

不贯通裂纹深度测量的 计算机自动修正

方志成 廖培福 陆丽华 邱庭训

(华侨大学)

(上海交通大学)

提 要

裂纹深度刻度曲线都是以贯通裂纹的标准试块来进行标定的,但是,实际裂纹都是不贯通的,这就牵涉到一个如何修正的问题。由于不贯通裂纹标准试块的加工非常困难,所以国外对此问题曾经研究了很久,得不到满意的结果。本文采用了计算机技术,初步比较满意地解决了这方面的问题。

前 言

用电位法测量裂纹深度,由于测得电压信号 U 与裂纹深度 Y 是相关关系,因此不能用确定性变量关系进行仪器刻度。为此,作者首次提出应该采用概率统计方法,并配以计算机技术来求出刻度曲线的数学模型,即回归方程。这在第二篇论文“裂纹深度刻度曲线的数学模型与计算机程序”中已做了详细的阐述,SJD~51型电位法裂纹深度测量仪的刻度曲线即按论文中所提出的方法进行刻度,实践证明,这种用概率分布的刻度方法,无论在适用性或准确度方面,都比用单个特定试块进行刻度标定来得好。但是裂纹深度的刻度曲线是一个很复杂的问题,它受到很多测试条件的约束^[4],其中较突出的是贯通与不贯通裂纹的修正问题。大家知道,仪器刻度曲线是以贯通裂纹的标准试块来进行统计标定的,但是实际裂纹大多是不贯通的,而加工不贯通裂纹的标准试块是非常困难的,国外曾经在这方面研究了很久,仅得出三根修正曲线,而实际应用是需要大量修正曲线。为此,本文作者首次采用了计算机技术,应用了插补和自动逼近修正的原理,初步比较完满地解决了这方面的问题。

一、不贯通与贯通裂纹刻度曲线的修正机理

图1为一不贯通裂纹的标准试块,从图上可以看出,激励电流 I 在试件的流通途径有 x , z 两条支路, x 路径是沿着裂纹边沿走的,其路径长短与裂纹深度 D 有关,而 z 路径是沿着试

块表面走的,其路经长短与裂纹长度 L 有关, x, z 形成两条并联支路,因此将使整个电阻值降低,所以在同样裂纹深度 D 情况下从内侧两根探针所取得信号电压,不贯通裂纹将比贯通裂纹来得低,这种作用称为分流效应。显而易见,随着 L/D 值的不同,分流效应的强弱也不同,如果 L/D 大于或等于某一数值,设为 k_D , 这时分流效应很不显著,甚至可忽略不计,也就是说这时不贯通裂纹实质上与贯通裂纹差别不大,其测量结果仍然可以按贯通裂纹的刻度曲线来处理,如果在实际测试时,实际条件的 L/D 值是小于 k_D 值,那测试结果就非要进行修正不可,否则将会产生

很大的误差,但是,不同的 L/D 值有不同的修正系数,这是一个很复杂的问题,因此日本花了很长时间得出三根修正曲线(即 $D = 5, 10, 15\text{mm}$),如图2所示,一般可表示成 $y_n = f_n(L/D)$ 。由图2可见,不同 D 值,它所对应的 L/D 测试条件也不同。

如 $D = 15$, 测试条件规定 $\frac{L}{D} > 3.5$

$D = 10$, 测试条件规定 $\frac{L}{D} > 5$

$D = 5$, 测试条件规定 $\frac{L}{D} > 6$

又如仪表读数 $D_a = 10$, 但如 $L = 45$, 用 $D = 15$ 的修正曲线试探,则 $L/D = 3$, 由此得出 $y_1 = 13$, $y_1 \neq D_a$ 且大于 D_a 。又用 $D = 10$ 的修正曲线试探,则 $L/D = 4.5$, 由此得出 $y_2 = 9.5$, $y_2 \neq D_a$ 且小于 D_a , 如图2所示。由此可知,真正的 D 值是在 $D = 10$ 和 $D = 15$ 两根修正曲线之间,要得出真正的 D 值就必须解决两个问题:

- ①需要有一套完整的 $D - L/D$ 修正曲线;
- ②需要自动逼近寻找。

显然,上述的第一问题,纯粹要依靠加工大量不贯通裂纹的标准试块来进行统计标定,在目前工艺条件下是不大可能的,所以本文作者是采用计算机扞补技术来解决。而第二个问题,要用人工方法来寻找到某根 $D - L/D$ 修正曲线,使其既能满足 L/D 值,又能满足 $y = D_a$, 是一件够麻烦的事情。本文作者同样提出采用计算机技术,并设计了一套自动逼近修正程序,实践证明其结果是令人满意的。

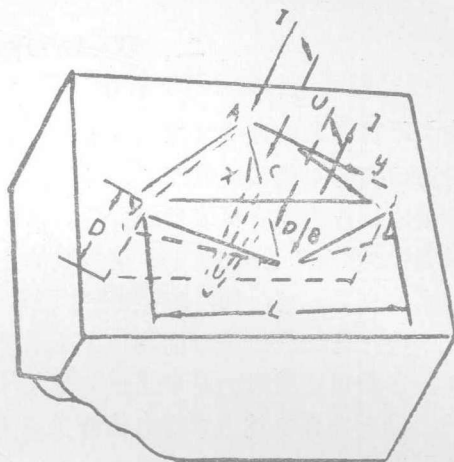


图1 I在试件中的流通途径示意图

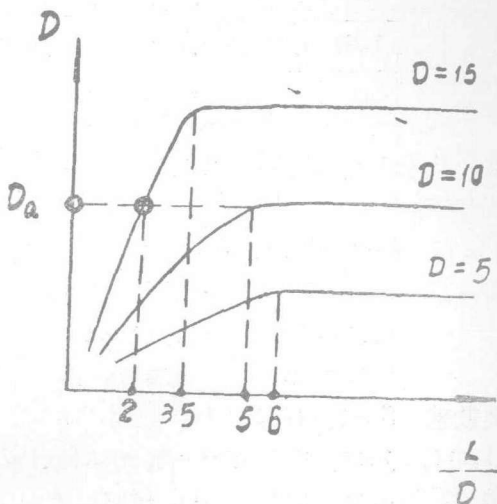


图2 L/D 值对测量的影响

二、D-L/D修正曲线的计算机求法

由于不贯通裂纹的试块加工很困难,故不容易得到大量的统计样本数据,因此有必要探讨一种方法使有限的试块能在一定精确度条件下得到较好的修正结果。利用计算技术可以实现这些要求。首先用有代表性的有限的试块的数据求出数学模型,目前暂以日本《非破坏性检查》第12卷第5号登载的45钢三根修正曲线作为我们的原始数据(见表1),然后利用插补技术,在 $D=15, 10, 5$ 三根修正曲线之间再插入若干根修正曲线,精确度要求高时可多插入一些。目前我们是以间隔为1毫米来细分,于是可得15根修正曲线,(图2,仅描三根)。各根修正曲线的测试条件(即 $L/D=k_D$ 应取多大)也要根据现有样本数据的规律来插补。应用计算机技术求得各根修正曲线的方法如下:

1、以日本的三条曲线为基准,三条曲线查对数值列于表1。

表1 日本三条修正曲线数值

L/D	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	6	D = 5	
D	1	1.75	2.5	3.1	3.7	4.2	4.5	4.7	4.8	5		
L/D	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	5		D = 10	
D	1	2.5	4.5	6.25	7.7	8.5	9.1	9.5	10			
L/D	0.3	0.5	0.7	0.8	1	1.23	1.4	2	2.5	2.9	3	3.5
D	1	2	3	4	5	6	7	10	12.5	14	14.25	15

2、从表1数据及用第二篇论文“裂纹深度刻度曲线的数学模型与计算机程序”求出回归方程如下:

$$D=15, \hat{y}=0.137318x^4+0.77099x^3+1.69698x^2+6.96477x-1.03821$$

$$\begin{aligned} \text{差值: } & 0.0818062, \quad -0.107719, \quad -0.237056, \quad 0.213962, \\ & 0.13675, \quad -0.0315024, \quad 0.0255384, \quad -0.0742436, \\ & 0.0496693, \quad 0.0205288, \quad -0.0272703, \quad -0.000430107, \end{aligned}$$

$$\text{离散差 } S=0.149009$$

$$D=10, \hat{y}=0.0743255x^4-0.808548x^3+2.39156x^2+0.973272x-0.0270276$$

$$\begin{aligned} \text{差值: } & 0.0389242, \quad -0.103584, \quad 0.0386801, \quad 0.0434079, \\ & 0.0767999, \quad -0.106428, \quad -0.0630531, \quad 0.0886593, \\ & -0.0133845, \end{aligned}$$

$$\text{离散差 } S=0.105908$$

$$D=5, \hat{y}=0.0111978x^4-0.153371x^3+0.527534x^2+0.789207x-0.168531$$

$$\begin{aligned} \text{差值: } & 0.00603557, \quad 0.00870967, \quad 0.0277889, \quad -0.042558, \\ & -0.0128872, \quad 0.0394478, \quad 0.0202971, \quad 0.018714, \\ & 0.00695562, \quad 0.4579557, \end{aligned}$$

离散差: $S = 0.0414423$

3、求插补程序

4、求转折点插补程序, 並由此得出 $D-L/D$ 修正曲线族转折点的数学模型如下:

$$\left. \begin{aligned} D=15 \sim 10, \quad \hat{g} &= 26.6667 - 3.3333x \\ D=10 \sim 5, \quad \hat{g} &= 35 - 5x \\ D=5 \sim 0, \quad \hat{g} &= 35 - 5x \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式(1)中 \hat{g} 就是 $D-L/D$ 修正曲线的 D 值, 而 x 则为 L/D 值。从式(1)可求得各根修正曲线的转折点 k_D 值, 亦即贯通与不贯通裂纹的测试条件如表 2。

表 2

修正曲线 号 $D =$	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
测试条件 k_D	3.5	3.8	4.1	4.4	4.7	5	5.2	5.4	5.6	5.8	6	6.2	6.4	6.6	6.8

只要 L/D 大于或等于表 2 所列数值时, 不贯通裂纹就可近似作为贯通裂纹处理, 即 SJD-51 型表面裂纹测深仪的读数 D_s 就是实际的裂纹深度 D 。当不符合测试条件时, 就要靠测试人员去查图 3 的 $D-L/D$ 修正曲线来解决。由于横坐标 L/D 中有变量 D , 必须查得实际的裂纹深度时才能得到准确的 L/D 值, 而查修正曲线又必须先知 L/D 值, 所以如果不用计算机自动逼近, 要试探多次才能找到。

5、总插补曲线图:

利用上述插补数据及插补程序, 可求出下列 15 根回归曲线的方程:

$$D=15, \quad \hat{g} = -0.137318x^4 + 0.77099x^3 - 1.69698x^2 + 6.96477x - 1.03821$$

$$S = 0.149009$$

$$D=14, \quad \hat{g} = -0.0201276x^4 - 0.0940078x^3 + 0.443152x^2 + 4.58726x - 0.508839$$

$$S = 0.0805898$$

$$D=13, \quad \hat{g} = 0.0517439x^4 - 0.667117x^3 + 2.03247x^2 + 2.4809x + 0.00178776$$

$$S = 0.0880256$$

$$D=12, \quad \hat{g} = 0.0734754x^4 - 0.829371x^3 + 2.46609x^2 + 1.651x + 0.0954599$$

$$S = 0.0677104$$

$$D=11, \quad \hat{g} = 0.0789622x^4 - 0.863746x^3 + 2.56274x^2 + 1.15886x + 0.0865727$$

$$S = 0.036484$$

$$D=10, \quad \hat{g} = 0.0743255x^4 - 0.808548x^3 + 2.39156x^2 + 0.973272x - 0.0270276$$

$$S = 0.105908$$

$$D=9, \quad \hat{g} = 0.0437667x^4 - 0.475581x^3 + 1.23148x^2 + 2.18061x - 0.701689$$

$$S = 0.0620814$$

$$D=8, \quad \hat{g} = 0.0273469x^4 - 0.301727x^3 + 0.69486x^2 + 2.38954x - 0.853291$$

$$S = 0.0676299$$

$$D=7, \quad \hat{g} = 0.0163333x^4 - 0.183426x^3 + 0.348203x^2 + 2.34825x - 0.898929$$

$$S = 0.051441$$

$$D = 6, \hat{g} = 0.0127886x^4 - 0.155577x^3 + 0.380237x^2 + 1.67227x - 0.594359$$

$$S = 0.0258065$$

$$D = 5, \hat{g} = 0.0111978x^4 - 0.153371x^3 + 0.527534x^2 + 0.789207x - 0.168531$$

$$S = 0.0414423$$

$$D = 4, \hat{g} = 0.0080918x^4 - 0.109018x^3 + 0.354699x^2 + 0.76201x - 0.216026$$

$$S = 0.00543979$$

$$D = 3, \hat{g} = 0.00546628x^4 - 0.0750811x^3 + 0.238316x^2 + 0.616465x - 0.185472$$

$$S = 0.00757136$$

$$D = 2, \hat{g} = 0.00327086x^4 - 0.0452315x^3 + 0.138895x^2 + 0.444695x - 0.14149$$

$$S = 0.0126893$$

$$D = 1,$$

$$\hat{g} = 0.00142453x^4$$

$$- 0.0198498x^3$$

$$+ 0.0565871x^2$$

$$+ 0.244863x$$

$$- 0.0836834$$

$$S = 0.00473261$$

根据上列15个数
学模型可绘出15根
D-L/D修正曲线, 如
图3所示。

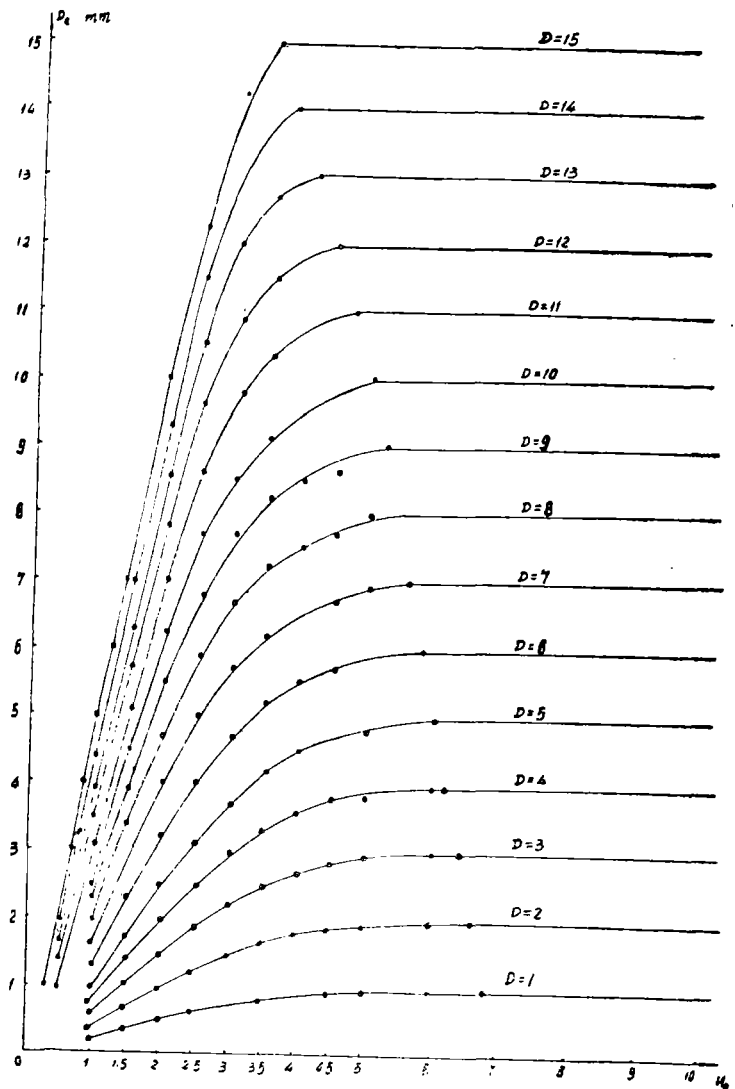


图3 D-L/D修正曲线(15根)

三、利用计算机自动逼近修正的基本原理及程序的流程图

目前我们是用 TRS—80 微型机采取比较直观的自动逼近方法来求出实际裂纹深度的近似值。每次都是从最大序号的修正曲线开始搜索。因为一般裂纹的表面长度 L 是可以测量出来的, 规定一根修正曲线, 即可求出第一个 L/D 值来进行试探, 由此值在该修正曲线上查得对应的 y_M 值, 如果 $y_M > D_a$, 表示应向序号小的修正曲线去寻找, 直到找出第 n 根修正曲线对应的 $y_n \approx D_a$ 为止。这根修正曲线序号代表的裂纹深度即为实际的裂纹深度, 程序流程图见图 4。

通过用各种代表性数据 (模拟 SJD—51 型表面裂纹测深仪的读数) 由键盘打入计算机进行自动修正, 其结果与人工查修正曲线所得结果基本相符。检验结果见表 3 和表 4。(表中 L 表示表面裂纹的长度, D_a 为仪器读数, D 为计算机修正后显示的数据, 单位都是毫米)。判别是否符合测试条件也由计算机自动进行。

由表 4 中看出自动修正非常必要, 如 $L=15$ 时, 测得 $D_a=4$, 结果实际裂纹深度 D 应为 6。而当 $L=12$ 时, 测得 $D_a=3$, 而实际裂纹深度也为 6。又如当 $L=28.8$, 测得 $D_a=7.2$, 实际应有 $D=8$, 而当 $L=24$ 时, 测得 $D_a=7.5$ 与前者相近, 但实际这时应有 $D=11$, 如果不进行修正, 必然

误差非常大。目前正在研究联机问题, 即将单板机与测试仪器联接在一起, 使其成为智能仪器, 测试条件的判别与不贯通裂纹刻度曲线的修正全为自动。

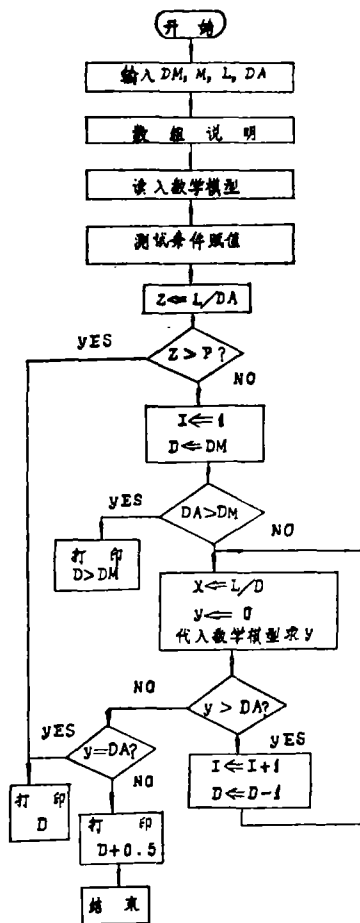


表 3

(L/D 等于表 2 所列的测试条件)

L	6.8	13.2	19.2	24.8	30	34.8	39.2	43.2	46.8	50	51.7	52.8	53.3	53.2	52.5
Da	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
D	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15

表 4 (L/D小于表 2 所列的测试条件)

L	9	14	15	12	30	28.8	21	32.8	36	24	33.6	30.6
Da	1.7	3.5	4	3	6.4	7.2	6	8.2	10	7.5	11.2	10.2
D	2	5	6	6	7	8	8	9	11	11	15	15

参 考 文 献

- 〔1〕 亀裂の長さ と深さの比が深さの測定値に及ぼす影響について, 非破壊検査, (1963)。
- 〔2〕 非破壊検査便覧, 日刊工業新聞社, (1978)
- 〔3〕 方志成, 实验数据处理(上海交大讲义), (1980)。
- 〔4〕 方志成等, 交流电位法裂纹深度测量仪, 华侨大学学报, 2 (1982)。
- 〔5〕 方志成等, 裂纹深度刻度曲线的数学模型与计算机程序, 华侨大学学报, 1 (1983)。
- 〔6〕 华南工学院电子计算机与算法语言, (1980)。
- 〔7〕 亀裂深度测定器A—5型, 日本飞机株式会社, (1978)。
- 〔8〕 中国科学院, 概率统计计算, (1978)。