

碳鋼軸件經過感應熱處理後之疲勞測試方法 The test method of fatigue property on carbon-steel after induction heat treatment

呂理得 黃正熙 王士賓

Lee-Der Liu, Chenhsi Huang, Shibin Wang

黎明技術學院 創意產品設計系

Department of Innovative Product Design, Lee-Ming Institute of Technology

摘 要

本文針對碳鋼軸件經過高週波感應熱處理後之破壞形態進行研究，由於鋼鐵材料製成之軸件常需在軸件上鑽孔作為插銷孔以便組合傳動，若能施以感應熱處理，其性能必能有所提升。故本文除了探討軸件上鑽削插銷孔之後之破壞特性，並加入高週波感應加熱及冷卻條件作為實驗變數，期望對碳鋼軸件在銷孔部位之破壞形態有進一步的了解。

本計劃延續先前之研究，規劃更詳盡的實驗方法驗證此類碳鋼軸件之最佳設計，實驗方法包括將軸件試片自行以精密銑床加工銷孔，之後在本校之熱處理檢定場地實施熱處理，並以本系之彎矩疲勞實驗機測試其疲勞性質，結果顯示，本文之試片之疲勞性質符合規範值，將來可再繼續探討碳鋼試棒經過熱處理之後致使試片之偏心率，是否能夠符合操作標準。

關鍵詞：疲勞性質、碳鋼、感應加熱

Abstract

This article aimed at the fracture mechanism on the middle-carbon-steel shafts before and after induction heat treatment. Because the kind of steel shafts were drilled a key-hole to be transferred parts, and then we heat treated the steel shafts in order to arise its performance. So we tried to distinguish the fracture characteristics of steel shafts treated by different induction heating and cooling conditions. In our previous study, we designed three heat treatment conditions to heat and cool the carbon-steel shafts.

This project planned to continue the previous study to realize the mechanical properties of steel shaft when the steel shaft after drill machined and different heat treated. We plan some more precise experiments to certificate the reliable design of



key-hole on steel shaft. Experimental methods including drilling a key-hole on steel shafts using a milling machine by ourselves and heat-treating steel shafts using the skill certification test site in our college. Besides, we tried to perform the bending fatigue test on the specimens. The test results showed that, the fatigue limitation of this kind of specimens was fitted for the standards. In future, we could research the shape deviations caused by heat treatments, and if the operation procedural will fit for certifications.

Key Words: fatigue property, carbon-steel, induction heating



1. 前言

高週波感應加熱可在很短的時間內讓工件局部表面升溫到淬火溫度，以便再施以後續的熱處理程序，對於生產線而言，是一種符合經濟效益的製程。

通常鋼材淬火後會變態為硬脆的麻田散體組織 (Martensite)，不僅過於硬脆而且殘留過高的內應力，不能直接使用，因此必須把硬化過的鋼材，再予以加熱到變態點以下的溫度施以回火，藉以產生回火麻田散體組織 (Tempered Martensite) 以提高韌性，鋼材在淬火後施以回火，可以提高鋼材的韌性及延展性，減少脆性並消除內應力，但不致使淬火的硬度降低過多，同時可以改善工件的材質均勻性及形狀穩定性。[1-2]

感應式硬化處理過程融合了電磁場、相變態及冶金學的現象，目的在使工件的特定區域變態成微細的麻田散體組織，增加工件的硬度及耐磨性，同時可以讓工件的其他部位受到此製程的影響，工件的強度及殘留應力分佈主要取決於高週波感應條件、鋼材種類及其原有之組織，控制主因便可掌握工件所需之特性及其生產之再現性，

由於鋼鐵材料製成之軸件常需在軸件上鑽孔作為插銷孔，並施以高週波感應加熱淬火或回火，故本文延續之前之拉伸破壞特性之外，也針對其疲勞性質進行測試。[3-4]

2. 理論分析

依熱處理手冊顯示[5]，1045 中碳鋼料之高週波加熱之淬火溫度隨感應頻率及效率而異，最高可至 1095℃，淬火後可藉由加熱至 200℃ 至 500℃ 的不同溫度回火一段時間以調節硬度，亦即，加熱至不同的

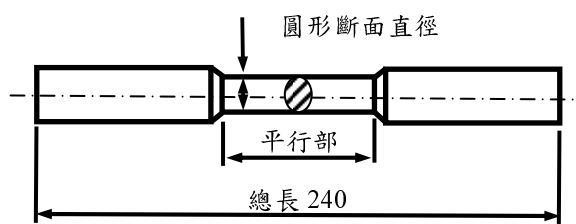
回火溫度進行回火可得到從淬火硬度 HRC55 稍為降低之硬度，常用的範圍約 HRC40 至 HRC42；若是正常化製程則加熱至 900℃ 後空冷即可。

大型工件在感應淬火後的自我回火可增加硬化鋼料的韌性及延性，同時消除脆性破壞的可能性，但會減少些許之硬度，淬火硬化的鋼料形成硬而脆的麻田散體組織，未回火之麻田散體過於堅硬而不適用於實務構件，其大量殘留之內應力亦可能造成異常之破壞。[6]

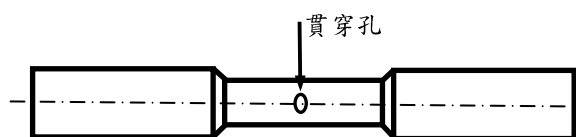
3. 實驗方法

3.1 拉伸實驗

本文之實驗採用圓桿狀之拉伸試片，試片總長約 240 mm，其平行部之直徑為 12.5 mm，標準距離長度為 50 mm，為了研究銷孔的破裂形態，我們在試片平行部之中央處分別鑽以 5、6、7、8 mm 直徑之貫穿孔以模擬不同銷孔的破裂形態。標準拉伸試片示意圖如圖一所示，試片上鑽製銷孔之示意圖如圖二所示。



圖一 標準拉伸試片示意圖



圖二 試片上鑽製銷孔之示意圖



拉伸實驗採用高鐵公司(Hi Tech Corp.)之 100 公噸萬能試驗機測試抗拉強度，另以美國 MTS 公司之 100 kN 動態拉伸實驗機(MTS 810)重複驗證延性材料及脆性材料在抗拉實驗過程之拉伸曲線變化情形。

3.2 熱處理條件

為讓同學深刻了解淬火後回火的重要性，本文設計三種熱處理製程與原材試片作比較，包括僅施以淬火熱處理、淬火後施以回火熱處理，以及加熱後施以正常化熱處理三種條件，熱處理之試片係在試片之銷孔處施以高週波感應加熱。

3.3 疲勞實驗

本文之疲勞採用圓桿狀之疲勞試片，試片總長約 240mm，其平行部之直徑為 12.5 mm，標準距離長度大於 50 mm，我們在試片平行部之中央處鑽以 8 mm 直徑之貫穿孔以模擬銷孔破裂形態，並與未鑽孔試片之結果互相比較，疲勞試驗機如圖三所示。

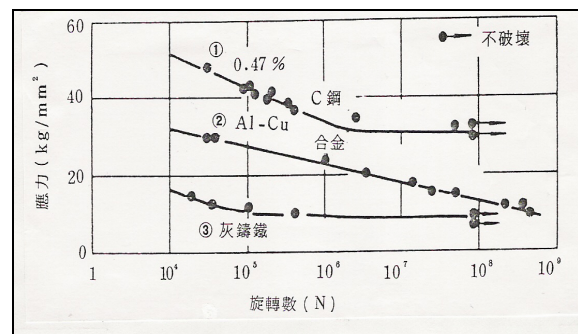


圖三 彎矩疲勞機

我們根據中華民國國家標準(CNS)「金屬材料疲勞試驗法則」(編號 4958)以及「金屬材料之迴轉彎曲疲勞試驗法」

(編號 7357) 規範之細節進行疲勞試驗，定義簡述如下：

疲勞試驗之目的乃測試材料之疲勞限(Endurance Limit)，當材料承受覆變應力(Repeated Stress)時，因為覆變應力具有週期性變化之特性，此種應力雖遠小於材料之靜力強度，但是該值若超過某限度後，則反覆次數充分增大時，終可使材料破斷，此即稱為金屬材料之疲勞破壞(Fatigue Failure)。一般金屬材料的疲勞限如圖四所示。



圖四 一般金屬材料的疲勞限

本文針對中碳鋼軸件進行疲勞試驗，我們認為熱處理後的試片表面及內部存在一些微裂紋的缺陷，並且伴隨著相當程度的相變應力，此類缺陷及應力集中將會隨時間經過而使缺陷擴散增大，直到發生破壞，雖然疲勞破壞不像其他破壞這麼迅速明顯，但是這是防止機件發生不可預期破壞的必要實驗。[7-10]

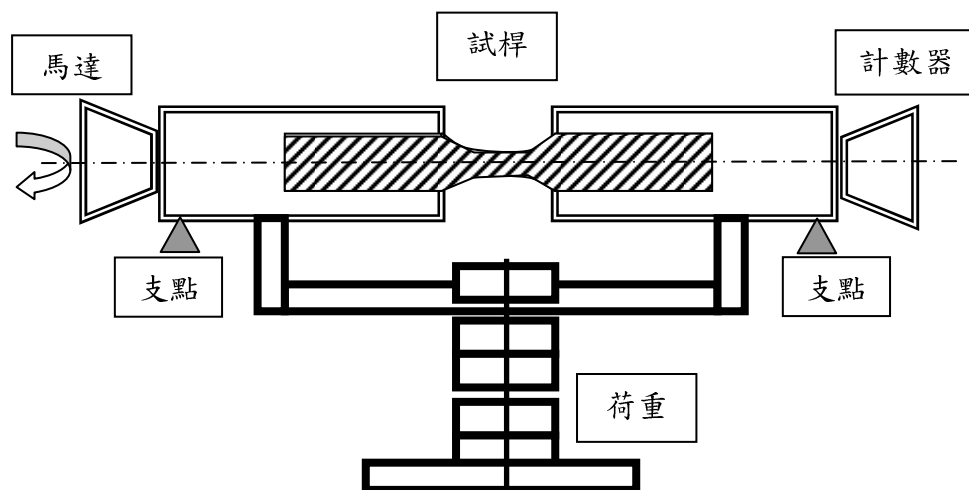
依據美國金屬學會之統計，今日之機械斷裂往往是因為機械材料因疲勞而造成疲勞斷裂(Fatigue Rupture)，如連桿機構、活塞銷、齒輪、彈簧、汽車之輪軸、壓縮機或內燃機之曲軸等，常因承受快速變化之週期應力或振動，日積月累下來，材料將逐漸導致疲勞而最後突然發生破斷。

一般而言，疲勞試驗機有拉伸壓縮疲勞試驗機，扭轉疲勞試驗機與旋轉彎曲疲



勞試驗機等形式，其最主要之差異在於所承受覆變荷重之不同。拉伸壓縮疲勞試驗所承受之覆變荷重為軸向荷重，而扭轉疲勞試驗所承受的是扭轉覆變荷重。至於我們最主要之旋轉彎曲疲勞試驗，所承受的

是直接剪斷荷重及彎曲荷重。一般我們所探討的疲勞試驗皆以旋轉彎曲疲勞試驗為主。旋轉彎曲疲勞試驗係將試桿夾持於旋轉疲勞試驗機，試桿及荷重之示意圖如圖五所示。



圖五 旋轉彎曲疲勞試驗試桿及荷重之示意圖

由圖中可知，當試桿夾於試驗機上後應先啟動馬達驅動試桿旋轉，再逐漸施加荷重 W 避免瞬間施加荷重造成試片變形。若 W 為所施加之荷重，而 L 為夾持器之支點到荷重施力點之距離，則試桿所承受之彎矩為 M ，由力學原理得知 $M=WL/2$ ，試桿表面所承受的最大應力為 $\sigma=MY/I$ ，其中 M 為彎矩， Y 為軸中心至軸表面之距離，即試桿半徑， I 為面積慣性矩，對圓軸而言其慣性矩 $I=3.14D^4/64$ ，所以最大應力為 $\sigma=16WL/3.14D^3$ 。

旋轉疲勞試驗即是將試桿固定於試驗機上，再施加荷重 W 使產生 M ，依公式再求取試桿所承受的應力 σ ，然後起動馬達使試桿承受覆變荷重，以描繪出最大應力與旋轉數對數值之曲線圖，此即 S-N 曲線圖。材料受反覆應力之作用而破壞者稱之疲勞破壞，而不造成疲勞破壞之最大應力值稱為疲勞限。

荷重若是完全對稱反覆稱為雙向振動應力，若是單向脈動反覆稱為單向振動應力，其他為不規則的反覆應力。所謂疲勞比 (Endurance Ratio) 是疲勞限對抗拉強度之比值，通常鋼之疲勞比約為 0.45~0.55 之間，但對有凹痕或被腐蝕的試桿而言，其比值會降低。鋼中若為麻田散鐵，則比值小於 0.25，但若為肥粒鐵，其比值則達 0.6 左右。[11-15]

3.4 疲勞破壞

疲勞破壞可分為幾個階段：

第一階段：裂口初生 (Crack Initiation)，包含可經適當退火而消除其初期之疲勞損害。疲勞裂口初生之機構需有兩組以上的滑移系統，表示在拉伸過程中，表面所生成的二個階梯。所表示的是當應力變為壓縮時，第一個滑移系統造成



一凹口，中表示隨後作用之滑移系統所造成一凸處。

第二階段：滑移帶裂口成長 (Slip-Band Crack Growth)，第一階段之初生裂口沿剪應力最大的面而加深，此階段又稱為第一期之裂口成長。

第三階段：裂口沿張應力高之面成長，在此階段，裂口已完全成型且沿垂直於拉伸應力最大之方向成長，又稱為第二期裂口成長。

第四階段：斷裂當裂口成長到相當大小時，材料所剩餘之截面積已不足以承受所加之應力時便會造成材料斷裂。

一般疲勞斷面可分成海灘紋及粗糙區，海灘紋之造成因素為(a)因週期性之應力負荷所產生之變化。(b)因斷面之腐蝕與氧化之間的差異。(c)因裂口尖端之應力集中而造成的一些塑性流變。而粗糙區之造成為上述第四階段，因最後之截面積已不足以承受荷重而破斷，造成了粗糙面。[16-18]

3.5 金屬材料疲勞試驗法 CNS 4958

本標準適用於反覆次數 10^4 次以上之疲勞壽命為對象，在室溫大氣中使用標準試片之金屬材料疲勞試驗方法之通則。

(A)有關應力及反覆次數之用語如下。

1. 標稱應力：不考慮凹口及其他因素所造成之應力集中，將材料視為彈性體所計算之應力。垂直應力用 σ ，剪切應力用 τ 表示。
2. 變動應力：大小隨時間變化之應力。
3. 覆變應力：在一定之最大值與最小值之間，以單純且週期性變化之應力。
4. 最大應力， σ_{\max} ， τ_{\max} ：覆變應力之最大代數值。
5. 最小應力， σ_{\min} ， τ_{\min} ：覆變應力之最小代數值。

6. 平均應力， σ_m ， τ_m ：覆變應力之最大應力與最小應力之代數和之 1/2。
7. 應力振幅， σ_a ， τ_a ：覆變應力之最大應力與最小應力之代數差之 1/2。
8. 應力範圍， σ_R ， τ_R ：覆變應力之最大應力與最小應力之代數差。
9. 應力振幅平均應力比，A：應力振幅與平均應力之代數比。A = σ_a/σ_m 或 A = τ_a/τ_m 。
10. 最小最大應力比，R = $\sigma_{\min}/\sigma_{\max}$ 或 R = τ_{\min}/τ_{\max} 。
11. 雙振幅應力：正負應力等值間之覆變應力。
12. 部分雙振幅應力：絕對值不等之最大值與最小值間之覆變應力。
13. 單振幅應力：0 與最大值或 0 與最小值間之覆變應力。
14. 部分單振幅應力：同一符號之最大值與最小值間之覆變應力。
15. 應力反覆次數，n：疲勞試驗中應力之反覆次數。
16. 破壞反覆次數，N：至發生疲勞破壞之應力反覆次數。
17. 反覆數比，n/N：於同一應力，反覆次數 n 與破壞反覆次數 N 之比。
18. 形狀係數 α ：凹口試片施加負載時，在應力集中部位，以彈性力學方法計算而得之最大高應力除以該部分之標稱應力所得之值。

(B)有關疲勞強度之用語如下。

1. S-N 線圖：即為應力-反覆次數線圖，縱座標為應力，橫座標為至破壞之反覆次數所繪之線圖。
2. 疲勞限度：能耐無限反覆次數之應力上限值。
3. 雙振幅拉伸-壓縮疲勞限度， σ_w ：雙振幅拉伸-壓縮應力作用時之疲勞限度，以應力振幅表示。



3.6 金屬材料之迴轉彎曲疲勞試驗法 CNS 7357

本標準適用範圍以反覆次數 10^4 次以上之疲勞壽命為對象，在室溫大氣中使用標準試片之金屬材料迴轉彎曲疲勞試驗方法。本標準採用 SI 國際單位制。

(A) 有關試片之相關規定。

1. 試片以切削或研磨作機械加工時，試片不得有撕裂及顯著之加工變形與加熱現象發生。
2. 經加工之試片須依砂布粗細度之順序研磨，磨去機械加工所留下之條紋，最後須使用比#320 更細之砂布研磨之。
3. 加工完成之試片，其直徑 d 與標稱尺度之許可差為 ± 0.04 mm。試片在加工後不得有 0.02 mm 以上之彎曲及偏心。
4. 試片加工完成後，須細心處理使其不生銹及受損傷等。
5. 試片之直徑，於同一截面互相垂直之二方向測定，並以其算術平均值為截面之直徑。

(B) 有關試驗機之相關規定如下。

1. 試驗機須能使試片之試驗部位產生固定值之彎曲力矩。
2. 試驗機之構造，必須對試片不產生軸向之負載及扭矩。同時試驗機須有能記錄試片至破壞時之應力反覆次數之裝置。
3. 當停電或其他原因使試驗機停止時，具有能防止自動再起動之裝置。
4. 試驗機須在額定負載範圍內能長時間使用，且能維持所規定之精度。
5. 自試驗機之支點與負載間之距離 L 及負載 P 之實測值求得之彎曲力矩 M 對標稱彎矩之誤差，在額定負載之範圍內，須在 $\pm 1\%$ 內。
6. 試驗機在彎曲負載 $P=0$ 之狀態下，須將試片之軸心調整成一直線。

(C) 有關試驗方法之相關規定。

1. 安裝試片不得有偏心，且必須牢固，以確保試片於試驗中無鬆動之虞，安裝時須注意試片之試驗部份避免承受過大之應力及受工具等之損傷。
2. 由砝碼或彈簧靜負載使其產生彎曲力矩之試驗機，當試驗機達到所規定之運轉速度後，須迅速將負載加上，但不得產生衝擊。欲終止試驗時，應除去負載後停止運轉。
3. 試驗中彎曲力矩應盡量調整為一定。此時調整中之應力不得超過規定最大應力與最小應力間之範圍。
4. 為求 S-N 線圖，於多數應力階段作試驗時，宜等間隔選擇應力直使兩相鄰之應力比在 S-N 線圖之傾斜部分為 1.05 ~ 1.5，在疲勞限度附近為 1.02 ~ 1.05。
5. 負載之反覆速率，原則上每分鐘 1000~5000 次連串之試驗，宜以相同之反覆速率施行。
6. 原則上同一試片之試驗自開始到終止不得停止。若試驗中途停止時，須記錄停止時之反覆次數及停止時間。
7. 除特別指定外，試驗反覆次數達至 10^7 前尚未破壞時得停止試驗。
8. 經試驗而未破壞之試片，不得再使用。

(D) 有關試驗結果之處理之相關規定。

1. 標稱應力採用發生最大應力截面處之彎曲力矩除以該處截面模數所得之值。
2. 對於應力易發生疑問時，須明確表明計算方法。
3. 應力之單位為 $N/mm^2=MPa$ ，原則上有效數字取至 3 位數。
4. 原則上反覆次數係從試片之負載達到所定之負載時開始計算。
5. 原則上破壞反覆次數係採取至破斷時之反覆次數。



6. 試驗結果之反覆次數，修整有效數字為 3 位數，以 10^n 倍數表示之，例如 2.34×10^6 。
7. S-N 線圖上，縱座標取應力振幅、應力範圍或最大應力等，橫座標取反覆次數。橫座標之刻度為對數刻度，縱座標之刻度為等間隔刻度。
8. 於 S-N 線圖上，對於未破壞之試片，其表示試驗結果之點須加記向右之箭頭。
9. S-N 曲線成水平時，水平線表示應力疲勞限度。但水平線所表示應力，每應力階段應試驗 2 個以上試片，其結果依下述方法之一求其應力。
 - (1) 每一應力階段，半數以上試片在指定反覆次數下，未破壞之應力階段中之最大應力，但低於此應力之應力階段中，未破壞之試片必須超過半數。
 - (2) 若求出水平線之應力，其應力階段試片全部未破壞時，則取該應力階段與大一階應力階段之平均應力。但低於此應力之應力階段中，不得有破壞之試片。必要時經雙方之協議，決定各應力階段試片之個數，並以統計方法求出疲勞限度。
10. 若僅要求保證疲勞強度為指定值以上時，以該指定之覆變應力試驗 3 個試片，報告任何試片在所指定反覆次數均未破壞即可。

(E) 有關時間強度之相關規定如下。

1. 求時間強度時，其反覆次數原則上指定下述之任一個次數， 1×10^4 ， 2×10^4 ， 5×10^4 ， 1×10^5 ， 5×10^5 ， 5×10^6 ， 1×10^7 ， 2×10^7 。
2. 決定時間強度，任選下述二個方法中之一。

(1) 依 S-N 線圖決定時間強度之方法：將 S-N 曲線繪於表示試驗結果各點之中間，在此曲線上求出所指定反覆次數相對之應力，作為時間強度。但 S-N 曲線不能靠外插法繪製。此法求出之時間強度須加注 A 記號，例如以 $\sigma(A10^5) = 275 \text{ N/mm}^2 (28 \text{ kgf/mm}^2)$ 表示。

(2) 不用 S-N 線圖決定時間強度之方法，在破壞反覆次數靠近指定反覆數之幾個應力階段進行試驗，而由每應力階段中取 2 個以上之試片進行試驗，其結果依下述任一方法所得之應力作為時間強度。

(a) 每一應力階段，半數以上試片在指定反覆次數下未破壞之應力階段中之最大應力。但低於此應力之應力階段中，在指定反覆次數下未破壞之試片必須超過半數。

(b) 若求出時間強度之應力階段之試片，在指定之反覆次數，全部未破壞時，取該應力階段與大一階應力階段之平均應力。但低於此應力之應力階段中，在指定反覆次數以內不得有破壞之試片。必要時經雙方之協議，決定各應力階段試片之個數，並以統計方法求出時間強度。用此方法求出時間強度者須加 B 記號，例如以 $\sigma(B10^5) = 275 \text{ N/mm}^2 (28 \text{ kgf/mm}^2)$ 表示。

(F) 試驗結果報告宜就下列各項詳細紀錄之。

1. 材料之製造廠商名稱。
2. 材料之種類、名稱、爐號及煉製履歷。
3. 材料之化學成分。
4. 自材料中採取試片之條件。
5. 熱處理條件。



6. 材料之抗拉強度，降伏點或降伏強度，伸長率及斷面縮率。
7. 材料之真破斷力、硬度、衝擊值等機械性質。
8. 試片之形狀、尺度及精加工條件。
9. 試驗機名稱、形式及容量。
10. 應力之種類、反覆速率等試驗條件。
11. 溫度、溼度等試驗環境條件。
12. 試驗年月日、試驗地點及試驗人員姓名。
13. 試驗結果之一覽表。
14. S-N 線圖，疲勞限度或時間強度。
15. 其他。

(G) 影響疲勞限度之其他因素。

1. 一般材料之強度愈大者，常因表面之凹痕效應而影響疲勞限度。
2. 試材表面受化學腐蝕時，會產生腐蝕疲勞 (Corrosion Fatigue) 而造成疲勞限度降低。
3. 其主要之因素是因為反覆應力使腐蝕孔擴大而產生疲勞破裂。
4. 試驗時之覆變速度若在每分鐘 30,000 次以下時，對疲勞限度皆無影響，但若疲勞試驗於中間中斷，休息後再進行時，則因長時間之休息而增加疲勞限度。
5. 疲勞限度會隨溫度上升或下降；一般而言在 450°C 以下時，下降較緩慢。在 450°C 以上時，下降則較快。
6. 一般試材經過回火處理後會增加其疲勞限度。
7. 若試桿承受過大之應力時，其材料內部之損傷會較嚴重，且疲勞限度會降低。

綜合上述七點，我們可概略歸納出影響材料疲勞性質之因素如下：(1)表面效應。(2)合金元素和晶粒大小。(3)應力振

幅。(4)應力系統。(5)振動頻率。(6)溫度效應。

4. 結果與討論

4.1 拉伸實驗結果

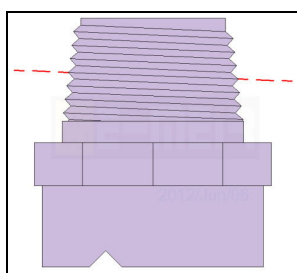
由先前研究顯示，拉伸試驗結果與規範稍有差異，推測可能拉伸速率過快的原因造成抗拉強度稍低。其他學者亦指出，因為高強度材料的破壞韌性較小，如果有了某些裂縫，其抗拉強度反而比低強度材料還要低，所以，如果使用高強度材料作為機械構材，萬一其中已有內在缺陷，反而是危險的設計。

4.2 疲勞實驗結果

本文先行使用具有 V 槽的非正式試棒進行測試，試棒長度 240 mm，夾持部外徑 20 mm，平行部外徑 12 mm，V 槽最小直徑 8 mm。試驗細節及結果略述如下。

1. 檢查疲勞試驗機跟電源有沒有正常連接及運作，包括馬達及計數器之各項開關按鈕，尤其是極限開關動作是否正常，若是試桿斷裂，試桿支架應觸及極限開關使馬達及計數器停止。
2. 夾持試桿，本疲勞試驗機之夾持機構係以防止鬆脫原理設計，當馬達驅動試桿支架旋轉時，操作者右側之夾頭係為左螺紋鎖緊，相對的，操作者左側之夾頭係為右螺紋鎖緊，故必須先將試桿支架卡住固定，再使用專用的鉤頭扳手將裝入彈簧夾之試桿鎖入試桿支架中。
3. 左螺紋的簡易辨別方法為，當螺紋軸心線直立放置時，眼睛看到的螺旋線左邊高就是左螺紋，右邊高就是右螺紋。簡易辨別法如圖六所示。





圖六 左螺紋的簡易辨別方法

4. 開啟馬達電源使試桿空轉，察看試桿迴轉方向是否正確，並觀察試桿是否會有鬆脫現象，若有鬆脫現象表示迴轉方向相反，必須更換三相電源改變迴轉方向。
5. 使馬達繼續旋轉以空負載驅動試桿，再將荷重逐漸加上荷重支架，以產生適當之彎矩，必須注意緩慢施加荷重，勿使試桿受到震擊。
6. 當施加荷重完畢，旋轉裝置穩定承受負載後，隨即將計數器歸零，進行計數。
7. 當試桿斷裂，試桿支架會觸及極限開關之自動停止器使馬達自動停止。
8. 讀取計數器上之數字，本疲勞試驗機之計數器需再乘以 100，即為迴轉數。
9. 卸除荷重及試桿，再裝上另一試桿，本試驗機之夾頭必須輔以環狀墊片以反向施力拉出彈簧夾，方能重覆上述步驟，進行下一次試驗。
10. 將應力 S 及迴轉數 N 記錄在 $S-N$ 曲線圖上。

本文先行使用具有 V 槽的試棒進行測試，使用荷重為 16 kg，試驗機之支點與荷重負載間之距離為 340 mm，試棒直徑係以 V 槽處之最小直徑 8 mm 計算。計算過程略述如下。

荷重 $W=16$ kg，長度 $L=340$ mm， $d=8$ mm

$$\begin{aligned} \text{應力 } S &= 16WL/3.14d^3 \\ &= 16 \times 16 \times 340 / 3.14(8)^3 \\ &= 56 \text{ kgf} / \text{mm}^2 \text{ (548 MPa)} \end{aligned}$$

本文之疲勞試驗機以 56 kgf/mm^2 之彎矩應力將中碳鋼 V 槽試棒反覆運轉 19959 迴轉數之後試片斷裂，參考圖四中最上方中的碳鋼疲勞性質線圖，在 56 kgf/mm^2 之應力負載下，其破斷迴轉數約為 10^4 左右，表示本文之疲勞試驗機功能正常，結果顯示，本文之試片之疲勞性質符合規範值，將來可再繼續探討試棒經過熱處理之後致使試片之偏心率，是否能夠符合操作標準。

5. 結論

1. 本文先前之研究顯示，中碳鋼軸件之斷面積雖依比例減少，但其抗拉強度並不減少反而提高，推測可能因為其加工硬化及特殊的應力分佈所致。
2. 本文之疲勞試驗機以 56 kgf/mm^2 之彎矩應力將中碳鋼 V 槽試棒反覆運轉 19959 迴轉數之後試片斷裂，表示本文中之試棒之疲勞性質結果符合規範。
3. 本文之試驗結果顯示疲勞試驗機功能正常，將來可再繼續探討試棒經過熱處理之後致使試片之偏心率，是否能夠符合操作標準。

參考文獻

- [1] Donald R. Askeland and Pradeep P. Phule, Essentials of Materials and Engineering, Thomson, 2004.
- [2] 陳永傳等人，超高頻感應加熱於鋼料快速滲碳的應用，金屬熱處理，2004。
- [3] 林德興，感應式回火在鋼材上之應用，金屬熱處理，2000。
- [4] 林德興，感應式齒輪熱處理，金屬熱處理，2001。譯自 Valery Rudnev etc., Gear Heat Treating by Induction, Gear Technology, 2000.



- [5] ASM, Heat Treater's Guide, Standard Practices and Procedures for Steels, 1988.
- [6] George Krauss: Principles of Heat Treatment of Steel, ASM, Ohio, 1980, p.91.
- [7] 楊榮顯，材料工程學，全華科技圖書公司，2005。
- [8] 劉松柏，材料強度破壞學，成環技術叢書，2000。
- [9] 陳意維，”雷射硬面處理與高週波感應表面硬化顯微組織特性之比率分析”，成功大學機械所碩士論文，1997。
- [10] Donald J. Wolpi, Understanding how Components Fail, ASM, 1991.
- [11] Kuno Weiss, Valery Rudnev, Ray Cook and Micah Black, Induction Tempering of Steel, Advanced Materials and Process, 8/1999, H19.
- [12] Stanley Zinn, A survey of new techniques in induction heating, Heat Treating, 1984.
- [13] M. F. Zhukov. etc., Induction pulse hardening of parts of thermal power equipment, Thermal Engineering, 1996.
- [14] J.U. Mohring etc., Numerical and experimental investigation into transverse flux induction heating, 1997.
- [15] T. M. Sorokina etc., Influence of high-temperature induction heat treatment on the properties of the metal, Metal Science and Heat Treatment, 1988.
- [16] G. A. Berlin etc., Structure transformations in graphitic steel during induction heating, Metal Science and Heat Treatment, 1994.
- [17] J. Rodel etc., Modeling of austenite formation during rapid heating, Surface Engineering, 1996.
- [18] F. H. Reike etc., Recent developments in induction hardening, Heat Treatment of Metals, 1978.

