

科学研究工作中的一些体会*

同志们：

庞院长、郝院长要我谈一谈“如何搞科学研究”，这样一个题目对社会科学工作者来说，或者是对些革命干部来说，相当于“如何掌握马列主义”。这种题目对于任何人来说都是很难谈的，要不是谈不出什么具体名堂来，要不然就会有很大片面性。

我今天要谈的并不是“如何做科学研究”这样一个大题目，而是就个人的经历和认识，谈一谈自己对科学研究工作的一点体会。我觉得空谈原则和大道理不一定能说明问题，因此在谈的过程中将穿插一些具体业务细节，想通过这些细节来说明某些科学研究工作的做法和逐步深入的过程。这些细节大部分是我15年前在国外做过的工作，有的则是别人的工作，我顺便借来说明我需要说明的问题。从纯业务观点来看，我将要举出的例子对今天在座的诸位不一定很恰当，因为隔行如隔山，不从事这方面业务的同志听起来一定会很生疏，而在这方面做过几年工作的人听起来又会觉得平淡无奇。但是，我认为如果我今天所谈的能“举一反三”，对在座中一部分人今后的研究工作有一点启发和帮助，我的目的就算达到了。

一

首先，科学研究为生产服务，理论联系实际是必须肯定的。这样做不仅是为了国家建设的需要，而且也确实是科学技术发展的过程和途径。打开世界科学发展的历史来看，我们可以很清楚地看出这样一个过程，我想，大家对于这一点都是很熟悉的，用不着我在这里多谈。当然大家也知道得很清楚，在科学研究为生产服务，理论联系实际的问题上，有为今天或者当前生产服务的，也有为明天或将来生产服务的；有直接服务于生产工作，也有间接对发展生产起指导作用的工作，这些工作都是需要的，不应该有所偏废。当然，对于某一个单位或某一个人来说，就有所侧重了。例如，工厂中的中心试验室应当着重解决当前生产中的问题，为当前生产服务，科学院的研究所及高等学校应当对明天的问题多多投入力量，为将来的生产开辟途径。产业部门的研究机构应当着重在工艺性强的问题上多做工作。以便科学院的研究所能腾出较多的力量来搞理论性的问题和基本性的研究。这种分工原则大家都承认。但是，由于种种原因，比如，国家当前的需要和人员条件，要达到这种合理分工还需要经过相当长的时间。

研究机构之间有分工，并不意味着从事理论性或基本性研究工作机构的选题都是从书本上来的，也不是说，理论性的研究都属于高度抽象性的和概括性的理论。在西欧，特别是在英国，一直到1945年前后还没有一个国家的冶金研究所或钢铁研究所。在那个时候以前，冶金方面的理论研究或基本性研究工作主要依靠有关大学的研究院来做，日常生产中发生的问题则主要由各工厂中的中心试验室承担。英国的工厂实验室特别是大工厂的中心试验室的力量一般都是比较强的，设备条件也很不错。担任大公司、工厂实验室主任的人有很多是水平较高的科学家，有些是皇家学会会员。

* 本文为1963年7月在东北工学院为大学生所做“如何做科学研究”的报告

例如 Frith-Brown 钢铁公司中心实验室主任过去由 Hatfield 兼任,现在由 Sykes 担任,都是皇家学会会员;Mond-Nickel 公司的中心实验室主任过去是 Allen,现在是 Pfeil,也都是皇家学会会员。工厂企业有钱,因此配备的工作人员水平也不错。但是,工厂中心试验室毕竟是工厂中心试验室,他们认为一时不能解决或短期难于见效的问题就提到大学里来要求进行基本性的研究。

第二次世界大战开始后不久(1940),那时我在 Sheffield 大学冶金研究院工作,并担任一个工业中几年来没有得到肯定答案的研究课题,这就是“高强度低合金钢中有时产生内部裂纹”到底是由于什么原因?讲到这个课题的提出是有一段故事的。在第二次世界大战以前,大约是 1937 年前后,当希特勒在欧洲日益猖狂的时候,英国为了自己的安全也在暗中备战,注意发展空军。有一次,在空军演习中一架 Spitfire 战斗机忽然从空中坠下来,驾驶员摔死了。恰巧,那个驾驶员是一位贵族勋爵的儿子,于是,这件事得到了加倍的重视,当时把失事的飞机每一个零件都收集起来,成立了专门委员会来调查研究,分析飞机失事的原因。调查研究结果是:飞机失事是由于主轴断裂。在主轴内部,发现很多的细小裂纹(像头发那么细小,后来称为发裂)。这个发现对于当时的合金钢厂来说是一个新的问题。于是,在 Hatfield 支持下,许多合金钢厂的中心试验室组织起来了,企图寻找产生裂纹的原因和避免的方法。他们在两三年内,统计了国内外很多工厂的生产记录,进行了大量的试验工作,得出好几种不同的结论:有人认为是由于钢中合金元素的偏析,使钢材冷却后,在偏析严重的地方残留着少量的奥氏体,后者在较低温度下或在使用过程中发生转变产生局部内应力而导致裂纹。有人认为是由于某些夹杂物的存在而产生应力集中所致。有人则认为是由于气体、水蒸气或碳氧反应所产生的 CO 所致。总之提出的原因很多,争论很多,谁也说服不了谁,谁都可以从自己的实验结果举出一些似是而非的事实来说明他自己的观点是对的。说也奇怪,一个人若事先有偏见,就一定在科学研究中专门找自己感兴趣的资料来作证。例如认为由于夹杂物而引起裂纹的人,专门找夹杂物与裂纹之间的关系,照出的相都是有关夹杂物的,用来说明自己的观点。正是这样,问题才提到大学里来要求进行基本性的研究。首先要求肯定产生内部裂纹到底是由于什么原因。我带领一名研究生(挑选本校毕业生最好的做研究生)来进行这桩工作。我们分析了各个方面的因素,根据他们提出的各种可能的理由从旁证和反证的角度进行试验,根据试验结果一个一个清理逐个进行淘汰。例如关于残留奥氏体的转变问题,为什么柱状奥氏体不产生内部裂纹?关于夹杂物引起发裂的说法经过大量样品的仔细观察,发现有些夹杂物更严重,钢却无裂纹,因此也被否定了。最后归纳到氢气的存在可能是产生内部裂纹的主要原因。光有旁证和反证不行,还得有正面的证明。如何从正面找到证明来说明氢是产生内部裂纹的主要原因就成为前进中的一个关键步骤了。当时实验室内用小样品来进行这方面的工作是有很多困难的。我们自己制造了氢气加热炉,制造了真空加热定氢装置,全是亲自动手。把钢样在高温氢气中加热,使足够的氢渗入样品中,由于样品小,必须急冷才能在样品中保留足够的含氢量,急冷的办法就是淬火。这样,高温渗氢的淬火样品($\phi 35\text{mm}-40\text{mm}$)可以发生内部裂纹,而在同样条件下将样品在 N_2 中或真空中加热淬火则没有内部裂纹。但是,淬火样品中内部裂纹的分布状况显然与工业生产大钢材的内部裂纹有所不同(见图 1),别人不信服。

对此不同,我们认为是样品大小的关系,若用大样品则产生的裂纹可能不这样,针对这种情况,我们又制造了较大的氢气加热炉,用较大的钢样($\phi 150\text{mm}$)在高温渗氢后在空气中冷却,产生的内部裂纹与工业生产大钢材的内部裂纹的分布完全相似。此外,对渗氢样品在冷却过程中还进行了一系列的热加工试验,发现随加工的方向不同可以改变裂纹的分布。由此证明由氢产生裂纹的观点是

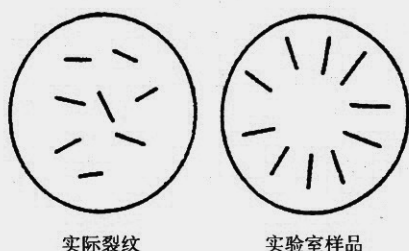


图1 工厂钢锭中实际裂纹与
实验室样品中裂纹分布的比例

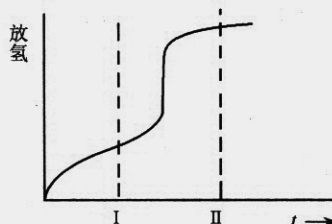


图2

正确的。同时在试验过程中,我们首次发现渗氢淬火的样品有明显的孕育期,这就是有时钢样淬火后在室温下马上剖开来看,没有裂纹,过一定时期后又有了,即有些淬火样品,发现有如图2所示之放氢现象。在 t 为I时切开时无裂缝;在 t 为II时切开就有了。孕育期的长短随样品大小,钢的成分及含氢量不同而异。孕育期的发现,解决了生产部门与使用部门过去许多“打官司”的问题,在过去,出厂的钢材也经过检验,当时已有用超声波(1943年即开始)可以探出内部裂纹。有时生产厂检查没有内部裂纹,但到使用部门经过机械加工以后就往往发现钢材中有内部裂纹,于是大“打官司”。在这段工作中,我们还进行了钢中氢溶解度的工作,以及大量真空定氢、金相、X光及相分析等工作。工作告一段落,得到结论是:合金钢材中内部裂纹的产生往往需一段孕育期,有的钢材在室温甚至要经过几个月才出现裂纹,有的则在冷却到室温的过程中就产生了裂纹。孕育期是否存在以及其时间长短视钢材成分、大小、含氢量高低以及其内部应力状态而定。总之,钢材中产生内部裂纹的主要原因是由于氢的存在,而裂纹的分布则取决于内部应力状态。

问题又提出了,内部裂纹既然是由于氢的存在,那么怎样去氢?在生产中如何能最经济地达到这个目的?这时,又来了两名研究生参加这项工作。为了避免问题的复杂化,我们决定先研究在单相区内(γ 区)恒温去氢的规律,得出一系列的曲线(图3和图4)如下:

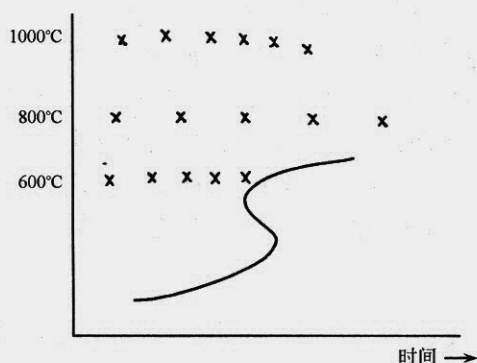


图3

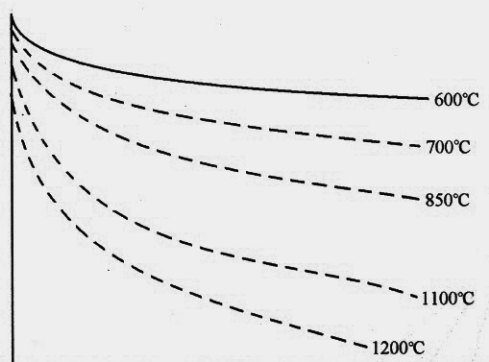


图4

这些曲线是这样得到的,用若干形状大小相同的样品,在1200°C渗 H_2 达到饱和后,其中有些在1200°C下 H_2 渗 N_2 ,有的放在控制在一定温度的盐熔炉中,在不同温度下取出淬火再测定样品中剩余的含氢量。得到上述一系列曲线以后,如何分析这些结果?这是科学研究中的一个主要问题,关系到能否把研究结果进一步用于生产。若不能正确分析,则其结果很有限。因为研究的是小样品,工厂中根本不感兴趣。

很显然,去氢速度与温度、时间和样品大小有关,如何从上述曲线来找出这种关系?在这项工作中,我们曾经请教数学物理学家,要他们找出一个公式来表示这种关系。但是,他们推导出来的公式与实验结果显然不甚相符,假如样品中含氢量为 y ,则他们从基本理论指导得到的公式为:

$$y = Ae^{-Bt}$$

将它画成曲线,如图 5 中虚线所示。与实验结果不符,凑齐了前端就不能凑后端。于是就不得不靠自己了,我们运用了自己一点点数学知识,最后找到了一个数学公式:

$$y = \frac{K}{1+a}(1 + ae^{-nt})$$

假定 n 与温度有关,通过改变 n 值,就可以应用上式来求出全部的实验曲线。从这些结果可以看出,温度越高,则 n 值越大,显然 n 与扩散系数有关。为了证明这种推测,我们画出 $\log n$ 与 $\frac{1}{T}$ 的关系,得到的恰好是一条直线,正好说明上述推测是正确的。

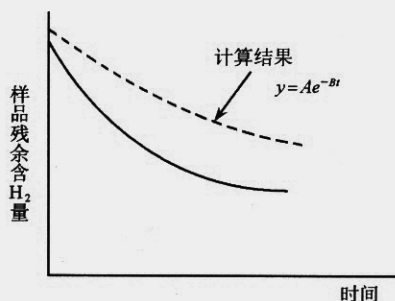


图 5

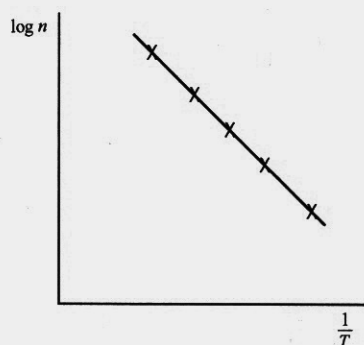


图 6

n 既然与 D 有关, D 的量词是 $L^{2t^{-1}}(\text{cm}^2/\text{s})$,而在 e^{-nt} 这个指数项中, t 的单位是 sec, nt 乘积只能是一个没有单位的纯数值(因为不能有 e 的负一厘米次方或负一秒次方……)。因此,如果用 D 来表达,则上式中 e^{-nt} 应当写成 e^{-Dx/L^2} , L 代表样品的尺寸大小,对同样形状比例的圆柱形试样来说,可以认为 L 相当于圆柱形的半径 r 。根据这个关系,可以看出温度、时间已知时,样品大小与去氢的关系,因而就可以根据小试样的去氢结果来推测大钢材的去氢。例如,我们要使钢材中的氢含量从原来的 6c.c./100g 去到 1c.c./100g,实验室中用 $r=20\text{mm}$ 的小试样在 650°C 需 2h,那么在工业生产中 $r=200\text{mm}$ 的钢材在 650°C 处理需要的时间应当是:

$$t_1 = \left(\frac{L_1}{L}\right)^2 t = \left(\frac{200}{20}\right)^2 \times 2 = 200\text{h} (\text{因为 } D \text{ 不变})。为$$

了验证这个推理,我们在实验室中做了一些试验,因为在实验室中也可用几种不同大小但形状比例却完全相同的钢样作去氢试验,它们同样在 1200°C 下渗氢淬火,得到图 7 的曲线。若最小的样品中试验曲线用“ $\times$ ”表示,大些的用“ $\circ$ ”表示,最大的用“ $\triangle$ ”表示,即 $r_3 > r_2 > r_1$,则 t_1, t_2, t_3 之间基本上符合上述关系的,即:

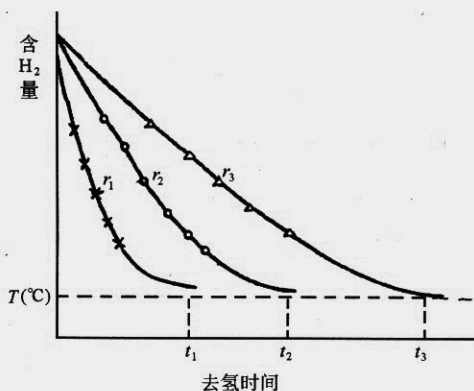


图 7

$$t_2 = \left(\frac{r_2}{r_1} \right)^2 t_1$$

$$t_3 = \left(\frac{r_3}{r_1} \right)^2 t_1$$

完全与以上推导的关系相符。这个数学关系后来还进一步为钢厂中实践结果所证实(Sykes)。由此可见,只要能找到科学规律,实验室中用小试样得来的结果完全可以指导生产。只怕实验结果不准,理论上不会进行分析,得不出科学规律来。事实上在进行上述工作的几年过程中我们根本没有到工厂中去。

问题又来了,恒温处理在生产上不方便,生产中比较方便的条件是自由冷却。那么在自由冷却的条件下去氢的情况怎样?在自由冷却下去氢,问题会复杂一些,因为这个问题牵涉到 γ 与 α 相中的氢扩散问题以及冷却过程中的相变问题。这时又新来了两名研究生参加这项工作,我们设计并制造出一个装置,在真空条件下既能测量冷却过程中氢从钢样中放出来的速度和放出来的量,同时又能记录钢的相变情况,能得的曲线如图 8 所示。

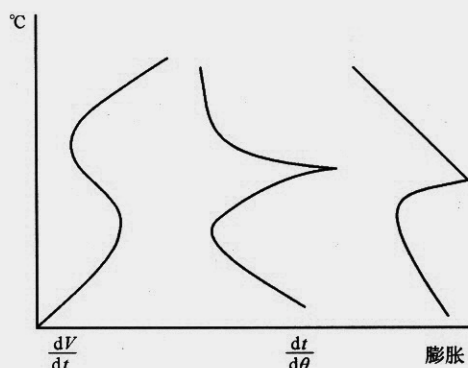


图 8

测量了许多不同成分(从而相变温度不同)的钢种在冷却过程中放氢的速度,三条曲线,是相变曲线,热

差曲线及膨胀曲线,其中 $\frac{dV}{dt}$ 如何得到的呢?从真空装置上的油压计变化得到的是 $\frac{dP}{d\theta}$,经过体积校正可以导出 $\frac{dV}{d\theta}$,从热差曲线得到的是 $\frac{dt}{d\theta}$,于是 $\frac{dV}{d\theta} \div \frac{dt}{d\theta} = \frac{dV}{dt}$,这就是放氢速度。实验结果指出,在 $\gamma \rightarrow \alpha$ 转变过程中放氢最快。进一步就是如何从 $\frac{dV}{dt}$ 推测出氢的扩散系数?看来放氢一定与氢扩散有关。我们用的是圆柱形样品,从一个无限长圆柱形的钢样放出氢气的理论公式,可以查到为

$$\frac{1}{D} \cdot \frac{dC}{dt} = \frac{d^2C}{dr^2} + \frac{1}{r} \left(\frac{dC}{dr} \right)$$

这个公式的解是

$$\frac{dV}{dt} = \text{放氢速度} = \frac{2CD}{r} \sum_{a=1}^{\infty} e^{-D\lambda_a^2 t}$$

式中 C 为钢样的含氢量, r 为钢样半径, $\lambda_a = \frac{\epsilon_a}{r}$ 而 ϵ_a 则是零级 Bessel 函数 J_0 的各种“临界值”可以从数学表中查出来,上式可以展开成:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{2CD}{r} \left(e^{\frac{-5.8Dt}{r^2}} + e^{\frac{-30.5Dt}{r^2}} + e^{\frac{-75.0Dt}{r^2}} + \dots \right)$$

可以看出,式中括弧内各项收敛得很快,只要 Dt 乘积不变,我们可以写成:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{2DC}{r} \times a \quad (a \text{ 为常数,即代表一定 } Dt \text{ 值的括弧内各项的总和})$$

在一定温度以上,可以认为 Dt 不变,(但太靠近常温时差别就大了)这种情况可以从图 10 中看出。

但是,在不同温度下, C 是不同的。因此只要各温度下 C_T 为已知,我们可以从 $\frac{dV}{dt}$ 得出:

$$\frac{1}{C_T} \cdot \frac{dV_1}{dt} = \frac{2D_1}{r} \cdot a_1$$

$$\frac{1}{C_{T_2}} \cdot \frac{dV_2}{dt} = \frac{2D_2}{r} \cdot a_2$$

.....

$$\frac{1}{C_{T_n}} \cdot \frac{dV_n}{dt} = \frac{2D_n}{r} \cdot a_n$$

只要 $D_1 t_1 = D_2 t_2 = \dots = D_n t_n$, 则 $a_1 = a_2 = \dots = a_n$, 可以认为 $\frac{1}{C_T} \cdot \frac{dV}{dt} \propto D$ 。

如果画出 $\log \frac{1}{C_T} \cdot \frac{dV}{dt}$ 与 $\frac{1}{T}$ 的关系, 则可得图 9。从这些结果, 可以比较不同钢种在 γ 区和 α 区的氢扩散系数。从得到的实验结果得到的结论是: “ α 区的氢扩散系数比 γ 区大, 对一般的低合金钢来说, γ 区的氢扩散系数不随成分变化, 而 α 区的氢扩散系数则随钢种不同而异, 特别是转变特征对氢扩散有显著的影响。”从直线结构的观点来看, 这是完全可以理解的 (因为 α 区内有 Fe_3C 与铁素体两相, 扩散受碳化物分布及颗粒大小的影响) (图 10)。

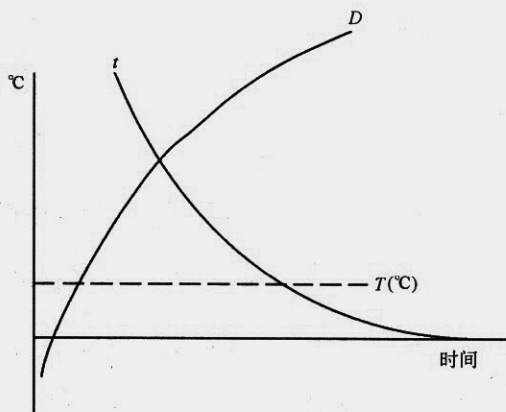


图 9

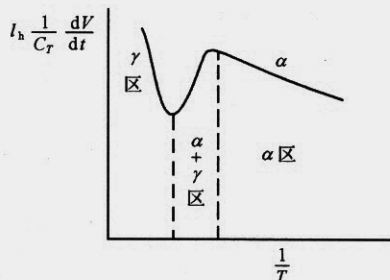


图 10

后来设计出一种热处理方法, 即先冷却到转变成 α , 继续加热到 α 最高温度但不致形成 γ , 则去 H_2 是最有效的。

因为时间关系, 我不打算更多地谈这方面的工作, 因为我今天的主要目的并不是作钢中含氢问题的专题报告。而只是在过去工作中选择一部分来说明科学研究中一些工作方法。这就是: 研究工作的逐步深入, 要依靠陆续不断地提出问题, 同时工作要系统化, 更重要的是要善于在理论上运用一些物理、化学、数学的成就分析实验数据, 得出科学规律。

这里必须补充一句, 大家不要嘲笑那些数学物理学家, 认为他没有能够推导出符合于实验数据的公式, 认为从纯理论上处理问题不行。事实上并不如此。后来我们和他们商量, 为什么有这些差别呢? 他们的公式是

$$y = Ae^{-Bt}$$

我们的公式是

$$y = \frac{K}{1+a} (1 + ae^{-nt})$$

差别仅在于边界条件不同,我们的公式是

$$t = \infty \text{ 时, } y = \frac{K}{1+a}$$

他们的公式是

$$t = \infty \text{ 时, } y = 0$$

若当时我们告诉他们边界条件为实际上只差一个残留氢项, $t=0, y=K, t=\infty, y=\frac{K}{1+a}$, 则他们完全可以轻而易举地导出我们的公式。为什么会有残留氢项? 从理论上讲, 残留氢项的存在似乎是不应该的。进一步的分析就完全明了这个问题, 原来是由我们特定的实验条件所引起的, 在我们的实验条件下, 开始进行恒温去氢时样品中 $[H]$ 的分布是均匀的。随着时间的延长 $[H]$ 浓度分布有了改变, 只有当浓度曲线达到稳定状态时, 他们是对的。我们在样品中浓度未达稳定状态, 所以不一样。

在图 11 中, 这种稳定状态大致相当于 $t=t_3$, 如果以 t_3 为零, 从理论上推导出来的公式 $y=Ae^{-Bt}$ 才是正确的(图 12)。事实证明正是如此。我们如果将以前的实验结果做如下处理, 就可以看出这种情况。换句话说, $\ln y = C - Bt$ 这样一个关系只适用于从 t_3 开始(图 13)。因此他们的数学推导并没有错。其所以不符合实验结果, 是因为我们最初对实验条件中所包含的条件不完全明了。从这里可以得出这样一个教训, 即当自己的实验结果不符合于基本理论时, 尽管自己的实验结果是准确的, 是无可非议的, 也不应当武断地认为基本理论是错了。应当好好地考虑一下, 为什么实验结果不符合基本理论? 否则就会闹出

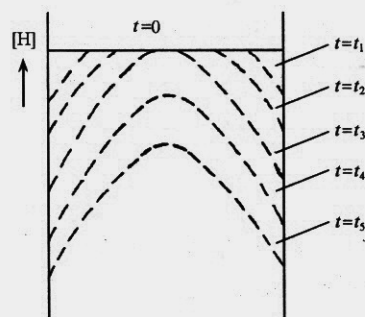


图 11

大笑话。这几年来, 我们闹出的笑话太多了, 不考虑自己的结果准不准, 动不动就从根本上怀疑前人多年来辛辛苦苦积累下来的基本规律和理论, 真是“蚍蜉撼大树, 好个不自量”!

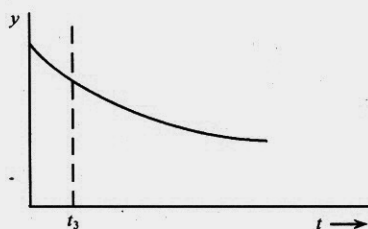


图 12

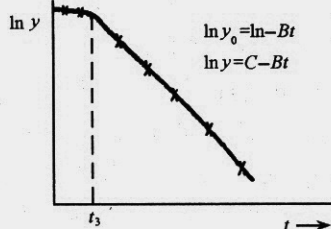


图 13

在上述工作中, 还应当提到的是实验方法和技术。在定氢方面, 由于我们在实验中发现 H_2 在常温也能从钢中跑出, 含 H_2 越高则开始跑得越快, 因此有必要把样品在淬火后, 或含 H_2 高而不一定是淬火的样品, 放入一种液体(水银)中先收集放出的 H_2 , 使一定时间后再进行真空加热定氢。并且, 定氢样品最好有一定的大小, 愈大误差愈小, 为什么在此以前, 工厂人员找不出正确的原因呢? 因为他们做实验时像定 C、S、P 那样小, 分析氢量, 结果在钻取试样时绝大部分氢都跑光了, 因此他们得不出氢是发裂的原因这样一个结论(实验工作的重要性)。许多研究工作者曾经为此而怀疑过钢中含氢究竟能起什么作用(因为他们测定各种钢在各种条件下 $[H]$ 都很低, 低到可以忽略的程度。并且发现不了 $[H]$ 随钢的厚度而变化的程度)。我们在工作中把从钢中放出的氢也收集起来了,

所以准确。由此可见,要注意实验技术。

另一点是通过不同温度下测量从固体钢样放氢的速度来计算钢中氢的扩散有它的优点。大家知道,一般的气体测定扩散系数的方法是用薄片,在薄片的一面充满气体在另一面维持真空,观察气体的渗透速度。这个方法对氢在含有碳的钢中的扩散来说则是不适用的,因为 H_2 的存在产生脱碳。 H_2 扩散后碳也没有了。正是这样过去没有人研究过钢中 H_2 扩散的,用较大样品脱碳的影响是可以忽略的。

一句话,要想在科学研究中得出创造性的成果,实验技术和实验数据的准确性是十分重要的。做实验时,处处要考虑到如何尽量地减少误差。特别是用来做理论分析的实验数据应当更加注意这一点。如果前人也做过这方面的实验的话,你的数据必须更准确一些,否则在科学上是不会有什么新的意义和价值的。从以上的例子也可以看出对实验结果进行理论分析的重要意义,如果不进行理论分析,实验室结果即使很准确,也不能得出科学规律从而不能应用到生产上去。从去氢试验这样一个例子,看起来几十克或几百克的小样品与工业生产中成吨的大钢锭不一样,但不能说这是脱离实际;若是用那么大的样品做试验,才是脱离实际哩。

二

只有在严格控制的条件下,充分运用已有的科学技术成果,才能得到更准确的结论。这正是近代科学工作的特点。充分运用已有的科学技术成果,一方面是为了改进实验技术和创造新的、先进的实验技术,同时也是为了对实验结果进行必要的理论分析。实验技术对于我们搞应用科学的人来说尤其重要。我们对实验技术一点也不能马虎,若准确度不够,条件不具备,就必须首先创造条件。实验方法不成熟就必须寻找成熟的实验方法。创造必要的条件,改进和完善必需的实验工具,正是科学研究工作本身的一项重要任务,实际上就是科研工作本身的一部分。不做或者不愿做这种工作的人实际上就是不配做科学研究工作。我们从前训练研究生时,往往要他们花一年到两年的时间搞自己的实验装置或改进已有的实验方法臻于完善(研究生对一般的实验室操作如金相、X光,以及一般的力学性质和物理化学性质测量在大学毕业时一般都已经学会了,不需再进行训练了)。实际上做实验的时间可能只占另一半的时间(即不到两年左右)。假如你所用的和所依靠的实验方法是X光衍射或磁性测量,看来在大学中已经做过的,但是为了能够深入一步发现问题,你必须在这些方面做出改进或至少做到十分熟练的程度,才能得出创造性的结果。一个搞金相的人,磨了一个样品,就说“我会了”,我说:“差得远哩!”我知道有人如用X光微光束测量金属内部应力如将光束搞得很小,花了几年时间,也有人花过两年时间去装置一架 Sucksmith 磁秤并做出某些改进才开始进行实验;有人花3年时间自己设计并制造出一套用光干涉圈原理的装置去测量合金在时效过程中的尺寸变化(小到 $10^{-6}cm$ 这样一个数量级)。类似这样的做法是数不胜数的。过去有人做渣钢反应,为了测量温度既快又准,曾经花了大部分时间先搞出一套用直流放大器做自动记录的仪器,然后进行工作。有人做通电快速加热和淬火过程中钢的转变,首先就是设计并搞出一套电子线路装置来记录这种转变,这些人不会电子学,就主动到处找人请教,最后总算搞出来了。正是这样,国外没有研究仪器的研究所许多新的实验方法和技术装备都是首先从实验室出来的,都是研究人员搞出来的。在资本主义国家,许多制造商不过是把搞出来的设备仪器标准化一下并弄得更漂亮一些而已。总之,在研究工作中做仪器设备是必要的,如果碰到困难就得去攻,不会就找人学,能找人帮助的就找人帮助,找不到人就自己埋头去干,从来也没有看到有人说“搞这个是改行,搞这个不适合”

的话,这才真正是“敢想敢干”。只要在大学里物理和化学的理论基础较好,对一般实验技术和原理掌握比较扎实,有干劲和钻劲,自己肯想肯动手去干,肯花时间一次不成再搞一次,许多东西就是这样搞出来的。不去改进实验技术或创造新的实验方法的人,尤其是不肯在实验技术方面多下工夫的人,只会做纯理论学家,是不行的。完全依靠购买设备依靠别人装好的设备来做工作的人,只能说是一个实验员。一旦由于掌握不好而弄坏,坏了又不管,那就简直不配进实验室。总之一个真正的科学研究人员,应当是设备的创造者而不应当是破坏者。

三

实验技术是一方面,理论分析又是另一方面。从实验提高到理论看起来似乎很难,但有时候也不是那么难。我们有些人一提到“理论”二字脑子里往往就出现一大堆数学公式,符号越古怪越好,有人被那些唬住了。当然我们应该承认,现在科学技术中数学基础是十分重要的。但是,许多科学上的推进也不一定都必须用高深的数学。Rutheiford 初次观察到原子核的分裂就基本上没有牵涉到数学问题,主要靠实验技术和敏锐的观察能力与想像力。Bohr 关于氢原子的学说初次引入了量子概念,他所用的数学式是经验式,在当时也是很简单的。总之,做科学研究的人,首先要能够深思,有想像力,但绝不是违背科学常识和科学基本原理的胡思乱想。敢想应有科学根据,符合客观规律,尊重客观事实。这样,就需要在基础课方面搞得扎实些,不求多但求精。在扎扎实实的基础上一步步前进,一级级上升,成年累月,熟能生巧。科学上的成就一方面靠自己的创造,而更大的程度靠善于运用前人积累的经验。因此有系统地做调查研究和学习是十分重要的。无论古今中外,大学问家大科学家对前人的经验都是很钻研的,尊重他人一点一滴的知识,所谓“涓涓水滴,汇成江河”。孔夫子“集大成”就是总结了前人和当时其他一些人的知识,他到处“问道”,就是到处向人学习,向老子问道。牛顿和爱因斯坦都是划时代的科学上的伟人,他们的成就主要是总结并创造性地发展了前人积累的知识。有一本书(《从牛顿到爱因斯坦》)(这本书几百页,是英文版)详细叙述了牛顿以后在物理和数学方面一系列的有杰出成就的科学家。如 Lorentz, Riemann, Minkowski, Maxwell, …… Planck 等十余人,指出爱因斯坦如何从牛顿和这些人那儿继承了他们的成就才前后引导到相对论。几乎可以这样说,没有牛顿就不会有爱因斯坦,如爱因斯坦早生三百年恐怕充其量只能做牛顿。还可以说,这十几位大数学物理学家中如果缺少哪一位,爱因斯坦恐怕还得去补这个人的缺。相对论应当说是时代的产物,是整个科学发展到一定阶段才会出现的。我们过去曾经有一种错误观点,认为应当先批判后继承,认为这样可能省点力气。于是就有人提出要打倒牛顿,推翻 Maxwell, 批判这个,指责那个,这样做是极其有害的。因为你没有先学习。不掌握人家的东西,怎能知道哪些是好的,哪些是坏的,其结果必然是谩骂一顿,瞎闹一顿,而自己却没有得到一点好处,这种人如果工作起来,必然是夸夸其谈,而一事无成,按照外国俗语“倒洗澡水连自己的小孩也倒掉了”,甚至做出错误的结果而不能判断,还洋洋得意。比较好的做法应当是“先继承,后批判”,事实上需不需要批判也值得考虑,因为你如果在某一工作中有新的创造和发展,那么对前人的工作也就“不批而自判了”。爱因斯坦的工作指出了牛顿定律的局限性,但他并没有写过一本批判牛顿的书,大科学家必然是谦虚的。“学而后知不足”,只有不学无术的人才会在科学工作中骄傲自满。

以下根据我个人体会,谈谈培养研究生的问题:

培养研究生主要在两个方面,实验技术前面已经讲过一些,另一方面就是培养他们科学上的分析和逻辑性,要求他们对自己做的工作结果提出看法和解释,在自己所做的题目领域内要能解释自

己的实验结果并且要不违背当时别人已经做了的工作。如果认为别人的结果不对,那么就必须指出别人在哪一点上错了并且为什么错了,自己的结果为什么对,自己的实验在哪些方面比别人考虑得更周到或根据什么比别人更准确,不这样是不能通过论文答辩的。这样一方面迫使他在实验技术方面下功夫,另一方面迫使你掌握与自己题目有关的文献,不能答辩说“我没有看见”。在实验方面,答辩的人不能做“唯条件论”者,用条件不好来推诿,来解释自己的结果不如别人。总之希望培养出来的人能尊重科学事实,尊重真理,全面真实地看问题,不仅要看自己的结果,也要看人家的结果,比较起工作结果来要客观、好就是好,不好就是不好,提出的看法要有说服力,就要从各个方面来进行实验,采用不同的实验方法,以便结果能互相印证。虽然这样做仍不能绝对保证自己提出的看法是正确的,但对培养出来的人来说,由于掌握了较多的实验方法,能综合地考虑问题,以后工作中办法就多了。我们从前搞过一点钢的冷加工与性能变化的关系方面的工作,几乎当时所有的物理实验和力学性能实验都搞过,通过这项工作,不仅了解了铁素体各种残余应力的来源及其对性能的影响,而且还接触到渗碳体(Fe_3C)的分布和其中残余应力对电学性能和磁学性能的影响,以及合金钢中各种碳化物在加工硬化中的作用等等。这项工作对生产也起了一定的指导作用,比如关于钢丝绳的使用寿命问题和精密冷加工的余量控制和变形问题等都得到解决。

以上所讲的都是我自己曾经接触到的一些工作,题目是与实际有联系的,途径正是毛主席指出的实践→理论→实践。采用的方法是从实验结果来寻找科学规律,或总结出规律,这是我们搞应用科学的人比较常用的方法。当然,搞科学研究并不限于这个方法,也可以先提出一种假说,然后用实验来验证这种假说,理论成立以后再用来指导实践。同时在实践中使理论不断得到修改和充实。但提出这种假说是需要一定的理论水平和数据的,不是头脑一晃就得假说的。例如,1930年前后Frenkel和Schottky都分别考虑到晶体中原子振动随温度的升高而加剧,原子或离子有可能离开正常点阵位置的问题。Frenkel认为随着温度的升高愈来愈多的原子离开了正常点阵位置跑到了填隙位置,因此所设Frenkel缺陷只是由一个空位和一个填隙原子组成的,Schottky认为随着温度的升高离开正常点阵的原子跑到了表面,在点阵中留下了空位,因此Schottky缺陷只是由空位组成。

他们都提出了近似的计算(用统计方法)表明缺陷浓度与温度成指数关系。在提出的时候,还都是假设,计算方法也很近似,因为他们都忽略了热膨胀的影响和缺陷周围原子振动频率的改变。后来,他们自己的工作以及别人的实验结果和理论计算证明这两种假说都正确,在某些晶体中Frenkel缺陷占主导地位而在另一种晶体中Schottky缺陷占主导地位。一般地讲,某些离子晶体中如果正离子与负离子的半径差别较大,则容易形成Frenkel缺陷,两种离子半径差别不大则容易形成Schottky缺陷。在金属与合金中,一般来说Schottky缺陷是主要的。我们今天知道:了解晶体中点缺陷的问题有何等普遍的意义(扩散、烧结、氧化、电导、半导体性能等)。必须认识到Frenkel和Schottky在当时能提出上述晶体缺陷这样的假说并不是偶然的,他们也是创造性地根据别人的实验结果,发展了当时已经有了的晶体不完整性的概念。晶体的不完整性首先是Darwin(1914)提出来的,他们根据晶体的X射线衍射强度并不符合完整晶体这样一个条件(Darwin当时提出嵌镶块这样一个概念,后来别人在这样一个基础上发展出位错理论)。除了当时已经知道晶体中存在不完整性以外,1920年前后已经有人开始研究了晶体的某些动力学性质,比如离子晶体中的离子迁移度,离子晶体的电导性能等等,有必要对观察到的现象寻找解释。这才导致他们两人的理论假设。我们今天知道离子晶体的导电性质和扩散现象,如果不用Frenkel或Schottky缺陷理论来解释这是很难理解的。

由此可见,要提出一个科学上的假设不能是凭空想出来的。要尊重既有的实验事实,尊重前人

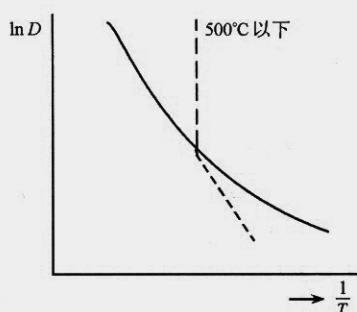


图 14

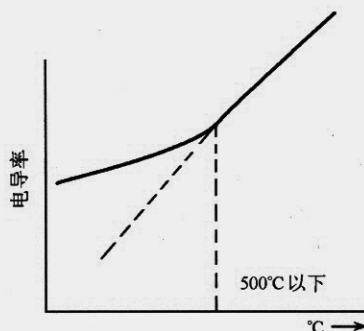


图 15

的知识,在这个基础上还要有自己的理论分析。假设提出以后,还要经过实践中的不断考验才能得到充实和发展,后者是无止境的。显然,我们今天还在研究晶体中的 Frenkel 缺陷和 Schottky 缺陷。

要做出创造性工作,往往需要设计独创性的实验。某些有杰出成就的科学家不仅善于做理论分析而且善于设计实验,用这种实验来证明自己提出的看法。Wagner 是 Schottky 的学生,他的金属高温氧化理论是大家所熟知的。远在 1920 年左右,就有人观察到许多金属在高温下的氧化动力学曲线可以用 $X^2 = 2Kt$ (或 $W^2 = 2Kt$) 来表达(图 16)。

用氧化速率来表达,则

$$\frac{dX}{dt} = \frac{K}{X}$$

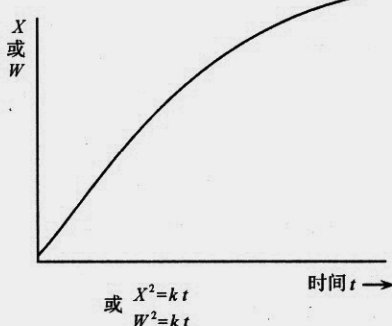


图 16

即氧化速率与氧化层厚度 X 成反比。从这个关系也不难体会氧化机制是一种扩散过程,但是什么东西在扩散?解答这个问题在于彻底弄清 K 的物理意义。已经从实验结果知道, K 随不同金属和氧化温度而变,温度升高则 K 增大,也说明 K 与扩散有关。曾经有人认为,氧化速度决定于氧气透过氧化层的速度,若不从基本物理概念着眼,对这种说法不可能提出反对意见。但是,只要稍微懂一点基本物理知识的人都会知道,如果氧化层是致密的,氧气分子就不能渗透过去,如果氧化层不是致密的,能允许氧气通过,那么氧化曲线就应当是直线规律而不应当是抛物线。因此,排除了氧气渗透

的可能性。那么是氧离子在氧化物晶体中的扩散吧,但氧离子的半径比一般金属的半径来得大,应当认为金属离子在晶体中扩散是比较容易的。正是这样 Wagner 首先提出金属离子(或空位)在氧化层中的扩散是金属高温氧化的控制因素。为了证实金属离子的扩散比非金属离子的扩散来得快, Wagner 设计出一个有名的实验如下:

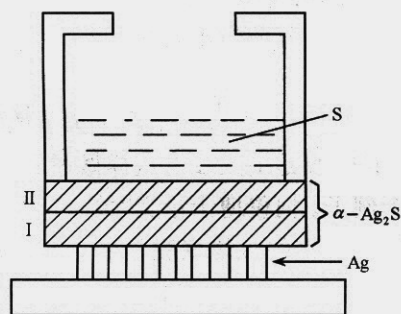


图 17

Ag 与熔融的硫被两块形状、重量相同的 $\alpha\text{-Ag}_2\text{S}$ 分隔开,在一定的温度下经过一段时间以后,发现 II 的重量增加了,而 I 的重量却没有增加。这个实验证明是 Ag 扩散通过 $\alpha\text{-Ag}_2\text{S}$,并且反应是发生在 S/ $\alpha\text{-Ag}_2\text{S}$ 的相界面上。假如 S

能扩散通过 $\alpha\text{-Ag}_2\text{S}$ 的相界面上,则应该有一部分反应发生在 $\text{Ag}/\alpha\text{Ag}_2\text{S}$ 的界面处,则 I 的重量也应该增加(图 17)。

四

由于今天并不是做什么科学专题报告,我要举的一些专业性的例子只粗略地谈到这里。从这些例子可以看出:科学上的设想,科学分析和推理,严格的条件,创造性的实验方法,先进的实验技术,可靠的系统性的实验数据,是科学研究取得成果的必要条件。在这些要求中至少要满足其中一部分才能够称得上为科学研究工作,尤其是严格掌握实验条件、得出系统的实验数据更是我们搞应用科学工作者的起码要求。

如何严格掌握实验条件?就是尽可能掌握可能影响实验结果的各种因素。在许多实际工作中,要切实了解每一个因素的影响是很困难的,比较简便的办法是使这些因素保持不变,做到在一系列的实验中结果可以严格地互相进行比较。例如,在冶金工作中如果我们研究的对象不是原料的影响问题,那就在不同实验中尽可能用同一批原料,这样可能由于原料不同而带来的影响就可以避免了。尽管我们对不同批的原料可以进行分析,可能有些更重要的成分没有而且分析本身还有误差,其他因素的控制可以类推。不能严格控制实验条件的人就没有资格轻易的根据自己实验结果下结论。

在实验技术方面不要轻易忽视一点一滴的改进,不要追求一下子就来个革命。别人做的工作中,真正改进的地方可能只有一点,要用显微镜找。对别人的工作要能够欣赏这一点,在自己的工作中才会注意这一点。怕麻烦的思想就会阻止自己去做改进实验技术的细致的工作。

必须记得科学工作中的成绩是一点一滴积累的,是一步一步的向前推进的。没有作过科学研究的人很容易“眼高手低”,看到别人一点一滴的改进认为“没啥”,但自己做时却又做不出来。有的人甚至不愿去做,说“这太渺小了”,天天在盼望“出奇迹”、“搞大发明”,结果往往搞了好几年,仍停留在不着边际的空想上。

对于实验技术,必须强调“熟能生巧”,搞熟了办法就多了。拿我们熟知的“热差分析”来说吧,最初用的是直接画时间-温度冷却曲线,Robert-Austin 在大量冷却曲线实验的基础上嫌这个方法不够灵敏,才改进为“热差”曲线。但后来有人又想到“热差”曲线仍有缺点:在某些相转变吸热放热很小,相发生转变的主要表现为两相的比热不同,从热差曲线来看比热的变化不够灵敏,sykes 进一步改进了热差分析方法,用测量比热,成功地研究了黄铜在 470°C 左右的有序无序转变。Robert-Austin 曾经要求一个新参加研究工作的大学生先做 500 条热差分析曲线才正式开始研究工作。在当时金属学方面的研究工具主要靠热分析和金相显微镜,Robert-Austin 这种要求说明我们在主要实验技术方面一定要自己做到“熟能生巧”,有所建树。我从前搞将近 10 年的钢中氢气工作,几乎每一个样品的定氢都是我自己亲自经手的。

所谓创造性的实验方法也可以指安排具有决定性意义的实验而言的。在许多情况下为了说明某一问题或证实某一种看法,可以进行一些直截了当的实验。这种实验是前人没有这样做过,但很能说明问题。以上所讲的 Wagner 关于 Ag^+ 扩散实验就是一个例子。柯俊博士论文“关于钢的过烧变脆”被认为是一篇较好的论文,就是他设计了一个实验直接证明“钢的过烧变脆是由于硫向晶粒间界的聚集”,其实钢的过烧变脆由于硫向晶粒间界聚集早已是大家承认了的,但是所根据的事实大都是间接的推测和不完全令人信服的证明。柯俊提出新的实验方法:将钢加热至 1400°C 拉断后在断裂的较平整处直接用金相观测出硫化物的树枝状结晶,虽然与以前结果相同,但是由于应用

了直接证明法,把这个问题“盖棺定论”了。其创造性就在于此。

科学设想,科学分析与推理是与一个人的基础与工作经验分不开的。要想在科学上出成果必须做好以下几方面:

(1) 科学工作者要练好一定基本功,学好一定基础课,不一定很高深,因为基础课也是学不完的。

(2) 科学研究工作者必须“勤学苦练”“学到老做到老”,学就是继承前人的经验,善于学就是善于继承。

(3) 科学研究工作者要有“愚公移山”精神,十年如一日,持之以恒才能出成就,说搞一、二年再看,碰到困难就后退,朝三暮四,此山望那山高者,不会做出结果。

(4) 不要为外来困难所吓退,科学研究工作者在某些地方“要有点傻气”,“思想要专一致志”,坚持下去才能出成果。

(本文根据记录整理,未经报告人审阅)