

中碳鋼軸件經過高週波熱處理後之拉伸破壞特性之研究 The Research of the Tensile Fracture Characteristics on Steel Shaft after Induction Heating Treatment

鄭鐵樹 呂理得 劉如真 林宜永

Te-Su Chen, Lee-Der Liu, Ju-Jen Liu, I-Yon Lin

黎明技術學院 化學工程與材料工程系

Department of Chemical and Materials Engineering, Lee-Ming Institute of
Technology

林本源

Ben-Yuan Lin

黎明技術學院 機械工程系

Department of Mechanical Engineering, Lee-Ming Institute of Technology

摘 要

本文一方面針對中碳鋼材料經過高週波熱處理後之拉伸破壞機制進行研究，一方面設計各種熱處理條件進行實驗，以深刻瞭解淬火後回火的重要性；由於鋼鐵材料製成之軸件常需施以高週波感應加熱淬火或回火，故本文除了探討軸件之拉伸破壞特性，並加入高週波感應加熱及冷卻之條件作為實驗變數，期望對中碳鋼之軸件拉伸破壞有進一步的瞭解。

為瞭解淬火後回火的重要性，本文設計三種熱處理條件與原材試片作比較，包括第一，僅施以淬火熱處理，第二，淬火後施以回火熱處理，以及第三，加熱後施以正常化熱處理三種條件，熱處理之試片係將於試片中央部位以高週波感應加熱，加熱溫度係以紅外線測溫槍即時觀測，將試片表面加熱至 950°C 後再施以不同之熱處理，實驗後並輔以試片之破斷面觀測，以便互相對照確認試片之熱處理條件，並比較其抗拉強度及破斷面型態。

結果顯示中碳鋼軸件經過熱處理之後會因為相變態及引發表面應力而硬化，若僅施以淬火熱處理，雖可獲得硬脆之組織，但其抗拉強度卻下降至原材之半以下；經過正常化熱處理之軸件因冷卻緩慢，材料已恢復原有之延展性，抗拉強度尚可維持；若是淬火後施以回火熱處理則可獲得最佳的延性及韌性，其抗拉強度得以提升兩成以上，可見淬火後必須回火的重要性。

關鍵詞：抗拉強度、鋼鐵材料、高週波加熱



Abstract

This article aimed at the induction heat treatment on steel. We designed some heat treatment conditions to discuss the importance of tempering during tensile fracture. We tried to distinguish the tensile characteristics of steels treated by different induction heating treatments.

We designed three heat treatment conditions to emphasize the importance of tempering process by compared with the row material. Three heat treatment conditions including the first one, quenching, the second one, quenching and tempering and the last one, normalizing. We induction heated the center position of specimens to 950°C. At the same time, we inspected heating temperature around the heated position by infrared thermometer to control heating time. We also inspected hardness and fracture type of specimens after tensile test.

The result showed that, the tensile strength of the steel shaft could be hardened after quenching because of the martensitic formation and stress distribution. The normalized specimens recovered the ductility and maintain the tensile strength because the lower cooling rate in air. When we quenched and tempered specimens, we obtained better toughness, and the tensile strength could be raised about 20%. It could be seen the importance of tempering after quenching.

Key Words: steel, tensile strength, 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，本文除了探討軸件之拉伸破壞特性之外，也針對各種熱處理條件進行實驗及比較，以深刻瞭解淬火後回火的重要性。[3-4]

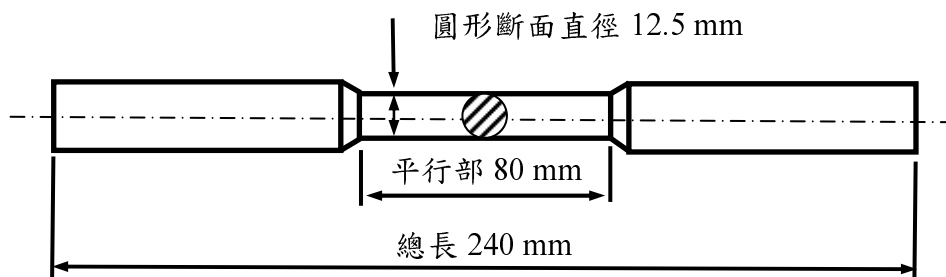
2. 理論分析

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，加熱溫度範圍為 950°C 至 1095°C，淬火後可藉由加熱至 200°C 至 500°C 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從淬火硬度 HRC55 下降到常用的硬度範圍，約為 HRC40 至 HRC42；若是正常化製程則加熱至 900°C 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

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 80 mm。標準拉伸試片示意圖如圖一所示。拉伸實驗係採用高鐵公司(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。



圖一 標準拉伸試片示意圖



為能深刻瞭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中央處施以高週波感應加熱，高週波設備包括控制主機、變頻機以及冰水機，高週波頻率為 300 MHz，功率為 12 kW。高週波圓圈形感應線圈共垂直緊密繞三圈，銅管表面覆蓋絕緣材料，避免與工件電性接觸而短路，三圈線圈總高度約 15 mm，直徑方向與圓桿試片間隔約 5 mm，加熱溫度係以紅外線測溫槍即時觀測，淬火熱處理製程係將試片表面加熱至 950°C 後直接施以水淬；回火製程係將淬火試片冷卻至常溫後再加熱至 200°C 持溫 2 小時後空冷；正常化製程則加熱至 950°C 後置於室溫中空冷。實驗後輔以光學顯微鏡觀測試片之破斷面型態。

4. 結果與討論

根據規範顯示，1045 中碳鋼未熱處理前之抗拉強度應大於 570 MPa，伸長率應大於 20%；熱處理硬化後之抗拉強度應大於 690 MPa，伸長率應大於 17%。[7]

表一為各種試片之抗拉強度試驗結果統計，結果顯示，未熱處理的原材試片之抗拉強度比規範大一些，高達 847 MPa，而伸長率略小，約只有 12%，儀器雖已保養校正，其結果仍與規範稍有差異，推測可能拉伸速率過快的原因。其中之淬火試片強度下降可能是因為硬脆組織造成非預期之斷裂，若是回火及正常化的試片，其延性及韌性已恢復水準，強度也趨於穩定。

圖二之拉伸曲線為 Hi Tech 公司之設

備所測試之【荷重-伸長量】結果，由左圖中可看出延性材料之原材試片最大荷重為 103986 (N)，對照之實際照片可看出明顯的頸縮及伸長率。

由圖二之右圖中可看出脆性材料之淬火試片最大荷重為 77396 (N)，對照之實際照片可看出明顯的火色殘留，其斷裂處平整，試片幾乎沒有變形就斷裂，拉伸曲線前半段之拖曳乃是夾頭夾緊試片前之滑脫現象並非實際之試片變形。

為驗證延性材料及脆性材料在抗拉過程之曲線變化，本文使用 MTS 810 動態拉伸試驗機重複測試。從圖三之試驗結果可看出延性材料與脆性材料之【荷重-伸長量】變化情形，方形記號顯示脆性材料在破斷前僅有小量變形量，圓形記號則顯示延性材料在破斷前有相當大的變形量。

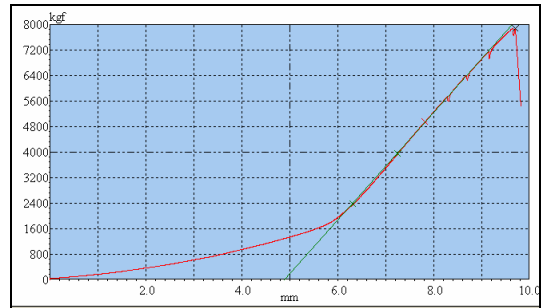
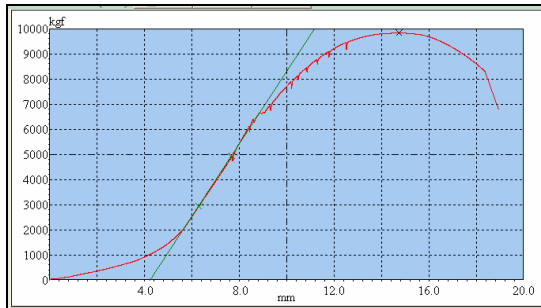
學者亦指出[8-9]，因為高強度材料的破壞韌性較小，如果有了某些裂縫，其抗拉強度反而比低強度材料還要低，所以，使用高強度材料作為機械構材時，萬一其中已有內在缺陷，反而是危險的設計。若是經過高週波加熱施以正常化熱處理之軸件，因為冷卻速率緩慢，該材料已恢復原有之延展性，其抗拉強度尚可維持。而淬火後施以回火熱處理之軸件可獲得最佳的延性及韌性，其抗拉強度得以提升兩成以上，可見淬火後必須回火的重要性。

圖四為延韌性破壞及脆性破壞之破斷面巨觀特徵比較，典型的延韌性破壞之斷裂面呈不規則形，其斷面可觀察到較為粗糙之巨觀組織；若是脆性破壞之斷裂面則呈平整狀，巨觀組織較為細緻。在顯微組織中，延韌性破壞裂縫呈穿晶破壞型態，而脆性破壞裂縫則呈沿晶破壞型態。[10-18]

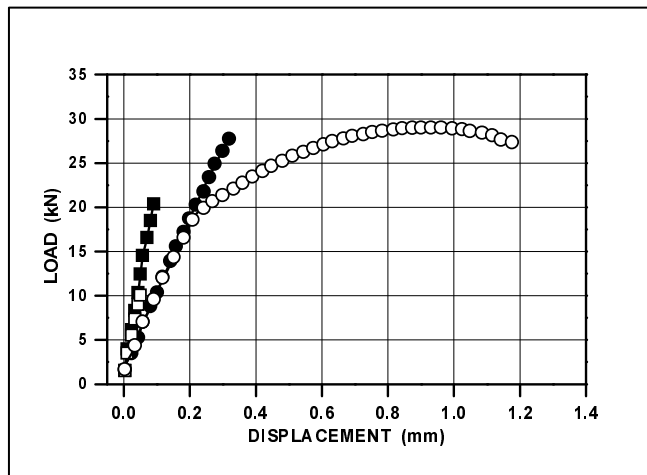


表一 各種試片之抗拉強度試驗結果

試片編號	熱處理方式	最大荷重 (N)	抗拉強度 (MPa)	伸長率(%)	斷面縮率(%)
1	原材	103986	847	12.6	39
2	高週波加熱後淬火	77396	631	0.2	2
3	高週波加熱後淬火及回火	108791	886	9.8	35
4	高週波加熱後正常化	96480	786	16.6	46

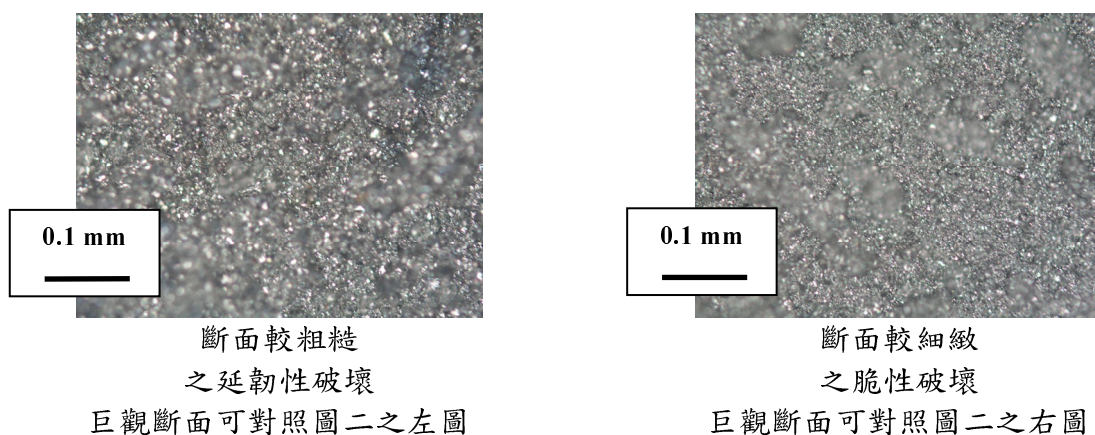


圖二 延性材料與脆性材料之拉伸曲線與實際試片對照圖。
左圖為原材，右圖為高週波加熱後淬火。



圖三 延性材料(圓形記號)與脆性材料(方形記號)之抗拉強度變化情形。





圖四 延韌性破壞及脆性破壞之破斷面巨觀特徵比較。

5. 結論

由以上的實驗及討論，可以得到下列結論：

1. 本文之中碳鋼軸件經過淬火硬化後，其抗拉強度提高係因麻田散體變態及引發殘留應力所致。
2. 本文之中碳鋼軸件，若僅施以高週波淬火熱處理，雖可獲得硬脆之組織，但其抗拉強度下降至原材之一半以下，可見淬火後回火的重要性。
3. 本文之中碳鋼軸件，經過正常化熱處理之軸件冷卻緩慢，材料已恢復原有之延展性，抗拉強度尚可維持；淬火後施以回火熱處理之軸件可獲得最佳的延性及韌性，其抗拉強度得以提升兩成以上。

參考文獻

1. Donald R. Askeland and Pradeep P. Phule, Essentials of Materials and Engineering, Thomson, 2004.
2. 陳鴻賓，金屬感應熱處理，復文圖書出版社，1987。
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. Wulpi, 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.

