

# 電位差法應用於裂縫深度之檢測

彭朋畿<sup>1</sup>、林炯暉<sup>2</sup>、張沛倫<sup>3</sup>、林韋丞<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 中龍鋼鐵股份有限公司課長/ 國立中央大學 工學博士

<sup>2</sup> 中龍鋼鐵股份有限公司 工程師

<sup>3,4</sup> 中龍鋼鐵股份有限公司 技術員

## 摘要

金屬材質物件的裂縫常為扁平狀，由於尖端應力集中因素極易造成裂縫成長，而使工件或設備件損毀，因此如何精確評估裂縫深度及長度是工業界非常重要之課題。

本文提出一種針對金屬物件開放性表面裂縫之交流電位差檢測法 (Alternating Current Potential Drop, ACPD)，透過檢測原理探討與現場實際應用，可明確檢測出表面裂縫之深度。本方法將有助於評估表面裂縫對整體工件或設備之可用性，並克服傳統檢測對於表面裂縫檢測深度之限制。

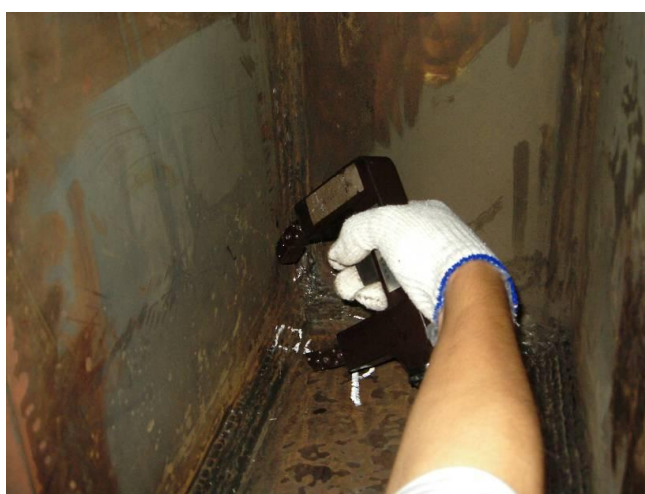
## 一、前言

金屬材質物件的裂縫常為扁平狀，其他如熔合不良、熔入不足、疊層、隙縫 (Seam) 及疊裂 (overlap) 等皆屬較嚴重之瑕疵，其原因為尖端應力集中等因素極易造成裂縫成長，進而使構件損毀，因此如何精確評估裂縫深度及長度是非破壞檢驗中之重要課題。

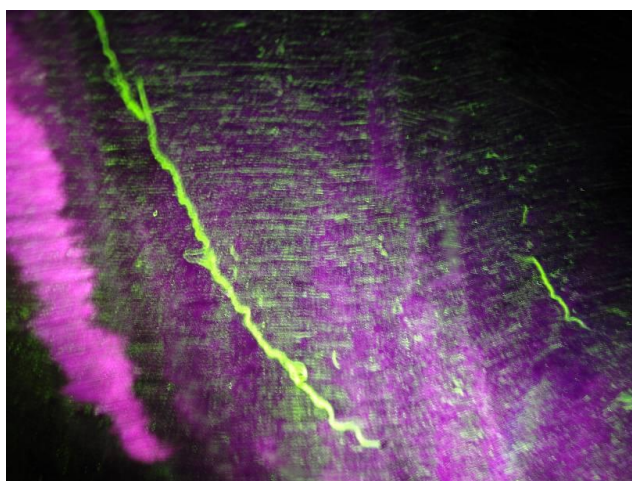
目前常用的瑕疵深度評估方法為利用超音波檢測技術之脈波到達時間法 (PATT)、繞射信號飛行時間法 (Time of Flight Diffraction, TOFD)、裂縫尖端繞射

回波連續追蹤重覆圓弧法(RRARC)及特殊表面波等方法[1]，超音波檢測技術中除超音波設備及技術需可靠有效外，最主要還須仰賴檢測人員的高度經驗，才能從訊號的差異研判是否真有瑕疵存在，並了解其種類特性等性質。

另磁粒檢測法及液滲檢測法亦可檢測工件表面之裂縫，其中磁粒檢測是將磁粒適當地施用於經過磁化工件之表面，以檢測該工件表面或次表面的瑕疵[2]。由於須將工件適當地磁化方能實施，因此磁粒檢測只適用於鐵磁性材料的工件(如碳鋼等)，同時其方法操作簡便且後清理容易，所以廣泛應用於鋼結構鋼道表面檢測(如圖一及二所示)。



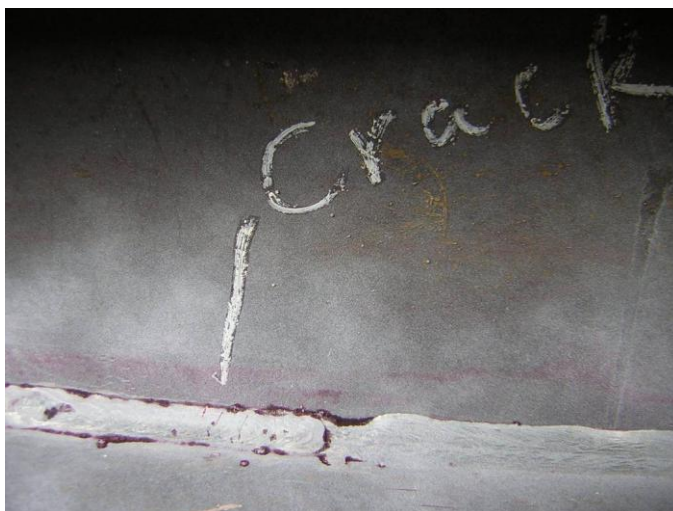
圖一 磁粒檢測法



圖二 磁粒檢測法之裂縫顯示

液滲檢測法主要利用兩種原理執行檢測，分別是滲透原理及顯像原理。其中滲透原理是利用滲透劑滲透到工件表面開口間斷中，並藉毛細作用使滲透材料進

入工件間斷內[3]。當滲透完成後，須將工件表面清除乾淨再施加顯像劑觀察。顯像劑為細小粉末，當施加在工件表面後會形成類似海棉組織的薄層覆蓋在工件表面上，此時在工件表面各處都有細小毛細作用產生，使間斷中殘留之滲透液藉毛細作用從間斷中吸出，同時在顯像劑上擴散放大，最後即可觀察間斷顯示(如圖三及四所示)。



圖三 液滲檢測法



圖四 液滲檢測法

有關磁粒檢測法及液滲檢測法均無法評估缺陷深度，且超音波檢測技術較不易檢出表面裂縫深度，故本文將提出一種針對金屬物件之開放性表面裂縫之交流電位差檢測法(Alternating Current Potential Drop, ACPD)，以期檢測表面裂縫之

深度，將有助於工件維護及使用壽命之評估。

## 二、電位差法之應用與原理

電位差法檢測技術常見於土木檢測業界之直流電地電阻檢測法，該方法是以直流電或低頻交流電來進行地下電性調查，經常使用於工程地質及水文調查。另外亦利用交流電位差法進行金屬物質表面裂縫深度之檢測，以下將分別介紹此兩種方法之原理。

### 2.1 直流電阻法於土木檢測應用

將直流電阻法應於土木檢測時，須先將電流通入地下。首先利用一對電流極將直流電引入地下，由於地球本身就是一個導體，引入的電流便傳導於地下，可形成一完整迴路的人為電場。此電場則因地下物質導電性的不同，使得在地表任意兩點間的電位也隨之不同。其次利用另一對電位極棒測量此迴路中任意兩點間的電位差(即電壓差)，由歐姆定律可知，電位差與電流之比值為電阻。電阻則與介質或導體電阻率有關，因此由電流強度、電位差及電位極的相對位置，經過計算後便可獲得地層的電阻率，並進而推算地層電性之構造模型。岩層的組成、岩性、孔隙率、含水量水之鹽度、溫度等因素都對岩石的電阻率有影響。大多數的岩石能通過電流是由於填充在岩石孔隙和裂隙中的水含有電離子，在電解過程離子的流動所產生的導電現象。因此岩石裡的孔隙率和含水量及水之鹽度就成為電阻率的主要控制因素。一般來說岩石電阻率會隨岩石孔隙率減少而增加，兩者關係成反比[4]。

### 2.2 直流電阻法基本原理

利用通入地下電流強度與量測之電位差去計算介質電阻率分佈狀況。其基本理論如下：以四極法為基礎，在地表佈置四根電極，在電流極上以低頻(約1Hz~10Hz)之交替直流電通入地層，同時使用量測電流強度，當電流展在某一距離時，電流將會通過某一相對的地層深度，如果在此範圍內地層的導電程度有差異情形時，則由電位極量測電位差，以反映出該導電差異的特性，並測定地層的電阻率[5]。

由上可知在一電性均質且等向性的空間地層，地層電阻率與電流、電位差及電極間距之關係可寫成：

$$\rho = K \frac{V}{I} \quad (1)$$

其中

$$K = 2\pi \left\{ \left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) - \left( \frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right) \right\}^{-1} \quad (2)$$

- I : 通入地下之電流。
- V : 電極間的電位差。
- $\rho$  : 介質之電阻率。
- K : 幾何因子(geometric factor)。
- AM : 電流極 A 至電位極 M 之距離；以下以此類推。

所以只要測得一組(K, V, I)就可依式(1)算出電阻率，然而實際地層是多層型態，而根據(K, V, I)算出之電阻率，只能稱為視電阻率(apparent resistivity)，因為它不是地下某一層的真实電阻率，而是在該電極相對位置情況下的綜合電阻率效應，且視電阻率會隨電極間距改變而改變。若將電極間距由小依次變大，就可依次測得由淺至深的地層訊號。視電阻率通常並不代表地下各電性地層的实际電阻率，而是代表此電極排列情形下所有電性地層的綜合效應[6]。

### 2.3 交流電位差法(ACPD)之原理

交流電位差法(Alternating Current Potential Drop, ACPD)為一種非破壞檢測法，常用於金屬導體表面裂縫深度之評估，檢測原理為電流流經裂縫兩測時，裂縫長度增加(電阻增加)而造成電壓降(potential drop)。利用交流電通過金屬表面時會產生集膚效應(Skin Effect)，而發展出交流電位差裂縫量測方式。交流電位差法具有上述的量測特性，但仍不能取代一般常用的裂縫檢測法，而是提供評估表面裂縫深度的一種方法[7]。

當交流電通過金屬導體時，電流透入導體表面下方一段距離，稱為透入深度( $\delta$ )，且與電流頻率(f)、導電率( $\sigma$ )及導磁率( $\mu$ )有關等物理特性有關。透入深度( $\delta$ )計算公式為：

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi\mu_r\mu_0\sigma f}} \quad (3)$$

其中，

- $\mu_r$  : 相對導磁率。
- $\mu_0$  : 真空導磁率( $4\pi \times 10^{-7}$  H/m)。
- $\sigma$  : 導電率。

交流電流在限制空間中流動，可被用來檢測金屬導體表面開放性裂縫深度，此技術即所謂的交流電位差法檢測技術。交流電位差法中使交流電流從通入金屬導體，電流沿著導體表面及裂縫周圍流動，並離開金屬導體。由靠近裂縫的兩個探頭偵測電壓降(voltage drop)，且此兩探頭維持固定距離。量測參考電壓  $V_1$  及由裂縫兩側量測電壓  $V_2$ ，其電壓比可由理論計算或校正程序轉換為裂縫深度。

#### 2.4 裂縫量測方式

交流電位差法需三個參數以產生裂縫深度，第一為探頭橫跨裂縫兩端之電壓值，第二為無裂縫處之電壓值，第三為量測電壓值之探頭間距。量測之電壓值可為任意單位，於計算裂縫深度值時，僅須注重兩者比例關係[8]。

假若裂縫位置未知，量測電壓的探頭應垂直沿著預期的裂縫邊緣進行檢測。此時需注意顯示螢幕上之數值變化，當顯示數值從一穩定數字突然跳至較高數值時，則表示探頭檢測出裂縫。另由原本較高的數值突然往下降低，則表示探頭已完全跨越裂縫。需注意螢幕顯示數字應為穩定、重複且非零數值，非重複出現或非常低的數值，則可能代表探頭與表面接觸不良。

欲決定裂縫位置須獲得兩個電壓值，可將探頭置於裂縫邊緣，緩慢朝向裂縫移動直到電壓值突然往上跳升，此時為裂縫之電壓值  $V_c$  (Cross-crack Voltage)。再將探頭由反方向緩慢離開裂縫，此時電壓會突然下降，則此電壓值應視為參考電壓值  $V_r$  (Reference Voltage)。本檢測程序之目的是盡量減少任何可能造成電壓數值變異之因素，產生變異的因素如探頭與待測表面不均勻接觸等狀況。量測電壓波形尖端形狀區域之電壓值為首要條件，否則裂縫深度則會被低估。實際上若不能正確量測尖端電壓，則須有補償誤差值。

## 2.5 裂縫深度評估(Crack Sizing)

根據論文研究指出[7]，交流電位差法可分為薄板(thin)與厚板(thick)集膚模式。每種模式依裂縫尺寸、電流頻率及探頭形式而異。由交流電位差法推導出理論的裂縫深度計算公式，實際量測疲勞裂縫深度是本法的最佳應用結果。裂縫深度檢查前應先完成一組已知且存在的理論結果，以設定相關檢測參數(如集膚深度)。

### 2.5.1 薄板尺寸量測

當裂縫長度大於裂縫深度與電壓探頭之間距時，則為薄板模式，當檢測條件滿足薄板模式時，裂縫深度之評估方式為以裂縫長度的方向與電壓探頭方向平行，本方法為薄板裂縫深度檢測中為最簡單的量測程序。所謂的長度是指深寬比大於 10 的狀況。因此在理論公式中， $E$  代表電場強度，且為常數，因此參考電壓( $V_r$ )可以表示為：

$$V_r = E\Delta_r \quad (4)$$

其中， $\Delta_r$  為電壓探頭量測得之參考電壓值，橫跨裂縫兩側之電壓值( $V_c$ )為：

$$V_c = E(\Delta_c + 2d) \quad (5)$$

其中， $\Delta_c$  是量測得到的橫跨裂縫兩側電壓探頭之間距， $2d$  代表額外的電流路徑，且由裂縫深度  $d$  推導而得。

將方程式(4)及(5)合併，並消去  $E$ ，可獲得裂縫深度之計算方程式(6)，如下所示：

$$d_1 = \frac{\Delta_r}{2} \left( \frac{V_c}{V_r} - \frac{\Delta_c}{\Delta_r} \right) \quad (6)$$

一般多數情況下，兩電壓探頭的間距為固定值，推得  $\Delta_c = \Delta_r = \Delta$ ，故方程式(6)可修改為

$$d_1 = \frac{\Delta}{2} \left( \frac{V_c}{V_r} - 1 \right) \quad (7)$$

方程式(7)是由 one-dimension(1-D)方法計算裂縫深度，且有不錯的預測效果。且為評估薄板中單一方向的裂縫深度，通常會視情況將量測之  $d_1$  乘以放大率  $M$ ， $M$  值與探頭間距、探頭與裂縫相對位置、表面裂縫深度及集膚深度等因素有關，則

最後得之裂縫深度公式為  $d = Md_1$ 。

### 2.5.2 厚板尺寸量測

一個類似於薄板模式的簡易公式為裂縫長度與裂縫深度及探頭間距比較，其中集膚深度大於裂縫深度，當量測厚板模式之裂縫深度時，需修正薄板模式之裂縫深度評估方式，且須經實際驗證而得，Lugg 提出一修正薄板裂縫計算公式[8]，厚板中裂縫深度的計算方程式，與薄板的計算方式略有不同，如(8)所示：

$$d_1 = \frac{\Delta}{2} \left( \frac{V_c}{V_r} - 1 \right) \left( \frac{V_r}{V_c} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

公式(8)為評估厚板中單一方向的裂縫深度，通常會視情況將量測之  $d_1$  乘以放大率  $M$ ，在厚板模式中  $M = (1 + 2d_1 / \Delta)^{-\frac{1}{2}}$ ，最後之裂縫深度公式為  $d = Md_1$ 。

針對裂縫評估之修正因素，Saguy 更提一計算方法[7]，可使方程式(8)用於評估薄板模式與厚板模式之裂縫評估方法，最後總結可將公式修正如下：

$$\frac{V_c}{V_r} = \frac{\Delta + 2d - f_1(\Delta, \delta) - f_2(d, \delta)}{\Delta} \quad (9)$$

其中  $f_1$  與  $f_2$  為交流電流通過裂縫產生之角隅效應(corner effect)，因此於厚板模式中才使用  $f_1$  與  $f_2$ ，在薄板模式中則忽略  $f_1$  與  $f_2$ 。 $f_1$  為補償在試片表面由  $\Delta$  及  $\delta$  引起之電壓降， $f_2$  為補償在試片表面由  $d$  及  $\delta$  引起之電壓降，相關符號如圖五所示。

由國外學者 Saguy 提出之經驗公式，包含角隅效應  $f_1$  與  $f_2$  方程式為：

$$f_1(\Delta, \delta) = \Delta \exp\left(-\frac{(\Delta/2) + \delta}{\delta}\right) \quad (10)$$

$$f_2(d, \delta) = 2d \exp\left(-\frac{d + \delta}{\delta}\right) \quad (11)$$

由於方程式(9)具有實際使用上的優點，克服薄板模式的限制性，因此量測的裂縫深度值不受材質、缺陷及結構尺寸的干擾。必須特別注意的是交流電位差法(ACPD)限制使用於開放性表面裂縫之深度量測，且次表面裂縫會影響裂縫深度的量測準確度。

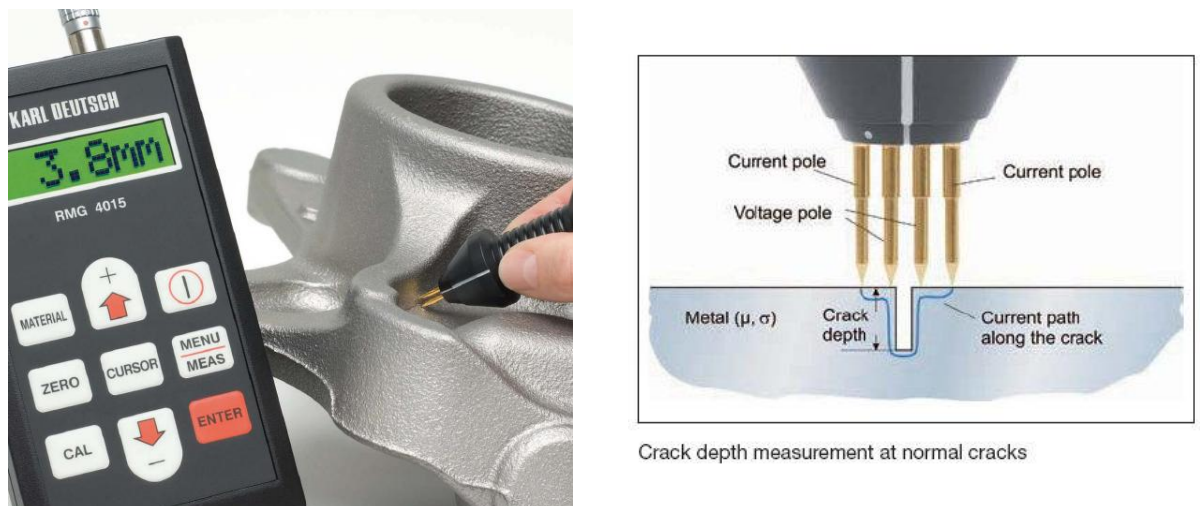


### 三、現場檢測及結果

本文舉一實際案例，以了解本方法之適用性。於現場實施裂縫深度檢測時，首先以目視、液滲或磁粒檢測法確認金屬物件表面有無開放性裂縫，若發現表面開放性裂縫時，再使用裂縫偵檢儀量測裂縫深度(交流電位差法)。由於各種金屬物件的材料性質差異，因此導電率及導磁率皆不同，故須於檢測金屬物件之無瑕疵部位進行儀器歸零動作，以利裂縫深度評估。

#### 3.1 檢測設備

本檢測儀器為 Crack Depth Measurement，型號 RMG 4015，由德國 KARL DEUTSCH 公司製造，並搭配 Probe RMSL-S 0° 探頭進行檢測(如圖五所示)。



圖五 KARL DEUTSCH 裂縫偵檢儀

#### 3.2 現場檢測

某設備發現靠近內側有明顯垂直裂痕(長度約 194mm)，故現場執行磁粒檢測、裂縫測深(交流電位差法)及超音波檢測。

經目視檢測(VT)裂縫位置上表面為 109mm，裂縫長度 194mm，經 MT 磁粒檢測，可明顯看出垂直裂縫，長度約 194mm(如圖六及七所示)。

利用裂縫偵檢儀量測裂縫深度(如圖八所示)，其裂縫總長度 194mm，並以 10mm 為量測區間，每區間測量 3 點取平均值，發現深度最大值為 16.5mm。再藉由超音波儀器檢測出有明顯瑕疵回波，初步評估此裂縫深度約為 13~16mm。



圖六 目視檢測(VT)裂縫狀況



圖七 磁粒檢測(MT)之裂縫狀況



圖八 裂縫偵檢儀之現場檢測

#### 四、結論與建議

本檢測技術利用電位差法提供金屬導體表面裂縫之檢測方法，依據試驗結果顯示，本方法確實能評估表面開放性裂縫之深度，可幫助現場檢測人員判斷裂縫對於工件或設備之影響，以利後續改善及評估等工作。

非破壞檢測方法之互相搭配使用，不僅可提高檢測準確度，更可提供檢測人員更多資訊，對於裂縫深度之影響將有更客觀的評定。

#### 五、參考文獻

1. 吳信賢，「表面裂縫深度評估技術研究」，第十四屆非破壞檢測技術研討會論文集，2008年。
2. 陳國英，磁粒檢測法（中級），中華民國非破壞檢測協會，1986年。
3. 李定一，液滲檢測法（中級），中華民國非破壞檢測協會，1982年。
4. 陳亦嘉，「地電阻影像剖面法應用之介紹」，地質，Vol.24，No.2，2005年。
5. 梅興泰，鄭富書，蔡道賜，「地電阻影像剖面法對非均質地下實體之模擬分析」，技術學刊，Vol. 21，No. 4，2006年。
6. 林志棟，王信越，「地電阻法輔助透地雷達應用於柔性鋪面工程檢測之研究」，國立中央大學土木工程研究所碩士論文，2006年。
7. H. Saguy, D. Rittel, “Flaw detection in metals by the ACPD technique: Theory and experiment”, NDT&E international, 2007.
8. Martin C Lugg, “AN INTRODUCTION TO ACAP”, Technical Software Consultants Ltd., United Kingdom, 2002.