

LS-5 型铜、铝构件裂纹测深仪

方志成 杜 民 廖培福

(华侨大学)

(上海交通大学)

摘 要

铜、铝构件裂纹深度的精确测量,一直是无损检测的一项难题。本文作者在解决了钢类构件裂纹深度精确测量研究之后,根据铜、铝构件的特点,设计了低频交流恒电流源,并用数理统计和计算机技术求出了铜、铝构件裂纹深度刻度曲线的数学模型,应用该模型研制出的 LS-5 型裂纹深度测量仪,已于 1985 年 4 月在上海探伤机厂进行产品鉴定。认为填补国内空白。

前 言

在宇航技术中,很多场合用到铜、铝构件,对它们的裂纹深度如何进行精确的测量,就成为无损检测技术中一项很重要的课题。LS-5 型裂纹测深仪,就是专为解决这方面测量设计的。

一、铜、铝构件裂纹深度精确测量所存在的问题

由于铜、铝构件的电阻值比钢类构件起码要小一个数量级,因此同样采用图 1 的四探针探头,其有用信号要比钢类构件小几十倍,而干扰信号两者基本相同,这样如果仍然用测量钢类构件的裂纹深度测量仪来测试铜、铝构件的裂纹深度,其信噪比必然要小得多,甚至无法测量。本文作者根据这个矛盾的特殊性,致力于抑制干扰信号的研究。

最主要的噪声源是两外侧探针通了交流电流后,会对内侧两探针、传感器内部弹簧、导线等产生了感抗 $x_L = 2\pi fL$,从而产生了感应电势 e_L ,钢类裂纹深度测量仪大都是采用高频交流恒电流源(一般频率为 1000—2000Hz),因此这个感应电势比起反映裂纹深度的信号要大得多,甚至使测量成为不可能,根据上述情况,作者研制了低频交流恒电流源($f=17\text{Hz}$),并对传感器探针、弹簧、连接导线做了特殊布置,这样,信噪比得到很大程度的提高,使铜、铝构件裂纹深度的测量成为可能。该仪器的框图如图 2 所示。

本文 1986 年 5 月 15 日收到。

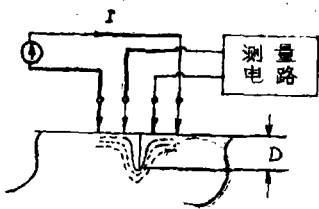


图 1 测量裂纹深度四探针探头

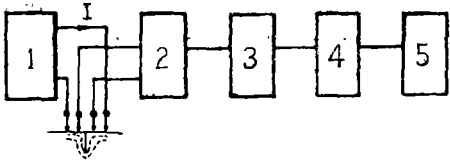


图 2 裂纹深度测量仪方框图

1—交流低频恒电流源； 2—前置放大；
3—选频放大； 4—检波； 5—数字显示

二、建立数学模型的必要条件

由于数理统计是建立在大量实验数据的基础上，因此要得到可靠有用的统计样本数据，必须具备下列4个条件。

- 1. 要有一台高精度（即重复性很好）的铜、铝构件裂纹深度测量仪，尽管这个时候仪器的刻度曲线尚未求出，但可以用这台仪器对人工试块来进行裂纹深度 y 和其所对应电压比 x 的测试，以取得可靠的统计样本数据 (y_n, x_n) 。
- 2. 要研制具有各种代表性的材质和尺寸的标准试块，这样，统计样本的数据才具有代表性。
- 3. 以裂纹深度 y 做为置定值，并用比测量 x 精确度高得多的测试手段来读取 y 的数值。由于采用了工具显微镜，误差可控制在 $\pm 0.5\%$ 以内，因此可认为 y 的误差相对 x 而言可以忽略。
- 4. 统计样本的选取也是一个很重要的问题，一般可按材质及尺寸范围来分类。

三、数据的测试与处理

标准试块按材质共分二类，即LY12和LF6（高强度及普通防锈铝）。然后根据尺寸（宽，厚，长）分成几种，测得人工裂纹深度 y 和电压比 x 关系如下：其测得数据分别如表1—8所示。

表 1 [材料LY12, 尺寸20×20×175mm, 零与满度(6mm)比率为1: 2.83]

人工裂纹深度 y	电压比 x 读数					电压比读数平均值 \bar{x}
	1	2	3	4	5	
0mm	450	451	446	447	448	$\bar{x}_0 = 448.4\text{mv}$
1mm	512	510	510	506	512	$\bar{x}_1 = 510\text{mv}$
2mm	670	667	666	676	670	$\bar{x}_2 = 669.8\text{mv}$
3mm	843	840	844	839	837	$\bar{x}_3 = 840.6\text{mv}$
4mm	982	991	992	988	987	$\bar{x}_4 = 988\text{mv}$
5mm	1128	1128	1132	1128	1120	$\bar{x}_5 = 1127.2\text{mv}$
6mm	1265	1272	1269	1266	1276	$\bar{x}_6 = 1269.6\text{mv}$

表 2 (材料 LY12, 尺寸 $20 \times 28 \times 175 \text{mm}$, 零与满度 (6mm) 比率为 1: 2.81)

人工裂纹深度 y	电压比 x 读数					电压比读数平均值 \bar{x}
	1	2	3	4	5	
0mm	442	445	442	444	442	$\bar{x}_0 = 443 \text{mv}$
1mm	509	516	511	516	513	$\bar{x}_1 = 513 \text{mv}$
2mm	660	663	667	668	663	$\bar{x}_2 = 664.2 \text{mv}$
3mm	824	830	827	835	829	$\bar{x}_3 = 829 \text{mv}$
4mm	985	977	977	978	976	$\bar{x}_4 = 978.6 \text{mv}$
5mm	1118	1123	1115	1115	1110	$\bar{x}_5 = 1116.2 \text{mv}$
6mm	1247	1238	1241	1240	1248	$\bar{x}_6 = 1242.8 \text{mv}$

表 3 (材料 LY12, 尺寸 $25 \times 25 \times 195$, 零与满度比率为 1: 2.7)

人工裂纹深度 y	电压比 x 读数					电压比读数平均值 \bar{x}
	1	2	3	4	5	
0mm	440	435	438	434	437	$\bar{x}_0 = 437.4 \text{mv}$
1mm	514	515	516	520	515	$\bar{x}_1 = 516 \text{mv}$
2mm	660	658	663	658	660	$\bar{x}_2 = 659.8 \text{mv}$
3mm	820	822	823	821	814	$\bar{x}_3 = 820 \text{mv}$
4mm	963	965	967	961	969	$\bar{x}_4 = 965 \text{mv}$
5mm	1084	1080	1076	1084	1081	$\bar{x}_5 = 1081 \text{mv}$
6mm	1188	1177	1182	1190	1192	$\bar{x}_6 = 1185.8 \text{mv}$

表 4 (材料 LY12, 尺寸 $35 \times 25 \times 195$, 零与满度比率为 1: 2.5)

人工裂纹深度 y	电压比 x 读数					电压比读数平均值 \bar{x}
	1	2	3	4	5	
0mm	442	441	439	439	439	$\bar{x}_0 = 440 \text{mv}$
1mm	509	507	508	505	508	$\bar{x}_1 = 507.4 \text{mv}$
2mm	636	636	636	644	638	$\bar{x}_2 = 638 \text{mv}$
3mm	793	794	800	799	793	$\bar{x}_3 = 795.8 \text{mv}$
4mm	917	920	917	924	919	$\bar{x}_4 = 919.4 \text{mv}$
5mm	1030	1032	1030	1040	1040	$\bar{x}_5 = 1034.4 \text{mv}$
6mm	1124	1119	1127	1127	1120	$\bar{x}_6 = 1123.4 \text{mv}$

表 5 (材料 LY12, 尺寸 35×45×210, 零与满度比率为 1: 5.1)

人工裂纹深度 y	电压比 x 读数					电压比读数平均值 \bar{x}
	1	2	3	4	5	
0mm	496	500	502	502	500	$\bar{x}_0 = 500\text{mv}$
5mm	1207	1213	1215	1210	1199	$\bar{x}_5 = 1208.8\text{mv}$
10mm	1587	1580	1600	1598	1602	$\bar{x}_{10} = 1593.4\text{mv}$
15mm	1887	1876	1876	1860	1896	$\bar{x}_{15} = 1879\text{mv}$
20mm	2077	2082	2074	2074	2088	$\bar{x}_{20} = 2079\text{mv}$
25mm	2316	2309	2303	2300	2311	$\bar{x}_{25} = 2307.8\text{mv}$
30mm	2565	2549	2546	2538	2556	$\bar{x}_{30} = 2550.8\text{mv}$

表 6 (材料 LF6, 尺寸 40×25×133, 零与满度比率为 1: 2.4)

人工裂纹深度 y	电压比 x 读数					电压比读数平均值 \bar{x}
	1	2	3	4	5	
0mm	431	431	431	427	427	$\bar{x}_0 = 429.4\text{mv}$
1mm	482	482	488	492	492	$\bar{x}_1 = 487.2\text{mv}$
2mm	617	615	613	611	611	$\bar{x}_2 = 613.4\text{mv}$
3mm	745	744	746	748	745	$\bar{x}_3 = 745.6\text{mv}$
4mm	846	856	860	861	865	$\bar{x}_4 = 857.6\text{mv}$
5mm	958	950	948	950	948	$\bar{x}_5 = 950.8\text{mv}$
6mm	1028	1029	1036	1030	1039	$\bar{x}_6 = 1032.4\text{mv}$

表 7 (材料 LF6, 尺寸 25×25×133, 零与满度比率为 1: 2.02)

人工裂纹深度 y	电压比 x 读数					电压比读数平均值 \bar{x}
	1	2	3	4	5	
0mm	415	420	439	439	440	$\bar{x}_0 = 415.6\text{mv}$
1mm	444	444	439	439	440	$\bar{x}_1 = 441.2\text{mv}$
2mm	515	515	512	512	512	$\bar{x}_2 = 513.2\text{mv}$
3mm	594	595	599	599	596	$\bar{x}_3 = 596.6\text{mv}$
4mm	686	985	677	675	683	$\bar{x}_4 = 681.2\text{mv}$
5mm	755	754	754	750	753	$\bar{x}_5 = 753.2\text{mv}$
6mm	845	838	839	837	839	$\bar{x}_6 = 839.6\text{mv}$

表 8 (材料 LF6, 尺寸 30×50×210, 零与满度比率为 1: 6.1)

人工裂纹深度 y	电压比 x 读数					电压比读数平均值 \bar{x}
	1	2	3	4	5	
0mm	550	546	545	545	550	$\bar{x}_0 = 547.2\text{mv}$
5mm	1540	1546	1539	1550	1550	$\bar{x}_5 = 1545\text{mv}$
10mm	2086	2096	2104	2088	2102	$\bar{x}_{10} = 2095.2\text{mv}$
15mm	2456	2457	2442	2462	2448	$\bar{x}_{15} = 2453\text{mv}$
20mm	2742	2757	2760	2727	2748	$\bar{x}_{20} = 2746.8\text{mv}$
25mm	3030	3029	3018	3027	3049	$\bar{x}_{25} = 3030.6\text{mv}$
30mm	3342	3351	3349	3373	3348	$\bar{x}_{30} = 3352.6\text{mv}$

四、数学模型的建立

根据测得数据, 可归并为四种统计样本, 即

LY12, 裂纹深度量程从 0—6mm,

LY12, 裂纹深度量程从 0—30mm,

LF6, 裂纹深度量程从 0—6mm,

LF6, 裂纹深度量程从 0—30mm.

无论是哪一种统计样本, 都可以按下列概念来建立数学模型.

设共测得 N 对 (x_n, y_n) 数据, $n=1, 2, \dots, N$. 一般地说, 函数 $y=f(x; a_0, a_1, a_2, \dots)$ 总可以用一个含有 $(M+1)$ 个参数的 M 阶多项式来逼近, $(M+1 < N)$, 即

$$\begin{aligned} y &= f(x; a_0, a_1, a_2, \dots) \\ &= a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + \dots + a_M x^M \end{aligned} \quad (1)$$

根据实践经验用四阶多项式逼近已能达到足够的精确度, 所以式 (1) 可写成

$$y = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3 + a_4 x^4$$

关键问题是要求出 a_0, a_1, a_2, a_3, a_4 诸参数的最佳估计值, 根据最小二乘法原理, 剩余误差总和应达最小, 即

$$\sum_{n=1}^N v_n^2 = \sum_{n=1}^N [y_n - f(x_n; a_0, a_1, a_2, a_3, a_4)]^2 = \min \quad (3)$$

要求 a_0, a_1, a_2, a_3, a_4 能满足最小二乘法条件, 也就是要求

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial a_0} \sum v_n^2 &= 0 \\ \frac{\partial}{\partial a_1} \sum v_n^2 &= 0 \\ &\vdots \\ \frac{\partial}{\partial a_4} \sum v_n^2 &= 0 \end{aligned} \quad (4)$$

亦即要求解下列方程组

$$\begin{aligned} \sum \left[y_n - f(x_n, a_0, a_1, a_2, a_3, a_4) \right] \left(\frac{\partial f}{\partial a_0} \right)_n &= 0 \\ \sum \left[y_n - f(x_n, a_0, a_1, a_2, a_3, a_4) \right] \left(\frac{\partial f}{\partial a_1} \right)_n &= 0 \\ &\vdots \\ \sum \left[y_n - f(x_n, a_0, a_1, a_2, a_3, a_4) \right] \left(\frac{\partial f}{\partial a_4} \right)_n &= 0 \end{aligned} \tag{5}$$

方程组 (5) 称为正规方程, 从正规方程解出的 a_0, a_1, a_2, a_3, a_4 值, 即为诸参数的最佳估计值 $\hat{a}_0, \hat{a}_1, \hat{a}_2, \hat{a}_3, \hat{a}_4$ 。式 (5) 可写成下列形式:

$$\begin{aligned} Na_0 + (\sum x)a_1 + (\sum x^2)a_2 + (\sum x^3)a_3 + (\sum x^4)a_4 &= \sum y \\ (\sum x)a_0 + (\sum x^2)a_1 + (\sum x^3)a_2 + (\sum x^4)a_3 + (\sum x^5)a_4 &= \sum xy \\ (\sum x^2)a_0 + (\sum x^3)a_1 + (\sum x^4)a_2 + (\sum x^5)a_3 + (\sum x^6)a_4 &= \sum x^2y \\ (\sum x^3)a_0 + (\sum x^4)a_1 + (\sum x^5)a_2 + (\sum x^6)a_3 + (\sum x^7)a_4 &= \sum x^3y \\ (\sum x^4)a_0 + (\sum x^5)a_1 + (\sum x^6)a_2 + (\sum x^7)a_3 + (\sum x^8)a_4 &= \sum x^4y \end{aligned} \tag{6}$$

根据所测得 N 对 (x_n, y_n) 数据, 算出式 (6) 有关系数, 然后求解式 (6) 联立方程组, 即得 a_0, a_1, a_2, a_3, a_4 的最佳估计值, 再代入式 (2), 即得刻度曲线的数学模型, 由于本文共讨论了四种统计样本, 因此应该有四个数学模型。这四个数学模型可以用计算机求出, 以此做为仪器刻度曲线的依据。

五、仪器的测试记录

1. 裂纹深度实测数据, 见表 9。

表 9		
仪表示值	裂纹实测深度	误差(mm)
2	2	±0
1.5	1.52	-0.02
1	1.02	-0.02
0.5	0.47	+0.03
6	6	±0
5	4.98	+0.02
4	4.1	-0.1
3	3.1	-0.1
2	2.03	-0.03
1	1.05	-0.05

仪器实测结果, 符合 ±7.5% 精度的要求。

2. 与西德的 KRAVTKAMER 公司生产的 X-RT705 产品相比较

西德 X-RT705		LS-5 型
量 程	0—3 (mm) 0—12 (mm)	0—2 (mm) 0—6 (mm)
激磁频率	0	~17Hz
精 度	/	按规定条件 $\pm 7.5\%$
重 复 性	/	优于 3%
功 耗	~150W	~20W
重 量	7.5kg	7kg

从以上主要技术性能对比来看,西德 X-RT705 型在精度、重复性这两项重要指标是没有给出的。因此 LS-5 裂纹测深仪非但在国内填补了精确测量铜、铝构件裂纹深度的空白,从技术性能来看也是优于目前世界上具有代表性的西德 X-RT705 型产品。

参 考 文 献

- [1] 方志成, 交流恒电流源, 上海电子技术, 1 (1982)。
- [2] 对裂纹深度无损检测仪器的评价, 理化检验 (无损检测分册), 3 (1978)。
- [3] Bedienungsanleitung Uniuersal, Ri Btie-fenme Bgerät XR-T705 KRAUTKRAMER, (19)。
- [4] 方志成, 国防工业出版社, 无损检测自动化与信息处理, (1986)。

LS-5 Type Crack Depth Instrument for Copper or Aluminium Member

Fang Zhicheng Du Min Liao Peifu

Abstract

In this paper, a new instrument called Ls-5 type crack depth instrument for use in copper or aluminium member is introduced. It has been recognized as a new term of innovation in our country and its production was approved by Shanghai Flaw Detecting Instrument Factory on April 1985.

It was a difficult problem in non-destructive testing to determine the surface crack depth of copper or aluminium member. After measuring accurately the surface crack depth of steel member, the authors have designed a source with low frequency alternating constant current and have found a mathematical model based on mathematical statistics and computer technique to represent the surface crack depth calibration curve of copper or aluminium member. Ls-5 type crack depth instrument is the application and development of this mathematical model.