

中碳合金鋼之雷射表面硬化處理

Laser Surface Hardening of Medium Carbon Alloy Steels

李政鴻 黃聖芳

中華技術學院 機電光工程研究所

Cheng-Hong Li, Sheng-Fang Huang

Graduate Institute of Electro-Mechanical-Optics Engineering, China Institute of Technology

摘要

本研究旨在探討三種中碳合金鋼包括 AISI 1045 中碳鋼、AISI 4140 鉻鉬鋼以及 AISI 4340 鎳鉻鉬鋼，以連續式二氧化碳雷射進行表面硬化處理所得之效果；研究方法為將三種鋼材分別製作成圓截面之圓棒，並以原有之熱軋延狀態以及經調質熱處理後，分別再利用雷射進行表面硬化處理。雷射參數為：連續式二氧化碳雷射，雷射功率 1000 W，配合三種雷射走速（5、7.5 及 10 mm/sec），於試桿圓周表面以等間隔方式（45°）沿軸向掃描八道。將雷射處理後之試桿分別進行金相顯微組織觀察、硬化深度及微硬度量測。研究結果顯示：鋼材不論是熱軋延狀態或調質熱處理後，經雷射處理所得之表面硬化層，其顯微組織均為麻田散鐵組織，微硬度值呈大幅的提升至 Hv 700 以上，但提升的幅度隨雷射走速增加而降低。所得之硬化層深度最大可達 1.88 mm。

關鍵詞：中碳鋼、雷射、表面硬化、熱處理。

Abstract

The effects of laser surface hardening for three medium carbon steels including AISI 1045, AISI 4140 and AISI 4340 have been studied. The laser surface hardening was carried out with continuous CO₂ laser beam which scanned eight times as axial direction on the circular cross-sections of these three steels surface. The parameters of laser hardening included power of 1000 W, and three scanning rate of 5mm/sec, 7.5mm/sec and 10mm/sec respectively. Two types of heat treatment, either hot rolling or quenched and followed by high temperature tempered were performed prior to laser

hardening. The microstructure, surface hardness and hardened depth the specimens were investigated. It was found that either hot rolling or quenched and followed by tempered, the microstructure of laser hardening layers were Martensite. The hardness value of the laser hardened layers promoted substantially to above Hv 700. But the range of promotion decreased as the laser scanning rate increased. The depth of hardened layer attained to 1.88 mm.

Keywords: medium carbon steels, Laser, Surface hardening, Heat treatment.

1. 前言

由於雷射具有能量集中、能量密度高及總輸入熱量少等特性，因此可達到加工之受熱時間短、熱變形量少、容易控制並限定被處理位置、以及可得到較細的組織等優點，使得雷射廣泛運用於材料的表面熱處理⁽¹⁻³⁾。

雷射表面硬化處理乃是利用高能量密度的雷射光束為熱源，照射在具有一定碳含量的鋼材表面時，瞬間加熱鋼材表面層，使快速達到沃斯田鐵化溫度，再利用鋼材自身的傳導冷卻作用，產生淬火效應，稱為傳導淬火或自淬火，使得沃斯田鐵變態為麻田散鐵，而達到表面變態硬化之目的^(2,3)。

在過去利用雷射進行鋼材表面硬化的研究，較多是針對中碳鋼，例如 Visscher 利用雷射對 AISI 1045 鋼進行表面硬化處理，獲得有效的硬化效果，並提升其表面耐磨性能⁽⁴⁾；Shiue 亦利用雷射對 AISI 1045 鋼進行表面硬化處理，並探討中碳鋼經雷射處理後之組織結構的變化情形⁽⁵⁾；Riabkina 等人則探討了 AISI

1045 鋼經雷射處理後，其硬化層與熱影響區之組織結構與微硬度的變化情形⁽⁶⁾。而 AISI 4140 鋼表面硬化相關的研究，多偏向於利用感應硬化方式^(7,8)，而較少利用雷射。Tsay 等人曾利用雷射對 AISI 4140 鋼進行表面硬化處理，但研究重點則放在氫脆的敏感性問題⁽⁹⁾。針對 AISI 4340 鋼表面硬化處理之相關研究有部分探討電子束對 AISI 4340 鋼疲勞裂縫延伸速率，或是磨耗特性與接觸疲勞現象的影響⁽¹⁰⁾，雖然有相同方式以雷射對 AISI 4340 鋼淬火來取代傳統的水淬⁽¹¹⁾，但是並未對以進行調質熱處理的鋼材進行比較。

由於中碳合金鋼具有良好的強度、韌性及硬度等機械性質，且不易發生淬裂，也無回火淬性，熱處理效果良好，為結構用合金鋼中之使用極為廣泛之鋼材，適合作為曲軸、連桿或齒輪等重要零件的材料^(12,13)。此類鋼材若經由適當的熱處理將有更優良之機械性能表現，又當工具鋼製作成心部需具有較佳強度與韌性，而表面有較高之強度與硬度之零件時，雷射表面熱處理是很適合之處理方式⁽¹⁴⁾，因此，本研究以 AISI 1045、AISI 4140 和 AISI 4340 三種鋼材進行雷射表面硬化處理，希望獲得一心部具有足夠的強度與韌性而表層具有較高的強度與硬度的材料結構，並探討不同雷射參數對三種鋼材的表面硬化層微結構、硬化深度以及微硬度值之影響效果。

2. 材料與實驗方法

2.1 實驗材料

本實驗所使用的鋼材共有三種，分別為 AISI 1045 中碳鋼、AISI 4140 鉻鉬鋼和 AISI 4340 鎳鉻鉬鋼。此三種鋼的含碳量都介於 0.25~0.6wt% 之間，所以都屬於中碳鋼。其合金元素含量列於第 1 表。本鋼材其原狀態為熱軋處理之圓棒。

2.2 試片製作與熱處理

將三種鋼材圓棒製作成中間段為直徑 12.5 mm、桿距長度 (gauge length) 50 mm 之圓斷面試棒。並分為兩組：一組為原來之熱軋狀態，一組則施以調質熱處理，淬火溫度 850°C，持溫 15 分鐘，AISI 1045 中碳鋼水淬至常溫，AISI 4140 鉻鉬鋼和 AISI 4340 鎳鉻鉬鋼則油淬至常溫，三者都再加熱至回火溫度 600°C，持溫 30 分鐘後，以急空方式冷卻至常溫。

2.3 雷射表面處理

雷射表面處理使用 Rofin-Sinar 820-1500W CO₂ 雷射機，產生的雷射光束為呈高斯分佈之雷射光 raw beam，直徑約 9 mm，但能量較集中的區域為圓心中央 4 mm 的範圍。雷射光於試棒表面沿軸向依次掃描八道，八道呈等分圓周方式，每道間隔 45°，雷射功率為 1000W，掃描速度分別為 5mm/sec、7.5mm/sec 以及 10mm/sec 三種，每道雷射間隔時間 15 分鐘，使試棒有足夠的時間以空冷方式冷卻至常溫。

2.4 金相觀察與硬度量測

切取試棒橫截面，加以研磨與拋光，利用 5 vol.%HNO₃ 之 Nital 硝酸酒精溶液腐蝕，以光學顯微鏡觀察母材及硬化層之顯微組織，並量測硬化層深度。再以 Vickers 硬度試驗機 (Shimadza H MV-2)，量測母材及硬化層之硬度值。

3. 結果與討論

3.1 金相顯微組織分析

圖 1 為 AISI 1045 中碳鋼、AISI 4140 鉻鉬鋼及 AISI 4340 鎳鉻鉬鋼經熱軋狀態之金相顯微組織，(a) 圖中呈黑白相間之層狀結構為波來鐵組織，白色部分為肥粒鐵組織，由於 AISI 1045 鋼經熱軋狀態後直接在空氣冷卻，產生連續冷卻變態 (Continuous Cooling Transformations)，於接近共析點的溫度發生沃斯田鐵變態，產生粗波來鐵的組織，同時也有初析的肥粒鐵組織。(b) 圖及 (c) 中 AISI 4140 鋼與 AISI 4340 鋼的波來鐵組織呈現較細的層狀結構，雖然三種鋼材之含碳量相近，但因 AISI 4140 鋼還添加了鉻和鉬；AISI 4340 鋼添加了鎳、鉻及鉬等合金元素，故呈現出波來鐵含量較多且層狀較微細，而肥粒鐵的量較少。由於肥粒鐵和雪明碳鐵組織的層狀結構越細，將使得鋼材整體的強度與硬度會越高。⁽¹⁵⁾。

圖 2 為三種鋼材經淬火回火調質熱處理後之金相顯微組織，原來熱軋狀態時的波來鐵組織已變態成為回火麻田散鐵組織，而初析的肥粒鐵組織依然存在。因 AISI 4140 鋼與 AISI 4340 鋼之合金元素含量相似，都添加的鉻與鉬，所以兩種鋼所呈現的回火麻田散鐵組織較相似，而 AISI 4340 鋼中還多添加了 1.80

wt.%的鎳，鎳是一種會使沃斯田鐵穩定的合金元素，而鎳與鉻兩種合金元素一起添加，對鋼的韌性及耐磨性有加成效果⁽¹⁶⁾。合金元素的添加會增加碳化物的穩定性，延緩變成雪明碳鐵的時間，因此在回火處理後，雪明碳鐵的粗化將會被抵制，回火處理期間的軟化現象較為緩和，而某些元素會形成碳化物，進而取代雪明碳鐵，形成析出硬化⁽¹⁷⁾。

圖3為三種鋼材之熱軋延狀態經雷射表面硬化處理所得硬化層的金相顯微組織，由於鋼材表面受到雷射加熱到高溫，瞬間達到沃斯田鐵化溫度後，當雷射停止時，受到鋼材自身冷卻之自淬作用，所以立即變態為麻田散鐵組織。從圖中可觀察到三種鋼材的顯微組織均呈現葉片狀或羽毛狀的麻田散鐵組織。此乃鋼材中所含之碳原子，當鋼材升溫至沃斯田鐵化溫度後急冷時，碳原子來不及擴散以形成雪明碳鐵，因而得到一種過飽和狀態的體心正方（BCT）晶格，其顯微組織呈葉片狀或羽毛狀的不規則排列，即為麻田散鐵組織。麻田散鐵組織的長方形程度隨著鋼材的含碳量而改變，葉片狀或羽毛狀的麻田散鐵組織特徵是其內部具有 $1 \times 10^{15}/\text{m}$ 到 $1 \times 10^{16}/\text{m}$ 的高密度差排⁽¹²⁾。

圖4為三種鋼材經調質熱處理後再施以雷射表面硬化處理所得之硬化層金相顯微組織，仍然呈現葉片狀或羽毛狀的麻田散鐵組織。由此可知，對AISI 1045、AISI 4140及AISI 4340三種不同的鋼材而言，不論其原有組織為熱軋延狀態抑或調質熱處理狀態，當施以雷射表面硬化處理之後，都會變態成為麻田散鐵組織。

3.2 微硬度分析

AISI 1045 中碳鋼、AISI 4140 鉻鉬鋼及 AISI 4340 鎳鉻鉬鋼三種鋼在退火狀態下之微硬度約為 Hv 200-230⁽¹²⁾，在熱軋延狀態之微硬度平均值：AISI 1045 中碳鋼約為 Hv 295，AISI 4140 鉻鉬鋼約為 Hv 327，AISI 4340 鎳鉻鉬鋼約為 Hv 365。經調質熱處理後微硬度平均值提高到：1045 中碳鋼 Hv 316，AISI 4140 鉻鉬鋼 Hv 396，AISI 4340 鎳鉻鉬鋼 Hv 441。微硬度值提升 1.07-1.21 倍。一般而言，此類型的鋼材經調質熱處理後微硬度約為 Hv 300~360⁽¹²⁾，所以 AISI 1045 鋼在此範圍內，而 AISI 4140 鋼與 AISI 4340 鋼經調質

熱處理後微硬度值顯得比此範圍稍高一點，應屬原有的熱軋延狀態處理所產生的硬化效果仍存在之故。

圖5為三種鋼材經雷射表面處理所得之硬化層微硬度比較圖。其中(a)圖 AISI 1045 鋼於熱軋延狀態經雷射表面硬化處理後，其硬化層微硬度值增高為 Hv 712~741。若先經調質熱處理，再施以雷射表面硬化處理，則硬化層微硬度值為 Hv 702~755，無論熱軋延狀態或經調質熱處理，都以雷射掃描速度 10 mm/sec 時，可獲得最大的微硬度值，顯示此雷射處理參數可以對 AISI 1045 鋼產生較佳的表面硬化效果。(b)圖 AISI 4140 鋼於熱軋延狀態經雷射處理後，其硬化層微硬度值增高為 Hv 742~771，若先經調質熱處理，再施以雷射表面硬化處理，則硬化層微硬度值達 Hv 666~801，無論熱軋延狀態或經調質熱處理，都以雷射掃描速度 7.5 mm/sec 時，可獲得最大的微硬度值。而(c)圖 AISI 4340 鋼熱軋延狀態經雷射處理後，其硬化層微硬度值增高為 Hv 790~833，以雷射掃描速度 7.5mm/sec 時，獲得最大的微硬度值 Hv 833。若先經調質熱處理，再施以雷射表面硬化處理，則硬化層微硬度值達 Hv 738~759，以雷射掃描速度 5mm/sec 時，獲得最大的微硬度值 Hv 759。因 AISI 4140 鋼與 AISI 4340 鋼之合金含量相似，所以當雷射掃描速度較快時，使得單位時間雷射所提供的加熱能量較少，而造成鋼材表面所獲得的加熱效果較差，導致麻田散鐵組織變態較不完全，最後造成硬化層的硬度值稍低一些。儘管如此，雷射表面硬化處理對三種鋼材的表面硬度，不論是原有的熱軋延狀態或是調質熱處理狀態，均有大幅的提升作用。此乃由於鋼材中有足夠的碳含量，可藉由淬火形成麻田散鐵組織，又 AISI 4140 鋼及 AISI 4340 鋼含有鎳、鉻及鉬等提高硬化能的合金元素，經雷射處理時，更容易獲得麻田散鐵組織形成硬化層，進而可以使鋼材的硬度大幅提升。

3.3 硬化深度分析

圖6為三種鋼材沿著表面硬化層的對稱中心線，自表面向內做微硬度量測所得的硬度值曲線。微硬度曲線大致可分成四個部份：1.AB 段稱為完全硬化區(Completely hardened Zone)，此區域之鋼材經過完全沃斯田鐵化後，經由自淬而形成麻田散鐵組織。

2.BC 段稱為過渡區(Transition Zone)。此區域乃由於溫度及時間之配合不足以使鋼材進行完全沃斯田鐵化，故經過傳導淬火後無法全部形成麻田散鐵，所以其硬度值比 AB 段為低。3.CD 段稱為過度回火區(Over Tempered Zone)，又可稱為熱影響區。此區域形成原因乃為整個升溫過程中，最高溫度未達到 A_{c1} 而造成了母材過度回火，因此其硬度已下降到接近母材。4.D 點以後的區域，不受到雷射表面硬化處理過程影響，即為母材(Base Metal)。

圖 7 為三種鋼材經雷射處理所得不同雷射走速之硬化深度圖，(a)圖之 AISI 1045 鋼隨著雷射掃描速度的增加，作用在 AISI 1045 鋼表面的熱量減少，因而表面沃斯田鐵化的深度亦相對減少，進而使得硬化層深度同樣減少。至於 AISI 1045 鋼有無先進行調質熱處理，所得硬化層均頗為相近，顯示 AISI 1045 鋼在熱軋延狀態與調質熱處理狀態，對雷射的吸收與熱量的傳導，並無明顯差異。(b)圖 AISI 4140 鋼在調質熱處理狀態，雷射掃描速度為 5mm/sec 時，獲得最大的硬化層深度 1.65mm，當雷射掃描速度為 10mm/sec 時，硬化深度僅為 0.96mm。(c)圖 AISI 4340 鋼與 AISI 4140 鋼硬化深度相似，在調質熱處理狀態，雷射掃描速度為 5mm/sec 時，獲得最大的硬化層深度 1.88mm，當雷射掃描速度為 10mm/sec 時，硬化深度僅為 1.21mm。其原因為隨著雷射掃描速度的增加，單位時間內作用在 AISI 4140 鋼與 AISI 4340 鋼表面的熱量減少，使得表面沃斯田鐵化的深度亦相對減少，因此造成硬化層深度隨之減少。而 AISI 4340 鋼熱軋延狀態所得之硬化深度比調質熱處理為低，原因為鋼材中添加了鎳、鉻及鉬等提高硬化能之合金元素，所以改良鋼材的硬化能，使鋼材容易被淬火硬化，回火軟化的抵抗性高。上述結果顯示 AISI 4140 鋼及 AISI 4340 鋼經調質熱處理後，比原有熱軋延狀態對雷射的吸收與熱量的傳導有較佳的效果，因而所獲得的硬化層深度較大，且硬度值較高。

4. 結論

本研究獲得之結論：AISI 1045 中碳鋼、AISI 4140 鉻鉬鋼及 AISI 4340 鎳鉻鉬鋼，不論是原有熱軋延狀態或是調質熱處理狀態，經雷射表面硬化處理所得之表面硬化層均呈麻田散鐵組織。硬化層之微硬度值均

有大幅的提升，硬化層與母材微硬度之比值平均達 2.21 倍。雷射表面硬化層深度：AISI 1045 中碳鋼為 0.85-1.45 mm；AISI 4140 鉻鉬鋼為 0.96-1.65 mm；AISI 4340 鎳鉻鉬鋼為 0.91-1.88 mm。

參考文獻

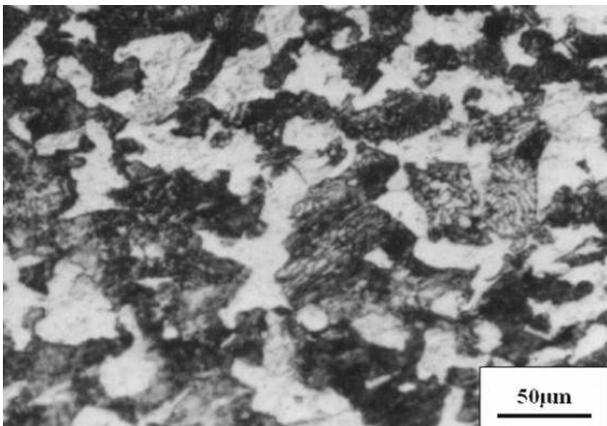
1. G. H. Harth, W. C. lesile, V. G. Gregson and B. A. Sanders, "Laser Heat Treating of Steels", *Journal of Metals*, Vol. 28, n4 Apr., 5-11 (1976).
2. M. F. Ashby and K. E. Easterling, "The Transformation Hardening of Steel Surface By Laser Beams", *Acta Metallurgy*, Vol. 32, n11, pp. 1935-1948 (1984).
3. S. Kou, D. K. Sun and Y. P. Le, "A Fundamental Study of Laser Transactions Hardening", *Metallurgical Transactions A*, Vol. 14A, Apr., pp. 643-653 (1983).
4. H. Visscher, "Influence of Laser Line Hardening of Carbon Steel AISI 52100", *Wear*, Vol. 181, n2 Mar., pp. 638-647(1995).
5. R. K. Shiue, "Microstructure Observation of the Laser-Hardened 1045 Steel", *Scripta Metallurgica et Materialia*, Vol. 25, n8, Aug, pp. 1889-1894 (1991).
6. M. Riabkina and J. Zahavi, "Structure and Microhardness of Laser-Hardened 1045 Steel", *Journal of Materials Science*, Vol. 23, n5, May., pp. 1547-1552 (1998).
7. K. Pantleon, O. Kessler, F. Hoffann, and P. Mayr, "Induction surface hardening of hard coated steels", *Surface and Coatings Technology*, Vol. 120-121, pp. 495-501 (1999).
8. Y. Totil, R Sadeler, H Altun, and M. Gavali, "The effects of induction hardening on wear properties of AISI 4140 steel in dry sliding conditions", *Materials and Design*, Vol. 24, pp. 25-30 (2003).
9. L. W. Tsay, Z. w. Lin, R. K. Shiue, and C. Chen, "Hydrogen embrittlement susceptibility of laser-hardened 4140 steel", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 290, pp. 46-54 (2000).
10. 彭戡平，不同比率高溫回火麻田散鐵及下變韌鐵對 AISI 4340 合金鋼疲勞性質與破裂韌性之研究，

國立中央大學機械工程研究所碩士論文(1988)。

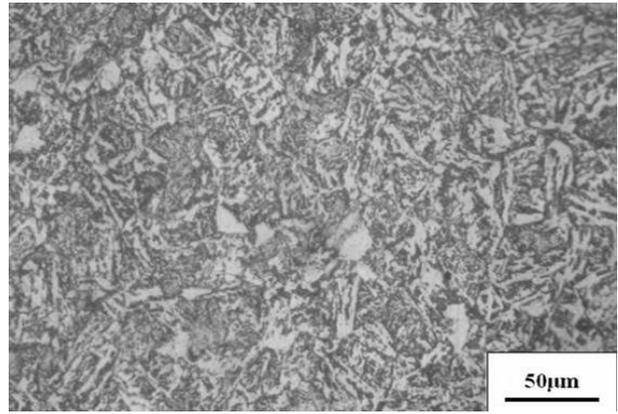
11. Liu Qingbin, Liu Hong, " Experimental Study of Laser Quenching of 40CrNiMoA Steel ", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 88,(1-3), 15 Apr., pp. 77-82(1999).
12. 黃振賢，金屬熱處理，文京圖書公司(1989)。
13. 李正國、李志偉、林本源、邱錫榮、陳文嘉、溫炯亮、傅豪、蔡履文，熱處理，高立圖書公司(1991)。
14. 楊義雄，熱處理導論-應用篇，全華科技圖書公司(1994)。
15. C. D. Lundin, K. K. Khan, D. Yang, "WRC Bull 405" (1995).
16. S. J. Sanderson, " ASM International Conference on Ferritic Steel for High Temperature Applications" (1981).
17. 呂浩，機械材料，鼎茂圖書公司(1997)。

Table 1 Composition list of the SNCM 4340 steel.

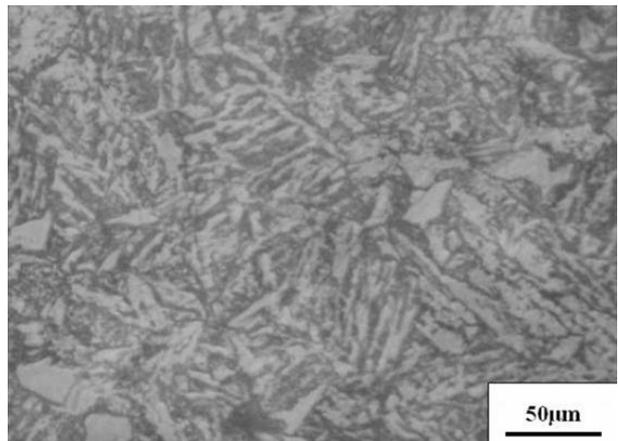
Elements Steels	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	Fe
AISI 1045	0.43	0.35	0.60	—	—	—	Bal.
AISI 4140	0.40	—	0.9	0.30	0.95	0.2	Bal.
AISI 4340	0.40	0.25	1.30	1.80	0.80	0.23	Bal.



(a)

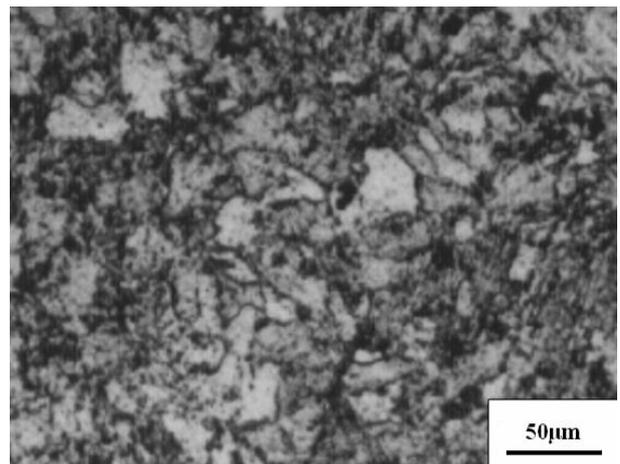


(b)

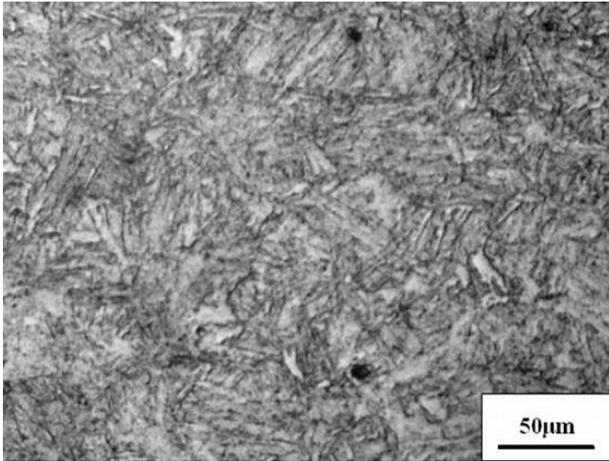


(c)

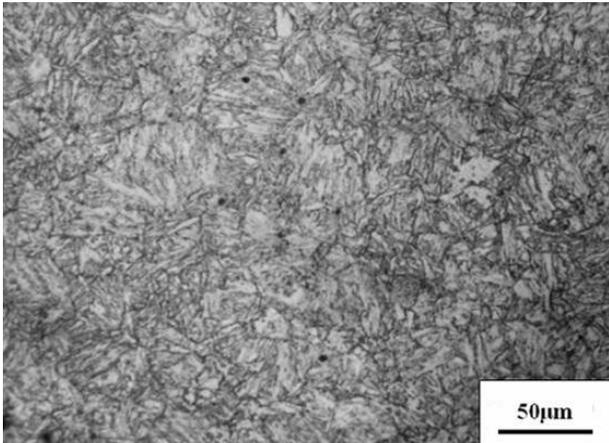
圖 1 (a)AISI 1045 中碳鋼、(b) AISI 4140 鉻鎢鋼及(c) AISI4340 鎳鉻鎢鋼熱軋延狀態之顯微組織



(a)

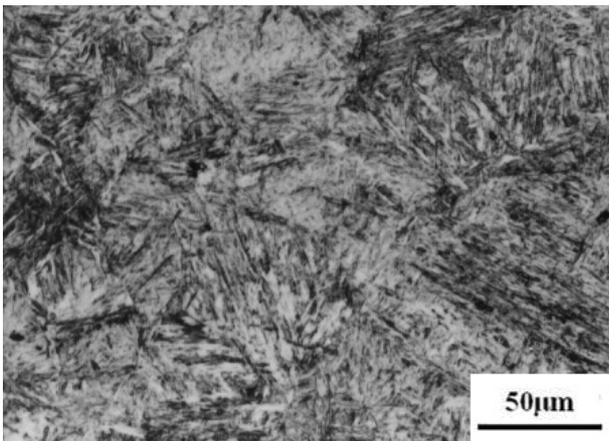


(b)

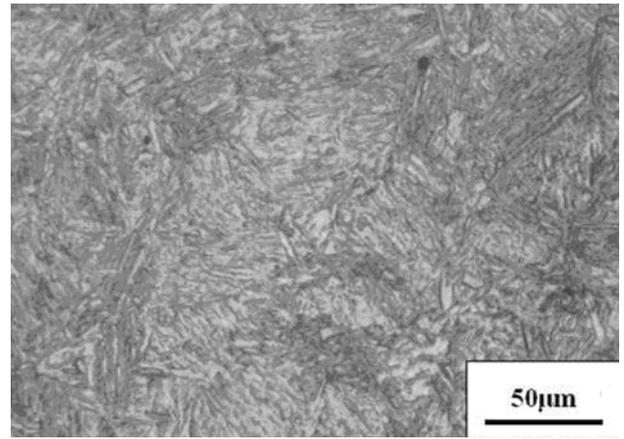


(c)

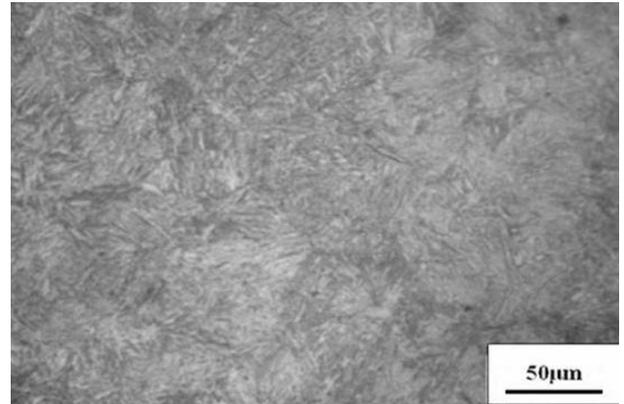
圖 2 (a) AISI 1045 中碳鋼、(b) AISI 4140 鉻鎢鋼及 (c) AISI 4340 鎳鉻鎢鋼經淬火回火調質熱處理之顯微組織



(a)

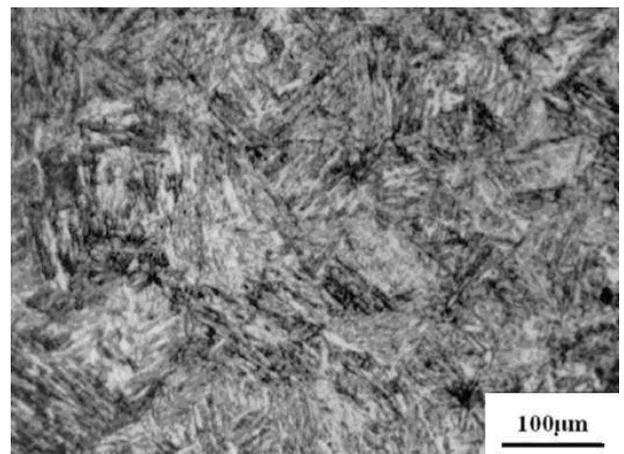


(b)

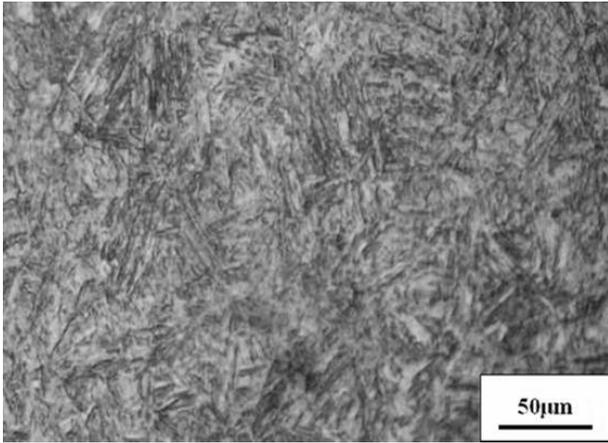


(c)

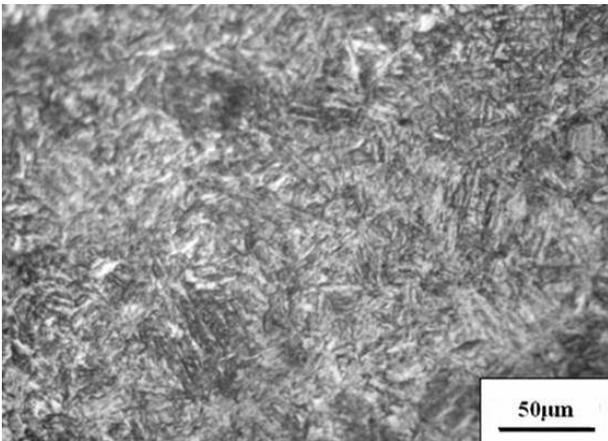
圖 3 (a) AISI 1045 中碳鋼、(b) AISI 4140 鉻鎢鋼及 (c) AISI 4340 鎳鉻鎢鋼熱軋延狀態經雷射表面處理之硬化層的顯微組織



(a)

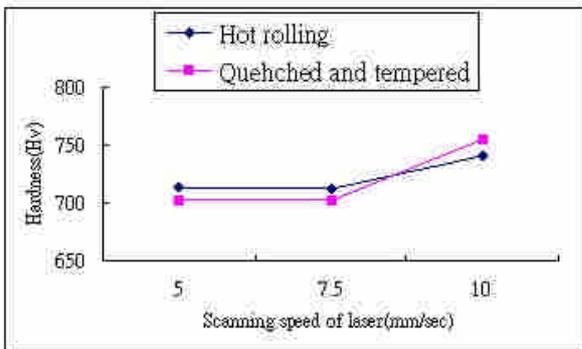


(b)

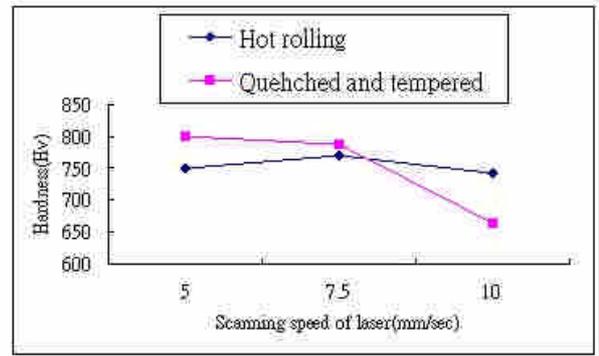


(c)

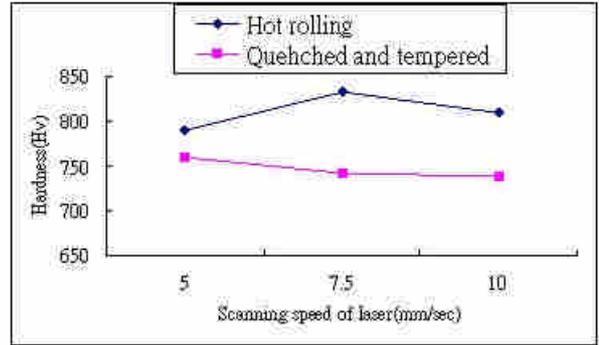
圖 4 (a)AISI 1045 中碳鋼、(b) AISI 4140 鉻鉬鋼及(c) AISI4340 鎳鉻鉬鋼調質處理再經雷射表面處理之硬化層的顯微組織



(a)

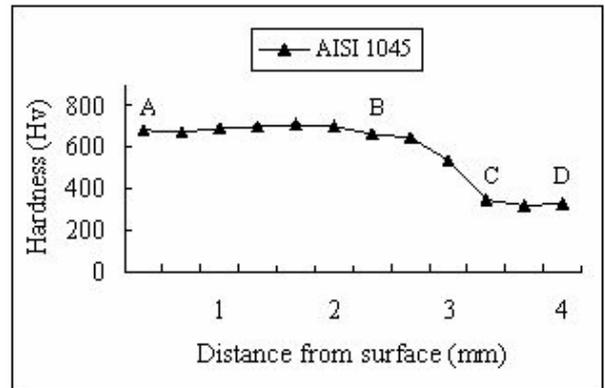


(b)

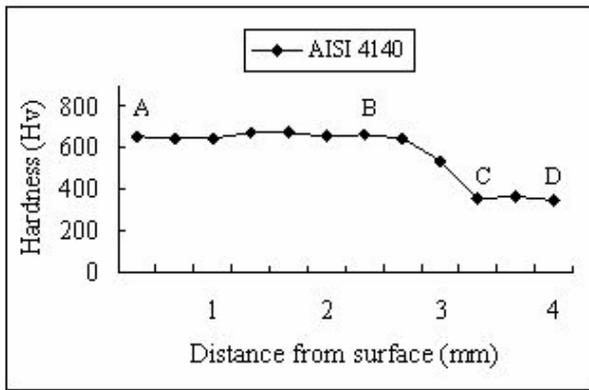


(c)

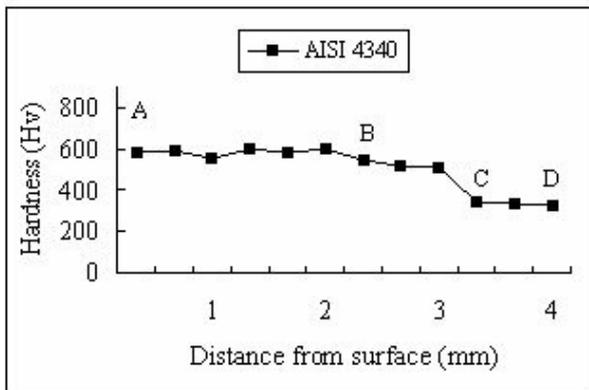
圖 5 三種鋼材經不同雷射走速所得之表面硬化層微硬度比較圖(a)AISI 1045 鋼、(b)AISI 4140 鋼及(c)AISI 4340 鋼



(a)

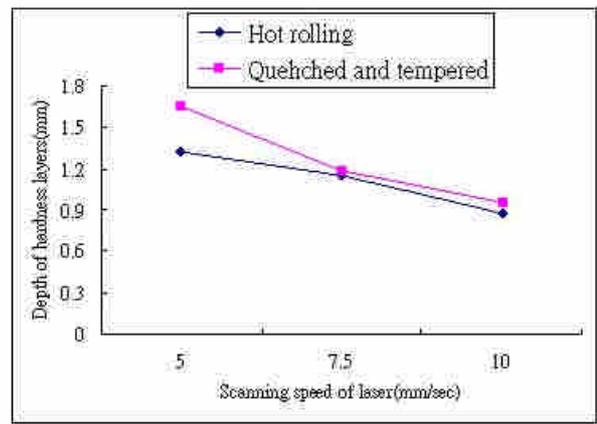


(b)

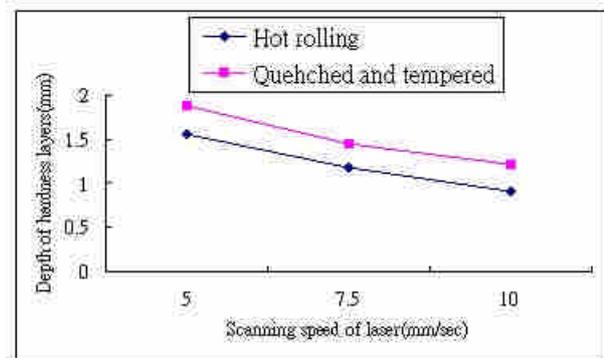


(c)

圖 6 三種鋼材之表面硬化層微硬度曲線圖，(a)AISI 1045、(b)AISI 4140 以及(c)AISI 4340

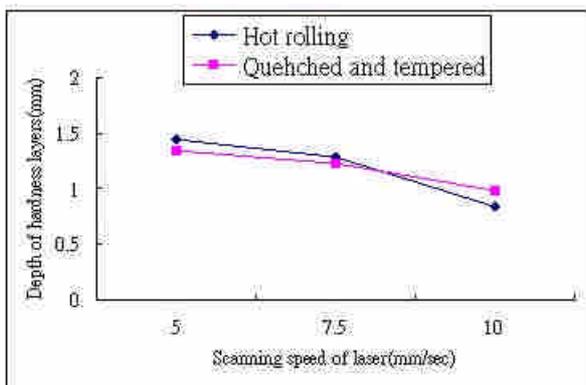


(b)



(c)

圖 7 三種鋼材經雷射處理所得之表面硬化層深度圖，(a)AISI 1045、(b)AISI 4140 以及(c)AISI 4340



(a)