

# 行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

## API 5L/5LC 管線管輓平測試與焊道延性測試之合理化分析, 與以熱轉印線量測應變之研發

### Rationalization Analysis of API 5L/5LC Flattening Test and Weld Ductility Test for Line Pipes, and Development of Strain Measurement Using Thermally-Transferable Grids

計畫編號：NSC 92-2212-E-034-003

執行期限：92 年 8 月 1 日至 93 年 7 月 31 日

主持人：陳文璟 中國文化大學機械工程學系

計畫參與人員：吳嘉昌, 張桓禎, 鄭凱鴻, 黃詩堯 中國文化大學機械工程系

#### 一、中文摘要

本計畫已成功地開發利用數位相機與影像處理軟體量測轉印貼紙格線間距之技術, 並應用到應變量測。此成果提供本計畫在分析焊道延性測試與碾平測試時之管線管應變之量測實驗基礎, 並從而建立管線管碾壓應變之計算模式。進而對 API 5L/5LC 規範之碾平測試與焊道延性測試等規範標準, 來檢驗其合理性與一致性。

**關鍵詞：**API 5L/5LC 規範、輓平測試、焊道延性測試、貼紙格線、應變量測/計算

#### Abstract

We have successfully developed a method to measure the displacements between printable and transferable tattoo grids using a digital camera and a photo-image management software, and applied it to the strain measurements. This development provides us a technical basis to measure and analyze the pipe strains incurred in the weld ductility test and the flattening test. Therefore, we are able to establish a model for calculating the strains on flattened pipes. This model then enables us to evaluate the rationalization and consistency of the pipe qualification criteria specified in API 5L and 5LC specifications.

**Keywords:** API 5L/5LC Specifications,

Flattening Test, Weld Ductility Test, Tattoo Grids, Strain Measurement/Calculation

#### 二、緣由與目的

應力、應變大小是材料是否會損壞之決定因素。當外加應變超過材料之延性, 即會產生破斷損壞。在破斷前所能承受之最大應變, 即定義為延性。欲量測或驗證材料之延性, 至少必須施加相當於材料延性之應變。API 5L 和 5LC 規範之焊道延性測試 (weld ductility test) 規定在碾壓至平板夾具間距  $h$  時 (如圖 1 所示),  $A$  處不許有超過  $1/8$  英吋之裂痕或斷裂; 即是欲以在碾壓時管壁所產生之應變, 來測試管之延性是否達到所規定之最低延性標準。在焊道延性測試和碾平測試 (flattening test) 之過程, 圓管經碾壓由圓管變形成橢圓管, 因管徑與管厚度不同, 各圓管所承受之弧度 (curvature) 變化不同, 而其管壁所遭遇之應變大小與變化亦有所不同。因此, 在碾壓時管壁所產生之應變大小, 是否足以測試材料之延性, 則是一重要且有待分析之課題。碾平測試之旨也是欲以碾壓時管壁所產生之應變, 來測試管之延性是否達到所規定之最低延性標準。碾平測試除了須測試焊道部位外, 也須測試管壁部位, 是管延性測試之另類選項。

管線管之敷設早已是高速公路、鐵路之外的水/油/氣第三交通運輸網路，加上在石油、石化、化學、核能產業廠區之密佈管路，其對周遭環境與安全之威脅早已不再是新聞，但事故仍頻頻發生。為了防範損壞造成悲劇災難，上述產業在美國石油協會 ( American Petroleum Institute, API ) 美國材料試驗學會 ( American Society for Testing and Materials, ASTM ) 和美國機械工程師學會 ( American Society of Mechanical Engineers, ASME ) 帶領下制訂出一系列工程規格、規範、與標準，以供設計、製造與施工之依據。這一系列早年就訂定之規格、規範、標準，大多數是建立在傳統累積之經驗法則。舉世沿襲數十年，因為是屬傳統產業，顯少受到新科技研發求新求變之挑戰與眷顧。諸多標準之設訂，因早年量測驗證方法不足，顯少有人質疑其合理性與一致性。本計畫針對美國石油協會訂定之碾平測試與焊道延性測試等規範標準 [1, 2]，來檢驗其合理性與一致性，必要時還將依計畫執行成果提出修正建議，使傳統法規亦能科學化、現代化。

### 三、結果與討論

#### (一) 建立並驗證焊道延性測試與碾平測試在管線管管壁所產生應變之計算公式。

如圖 1 所示，在測試過程，管道管由圓管變成橢圓管，因為管弧度變化，會在管內外壁產生應變。假設在測試過程，管道管變形均勻分佈，管厚度也維持均勻一致。應變量之計算可從下列兩假設前題來進行：1. 測試過程中，管厚度不變；與 2. 測試過程中，管厚度隨碾壓而均勻改變。若測試過程中，管厚度維持不變：碾壓後橢圓管厚度 (  $t'$  ) 仍維持原圓管厚度 (  $t$  )，

$$t' = t = h - 2b \quad (1)$$

整理得 
$$b = \frac{h-t}{2} \quad (2)$$

$h$  = 測試時兩平行平板夾具間距，

$b$  = 橢圓之小徑，

$D_o$  = 圓管外直徑，  
假設管厚度中間之圓周 ( mid-wall circumference ) 是中性面軸 ( neutral-surface axis )，且其周長不隨測試碾壓由圓形變成橢圓形而改變。

$$\pi \cdot (D_i + t) = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{a^2 + b^2}{2}} \quad (3)$$

$D_i$  = 圓管內直徑，

$a$  = 橢圓之大徑，

式 (2) 之  $b$  代入式 (3) 得

$$a = \sqrt{\frac{1}{2}(D_i + t)^2 - \frac{1}{4}(h-t)^2} \quad (4)$$

圖 2 之垂直橢圓方程式為： $\frac{x^2}{b^2} + \frac{y^2}{a^2} = 1$ 。

應用下述步驟計算橢圓大徑端點 A 處之弧度  $\kappa_A$ ，並進而計算由圓管碾壓成橢圓管，橢圓管在大徑 A 處管內外壁產生之應變。

整理垂直橢圓方程式  $(\frac{a^2}{b^2})x^2 + y^2 = a^2$

得垂直橢圓函式

$$y = f(x) = \pm \sqrt{a^2 - (\frac{a^2}{b^2})x^2}$$

一次微分：

$$y' = f'(x) = \mp (\frac{a^2}{b^2})x \cdot [a^2 - (\frac{a^2}{b^2})x^2]^{-1/2}$$

二次微分：

$$y'' = f''(x) = \mp \{ (\frac{a^2}{b^2}) \cdot [a^2 - (\frac{a^2}{b^2})x^2]^{-1/2} + [(\frac{a^2}{b^2})x]^2 \cdot [a^2 - (\frac{a^2}{b^2})x^2]^{-3/2} \}$$

橢圓在大徑端點 A 處之弧度 (  $\kappa_A$  ) 可由式 (5) 計算得：

$$\kappa_A = \frac{f''(0)}{[1 + f'(0)^2]^{3/2}} = -\frac{a}{b^2} \quad (5)$$

測試前原圓管中性面 ( neutral surface ) 之弧度 (  $\kappa_C$  ) 可由式 (6) 計算得：

$$\kappa_C = \frac{1}{\rho_C} = -\frac{1}{\frac{D_i}{2} + \frac{t}{2}} \quad (6)$$

由圓管碾壓成橢圓管，在橢圓管大徑 A 處外壁之工程應變 (  $e_{A0}$  ) 可由下式計算得：

$$e_{Ao} = \kappa_A \cdot \left(-\frac{t'}{2}\right) - \kappa_C \cdot \left(-\frac{t}{2}\right) \quad (7)$$

若以真實應變計算，在橢圓管大徑 A 處外壁產生之真實應變 ( $\varepsilon_{Ao}$ ) 則為：

$$\varepsilon_{Ao} = \ln \left[ 1 + \kappa_A \cdot \left(-\frac{t'}{2}\right) \right] - \ln \left[ 1 + \kappa_C \cdot \left(-\frac{t}{2}\right) \right] \quad (8)$$

例一：當外直徑為 18 英吋，管厚度為 0.375 英吋之圓管，被碾壓至  $h = (3.05t) / (0.05+3t/D_o) = 10.167$  英吋時，若管厚度維持不變，橢圓管在大徑位置之弧度 ( $\kappa_A$ ) 由測試前原圓管之弧度 ( $\kappa_C$ ) 0.113 增為 0.478。因此，橢圓管在大徑位置內外壁產生 0.068 之工程應變或 0.065 之真實應變。

上述計算公式是建立在管線管由圓管變成橢圓管之假設。如圖 3 至圖 5 所示，本計畫於焊道延性測試與碾平測試過程，以數位相機擷取管截面 (cross-section area) 影像，來分析管線管由圓管變成橢圓管之變化。圓管壓至焊道延性測試規定之間距  $h$  時，管外周呈單橢圓形狀 (圖 3)；壓至碾平測試第一階段  $h=2/3D_o$  時，管外周呈現雙橢圓形狀 (圖 4)；壓至碾平測試第二階段  $h=1/3D_o$  時，管外周亦呈雙橢圓形狀，但雙橢圓之大徑隨碾壓間距變小而變小 (圖 5)。此顯示上述管大徑端之應變計算公式適用於焊道延性測試；至於碾平測試，此計算公式仍可適用，但計算時橢圓大徑之大小，須隨碾壓間距之變小，由單橢圓變成雙橢圓且雙橢圓之大徑亦隨碾壓間距之變小而變小來作修正。圖 6 至圖 8 顯示修正後之管大徑端應變計算值與量測值相當吻合。

## (二) 開發並驗證以貼紙轉印平行線之格線間距量測技術，以提供一種簡易方便且經濟便宜之應變量測方法。

上述計算顯示管線管在焊道延性測試與碾平測試，皆承受相當大的應變值，如焊道延性測試之 0.068 (6.8%)，碾平測試

則更大。以應變片量測應變是公認的精確量測方法，但應變片所能勝任量測之應變值約在 2% 之內，故不能適用於本計畫之應變量測。因此吾人另行研發出以貼紙格線量測大於 0.5% 應變 (0.005ε 或 5000με) 之應變量測技術 [4~6]。此量測法之應變解析度與精確度皆在 500με (0.05%) 之內。量測方法：(1) 以高解析度印表機在空白紋身貼紙光面列印格線，並將印有格線之貼紙裁成長條狀；(2) 以類似應變片之貼法，將格線貼紙光面用氰胺乙酸乙脂快乾膠 (cyanoacrylate adhesive) 黏貼於試棒/試片上，然後將貼紙背部紙面沾濕除去，透明貼紙格線即轉印呈現在試棒/試片上 (圖 9 與 10)；(3) 使用 5 百萬畫素點高解析度數位相機以遠距變焦鏡頭 (Telephoto lens) 近距離拉近聚焦 (Zoom in) 近拍拉伸測試前試棒/試片上之格線 (需預留伸長空間)；(4) 以 MTS 試驗機或萬能試驗機進行拉伸測試；(5) 在拉伸過程中每個預定之施力階段，使用同一數位相機，以相同聚焦狀況再度近拍試棒/試片上之格線；(6) 將拉伸過程所拍攝之格線影像傳輸至電腦，並以影像處理軟體 (PhotoShop) 量測貼紙格線上最左線與最右線在拉伸前與拉伸後之畫素點座標 (參考圖 11 與 12，和文獻 5 與 6)；(7) 拉伸後貼紙格線伸長增加之畫素點數除以拉伸前原貼紙格線之畫素點間距，計算得應變。

以刻痕量測應變之方法與上述以貼紙格線量測應變之方法雷同，除了 (1)、(2) 步驟以高度規水平沿劃刻痕於試棒上取代貼紙格線外，其餘步驟皆相同。在解析度足夠的情況下，以刻痕量測應變之方法是最精確與最真實之應變量測。為了評估以貼紙格線量測得之應變的精確度，貼在鋁試片後側之應變片 (圖 13) 與刻在貼紙格線後方另側試棒/試片上之刻痕 (圖 10)，也同時用來量測應變以做比較。

圖 14 比較鋁試片在拉伸過程以貼紙格線量測之應變與以應變片量測之應變。當應變值超過 0.0025 (2500 με) 時，所有格線應變數據點皆落在比值為 0.9 與 1.1 斜線之間；這表示當量測應變大於 0.0025

(2500  $\mu\epsilon$ ) 時，格線應變值與應變片應變值相當吻合，誤差在 $\pm 10\%$ 之內。因為此法之應變量測解析度只有 0.0005 (500  $\mu\epsilon$ )，對小於 0.005 (5000  $\mu\epsilon$ ) 應變之量測需很謹慎，才能維持精確度。不過只要量測應變值超過 0.005 (0.5% 或 5000  $\mu\epsilon$ )，格線應變之誤差仍然在 $\pm 10\%$ 之內。

圖 15 比較鉛試片在拉伸過程以貼紙格線量測之應變與以刻痕量測之應變。因為刻痕畫素座標之量測與格線畫素座標之量測雷同、刻痕應變與格線應變之計算方法也相同，所以除了 2 個應變小於 0.0015 (1500  $\mu\epsilon$ ) 之數據點外，其餘數據點皆落在比值為 0.9 與 1.1 斜線之間。這表示當應變值超過 0.0015 (0.15% 或 1500  $\mu\epsilon$ ) 時，格線應變之精確度與刻痕應變相當接近，誤差在 $\pm 10\%$ 之內。

圖 16 比較以貼紙格線與以刻痕量測自不同強度之鋼試棒的伸長率 (%EL)，圖中所有數據點之格線伸長率與刻痕伸長率之比值亦皆在 0.9 與 1.1 之間，比值平均值為 0.996，標準誤差為 0.027。此結果顯示以貼紙格線與影像處理軟體量測得之應變相當精確，在實驗量測標準誤差內其精確度可達 $\pm 3\%$ 之內。

綜合上述圖 14 至圖 16 對格線應變量測精確度之分析，吾人驗證以貼紙轉印格線量測應變之應變量測法，可以克服應變片只能量測小應變之量測限制，提供一精確之應變量測方法，可以延續應變片之量測，對應變片無法量測之較大應變來作量測 [4~6]。此成果提供本計劃在分析驗證焊道延性測試與碾平測試時之管測試應變之實驗基礎。圖 17 展示以貼紙轉印格線量測應變之應變量測法應用於焊道延性測試與碾平測試時之管大徑應變之量測。在焊道延性測試或碾壓測試前，先在圓管 3 點鐘與 9 點鐘位置黏貼上貼紙格線；測試後再在其側浮貼上參考格線，擷取影像量測原先黏貼格線之伸長即可計算管大徑端應變。

**(三) 全面分析 API 5L 和 5LC 所登錄之管線管在碾平測試和焊道延性測試過程，其管壁所承受之應變大小與**

**變化。並從應力與應變之角度來衡量，此規範之規定是否合理與一致。**

表一列出不同尺寸管，在焊道延性測試時，圓管碾壓成橢圓管，管外壁產生之最大應變的計算結果。表二列出不同尺寸管，在碾平測試之前二階段（先碾壓至  $h = (2/3) D_o$ ，再碾壓至  $h = (1/3) D_o$ ），管外壁分別產生之最大應變的計算結果。

本計畫針對 API 5L/5LC 訂定之碾平測試與焊道延性測試之檢驗標準 [1, 2]，由表一與表二圓管碾壓成橢圓管管外壁產生之最大應變值來作比較分析 [3]，發現其有四項缺失：(1) 不同尺寸管，在焊道延性測試時，管外壁產生之最大應變並不一致，隨管徑與厚度比 ( $D_o/t$ ) 之比值變小而變小。此表示管外徑相同但管厚度較大之管，在焊道延性測試時承受較小之應變。此與 API 5L 和 5LC 規範所登錄之管延性 (伸長率) 之最低要求標準，隨管厚度增大而增大背道而馳，因為較大的延性需要較大的應變來測試。(2) API 5L 和 5LC 規範所登錄之管延性 (伸長率, %EL) 之最低要求標準，隨管強度不同而不同；而焊道延性測試所反映之應變，並未能反映管強度不同之管須要不同之應變量來測試。焊道延性測試產生之最大應變也顯然不足以測試絕大部份 API 5L 和 5LC 管的延性需求。(3) 不同尺寸管，在碾平測試時，管外壁產生之最大應變也不一致，且也未能反映管強度不同之管須要不同之應變量來測試。(4) 在碾平測試時，雖然管外徑相同但管厚度較大之管承受較大之應變，與 API 5L 和 5LC 所登錄之管延性 (伸長率) 之最低要求標準，隨試片厚度增大而增大，而需較大之應變來測試相吻合。但管徑與厚度比 ( $D_o/t$ ) 大於 90 之管，產生之應變量則不足以測試絕大部份這類尺寸管管延性之最低標準；而管徑與厚度比 ( $D_o/t$ ) 之比值小於 34 之管，產生之應變量則太大，比拉伸試驗之合格標準嚴格許多，而難以讓絕大部份這種尺寸管通過測試。

本計畫主持人將在執行九十三年度之國科會研究計畫 (合理化修正 API 5L/5LC

管線管輻平測試與焊道延性測試之規範，NSC 93-2212-E-034-004) 時，延續這些發現繼續測試不同管徑、厚度、強度之管，依計畫執行成果提出合理化修正建議，使傳統法規亦能科學化、現代化、與合理化。

#### 四、計畫成果自評

本計畫研究內容與原計畫完全相符，預期完成工作項目亦完全達成預期目標。

研究成果也分別寫成 3 篇學術論文、1 篇大學生研究所甄試論文、還有 1 篇大學生研究所甄試論文正在撰寫中。其中『管線管碾壓產生之應變計算模式與管線管焊道延性測試與輻平測試之合理化分析』已發表於華岡工程學報第十七期【文獻 3】；『以貼紙轉印格線量測間距變化之應變量測方法』其中之鋁試片部份已由大專生研究助理完成研究所甄試論文【文獻 4】、並發表於華岡工程學報第十八期【文獻 5】、鋼試棒部份已被接受即將於中國機械工程學會第二十一屆全國學術研討會發表【文獻 6】；『管線管碾壓產生之應變之雙橢圓修正計算模式』也正由現為大四學生之研究助理撰寫研究所甄試論文中。參與本計畫之大專生研究助理：張桓禎甄試錄取國立交通大學機械所、吳嘉昌甄試錄取國立海洋大學機械所、鄭凱鴻與黃詩堯正準備研究所甄試中。

本計畫已成功地開發以數位相機與影像處理軟體量測轉印貼紙格線間距之技術，並應用到應變量測。此技術之推廣將可提供產業界、學術界一種簡易方便且經濟便宜之應變量測（可銜接應變片應變量測，量測較大應變直至破斷）之新選擇。

#### 五、參考文獻

- [1] API specification 5L: Specification for Line Pipes, Forty-second Edition, American Petroleum Institute, 2000.
- [2] API specification 5LC: Specification for CRA Line Pipes, Third Edition, American Petroleum Institute, 1998.
- [3] 陳文璟，管線管焊道延性測試與輻平

測試之合理化分析，華岡工程學報第十七期，中國文化大學工學院，92 年 6 月。

- [4] 張桓禎，吳嘉昌，應用貼紙格線與影像軟體之應變量測方法，大學生研究所甄試論文，中國文化大學機械工程學系，指導教授：陳文璟，92 年 11 月。
- [5] 陳文璟，張桓禎，吳嘉昌，應用貼紙格線與影像處理軟體在鋁試片量測應變之評估，華岡工程學報第十八期，中國文化大學工學院，93 年 6 月。
- [6] 陳文璟，吳嘉昌，張桓禎，應用貼紙格線與影像處理軟體量測鋼試棒之伸長率，論文已被接受將於中國機械工程學會第二十一屆全國學術研討會發表，國立中山大學，高雄，台灣，93 年 11 月 26~27 日。

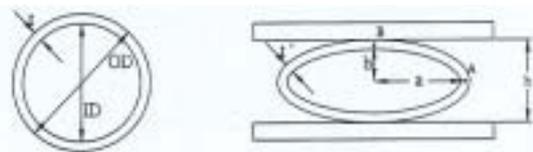


圖 1. 碾平測試與焊道延性測試時，管線管由圓管變成橢圓管。

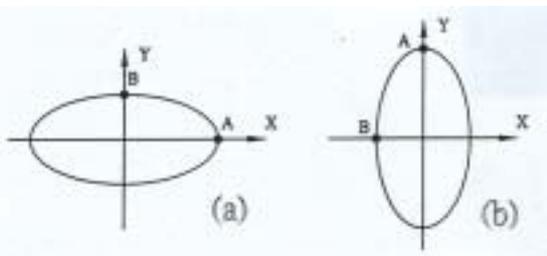


圖 2. 垂直橢圓方程式  $x^2/b^2 + y^2/a^2 = 1$  用來計算在大徑端點之弧度  $\kappa_A$ 。



圖 3. 圓管於延性測試，管外周呈單橢圓形狀。



圖 4. 輓壓測試至  $h=2/3 D_0$ , 管外周呈現雙橢圓.



圖 5. 輓壓測試至  $h=1/3 D_0$ , 管外周呈現雙橢圓.

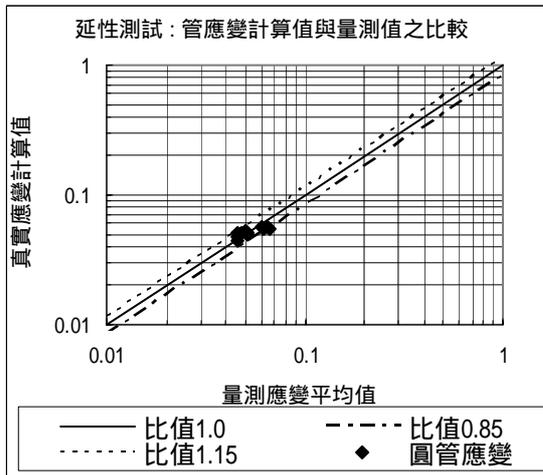


圖 6. 延性測試壓至  $h=3.05t / (0.05+3t/D_0)$ , 管大徑端應變計算值與量測值之比較.

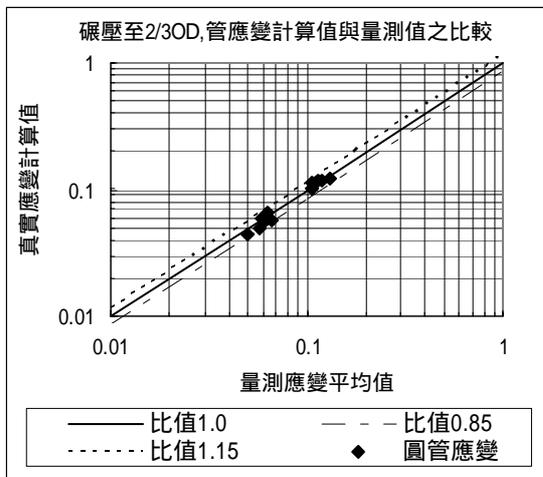


圖 7. 輓壓測試時, 圓管壓至  $h=2/3 D_0$ , 管大徑端應變計算值與量測值之比較.

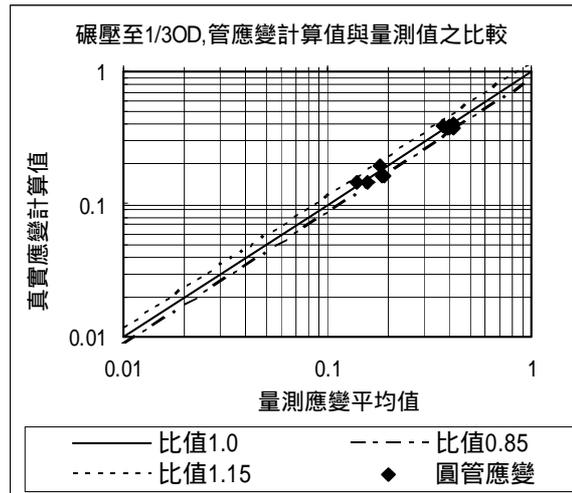


圖 8. 輓壓測試時, 圓管壓至  $h=1/3 D_0$ , 管大徑端應變計算值與量測值之比較.

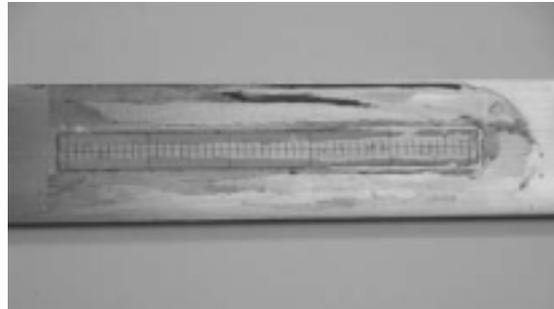


圖 9. 展示黏貼在鋁試片上之貼紙格線.



圖 10. 展示鋼試棒上之貼紙格線與刻痕.



圖 11. 取線寬帶中線的畫素點座標來定位格線.



圖 12. 「顏色」選項勾選「全部墨水」；「座標」選項勾選「像素」。

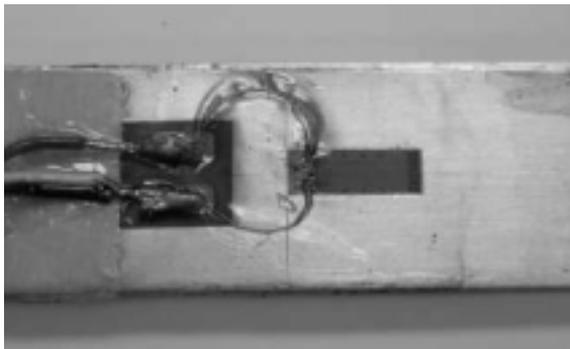


圖 13. 展示應變片黏貼在鋁試片之另一側上。

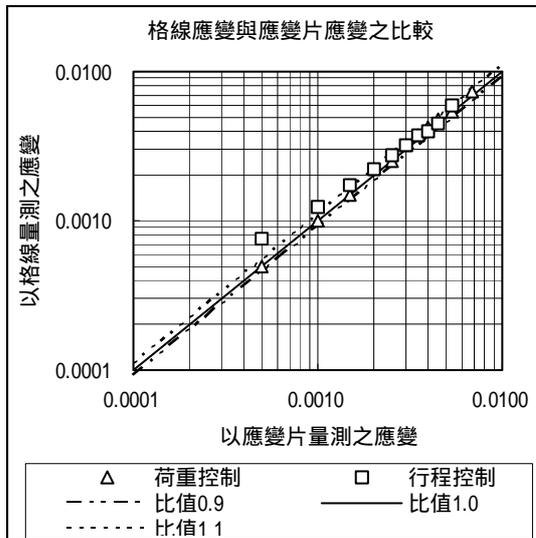


圖 14. 鋁試片格線應變與應變片應變之比較。

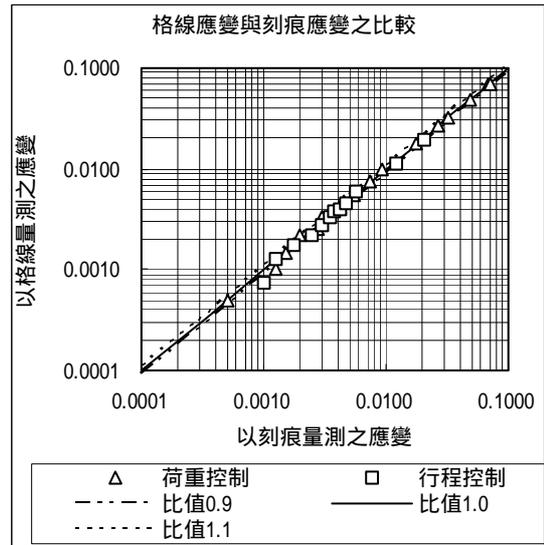


圖 15. 鋁試片格線應變與刻痕應變之比較。

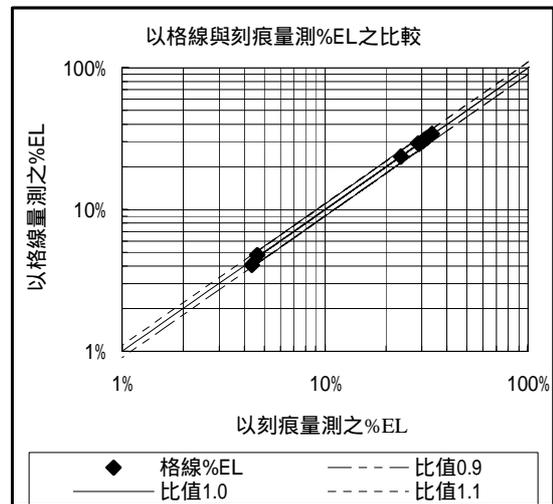


圖 16. 不同強度鋼試棒格線%EL 與刻痕%EL 比較。

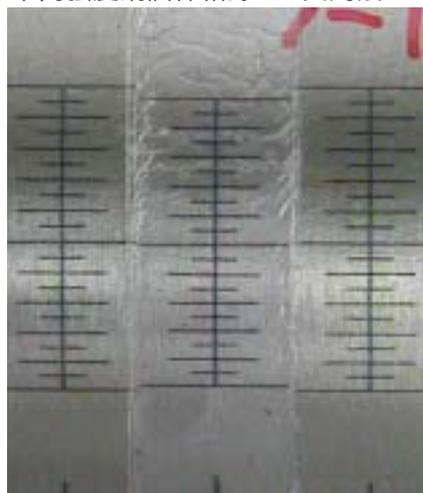


圖 17. 延性測試或輾壓測試前,先在圓管 3 點鐘與 9 點鐘位置分別黏貼上貼紙格線(左,右);測試後再在其側浮貼上參考格線(中),擷取影像量測原先黏貼格線之伸長即可計算管大徑端應變。

表一 焊道延性測試：圓管碾壓成橢圓管管外壁產生之最大應變值

圓管外直徑 $D_o$ (英吋)	4.5	4.5	4.5	8.625	8.625	8.625	18	18	18
圓管厚度 $t$ (英吋)	0.083	0.219	0.674	0.125	0.375	1	0.188	0.5	1.25
管徑與厚度比 $D_o/t$	54.2	20.5	6.7	69.0	23.0	8.6	95.7	36.0	14.4
碾壓至 $h$ (英吋):公式(2)	2.403	3.408	4.117	4.078	6.339	7.667	7.05	11.438	14.758
橢圓管外壁最大工程應變( $e_{Ao}$ )	0.079	0.063	0.063	0.087	0.064	0.061	0.101	0.07	0.061
橢圓管外壁最大真實應變( $\epsilon_{Ao}$ )	0.075	0.058	0.052	0.082	0.06	0.053	0.096	0.066	0.056
圓管外直徑 $D_o$ (英吋)	36	36	36	52	52	52	80	80	80
圓管厚度 $t$ (英吋)	0.25	0.625	1.25	0.375	0.75	1.25	0.562	0.875	1.25
管徑與厚度比 $D_o/t$	144.0	57.6	28.8	138.7	69.3	41.6	142.3	91.4	64.0
碾壓至 $h$ (英吋):公式(2)	10.765	18.673	24.73	15.966	24.526	31.22	24.117	32.226	39.355
橢圓管外壁最大工程應變( $e_{Ao}$ )	0.128	0.081	0.067	0.125	0.087	0.073	0.127	0.099	0.084
橢圓管外壁最大真實應變( $\epsilon_{Ao}$ )	0.119	0.077	0.062	0.117	0.082	0.069	0.119	0.093	0.08

表二 電焊管碾平測試：圓管碾壓成橢圓管管外壁產生之最大應變值

圓管外直徑 $D_o$ (英吋)	4.5	4.5	4.5	8.625	8.625	8.625	18	18	18
圓管厚度 $t$ (英吋)	0.083	0.219	0.674	0.125	0.375	1	0.188	0.5	1.25
管徑與厚度比 $D_o/t$	54.2	20.5	6.7	69.0	23.0	8.6	95.7	36.0	14.4
先碾壓至 $h=(2/3) D_o$ (英吋)	3	3	3	5.75	5.75	5.75	12	12	12
橢圓管外壁最大工程應變( $e_{Ao}$ )	0.038	0.11	0.499	0.029	0.097	0.336	0.021	0.059	0.169
橢圓管外壁最大真實應變( $\epsilon_{Ao}$ )	0.036	0.1	0.354	0.028	0.088	0.26	0.02	0.055	0.146
再碾壓至 $h=(1/3) D_o$ (英吋)	1.5	1.5	1.5	2.875	2.875	2.875	6	6	6
橢圓管外壁最大工程應變( $e_{Ao}$ )	0.284	0.96	10.98	0.217	0.82	4.818	0.152	0.46	1.666
橢圓管外壁最大真實應變( $\epsilon_{Ao}$ )	0.246	0.649	2.336	0.194	0.579	1.66	0.14	0.37	0.936
圓管外直徑 $D_o$ (英吋)	36	36	36	52	52	52	80	80	80
圓管厚度 $t$ (英吋)	0.25	0.625	1.25	0.375	0.75	1.25	0.562	0.875	1.25
管徑與厚度比 $D_o/t$	144.0	57.6	28.8	138.7	69.3	41.6	142.3	91.4	64.0
先碾壓至 $h=(2/3) D_o$ (英吋)	24	24	24	34.667	34.667	34.667	53.333	53.333	53.333
橢圓管外壁最大工程應變( $e_{Ao}$ )	0.014	0.035	0.075	0.014	0.029	0.05	0.014	0.022	0.032
橢圓管外壁最大真實應變( $\epsilon_{Ao}$ )	0.014	0.034	0.07	0.014	0.028	0.048	0.014	0.021	0.031
再碾壓至 $h=(1/3) D_o$ (英吋)	12	12	12	17.333	17.333	17.333	26.667	26.667	26.667
橢圓管外壁最大工程應變( $e_{Ao}$ )	0.098	0.265	0.609	0.102	0.216	0.387	0.1	0.159	0.236
橢圓管外壁最大真實應變( $\epsilon_{Ao}$ )	0.093	0.232	0.462	0.097	0.193	0.32	0.094	0.146	0.209