

超聲波及其應用

（附錄）
（附錄）
（附錄）

鋼鐵研究院

圖書編號

圖書編號

超聲波及其應用

(蘇聯)Л.Л.羅森別爾格著 方明譯

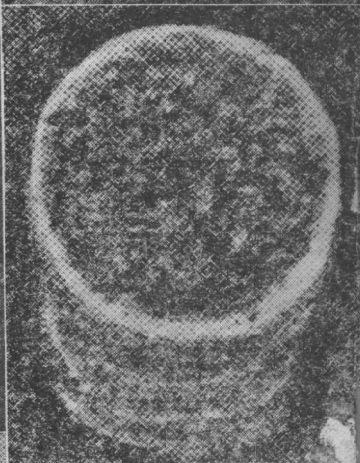
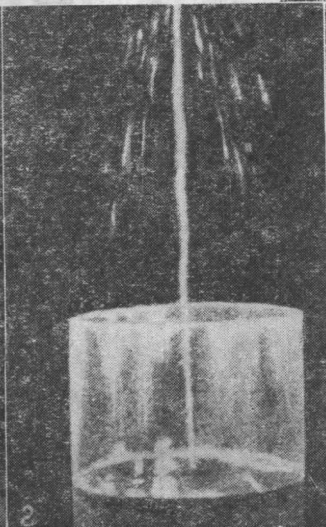
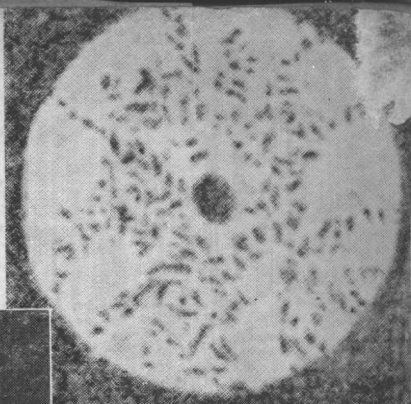
鋼 鐵 研 究 院

分 类 号 _____

登 記 号 _____

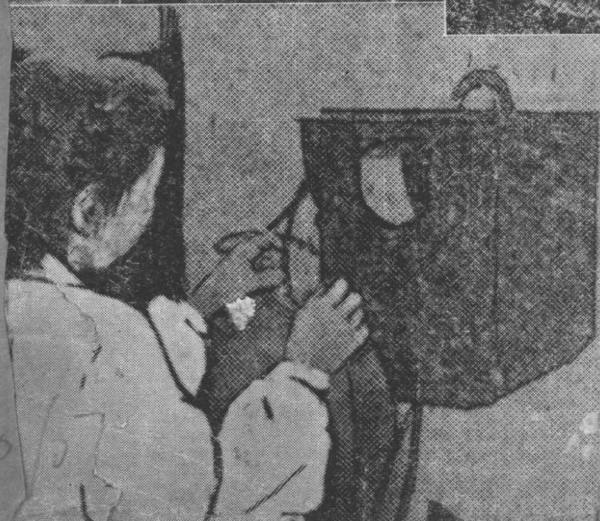
右：液體中的孔蝕氣泡。

下：兩幅都是超聲波所產生的噴泉。

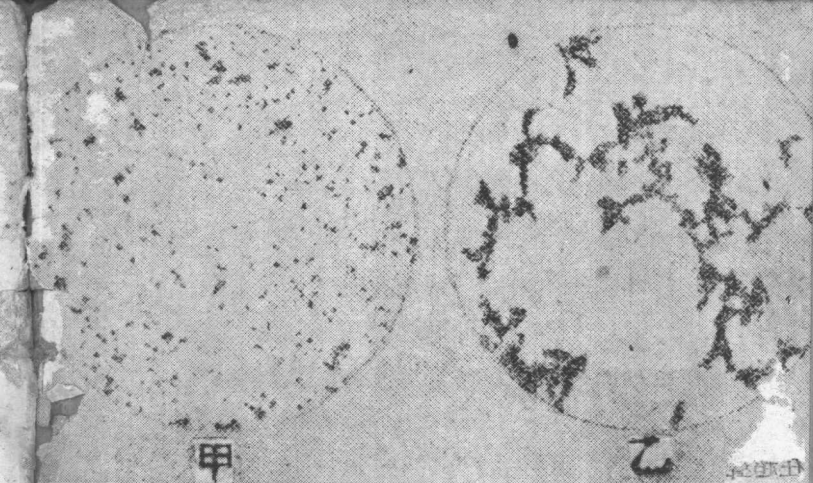


上：受了孔蝕
氣泡作用後的金
屬表面。

左：回波—
缺陷檢查器所
形，檢查者
這儀器前工

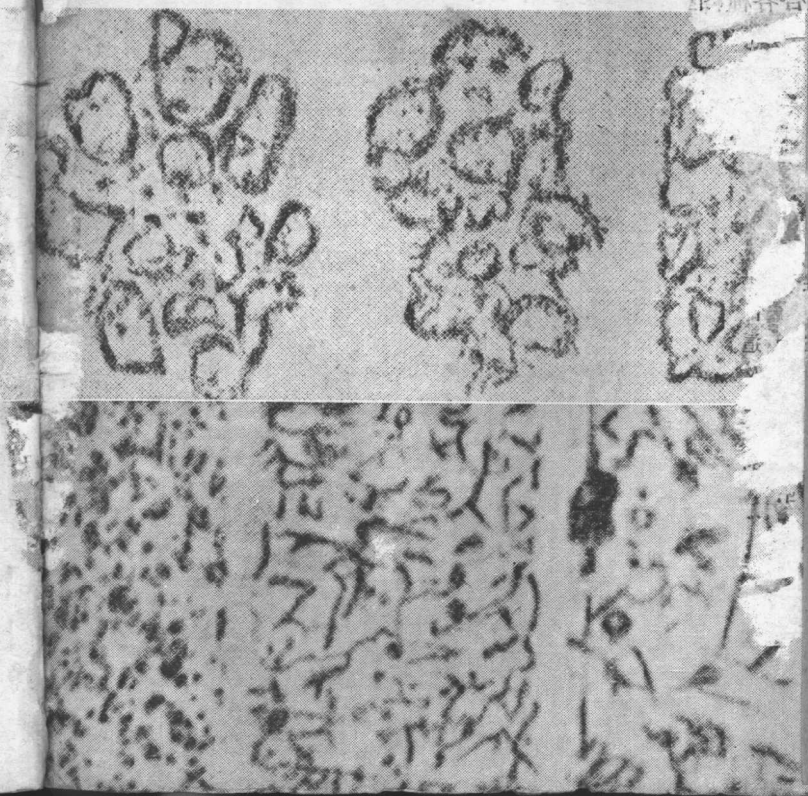


KAR60/07



下：超聲波照射下的草履虫。隨着時間遞增而得到的四張照片。

上海科學出版社



引 言

最近十年來，在科學技術雜誌及通俗科學雜誌的文章裏，時常見到「超聲波」這樣的一個新名詞。這個名詞的出現多在一些似乎與它本身毫不相干而出乎意外的場合。例如人們談到用超聲波來檢查金屬產品的缺陷，也談到用它來消毒牛奶。至於鐸接鋁金屬，洗衣服，在玻璃上鑽孔，以及尋找沉沒了的船隻等也都應用了超聲波。

超聲波的用途既然是多種多樣的，究竟它怎麼可能有這樣多的用途呢？正如超聲波這個名詞本身所指出的，首先它是一種聲波。同時，我們任何人在早先都沒有聽說過交響樂隊的音樂、警笛聲或風聲，能够解決上面所提到的各種任務。

那末人人都熟悉的聲波比起超聲波來究竟有什麼相同和不相同的地方呢？

聽不到的聲音的性質

超聲波是什麼 現在讓我們稍微回想一下吧。聲波是一種能在任何介質中（如氣體、液體及固體）傳播的彈性波。聲波的傳播情形如在圖一中表示。

爲了簡化起見，我們可以不研究真正的聲源，而研究一個理想中的聲源——一個作週期性脹大與縮小的小球（畫在第一圖的中心）。當小球脹大時，緊靠着小球的介質質點受到壓縮，這些質點再將這個壓縮傳給相鄰近的一層。這種壓縮狀態傳遍整個介質。然後，當小球收縮時，緊靠着小球的、原來已被壓縮的介質質點就能膨脹，這種膨脹狀態也同樣地逐漸傳遍了整個空間。壓縮和稀疏所構成的依次交替過程朝着各個方向傳播，這就是聲波。

我們所聽到的聲音，隨着離開聲源的距離而減弱。造成這個現象有着兩個原因：第一，當聲波在介質中傳播時，聲波被介質吸收了一部分；第二，聲波的總面積隨着它離波源的距離而遞增，而總面積所具有的能量，則由於被吸收的緣故而遞減。因此，聲波單位面積上的能量減少了，而這個數量正是決定着聲音的響度的。

聲波的傳播速度只是和介質的性質有關。例如聲音在空氣中的傳播速度每秒約爲三百四十公尺，在水中每秒約爲一千五百公尺，在鋼鐵中每秒約爲五千三百公尺。這裏所引用的數字都是平均值，並且因溫度、壓力的不同，甚至因少量

雜質的存在而有所變化。空氣中的聲速決定於水蒸氣及二氧化碳的含量；海水中的聲速也因其含鹽的多少而有所變化。

每種聲波都有一個物理量，那就是在一秒鐘內相互交替的壓縮次數和稀疏次數。一次壓縮和一次稀疏構成一週波。一秒鐘內的週波數便叫做這個聲波底頻率（註一）。

在人的耳朵聽來，頻率不同的振動便是高低不同的聲音。最低的聲音（打鼓聲、低音號聲等）的頻率很小：只有100—300赫茲。相反的，高的聲音（長笛、哨笛、蚊鳴等）的頻率很大：大到6000—8000赫茲。比20赫茲還低的聲音以及比15000赫茲還高的聲音，我們的耳朵根本聽不到（註二）。然而這是不是說聽不到的聲音客觀上就不存在了呢？當然不是的。它們的存在可以用特殊的儀器來證明。

聽得到的聲音以及聽不到的聲音，同太陽光表現在光譜上的情形大體上相似。在太陽光譜中，有從紅色到紫色的可見光區域，也有紅外線和紫外線兩個不可見光的區域。聲音同太陽光譜相似，比人耳所能聽到的頻率還低的聲音叫做超長波；而頻率超過15000赫茲的聲波振動便叫做超聲波，這是我們的耳朵所聽不到的聲音。

所以，超聲波就是聽不到的高頻聲波。

很自然地會發生這樣的一個問題：超聲波的第二個界限到底在那兒呢？也就是說，超聲波底最高頻率是怎樣呢？根據下面的說明，我們可以找到這個問題的答案。在聲波傳播的過程中，聲波本身所具有的能量，被傳播聲波的介質吸收

了一部分。至於被吸收的這部分能量有多大，則決定於介質的性質。照例說來，聲波的能量在氣體中被吸收得最多，在液體中吸收得較少，在固體中吸收得最少（例如在金屬中，在石英晶體中等）。並且，振動的頻率愈高，也就是說聲音愈高，被吸收的能量就愈增多。當樂隊由遠而近或者由近而遠的時候，我們所聽到的聲音便是證明聲波吸收原理的好例子：隨着距離的增加，首先消失的是高的聲音，如長笛和豎笛，然後是中音短號和中音提琴，最後，當距離很遠的時候，我們就只能聽到大鼓底聲音了。最低的聲音傳播得最遠。超聲波也適於這個原則：頻率愈高，吸收愈厲害，而超聲波所能傳播的距離就愈短。第一個注意到這種情況的人是著名的俄國物理學家 П·Н·列別捷夫，而早在一九〇六年，他的學生們便研究了獲取超聲波振動的方法，並對超聲波進行了許多重要的實驗。

我們根據上面的說明便可以估計，超聲波振動的上限大約是一千億赫茲比這個數字更再高的頻率的超聲波吸收得如此厲害，以致它在聲波發射器的表面上就已完全無聲。然而這個上限尚未達到過。目前，最高頻率的超聲波是蘇聯科學家 С·Я·索科洛夫教授在實際研究中所獲得的，其頻率大約是一百萬赫茲。

聲波射線 聲波從聲源朝着各個方向傳播，這一點是我們都熟悉的。例如，當一個人說話的時候，在他的前面、側面，甚至在他的後面，都一樣地能聽到他的聲音；當汽車響喇叭

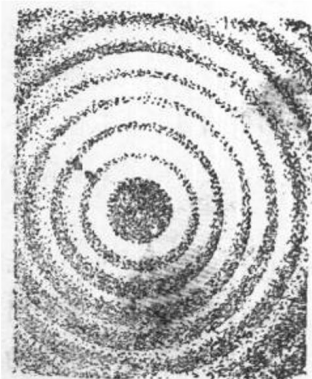
叭時，喇叭聲音在各個方向的傳播情形都完全是一樣的。因此我們說，可聽到的聲音的聲源是沒有方向性的，或者說是方向性很小的。

此外，如果讓聲波通過一個不大的孔，那麼在通過以後，聲波將繼續朝着各個方向傳播，並不會以定向射線的形式向前進；這和光線在通過不透明屏幕上的小孔以後的情形不同，大街上的嘈雜聲通過開着的窗戶傳到屋子裏以後，各個地方所聽到的聲音實際上都是相同的，而不限於對着窗戶的地方。

我們都知道，光線和聲音一樣，也是具有波動性的，如果把不透明的東西放在光線所要經過的路徑上，便會產生出這些東西的影子來。在任何情形下，如果障礙物並不太大的話，聲波是不會產生這樣的影子的。在音樂會上，我們能聽到所有的樂器，沒有一個例外，雖然有很多樂器是看不到的，因為它們被其他的樂器擋住了。聲波彷彿「繞過」了障礙物，因而不會產生影子。然而聲音並不是永遠都有着這種「繞過」現象的。站在無門窗的高牆的兩邊，彼此談話是很困難的；如果同你交談的人是在兩層樓的另一層，那麼你就根本不會聽到什麼東西。可是這都是特殊情形，我們在日常生活中，照例是看不到聲波的影子的。

聲音和光都是波動，為什麼却具有這種似乎是完全相反的性質呢？爲了弄清這一點，還需要講一個聲學中的概念——聲波的波長。

在向前傳播着的聲波中，相鄰兩個壓縮或相鄰兩個稀疏中間的距離叫做波長（見圖一）。換句話說，波長就是聲波在一個全振動期間內所通過的距離。通常用希臘字母 λ 來表示波長（ λ 讀作「蘭達」）。



圖一 聲波的傳播。

從這個定義當中，可以導出一個表示 f 、 λ 、 c 三因素有關係的基本公式，（ f ——聲波振動的頻率， λ ——波長， c ——聲波在介質中的傳播速度）。事實上，既然聲波在一個全振動期間所傳播的距離為 λ ，那麼它在一秒鐘內所傳播的距離便要大 f 倍，因為它在一秒鐘內完成了 f 個全振動。可是從另一方面看，聲波在一秒鐘內所傳播的距離正好就是聲音在介質中的傳播速度。這樣一來，我們便得到

$c = \lambda f$ ，即聲波的傳播速度 = 波長 $\times$ 聲波振動的頻率。

從這個公式中可以看出，對一定的介質來說，波長與頻率成反比：頻率愈高，波長愈短。因為超聲波的頻率比可聽到的聲音的頻率要高得多，所以超聲波的波長就短了。

事實告訴我們，聲波在障礙物附近的傳播，主要是決定於障礙物的大小同波長之間的比例關係。如果障礙物很小，或者障礙物的大小和波長相差不遠，那麼，波便會繞過障礙物而不產生影子。同樣地，當波通過小孔（和波長相比）之後，

便會朝各個方向傳播（散開）。可是假如障礙物比波長大得多，散開的情形便不會發生，從而在障礙物的後面產生出影子。

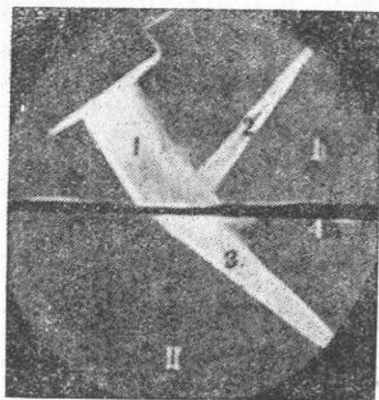
可聽到的聲音的波長在幾十厘米或一兩公尺左右。因此，人的身體和放着樂譜的架子，是不會成為聲波的障礙物的——聲波完全能繞過這些東西。祇有比兩公尺還大的障礙物才會產生「聲影」（在我們談過的例子中，高牆和房屋便是這類障礙物）。而光波的波長是用毫米的萬分之幾來度量的，因此，我們周圍所有的東西都會產生明顯的影子。

上面已經指出過，超聲波與通常聽得到的聲波不同，就在於超聲波具有非常短的波長。因此超聲波也能產生「聲影」，並且能聚集成狹小的發射綫束。同光綫的情形一樣，我們把這種發射綫束叫做超聲波發射綫。

超聲波發射綫和光綫有很多相似的地方。超聲波發射綫能够反射、折射。並且還能聚焦，它在這時所遵循的定律和幾何光學的定律完全相同：超聲波發射綫的入射角等於反射角；在從一種介質轉入另一種介質時，超聲波發射綫便發生折射，也就是說，將改變它自己的傳播方向。圖二是一張超聲波發射綫的照片：在圖的左上方有一個超聲波發射器，超聲波發射綫從這裏發出，然後到達一塊金屬板的表面上。這時一部分的超聲波能量被反射了，從圖上可以看出，反射角是等於入射角。一部分超聲波發射綫則穿過了金屬板，但因為聽不到的聲音在板後面液體中的傳播速度，與在板前面液體中的傳播速度是不同的，於是在穿過金屬板以後，超聲波

便發生折射，也就是說，多少把它自己的傳播方向改變了，從照片上也可以非常清楚地看出這一點。

現在可能會發生這樣的問題：這張照片是怎樣攝取下來的呢？因為超聲波發射綫和聲波本身都是看不到的。事情是



圖二 超聲波發射綫的照片。

- 1—入射綫；2—反射綫；3—折射綫；
4—金屬板；I和II—兩種不同的液體。

這樣的：當超聲波在介質中傳播時，產生了相當大的剩餘壓力。由於這種壓力的作用，在超聲波發射綫所走過的地方便產生了密集，這些密集可以用特殊的光學方法觀察出來。這樣一來，超聲波發射綫的「跡像」就能看得出來。

超聲波的波長很短，

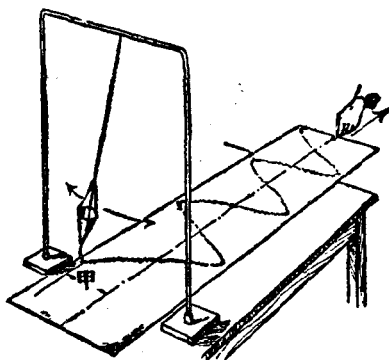
因而可以造成超聲波發射綫束，這就使我們不僅能

够把超聲波的全部能量集中到所需要的方向，並且還能够把超聲波聚焦，也就是說，能把超聲波發射器的全部能量集中在不大的體積中。同聚焦光綫的情形一樣，也可以用凹面鏡以及稜鏡等等來聚焦超聲波。聲學稜鏡的樣子同常見的光學稜鏡很相像，但用來製造聲學稜鏡的則是這樣一些物質，聲音在這些物質中的速度和在周圍介質中的速度是不相同的；例如，在水底工作時所用的聲學稜鏡是用膠玻璃製成的。

聲波底功率 我們已經知道，超聲波是一種同聲波相類似的波而不同的就在於頻率比較高，高到超過人的聽覺所能接收的限度。我們還知道，因為超聲波的波長很短，所獲得的超聲波便能形成爲定向的、集中的發射綫束。但我們還完全沒有認識到超聲波的另一特性，即那些使超聲波成爲如此有用的技術工具的特性。

這些特性也是產生於超聲波的基本性質——振動頻率非常高。爲了闡明這一問題起見，現在我們來研究一下傳播聲波的介質中某一質點的振動情形。

聲波是由依次交替的壓縮與稀疏所形成的，在這些壓縮和稀疏的作用下，我們所研究的質點會像擺球一樣地在其平衡位置附近作忽左忽右的振動。在振動時，質點從它的平衡位置偏移一個距離 A ，我們通常把 A 叫做振幅（見圖三）。很顯然，在頻率像 100 赫茲這樣的聲波的作用下，質點走過長爲兩倍振幅的距離的次數必須爲 100。但在振



圖三 介質質點的振動（在向前移動的木板上，可以看得出振幅爲 A 的振動跡像）。

幅不變的條件下，如果振動的頻率變成 1000 赫茲，那麼在一秒鐘內，同一質點所必須走過的距離，將等於兩個振幅的

1000倍。要做到這一點，質點運動的速度比第一種振動時的速度要大九倍。

因此，我們可以得到一個結論：聲波的頻率愈高，介質質點的振動速度便愈大，這種速度與聲波的頻率成正比。另一方面，力學又告訴我們，運動着的物體所能表現的能量是由動能來決定的，動能的數值等於物體的質量乘上物體平均速度的平方，再用二來除一下。這就是說，聲波振動的頻率愈高，質點振動的速度便愈大，因而聲波傳遞給質點的能量也就愈大。

應當指出，我們平常所聽到的聲音的能量是很小的。我們可以用下面的例子來說明這種能量的大小。如果我們想用說話聲音的能量來燒開一壺水（燒開一壺水需要在二十分鐘的時間內供給四百至六百瓦的功率），便需要把所有的莫斯科市民在二十四小時內說話的能量全都收集起來。說話聲音的能量是非常小的，它僅僅能使我們非常靈敏的耳朵的機構動作起來。

談到超聲波振動，情形便大不相同了。例如，頻率為一百萬赫茲的超聲波振動所具有的能量，相當於振幅相同而頻率為1000赫茲的聲波振動所有的能量的一百萬倍，因為聲波的能量與頻率比的平方成正比。

由此可見，超聲波的第一個特點是：超聲波所有的能量比可聽到的聲音所有的要大得多，這種能量能對物質和有機體能發生作用。超聲波發射綫束的功率可達到幾十到幾百瓦

特，而其強度（也就是說發射綫束的單位截面積上總共有的功率）則可以達到每平方厘米幾瓦特，有時甚至達到每平方厘米幾十瓦特。

液體的斷裂 我們已經說過，聲波在液體和氣體中的傳播過程，是由介質的壓縮與稀疏依次交替而形成的。這就是說，在介質原有的壓力上面（當沒有聲波時），例如在大氣壓力上面，要加上或者減去某一個額外的或多餘的壓力，這個壓力是由於聲波的通過而產生的。這種多餘壓力的大小和聲波的強度有直接關係，因而叫做聲壓。對於通常所聽到的聲音說來，這種壓力非常小；例如，當我們談話的聲音不很高，這種壓力大約為 0.001 克/厘米²。爲了說明這個數量小到什麼程度，我們可以指出，這個壓力剛好能吸起一個小虫（例如落在水面浮葉上的小虫）。

由於超聲波的能量非常大，超聲波中的多餘壓力便能達到很大的數值。例如，當水中有中等強度（ $3-5$ 瓦/厘米²）的超聲波通過時，多餘聲壓等於好幾個大氣壓。當液體中具有這麼大的聲壓時，便會引起一種名叫孔蝕的新現象。

正如上面所談到的，聲壓有時是正的，有時是負的，也就是說，當聲波在密集狀態發生時，液體將受到來自各個方向的壓力，此壓力的大小等於幾個大氣壓；當稀疏狀態發生時（也就是說在負壓力時），液體上將有拉力作用。液體容易「經受」住大的壓縮，但在拉力作用時，液體就經受不住而斷裂開來。這類斷裂發生在液體強度減弱了的地方；在液

體中，小氣泡以及雜質小質點多般在這樣的地方。

由於斷裂的結果，在液體中產生了許多小空腔（孔蝕氣泡），這些空腔存在的時間很短，接着便會閉合起來。在閉合時有很大的作用力產生，而瞬時壓力則能達到幾萬大氣壓。當壓力陡然增加到最高峰時，溫度會猛烈地上升。

氣泡閉合時產生的巨大壓力，能够破壞它附近的固體的表面。封二的右上圖為一張照片（攝影時的露光時間大約是萬萬分之一秒），這張照片來自蘇聯物理學家 M·O·科爾費爾得與 Л·Я·蘇沃洛夫的著作。照片所拍攝的是液體在超聲波通過時的情形。在照片上可以看到許多不同大小的孔蝕氣泡。照片的中心有一個斑點——這是由幾個小氣泡合併而成的大氣泡。封二的右下圖所表示的，是金屬表面受到正在閉合的孔蝕氣泡所產生的作用的情形，我們可以看得很清楚，孔蝕現象所引起的破壞是很厲害的。然而，孔蝕氣泡所引起的副作用還不限於此。著名的蘇聯物理學家 Я·И·弗林格爾作了一個這樣的假設（這個假設後來得到了證實）：他認為當氣泡形成與閉合的時候，會發生帶電現象；氣泡中跑進了小的火花，因而整個液體開始微微發光。蘇聯科學家 В·Л·列弗新與 С·Н·爾日弗金曾觀察並研究了液體在超聲波作用下的這種發光現象。當然，孔蝕時所發生的帶電現象對超聲波的化學作用是有影響的。

現在我們來研究一下，當質點在超聲波的作用下發生振動時它的加速度將是怎麼樣的。大家都知道，我們通常都把

地球的吸引力所引起的重力加速度作為加速度的單位。這個加速度等於 9.81 公尺/秒²，並以字母 g 來表示它。例如當電梯開始運動或者停下來時候，我們就會感覺到加速度；可是比 g 大半倍到一倍的加速度是不大的，對人的身體來說，要經受這樣的加速度並不感到困難。當飛行員表演特殊的飛行技術時，需要作非常急的轉灣，或者由俯衝而陡然上升，由於離心力的緣故，會有一個比重力加速度更大的加速度作用在飛行員的身上。當這個加速度等於 $5 - 6g$ ，也就是說：比重力加速度大 $4 - 5$ 倍時，飛行員還不會感到有什麼不舒服；然而當這個加速度達到 $8 - 10g$ 時，飛行員就會感到非常不舒服，甚致有的會失去知覺，有時還會有死亡的事故發生。

由於中等響度的說話所發出的聲波通過，液體質點所獲得的加速度大約等於 g 的百分之幾，這種加速度當然不能對介質發生什麼很大的影響。然而在超聲波振動的作用下，加速度可達到 g 的幾十萬倍甚至幾百萬倍，這樣巨大的加速度是會把介質質點的力學結構破壞。

從以上所講的事實可得出這樣的結論：超聲波的顯著特點就在於它所具有的機械能量很大。這就使得所產生的加速度非常大，同時使得介質中的壓力具有很大的瞬時變化。當位相為負時，在巨大壓力作用之下，連續的介質中發生了斷裂孔蝕氣泡。氣泡底閉合時即發生猛烈的瞬時衝擊，此時壓力可達到幾萬大氣壓，這樣就使溫度升高現象以及介質質點的帶電現象全都發生了