

調 査

金属工業界への超音波探傷器の應用

高木 昇・丹羽 登(電気)

聖徳太子を記念して大阪四天王寺に造られた世界一の大釣鐘も、鐘鑄造者がこの装置を持つていたら鳴らざる鐘で終つてしまわなかつたにちがいない。アメリカではすでにこの装置が實用化され、金属製品の内部の傷を外から検出して生産能率を高め、且つ事故を未然に防止するのに役立つている。本邦でも使つていただける日が遠くないと思われるので利用者への豫備知識として御紹介する。

1 は し が き

音を使つて物體の内部の様子を推定することは古くから行われてきた。例えば醫者が打診によつて体内の異常を知つたり樽を叩いて中に残つている液量を推定すること等は現在でも身近に行われている。しかしこれらはいわゆる勘を働かすもので或る程度の熟練を必要とする。とくに金属材料中の傷を見出し、熔接個所の不良を知るような工業的用途に對してはさらに定量的な測定法が望ましい。その目的で従來X線法、磁氣探傷法等がそれぞれの分野で使用されてきた。

一方音を利用して定量的に物體の中の様子を知る方法も約20年前より各國で試みられている。初期のものはいずれも超音波の連続波を使用するもので、例えば傷を見出すべき金属板の一面から平面波を送り込み、他面へ到達する波の減衰状況から板内の異常を知るか、或は同じ大きさに作った金属棒の振動の減衰程度から熱処理状況、材質の異常等を知るという程度で、いずれも研究の域を脱せず、廣く工業的に應用されるには至らなかつた。

ところが戰時中發達したレーダーの原理と技術を應用して超音波インパルスを用い金属材料の品質を検査する装置が最近美米で實用化され、すでに Reflectosope (Sperry 社)、Stethoscope (Westinghouse 社) 等の商品名で賣り出されている。本邦においても二、三研究、試作が進められており、廣く各分野に利用される日も遠くないことと思うのでここに紹介する。

2 本装置の長所短所

本装置の應用分野として次の如き場合がある。

(1) 従來X線法以外に嚴密な検査方法がなく、ハンマーで叩いて音から判断するか、工員の腕を信頼せざるを得なかつた熔接個所内の氣泡、不純物等を容易に見てできる。しかもX線法よりは装置が簡單で、さらにこの装置を被測個所から離して置き、送受振器(後述)のみを

簡易に移動させて各所の測定を行い得る。

(2) 金属製品の仕上げ工程中に傷が表面に現われてきたり、加工中或は使用中不測の傷によつて材料が破損し損失をまねくことがあるが、この装置で豫め内部の傷不純物*の有無或は位置を確かめておく事ができる。また鍛造、壓延、引拔、焼成等の工程中に生じた内部の傷を發見してこれに續く工程による無駄を省き得る。

(3) 車軸、軸受、内燃機關の部分品等繰返應力の加わる部分が使用中疲勞によつて内部に傷を生じているのを外部から發見できる。

(4) 化學工場のタンク、高壓ボイラー、水壓鐵管の管壁、リベット等長期使用によつて腐蝕され易いものの厚みを定期的に測定し、且つ内部の腐蝕、龜裂の状況を知ることによつて危険を未然に防止できる。このような目的に對し、従來X線の透過量による厚み測定法も行われてきたが、これは板の両面に装置を置かねばならぬのに反し、この装置では一方の面のみに接し得ればよいので大きな壁、使用中の氣密の罐等でも使用できる。

その他共通の特徴としては

(5) 傷の深さ(測定面からの距離)の測定が可能である。(X線法では不可能)

(6) X線法磁氣探傷法では困難であつた表面方向に平行な薄い傷の検出が容易である。

(7) X線より透過能力が大きいので長い距離、例えば車軸の軸方向の検査等も行い得る。

これに對し従來の方法より劣る點は、

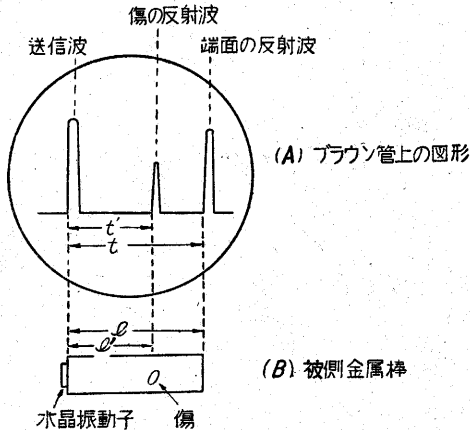
(1) 表面に厚い塗料、著しい凹凸のあるときは送受振器を接着させるために、或る程度仕上げる必要がある。X線ならば直接接着させないで良いのでその必要はなく、また移動しつつある物體(例えば壓延機から流れ出てくる金属板)の検査も可能であるが、本装置ではやや困難である。

* 集中的に存在する不純物の意味であつて、例えば合金中に豫定の成分以外に(一様に分布して)含まれた不純物の量を測れるわけではない。

(2) 磁氣探傷法よりは装置が複雑でしかも表面に近い傷は検出できない。

3 装置の概要

超音波探傷器の原理は所謂レーダー、音響測深機、或は火薬の爆発による振動を用いて地底、海底の性質を知る方法に類似している。まず第1圖(B)の如き金属棒(長さ、或は板ならば厚み: l)の一端面に機械的振動を



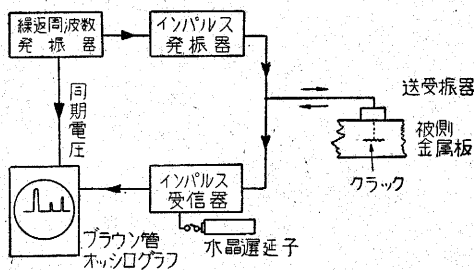
第1圖 ブラウン管による傷の検出法

衝撃的に加えると、その振動は他端面迄傳播し、再び最初の面へ戻ってくる。その往復時間 t は金属中の音速を v とすれば、

$$t = 2l/v \dots\dots\dots (1)$$

で與えられる。もし圖のように中間に傷(クラック、氣泡、不純物等周囲と音響抵抗の異なる部分)があれば他端面からの反射よりも前に、傷の大きさ、種類等に應じた反射波が戻ってくる、従つて t 秒間の反射波の状況を觀察すれば物體中の傷の大きさ、位置等が外部から知り得るわけである。その方法として火薬による地質調査等では電磁オシログラフを使用することもあるが、この場合はレーダーと同じくブラウン管を用いる。その原理を第2圖に従つて説明する。*

第一に繰返周波數 f_r (普通は 500c~10kc、被測物體の



第2圖 超音波探傷器主要構成圖

* 具體的には種々の方式があるが、本稿では應用を主とするため、電氣的音響學的諸問題並に文献等については別稿參照。(3)

大きさに應じて選定する。)のインパルスを作りこれに搬送周波數 f の發振器を變調する。(f は 500kc~15Mc 位であり被測材料の種類、目的に應じて決める。後述) その出力電壓を高周波ケーブルによつて送受振器に傳える。その内部に水晶振動子があり、上記の電氣的インパルスによつて同じ周波數の機械的振動を起す。この超音波が金属中を傳播し、他端面或は中間の傷から反射波がくると水晶振動子は電氣的インパルスを生ずる。これを中心周波數が f なるインパルス受信機によつて検出し、ブラウン管オシログラフの縦軸に送る。同時に f_r に同期した掃引回路の出力を横軸に加えればブラウン管面上には第1圖(A)の如く時間を横軸にとつた t 秒間の反射波形状が現われる。その傷の反射波の位置から傷迄の距離がわかり、その高さ、形から傷の形状が推定できる。また板の場合ならば端面の反射波の位置から板の厚みが知られ、その高さから内部、他端面の腐蝕の狀況がわかる。また中間に反射波があれば板の内部に異常な層、傷のあることが知られる。

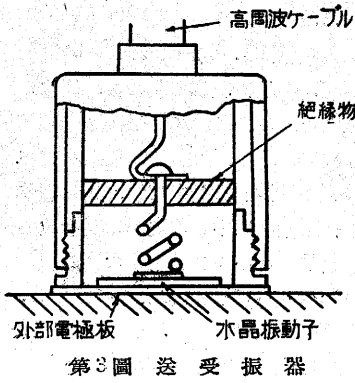
距離目盛 反射波の位置をくわしく知るためには電波兵器に於けると同じく種々の距離目盛回路が考えられているが、熔接石英棒中の超音波インパルスの往復時間を利用した水晶遅延子を使用すれば測距回路は全く不要なので装置を簡易化できる。(4)

使用波長 金属物體中の超音波の波長 λ は次式で與えられる。

$$\lambda = v/f \dots\dots\dots (2)$$

例えば $f=1Mc$ で $v=6km/s$ とすれば(鋼鐵は $v=5.8 km/s$, アルミニウム 6.4km/s) $\lambda=6mm$ となる。傷の大きさが波長に比較して充分大きいときは問題ないが、波長に比して小さいと廻折波が増し反射波は少なくなつてしまう。また輻射される超音波ビームの指向性も波長の短いほど鋭い。(例えば直徑 2cm の圓板から音速 5km/s の物質中へ傳わるビームの開きは 10Mc で 1.7°, 500kc で 37.6° である) これらの點から波長は短いほど、即ち周波數は高い程分解能、測定精度がよくなることが知られる。ところが周波數が高くなると送信機、受信機の簡易化が困難になり、周波數に逆比例して薄くなる水晶振動子の厚みにも薄い方の製作限度がある。また周波數が増して波長が短くなると物體中での超音波の減衰が著しくなる故この點からも材質に應じた周波數の限界がある。かくして實用上は 500kc~15Mc 位の範圍が適宜選擇使用されている。

送受振器 水晶振動子は第3圖の如くグループに收め、外部電極板によつて水晶を保護する。の送受振器を被測物體の表面に押しつけて測定を行うが、物體の表面には凹凸のある事が多い。ところが送受振器の外板は平面なので點接觸になつてしまい、中間に超音波の減衰の激しい空氣の薄層ができる。これを防ぐために、普通接觸



第3圖 送受振器

部分に油、ワセリン等を塗っている。とくに表面仕上げの荒い材料、鑄造による多孔質材料の場合に超音波の減衰を減らすために水銀、ハンダ、アマルガム等を使用する事もある。

4 金属工業界への應用

(1) 鋼材中の傷の發見 例へばタービン發電機の軸を造る場合には廻轉が早いので内部に小さな傷でも残っていると危険である。また應力のかからぬ部品で、たとへ内部には傷が少しくらいあつてもよい場合でも切削加工中に表面に現われ、仕上げを終つても外部から見えるような傷があると使いものにならぬ場合があり、それまでの工程が全部むだになってしまう。このような場合には分解能を増し、かつ傷の位置の測定精度を増すために、減衰の面からの制限の許すかぎり高い周波数を用いる。(航空機用鍛造、押出製品には 15Mc⁽⁵⁾ その他目的によつて 4Mc 位⁽⁶⁾ まで現用されている。) 測定距離は浅い方は普通約 2cm (とくにその目的に作れば 5mm); 深い方は 10m 迄計つた⁽⁷⁾ 例がある。

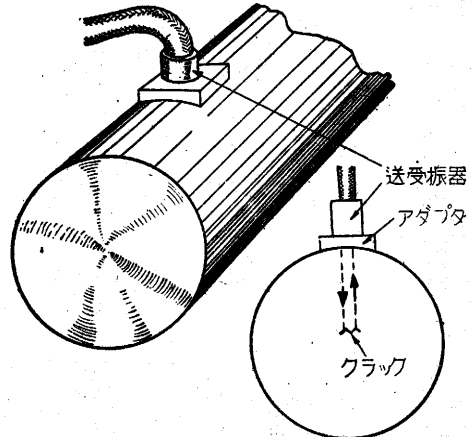
(2) 鑄造製品中の傷 鑄物の「す」を見つけない場合等は正常な素材中にも氣泡が多いので音波は散亂し、速かに減衰してしまうので精度を犠牲にして長い波長を用いる。例へば 3 吋厚の鑄鐵板の端面の反射波が 800kc では明瞭に見られたにもかかわらず 2.5Mc では認められなかつたという例⁽⁸⁾ もある。普通は 500kc くらいを使用する。もちろん鑄鐵といつてもニッケルを多く含み、かつ硬化された内燃機關のシリンダーの場合等は 2~3 Mc を使用できる⁽⁹⁾ ので測定精度を高め得る。

アルミニウムの鑄造品も氣泡が多くて明瞭な反射波を得難いが、マグネシウム鑄造品は 15Mc (波長 0.2mm) の超音波をもよく通すので氣泡、收縮孔等をも容易に發見できる。

鑄造品を試験する場合は結晶の成長方向と超音波ビームの方向との關係によつて減衰、反射の狀況が變るので結晶方向の檢出も行い得る。⁽⁵⁾

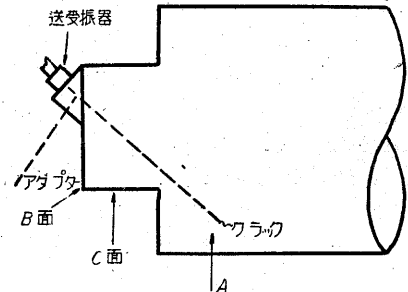
(3) 形状、材質に應じた送受振器接着方法 鑄鐵その他面の荒い物質、或いは材料の表面を軽くグラインダーで仕上げただけで凹凸の残つている場合には前記の油、水銀等の使用以外に加熱して可塑性を持たせたプラスチックを被測面に押しつけ凹凸の奥まで侵入させ冷却固化の後測定する方法も行われている。

また車軸を直径方向に試験したり、内燃機關のシリンダーの内壁 (外側は放熱板等の邪魔物が多いが、内壁は仕上げてある故内側からの方が容易である。) からビームを送受したい場合もある。⁽⁹⁾ このときもプラスチックを使用すれば簡便であるが、多量生産工程中で同じ形のもの多数検査するような場合は、境界面での反射を少くするため被測物と同じ材料或は送受振器の外板と被測物との中間の音響抵抗を持つた材料を使い、第 4 圖の如く上面は平面、下面は被測物の表面に一致した曲面を持つ adapter を使用する。また水晶振動子の下面を被測面に合わせて仕上げ、直接使用する方法もある。



第4圖 曲面用アダプター

次に第 5 圖の如く車軸に車輪を焼嵌める A 部分 (特にキー溝附近) にクラックを生じ易く、しかも應力が大き

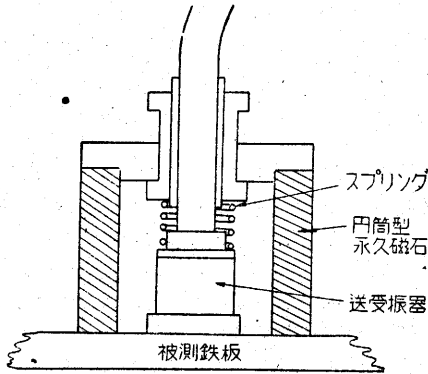


第5圖 Angle beam 法による傷の檢出

いのでその部分の狀況を檢查したいことがある。前記の方法で周圍から直径方向に検査することも可能だができるならば平らな B 面或いは仕上げてある C 面 (曲面) から試験したい。このようなときは圖の如く三角柱の adapter を用い、ビームを斜に投射すれば陰の部分の傷も檢出できる。⁽¹¹⁾

さて送受振器を被測物體に接着させるにはいずれも手をもつて軽く押しつけるのであるが、できるならば両手をあけて測定に便ならしめたい。そこで被測物體が磁性材料で、充分大きな面を持つ場合は第 6 圖の如く送受振器の周圍に圓筒型永久磁石をつけ、スプリングで送受振器を一定壓力で被測面に押しつけることにより手で保持

する手数を省き、且振動、接着壓力の變動による反射波の亂れを防ぐ事ができる。(8)



第 6 圖 永久磁石による送受振器の保持

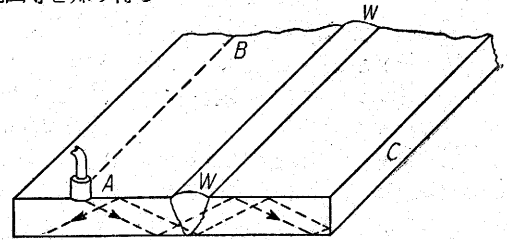
(4) 熱處理狀況の監視 合金或は鍛造、壓延、引拔等による製品中の超音波の減衰狀況は材料の Grain structure、熱處理方法で變る。例えば或るクロムモリブデン鋼は熱處理の前後で減衰度が $\frac{1}{2}$ になる、(5) またマグネシウム合金で熱處理の溫度を 100°F 高めると減衰が約 $\frac{1}{4}$ (10Mc) になるという例(2)もある。従つてこの装置を用いて他端面からの反射波強度を知り、或は感度を上げて多重反射波をブラウン管上に畫かせ、その減少度を求めて熱處理狀況を知ることでもある。この目的には Grain size やその境界面の性質に應じて 2~10Mc の超音波を使用している。

(5) 熔接個所の検査 熔接部分に氣泡、不純物が残つたり、周圍の母材中の熱的に亂された部分にクラックが入つたりすると強度劣化して事故の原因となる。これに對してこの装置を用いれば X線法よりはるかに簡易に缺陷を検出し得る。もつとも熔接の場合には小さな氣泡があつても差支えないので、この装置で傷の反射波が現われたからといつて必ずしも強度不足とはかぎらない。豫め試験片によつてどの程度の反射波までは使用可能かを確めておき適當に長い波長を用いばよい。

さて熔接した部分は必ずその表面に凹凸があるので従來は検査に際して被測部分(第 7 圖の W, W')の表面を手持グラインダー等で仕上げて垂直に検査するか、同圖の C 面から板内へビームを板面と平行に送り込んで熔接部からの反射を見ていた。ところが熔接部の表面を削ることは工程が増し、また機械的強度を弱めることにもなるので 1948 年に Sperry 社が Angle beam 法という新法を實用化した。(1) これは第 3 節における如く三角柱の合成樹脂材の斜面に水晶振動子を接着させた送受振器(第 5 圖の場合と異り、豫め送受振器中に、斜めに振動子を配置してある)を使い、試験すべき板面に斜めに超音波ビームを送り込む以外は普通の方法と同一である。ビームは第 7 圖の如く上下面で何回も全反射して通路中の傷の反射波(位置が適當ならば他端面からの反射波も)

をブラウン管上に現わす。従つて熔接個所から W, W' 適當な間隔だけ離れた AB 線上で送受振器を動かせばよいので熔接個所の表面を仕上げる必要はなく、また AB 上に凹凸があつても熔接部の表面を仕上げるよりは容易である。

なおこの場合熔接による母材の組織の變化、使用した熔接棒材と母材との音響抵抗の相異等のため、正常な熔接個所を通るときもビームが影響されるわけであるが、鋼材について實驗の結果約 3Mc までは實用上影響無く 10Mc 以上では正常な熔接個所からも反射波が認められた *これによつて Seam weld, Spot weld, 等における熔接不良部分の検出或いは熱的に影響を受けた部分の範圍等を知り得る。



第 7 圖 Angle beam による熔接個所の検査

(6) 炭素電極の検査 製鋼用電氣爐 アルミニウム製造用電解槽等の電極に用いる黒鉛棒は焼成前に内部の傷を見出し得れば熱源の無駄を省き得、或は傷を知らずして使用中加熱により一部分が爐中へ落ち槽中の原料に混つてしまひ大損害を招くことがあるので、この電極の内部の傷を知ることはきわめて望ましい。しかし黒鉛は非常に氣泡が多く超音波の減衰が激しいので有効使用周波數所要送信出力、受信感度等、或はさらに回路構成も普通の形式ですむか否か等の問題を目下考究中である。

5 結 言

超音波探傷器は金屬工業界に對して種々の用途を持つので米國ではすでに廣く使用されている。本邦でも一、二の實用試験も(6)行われる段階に達しているので、利用して戴く方々への紹介を兼ねて内外の實狀を記した次第である。

文 献

- 1) B. Carlin: Weld. J. Junn. 1948.
- 2) F.A. Mety r., W.M. Andersen: electronics, July. 1947.
- 3) 高木昇, 丹羽登: 電氣學會雜誌, 1949 年 9 月.
- 4) 高木昇, 丹羽登: 電氣三學會講演予稿 1949 年 10 月.
- 5) D.G. Erdman: E.E. Feb. 1948.
- 6) 藤部正登: 電研月報 (日發) 1949 年 10 月.
- 7) D.M. Kelman: Westinghouse Eng. July. 1949.
- 8) W.I. Dowson: Weld. J, Jan. 1947.
- 9) F.W. Struthers J.A.S.A. May. 1947.

* 生研開所式の際展示。