

超声波

在机械制造中的应用

北京市机械研究所

編譯者的話

本譯文集汇集了苏、德、英等国有关机械制造业中超声波应用方面的一些論文，主要叙述超声波机械加工工艺及特性、另件清洗、超声波焊接，同时也介紹了超声波加工用裝置的設計与計算、超声波設備和机床，而且还談到了超声对物質作用方法的应用，以及一些理論等問題。

本文集可供有关从事应用和研究超声波的工程技術人員、技術工人和科學研究工作參考。

本書多蒙北京市電工研究所幾位翻譯同志的大力協助，才得以早日完成，僅在此向他們致以謝意。由於時間倉促，譯者的能力有限，在選題和翻譯上不妥之處在所難免，希望讀者和專家們指正。來信請寄北京市機械研究所（地址：北京市建國門外大北窯）。

目 录

1. 超声波在工业中的应用..... (1)
2. 工业中的超声波技术..... (37)
3. 超声波工艺设备..... (52)
4. 超声波加工用振动器的计算与设计..... (66)
5. 遥控超声波发生器..... (82)
6. 超声波加工机床..... (83)
7. 超声波加工..... (90)
8. 金属超声波加工工艺特性..... (99)
9. 硬脆材料超声波加工法..... (110)
10. 材料超声波加工的几个问题..... (121)
11. 零件的超声波清洗..... (137)
12. 超声波清洗技术的实用..... (144)
13. 超声波在焊接中的应用..... (152)
14. 超声波焊接的若干问题..... (161)

超声波在工业中的应用

化学科学博士 B.B.庫廖夫采夫教授

人耳听不见的20,000周以上的高频振荡叫做超声波。近年来,超声波在工业的各个部门获得了实际的应用〔参考文献1—7〕。

一般说来,超声波应用可分为两大领域。

第一大领域是应用超声波进行工业检验〔参考文献8—15〕。在这方面,金属和非金属制件的超声波探伤法获得了巨大的成就,超声波探伤法已成功地应用于某些技术部门。

超声波对物质作用的方法的应用是属于第二大领域。

估计到大家利用超声波的兴趣很浓,自然会有一种力求扼要地总结这方面现有成就的希望,指出所发生的困难,探讨超声波在工业中的应用及继续发展的前景。

因此,本文主要论述超声波不涉及探伤法的应用方面,但是考虑到探伤法的重要性,另外专题讨论一下超声波探伤法是合宜的。还必须着重指出,正如许多研究工作所表明的,在超声作用下所观察到的某些效应,就是在相当强的可听声音作用下也能得到。在个别场合,可听声音的作用甚至更为有效。所以,在下文中不再讨论可听声音和超声的差别。

必须指出,超声的许多作用都由超声在物质中传播时而产生的很大加速度来决定。在此情况下,当超声频率发生变化时,应该注意,加速度是与 $A\omega^2$ 乘积成正比, A ——为振荡的振幅。因振

幅与超声功率 P 的平方根成正比，故在轉为較低頻率时，为了保持与所产生的加速度有关的效应，必須这样提高功率，使 $\omega^2 \sqrt{P}$ 之乘积为一常数〔参考文献7〕。如果观测到的效应取决于声压，則 $\omega^2 P$ 乘积应为常数。正如常见的那样，如果对于所观测的效应来说，空化现象的发生是有决定意义的話，那末便应当估計到空化与頻率的关系〔参考文献16—18〕。但是，这些见解只能提供一个概略的目标，因为在絕大多数场合下超声的作用机构尚未得到精确証实。

1. 超声波在生产檢驗中的应用

通常，声学檢驗法是利用声音速度或其吸收与传播声波的物質性能的相互关系。为此目的，不过极少〔参考文献19〕利用声场性质的观测，或者声波頻率与声源运动的相互关系〔参考文献27〕。自然，这种檢驗的精确度将和声速 C 或声吸收系数 α 的測定精确度有着紧密不可分的連系。

现代实验技术提供了測量声速变化和自动記錄測量結果的可能性，相对測量精度可达 $10^{-5} \sim 10^{-6}$ 〔参考文献14、20〕，声速絕對測量精度要稍低一点。但是，对于大多数声学檢驗法来说，就是測出相对声速值也有着决定性的意义。

声吸收系数的測定在方法上比較复杂，而且可能精度不太高，在最佳情况下，測量誤差約为百分之几〔参考文献21〕，往往超过10%。这种状况是声学檢驗仪中較常利用声速測量，而較少利用声吸收測量的原因之一。

纵声波在物質中的传播速度用下面方程表示：

$$C = \sqrt{\frac{1}{\rho \beta}} \quad (1)$$

式中： ρ ——密度， β ——絕热压缩系数。

如果物質的性能服从于理想气体定律，方程(1)則改写

成：

$$C = \sqrt{r \frac{RT}{M}} \quad (2)$$

式中：R——通用的气体常数；

T——绝对温度；

r——一定压热容量 C_p 对固定容积热容量 C_v 之比；

M——气体或气体混合物的分子量。

假设声音在气体混合物中传播，那末声速显然将和混合物的分子量，亦即和其成分有关。正因为如此，在工业中成功地应用声学测量来分析气体〔参考文献8〕。分析气体用的首批仪器是当气体压力不变和声管长度固定时利用声管音高与气体密度的关系。这种型式的气体分析器有二根管子，一根通待分析的气体，而另一根则与大气相通。两根管子都调到同音。任一根管子的音的改变就会引起差拍产生，从而便可精确地测出拍频。产生差拍的频率和气体成分的变化有关，使用普通声频计并借助于上述声学气体分析器就可测定空气或氮气混合物中氢的含量，其误差小于0.1%。

如不测量由于任一发声管声音变化而发生的拍频，则可使管音保持固定而改变发声管长度；利用保持声音固定所必需的发声管延长量或缩短量与气体成分有关的换算表，即可检测气体成分。在上述仪器中，必须注意进入两管的气体的温度的恒定性。类似上述的声学气体分析器已成功地应用于合成氨的生产〔参考文献8〕。此仪器备有信号器，当气体成分有爆炸危险时，信号器即自动接通，发出信号。

分析混合气用的现代声学气体分析器〔参考文献23、24〕，正如上所说，利用了声速与混合物成分的关系。为此目的而设计的一个仪器的工作室〔参考文献23〕就是一根管子，管子两端分别配置声波源和接收器；两端距离为 d 。假设声音频率为 ω 、速度

为 c ，則声源和接收器的电压相位之間发生相移；它等于 $\frac{\omega d}{c}$ 并在气体成份变化时亦发生变化。

为了测量相移，往示波器鉛垂板加上正的尖头脉冲，它們相当于放射器和接收器上的电压另值。尖头脉冲間的距离与相移成正比并随着气体成分的变化而变化。上述仪器供分析空气——甲烷混合物之用，但也可用来分析其它二元混合气体，如果只是声音在混合組元中的速度不同的話。气体分析器的校准曲綫如图 1 所示。

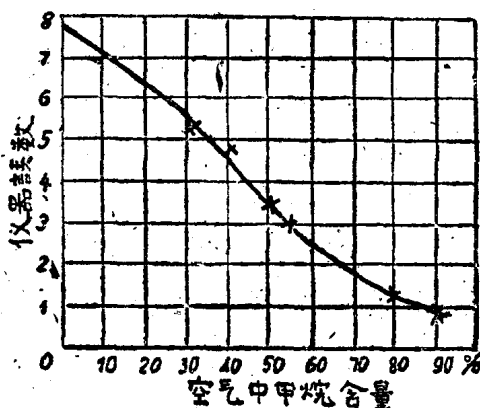


图 1 声学气体分析器的校准曲綫。

参考文献〔25〕介紹了一种气体分析器模型，声波在里面同时沿着二根相同的管子传播，一根充滿标准气体，而另一根充滿待测气体。管子的一端配置着声接收器。声音在两种气体中传播速度的差異引起接收器记录的振盪发生相移，根据相移的大小能判断出被分析气体的成分。把声学测量和化学测定（測定混合气一种組份之含量）結合起来，也可以分析三元混合物，例如， $H_2-O_2-N_2$ 混合气体。如果利用曲綫图便可減輕分析結果的計算。

还有这样的声学分析器，它以充滿待测混合气体的声室的固有振盪頻率与混合气成分的关系为原理〔参考文献24、26〕。这个原理被利用在自記分析器上，自記分析器的用途是确定內燃机中空气——燃料的混合比。废气混合物通过特殊电炉并在电炉中氧化，以致排出的气体中只含有 CO_2 和固定的少量水蒸汽。仪确定燃料——空气比值并将其記錄在磁带上，誤差为 $\pm 1\%$ ，就精度來說，此仪器不亚于利用混合气体化学分析法的类似分析器。

前面已經指出，应用声学气体分析器时必须保持恆定温度。为了明确方向起见，可进行下列計算：假定空气乙烷混合物在乙烷含量为 5 至 60% 的条件下发火燃烧〔参考文献28〕；在浓度范围接近空气——乙烷混合物燃烧下限时，如乙烷浓度增加 1%，声速在 0° 时增长約 1 米/秒；同时温度升高 1° 便引起声音在混合物中的速度增大 0.6 米/秒。

使人确信：为了可靠地分析混合气体，保持恆定温度，是头等重要的。就恆温技术的现状來說，保持必要的恆定温度不会有很大困难。

在某些场合，光学——声学分析器〔参考文献22〕能引起人們的兴趣。这类仪器內有一道断續的射綫束射向被分析的混合气体，混合气体中待检测的那个組份便选择地吸收射綫。由于吸收射綫能量的結果，被分析混合物中产生声頻压波，借微音器便能感觉出来。所生声波强度和吸收射綫能量的气体含量有关。利用光——声反射效应，〔参考文献29〕有可能在长波紅外区进行測量，因此能够分別測定混合物中各种碳氢化合物的含量。

声学气体分析器沒有慣性，允許在气流中进行測量，并且对不大的压力变动不灵敏。此仪器可以装配上自动記錄气体成分的附件，必要时它发出光信号或声信号。

上述原理被用来設計分析混合液〔参考文献14〕，特別是測

定清洗度，乃至化驗蒸汽鍋爐和透平機等用水的儀器。為此而設計成的УЗНС—3型儀器（超聲速度計）內有二個同樣的容器，一個容器內流過待分析的液體，同時另一個容器則灌滿標準液體。超聲脈沖則通過這兩個容器。

超聲脈沖通過所需時間根據液體成分而發生變化。適當的電子設備即可記錄約 $10^{-2}\%$ 的聲速變化和極準確地觀測所分析液體的成分。УЗНС—3型儀器能夠以 0.1% 的準確度檢驗乙醇濃度和測定甲醇木精的雜質。

在某些場合，為了檢測的目的，可以利用聲音吸收隨着混合物成分變化而變化的原理，比方說，檢測鑄造浮渣的成分便是如此。圖2所示為用УЗНС—3測得的聲吸收與浮渣濃度的關係曲線。仔細看一看圖形，就會使你信服，浮渣濃度和實驗測定的聲吸收量之間是存在着一定關係的。

因二元混合物的比重和其成分有關，УЗНС—3可在某些場合用來連續地觀測液體的比重。由於聲學測量法無慣性，使得我們有可能用它來測定內燃機工作時氣缸中的溫度變化（參考文獻30）。為此目的，將氣缸配上一個特殊工作室（圖3），室中插入二根銅管，一根引超聲脈沖進入被測氣體內，而另一根將已通過氣體的脈沖送到接收器。超聲波發射器和接收器是鈦酸鋇做的兩個換能器。專門電子設備能測出超聲脈沖通過從發射器到接收器一段路程所需要的时间；在上述儀器中，這時間等於40微秒左右，正如誤差鑑定所表明的，測定這個時間的誤差可能是 $\pm 1.2\%$ ，對此必須加上由於氣體成分的某種不定性和此氣體性能對理想氣體性能的偏差所引起的誤差。

超聲脈沖傳播路線上溫度變化的可能性，在確定聲速和溫度的關係時，同樣會引起某種不固定。事實上，如果以 $T(X)$ 表示溫度沿脈沖傳播方向的分布函數，那末用下列積分便可求得脈沖通過從 X_1 到 X_2 一段路程所需的時間 t ：

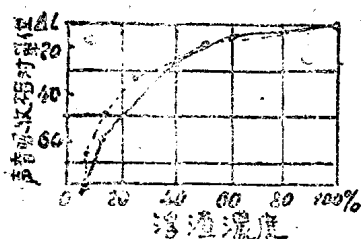


图2 声音吸收与浮渣浓度的关系曲线

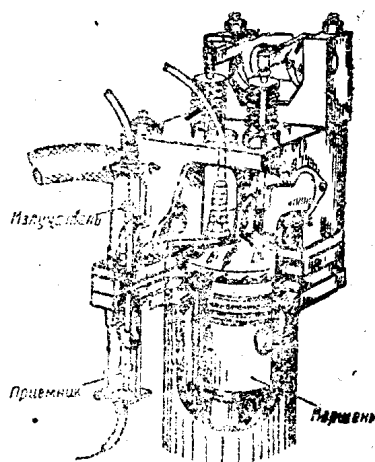


图3 内燃机工作室中声音速度的测量

$$t = \left[\frac{rR}{M} \right]^{-1/2} \int_{x_1}^{x_2} \left[T(x) \right]^{-1/2} dx, \quad (3)$$

式中: $r = \frac{C_p}{C_v}$;

R —气体常数;

M —分子量。

不难相信: $T(X)$ 函数无论怎样变化, 方程式 (3) 仍可成立。

根据此仪器制造者的鉴定, 温度测定总相对误差在低温时约为 3%, 在高温时约为 5%。但是, 在此情况下, 假设温度有变化的混合气体的性能和理想气体的性能没有区别, 特别是, 假设温度和压力变化时热容量比仍然不变。后一假设可能性极少〔参考文献 15〕。这个意见并不贬低所提方法的价值, 因为在静止条

件下仪器是可能预先校准的。图4表示内燃机工作一星期的研究结果。必须指出,所得到的结果几乎完全一致。超声测量温度的方法,在某些技术部门,以及在研究燃气涡轮机和气轮喷气发动机的工作时可以获得应用。

近几年来,超声测量法被用来测定难以观察的液流速度(参考文献31)。为此目的,在液流导管上装两个钛酸钡造的换能器Q(图5)。其中一个换能器是发射器,而另一个是超声脉冲接收器。在机械式换接器的帮助下,两换能器每秒10次地改变自己的作用,并且是放发器和超声脉冲接收器轮流地进行改变。因为超声在液体中的传播速度比较小,所以在放发器和超声接收器的振荡之间产生相位差 $\Delta\varphi$,此相位差不难测出。因为测量是在流动的液体内进行的,而 $\Delta\varphi$ 值将取决于超声在液体中的速度 C 和流速 V 。为了消除由于测量 C 值不准确而引起的误差,可顺液体流动方向和逆流方向轮流地进行测量。假设两换能器间的距离为 D 和超声圆频率为 ω ,相位差将可由下列方程式求出:

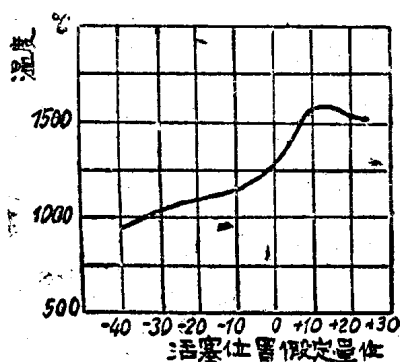


图4 用声学法测量内燃机气缸温度的结果

当脉冲顺着液体流动方向传播时:

$$\Delta\varphi_1 = \omega \frac{D}{C+V} = \omega \frac{D}{C} - \omega \frac{VD}{C^2} \quad (4)$$

当逆向传播时:

$$\Delta\varphi_2 = \omega \frac{D}{C-V} = \omega \frac{D}{C} + \omega \frac{VD}{C^2} \quad (5)$$

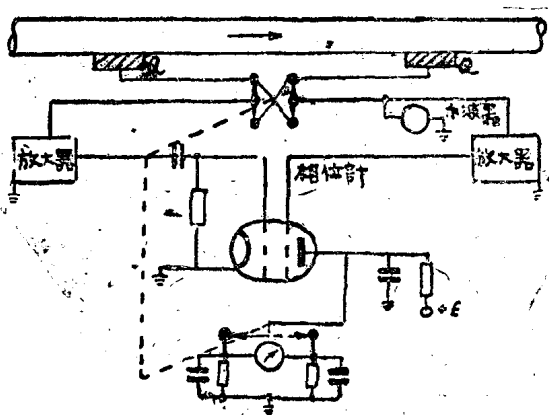


图5 超声测量液流速度计示意图

相位計记录下 $\Delta\varphi$ 两数值之差，即：

$$\Delta\varphi_1 - \Delta\varphi_2 = \left| 2\omega \frac{VD}{C^2} \right|, \quad (6)$$

式中沒有数值大的 $\omega \frac{D}{C}$ 項，如果有时，会使測量結果失真。

設 $\omega = 2\pi \times 10^5 \text{ 秒}^{-1}$ ； $D = 10 \text{ 厘米}$ ； $C = 1.5 \times 10^5 \text{ 厘米} \cdot \text{秒}^{-1}$ ； $v = 10 \text{ 厘米/秒}$ ，則得出：

$$\Delta\varphi_1 - \Delta\varphi_2 = 0.32^\circ.$$

上述仪器可以进一步改善。特别是用电子换接器来代替机械换接器。在形式上作某些改变时〔参考文献32〕，类似的仪器可以测定液体的重量消耗，或者說，測量液体的密度。已經設計出了一種特殊的測量海流用的声学仪器〔参考文献33〕。仪器的电子部件、磁性罗盘、星期发条表、继电器和照相机都装在魚雷状容器內。容器外面装有超声波发射器和接收器。鋼索把容器絆在重型圓筒上，圓筒內帶着为仪器供电用必需的蓄電池，这个重型圓筒就代替錨。漂游在水面的輕浮标标明浸入水中的順流配

置的仪器位置。经过一定时间以后，继电器接通照相机拍下钟表、盘罗和超声振荡相移记录器的读数。在胶卷显影以后，可以精确地看出，在一定时间内水流速度及其方向的变化情况。

在某些化学工艺部门，在检测化学过程时，必须注意物品的粘度变化。为此目的，已经设计出了一种自动超声粘度计，它由小型探测器、联接电缆和复杂电子计算机组成。直接工作的部件——探测器乃是矩形截面的、磁致伸缩材料制的金属条。特殊振荡器激发出探测器的超声振荡，超声振荡的波长比探测器的横截面尺寸大得多。标准仪器的振荡频率为28千周，特殊用途的仪器的频率可在10至150千周范围内变动。

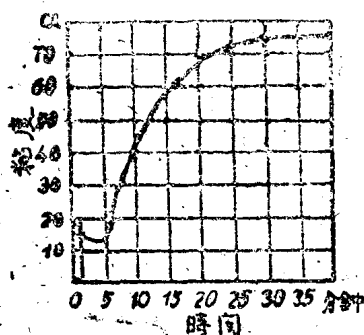


图6 人血凝固过程中的粘度变化

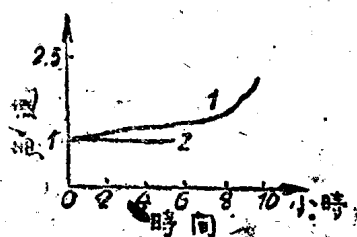


图7 反应过程中声速的变化：
1—甲基丙烯酸酯的聚合；
2—蔗糖的变化。

当把探测器浸入液体内部时就会激起横波和纵波。液体的粘性引起这种波沿探测器的传播速度和探测器振荡的衰减。超声波的能量是很小的，因而不影响被研究材料的性能。

对于具有“牛顿”粘度的液体，上述粘度计是测定真粘度，而对于粘性弹性材料，则是测定所谓“表观”粘度，也就是会引起探测器振荡衰减的“牛顿”液体的粘度。此仪器能够在-123至

+343°C的很宽温度范围内連續地測量粘度。

粘度計可以完成极不相同的測量任务,比方說,用此仪器測量如图6所示的人血凝固过程中的粘性变化。同时也可以測量流动中的液体。測量所需時間小于1秒。測量誤差为2~5%。此粘度計还可以測量深厚液体以及液膜的粘度,測量范围从1至 5×10^4 厘泊·克/厘米³。

相应的計算表明,如果超声頻率比之分子振盪頻率小,而超声场强不大的話,超声并不影响化学反应的速度〔参考文献13〕。因此,測量超声速度的方法可作为检查某些化学反应进行的一种方法。研究介質彈性变化特强的聚合反应时应用这个方法是特別有效的。图7所示为用声学法研究50°C时在催化剂作用下甲基丙酮酸脂聚合反应(曲綫1),以及蔗糖轉化反应(曲綫2)的結果。应当注意到,当蔗糖轉化反应进行的时候声速是不变的。

必須指出,化学变化对超声传播速度的影响較小,即使对一些其他反应說来,也是如此。这一情形对于采用声速直接測量法来检查化学过程受一定限制。

如众周知,声速取决于介質的彈性,所以声学測量可用来測定表示物体彈性的几个常数。表示各向同性体的彈性的常数是 δ 和 μ ,常数 μ ——刚性模量,而常数 δ 和杨氏模量及模压縮系数(泊松系数) σ 有关,其关系式如下:

$$E = \frac{\mu(3\delta + 2\mu)}{\delta + \mu} \quad (7)$$

$$\sigma = \frac{\delta}{2(\delta + \mu)} \quad (8)$$

依据弹性理論,纵波在无限膨胀介質中的传播速度是 C_L ,可由以下方程求出:

$$C_L = \sqrt{\frac{E}{\rho} \times \frac{1-\sigma}{(1-\sigma)(1-2\sigma)}}, \quad (9)$$

式中： ρ ——介質密度。

切变波在无限膨胀介質中的传播速度为 C_t ，它等于

$$C_t = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (10)$$

如果以实验方法确定 C_l 和 C_t ，那末计算泊松系数 σ 和介質弹性常数就不复杂了。现在，测量固体弹性常数的声学法，或通常所说的动态法，在研究固体弹性及其随着温度、成分、加工性质等的变化的变化时，获得了广泛的应用〔参考文献1、35、36〕。声学法还特别广泛地被用来研究各种玻璃的弹性性能。

必须指出，弹性动态研究法使有可能得到和静态法不同的絕热弹性常数值；用静态法能求出上述常数的同温值。

声波在各向异性固体——晶体內传播时，情况是比较复杂的。特别详细地研究了砷金属卤化物晶体的弹性。

研究高分子聚合物的弹性的工作中广泛地应用着声学研究法〔参考文献37—39〕。研究超声速度及其吸收系数的频率及温度关系，可以作出关于聚合物性能以及其中所产生过程的有价值的結論。对用动态法研究生橡胶的弹性进行了大量的研究工作〔参考文献40、41〕。用此方法研究了生橡胶化学性质、硫化条件、填料性质和数量，以及其它因素对橡皮弹性的影响。如果試样制成薄壁管状并研究声波沿其軸传播，这样，计算便简化了。在此情况下，延伸波传播速度 C_d 与材料的弹性有关，其方程式如下：

$$C_d = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (11)$$

式中： E ——杨氏模量， ρ ——材料密度。

对于扭转波在管中的传播速度說来，切变波在无限大的介質中传播速度的公式(10)同样是适应的。

动态研究法，在不破坏試样检查混凝土质量的场合，就获得了大量的推广〔参考文献42〕。由于实验研究的结果，已经弄清，

混凝土硬化过程中纵超声波在其中的传播速度会发生变化，这变化和混凝土强度变化有关，亦即和它的质量有关。超声速度和混凝土质量的关系大体如下。

超声速度，米/秒	混凝土质量
4,500以上	优良
4,000—4,500	中(尚好)
3,300—4,000	坏
2,300—3,300	很坏
2,300以下	

但是必须指出，超声在混凝土中的传播速度与混凝土成分及水泥保存方法有密切关系。因此，当应用声学法测量混凝土质量特征时，必须首先用实验方法确定对于该种材料的上述超声速度和混凝土强度的相互关系。

声学法不仅能够检查混凝土单个制件试样的质量，而且能够检查堤坝、桥梁、各种地基、路面和其它建筑物内的混凝土质量。原则上，此种方法也适于检测其它建筑材料，以及各式各样的化工产品的强度。譬如说，声学法成功地应用于检查皮革的质量〔参考文献43〕。在皮革的化学物理性能，特别是原纤维定向作用发生变化的条件下，超声在其中的传播速度也发生变化。测量出声速就能够考察样品应力、陈化、充脂等所引起的原纤维排列变化，可以确定声速和皮革断裂延伸率及应力值之间的相关关系。为了用声学法研究皮革，已经设计出了一种专门的机器。这方法的缺点是，超声在皮革中的速度和下面许多因素有关：鞣制、含脂量和温度、样品剪裁方法、厚度和长度，同时还未能分别地找出这些因素对声速的影响。有人提出按照100°C时陈化过程中超声在皮革内的传播速度最大值来表征皮革质量。

能作振盪的任何物体都有一定的固有振盪頻率，即所謂諧振頻率，在此頻率时振盪特別强烈。对于片状物來說，振盪諧振頻

率 t_R 和其厚度有关并由以下方程决定：

$$t_R = \frac{kC_l}{2d},$$

式中： k —自然数列； C_l —纵声波在薄片中的传播速度。如果知道 C_l 和测量出 t_R ，可以确定薄片的厚度 d 。以这个原理作基础創造了大量的各式各样结构的超声波厚度計〔参考文献44〕。通常，这类型式的仪器中超声波发射器紧紧貼着壁，壁的厚度最好一定。特殊装置（往往是能改变振盪回路电容的可轉动电容器）迫使輻射振盪頻率在一定范围内平稳地变化。当发射器振盪頻率和壁的諧振頻率一致时，振盪回路中的屏流变化着。这变化使得有可能极准确地測定壁的諧振頻率，若知道 C_l ，便可計算出壁的厚度。借助这种仪器测量厚度所达到的精度約为0.1%，但是，一般为3%左右。实际上，可测厚度范围在5至90毫米限度內。应当注意，发射器所紧貼的表面应很好加工，并且应有一定程度的正确形状。如果表面不平度超过半个波长（在薄片材料中）的话，测量是不可能的。为了测量曲面壁的厚度，仪器須备有殊特形状的发射器。超声波厚度計的一个优点是，在只能接近一面的情况下能够进行测量，例如测量管子、蒸汽鍋炉壁、压缩空气罐、船壳以及其它。

为了上述目的，可利用脉冲式超声厚度計，这种厚度計在某些场合可能比諧振式仪器优越。

这些仪器能确定金属板的結合质量。結合得好时，已結合的板如同一个整体，并且测出的厚度正好等于两板的厚度。結合得不好时，测得的厚度只是发射器所貼着的那块板的厚度。同样，上述仪器也能測定各式容器灌注液体的程度。

声学测量厚度的精度使得有可能发现冷軋薄鋼板时鋼板內发生的弹性非均质现象。这样，已經确知，在軋制方向切变波速度是3243米/秒，而在垂直方向仅为3140米/秒。