些氢陷阱会降低材料的氢脆敏感性。氢与缺陷的交互作用可形成不同类型的氢陷阱。这些缺陷包括点缺陷 (溶质原子、空位等) 位错、界面 (晶界、裂纹)、体积缺陷 (空洞、第二沉淀相等)。我国大量生产实践证明, 重轨钢中加入稀土元素可减少白点; 攀钢产品中一般残留少量 Ti、V 等活性元素, 经验证明这种钢也不发生白点。但是至今对这些钢中残留少量 V、Ti、Nb、Re 等活性元素为什么能降低氢脆敏感性所知甚少, 因此研究这方面的理论对实践是十分有意义的。

考察的几所大学如 Minnesota 大学、Carnegie Mellon 大学、西北大学、及宾州大学等都在大力研究这方面的问题, 采用的方法都是电解渗氢或气体渗氢法, 采用具有不同陷阱的样品, 测定氢的扩散系数来了解氢在金属中的运动。例如 Carnegie—Mellon 大学采用纯 Fe 单晶体或甚至工业用钢, 在渗氢同时加拉伸应力, 来了解氢与位

错的交互作用,证明当应力超过屈服强度时, H渗透通量连续下降,表明位错对氢具有陷阱作用,试验还表明位错确实可带动氢原子运动,并可测出位错的运动的实际速度。

又如 Carnegie—Mellon 大学某些研究者在平均缺陷浓度相同的情况下,用不同变形量来改变位错密度,从而测定 H 扩散系数的变化,并由此求出氢与位错的结合能。在相同位错密度的情况下采用不同密度的样品测定氢的扩散系数,从而求出氢与空洞的交互作用能。这些研究的共同特点是在制造样品上下功夫,在相同的条件下改变一种缺陷的数量,然后测定由这种缺陷浓度的变化所引起氢扩散系数的变化,由此可深入了解氢与这种缺陷的交互作用。

铁及钢中的第二相例如碳化物或夹杂物也是一种特殊类型的氢陷阱场所, Carnegie-Mellon 大学及西北大学正在大力研究碳化物的形态与分布对氢陷阱性质的影响,某些活性元素的碳化物,例如 TiC, 是一种最好的不可逆陷阱,它能减缓氢脆敏感性,但是 TiC 的分布与颗粒大小起着决定性作用,因此采用不同固溶时效热处理制度,将明显改变碳化物颗粒大小及分布从而改变氢陷阱的性质,实验表明其减缓氢脆敏感性的效果确与热处理制度有关。上述工作对我国的生产实践及科研方向具有参考价值。可能的研究课题如下:

(a)、氢在纯 Fe、纯 Nb 纯 Ti 中与缺陷的交互作用,氢与位错、孔洞、及其他间隙原子的交互作用。

(b)、氢与 Fe 中或钢中第二相的交互作用,氢与 Ti, V, Nb, RE 元素碳化物的交互作用。

(c)、典型工程用钢中加 Ti, V 或 RE 元素,研究不同热处理制度对上述元素碳化物形状、大小及分布的影响,及对氢陷阱性质及氢脆敏感性的影响。

2)、氢脆机构的研究

到目前为止至少存在四种氢脆机理,这就是晶格脆性理论,高压氢理论,氢降低表面能理论及氢化物理论,在这些理论中由 Oriani 教授提出的晶格脆性理论已获得较大进展并得到某些实验的支持。按照这一理论,溶解或吸附状态的氢将降低金属原子间的结合力,也就是在外力作用下将降低金属的断裂强度,因此在一定应力强度因子下,在氢气氛中存在一个临界氢压力,低于此压力,裂纹不能扩展,高于此压力裂纹将开动。临界氢压力与临界应力强度因子 K_{Th} 的关系已由实验所证实,这是晶格脆性理论的一方面证明。液态金属对某些金属及高强钢的脆化作用在某种程度上是晶格脆性理论的另一表现,这就是液态金属吸附在裂纹表面时降低了被脆化金属的原子间结合力。例如一个带裂纹的试样在某些液态金属的作用下将吸附在裂纹表面,降低了原子间结合力,因此裂纹扩展所需的应力强度因子 K_{Th} 将降低,不存在液态金属作用时所需的应力强度因子,因此研究液态金属中某一组元的活度 a_m 与裂纹开始扩展的应力强度因子 K_{Th} 之间的关系和气体氢压力与临界应力强度因子 K_{Th} 之间的关系是一样的。获得 $a_m \sim K_{Th}$ 关系将对晶格脆性理论的完善大大前进了一步,其理论意义是显而易见的。

以上只是概念设计,尚未有任何人做过试验,试验可采用某一液态合金,用改变组元浓度的方法来获得不同活度 a_m ,然后打开有裂纹并加载的 WOL 试样放入液态合金中,载荷大小由裂纹张开位移 COD 而求得,在恒位移下裂纹将扩展至某一临界 K_{Th} ,此

时裂纹停止扩展，于是即可得到 $\alpha_M \sim K_{Th}$ 曲线。

上述理论研究不仅可解决液态金属的脆化机理，还可使晶格脆性理论进一步深化及完善。

晶格脆性理论的另一面研究是从原子间结合力的变化而进行的。金属的弹性模量大小是原子间结合力的一个重要参数。不少人研究金属或合金在充氢前后弹性模量的变化从而推测原子间结合力的变化。例如有人研究 H 对 Ti-18Mo β 钛合金弹性模量的影响，结果表明 H 确实降低了合金的弹性模量，但这种降低是否确系 H 降低了原子间结合力所引起，还是由于充氢改变了合金内部缺陷状态及位错组态，从而使应力得到松弛，目前尚无定论。此外除了上述影响外，氢还可能影响合金相的稳定性，在钛合金中氢是 β 稳定元素，由于氢的存在可能对抑制 ω 相的形成有重要作用，这些都可能直接影响弹性模量。

3)、氢与金属中杂质原子的交互作用

氢的晶格脆性理论的深化必然牵涉到晶界脆化，很多高强钢在氢气氛下的所谓环境氢脆，其断口特征都是沿晶断裂。宾州大学 McMahon 学派正在大力研究高强钢中氢与某些杂质元素 (P, S, Sb, Sn) 等的交互作用。大量研究结果表明，高强钢在 H_2 气氛中产生沿晶断裂（此时的断裂强度即等于晶界强度），这是氢弱化晶界的直接证明，当高强钢中含有某些杂质元素如 P, S, Sb, Sn 时，它也将一定在热处理条件下在晶界析出，也弱化了晶界。结果表明杂质元素脆化晶界的能力与氢弱化晶界是互相叠加的，而且是互相独立的，试验还表明杂质元素在晶界的析出与钢中 Mn, Si 的含量有关，还与热处理制度有关。在相同 P, S 含量情况下含 Mn, Si 高的合金钢，Mn, Si 可促使杂质元素 P, S 在晶界沉淀，增加了脆化效果，其裂纹开始扩展临界应力强度因子 K_{Th} 随 Mn, Si 含量的增加而下降，而 Mn, Si 低的合金钢在相同 H_2 气氛下其 K_{Th} 大大升高。西北大学 Meshii 教授也在进行类似的氢与杂质元素 S 的交互作用，研究在 H_2 气氛下不同固溶温度对含 S 纯 Fe 晶界强度的影响，随着固溶温度的升高，降低 S 在晶界的偏聚量，可增加晶界强度，获得了相同的结论：即氢与硫都弱化晶界，它们脆化晶界的效果是互相独立的也是相互叠加的。

上述研究工作不仅有理论意义，而且有实用价值，即不能孤立地研究钢的氢脆，而必须研究氢的脆化作用的同时研究钢中其它杂质元素 P, S, Sn, Sb 等的脆化作用，因为这些杂质元素在钢中或多或少存在的。

五、体会与建议

这次在美国考察了五所大学共半年时间，除一般考察及研究工作外，经常参加他们的学术活动，参加课题组会议，与很多教授、博士及研究生接触，了解各方面情况主要体会如下：

1、金属与合金的氢脆研究十分普遍研究思想活跃，这方面的学术会议也十分频繁，表明美国政府、研究机构及企业对这个领域是很重视的，在这方面的投资也很大。研究课题的来源大都来自企业，因此，其背景是十分明确的，课题一经下达，研究工作的深度及广度并不受课题背景的限制，例如 Ohio 石油公司下达给 Oriani 教授的任务为解决石油用钢的氢脆及腐蚀问题，但仔细看一看他们的工作内容，大部分偏重

在理论研究。研究氢脆机理，晶格脆性理论，疲劳裂纹的形成及扩展机理等。另外氢脆研究的普遍性的印象十分深刻，凡是有冶金材料科学系的大学，几乎没有例外地都开展这方面的研究，彼此各有特点，从不同角度来研究，看到他们彼此重复现象也是很多的，但他们认为表面看起来有些重复，但当工作深入后就会显示出不同特点。所以不必过份担心重复问题，但要防止低水平的重复。

2)、我们与他们比较在理论上或学术见解上的差距并不太大，差距是我们的速度太慢。这次与一些教授学者讨论后，感到他们想到的理论或学术上的见解，我们有些也想到了，他们可以很快实现他们的想法与见解，但我们则不能，这受很多设备条件上的限制，要实现这些想法需要较长的时间，等我们搞出来时就已经过时了，或甚至意义不大了。

3)、学术活动十分繁频，坚持每周一次研究组会议，讨论学术及技术问题，这是教授们利用周会检查一个研究成员工作的普遍方法，很多好的想法与概念往往是在这样的会议上形成的，这种周会也是安排研究计划的会议，又是教授系统向研究生讲解新的理论与设想的场所，形式多样也很随便，利用这个机会充分交流学术思想，互相启发。我深深感到这种周会对活跃学术空气提高研究工作质量的极端重要性。另外这种会议又是深入检查每一个人工作的最好方法。研究生必须轮流在周会上汇报工作，可以起到互相督促检查的目的，也自然形成相互检查的压力。

4)、重视研究工作的质量及数量，而不强调上班时间，研究课题及计划一旦确定，研究生或其他工作人员即可自由支配他们的时间，而不强调每天必须按时上班，事实上教授从来不检查工作人员迟到早退问题，而只检查工作的内容、深度及解决问题的情况。因此当一项工作条件已经成熟，即可能白天晚间连续干完，甚至周末或假期也在努力工作，所以工作效率很高，这样还可自动调节某些繁忙设备的利用率。

5)、我只考察了美国大学中的科研情况，没有机会去研究所考察，可能研究所的科研组织与大学有所不同。但我比较一下美国大学中的科研情况与我国研究所的科研情况，觉得有些地方值得我们借鉴。例如研究所设研究室的体制，我认为值得重新考虑，研究室当经过一定时间后，往往容易形成所谓拼盘的格局，即不同学科的研究组混在一起，彼此很少联系。为了解决所谓拼盘问题，研究室的体制须经常调整，每次调整都要大动干戈，化很多精力。我觉得科研是在不断发展的，一个生长点会派生出另一些生长点，因此在一个固定学科方向的研究室内部，当经过一定时间后，形成拼盘的结构是不可避免的，这是科研发展的必然结果，发展了的研究室如仍以原来研究室的学科方向来看，它必然是五花八门拼盘结构。如果我们把一个研究室看作是相当于大学的一个系，一个系内部可以有不同的学科混合一起，谁也不能把系看作是拼盘。

根据以往的经验，研究室往往是本位主义山头主义的场所，因此取消研究室建制，而建立相当于大学一个系的部的建制是可考虑的。部下面即为一个个的课题组，课题组必须有称职的学科带头人，当研究工作发展后可以在原课题组中分出来成立另外的课题组。课题组是科研的基本单位，它只搞研究工作而没有任何其他行政事务，部可设部主任及脱产的业务行政秘书，部主任可以每两年或三年轮换一次，一个部可以管十个或几十个课题组，部是行政机构，部可设学术委员会负责学术领导，它又受所学术委员会的领导，一个研究所可设若干个部。

这样做的好处是可大大减少脱产人员，行政事务工作可集中在少数几个脱产人员身上，其它人都是在科研第一线，部是一个大领域的综合体，不会认为部是一个拼盘，其次可完全避免过去研究室的那种山头主义本位主义的情况。

赴美访问及参加国际低温材料会议的报告

李依伦

我于1983年8月13日—10月7日到美国访问，这次去的目的有三：

1. 参加国际低温材料会议 (ICMC)。
2. 参观了解低温材料与材料科学有关的研究工作及设备。
3. 参观了解比勒金相公司金相试样制备技术及金相设备的发展。

1983年8月15日—19日在Colorado Springs参加国际低温材料会议，代表金属所及低温材料专业组提出宣读和Poster Show报告各一篇。会后参观了Boulder Colorado的美国国家标准局；Chicago附近的费米国家加速器实验室；西北大学及加利福尼亚大学材料科学系；在Chicago附近的Lake Bluff地方的Buehler Ltd工作，学习五周，详细了解，熟习金相制样方法及设备，金相研究与发展实验室的工作。现将有关情况汇报如下：

1. 一九八三年国际深冷材料会议论文介绍：

国际深冷材料会议简称ICMC，今年八月十五日至十九日在美国科罗拉多，斯普林斯举行。该会议自1955年开始每逢单年与深冷工程会议联合召开；每逢双年分别召开一次讨论会，1984年7月24日将在苏联基辅巴尔电焊研究所举行。深冷材料中又分为结构材料及超导材料两大部份，我只参加了金属结构材料部分，超导材料部分另有国内其它单位参加及介绍。

在深冷结构材料部分有十二个国家的六、七十名代表参加，会议宣读的论文共72篇，其中美国33篇，日本14篇，苏联10篇，西德4篇，中国、民德、英国各2篇，澳大利亚、法国、比利时、瑞士，以色列各1篇。

这72篇论文按内容分为六组：

- | | |
|------------|-----|
| 一、深冷合金的发展 | 7篇 |
| 二、形变与断裂性能 | 14篇 |
| 三、制作与工艺 | 13篇 |
| 四、物理性能 | 13篇 |
| 五、复合材料与非金属 | 16篇 |
| 六、工程评价 | 9篇 |

美日苏等国对深冷材料研究兴趣广泛，投资浩大，主要目的是为发展新能源解决材料问题。如超导电机、聚变反应堆、高能加速器超导磁体、氢气泡室、宇宙飞船的火箭推进器贮槽、液化天然气槽船、深冷电子学等。目前美国橡树岭实验室建立的核聚变用

阴阳磁体系统受真空、深冷脉冲载荷和磁场的作用，而且许多磁体在一起工作，一个坏了全体都要停止，因此对于深冷材料的强度、疲劳、韧性、制作加工、焊接成型等性能，组织稳定性、抗辐照性能等等都要加以严格控制。

下面分五方面介绍：

一、深冷合金的发展

1. 深冷用高强高锰不锈钢的发展

日本钢公司在 25Mn—5Cr—1Ni 钢基础上改进使 σ_s 达到 1200 MPa (4K)，并具有较高韧性和抗腐蚀性，使 Charpy 冲击值 (CVN) 达 100J 以上，以满足核聚变环形线圈超导磁体结构材料的需要。

由合金元素对 77K、4K 力学性能影响，得到屈服强度与 CVN 吸收功之间的关系见图 1

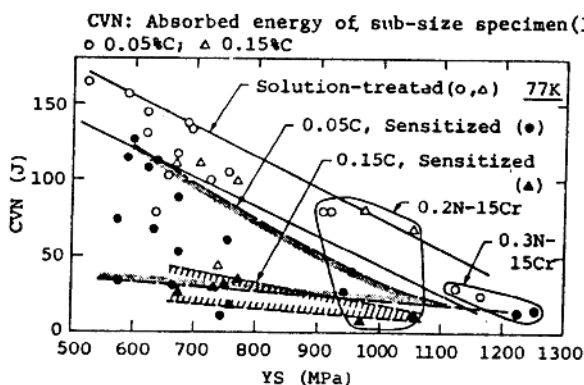


图 1 钢种屈服强度与 CVN 吸收功的关系

又通过腐蚀试验试样 ($7 \times 50 \times 200 \text{ mm}^2$)，在 320# 砂纸磨光后，固溶及敏化处理，再放在大气中和饱和水气中浸泡 60 天，取出测量锈蚀面积占整个面积的百分数，选出成份。

综合上述结果，得到的最佳钢种是

0.05C—0.3Si—25Mn—15Cr—1Cu—1Ni—0.2N—Nb

2. 32Mn—7Cr 钢

日本东京大学为下一个托克马克聚变反应堆，大型超导磁体的结构材料，研究了 32—35Mn⁹。钢在 77K 与 4K 下力学及塑性变形行为，真空熔化控制低 Si 及 C、N 与微合金化元素 V，采用沉淀强化达到高强度，但是固溶温度太高时在断口晶界上用俄歇能谱仪分析出有 P、Si、C、N 聚集，因此通过试验认为 1123K 低温固溶、937K、48 小时时效是最好的热处理制度。由于细化晶粒，抑制低 Si 钢中 P 的聚集，在 V 较高时 C 可适当提高，实验结果得最佳合金成份如下：