

具有銷孔之中碳鋼軸件經過高週波熱處理後之拉伸破壞特性之研究

呂理得^{1*}，林本源²，劉如真³，林宜永⁴

¹黎明技術學院化材系 副教授

²黎明技術學院機械系 副教授

³黎明技術學院化材系 講師

⁴黎明技術學院化材系 專題生

中文摘要

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，讓同學深刻了解淬火後回火的重要性；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，故本文除了探討軸件上鑽孔後之拉伸破壞特性，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銷孔拉伸破壞有進一步的了解。

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，並在試片平行部之中央處分別施以 5、6、7、8 mm 直徑之貫穿孔加工，初步結果發現，其最小斷面積雖依比例而減少，但經過拉伸試驗後發現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孔形應力分佈所致。

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條件與原材試片作比較，包括(1)僅施以淬火熱處理、(2)淬火後施以回火熱處理，以及(3)加熱後施以正常化熱處理三種條件，熱處理之試片係將試片之銷孔處施以高週波感應加熱及冷卻，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表面硬度以及破斷面之觀測，三者互相對照確認試片之熱處理條件，以比較其抗拉強度及破斷面型態。

結果顯示，具有銷孔之中碳鋼軸件，因為加工硬化及孔形周圍之應力分佈所致，其抗拉強度反而提高，若僅施以淬火熱處理，雖獲得硬脆之組織，但其抗拉強度下降至原材之一半以下，且斷裂位置常在組織變化之交界而不一定斷在銷孔處；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；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。

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 always drilled a key hole on steel shafts, and then heat treated the key hole by induction, we tried to distinguish the tensile characteristics of steels treated by different heating and cooling conditions.

Experiment of this article used standard rod steel tensile specimens, its total length was 240 mm, the diameter D and standard length L of parallel part was 12.5 mm and 50 mm. We drilled different key-holes of 5, 6, 7, 8 mm diameter through the center of specimens. So that, the section areas of drilled specimens were proportionally decreased. We found the tensile strength did not decrease after tensile test.

We designed three heat treatment conditions to emphasis the importance of tempering process by compared with the row material. Three heat treatment conditions including (1) quenching, (2) quenching and tempering and (3) normalizing. We induction heated the key-hole position to 950°C and inspect heating temperature around the key hole by infrared thermometer. We inspect hardness and fracture type of specimens after tensile test.

The result showed that, the tensile strength of the steel shaft with a key-hole did not decrease because of the formation hardened and stress distribution made from machinery. Some unexpected fracture position in hardened quenched specimens although the tensile strength could be increased. 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.

Keywords: steel, key-hole, tensile strength, induction heating.

* e-mail: peter@mail.lit.edu.tw

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，故本文除了探討軸件上鑽孔後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，讓同學深刻了解淬火後回火的重要性。[3-4]

2 實驗原理

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°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°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

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，未鑽孔試片

之第一碼編號為 0，鑽以 5 mm 直徑貫穿孔之試片第一碼編號為 5，鑽以 6 mm 直徑貫穿孔之試片第一碼編號為 6，依此類推。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。

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。

未施以熱處理之原材試片之第二碼編號為 1，施以水淬之試片之第二碼編號為 2，施以水淬及回火之試片之第二碼編號為 3，施以正常化熱處理之試片之第二碼編號為 4。

熱處理之試片係在試片之銷孔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，足以涵蓋銷孔範圍，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。實驗後輔以試片之洛氏硬度 HRC 測試，並以光學顯微鏡觀測破斷面型態。

4 結果與討論

4.1 拉伸實驗結果

根據規範顯示[7]，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%。

表一為各種試片之抗拉強度試驗結果統計，第一碼編號為(0)的無貫穿孔之試片結果顯示，0-1 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。

圖三為各種試片之抗拉強度變化情形，從圖中之實心方塊可看出無貫穿孔之試片經過其他三種熱處理後的抗拉強度變化情形。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。

圖四之拉伸曲線為 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(0-1)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。

由圖四之右圖中可看出脆性材料(0-2)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。從圖五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，萬一其中已有內在缺陷，反而是危險的設計。

4.2 銷孔的破裂形態

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，從表一中之(1)無熱處理之試驗數據以及圖三中之未熱處理試片試驗結果可看出，在具有銷孔的試片當中，其最小斷面積雖依比例而減少，但經過拉伸試驗後發現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孔形應力分佈所致。

4.3 不同熱處理的影響

具有銷孔之試片若經過不同熱處理，從圖三之抗拉強度變化情形可看出，具有各種不同直徑銷孔的試片大致與沒有銷孔之試片有相同的趨勢。

若是僅施以淬火的試片，其抗拉強度不僅下降，而且從圖六中間照片之破斷特徵亦可看出，此種試片之斷裂面平整，幾乎沒有變形即斷裂，甚至多在銷孔以外的位置斷裂，理論上而言，銷孔處之位置截面積最小，當試片承受靜態之拉應力時，應該在銷孔處斷裂比較合理，本文之拉伸試片多在銷孔以外的位置斷裂，可見高週波之快速加熱在工件中累積極大的內應力，其硬脆組織或是內潛缺陷造成的非預期斷裂甚為嚴重。[10-16]

從抗拉強度而言，若是此種僅施以高週波淬火熱處理之軸件，雖可獲得硬脆之組織，其銷孔周圍之表面硬度經測試大約在 HRC45 至 HRC50 之間，但其抗拉強度將會下降至原材之半以下，且斷裂位置常在組織變化之交界處而不一定斷在銷孔處。

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。

圖七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，其斷面之巨觀可觀察到較為粗糙之組織；若是脆性破壞之斷裂面則呈平整，巨觀組織較為細緻。在顯微組織中，延韌性破壞裂縫呈穿晶型態，而脆性破壞裂縫則呈沿晶型態，將來可由電子顯微鏡加以觀測。[17-18]

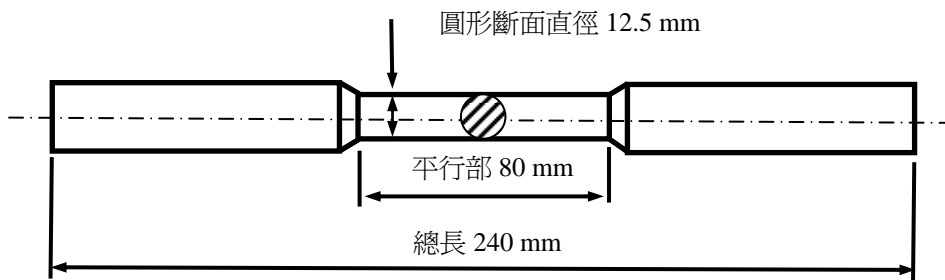
5 結論

1. 本文之具有銷孔之中碳鋼軸件，其最小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孔形應力分佈所致。
2. 本文之具有銷孔之中碳鋼軸件，若僅施以高週波淬火熱處理，雖獲得硬脆之組織，但其抗拉強度下降至原材之一半以下，且多不在銷孔處斷裂，讓同學深刻了解淬火後回火的重要性。
3. 本文之具有銷孔之中碳鋼軸件，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。

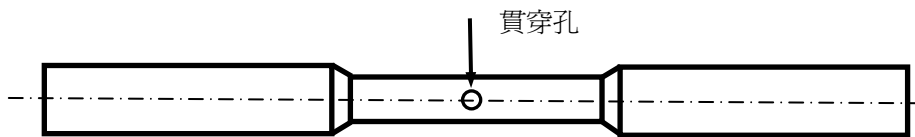
6 參考文獻

- [1] Donald R. Askeland and Pradeep P. Phule, *Essentials of Materials and Engineering*, Thomson, 2004.
- [2] 陳永傳等人，超高频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.

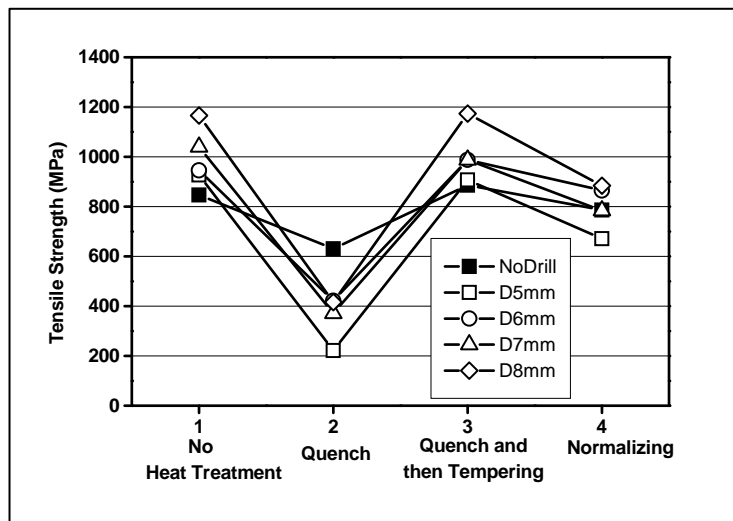
- [14] J.U. Mohring etc., Numerical and experimental investigation into transverse flux induction heating, 1997.
- [15] T. M. Sorokina etc., Influence of high-temperature induction heat treatment on the properties of the metal, Metal Science and Heat Treatment, 1988.
- [16] G. A. Berlin etc., Structure 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.



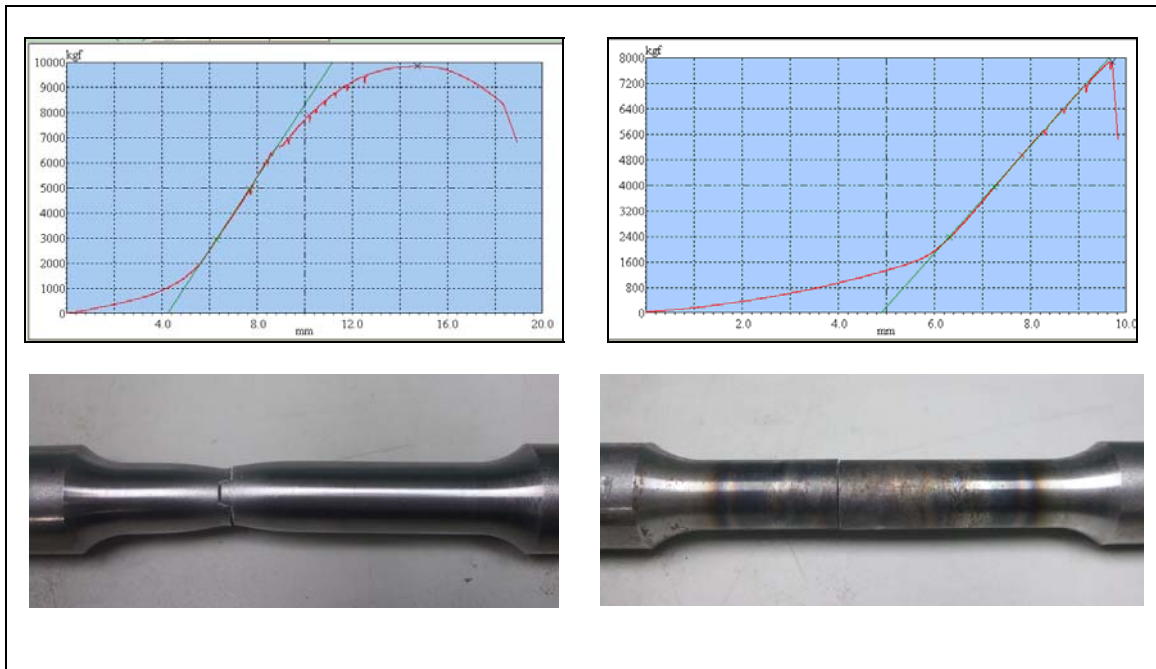
圖一 標準拉伸試片示意圖



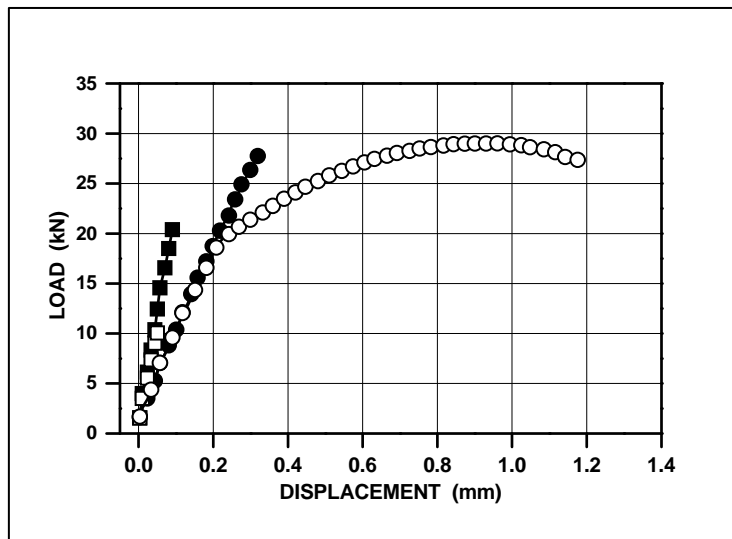
圖二 試片上鑽製銷孔之示意圖



圖三 各種試片之抗拉強度變化情形



圖四 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 0-1 無貫穿孔原材，右圖為 0-2 無貫穿孔高週波加熱後淬火。



圖五 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

試片編號	(A) 無貫穿孔	最大荷重 (N)	截面面積 (mm ²)	抗拉強度 (MPa)	伸長率 (%)	斷面縮率 (%)
0-1	原材	103986	122.72	847	12.6	39
0-2	高週波加熱後淬火	77396	122.72	631	0.2	2
0-3	高週波加熱後淬火及回火	108791	122.72	886	9.8	35
0-4	高週波加熱後正常化	96480	122.72	786	16.6	46

試片編號	(B) 無熱處理	最大荷重 (N)	截面面積 (mm ²)	抗拉強度 (MPa)	伸長率 (%)
0-1	原材	103986	122.72	847	12.6
5-1	原材 5 mm 貫穿孔	55850	60.22	927	約 16
6-1	原材 6 mm 貫穿孔	45998	47.72	964	
7-1	原材 7 mm 貫穿孔	36641	35.22	1040	
8-1	原材 8 mm 貫穿孔	26485	22.72	1166	

試片編號	(C) 高週波加熱後僅淬火	最大荷重 (N)	截面面積 (mm ²)	抗拉強度 (MPa)	伸長率 (%)
0-2	無貫穿孔	77396	122.72	631	
5-2	5 mm 貫穿孔	13340	60.22	222	φ
6-2	6 mm 貫穿孔	20155	47.72	422	φ
7-2	7 mm 貫穿孔	13076	35.22	371	φ
8-2	8 mm 貫穿孔	9441	22.72	416	φ

試片編號	(D) 高週波加熱後淬火回火	最大荷重 (N)	截面面積 (mm ²)	抗拉強度 (MPa)	伸長率 (%)
0-3	無貫穿孔	108791	122.72	886	9.8
5-3	5 mm 貫穿孔	54593	60.22	907	約 12
6-3	6 mm 貫穿孔	44557	47.72	934	
7-3	7 mm 貫穿孔	34794	35.22	988	
8-3	8 mm 貫穿孔	26678	22.72	1174	

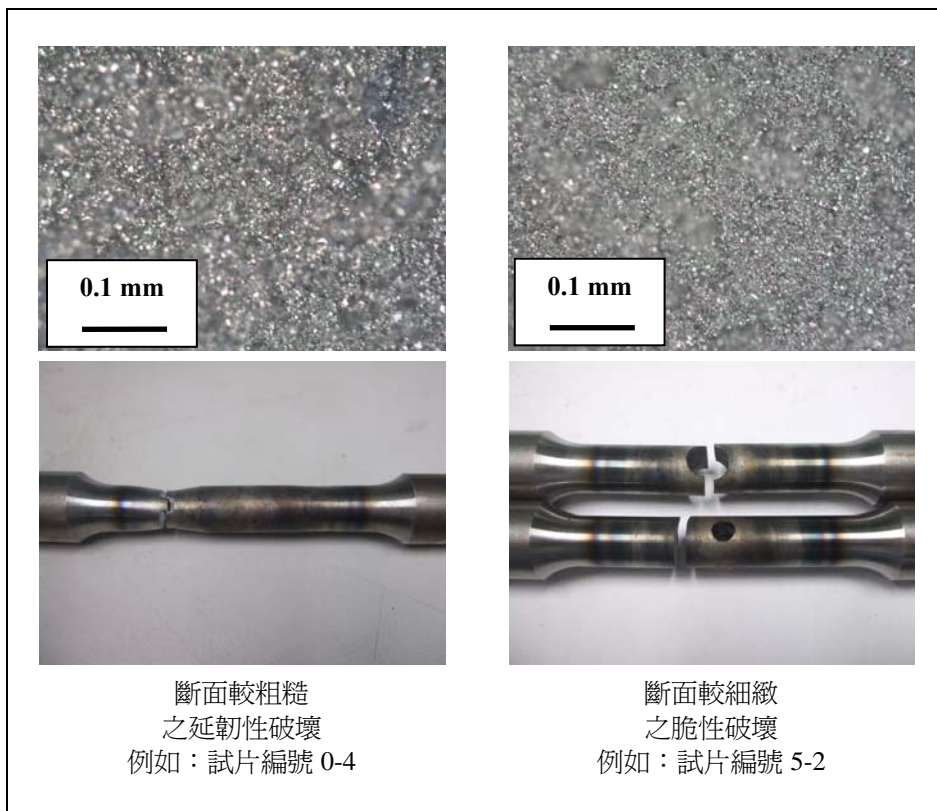
試片編號	(E) 高週波加熱後正常化	最大荷重 (N)	截面面積 (mm ²)	抗拉強度 (MPa)	伸長率 (%)
0-4	無貫穿孔	96480	122.72	786	約 16
5-4	5 mm 貫穿孔	40396	60.22	671	
6-4	6 mm 貫穿孔	41268	47.72	865	
7-4	7 mm 貫穿孔	27600	35.22	784	
8-4	8 mm 貫穿孔	20078	22.72	884	

表一 各種試片之抗拉強度試驗結果

- (A)無貫穿孔
- (B)無熱處理
- (C)高週波加熱後僅淬火
- (D)高週波加熱後淬火及回火
- (E)高週波加熱後正常化



圖六 不同熱處理之具有銷孔之試片在拉伸試驗後之破斷特徵



圖七 延韌性破壞及脆性破壞之破斷面巨觀特徵比較