

625259

О. И. 巴比科夫

超声波及其在 工业上的应用

科学出版社

325259

03458

超声波及其在工业上的应用

О. И. 巴比科夫 著

查济璇 范国良 译



科学出版社

1962

О. И. БАБИКОВ

УЛЬТРАЗВУК И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Государственное издательство
физико-математической литературы
Москва, 1958

D461/12

內容簡介

本书首先简单地介绍了产生超声波的各种方法与超声波在物质中传播时的一些特点,其次以较多篇幅叙述了超声波在工业上的各种应用,包括用超声作为物质材料检测的方法,以及强功率超声对物质材料的加工处理的作用等等,尤其着重介绍了脉冲超声探伤与用脉冲超声作物理化学研究的应用。

本书可供在工业部门中从事应用超声技术的工程技术人员阅读,也可供其他有关的技术人员与科学研究干部参考。书中对各个问题的物理本质也有所提及,以便对希望了解超声技术现状所由来的广大读者,有所帮助。

超声波及其在工业上的应用

О. И. 巴比科夫 著

查济璇 范国良 译

*

科学出版社出版 (北京朝阳门大街 117 号)

北京市书刊出版业营业许可登记证字第 061 号

中国科学院印刷厂印刷 新华书店总经售

*

1962 年 9 月 第 一 版

1962 年 9 月 第一次印刷

(京) 0001—2,600

书号: 2607 字数: 155,000

开本: 850×1168 1/32

印张: 5 7/8 插页: 3

定价: 1.10 元

目 录

緒論	1
第一章 超声波的传播和吸收	7
§ 1. 关于超声波的概念	7
§ 2. 液体与固体中的声速	12
§ 3. 介质分界面上的反射	20
§ 4. 液体中的声吸收	23
§ 5. 固体中的声吸收	29
§ 6. 空化现象	32
§ 7. 超声场的显示	35
第二章 超声波的获得	38
§ 8. 机械法获得超声波	38
§ 9. 磁致伸缩效应	39
§ 10. 压电效应	46
第三章 脉冲法超声探伤	55
§ 11. 最简单的脉冲探伤仪的线路	57
§ 12. 现代探伤仪的各参量	67
§ 13. 确定缺陷的大小	71
§ 14. 探头与被测件间声接触质量的检查	79
§ 15. 工业上应用超声探伤的一些例子	80
第四章 連續波法超声探伤	85
§ 16. 阴影法	85
§ 17. 工业中应用阴影法探伤的一些例子	87
§ 18. 共振法	94
§ 19. 工业中应用共振法检查的一些例子	98
第五章 研究金属的微观结构与测定弹性常数	101
§ 20. 确定金属中的晶粒大小	101
§ 24. 弹性常数的量测	106

第六章 物理化学分析的脉冲超声方法.....	113
§ 22. 测量超声速度的脉冲法.....	113
§ 23. 超声吸收的测量.....	122
§ 24. 运动液流与杂质对量测结果的影响.....	126
§ 25. 一些实际应用的例子.....	127
第七章 加工硬脆材料.....	135
§ 26. 超声波钻床的主要元件.....	137
§ 27. 加工精确度、生产率和工具磨损.....	142
§ 28. 超声波方法加工材料的应用.....	145
第八章 铝的钎焊和镀锡.....	148
§ 29. 超声钎焊机理.....	149
§ 30. 铝合金铸件的修整.....	154
第九章 超声波清洗.....	156
§ 31. 超声波清洗机理.....	158
§ 32. 在清洗液中激发超声波的方法.....	159
§ 33. 超声波洗涤的应用.....	162
第十章 超声波处理的冶金效应.....	171
§ 34. 应用超声波来改善金属组织.....	172
参考文献.....	177

緒 論

現在,超声波正成功地应用在机械制造、化学、冶金、医疗、輕工业、农业和动力工程等方面,而很难說出哪个技术部門用不上超声波的某些特性。超声波技术的效能和技术經濟上的巨大优越性,使它有极大的可能在发展工业方面成为強有力的技术进步的工貝。

应用超声波探伤法来检查金属制品的内部伤痕和缺陷是众所周知的。由于超声波具有強大的穿透能力,使它在所有各种不破坏試件的物理探伤法中占居首位。金属脉冲超声探伤法的应用范围极广:渦輪机和內燃机的零件,汽車、蒸汽機車和飞机的零件,鋼軌、鍛件、板狀材料、管道、緊固双头螺栓、鍋炉的鉚縫,和軋鋼、鍛造、冲压車間的各式各样的不同产品。除了脉冲超声探伤法以外,还有几种就其物理本質讲各不相同的利用非衰减波的探伤法。当零件只有一个面能接触到,而用共振法来检查它的厚度时,就属这一类。在检查鍋炉壁、导管壁和船艙外壳的腐蝕区域的时候,我們就会遇到用这样的方式来測量。借助于所謂“阴影法”,非衰减波也还用来检查汽車輪胎中的缺陷;薄鋼板和砂輪中的未焊合处和分层区域也可用这种方法确定出来。

然而,超声波检测法不只局限于作为一种探伤法。例如,測量出超声波在各种介質中的传播速度和吸收系数后,就可以判断它們的弹性参数——密度、粘滯性和弹性模量,因为正是这些参数决定着超声波的速度和吸收值。这样,就出現了联系这种測量数据与被試材料的結構的可能性。例如,根据声波在金属中的吸收数值,可以确定晶粒的大小,因而也就可以确定該金属的結構。根据測得的超声波纵波和横波的传播速度的数据,可确定出金属和橡胶、塑料、玻璃、陶瓷、冰等材料的弹性常数(楊氏模量、剪切模量和

泊松系数)。因为这种测量也可用来研究固体中所产生的过程的动力学,故用这种方法可以检验材料的应力状态,例如,测量荷载很大的钢筋混凝土或钢制构件的弹性模量。

超声波在某种液体介质中的速度和吸收数值常常与该种介质的物理化学特性有关。这一方面可以作出关于物质结构、分子内键和分子物理学专家们所感兴趣的其他一些问题的结论;另一方面,用这种方法还能够检验介质的浓度,介质中是否存在有杂质,以及研究各种过程和反应进行的动力学。这种超声波分析检测的方法是基于连续地求出声波在被研究介质中的速度值和吸收值。利用超声波分析物理化学过程的方法,作为化学、水解、油漆颜料、药物和食品生产中的液体介质的检测法,以及作为合成橡胶工厂和石油加工厂的液体介质的检测法,是超声波技术中完全崭新的方向。这种方法是值得特别注意的,因为首先,在化学中还没有统一能用于许多种现象和过程的检测(分析)方法;其次,超声波脉冲分析法可以反映所研究过程的动力学。还可以对运动着的介质流进行测量,因而可采用这种方法直接在生产条件下检测其物理化学过程。

当用超声波作为处理物质的一种方法时,我们会遇到另外一些物理状况。为了这个目的,常常利用空化现象——在声波作用下,在液体中形成空腔的现象。这些空腔随传播着的声波的频率而伸张和压缩。当压缩时,空腔的尺寸缩小,同时,所产生的巨大压力可能使空腔完全消失,即可能使它们完全闭合。因为闭合之前空腔内的压力可达几千大气压,故在空腔完全消失的瞬间,会产生强烈的液压冲击,致使材料破坏。空化泡闭合时产生的液压冲击,正成功地用来破碎和分散许多种物质。象石膏、石墨和某些金属(铜、银)等固体物质,用超声波很容易分散和粉碎。强力超声波的破碎作用被用来钻削不同形状和不同尺寸的孔,以及切割硬脆材料(钨、钼和它们的碳化物,陶器,玻璃,瓷器)。在焊铝时,也利用超声波的破碎作用来破坏其氧化膜。用超声波制备乳浊液——混合一般不能混合的物质,例如水与汽油、水银、油、石蜡等的

混合液时，空化效应起着重要的作用。用超声波获得乳浊液的方法实际上可用于任何物质，因而最近以来在许多工业部门中都具有了实用的意义。借助于强力超声波使零件的清洗和去脂得到加速。对于精细零件，例如钟表机构和滚动轴承的零件，这是特别重要的。在这些零件的表面上残留的小杂质和尘埃，会与其制造上的不精确一样，严重地影响到它们的工作效果。超声波清洗甚至可以从轮廓很复杂的零件上极小的细孔、缝隙、凹处和孔中完全清除污垢。清洗液中所产生的空化现象会使杂质微粒获得巨大的加速度，因此杂质微粒就很容易从零件表面上分离出来。这就使零件的清洗过程加速并改善。

强力超声波还可用来使如下许多工艺过程加剧：熔化金属的结晶和获得优质钢，橡胶生产中高分子化合物的裂解，造纸工业中分散纸浆，加速皮革的鞣制，织物的去脂和染色，沉淀工厂烟筒中细小的烟粒等等。在超声波的作用下，一系列的化学反应和氧化过程会加速。足够强烈的超声波会伴随产生一系列的生物效应。在超声波作用下，许多微小的有机组织和细菌会死亡，同时当声波在液体中传播伴随有空化现象时，超声波会对有生命的有机组织产生特别强烈的作用。借助于超声波正在进行着牛奶的消毒和保藏食品的试验。在医疗上正在进行着治疗许多病症和恶性肿瘤等的试验。

超声波的应用范围非常广，甚至很难把它的可能应用的部门全部列举出来。为了比较清楚地表示出超声波在工业上应用的主要方面的全貌，我们试行把有关的超声波设备的主要参数进行分类。下面所列出的分类表不能认为已完全反映了超声波在工业上的应用部门。表1内所列的是在工业上应用的强力超声波的超声设备、发生器和辐射器的基本特性。从表1中可见，为了获得强力的超声波，是采用基于磁致伸缩效应和压电效应的换能器。许多现象和过程中广泛采用磁致伸缩振动物是因为它能送入较大的功率，装置简单，并且热稳定性高。此外，磁致伸缩振动物可以得到频率相当低的在几十千赫范围的超声波，可是压电式辐射器通常仅

表 1 强力作用的超声波设备的分类和它的工业用途

设备名称	设备的用途和它的应用范围	发 生 器		幅 射 器		某些工艺特征
		功 率	频 率	类 型	单位面积的功率; 振幅	
清洗设备	清洗细小零件; 钟表机构; 滚珠轴承; 继电器触点; 电子管阴极管和栅极; 电机电刷	功率范围 0.5到2.5千瓦	最合适的功率 1千瓦	压电石英和钛铌银	1—10瓦/厘米 ²	清洗介质: 三氯代乙烷, 煤油, 汽油
	光学仪器的清洗和去脂, 去除清漆薄层, 油膜, 油脂	0.5到10千瓦	25千赫	磁致伸缩式		
钻 床	钻削、切割、研磨脆性材料	50瓦到2千瓦	16到30千赫	磁致伸缩式	0.02到0.08毫米	加工准确度达0.005毫米
	处理金属结构和消毒	15到60千瓦	30千赫	磁致伸缩式 (材料为钽明磁合金)	5—40瓦/厘米 ²	
超声波发生器	获得乳化液和分散物质	0.3到2千瓦	150千赫到1兆赫	压电式	0.1—10瓦/厘米 ²	
	加剧物理化学过程	0.5到10千瓦	16到30千赫	磁致伸缩式		
超声波熔铁	应用在医疗和生物学中	0.2到1千瓦	0.5—1兆赫	压电式	1—10瓦/厘米 ²	
	铝、镁、镍和它们的合金的钎焊	0.35到100瓦	20—30千赫	磁致伸缩式	0.1—8瓦/厘米 ²	
凝聚悬浮体的设备	镀锡槽中镀锡	50到250瓦	100千赫—1兆赫	压电式	0.025毫米	焊接精度 4 公斤/毫米 ²
	沉淀工厂烟囱中的煤烟和碳黑	0.5到2千瓦	16—30千赫	磁致伸缩式 (材料为钽明磁合金)	1—2瓦/厘米 ²	沉淀微粒的直径 10 微米到 0.005 微米

表 2 检测和分析用的超声波仪器的分类和它的工业用途

仪器名称和它的缩写符号	仪器的用途和它的应用范围	工作情况	频率	某些技术特征	苏联工业部门的生产情况
探伤仪 (УЗП)	确定金属以及陶瓷、玻璃和塑料的内部缺陷的尺寸和位置	脉冲式	0.7 到 4.5 兆赫	能确定缺陷的最小面积 1—4毫米 ² 。指示缺陷位置的准确度 1—3%	成批生产
谐振式厚度计 (УЗТ)	阴影法检查板状材料和汽车轮胎	非衰减波	50千赫到10兆赫	容易自动化	仅有实验室样机
声速测量仪 (УЗМ)	确定零件的厚度和板状材料与管子的腐蚀区	非衰减波	1 到 7 兆赫	确定厚度的准确度： 0.5 到 3%	小批生产
声吸收测量仪 (УЗМП)	确定液体的浓度和掺杂物，研究物理化学过程和反应进行的动力学	脉冲式	1 到 5 兆赫	测量速度的准确度： 0.1 到 0.01%	仅有实验室样机
	确定液体混合物中的浓度和掺杂物	脉冲式	1 到 50 兆赫	测量准确度：0.8 到 5%	仅有实验室样机
应力状态测定仪 (УЗН)	研究金属结构(测量晶料直径— d)和其他材料的结构		从 $\lambda_{\text{吸收}} \geq 20d$ 到 $\lambda_{\text{吸收}} \sim d$	用多次反射方法测量	仅有实验室样机
	测定和检查材料的弹性模量和应力状态	脉冲式	0.5 到 5 兆赫	准确度：1 到 3%	尚未生产
耗量计 (УЗР)	测量液体的消耗量	非衰减波	300千赫—1兆赫	准确度：~2%	仅有实验室样机

能用于几百千赫以上的频率。最近以来,钛酸钡辐射器已获得日益广泛的采用。在许多方面它完全排挤了以前为产生高频超声波所用的压电石英辐射器。对于强力超声波作用下所产生的许多物理现象,例如清洗、钻孔和分散等来说,当在工作介质中产生有空化时,会得到最好的效果。因为空化要在很高的辐射强度时才能产生,故对于例如辐射面积为 500 厘米²的辐射器来说,就需要功率不低于 1 千瓦的发生器。当超声波用在工业上的时候,为了使任一超声波设备都能得到较高的生产率,需要照射很大的容积,因此这么大功率的发生器是最合适的。

各种工业部门中用于检测和分析的超声波仪器的特点是采用的振动频率较高(表 2)。

采用频率为兆赫级的超声波是由于这种频率在被研究的介质和材料中的传播特性所决定的。因为当频率增高时,超声波的吸收增大,故在高频下测量超声波的吸收,其准确度将特别高。对于脉冲法来说,高频振动可以得到较短的超声脉冲的持续时间,因而提高在指示器的期待扫描线上时间读数的准确度。在许多情况下,为了检测目的而采用非衰减的和连续的超声波,它与脉冲法比较起来具有某些优点。但在绝大多数情况下,仍完全偏重于应用脉冲法。脉冲法准确度高,测量速度快,能够反映被研究过程的动力学,以及其他许多宝贵的优点,使它在各种超声波检测方法中,占着首位。无疑地,未来的发展前途也是属于它们的。

第一章 超声波的传播和吸收

§ 1. 关于超声波的概念

在研究振动的传播过程和由声源到接收器的传送过程时，我們遇到波的概念。物质介质的存在是传送声波的必要条件。例如，如果介质的一个质点离开了平衡位置，那末另外一些质点作用在它上面的弹性力将迫使它返回到原始位置。这时邻近的质点本身又离开平衡位置，而且由于惯性力的作用，甚至波通过了之后，介质也会在其原始位置附近继续振动。当介质质点的振动频率在人耳闻阈内的情况下，我們感受到的弹性波就是声。超声波与弹性声波的区别仅在于频率更高。在弹性介质中传播的波，其频率在声频以上，換句話說，超过人耳聞閾的频率——20000 赫时¹⁾，我們就把这种波称之为超声波。与振动频率相应地，声波还可用一定的波长来表征。同时，声波的传播速度(C)、波长(λ)和频率(f)之間，存在着一定的关系，可用下面的公式确定：

$$\lambda = \frac{C}{f}. \quad (1)$$

目前所能得到的超声波频率的上限，尚限于 10^8 到 10^9 赫，因而，尚限于特超声波频率以下，特超声波的频率一直可伸展到 10^{13} 赫的数量级。超声波波长与光波波长相接近。例如在空气中，频率为 10^8 赫时，超声波波长为 $\sim 30 \times 10^{-5}$ 厘米。同时，人眼能感受到的电磁波，即光波，其波长范围是 $(4-8) \times 10^{-5}$ 厘米^[1]。因此，波长短的超声波在很多方面类似于光波。例如，对它可以应用几何

1) 当声波与超声波的概念是指弹性波所固有的共同性质时，我們认为用振动频率完全能够相当确切地说明它，因此，今后在声波与超声波的概念方面将不作重大的区别。

光学的那些定律。

超声波能够在任何弹性物体：液体、固体和气体中传播。这时，波的型式主要决定于介质的弹性。液体和气体不具有剪切弹性，因而既没有承受任何切向应力的能力，也不会产生任何切向应力。另一方面，在两邻近层接近和离开时，将产生阻碍剪切和伸张变形的回复力。正因为介质质点的振动是产生在弹性回复力的方向上，因此在液体和气体中，波仅仅能够在与波传播方向相一致的质点的振动方向传播。这种波称为纵波。纵波在介质中传播时产生连续地分布着的压缩和稀疏的区域。例如驻波^[2]，在最大振幅点——波腹——我们将得到压缩区域；相应地在波节处将得到稀疏区域。对于行波，在空间的任一点，交替地是波腹或波节。液体和气体中的声波为纵波是由这些介质中仅具有一个弹性系数所决定的。四周压缩变形时，弹性力具有法向压力的性质；它引起的运动垂直于行波波阵面，亦即在传播方向。在固体中具有形状弹性，除了体积变形产生的法向应力外，也产生切向的剪切应力。与切向应力有关的形变是以横波形式传播的。这时，介质质点的振动垂直于波传播的方向。所以，在固体中既能够传播纵波，也能够传播横波。在纯粹横波中，介质不会产生稠密和稀疏。在固体中也能够传播表面波。纵波、横波和表面波传播速度之间的关系如下^[3]：

$$C_{\text{прод}} > C_{\text{поп}} > C_{\text{пов}},$$

而且

$$\frac{C_{\text{поп}}}{C_{\text{прод}}} \simeq 0.63 \text{ 和 } \frac{C_{\text{пов}}}{C_{\text{поп}}} \simeq 0.9. \quad (2)$$

按照传播的轨迹特性分为平面波、柱面波和球面波。在理想的情况下，当声辐射器作成点声源时，就会产生球面波。可是，实际上认为，如果声辐射器的半径(r_0)甚小于由它所辐射的声波波长(λ)，即

$$r_0 \ll \lambda$$

时，就会产生球面波。随着辐射器半径的增大(在一定的频率时)，

球面波便失去其性質而轉變成平面波。譬如在如下条件时：

$$r_0 \gg \lambda, \quad (3)$$

便产生平面波。

例如，直径 3 厘米的輻射器，頻率为 2 兆赫，在介質为水中工作时，我們將得到：

$$\lambda = \frac{1.5 \times 10^5}{2 \times 10^6} = 0.75 \text{ 毫米}.$$

由它所輻射的波实际上已可看作平面波，因为輻射器半径与波长之比是：

$$\frac{r_0}{\lambda} = \frac{1.5}{0.75 \times 10^{-1}} = 20.$$

必須指出，在距声源很远处，球面波波陣面便越来越变直，因而波轉变为平面波。

由于气体和液体的导热性低，可以认为，声波传播时，在介質中每一点的压缩和稀疏均是絕热的，即受热和冷却都来不及渗透到周围的介質内部，因而不会产生充分的热交换。在这种情况下，密度和压力的关系用下面的关系式确定：

$$\frac{p}{p_0} = \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma$$

式中 $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$ ——热容之比，对于空气， $\gamma = 1.41$ ，对于水， $\gamma = 1.001^{[4]}$ ； ρ_0 ——液体的起始密度。

用 δ 表示声波经过介質传播时，由于介質的变形引起的密度增加值与起始值之比：

$$\delta = \frac{d\rho}{\rho_0},$$

我們得到：

$$p \approx p_0(1 + \gamma\delta) \approx p_0 + p_0\gamma\delta. \quad (4)$$

$p_0\gamma\delta$ 值表示由于声波引起的变形而产生的压力。 $p_0\gamma$ 是压力与形变(δ)之間的比例系数。在此情况下，該系数在物理上表示弹性系数(模量)：

$$S = p_0\gamma. \quad (5)$$

平面波通常确定着在一个坐标 (x) 方向上传播能流, 坐标 (x) 垂直于波陣面。为了得到声波的传播方程式, 必須认为, 液体是可压缩的, 而且在运动时是連續的。因此, 利用运动(动平衡)^[5] 方程式、連續性方程式^[6,7] 以及公式(4), 我們就可得到平面波的传播方程式(波动方程式), 形式为:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = \frac{\rho_0 \gamma}{\rho} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2}, \quad (6)$$

式中 φ ——叫做速度位函数。

如果用 $\mathbf{v}$ 表示液体任一质点的速度向量, 那末

$$\mathbf{v} = \text{grad } \varphi^{(1)}, \quad (7)$$

梯度 φ 在坐标軸上的投影将等于

$$u = -\frac{\partial \varphi}{\partial x}, \quad v = -\frac{\partial \varphi}{\partial y} \quad \text{和} \quad w = -\frac{\partial \varphi}{\partial z}. \quad (8)$$

声波传播方程式不仅可写成速度位函数, 也可写成其他一系列值的函数, 例如 p 、 ρ 、 δ 、位移 ξ 、振动速度 $\dot{\xi}$ 等等的函数。但是, 用速度位函数来表示最方便。此外, 尚具有那样的物理意义, 能确定出液体为无旋运动的^[5,8], 因为 $\text{rot grad } \varphi = 0$ 。

声波传播时, 介质质点以一定的速度在平衡位置附近振动, 这个速度叫做振动速度。利用速度位函数, 对于平面波, 可以写出振动速度的形式为:

$$\dot{\xi} = -\frac{\partial \varphi}{\partial x}. \quad (9)$$

声波传播时, 介质质点的振动致使在液体中形成稠密与稀疏区域。这时, 声压通过速度位函数用如下的公式求出:

$$p = \rho \frac{\partial \varphi}{\partial t}. \quad (10)$$

从公式(9)和(10)得出, 速度位函数, 即波动方程式的解为已

1) 梯度的分析式为:

$$\text{grad } \varphi = \frac{\partial \varphi}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial \varphi}{\partial y} \mathbf{j} + \frac{\partial \varphi}{\partial z} \mathbf{k},$$

式中

$\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$ ——相互垂直的单位长度向量。

知时,可以很快得出振动速度和声压的值。

公式(6)中表示式 $\frac{p_0 \gamma}{\rho}$ 具有速度平方的意义。因此,声波传播速度可以写成如下的形式:

$$C = \sqrt{\frac{p_0 \gamma}{\rho}} = \sqrt{\frac{s}{\rho}}, \quad (11)$$

式中 p_0 用巴¹⁾表示。方程式(6)的解可以写成如下的形式^[9]:

$$\varphi = A \cos \omega \left(t + \frac{x}{C} \right), \quad (12)$$

式中 A ——振幅, $k = \frac{\omega}{C}$ ——波数。从(12)式得到声压 $p = \rho \frac{\partial \varphi}{\partial t}$

与振动速度 $\left(\dot{\xi} = \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)$ 之比,这关系表示“声学的欧姆定律”,其值叫做声阻抗^[7,10]:

$$R = \frac{p}{\dot{\xi}} = \rho C. \quad (13)$$

声阻抗等于介质密度(ρ)与声波传播速度(C)的乘积,而且是一个常数,即仅决定于该种介质的性质。

让我们利用(13)式来计算火车汽笛声的空气质点振动速度。火车汽笛声声压的幅值约为 $p = 3000$ 巴,所以

$$\dot{\xi} = \frac{3000}{1.29 \times 10^{-3} \times 3.22 \times 10^4} = 70 \text{ 厘米/秒}.$$

因而;甚至对最强的声波,介质质点振动的速度都比声波传播速度小很多($\dot{\xi} \ll C$).

纵波在有限尺寸的固体(棒)中传播时,即当:

$$\lambda \gg d,$$

式中 d ——表征棒横向尺寸的值,并且假定棒的横向变形很小,服从于虎克定律^[11],波动方程式可以写成下面的形式:

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = \frac{E}{\rho} \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2}, \quad (14)$$

1) 巴=1 达因/厘米²。应当注意到:1 大气压 = 1.033 公斤/厘米² = 1.015 × 10⁶ 达因/厘米²。

式中 ξ ——位移, E ——纵向弹性模量或杨氏模量。

由波动方程式(14)得出, 棒的横向尺寸小于声波波长时, 纵波传播速度用下面的公式求出:

$$C = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (15)$$

即材料愈硬愈轻, 则其中的声速愈大。

对于固体, 声阻抗值将是:

$$R = \rho C = \sqrt{\rho E} = \frac{E}{C}. \quad (16)$$

通过介质传播的声波, 本身带有一定的能量。同时, 在一秒钟内沿垂直于声波传播方向一平方厘米的面积上传送过的能量叫做强度或声强。对于正弦形式的平面波, 声强用下面的公式确定^[12]:

$$I = \frac{p^2}{2\rho C} = \frac{\xi^2 R}{2}, \quad (17)$$

式中 p ——交变声压幅值, ξ ——振动速度幅值。

在 C. G. S. 制中, 声强用尔格·厘米⁻²·秒⁻¹来量度; 在工程上应用的单位为瓦/厘米², 而 1 瓦/厘米² = 10⁷ 尔格·厘米⁻²·秒⁻¹。在空气中, 极强的声波, 例如在 $p = 3000$ 巴时, 我们将得到:

$$\begin{aligned} I &= \frac{3000^2}{2 \times 42} = 1.1 \times 10^5 \text{ 尔格} \cdot \text{秒}^{-1} \cdot \text{厘米}^{-2} \\ &= 1.1 \times 10^{-2} \text{ 瓦/厘米}^2 \end{aligned}$$

相应地在人耳听阈内最弱的声波, 即在 $p \approx 2 \times 10^{-4}$ 巴时, 声强值等于 10⁻¹⁶ 瓦/厘米²。

§ 2. 液体与固体中的声速

液体中的声速 如上所述, 假定声波的传播是一个绝热过程, 液体中的声速用下面的公式确定:

$$C = \sqrt{\frac{S\gamma}{\rho}} = \sqrt{\frac{1}{\beta_{ad}\rho}}, \quad (18)$$

式中 S ——压缩模量, $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$, β_{ad} ——绝热压缩系数。