

腐 蚀 与 防 护 全 书

腐蚀试验数据的统计分析

中国腐蚀与防护学会 主编

曹楚南 编著

内 容 提 要

本分册介绍腐蚀试验数据的处理和表示方法。第1章着重介绍数据的有效位数的确定方法和实验数据的误差来源；第2章至第5章介绍属于正态分布的实验数据的分析处理和实验设计的基本概念和方法；第6章介绍两种不能用平均值来表示的点蚀试验数据的处理方法；第7章介绍线性响应关系及其应用。每种方法都附有相应的例子，以便读者具体掌握方法的应用。

本分册介绍的基本概念和方法，除适用于腐蚀与防护科技工作者外，对其他领域的科技工作者也有参考价值，同时也可做为大专院校有关专业师的参考书。

该书由宋哲哲审校。

腐蚀与防护全书 腐蚀试验数据的统计分析

中国腐蚀与防护学会 主编
曹楚南 编著

责任编辑：刘威
封面设计：许立

化学工业出版社出版发行
(北京和平里七区十六号楼)

化学工业出版社印刷厂印刷
新华书店北京发行所经销

开本 $850 \times 1168^{1/32}$ 印张 $4^{1/2}$ 字数117千字
1988年4月第1版 1988年4月北京第1次印刷

印 数 1—10,000

ISBN 7 5025 0085 5/TQ·47

定 价 1.30元

序

腐蚀与防护科学是本世纪30年代发展起来的一门综合性的技术科学，目前已成为一门独立的学科，并正在不断的发展。

腐蚀是材料在各种环境作用下发生的破坏和变质，遍及国民经济各个部门，给国民经济带来巨大的损失。根据工业发达国家的调查，每年因腐蚀造成的经济损失约占国民生产总值的2—4%，我国每年因腐蚀造成的经济损失至少达二百亿元。搞好腐蚀与防护工作，已不是单纯的技术问题，而是关系到保护资源、节约能源、节省材料、保护环境、保证正常生产和人身安全、发展新技术等一系列重大的社会和经济问题。因此，全面普及腐蚀科学知识，推广近代的防护技术，以减少腐蚀造成的经济损失，延长材料和设备的使用寿命，促进城乡经济的发展和企业经济效益的提高，是当前亟待解决的问题。

为此，中国腐蚀与防护学会和化学工业出版社决定共同组织编写《腐蚀与防护全书》。《全书》分总论、腐蚀理论、环境腐蚀与防护、耐蚀材料、防蚀技术、腐蚀试验与监控六篇数十个分册，并将陆续出版。

《全书》属于专业百科性质的大型综合性工具书，全面系统地阐述腐蚀学科的理论和应用，总结国内外的腐蚀与防护经验，反映近代的防护技术；内容广泛，兼顾知识性、教育性和实用性。主要供腐蚀与防护专业以及与该专业有关的工程技术人员阅读使用，也可供企业管理干部与大专院校有关专业师生参考。

《全书》编写工作曾得到腐蚀与防护领域许多专家、工程技术人员及其所在单位领导的热情协助和大力支持，对此，表示衷心地感谢。

由于我们水平有限，缺点和错误在所难免，望读者批评指正。

《腐蚀与防护全书》编委会

1987. 2

目 录

第1章 实验数据	1
1. 科学实验	1
1.1 科学实验的目的	1
1.1.1 科学实验的目的	1
1.1.2 两类科学实验	1
1.1.3 腐蚀试验	2
1.2 科学实验的步骤	2
a. 确定实验的具体目标	2
b. 收集有关资料	3
c. 确定实验内容	3
d. 实验安排设计	3
e. 进行实验	3
f. 数据的分析处理	4
g. 讨论和结论	4
2. 实验数据	4
2.1 数据的表示形式	4
2.2 数据的有效位数	5
2.3 末位有效数字的含意	5
2.4 4舍6入	6
2.5 尾数5的舍、入方法	6
2.6 和与差的有效位数	8
2.7 积与商的有效位数	8
3. 数据的误差	9
3.1 过失误差	9
3.2 系统误差	10
3.3 计算误差	11
3.1 偶然误差	12
4. 腐蚀试验数据	12
第2章 偶然误差的特点	14
1. 实验精度的表示方法	14
1.1 偏差与误差	14

1.1.1 偏差	14
1.1.2 误差	14
1.2 实验数据的精度	15
1.2.1 实验数据的精密度	15
1.2.2 实验数据的准确度	16
1.2.3 实验数据的精度	16
1.2.4 实验数据的精度的表示方法	16
2. 正态分布	17
2.1 由偶然因素引起的实验误差的特点	17
2.2 正态分布	18
2.3 u 值表	19
第3章 平均值	22
1. 统计方法	22
1.1 样本和统计量	22
1.1.1 总体参量	22
1.1.2 样本和统计量	22
1.2 真值和标准偏差的估计值	23
1.3 平均值的精度	24
2. t 分布	25
2.1 平均值的误差	25
2.2 t 分布和 t 值表	26
3. 平均值的表示方法	28
3.1 平均值的表示方法	28
3.1.1 置信范围	28
3.1.2 平均值的表示方法	29
3.2 重复试验的意义	30
第4章 简单的对比试验结果的处理	33
1. 判断实验值与预期值是否一致	33
1.1 预期值	33
1.2 判断实验值与预期值是否一致的方法	34
2. 判断对比试验的实验结果	36
2.1 两种对比试验	36
2.2 配对安排的对比试验结果的处理	37
2.3 随机安排对比试验结果的处理	39
3. 实验设计时应注意的问题	41
3.1 配对安排和随机安排的选择	41
3.2 显著水准的选择	44
3.3 重复试验次数的选择	45

第5章 差方分析	48
1. F 检定	48
1.1 差方和的分解	48
1.2 F 分布和 F 检定	52
2. 差方分析	53
2.1 单因素试验的差方分析	53
2.2 不考虑交互效应的多因素差方分析	56
3. 因素间的交互效应	59
3.1 因素的类型	59
3.2 因素间的交互效应	60
3.3 考虑交互效应的两因素差方分析	61
3.3.1 计算公式和差方分析表	61
3.3.2 进行 F 检定的规则	63
3.4 三因素试验的差方分析	66
4. 拉丁方和析因实验安排	72
4.1 拉丁方实验安排	72
4.1.1 拉丁方实验安排方法	72
4.1.2 拉丁方实验安排的优点	74
4.1.3 拉丁方的差方分析	76
4.2 析因实验安排	78
4.2.1 2^3 析因实验安排	78
4.2.2 一般的析因实验安排	80
第6章 关于点蚀试验的数据处理	82
1. 腐蚀活性点平均密度	82
1.1 泊松分布	82
1.2 试样上不出现腐蚀活性点时的推断方法	84
1.3 试样面积对于实验精度的影响	85
1.4 试样上出现大量腐蚀活性点时的数据处理方法	87
2. 关于腐蚀孔深度的统计规律	89
2.1 腐蚀孔平均深度的统计测定方法	89
2.2 最深腐蚀孔深度的统计规律	91
2.3 最深腐蚀孔深度统计值与取样面积的关系	94
2.4 设备穿孔前的使用寿命的统计规律	96
第7章 回应关系	99
1. 回应关系	99
1.1 回应关系	99
1.2 最小二乘法	100
1.3 回应线的置信范围	104

1.3.1 回应关系的差方估计值	104
1.3.2 参量 b 的置信范围	105
1.3.3 回应线的置信范围	106
1.4 变量之间相关性的判断	109
a. 对参量 b 的估计值的 t 检定	109
b. 利用相关系数 r 进行判断	110
2. 变数变换	111
2.1 半对数关系式的变换	112
2.2 双对数变换	114
2.3 抛物线关系式的变换	116
2.4 指数函数关系式的变换	120
附录	123
附表 1 双尾 u 值表	123
附表 2 双尾 t 值表	123
附表 3 F 值表	124
附表 4 $x = A_s \cdot \bar{n}$ 的置信范围	130
附表 5 r 值表	130
参考文献	131

第1章 实验数据

1. 科学实验

1.1 科学实验的目的

1.1.1 科学实验的目的

按照预订的目标、设想和计划,利用科学的方法和手段来取得关于客观世界某一事物、某一过程或某一方面的科学信息,叫作科学实验。科学实验的目的,从根本上说,是为了改造客观世界,但就每一科学实验的直接的目的来说,则是为了正确地获得所需要的科学信息。为此,除了正确地进行科学实验外,还要正确地分析处理实验数据。

1.1.2 两类科学实验

改造客观世界首先要了解客观世界,了解构成客观世界的各种物质的运动规律,并且要能在这种了解的基础上,采取有效的办法解决各种面临的具体科学技术问题。故就自然科学的范围来说,可以按照科学实验的具体目的将科学实验分成两类:

1) 为了了解客观世界而进行的科学实验。这包括为了了解各种事物的组成、结构及性能和特点,为了了解自然界中各种现象的本质及其产生原因,为了了解各种物质运动的规律,以及为了了解存在于客观世界的各种事物、现象和物质运动规律之间的错综复杂的关系等目的而进行的科学实验。

2) 为了解决面临的具体科学技术问题而进行的科学实验。这包括为了探求解决某一具体的科学技术问题的途径,为了检验为解决某项科学技术问题而拟订的计划、方案、办法和措施是否符合客观实际和能否达到预期效果,为了分析检查在改造客观世界的某项

实践中遭受挫折和失败的原因等目的而进行的科学实验。

1.1.3 腐蚀试验

腐蚀试验也是一种科学实验，故也可按进行腐蚀试验的具体目的而将腐蚀试验分成上述两类。

属于为了了解客观世界而进行的腐蚀试验是：为了积累数据而进行的各种现场挂片、曝置和埋设试验及在实验室中进行的评价各种金属材料在不同介质中的各种耐蚀性试验；为了了解各种腐蚀过程的发生原因和动力学规律；为了了解形成各种特殊形式的腐蚀破坏的原因和条件；为了了解金属材料的成份、金相组织、受力状态、加工过程等材质方面的因素和介质的成份、温度、流速等。环境方面的因素对腐蚀速度及腐蚀破坏形式的影响；为了了解某些腐蚀产物膜如钝化膜的生成和破坏条件及其对腐蚀速度与腐蚀破坏形式的影响；为了了解一些与腐蚀过程伴生的过程如金属中的渗氢过程的动力学规律及其对于金属材料性能的影响等。

属于为了解决面临的具体科学技术问题而进行的腐蚀试验是：为了发展新的耐蚀合金材料而进行的各种腐蚀试验；为了改进已有的防护技术和探索新的防护技术而进行的腐蚀试验；为了解决某项工程中设备的选材问题而进行的腐蚀试验；为了检验为某一特定体系拟订的防护措施的效果而进行的腐蚀试验；为了分析判断生产实践中发生某一腐蚀破坏事故的原因及寻找防止同类事故继续发生的办法而进行的腐蚀试验。

1.2 科学实验的步骤

为了获得可靠的实验数据并正确地 from 实验数据中得到所需要的科学信息，也为了提高科学实验的效率，科学实验应遵循正确的步骤进行。一项成功的科学实验，一般须经过下列 7 个主要步骤：

a. 确定实验的具体目标

实验的具体目标不同，实验的内容如实验所用的方法和材料、实验条件的安排和实验数据的分析处理等都会不同。例如：如果实验的具体目标是一般性的数据积累，就应考虑实验所用材料是否具

原
书
缺
页

和描述（包括摄影），一种是实验数据。实验数据是通过测量取得的，所测量的量都是物理量。测量是否准确，测得的实验数据是否可靠，是整个科学实验工作中最重要的问题。所谓实验数据是否可靠，就是指能否经受实验者本人和别人进行的重复测量的检验。

f. 数据的分析处理

在许多情况下，必须对实验数据进行分析处理，才能作出正确可靠的判断。特别是在同生产实践关系比较密切的科学实验中，影响实验结果的因素往往很多，实验过程又往往不能控制所有因素的变化情况，因而，一般说来实验结果分散性比较大，就特别需要应用统计分析方法对实验数据进行分析处理，以便从分散性较大的实验数据中分清和判断各种因素的影响，作出不掺杂主观成份的推论和判断。这情况正同需要信号分析技术来从噪声比较大的背景中取出有用的信号类似。

g. 讨论和结论

根据由数据分析所作出的判断，进一步讨论分析产生有关现象的原因和实验数据所反映的客观规律，以深化对面临科学问题的认识，从而归纳成相应的结论。

2. 实验数据

2.1 数据的表示形式

科学实验的结果，除了一些对现象的定性的描述外，主要以实验数据来表示。希望通过实验取得的科学信息，主要蕴含在实验数据中。故在记录实验数据，处理实验数据和用实验数据来交流由实验得到的科学信息时，应该以正确的形式来表示。实验数据，是指科学实验中通过测量得到的和经过各种运算和处理以后的所有数据。未经任何数据处理以前的实验数据，叫做原始实验数据。由 2 个或更多个实验数据平均得到的数据，叫做数据的平均值。实验数据的表示方式有两种：

- 1) 以有理数的形式表示 例如: 0.05 mA , 1.576 g 。
- 2) 以有理数乘以指数的形式表示 例如: $3.68 \times 10^{-3}\text{ g cm}^2 \cdot \text{h}$, $1.01 \times 10^3\Omega \cdot \text{cm}$ 。

2.2 数据的有效位数

不论以何种方式来表示, 数据的有效数字部分, 称为有效数字。组成有理数的数字个数, 称为有效位数。但 0 不能作为有效数字的第一位。若数码 0 处于数据的前面, 它就不算作有效数字, 因此在计算数据的有效位数时, 也不计入。相反, 若数码 0 处于数据的末位, 即使是在小数点后面, 也算作有效数字, 在计算数据的有效位数时, 应该计入。一般, 我们把有效位数为 n 的数据或数字, 称为 n 位有效数据或数字。例如: 1.576 是 4 位有效数字, 1.01×10^3 是 3 位有效数字, 0.25 是 2 位有效数字。 65.0 与 65 的有效位数不同, 前者是 3 位有效数字, 而后者则是 2 位有效数字。同样, 1.01×10^3 与 1010 的有效位数不同, 前者是 3 位有效数字, 后者则是 4 位有效数字。 0.05 是 1 位有效数字, 因为 0.05 与 5×10^{-2} 这两种表达形式, 含意完全一样。

2.3 末位有效数字的含意

数据 0.25 的含意是, 这个量真正的数值处于 0.245 至 0.255 之间。数据 65 与数据 65.0 的含意之所以不同, 是因为数据 65 的含意是这个量的真正数值处于 64.5 至 65.5 之间, 而数据 65.0 的含意是这个量的真正数值处在 64.95 至 65.05 之间。故一个数据的有效数字中, 从首位到倒数第 2 位是正确可靠的, 末位数是最佳推测值, 它不是代表数轴上的一个点, 而是一个区间, 它的范围是从数轴上左侧同末位数相邻的数点之间的中点开始到数轴上右侧同末位数相邻的数点之间的中点为止。例如, 数据 0.25 的含意如图 1-1 所示。

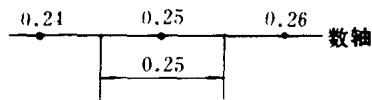


图 1-1 数据 0.25 的含意

2.4 4 舍 6 入

在一项实验中,用同样的仪器和实验方法所完成的各次测量的测量值,有效位数应该一样。通常在测量中除了可以从仪表上直接读出测量值的末位有效数字外,还能估计一个尾数。例如,如果用刻度可以读出 0.01mA 的毫安表测量极化电流,毫安表的指针往往会指在两个刻度之间。例如,指在 0.12mA 和 0.13mA 这两个刻度之间。如果指针比较靠近读数 0.12mA ,实验记录可以根据对指针位置的估计写作 $0.12(1)$, $0.12(2)$, $0.12(3)$ 或 $0.12(4)$;如果指针的位置比较靠近刻度 0.13mA ,根据实验人员对指针位置的估计,实验记录就可能写作 $0.12(6)$, $0.12(7)$, $0.12(8)$ 或 $0.12(9)$ 。括号中数字是估计尾数,并不是有效数。用这样的电流表得到的测量值应该是2位有效数,在整理实验记录时,如何来处理尾部的估计数?处理尾部估计数的原则是:凡是4和4以下的估计尾数,都舍去;凡是6和6以上的估计尾数,都进位,使末位有效数字进1。故 $0.12(1)$ 至 $0.12(4)$ 的原始记录,在整理数据时都写作 0.12 ; $0.12(6)$ 至 $0.12(9)$ 的原始记录,在整理数据时都写作 0.13 ,从而使实验数据都保持为2位有效数字。这种处理有效数字后面尾数的原则叫作4舍6入原则。这一原则不仅适用于原始实验数据的处理,也适用于数据的运算过程。

2.5 尾数5的舍、入方法

如在末位有效数字后面的估计尾数为5,可以采取下述办法决定尾数的舍、入:如尾数5前面的末位有效数字是偶数,就将尾数5舍去;如末位有效数字是奇数,就将尾数5进位,使末位有效数字变成偶数。这种方法叫做“舍、入成偶数”法。当然,也可以反过来,采取“舍、入成奇数”的方法,即,若尾数5前面的末位有效数字是奇数,将尾数5舍去;若尾数5前面的末位有效数字是偶数,尾数5就进位,使末位有效数字成为奇数。不论用哪一种方法,重要的是全部处理数据过程中要始终一致,只用一种方法。这

种方法的根据是，末位有效数字是奇数的概率和是偶数的概率是相同的，各为50%。只要始终采用上述两种方法中的一个来处理尾数5，那么尾数5舍、入的概率也就各为50%，即，大致有一半的机会被舍去，一半的机会进位。表1-1中第1列（实测数）所列出的是13个3位有效数字的测量数据，尾部估计数都是5。第2列（截尾）列出的是采取“5舍6入”的办法，把6以下的估计尾数都舍去以后的数据。第3列（进位）列出的是采取“4舍5入”的办法，把5以上的估计尾数都进位以后的数据。第4列中列出的是用“舍、

表 1-1 用不同方法处理尾数5的结果比较

1 (实测数)	2 (截尾)	3 (进位)	4 (舍、入成偶数)	5 (舍、入成奇数)
10.65	10.6	10.7	10.6	10.7
10.55	10.5	10.6	10.6	10.5
10.15	10.1	10.2	10.2	10.1
10.45	10.4	10.5	10.4	10.5
10.85	10.8	10.9	10.8	10.9
10.55	10.5	10.6	10.6	10.5
10.35	10.3	10.4	10.4	10.3
10.35	10.3	10.4	10.4	10.3
10.75	10.7	10.8	10.8	10.7
10.45	10.4	10.5	10.4	10.5
10.65	10.6	10.7	10.6	10.7
10.55	10.5	10.6	10.6	10.5
10.35	10.3	10.4	10.4	10.3
总 和	总 和	总 和	总 和	总 和
136.55	136.0	137.3	136.8	136.5

入成偶数”的办法处理后的3位有效数字；第5列中列出的是用“舍、入成奇数”的办法处理后的3位有效数字。表的最下面一行是13个数据的总和。13个3位有效数字之和是4位有效数字（参阅本章2.6段）。第一列的总和为136.6(5)，第5列的总和与之最接近，第4列次之，其余两列的总和离得都较远。在这13个数据中，末位有效数字是偶数的数据有5个，占总数的38.5%。末位有效数字是奇数的数据有8个，占总数的61.5%。数据个数愈多，它们的百分

比将愈接近50%，第4列和第5列的总和也将愈接近第1列的总和。

2.6 和与差的有效位数

对数据进行加、减运算时，应先采取舍、入的办法，使各个数据的末位有效数字的位数相同，然后进行加、减运算。所得和或差的有效位数，根据和或差的有效数字计算。和的有效位数有可能增加，差的有效位数有可能减少。

例：进行下列五组运算：1) $0.5182 + 1.061$ ；2) $0.518 + 0.682$ ；3) $51.8 + 0.132$ ；4) $0.518 - 0.3018$ ；5) $0.518 - 0.4664$ 。

解：

$$1) 0.5182 \text{ (4 位有效数字)} + 1.061 \text{ (4 位有效数字)} \\ = 1.579 \text{ (4 位有效数字)}$$

$$2) 0.518 \text{ (3 位有效数字)} + 0.682 \text{ (3 位有效数字)} \\ = 1.200 \text{ (4 位有效数字)}$$

$$3) 51.8 \text{ (3 位有效数字)} + 0.132 \text{ (3 位有效数字)} \\ = 51.9 \text{ (3 位有效数字)}$$

$$4) 0.518 \text{ (3 位有效数字)} - 0.3018 \text{ (4 位有效数字)} \\ = 0.216 \text{ (3 位有效数字)}$$

$$5) 0.518 \text{ (3 位有效数字)} - 0.4664 \text{ (4 位有效数字)} \\ = 0.052 \text{ (2 位有效数字)}$$

2.7 积与商的有效位数

1) 两个数据相乘或相除后所得积或商的有效位数，由有效位数少的数据决定。

例： $1.3 \text{ (2 位有效位数)} \times 173 \text{ (3 位有效位数)}$
 $= 2.3 \times 10^2 \text{ (2 位有效数字)}$

2) 但必须注意，在处理数据时，有些进入乘、除运算的数字并非实验中测量的实验数据，而是准确的数字。对于这些数字说来，不存在有效数字和有效位数的概念。它们进入乘、除运算后所得积或商的有效位数的计算，与这些数字无关。这些数字主要有两类。

一类是某些规定的换算比值,例如 $1.1\text{ m} = 1.1 \times 100 = 110\text{ cm}$ 。另一类是准确的计数,如重复试验的次数。

3) 平均值的有效位数有可能多于单个实验数据。这是因为,按照关于数据相加时所得和的有效位数的计算原则,所有重复试验的实验数据的总和,有效位数有可能多于单个实验数据。而在计算平均值时,作为除数的重复试验次数,乃是准确的数字,运算后所得平均值的有效位数,与它无关,只决定于作为被除数(重复试验的实验数据的总和)的有效位数。

例:求下列4个3位有效数字的数据的平均值:3.68, 3.66, 3.63, 3.61。

解:这4个数据的总和为4位有效数字14.58,故平均值为 $14.58 \div 4 = 3.645$ (4位有效数字)。

3. 数据的误差

实验数据的误差是指原始实验数据或经过简单运算后的数据同它们的“真值”,即应有的数值之间的差。有多种原因引起实验数据的误差。按照引起误差的原因分类,实验数据的误差有过失误差、系统误差、计算误差和偶然误差四个类别。

3.1 过失误差

过失误差也叫做疏忽误差,是由于工作者的疏忽引起的。例如:测量时由于疏忽而读错的数;记录时由于疏忽而记错的数;用计算器或计算机对数据进行处理时由于疏忽而按错了数字键等等。这种误差的消除,主要依靠工作时集中精力,从控制实验条件、测量读数、作记录到对于数据进行计算处理,每一步都细心谨慎,防止出差错。发生这种误差后,往往会使得实验数据或数据处理后的结果,出现一个异常的数值。在发现某个实验数据出现异常的情况下,实验工作者应该查找原因。若经过仔细的检查仍不能找出导致这个实验数据的数值异常的原因,则这个实验数据的异常,有可能是过失误差造成的,可以舍去。问题是,什么样的数据才可以算作异常的