

国外近期无损评价 文献汇编

中国测试技术研究院
出版

前 言

无损检测是一门新兴的综合性科学技术。它在我国近几年迅速展开，广泛应用于航空、机械、冶金、造船、轻工及国防工业、科研等部门。在我国实现四个现代化的进程中，无损检测技术的应用将越来越受到重视，并有着广阔发展的前景。

为提高我国无损检测技术，我们发行了《国外近期无损评价文献汇编》。本文集以一九八五年美国第十五届《无损评价》专题技术讨论会为主，以及英、日、法、德无损评价的先进技术文献汇编的。全集共四十余篇研究报告。都出自国外NDE多方面的权威作者，内容涉及电磁方法、超声换能器技术、复合材料检测和应力分析、激光技术、红外热成像技术、成象显示技术、超声三维显示技术及其应用、射线照相术及辐射方法等领域。图文并茂，全文约有40余万字。

本书邀请从事无损检测方法研究和检测应用方面的高级工程师和工程师负责选材、翻译、校对和审定。担任翻译工作的有朱建堂、丁子明、魏成斌、张纪敏、朱崇全、刘书玉、裴镭、温其诚、潘孝洪；担任校对工作的有朱建堂、丁子明、张纪敏、朱崇全；特邀中国无损检测学会常务理事、新技术组组长陈积懋任主审，朱建堂副审；责任编辑丁子明、李金玉。

本汇编由中国测试研究院技术处情报研究室负责出版、发行。

本书特别适合从事无损检测方法研究的学者、工程师和其他科技工作者；适用于高等学校中从事材料研究、结构设计、断裂、破损理论研究的教师和高年级学生；适用于航天、船舶、机械、冶金、化工、核工程系统的结构设计人员，工艺分析人员，质量控制人员 and 无损检测工程技术人员和技术工人。本书将对我国无损检测工作的发展起推动作用。由于编译时间仓促，错误难免，敬请批评指正。

中国测试技术研究院

目 录

1、应用电流扰动法探测磁性材料.....	(1)
2、用磁场梯度计检测缺陷.....	(7)
3、裂缝深度对脉冲涡流的影响.....	(11)
4、调频雷达技术在检测砖砌隧道和混凝土隧道上的应用.....	(15)
5、用于反应堆管道系统径向裂纹成象的声全息二重连接成象术.....	(27)
6、瞬时热成象无损评价.....	(33)
7、现代数字图象增强技术.....	(39)
8、液晶点阵显示器在低功率无损检测仪器中的应用.....	(44)
9、用于材料表面检测的超声直接反向散射技术.....	(48)
10、声纳整流罩橡胶透声窗的超声检测系统.....	(50)
11、使用辅助脉冲作结构完整性的超声评价.....	(58)
12、用于自动超声探伤可靠性的模拟模型.....	(61)
13、一种使用渗透膜的新型声耦合器件.....	(66)
14、X射线计算机层析摄影法、超声波透射法和低千伏X射线 成象法用于检测未烧结陶瓷特性的比较.....	(70)
15、射线照相法中消除表面不规则影响的方法.....	(75)
16、用于射线照相的干成象系统.....	(78)
17、探查和测量木材内部变质的射线照相法和层析X射线照相法.....	(82)
18、激光技术在21世纪材料加工和无损检测中的作用.....	(86)
19、应用简易最佳法估算换能器的等效电路参数.....	(90)
20、超声换能器Hayward模型的等效电路.....	(93)
21、钢管快速探伤用的超声换能器计算机控制阵列.....	(98)
22、采用最佳结构参数改进超声换能器.....	(104)
23、复合材料结构的剪切照相无损评价.....	(111)
24、利用泄漏兰姆波对复合材料中的缺陷进行无损评价.....	(114)

25、纤维增强复合材料中缺陷的超声成象.....	(119)
26、石墨/环氧树脂复合叠层材料中冲击损伤的超声反向散射研究	(125)
27、定量的超声无损评价.....	(131)
28、金属中亚表面应力的无损评价.....	(141)
29、具有轻微各向异性残余应力的试样中主应力差的超声测定.....	(144)
30、拉伸应变对由循环载荷在铁磁性钢中感生的磁脉冲的影响.....	(152)
31、一种基于超声的测量金属线性热膨胀系数的新方法.....	(156)
32、碳纤维复合材料无损检测用的涡流探测器的最佳化	(159)
33、利用时间延迟频谱分析对高衰减材料进行超声特性表征.....	(162)
34、在金属基复合板材中超声波传播的频率相依性	(168)
35、玻璃纤维增强塑料中疲劳裂纹生长的温度记录方法检测.....	(172)
36、纤维增强复合材料的声发射研究.....	(177)
37、利用P波 测定铁路路轨中零力的平均传输时间.....	(183)
38、使用超声波计算层析照相法对木杆进行无损探伤.....	(191)
39、激光——表面下缺陷的超声特性描绘的无损检测技术基础.....	(195)
40、声学显微镜：用于陶瓷无损评价的一种工具.....	(202)
41、在X—射线探伤中焊接缺陷的自动识别.....	(207)

应用电流扰动法探测磁性材料

Cecil M. Teller

摘要

应用电流扰动法(ECP)探测非磁性材料与器件中的裂纹和缺陷,已获得了很大的成功。然而,在此以前该法并未应用到磁性材料上,其主要的原因在于,磁导率具有很大的场放大效应和任何磁导率变化都有可能把电流分布扰动直接产生的任何效应完全掩盖。因此,当ECP方法应用到磁性材料时,为了测定磁导率对ECP方法灵敏度的影响,开展了本项研究。本文详细介绍了检测 AISI4140 钢钻杆工具接头螺纹根部在使用期中产生的疲劳裂纹和模拟缺陷两者可行性的结果。

1. 引言与提要

钻头导管和钻杆的工具接头处的疲劳断裂事故仍然是采油工业具有全球性的严重问题,特别是公螺纹与母螺纹工具接头最后几圈啮合螺纹处容易出问题。现场使用的常规磁粉探伤存在显著的缺点。在钻井位置探伤不久后,就会出现由于工具接头疲劳引起的井下钻头组脱落现象。近来研究出了一种工具接头自动探伤的新方法⁽¹⁾,其探伤可靠性提高了很多。然而,这种基于磁通漏磁工作原理的探伤系统不便于携带,满足不了某些探伤服务公司希望在钻台上单人操作的要求。另外一种电磁无损评价方法,即电流扰动法(ECP),确实可以满足所要求的可携带性,但对于工具接头中使用的典型磁性合

金尚未证明有效。所以,我们应用ECP方法进行了一些初步实验,以便测定在对工具接头螺纹中的疲劳裂纹探伤时,磁导率效应造成的困难究竟达到何等程度。

ECP方法是在被探伤的部件中建立起电流,然后检测由裂纹等各种缺陷引起的电流扰动产生的磁场分量⁽²⁾。一般来说,利用感应线圈以变压器作用原理建立起电流,而磁场分量是用单独的、无源的线圈型传感器探测出来的。鉴于ECP方法应用到非磁性合金⁽³⁾的螺纹探伤时,已经得到了很好的结果,也可能把它应用到磁性材料。然而迄今为止,虽然没有足够的理由证明为什么不能同样应用到磁性金属上,但是基本上ECP方法的全部研究工作都是在非磁性金属上进行的。应用于铁磁性材料的主要问题在于,磁导率具有很强的磁放大效应以及任何磁导率反常,都可能把电流分布扰动直接引起的任何效应完全掩盖了⁽⁴⁾。因此,本工作的目标在于确定,对于磁性工作接头材料应用ECP方法是否可行,以及如果可行的话,为了探测所关心的螺纹根部疲劳裂纹,灵敏度是否足够高。

简而言之,对于工具接头螺纹根部疲劳裂纹,在含有锯槽和实际疲劳裂纹的试样上,明确地证明了利用ECP方法进行探测的可行性。举例来说,很容易探测到工具接头螺纹根部深度为0.125in、弧长为0.590in、宽度为0.036in的锯槽。虽然磁导率效应确实对这一方法的灵敏度有影响,但这些影响

并不像原来在文献中推测的那样有害。然而在这一可行性研究中,还没有完全弄明白这种方法灵敏度的极限有多大,而且甚至应该能探测到更小的裂纹。现代数字信号处理与图像识别技术有可能使疲劳裂纹的探测灵敏度提高,接近探伤服务公司要求的指标,但是利用能大大改进信噪比的简单模拟滤波技术,也可以经现这一目标。此外,ECP方法和其它方法,包括和漏磁通方法相比,例如在重量、简便和价格方面具有显著的潜在优点。

以下各节将详细介绍采用的实验方法,选用了包括初步的模拟信号与数字信号处理在内的实验结果以及作出的有关结论。

2. 实验方法

设计并制作了一个专用的ECP探头,采用感应方式引入电流,从螺纹齿顶对工具接头试样的螺纹进行扫描(参看图1)。初期的工作在简单的铝质、钢质圆柱体上进行的,柱体的外径表面上有锯槽,以避免螺纹的复杂情况(参看图2)。此后是在实际的工具接头试样上进行实验。有四个工具接头试样是DRILCO提供的,(其中一个含有真正的疲劳裂纹),目的是为了对接头—接头区域磁导率变化进行评价,以及对可能不利于ECP结果的其他效应进行评价。在一个工具接头试样上加工了几条锯槽,以模拟螺纹根部的裂纹并估算其灵敏度极限(参看图3)。下面列举了被研究的全部试样和试样状态:

- 1) 6061T—6 铝制圆柱体4in(直径)×12in(长),具有三条锯槽;
- 2) AISI4140(Q&T)钢制圆柱体,4in(直径)×12in(长),具有三条锯槽;
- 3) 旧的钻杆工具接头,自轴肩起第十个螺纹根部有1条锯槽;
- 4) 新的钻杆工具接头,切削螺纹;
- 5) 新的钻杆工具接头,冷轧螺纹;

6) 旧的钻杆工具接头,自轴肩起第三个螺纹根部有一疲劳裂纹(所跨弧长约为130°,深度未知)。

把仪器仪表安装在实验室控制台上(参看图4)。全部仪器都是买来的现成商品。

一台标准10in车间车床用作对试样进行扫描的试验台。用四爪夹盘把试样装在车床车头上,并以慢速(6—10转/分)旋转。ECP探头安装在复式刀座的刀架上进行平移运动,而平移运动通过车床丝杆和工具接头螺纹螺距(或螺距的倍数)相同步。虽然并不是测量方法本身的要求,但可以让ECP探头骑在螺纹齿顶上,使测量装置简而易行。用悬臂片簧把探头悬吊起来,它使探头方向垂直于试样表面,而同时又跟随着工具接头的斜度。

为了评价ECP对工具接头缺陷的响应,如以下几个方面的变量进行了研究:

- (1) 探头设计参数,例如传感器线圈和感应线圈结构形状;
- (2) 典型的工具接头材料的磁导率变化的效应;
- (3) 激励电流的频率、振幅和总功率要求;
- (4) 各种尺寸缺陷的信噪比。

3. 经选择的实验结果

3.1. 简单柱状试样中锯缝产生的ECP信号

开始时ECP探头的安装与检测是在直径4in的铝质及工具接头钢质柱体上进行的(试样1,试样2),柱面上有锯槽。对这些试样的锯槽进行了螺旋线扫描,以说明ECP的特征探头响应和磁导率的影响。对非磁性材料中与裂缝相似的表面缺陷,由于它的ECP响应已经相当熟悉,所以采用了铝质样品。

图5示出了本项研究所使用ECP探头的特征响应。我们暂时只考虑对铝质试样测得的顶部信号曲线。由于三种不同尺寸的槽缝

位于同一圆周平面内,而对于每一个槽缝,信号要重复几次,所以ECP的信号曲线有些复杂。然而注意到标以A、B、C的信号相应于图中所示尺寸的三个槽缝,探头响应的图形就很明显了。应当首先指出振幅依赖于槽缝尺寸。此外,信号峰值包络线为正弦形。相对于基线先正后负。重要的是当试样直接放在槽缝上面时会出现零点。因此,这一零点可以用来确定槽缝的位置,而且只要在两侧存在信号振幅反相的图形,这种判断就是十分确切的。对于工具接头螺纹根部的槽缝,后面还要详细介绍它的ECP探头特征响应。

图5还示出了利用同一仪器装置,且在钢质试样上切割出同一尺寸的槽缝,对其ECP响应进行了直接比较。应当指出除了具有较强的磁导率背景外,其响应图形与铝质试样基本相同。为了说明磁导率的效应,需要注意的重要情况在于铝质试样槽缝信号具有很高的灵敏度(其信噪比实质上为无穷大),该信号没有磁背景(此时磁背景为水平基线)。尽管钢质试样槽缝的ECP信号绝对振幅近似等于铝质试样的相应信号,但由于存在磁背景,钢质试样的灵敏度下降了。这一磁背景是相干干涉,而不是随机噪声。为了说明这一事实,在钢质试样的无裂纹区对同一路线进行重复圆周扫描,结果示出图6。注意磁背景的每一细节都完全是重复的。(即它实际上形成了材料磁背景的指纹印记)。任何微小的变化都是由于ECP探头与试样摩擦接触而引起的。当然并非必须如此,因为利用空气支承,可使探头与表面保持千分之几英吋的间隙。

3.2. 旧的(用过的)带有锯痕的工具接头产生的ECP信号

研究了1号、2号试样对ECP探头的响应特征后,工作集中在3号试样上。3号试样在螺纹根部切割出一条“姆指甲大小”的

锯缝(深0.125in,弧长0.590in,宽0.036in),以模拟疲劳裂缝(见图3)。由于本试样为旧工具接头,在其基体上分布有使用保养不当造成的人为损伤,它们会产生磁背景,这些损伤可以是微小的螺纹损伤,但不是明显的疲劳裂纹。

ECP探头的设计是使它位于工具接头螺纹的齿顶。所以探头的有效提离间隙为螺纹深度0.122in加上大约0.010in的探头保护套(聚四氟乙烯带),总共约0.132in。这一提离间隙使灵敏度略有下降,但减小量并不十分严重。事实上,ECP探头的灵敏度比最初预料的要高,可以在所用100KHz频率时小于0.5A的电流激励。

图7给出了在3号试样锯槽上得到的某些典型结果(这些信号波形已经过模拟滤波),图7a画出的信号系列清楚地说明了ECP数据中以利用的信息有多么丰富。第一,如同试样1、试样2那样,当槽缝处于探头的可探测区内时,调节扫描间距,让它比螺纹间距更细,缝隙信号可以重复每一个周期。在这些数据中,扫描间距为每英寸16条螺纹(t/in),而螺纹本身间距只是每4条螺纹。第二,当从槽缝的一侧沿轴向移向另一侧时,槽缝信号的极性反向(信号由模拟滤波器进行微分)。要特别注意图7b中标以A、B的信号,它具有槽缝信号脉冲串展宽后的波形,在信号脉冲串中包括槽缝两侧的信号。信号A开始是上升,然后再下降,而信号B(及其它右边槽缝信号)恰恰相反。最后一点,信号脉冲串峰值的包络线所具有的特征图形,与叠加在载波频率上的调制图形相似(在这种情况下为背景信号)。虽然还没有足够的数据来证明峰值振幅与槽缝界面面积具有相关性这一论断,但是根据以前在非磁性材料上的研究工作,似乎应该存在这种关系。毫无疑问,对其他信号特点与图形进行分析研究,将会有助于鉴别所关心的

缺陷究竟属于疲劳裂纹,还是属于无害的或良性的缺陷。

3.3.(新的)无缺陷工具接头产生的ECP信号。

本节介绍对两个新的工具接头进行ECP背景响应的比较。试样4为切削螺纹,试样5为半冷加工螺纹(孔端)及半切削螺纹(肩端)。

图8是对试样4螺纹进行完整的螺线扫描(16t/in)得到的背景信号。尽管背景有良好的重复性,并且某些特徵也许显示出微小的加工缺陷,但看不出明显的反常信号。然而,当移向肩端区时,背景信号要小得多。作为对比,图9为试样5的背景信号。注意冷滚螺纹取得的前半部信号波形和切削螺纹取得的后半部信号波形略微不同。特别是在螺纹冷滚部份背景上有周期性尖峰脉冲,其振幅相当显著,而在螺纹切削部份,不论是试样4或试样5,尖峰脉冲都不明显。同样,在两个脉冲之间的背景,不论是试样4或试样5,都比切削工具接头螺纹要低一些。然而还没有什么显著的差别可以确切地归因于冷滚加工。因此,还不能预期冷加工会对探测螺纹根部疲劳裂纹的灵敏度起不利的影响。

3.4.带有疲劳裂纹的旧的工具接头产生的ECP信号

试样6带有在使用中产生的疲劳裂纹,这些裂纹可以用湿荧光磁粉方法探测出来,现在用ECP探头对试样6进行探伤检查。从轴肩算起的第三条螺纹上有一较大疲劳裂纹,其周向跨度约130°,但裂纹深度不明。在第一螺纹根部也有明显的其它裂纹。图10a表示从疲劳裂纹区得到的ECP信号之一。为了便于比较,图10b也示出了试样3的锯槽信号。根据这些数据可以得出一些重要的观测结果。首先,用ECP方法很容易探测出疲劳裂纹,这一点至关重要,因为本项研究的

基本目的恰恰是为了证明这种探测的可行性。第二,疲劳裂纹信号要比槽缝信号复杂得多,这是人们所能预料到的。和最初的双极性槽缝信号相比,疲劳裂纹信号有多个峰值。这些多极峰值可能是螺纹根部的多条裂纹引起的。另外,疲劳裂纹信号沿扫描方向在空间上更为扩展,这意味着和槽缝情况相比具有更长的弧长。第三,和槽缝信号相比,裂纹信号振幅比较低,意味着虽然和槽缝相比,裂纹弧长是长得多,但其深度也许没有槽缝那么深(槽缝深度为0.125in)。

3.5.信号处理

对于由工具接头试样3槽缝处得到的ECP信号波形,为了改进它的信号噪声比(S/N),在模拟滤波方面做了一些工作。图11给出了相当典型的实验结果。顶部信号波型未经处理,而是直接取自锁定放大器。注意这一槽缝信号是叠加在螺纹侧面与梯形背景信号上面的,其S/N为0.4。下面这张图的信号波形在记录之前用简单的高通RC滤波器进行了信号处理。可以清楚地看出,总信噪比S/N得到了显著的改善(S/N达到2.3),而且消除了螺纹侧面和梯形的影响。鉴于这种类型的模拟滤波器截止响应并不尖锐,滤波器也把槽缝信号微商了。尽管这一微分使原来的波形失真,但还是大大提高了灵敏度。

此后进行了初步的实验,以便确定试样3锯槽ECP信号的信噪比中,是否还能进行其它的改进。实验采用了Nicolet4094数字示波器,示波器具有波形分析软件包。选用了数字滤波程序(P07)。按照这一程序改以计算时畴波形(1024点)的快速富里埃变换(FFT),可使操作人员改变频畴图像,最终计算出逆富里埃变换。如果频畴表像一变,产生的时畴波形将改变原来的样子。一般是采用数字滤波以消除波形数据中的已知频率噪声。低通、高通、和陷波滤波都可同

时进行。

图12对试样3的槽缝信号结果进行了比较,其信号包括两个重复的波形,其间相距一个周期。上部的信号波形是经过锁定放大器直接记录下来的。锁定放大器还有其它的滤波作用,这样可以得到本探头和装置可能得到的最佳结果。此时S/N为0.6。在下面的波形中,采用了Nicolet示波器的数字滤波程序,基本上以带通方式工作,以消除0.5 Hz以下与1.5 Hz以上的各种频率。这一步骤消除了低频噪声和背景分量,使信噪比S/N提高到2.3。同时它也显著地改变了槽缝信号的特性(主要是由于消除了高频分量)。

当对这两种信号处理方式比较其所测S/N的改进时,显然可以看出,模拟滤波器得到的结果至少和数字滤波器一样良好。然而,千万要注意不要过早地放弃数字方法而偏爱模拟方法,因为通过现有的多种多样的数字信号处理与图像识别技术,这种方法可能或许是应该被评定为具有更加宽广的灵活性的。

4. 结论

基于这些可行性的研究结果,可以得出以下几点结论:

(1) 为探测工具接头螺纹根部的疲劳裂缝, ECP方法是可行的。

(2) 尽管磁导率与磁导率的局部变化的效应有害地影响了灵敏度,但它并不妨碍用这一方法探测微小的疲劳裂缝,实现探伤服务公司的探测目标。

(3) 由于消除了与螺纹锥度与剖面相关的低频背景,简单的模拟高通滤波可以显著地提高灵敏度。把信号微分以后,有效地提高了信噪比。

(4) 为了使ECP探头设计最优化,确定方法的灵敏度极限,并充分认识数字信号

处理与图像识别技术的功能,尚需作更多的工作。

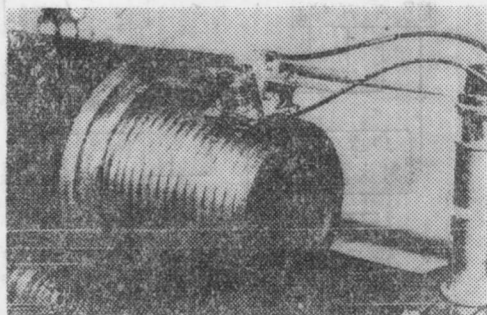


图1 钻杆工具接头螺纹齿顶的ECP探头

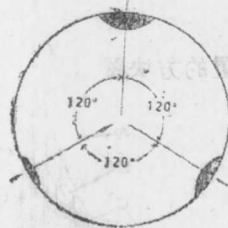


图2 铝质和钢质圆柱体(试样1和2)上的锯槽

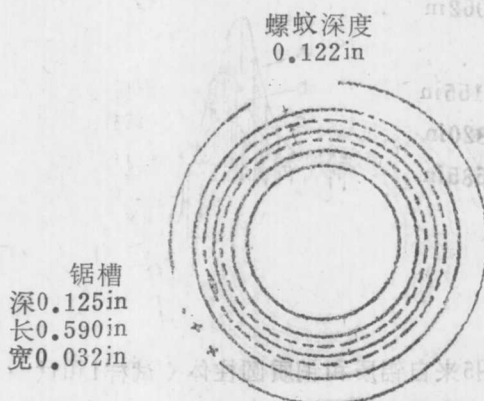


图3 旧工具接头(试样3)上的锯槽

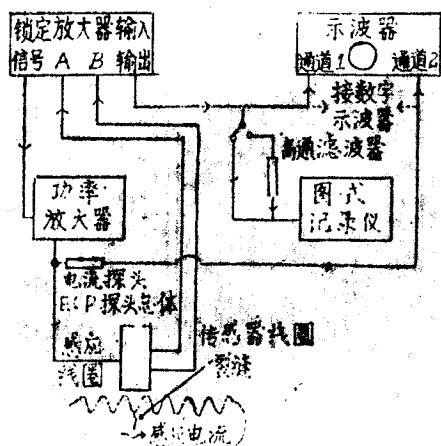


图4 ECP装置的方块图

槽缝尺寸

形状：母指状

宽度：0.020in

深度：

A 0.250in

B 0.125in

C 0.062in

长度：

A 1.155in

B 0.820in

C 0.585in

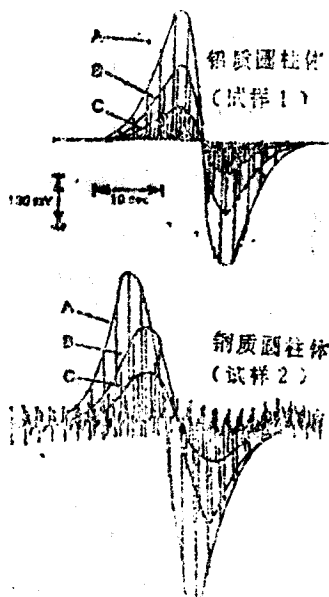


图5来自铝质和铜质圆柱体（试样1和试样2）锯槽ECP信号的比较

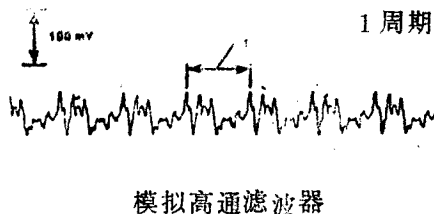
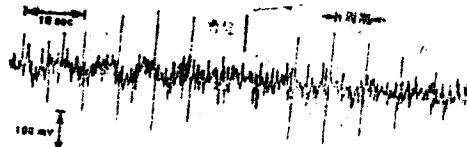
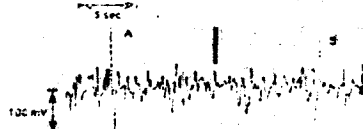


图6 钢质圆柱体（试样2）的磁背景

0.590in长 × 0.125深 × 0.032in宽



7a. 模拟高通滤波槽信号脉串冲



7b. 槽缝信号脉冲串展宽扫描

图7 旧工具接头（试样3）锯槽的ECP信号脉冲串 尖端 100mv 10sec

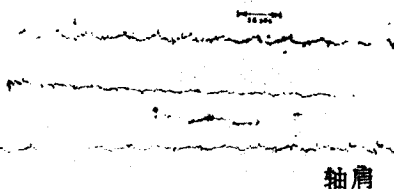


图8 具有切割螺孔的新工具接头（试样4）的磁背景 尖端 100mv 10sec

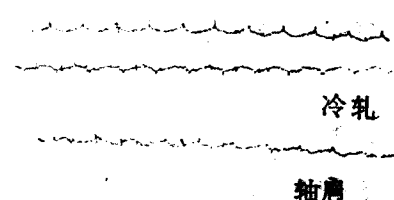
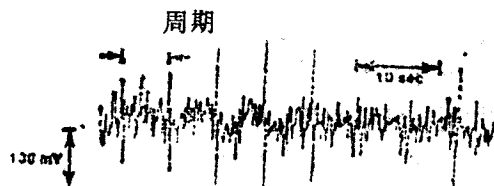


图9 具有冷轧螺纹的新工具接头（试样5）的磁背景



10a. 疲劳裂缝信号的模拟高通滤波曲线

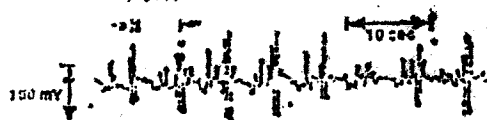
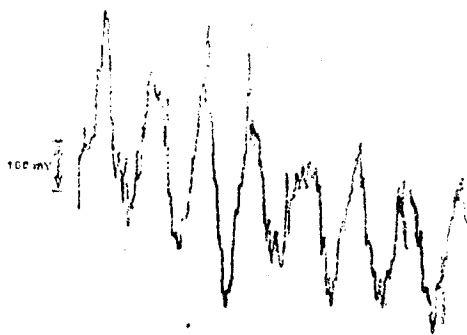
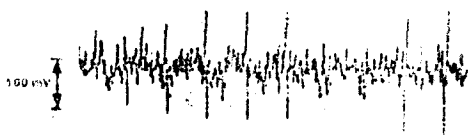


图10 旧工具接头（试样3和试样6）锯槽和裂缝产生的ECP信号脉冲串

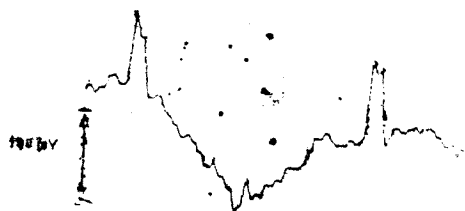


11a 未经滤波的模拟波形

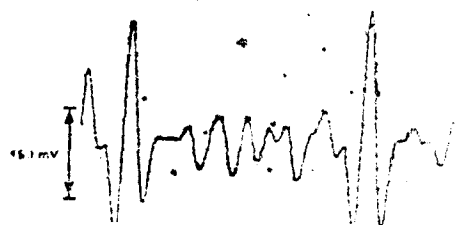


11b 经模拟高通滤波的波形

图11 模拟滤波对旧工具接头(试样3)锯槽信号脉冲串的影响



未经滤波的模拟波形



经数字带通滤波(05~1.5Hz)的波形

图12 数字滤波对旧工具接头(试样3)锯槽信号脉冲串影响
(丁子明译, 朱建堂校, 陈叔懋审)

用 磁 场 梯 度 计 检 测 缺 陷

T.E. Capobianco, J.C. Moulder和F.R. Fickett

摘要

当在导体内感应出涡流时, 缺陷使涡流改变方向, 并使伴生的电场与磁场发生扰动。在常规的涡流检测中, 当用于感应涡流的探测线圈阻抗发生变化时, 即可检测到与缺陷伴生的扰动场。另外还研制了检测与表征缺陷扰动场——包括电场与磁场的更直接的方法。我们描述了一个用于确定由缺陷引起的磁场梯度法向分量的方法。应用超导量子干涉器件(SQUID), 是该测量系统的新颖特点。SQUID提供的灵敏度高于常规的检测方法, 并有可能以基本物理量——磁通量为基础进行定标。我们报告了利用本系统对铝合金试样一条疲劳裂纹和几条人工缺陷进

行测量的一系列结果。本文讨论了和缺陷信号相比较的边界邻近效应和品质因数。

前言

对微小缺陷进行电磁探测并估计其尺寸大小, 通常是困难的原因在于信号电平微弱, 并且从具有电噪声的环境中如何提取这些信号也是问题。直接测量紧挨着缺陷处的磁场或磁场梯度, 可以减少这些困难, 因为这时信号增大了, 而同时减少了噪声。此外, 这一方法可以成为一个很有用的工具, 以此来验证涡流与裂纹相互作用的理论计算, 而对于定量的无损评价(NDE)这种理论计算是很有必要的。本文介绍的系统可测量与试样表面垂直的磁场梯度分量。

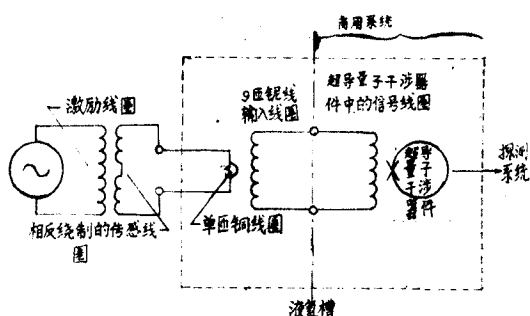


图1 系统图

本实验与涡流扰动和交流电位差测量方法相似。实验的显著特征为(1)利用磁场的法向分量感应信号,(2)使用超导量子干涉器件(SQUID)。

实验

我们的装置与超导量子干涉器件磁强计安装在一起(图1)。超导量子干涉器件的基本部件是一个超导环路,环路内某个点上为约瑟夫逊结。它与低温(4 K)槽路的线圈进行电感性耦合,该槽路在其谐振频率下进行工作。此电路的射频阻抗对于与超导环路相耦合的磁通量的变化很敏感。用SQUID系统的检测电路监测这一阻抗,其反馈信号施加于谐振电路,以保持谐振电路在所有时间里运转在同一工作点。对反馈信号进行读数以作为SQUID的输出读数。SQUID对于其输入线圈产生的低电平磁场信号很敏感。理论上有可能测量出一个磁通量的若干分之一。关于超导量子干涉器件(SQUID)工作原理的详细说明可参看文献1。

SQUID的输入端与室温梯度计的探头形成电感性耦合。以前Fickett和Capobianco⁽²⁾介绍过这种系统。SQUID的频率响应目前限制在30KHz以下的波段内,但是能在更高频率下工作的控制部件已开始成为商品了。仪器限制在兆赫波段以下工作看来是和电子学仪表有关,而并不是由SQUID本身决定的。使用SQUID给系统增添了大约80dB的附加

增益。这较高的灵敏度并不意味着能探测小四个量级的裂纹,而宁可说是让我们能对各个参数进行协调,例如减小信号大小以改善空间分辨力或提高信噪比。对于较大的缺陷来言,我们装置的信噪比是40:1。

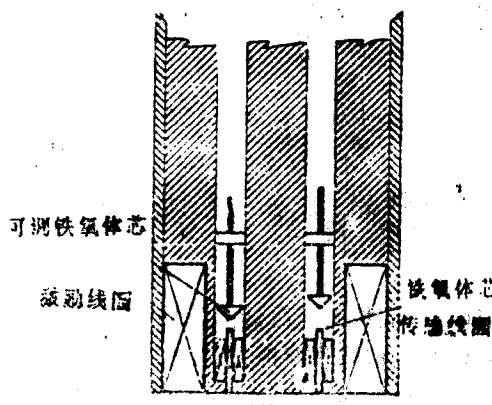


图2 梯度计探头

使用的探头是磁场梯度计型式的(图2)。它由二个铁氧体磁心传感线圈串联反接而成,它的外面包绕着空心激励线圈。传感线圈的铁氧体磁心直径为1.3mm,长度为3.6mm,绕在它们上面的线圈外径为2.5mm,长度为2.3mm,并由*40AWG铜线缠绕140匝构成。激励线圈内径为8.1mm,外径为12.2mm,长度为6.1mm,并用*40AWG铜线缠绕1000匝。对于理想的探头,任何探测到的信号都是由位于工件表面上的两个传感线圈中磁场强度差引起的。实际上,由于两个反绕的传感线圈的不平衡,我们的探头产生了附加信号。这种部件的缺点使它限制了SQUID的动态范围。我们曾经利用位于传感线圈铁氧体磁芯上的调谐棒,试图抵消这种不平衡信号,但这种方法效果不好。为了消除探头上这种信号还有另外一些方法可以利用。一种方法是更精确地确定激励线圈内两传感线圈的位置,使得在每个传感线圈的位置上,激励线圈产生的磁通量完全相当。如

果传感线圈内使用铁氧体磁芯, 为了使该材料的变化最小, 应当测量材料的磁特性。通过增加或减少绕线匝数, 同样可以使线圈达到平衡。一旦实现了有效的平衡方法, 我们认为灵敏度至少可以提高一个量级。

本文报导的全部测量都是在10KHz频率下进行的。初步的数据表明, 对我们特定的系统, 这个频率的灵敏度最高。缺陷是在6061铝合金板上用放电加工机床(EDM)切割出的矩形凹槽。放电加工凹槽的深度为0.25mm至1.27mm不等, 但全部缺陷均约为6.5mm长。在该频率下铝合金的趋肤深度约为0.8mm。

探头取向和扫描方向标在数据曲线图(图3 a—d)的右上角。

把一个传感线圈放在缺陷的位置处, 另一个传感线圈离开缺陷处, 而联接两个线圈中心的直线与缺陷长轴相垂直, 以这种方式进行纵向扫描。然后探头沿着缺陷的长轴移动。当探头的取向相同, 而探头在缺陷中心沿着与缺陷长轴垂直的方向移动, 使二个线圈都横穿过缺陷, 将这种方式称为横向扫描。

结果和讨论

图3 a—d表示缺陷信号振幅对探头位移的关系曲线图。尽管对于裂纹尺寸而言, 探头设计并未最佳化, 但二峰值之间的距离仍是裂纹长度相当精密的量度(对于纵向扫描来言, 不确定度在6%以内)。

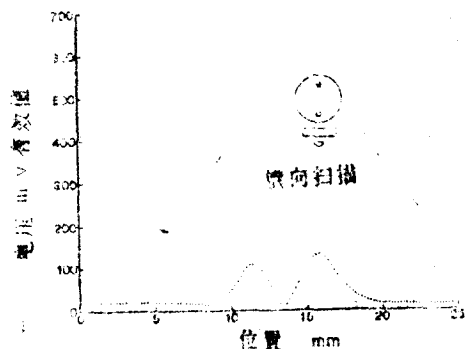
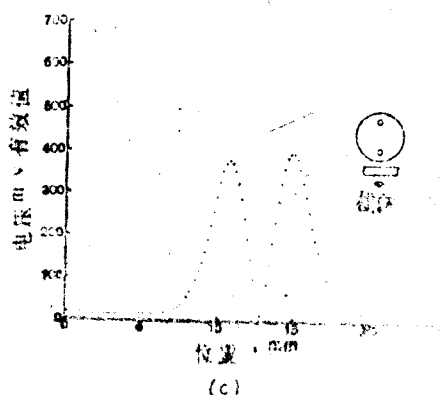
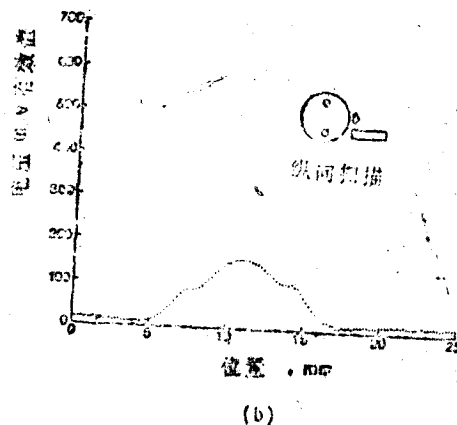
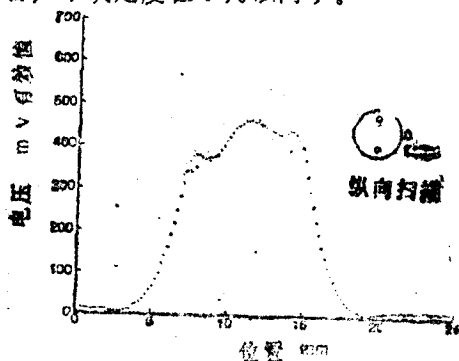


图3 二种扫描几何图形的超导量子干涉器件输出

从裂纹一边到另一边, 所见到的峰值振幅差别可能是激励磁场不均匀分布引起的, 也可能是传感线圈偏离激励线圈真实直径引起的。不管原因如何, 其影响具有指向性。当探头旋转180°时, 较高的峰与较低的峰交换位置。

Beissner等人⁽³⁾介绍了梯度计探头的相关特性。如果把来自不同尺寸缺陷处的信号振幅,作为这些缺陷面积(长度乘深度)的函数绘图,可以看出它们是成线性关系的(图4)。当缺陷与表面处于垂直的情况时,这可能成为测定缺陷尺寸的简易方法。当缺陷与表面夹角不是 90° 时,我们还没有研究出这种缺陷会产生什么结果,也不清楚这样的缺陷方位对振幅-面积关系式有何影响。对于我们得到的全部数据都存在线性关系。在所有情况下就最小二乘法近似而言,其数据相关性都很高,其范围为 $0.98 \sim 0.99$ 。

梯度计探头对提高和边缘邻近效应与一个单个探头不同。因为探头包含二个电平衡的线圈,提高 0.1mm 产生的信号小于最小裂纹(深度 0.25mm)上得到的缺陷信号的 4% 。然而,探头对其沿传感线圈中心连线的倾斜非常敏感,倾斜 8° 产生的信号与测得的最大(深度 1.3mm)缺陷所产生的信号相差不大。我们发现,边缘邻近效应依赖于探头的取向。当探头的取向为二传感线圈中心连线平行试件边缘时,激励线圈实际上可以在边缘安放,而没有显著的影响。然而,当探头取向为垂直时,在距边缘 5mm 处即可探测到板的边缘效应。

单个探头通常采用的品质因数包括灵敏度和分辨率。表1比较了梯度计探头与单个探头的典型指标。灵敏度可以定义为缺陷信号与背景信号之比,对于单个探头为 $(\Delta Z)/Z$,对于梯度计探头为 $(\Delta V)/(V)$ 。分辨率是缺陷信号与提高信号之比。

表1:二种类型探头的品质因数的比较

	梯度计探头	单个探头
灵敏度	17.5	0.001
分辨率	44.0	0.001

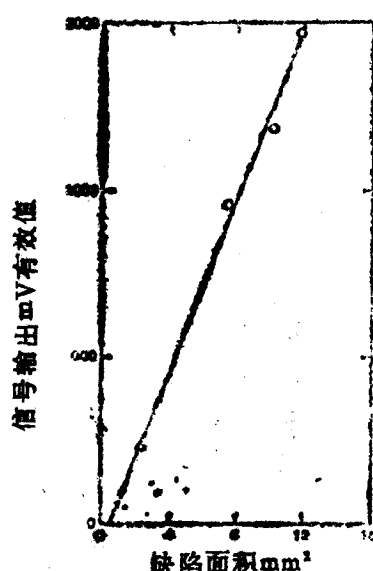


图4 信号振幅对陷面积关系曲线

因为对于梯度计探头而言,信号振幅和缺陷尺寸之间的关系是线性的,不同梯度计探头相互比较的另一品质因数可能是归一化的缺陷信号对裂纹尺寸之比。这一指标应当以单位激励线圈电流的形式给出。图4中曲线的斜率,能清楚地显示出这种类型探头的灵敏度。对于本文使用的探头,这一品质因数为 $0.248\text{VA}^{-1}\text{mm}^{-2}$ 。

结束语

梯度计探头是检测导电材料中缺陷的一种灵敏探测器。它产生的缺陷信号能比单个探头产生的缺陷信号大几个数量级,其提高灵敏度减到了最小值。这种技术可以进一步推广,它可描绘出缺陷与感应电流相互作用引起的磁场梯度,乃至其磁场分布图。信号振幅与缺陷面积的线性关系始终具有重复性,而曲线的拟合也在裂纹面积测量的不确定度范围以内。这一特点为测定缺陷长度和深度提供了简便易行的校准方法。超导量子干涉器件使我们在不损失灵敏度或信噪比的情况下扩大了检测参数量程。

(丁子明译、朱建堂校、陈叔懋审)

裂缝深度对脉冲涡流的影响

J.L.Fisher, R.E.Beissner, J.E.Doherty

摘要

可以把脉冲涡流信号的时域测量与钛的微小的表面穿透缺陷深度(深度0.25~1.2 mm)联系起来。计算结果表明:这些信息是由存在于表面开口裂缝尖端周围的涡流密集(Kahn效应)产生的。这种涡流集中产生一个信号,它在接收器上显示出来裂缝尖端周围涡流扩散过程的时间特性。为测量Kahn效应的结果,研制成功了时畴处理技术。本文报道了裂纹深度对接收器信号的影响。应用涡流扩散理论分析了这些结果。

1. 引言

在脉冲涡流(PEC)探伤方法中,发射线圈中的重复电流脉冲用来激励试验样品中的涡流。用传输和反射场激励另一分开的接收器。通过接收器响应的变化来探测和表征感兴趣的材料变化。与常规连续波涡流检验相比较,这种方法本质是宽频带的,因此,至少提供了用一种激励波形得到更多信息的可能性。为了比较起见,就单频涡流来说,顶多有二个变量,即相位和振幅等效的一组变量,可以变化并被测量,这可以与PEC接收器频谱内作为频率函数的相位和振幅相当。此外,在PEC试验中,容易得到时畴信息;脉冲和它所包含的每一频带在传播过被检材料后,于不同时刻出现,因为在导电材料中电磁场的传播速度是频率的函数。因此,很自然地考虑宁肯在时畴中提取信息,而不采用频率域。

虽然PEC技术已存在了一段时间,但它没有得到普遍应用。在历史上,PEC试验中所用的大多数方法都只利用了一小部分可用

信息。有一种方法只简单地测量差动接收器线圈的峰值振幅⁽¹⁾,当振幅改变时,显示出试验材料的不连续性。另一些方法是根据如下的观测,当一个变量(例如提高)发生变化时,输出响应曲线上的某些点没有明显的变化,但存在缺陷时,就有较大地变化了。Waidelich⁽²⁾对此作出了解释。另外一些方法涉及到按时在几个不同的点采样接收信号。为了把不感兴趣的特性变化效应减到最小,让感兴趣的特性产生的信号达到最大⁽³⁻⁵⁾,可以从参数上对得到的振幅进行组合。提出这一方法的目的在于,希望得到与多频涡流试验相似的有效深度灵敏度,并利用接收脉冲的频谱随着时间而变化这一事实。

西南研究院(SWRI)新近的研究工作提出了一些重要的问题:它们涉及到脉冲形状的影响,在时畴内区分裂纹和背景信号的可行性,以及从PEC数据中得知裂纹深度信息的可能性。为了回答这些问题已经取得了显著的进展,至少达到了这样程度,即对于未来的研究工作现在已可指出明确的方向了。因此,对某些早期的成果进行回顾,用以阐明近期研究工作的意义是适当的。

2. 模型的改进

图1和图2给出了裂纹信号的一些早期计算结果。图1表示,表面下不同深度处点状缺陷的计算信号与时间(秒)的函数关系,并在峰值处归一化为1。这里需要说明的要点是:对于和所研究的裂缝尖端深度相应的点状缺陷深度来说,缺陷信号峰值到达时间大约为几十毫微秒。因此,如果打算从

测量峰值到达时间取得深度数据的话,输入脉冲宽度或脉冲衰减时间必须非常短,大约是几毫微秒。

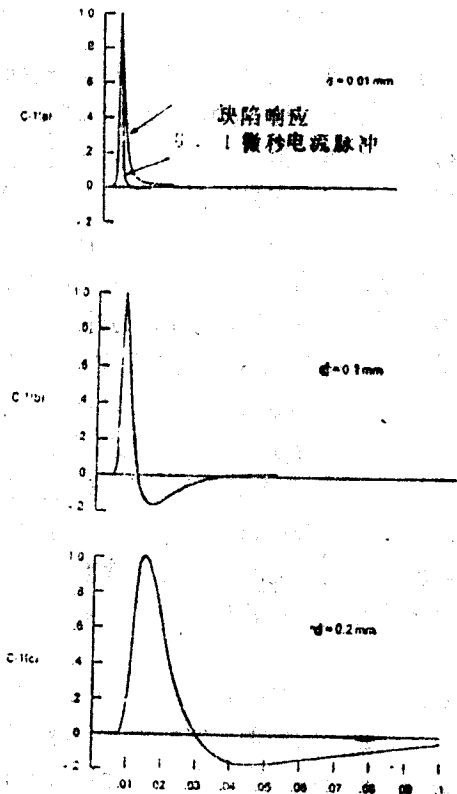


图1 ns高斯脉冲在表面下不同深度处的点状缺陷的计算信号。对于所关心的相应裂缝尖端的深度,峰值信号到达时间为10ns量级

图2描述了点状缺陷信号的另一个特征。这是一幅相应于三个不同的脉冲宽度,作为缺陷深度函数的缺陷信号峰值振幅的曲线图。这里值得指出的要点是,在表面下起始的0.1mm深度内,预测的信号振幅减小了约100倍。根据这两组点状缺陷的计算,我们可以预料,与从近表面反射回来的信号相比较,感兴趣的信号是非常微弱的,并且所关心的到达时间大约为几十毫微秒。

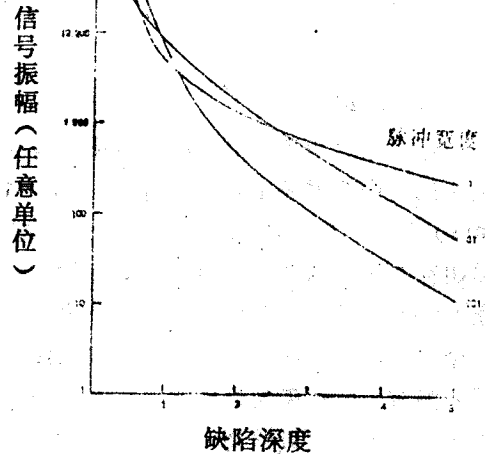


图2 在不同脉冲宽度条件下,点状缺陷信号峰值振幅对缺陷深度的函数关系。预测信号振幅在最初0.1mm深度内减小约100倍,表明与这种模型的近表面反射比,其信号非常微弱

然而,图1和图2中所示数据是以点状缺陷计算结果为根据。目前还不清楚如何解释关于来自表面开口裂缝的信号。遗憾的是,理论不能对这些问题提供明确的答案,因为对于涉及上述传播时间的脉冲系统,点状缺陷模型⁽⁶⁾是目前可以利用的唯一模型。另一方面,对点状缺陷模型进行简单的推广有可能对裂缝信号作出“最佳情况”和“最坏情况”的估计。

图3为上述结果之一。在计算中假设裂缝可以表示为沿裂缝表面上分布的点状缺陷的集合。这是“最坏情况”的模型,因为它忽视了电流被迫从表面沿着裂缝表面流下去的事实,这将会削弱近表面效应而突出裂缝尖端效应。因此集成点状缺陷模型估计是过分强调了由裂缝引起的近表面扰动。

图3所示的计算结果证明了情况确实如此。这里画出的峰值是宽度为1.0s、上升和下降时间为50ns的输入波形(虚线)和裂纹响应函数(实线),在两者的峰值处都归一化为1。这里有一个重要的论点,即集成点状缺陷模型预言,对于深度范围0.127~0.50mm的裂隙,响应函数具有完全相同的形状。换句话说,这种模型预示,近表面效应占支配地位达到这种程度,以致测不到裂缝深度效应。

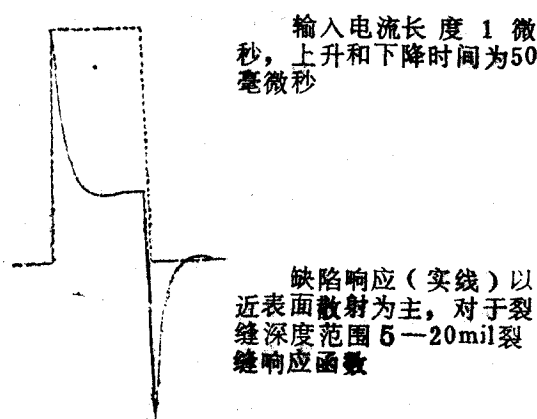


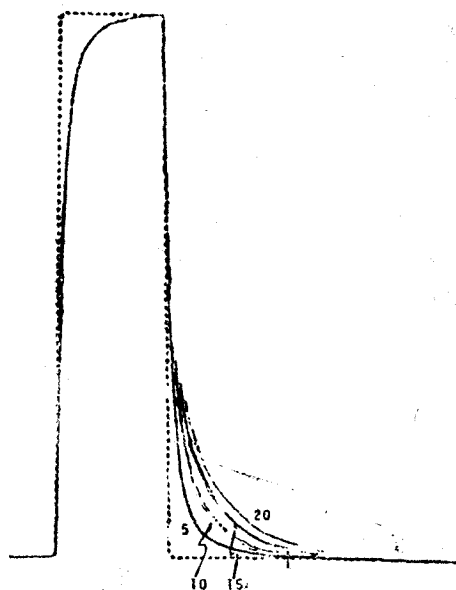
图3 基于集成点状缺陷模型的缺陷响应。输入电流(虚线曲线)持续时间1 μ s, 上升或下降时间为50ns。缺陷响应函数(实线)以近表面散射为主。对于深度范围为5~20mil的裂隙, 其响应函数相同

还有另一个极端情况, 人们也许假设裂缝尖端的电流扰动占支配地位, 而近表面效应可忽略不计。这种通常所说的裂缝尖端模型给出了图4所示的结果(其输入脉冲与图3中所用的相同)。此时, 当裂隙深度改变时, 衰减时间明显地移动, 这表明通过对脉冲衰减特性进行分析可以得出深度信息。

关于图4还要补充二点。第一, 信号上升时间也与深度相关, 并且正如衰减数据一样, 脉冲上升时间也可以用来推导出裂缝深度。第二, 正如图1所示, 宁可用衰减特性或上升时间特性来推测裂缝深度, 而不用峰

值到达时间。这是一个明显的优点, 因为发现上升或下降时间约为数百毫微秒量级, 而峰值到达时间却在几十毫微秒以内。因此, 对于图4所示的特殊脉冲波形, 容易分辨出衰减特性的差别, 而看出峰值到达时间的差别。

然而, 关于这一主要问题在这一点上还没有答案。图3使用的集成点状缺陷模型表明, 测量不到深度信息, 而“最佳情况”模型, 即裂缝尖端计算结果, 却断言根据反射信号的上升和下降时间特性很容易推导出裂缝深度。进一步看, 二种计算结果都有疑问, 因为二者都是以点状缺陷理论的简单推导为依据。显然, 这种情况需要对不同深度裂纹产生的信号作实验研究, 以便确定这二种模型哪一个更接近准确, 即确定裂纹信号是完全受近表面散射所支配, 还是裂缝尖端效应是可以测量得的。



缺陷深度(单位为密尔)

图4 基于裂缝尖端模型的缺陷响应(其输入脉冲与图3中所用的相同)。对于不同深度的裂缝尖端, 可以看出响应函数的衰减特性有明显差异