

用20MHz静电换能器精密测量超声波 声速和声衰减系数*

刘镇清 魏墨鑫

(上海, 同济大学声学研究所, 200092)

用静电换能器对小尺寸固体试样作了高精度超声测量, 由于静电换能器非接触的特点, 避免了耦合层及换能器本身对测量引入的误差。当超声波频率为20MHz时, 通过衍射修正后, 声速测量的精度优于 10^{-5} , 声衰减系数测量的精度小于2%。由此得到的声学参量较正确地反映了试样的声学特性。

1 前言

超声测量是超声研究与应用的基本手段, 常见的超声测量用换能器大多是接触型的。对固体作超声测量时, 从换能器辐射面发出的超声波要进入被测体, 或从被测体接收超声波时, 都必须解决换能器与被测体间的声耦合层问题。在超声精密测量时, 应该对声耦合层及换能器的影响进行评估并作适当的修正, 这样的修正有时可能是相当麻烦的^[1-3], 而且准确修正也并非容易。

用非接触的超声换能器可避免耦合层及换能器对超声测量的影响, 还可保障被测试样表面的自由边界条件, 以此得到的声学参量将更为正确。静电换能方法是非接触式超声换能方法之一, 其优点是结构简单、体积小、造价低廉, 尤其对小试样的超声测量比较有利, 适合于普通实验条件下的超声精密测量与研究工作, 而其缺点则是无法直接激发或接收横波。

静电换能器的换能效率比较低, 而且本项工作在方波调制超声脉冲方式下进行, 为

了减小波形的畸变, 在发射或接收换能器上不能添加高Q值的匹配电路, 这使得换能效率低的矛盾更加突出。为此, 我们从静电换能器本身及电路两方面作了探索,^[4,5]研制成功了静电换能器脉冲超声测量系统。本项工作利用自行研制的测量装置, 对固体试样的声速及声衰减系数作了精密测量。由于接触式超声测量时耦合层及换能器对声衰减测量的影响较大, 本文还对同样的固体试样, 在同样的超声波频率下用压电换能器作了声衰减测量, 其结果与静电换能器得到的结果作了比较与分析, 从而证实了静电换能器在声衰减测量时更方便、更正确。

2 声速测量

目前声速测量中主要采用脉冲法, 它可克服超声发射与接收回路间的串扰及驻波影响, 且具有较高的测量精度。本文采用公认的高精度声速测量方法——脉冲回波重合法, 在超声频率为20MHz时, 对玻璃及铝

* 国家自然科学基金资助课题

试样作了声速测量，静电换能器脉冲回波重合法的测量结构如图 1 所示。图中，自行研制的声速仪包括：音频信号发生器、双通道延迟脉冲发生器、射频脉冲发生器以及接收放大器等部分^[5]。E312A 型频率计用来测量音频信号发生器的周期，进而确定两次回波重合时的时间间隔。接收放大后的超声回波信号送 COS5041 型示波器 Y 轴作观察，输送到示波器 Z 轴的是增辉信号，此信号只对选定的两个回波增辉，以便实施脉冲重合。

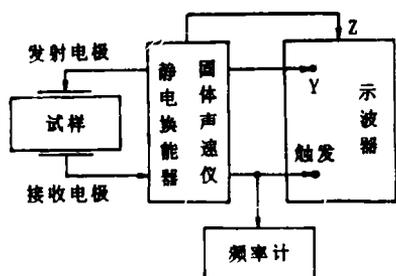


图 1 静电换能器脉冲回波重合法测量声速的原理图

静电换能器的发射与接收电极均是直径为 13mm 的圆片状结构。圆柱状铝试样的长度为 $30.260\text{mm} \pm 1\mu\text{m}$ ，其半径约 34mm。玻璃试样也是圆柱状的，长度为 $31.522\text{mm} \pm 1\mu\text{m}$ ，半径约 35mm，其两端表面镀上 50nm 左右厚度的铜膜，铜膜与静电换能器电极构成工作电容对。

若将发射与接收静电换能器电极置于铝与玻璃试样的两端表面中心，则可允许超声波束扩张 20mm 以上而不发生侧壁反射的影响。那么，超声波频率为 20MHz，取铝与玻璃的纵波声速分别为 6400m/s 与 4200m/s，第 10 次回波内的超声波都可认为没有受到侧壁反射的影响。

在实际工作中，总是首先获得超声波渡越时间(声时)，尔后对应试样的长度求得声速。表 1 与表 2 分别是玻璃与铝试样的声时测量结果。测量时保持试样的温度恒定不变，并在较短时间内测得 10 组不同超声回波间的声时值，表中的声时测量值便是 10 次测量的

统计平均结果，这样可减少目测回波重合时的随机偏差。

表 1 玻璃试样声时测量结果(单位 μs)

回波序数 (m-n)	实测值	衍射修正值	修正后值
2-1	15.17387	0.00080	15.17467
3-2	15.17417	0.00043	15.17460
4-3	15.17374	0.00069	15.17443
5-4	15.17443	0.00013	15.17456
6-5	15.17417	0.00021	15.17438
7-6	15.17387	0.00064	15.17451
8-7	15.17404	0.00069	15.17473
9-8	15.17386	0.00068	15.17454
10-9	15.17391	0.00064	15.17455
平均值	15.17401		15.17455
标准差	0.00020		0.00010

表 2 铝试样声时测量结果(单位 μs)

回波序数 (m-n)	实测值	衍射修正值	修正后值
2-1	9.45611	0.00079	9.45690
3-2	9.45635	0.00072	9.45707
4-3	9.45636	0.00033	9.45669
5-4	9.45649	0.00035	9.45684
6-5	9.45573	0.00089	9.45662
7-6	9.45581	0.00092	9.45673
8-7	9.45591	0.00078	9.45669
平均值	9.45611		9.45679
标准差	0.00028		0.00014

由于静电换能器是非接触的，它基本避免了换能器和耦合层引起的接收回波附加相

移,可不必再作修正。这样,声时测量值为试样绝对声时与衍射相移引起的附加声时的综合结果,即绝对声时为:

$$\delta = T + T_D \quad (1)$$

其中, T 为声时测量值, T_D 为衍射修正量。由表 1 与表 2 可知,通过声速衍射修正,^[6] 静电换能器测量固体绝对声时的偏差接近 0.1ns。这不仅是由于换能器非接触的结果,而且也体现了较高超声工作频率的优越性。因为衍射修正本身可能会由于静电换能器边缘效应等因素造成偏差,而超声波频率的提高使得衍射修正量变得更小,这就为最后所得结果的精确性奠定了基础,这也是本项目工作将静电换能器超声波工作频率提高到 20MHz 的原因之一。

铝试样只取到第八次回波是由于接收信号较弱,第八次以上的回波受到噪声的影响较大,以致声时测量精确度较差,较难给出可信的结果。

3 声衰减测量

声衰减也是超声波基本参数之一,目前它的测量精度与准确度都远比声速测量低。这是由于影响声衰减测量的因素较多,很难正确修正。声衰减测量值 A_T 主要包含有:试样声衰减,衍射效应造成的附加声衰减,耦合层与换能器引入的声衰减,即:

$$A_T = A_S + A_D + A_R \quad (2)$$

其中, A_S 为试样的声衰减, A_D 为衍射引起的声衰减, A_R 为耦合层及换能器造成的声衰减。 A_D 可由衍射修正预先剔除, A_R 与耦合层的声学特性、厚薄以及换能器的结构和声学特性都有关,^[2,3] 因此 A_R 很难准确修正、剔除。

静电换能器声衰减测量原理如图 2 所示,换能器工作状态与试样都与声速测量时一致。放大后的超声回波信号经标准衰减器后送示波器,这里选用了 Gould 公司生产的

4072 型数字存储示波器。测量时首先将衰减器的衰减量调至较大的数值,并使示波器接收到的第一次回波幅度固定在某一值上;尔后再选取第二次回波并减小衰减器的衰减量,使示波器收到第二次回波的幅度与第一次回波一致,这时衰减器的读数差值就是两次回波衰减测量值。以此类推便可获得以后几次回波间的声衰减测量值。

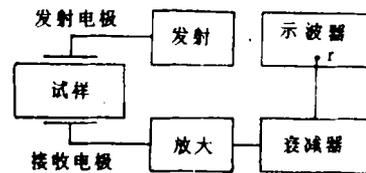


图 2 静电换能器超声衰减测量原理图

静电换能器避免了测量探头与被测试样间的直接声耦合,使得声波反射界面接近理想的自由界面,这就使得最难修正的耦合层与换能器引入的声衰减修正变得不再必要。表 3 和表 4 是静电换能器对试样声衰减的测量结果。为了便于说明问题,将压电换能器对同样试样在相同超声波频率下的声衰减测量结果一并列出,压电换能器的直径是 6.5mm,声耦合材料是硅脂。表中所有测量值都是十次测量的统计平均结果。

由表 3 与表 4 可知,通过声衰减衍射修正后^[7],用压电换能器获得的声衰减明显大于静电换能器获得的声衰减值,这主要是接触式换能器和耦合层造成附加声衰减所致。可以认为,非接触的静电换能器测声衰减时,式(2)中的 A_R 项为零;因此经过声衰减衍射修正剔除 A_D 后,得到的声衰减系数即为试样自身真正的声衰减系数。为了更精确地得到声衰减系数,可将间隔多次的回波幅度作比较,并以此求出试样的声衰减系数。表 5 便是间隔取 4 次回波时,通过声衰减衍射修正后得出的玻璃与铝试样的声衰减系数。这时的相对误差接近 1%,这里的误差是读数偏差、衍射修正剩余偏差等因素共同引起的。

表 3 玻璃试样声衰减测量结果

静电换能器				压电换能器		
回波序数 (m-n)	衍射修正量 (dB)	声衰减测量值 (dB)	衍射修正后值 (dB)	衍射修正量 (dB)	声衰减测量值 (dB)	衍射修正后值 (dB)
2-1	0.49	1.65	1.16	0.08	2.48	2.4
3-2	0.53	1.67	1.14	1.71	3.89	2.18
4-3	0.21	1.39	1.18	1.74	4.02	2.28
5-4	0.55	1.7	1.15	1.66	3.37	2.21
6-5	-0.16	1.07	1.23	1.27	3.6	2.33
7-6	-0.14	1.05	1.19	1.34	3.73	2.39
8-7	0.1	1.22	1.12	1.22	3.33	2.11
9-8	0.26	1.42	1.16	1.06	3.26	2.2
10-9	0.39	1.5	1.11	0.71	2.85	2.14
平均值(dB)		1.408	1.160		3.448	2.249
标准差(dB)		0.236	0.035		0.488	0.100
平均声衰减系数(dB·m ⁻¹)			18.40			35.67
声衰减系数误差(dB·m ⁻¹)			0.56			1.59

表 4 铝试样声衰减测量结果

静电换能器				压电换能器		
回波序数 (m-n)	衍射修正量 (dB)	声衰减测量值 (dB)	衍射修正后值 (dB)	衍射修正量 (dB)	声衰减测量值 (dB)	衍射修正后值 (dB)
2-1	0.59	2.62	2.03	0.84	3.92	3.08
3-2	0.39	2.45	2.06	2.37	5.02	2.65
4-3	0.75	2.79	2.04	2.1	4.93	2.83
5-4	-0.22	2.02	2.24	1.72	4.45	2.73
6-4	-0.05	2.05	2.1	1.51	4.18	2.67
7-6	0.29	2.33	2.04	1.27	3.95	2.68
8-7	0.48	2.49	2.01	1.17	4.02	2.85
9-8	0.58	2.58	2	0.94	3.64	2.7
10-9	0.58	2.5	1.92	0.88	3.41	2.53
平均值(dB)		2.426	2.049		4.169	2.747
标准差(dB)		0.240	0.082		0.513	0.148
平均声衰减系数(dB·m ⁻¹)			33.85			45.38
声衰减系数误差(dB·m ⁻¹)			1.35			2.45

表 5 玻璃和铝试样的声衰减系数(dB/m)

回波序数 (m-n)	玻璃	铝
5-1	18.36	34.58
6-2	18.64	34.86
7-3	18.84	34.78
8-4	18.60	34.66
9-5	18.64	33.67
10-6	18.16	32.92
平均值	18.540	34.245
标准差	0.240	0.711

4 结束语

用自行研制的静电换能器超声测量系统对固体试样作了绝对声速及声衰减系数的测量。由于避免了换能器与试样的直接接触，消除了界面引起的声波附加相移及附加声衰减。因而不需要作换能器与耦合层的反射修正便可得到高精度的固体声速及声衰减系数，简化了测量步骤。

当超声波频率为20MHz时，对玻璃和铝

试样的测量结果表明，用静电换能器测量绝对声速的精度可达0.1ns，其相对误差优于 10^{-5} 数量级；绝对声衰减系数的测量精度小于2%。

利用静电换能器非接触与宽带的特点，可用它对试样中的超声振动信号作无失真检测，亦可用于压电换能器的校准，还可将它与激光超声设备组成一套完整的非接触超声检测系统等。我们将陆续开展这些工作。此外，我们还将对如何提高衰减测量精度的问题作进一步探讨。

参考文献

1. 查济璇, 声学学报, 1986, 11(4):267
2. 陈雁, 魏墨鑫, 声学技术, 1989, 8(2): 13~18
3. Wei Moan, Tan Jinxing, Chen Yian, Western Pacific Regional Acoustics Conference (1985), Hong Kong 470~475
4. 刘镇清, 魏墨鑫, 传感器技术, 1992, 11(1): 28~30
5. 刘镇清, 魏墨鑫, 实验室仪器, 1991, 10(4): 6~8
6. Wei Moan and Tan Jinxing, Chinese Journal of Acoustics, 1983, 2(2):177~183
7. A. S. Khimunin, Acustica, 1972, 27(4): 173~181

《超声换能器》新书邮购

《超声换能器》一书已由南京大学出版社于1992年8月出版。该书既有基本理论分析又有广泛的实际应用，涉及无损检测、生物医学诊断、地球物理勘探、水声、通信和信号处理等各领域，可满足多方面读者的需要。作者为东南大学袁易全副教授。该书大32开本，34万字，平装12.00元；软精装13.00元。另加8%邮购费，书款请寄：中国银行无锡市南长办事处，帐号01051741355，地址：无锡市锡进文化服务经营部；邮编214000。

(张为国 韦余红)

本刊讯

▲上海飞乐电声总厂高级工程师、原中国声学学会理事、上海市声学学会常务理事、电声专业委员会主任，张本厚同志因病医治无效，于1992年7月20日6时35分在上海逝世，终年77岁。早在60年代初期张本厚同志主持的“电声学译丛”编译工作，对促进我国电声学发展起了重要的作用，张本厚同志逝世是上海市声学界的一大损失。

▲原上海市声学学会副理事长李宝善高级工程师因病于今年3月6日在纽约逝世。