表 2 LNG32 永磁的磁特性参数

量	符 号	SI 制	CGS 制	换算系数 k (SI = kCGS)
剩磁	B_r	1.2T(Wb/m²)	12000 Gs	10^{-4}
矫顽力	H_c		600 Oe	
磁化场	$\mu_0 H_c$	600T(Wb/m²)		
磁能积	$(B\cdot H)_m$	32kJ/m³	4×10^6 GsOe	$\frac{10^{-1}}{4\pi}$
回复磁导率	μ_{rec}	3.5	3.5	1

表 1 中 μ_i，μ_m 都是指相对磁导率.

2. 永磁材料磁特性参数测量

永磁材料要求测量饱和磁滞回线在第二象限的一段即退磁曲线，它的特征参数是剩磁 B_r，矫顽力 H_c，最大磁能积 $(B\cdot H)_m$，还要求测量回复曲线及其特征量回复磁导率 μ_{rec}.

永磁材料的磁化场是由电磁铁产生，磁场的大小用自由空间的磁感应 $\boldsymbol{B}_0$ 表示($\boldsymbol{B}_0=\mu_0\boldsymbol{H}$). 这样计算方便，特别在作图时便于和原来习惯使用的 CGS 制相比较. 下面举一铝镍钴永磁的实测数据，如表 2.

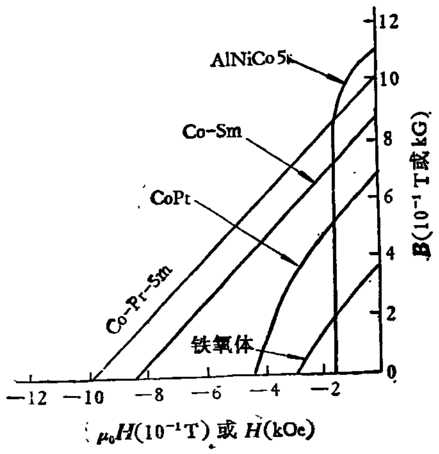

图 1

永磁材料的退磁曲线用 $\boldsymbol{B}=f(\mu_0\boldsymbol{H})$ 描绘比较方便，也便于和 CGS 制的曲线比较. 退磁曲线的典型示例如图 1 所示.

三、结 语

国际单位制是国际上公认的先进单位制，它的结构比较科学，使用比较方便，避免了由于多种单位制并用而引起的混乱和不必要的换算.

电磁量的国际制单位，由于增加了电流的基本单位安培，这样就可以通过单位换算公式，使力学、电学、热力学单位彼此发生了联系. 由于给自由空间的介电常数 ε_0 和磁导率 μ_0 赋予了量纲，这就消除了对电场强度和电位移，磁场强度和磁感应强度的概念混淆，同时也消除了 CGS 制给予电荷的又奇怪又不合理的量纲. 毫无疑义，SI 单位制必将得到广泛的应用.

误差与实验数据处理教学中的几个问题(上)

李 化 平 (北京钢铁学院物理教研组)

一、名词和概念

1. 误差：是指测量值与真实值之差[1)]，即

误差＝测量值－真实值.

1) 更广义的理解是，某量值的得到值（如测量值、标称值、近似计算值）与其客观真值（如校准值、理论值、公认值等）之差.

上式定义的误差反映的是测量值偏离真实值的大小和方向，因此又常称为绝对误差.

误差与真实值之比叫做相对误差. 考虑到一般情况下测量值与真实值相差不会太大，故可用误差与测量值之比作为相对误差.

在实验教学中，还经常用到修正值的概念，显然，当我们对含有误差的测量值加上修正值后，就可以消除误差的影响而得到真实值，即

修正值＋测量值＝真实值，

或

修正值＝真实值－测量值.

由上述定义可知，修正值与误差大小相等，符号相反.

2.偏差： 是各测量值与其算术平均值之差.

3.精密度、准确度、精确度、正确度；精度：

精密度、准确度、精确度和正确度在使用上有两种表示方法：

(1) 用精密度反映偶然误差大小的程度，用准确度反映系统误差大小的程度[1]，用精确度反映系统误差与偶然误差的综合效果.

(2) 用精密度反映偶然误差大小，用正确度反映系统误差大小，用准确度反映二者的综合效果[2]

比较上述两种表示方法，可以看出准确度这个词目前尚无统一的定义. 从计量学看，推广后一种表示方法. 大学物理实验教材一般采用前一种表示方法. 为了概念上的统一，我同意在实验教材中仍采用前者. 此外，前一种表示方法词义比较确切，词形与误差合成的概念对应一致[3].

精度是一个含义不确切的词，其意义可以这样来理解，如实验结果的相对误差为 0.1%，则可笼统地说其精度为 10^{-3}，如果误差纯由偶然误差引起，精度就是指精密度，如果误差是由偶然误差与系统误差共同引起（如未经校准的 0.5 级或 1 级电表），则精度泛指二者.

(4) 不确定度：它是用来表示误差范围的一个重要概念. 在计量工作中就常用不确定度来评定实验结果的误差，因为不确定度包含了各种来源不同的误差对测量结果的影响，而它们的计算又反映了这些误差所服从的分布规律. 为了取得对不确定度计算和表示方法上的统一，国际计量局在 1980 年 10 月召开了国际会议，专门讨论了这一问题并提出了建议书[4]. 从这一建议可以看到，实验不确定度主要还是用标准差表示.

二、系统误差与偶然误差

按照误差对实验仪器和实验结果影响的特征，一般将误差分为系统误差及偶然误差两类.

1. 系统误差

它是在同一条件下多次测量同一量时，误差的绝对值和符号保持恒定；测量条件改变时，误差亦按确定的规律变化（例如，分光仪偏心差引起的角度测量误差是按正弦规律变化）. 系统误差的特征是它的确定性. 此外，还有一类方向和绝对值未知（或尚未确定）的系统误差，叫做未定系统误差，在数据处理中，这类误差常用估计方法得出，并与处理偶然误差相似，用统计方法来处理. 系统误差需要改变实验条件和测量方法才能够发现. 系统误差的减小和消除是个比较复杂的问题，只有在很好地分析了整个实验所依据的原理和测量方法的每一步以及所用的各件仪器之后，才能找出产生误差的各种原因，从而有可能设法在测量结果中消除或减小它的影响.

2. 偶然误差

一般说来，在相同条件下，对同一量进行多次重复测量时，在极力消除或改正一切明显的系统误差之后，每次测量结果仍会出现一些无规律的起伏，我们将这种起伏归结于偶然误差的存在[1]. 和系统误差相反，偶然误差的出现，从表面上看，似乎是纯属偶然（偶然误差在单次测量时可正可负，可大可小），但若测量次数很多，结果中就显示出明显的规律性. 实践和理论都

1) 实际上，系统误差未消除时，偶然误差也常常会表现出来.

证明,大部分的测量误差均服从正态分布(高斯分布). 服从此分布的偶然误差具有下面的一些特性:

(1) 单峰性: 绝对值小的误差出现的概率比绝对值大的误差出现的概率大.

(2) 对称性: 绝对值相等的正负误差出现的概率相同.

(3) 有界性: 在一定测量条件下,误差的绝对值不超过一定限度.

(4) 抵偿性: 偶然误差的算术平均值随着测定次数的增加而越来越趋向于零,即

$$\lim_{K\to\infty}\frac{1}{K}\sum_{i=1}^{K}\Delta x_i=0.$$

误差理论的任务主要就是研究这种偶然误差对测定结果的影响,并通过对测量数据的适当处理,尽可能减少这种影响,此外,还要对测量结果的精度做出正确的估计.

3. 偶然误差与系统误差的关系

系统误差的特征是它的确定性,而偶然误差的特征则是它的随机性,二者经常是同时存在于一切科学实验中,它们之间也是互相联系的,有时难以严格区分. 我们经常把一些不可定系统误差看作是偶然误差,也常把一些可定的但规律过于复杂的系统误差当作偶然误差来处理,从而使得部分误差被抵偿以得到较准确的结果. 有时系统误差与偶然误差的区别还与空间和时间的因素有关. 时间因素有两方面的含义: 一是指时间的长短,例如校验仪表所用的标准,它的温度在校验所需的短时间内可保持恒定或缓慢变化,但在长时间中它却是在其平均值附近作不规则的变化,因而环境温度对标准仪表的影响在短时间内可以看成是系统误差,而在长时间内则为偶然误差; 另一含义是,随着科学技术的发展,人们对误差来源及其变化规律认识加深,就有可能把过去认识不到而归之于偶然误差的某些误差确定为系统误差. 总之,系统误差与偶然误差之间是否有本质上的差别还是当前误差理论中存在争论的问题.

三、测量精度的评定(测量的偶然误差估计)

对于偶然误差的概率处理,是在完全排除系统误差的前提下进行的,即是在认为系统误差不存在,或已得到改正,或者小到可以忽略的情况下进行的.

设对某一物理量在同样条件下作多次测量,得 $x_1, x_2, \cdots, x_K$,各次测量值的误差为 $\Delta x_i = x_i - x\ (i=1, \cdots, K)$,$x$ 为该物理量的真实值. 根据偶然误差的基本特性可得出误差密度分布函数:

$$f(\Delta x)=\frac{h}{\sqrt{\pi}}\cdot e^{-h^2\cdot\Delta x^2},$$

式中 h 为一常数,对不同的实验,h 有不同的值. h 大,曲线狭,h 小,曲线平坦(图 1),但曲线与横坐标所包围的面积相等,因为这面积表示各种测量值出现的概率的总和,应恒等于 1. 即

$$\int_{-\infty}^{+\infty}f(\Delta x)d(\Delta x)=1.$$

h 可以作为实验(或测量)精密度的标志,h 的大小反映了测量值的离散情况和集中趋势,故称 h 为精密度常数,但它只具有理论上的意义. 为了能从实验数据来确定结果的精密度,下面引入平均误差、均方误差、概差等概念.

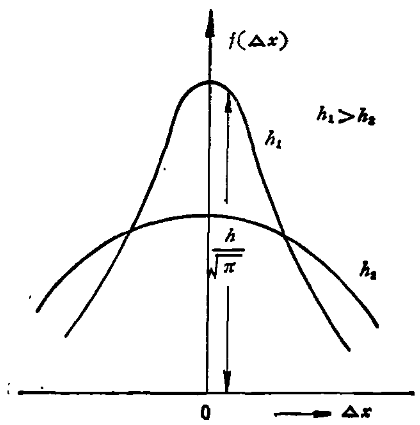

图 1

1. 平均误差 η

定义

$$\eta=\frac{\sum_{i=1}^{K}|\Delta x_i|}{K}, \qquad (1)$$

η 应与 h 有关,现推求如下:

已知 $f(\Delta x)$ 代表某一误差 Δx 发生的概率,在误差为 Δx—$\Delta x+d(\Delta x)$ 之间各种误差发生的概率是 $f\cdot d(\Delta x)$, 如果误差的总数是 K,而误差在 $\Delta x+d(\Delta x)$ 之间的数目是 K',则由概率定义,$f\cdot d(\Delta x)=K'/K$,因而 $K'=K\cdot f\cdot d(\Delta x)$,该区间内误差的总合便是 $\Delta x\cdot K\cdot f\cdot d(\Delta x)$, 故整个误差分布的区域上误差的总合为

$$\int_{-\infty}^{+\infty}K\cdot\Delta x\cdot f\cdot d(\Delta x),$$

故平均误差

$$\eta=\frac{2K\cdot\int_{0}^{\infty}f\cdot\Delta x\cdot d(\Delta x)}{K}=\frac{1}{\sqrt{\pi}\cdot h}. \qquad (2)$$

(2)式是在 $K\to\infty$ 的结果,亦即在 K 很大时合理,且 η 计算简便. 但实际情况 K 不大,故 η 随 K 变(不稳定),其次 η 不能反映数据的离散情况,因为不同精度的两组测量数据可以算出相同的 η.此外,K 有限,不能直接推出极限误差.

2. 均方误差

定义

$$\varepsilon=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{K}(\Delta x_i)^2}{K}}. \qquad (3)$$

同 η 一样,ε 与 h 有关,

$$\varepsilon^2=\int_{-\infty}^{+\infty}K\cdot(\Delta x)^2\cdot f\cdot d(\Delta x)/K$$
$$=2\int_{0}^{\infty}(\Delta x)^2\cdot f\cdot d(\Delta x)=\frac{1}{2h^2},$$

故

$$\varepsilon=\frac{1}{\sqrt{2}\cdot h}. \qquad (4)$$

用均方误差来评定测量数据的偶然误差情况具有如下优点:

(1) ε 有相当稳定性, ε 随 K 的变化比较小.

(2) 它以平方计值,故其值与个别偶然误差的符号无关,且能反映数据的离散度.

(3) 它与最小二乘法的观点相吻合.

(4) 对于有限次测量,它与极限误差仍存在固定而简单的关系.

因此,一般均用 ε 来反映测量精密度,亦即用它来反映偶然误差的大小.

3. 概差 P

它是这样一个误差值,即比它大的误差出现的概率和比它小的误差出现的概率相同,即

$$\int_{-P}^{+P}f\cdot d(\Delta x)=\frac{1}{2}.$$

计算出

$$P=\frac{0.477}{h}. \qquad (5)$$

综合 η,ε,P 三者,得

$$P=0.675\varepsilon=0.845\eta, \qquad (6)$$
$$\varepsilon=1.25\eta,$$

并把它们表示在误差曲线上(见图 2).

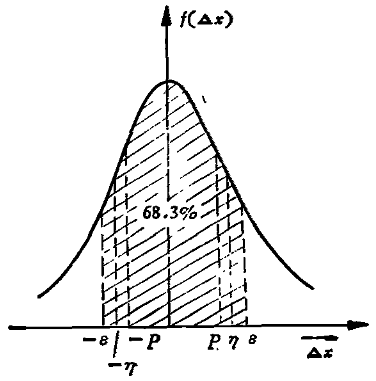

图 2

由图 2 可以明显看出,我们用一个数来表示误差,只不过表示测量值的概率分布,亦即对测量结果可靠性的一个估计. 把结果写成 $x\pm\varepsilon$,这只是说,对量的任何一次测量值 x_i 出现在 $x+\varepsilon$ 到 $x-\varepsilon$ 间的概率为 68.2% (由拉普拉斯积分表查出); 平均误差 η 表示误差落在 $\pm\eta$

区间概率为 57.5%；概差则表示落在相应区间内的概率为 50%. 即这三种误差表示的都是在一定概率下的误差范围，因此三种误差的数值之前都要加"±"号.

综上所述，可以看出在 $K\to\infty$ 时，用 η, ε, P 来表示一组测量中各测量值的精度都是可以的，但对有限次数的测量(我们只能计算出偏差)，显然以均方误差来估计测量的精密度是比较可靠的. 我国和世界上许多国家都在科学报告中使用均方误差，而在技术报告中则多使用极限误差. 由概率论计算知，绝对值大于 3ε 的概率为 0.3%，因而常取极限误差 $\Delta_{\lim}=3\varepsilon$.

对于有限次数的测量，数据将不会完全符合正态曲线的分布，均方误差也不能按 (3) 式来计算，那么我们该选择怎样的一个值，并以此值代替真值的话，就能使测量的各次数据 x_1, x_2, $\cdots$, x_K 相对于该值的偏差按概率最大的正态分布. 依据最小二乘法原理，这个最佳值就是算术平均值，现证明如下：

由最小二乘法原理，被测量的最可几值是这样一个值，它与各次测量值之差的平方和为最小. 设以 $\bar{x}$ 表示这个最可几值，即有

$$f(\bar{x})=\sum_{i=1}^{K}(x_i-\bar{x})^2=\min.$$

令

$$f'(\bar{x})=0,$$

则有

$$f'(\bar{x})=2\sum_{i=1}^{K}(x_i-\bar{x})=0,$$

故

$$\bar{x}=\sum_{i=1}^{K}x_i/K. \tag{7}$$

可以证明，对于有限次测量，一次测量值 (测量列) 的误差计算公式应取如下形式：

$$\eta=\frac{\sum\limits_{i=1}^{K}|\delta x_i|}{\sqrt{K(K-1)}},\quad(\delta x_i=x_i-\bar{x}). \tag{8}$$

$$\varepsilon=\sqrt{\frac{\sum\limits_{i=1}^{K}(\delta x_i)^2}{K-1}}. \tag{9}$$

对于一组等精度测量数据的算术平均值，其误差数值应该更小些 (因为算术平均值比任何一次测量值都应更接近真值一些)，可以证明算术平均值的误差等于一次测量值的 $\frac{1}{\sqrt{K}}$ 倍，即

$$\varepsilon_{\bar{x}}=\sqrt{\frac{\Sigma(\delta x_i)^2}{K(K-1)}}, \tag{10}$$

$$\eta_{\bar{x}}=\frac{\Sigma|\delta x_i|}{K\sqrt{K-1}}. \tag{11}$$

根据上述分析知，一列等精度的测量结果应表示成(如用平均误差表示)

$$x=\bar{x}\pm\frac{\sum\limits_{i=1}^{K}|\delta x_i|}{K\sqrt{K-1}}. \tag{12}$$

(12) 式的意义是：被测量 x 的最佳值是 $\bar{x}$，误差区间 $\bar{x}+\eta_{\bar{x}}$ 到 $\bar{x}-\eta_{\bar{x}}$ 包含 x (客观真值) 的概率是 57.5%. 应该注意的是(12)式不能理解为 x 落在 $\bar{x}+\eta_{\bar{x}}$ 到 $\bar{x}-\eta_{\bar{x}}$ 区间内的概率为 57.5%，因为 x 具有确定的值，不存在概率的问题.

目前许多普通物理实验教材和讲义，一般都将多次测量结果表示成

$$x=\bar{x}\pm\frac{\sum\limits_{i=1}^{K}|\delta x_i|}{K}. \tag{13}$$

这就出现一个问题，即近似地用一次测量(或测量列) 的平均误差来表示算术平均值的平均误差显然是不妥当的，它也决不具有平均误差所对应的概率涵义. 我们只能这样来理解 (13) 式，因为 $\eta_{\bar{x}}=\frac{\eta}{\sqrt{K}}$，一般测量要求 K 在 10 次左右，因而单次测量的平均误差 $\eta=\sqrt{K}\,\eta_{\bar{x}}\approx 3.2\eta_{\bar{x}}$，故 (13) 式相当于

$$x=\bar{x}\pm 3.2\eta_{\bar{x}}. \tag{14}$$

由概率论估算，$3.2\eta_{\bar{x}}$ 接近于极限误差. 据此，可以把 (13) 式中的 $\frac{\Sigma|\delta x_i|}{K}$ 勉强理解为最大误差，不这样就难于理解 (13) 式. 进一步我们就可以说，真值一定在误差区间内.

顺便提一下：(1) 式和 (8) 式表示的是误

差和偏差的绝对值的平均值，而不是误差和偏差的算术平均值，因为后者总是恒等于零，自然用它来表示测量误差是没有意义的.

四、关于测定次数的问题

算术平均值是一列等精密度测量的最佳值，其精度一般多采用(10)式表示的均方偏差(或称标准偏差)来进行评价. 由(10)式可知，平均值的均方偏差等于一次测定值的均方偏差的 $1/\sqrt{K}$ 倍. 由此可见，算术平均值的精密度和测定次数K密切相关，K愈大时所求出的算术平均值也越接近真值，因为其精密度越来越高. 但是测量的精度主要还是取决于所用测量仪器的精度、测量方法、环境和观测者等因素. 测量时应把这些条件所能达到的精度体现出来，超出这些条件单纯去追求测定次数是没有多大意义的，当然必要的次数还是需要的，特别是对比较精密的测量，没有一定的次数就得不到应有的可信赖值.

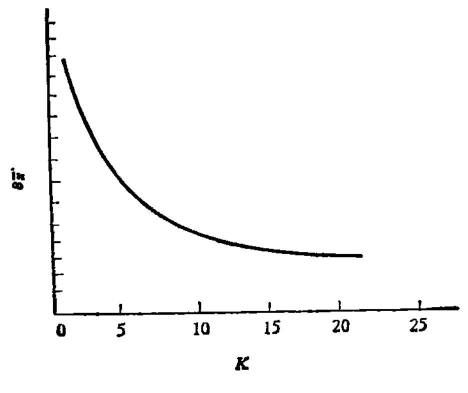

图 3

由 $\varepsilon_{\bar{x}}=\varepsilon/\sqrt{K}$，作 $\varepsilon_{\bar{x}}$-K 的关系图，得图3所示曲线. 由曲线可看出，随着测量次数K的增加，$\varepsilon_{\bar{x}}$ 逐渐减小，但在 $K>10$ 以后，$\varepsilon_{\bar{x}}$ 减小极慢. 因此，测量次数K不必过多，一般重复10次就可以了. 同样(10)式表示的也是偶然误差对最后结果的影响，它只能由比较精确的仪器显示出来，对于一般仪器，由于仪器灵敏度或仪器精确度不高而产生的误差将掩盖住这些偶然误差. 这就是说，对于这些情况下的测量次数还可以更少些，例如5次左右.

五、仪器的准确度和仪器误差

仪器准确度和仪器误差是由测量误差来限定的，例如用电表来测量一个实际值为2.00伏(相对真值)的电压，伏特计给出的读数为1.98伏，我们就说仪器(伏特计)准确度为1%，仪器误差为0.02伏. 由此例可以看出，仪器误差就是指在正确使用仪器的条件下，测量所得结果和被测量的真值之间可能产生的最大误差.

仪器误差通常是由制造工厂和计量机关使用更精确的量仪、量具，经过检定比较，给出仪器的准确度级别，由所用仪器的量程和级别、或只用级别就可以算出仪器误差的大小来.

仪器准确度级别的确定方法如下：

以电表为例. 对于电表，构成仪器误差的因素主要有以下几部分：(1)活动部分在轴承里的摩擦；(2)游丝的弹性不均匀及游丝的老化；(3)磁场强度的不均匀；(4)分度不均匀；(5)外界因素变动对仪表读数的影响；(6)调节仪表指针到所要求的示值时所引起的起伏；(7)检验用的标准所引起的误差(正常情况下，这一项引进的误差可以忽略). 仪表准确度等级就是根据这些可定的系统误差、不定的系统误差和偶然误差所造成的总的不确定度来决定的[5]. 据此可把仪器的最大可能误差表示成

$$\Delta_{仪}=|e|+C\sqrt{\varepsilon_R^2+\varepsilon_s^2}=|e|+C\varepsilon$$

或

$$\Delta_{仪}=|e|+3\varepsilon, \tag{15}$$

式中 e 为总的确定性误差(可定系统误差)，ε_R 和 ε_s 分别为总的偶然误差及未定系统误差的标准差，C为置信因子，其值取决于 ε 所服从的规律以及 $C\varepsilon$ 值的置信水平. 当 ε 近于高斯分布时，对应的置信概率 $P=0.99$ 时的 $C=2.58$，为了简化一般取 $C=3$，显然 $C\varepsilon$ 相当于偶然部分的极限误差. 如果检测和计算出的 $\Delta_{仪}$ 与其对应的量程之比等于0.18%，则把这只表定为0.2级. 一般精度级别高的(如0.2级，0.1

级)才进行这种严格和繁杂的检测和计算，对于0.5级以下的仪表，通常是借助标准仪表和它进行比较、校验，从而定出准确度级别．如果借助标准对它引入修正值，即从测量中去掉了确定的系统误差，则仪表的不确定度大约为由标称准确度级别计算出的误差值的一半（级别太低的仪表除外）．这就表明，当对仪表进行校正引入修正值后，就完全能保证测量的不确定度小于仪器准确度等级所给出的误差，亦即测量的准确度可以高于仪表的准确度．但应指出，对于0.2级以上的精密仪表不允许有修正值，原因是这类表的可定系统误差在制造时均得到消除或减至最小，而它在正常情况下的允许偏差已经改变了这个修正值，所以意义不大．综上所述可以看出，仪表的级别误差有系统误差（可定的），也有偶然误差（包括未定系统误差）的因素，究竟以哪个为主，对于不同仪表不尽相同．0.2级以上的仪表主要是偶然误差；实验室常用仪表（如0.5级），两种误差都有，且数值相近；级别低的和工业用仪表则主要是系统误差．因此，有些实验教材笼统地把仪表误差称为系统误差，并用仪器误差的大小来表示系统误差的数值，用代数方法与其它误差合成，显然这样做是会夸大测量结果的误差数值．同样，对于以系统误差为主的仪表，也不能用标准差或差等来反映测量结果的可靠程度．

六、直接测量结果的误差表示

由前述可知，直接测量结果精度的评定可以有下面的一些表示方法：

1．如测量中系统误差已排除或减至最小，且测量仪器又比较精确，这时，造成测量数据的起伏基本上是偶然误差，测量结果可用标准差、概差、平均误差或极限误差等来表示：

$$x = \bar{x} \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{K} (\delta x_i)^2}{K(K-1)}},\ (P = 0.682)\ 单位;$$

$$x = \bar{x} \pm 0.675\varepsilon_{\bar{x}},\quad (P = 0.50)\ 单位;$$

$$x = \bar{x} \pm \frac{\Sigma|\delta x_i|}{K\sqrt{K-1}},\ (P = 0.582)\ 单位;$$

$$x = \bar{x} \pm 3\varepsilon_{\bar{x}},\ (3\varepsilon_{\bar{x}}\ 为极限误差).$$

为了保证这四个表示式的准确性，测量次数K不应小于10次．如$K<10$次，测量数据将偏离正态分布．

2．对于一般教学实验，所用仪表或仪器的精度也很不一致，有的能反映出测量数据的起伏，有的则相反．为了计算简单，习惯上均未严格按偶然误差理论来处理数据，一般把结果表示成

$$x = \bar{x} \pm \frac{\Sigma|\delta x_i|}{K},$$

式中 $\frac{\Sigma|\delta x_i|}{K}$ 相当于最大误差．

下面写出三种情况下测量结果的误差表示法：

（1）仪器精度不高，测量条件比较稳定，多次测量同一物理量结果相近，测量结果的最大误差就用仪器误差表示，即

$$x = \bar{x} \pm \Delta x_{仪}.$$

（2）被测量不允许作多次测量时，这时测量结果的误差可表示成

$$x = x_{测} \pm \Delta x_{仪}.$$

（3）如多次测量的最大误差 $\frac{\Sigma|\delta x_i|}{K}$ 与仪器误差 $\Delta x_{仪}$ 接近相等，这时用 $\frac{\Sigma|\delta x_i|}{K}$ 或 $\Delta x_{仪}$ 表示测量结果的最大误差都可以．

总之，因为 $\Delta x_{仪}$ 或 $\frac{\Sigma|\delta x_i|}{K}$ 都是代表最大误差，所以不应把二者加起来作为结果的最大误差，一般取大的即可．

3．测量条件不符合仪器所要求的工作条件时，测量结果的最大误差宜把 $\frac{\Sigma|\delta x_i|}{K}$ 与 $\Delta_{仪}$ 加起来．例如箱式电桥（或电位差计等），由于仪器灵敏度不符合仪器对灵敏度的要求，这时将引进附加误差．因而当用该电桥测电阻时，测量结果应表示成

$$R = R_x \pm (R_x \cdot f\% + 0.2/s). \qquad (16)$$

(16)式是对应于一次测量，0.2 是判断检流计平衡的视差，f 是电桥的级数，S 是电桥灵敏度. 如进行了多次测量，则测量结果应写成

$$R = \bar{R}_x \pm \left(\bar{R}_x \cdot f\% + \frac{\Sigma |\delta R_{x_i}|}{K} \right). \quad (17)$$

这里应指出，(16) 和 (17) 式中的最大误差表示项中所包含的两部分宜用高斯合成法合成，以避免过分地扩大测量结果的误差数值.

(待续)

参 考 文 献

[1] L. G. Parratt, Probability and Experimental Errors in Science, New York, John Wiley & Sons, Inc., (1961), 65.
[2] 刘智敏，误差与数据处理，原子能出版社，(1981)，7.
[3] 何贡，计量技术，5 (1978)，36.
[4] 国际计量局，计量学报，3-2 (1982)，158.
[5] F. L. Hermach, *Communication and Electronics*, 54(1961), 90—95.

(上接第 30 页)

在颗粒为 2.5μm 的以 SD-1 石墨为原料爆炸合成的金刚石中分别混入重量比为 1.96% Fe 粉、1.96% Fe_2O_3 粉、1.96% Ti 粉、2.5% W 粉和 2.2% Co 粉，然后分别测量各个混合物的热性能，结果如图 5 所示. 从图 5 可以清楚地看到，某些杂质（如 Fe），对金刚石的氧化过程起抑制作用（负催化剂），而另一些杂质（如 Fe_2O_3、Co 等）则起促进作用（正催化剂），还有一些杂质（如W和 Ti）则影响不大. 另一个很有意思的现象是，加入 1.96% Fe 粉的金刚石的氧化过程（图 5 中的 a 曲线）与图 1 中的 b, c 两曲线的氧化过程极为相似. 因而我们推测，以球墨铸铁和生铁为原料爆炸合成的金刚石具有很高的抗氧化性能，一个重要原因是其中含有一定量的 Fe，起着抑制金刚石氧化的作用.

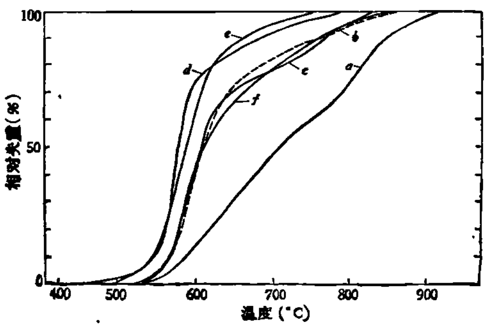

图 5 杂质对金刚石热性能的影响

a——含有 1.96% Fe 的爆炸金刚石；
b——含有 1.96% Ti 的爆炸金刚石；
c——含有 2.5% W的爆炸金刚石；
d——含有 1.96% Fe_2O_3 的爆炸金刚石；
e——含有 2.2% Co 的爆炸金刚石；
f——不含杂质的爆炸金刚石

有趣的是另外一组实验证明，同样的 Fe 粉却是石墨氧化过程的正催化剂. 可见，不同添加剂对某种物质的氧化过程的影响可以完全不同，而同一种添加剂对不同种类或不同结构的物质的氧化过程也可以起完全不同的作用. 这种氧化过程中的催化机理尚有待进一步研究. 然而，还原铁粉对金刚石和石墨氧化作用的这种截然相反的特性，恰好能在石墨和金刚石混合物的氧化分离过程中得到应用.

综上所述，我们可以得出如下初步结论：

(1) 人造金刚石的热性能因合成方法和所用原料的不同差别很大. 除颗粒大小、比表面积、晶体结构外，杂质的存在也是影响热性能的重要因素.

(2) 还原铁粉是金刚石表面氧化过程的负催化剂，而 Fe_2O_3，Co 等是正催化剂. 以生铁和球墨铸铁为原料合成的爆炸金刚石具有优异的抗氧化性能，其中一个重要的因素是铁在其中起了抑制氧化的作用.

(3) 在以球墨铸铁为原料爆炸合成的金刚石中，六方和立方型结构的金刚石热性能不同，立方型金刚石的抗氧化性更好一些.

(4) 较大颗粒的爆炸金刚石中晶体缺陷的存在，大大降低了金刚石的抗氧化性能.

本实验得到何寿安先生的宝贵指导及所内外一些同志的帮助，特此致谢.

参 考 文 献

[1] 中国科学院物理研究所、北京砂轮厂爆炸法人工合成金刚石小组，物理，1(1972)，37.