

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

雷射表面改質處理之研究

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC91-2216-E-002-021-

執行期間：91年08月01日至92年07月31日

執行單位：國立臺灣大學機械工程學系暨研究所

計畫主持人：陳永傳

計畫參與人員：江國安、劉家銘、鄭佳祥

報告類型：精簡報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 92 年 9 月 19 日

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫 成果報告
 期中進度報告

雷射表面改質處理之研究

Study on Surface Modification by Laser

計畫類別： 個別型計畫 整合型計畫

計畫編號： NSC - 91 - 2216 - E-002 - 021

執行期間：91年8月1日至 92年7月31日

計畫主持人：陳永傳 台灣大學機械工程學研究所教授

共同主持人：

計畫參與人員：江國安等 台灣大學機械工程學研究所研究生

成果報告類型(依經費核定清單規定繳交)： 精簡報告 完整報告

本成果報告包括以下應繳交之附件：

赴國外出差或研習心得報告一份

赴大陸地區出差或研習心得報告一份

出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份

國際合作研究計畫國外研究報告書一份

處理方式：除產學合作研究計畫、提升產業技術及人才培育研究計畫、
列管計畫及下列情形者外，得立即公開查詢

涉及專利或其他智慧財產權， 一年 二年後可公開查詢

執行單位：台灣大學機械工程學研究所表面改質實驗室

中 華 民 國 92 年 9 月 18 日

雷射表面改質處理之研究

Study on Surface Modification by Laser

計畫編號：NSC-91-2216-E-002-021

執行期限：91 年 8 月 1 日至 92 年 7 月 31 日

主持人：陳永傳 台灣大學機械工程學研究所教授

計畫參與人員：江國安等 台灣大學機械工程學研究所研究生

摘要

本研究主要將 SK3、SK5、SK7 與 SKD61 鋼材施以雷射相變硬化處理後，對其硬化效果之評估與溫度場模擬分析，探討各種製程參數對於鋼材的表面硬度、金相組織、硬化層幾何型態的影響。實驗結果顯示，鋼材經雷射相變硬化處理後，硬化層的厚度會隨著雷射掃描速度的提升而降低，而隨雷射功率的增加而增加。經由溫度場的模擬分析得知，雷射熱處理時的加熱速度極快，保溫時間極短，故能發生相變硬化的臨界溫度較傳統的淬火溫度為高，且與雷射掃描速度及材料的顯微組織有密切的關係。隨著掃描速度的增加，臨界硬化溫度有提高的趨勢；而材料的組織愈微細，碳化物分佈愈均勻，則臨界硬化溫度愈低。綜合上述，以雷射束加熱與一般傳統熱處理比較，具有很強的優勢，如可局部加熱來控制硬化範圍，沒有污染，可精確控制加熱量，進而能對硬化層的組織結構、幾何型態與溫度場分佈進行有效的分析與預測。

關鍵詞：雷射相變硬化、臨界硬化溫度、溫度場

Abstract

The purpose of this study is to investigate the characteristics of laser transformation hardening. The relationships between laser processing parameters including laser power, scanning rate and laser beam diameter (defocus), and the properties of hardened layer including hardness distribution, geometrical features, microstructure and thermometric field were evaluated after laser treatment. The relationships between laser processing parameters and surface hardening quality of SK3, SK5, SK7 and SKD61 steels were revealed that the hardening depth will be increased either by increasing laser power or lowering laser scan rate. The critical hardening temperature of laser treatment is apparently higher than that of general heat treatment.

Key Words: laser transformation hardening, critical hardening temperature, thermometric field

1. 前言

自 1970 年雷射被成功發展以來，雷射加工技術已漸趨於成熟，很多成功應用的例子與專利陸續被開發，其研究方向亦趨於多元化，在科技先進國家，雷射也逐漸被應用在材料的表面硬化處理上[1-3]。以雷射束加熱容易控制加熱範圍，可作定點加熱，因此也適用於精密零件的局部表面硬化處理。實施雷射表面硬化處理還具有母材變形量小、處理時間短、硬化層組織微細、硬度均勻且可視需要作彈性調整等特點。本計畫主要研究 SK3、SK5、SK7 與 SKD61 各種鋼材經雷

射相變硬化處理後的硬化效果與其溫度場的模擬分析，同時探討各種製程參數對於其表面硬度、金相組織、硬化層幾何型態的影響。

2. 研究目的

以鋼料 SK3、SK5、SK7 與 SKD61 為試樣，施以各種條件之雷射表面硬化處理，由其硬度分佈及硬化深度，探討各製程參數對硬化效果的影響。本研究主要是朝兩個方向進行：

- (一) 硬化深度的預測：對於不同組織之鋼材，其在雷射相變硬化處理時產生硬化層的難易度可利用實驗修正後的數學函數來加以評估。藉由溫度場之計算，並配合淬火試片之實際硬化深度 (Z_C) 做為參考點，即可預測在不同組織下，經由雷射相變硬化處理所產生的硬化層厚度。
- (二) 探討鋼材之組織對硬化深度及硬度分佈之影響。原材之球化組織，由於其碳化物較粗大，因此需要較長時間與較高溫度才能充分溶入沃斯田鐵中。而淬火組織及淬火-回火組織的碳化物較為微細，較易溶入沃斯田鐵中，故其雷射相變硬化效果，與原材應有所不同。

3. 文獻探討

3.1 雷射相變硬化之原理

雷射相變硬化處理是利用雷射高能量密度的特性，將鋼料表面薄層迅速加熱至沃斯田鐵變態溫度以上，隨後藉由鋼料本身的導熱能力迅速將熱量帶走，使表層變態生成麻田散鐵，而達到表面硬化的目的[4、5]。因此與加熱速率有關的製程參數（如雷射功率、離焦距離、掃描速度..等）自然與硬化深度有密切的關係。此外鋼料的化學成分、顯微組織等冶金因素也會影響硬化層的厚度與硬度分佈。

3.2 溫度場的模擬（3D 移動熱源計算溫度場之數學處理方法）

對於高斯熱源，若移動速度（x 方向）足夠大，可將其視為有限寬度之直線熱源來處理，此時溫度場的分析解（Rykalin）如下：

$$T - T_0 = \frac{A \cdot q}{V \cdot 2f \cdot \lambda [t(t+t_0)]^{0.5}} \exp\left(-\frac{1}{4a} \left[\frac{z^2}{t} + \frac{y^2}{(t+t_0)}\right]\right) \quad (1)$$

此式在 $z=0$ 時，與 Rosenthal 提出分析解的計算結果相同，即試片受熱區中心處的表面溫度是無限大，為了修正這方面的問題，1984 年，Ashby 提出利用 Z 軸座標平移方式，導入一個 z_0 常數，將試片表面位置由 $z=0$ 降至 $z=-z_0$ ，其中 z_0 常數具有調整誤差功能，必須經由實驗來做修正。為使所算出的理論值與實驗值更為貼切，導入 1 個變數 κ ，使得 Y 軸方向的硬化寬度與理論值一致，其中 κ 具有調整誤差功能，必須經由實驗來做修正，如下式所示[6-9]：

$$T - T_{amb} = \frac{A P_f}{2f r v_j [t(t+t_0)]^{0.5}} \exp\left\{-\frac{1}{4a} \left[\frac{(z+z_0)^2}{t} + \frac{y^2}{(t+t_0)}\right]\right\} \quad (2)$$

若 z_0 、 κ 已知，可針對某一 Z 位置，解出到達尖峰溫度 ($T=T_P$) 所需時間 ($t=t_P$)。進而求出整個溫度場變化情形。

4.研究方法

實驗流程如圖 1 所示，就黑化處理與雷射相變硬化處理部分說明，分述如下：

4.1 黑化處理

當利用雷射進行表面處理時，影響硬化效果的因素之一是材料對雷射光束的吸收率。為了提高雷射光束的吸收率，工件在實施雷射表面相變硬化處理前，必須先經過表面黑化處理。本研究採用磷化法來實施黑化處理，將清洗過的工件置於磷酸錳 ($Mn(H_2PO_4)_2$) 為主的溶液中，在 $80^\circ C$ 浸漬 30 分而得到磷化膜，此磷化膜以 $Fe(H_2PO_4)_2$ 、 $Mn_3(H_2PO_4)_2$ 為主，表面呈深灰色的絨狀，對雷射光的吸收率可達 90% 以上。

4.2 雷射相變硬化處理

將黑化處理後的試片置於治具中再放入工作台內以進行雷射相變硬化處理，如圖 2 所示，利用雷射加工機上的程式控制，調整雷射頭至所需離焦位置，以便設定雷射光光束半徑。實驗時採用氮氣為遮護氣體。為避免不同試片因其黑化處理後，表面黑化層之厚度有所差異，因此同一系列實驗參數之比較均於同一試片上進行。

5.結果與討論

5.1 雷射加工參數對硬化層厚度的影響

以下便針對鋼材經雷射相變硬化處理後，雷射加工參數對硬化層厚度的影響，一般而言，以數百~數千瓦的雷射功率都能對鋼材進行相變硬化處理，而單位時間內硬化面積主要決定於雷射功率，如圖 3、4、5、6 分別為碳工具鋼 SK3、SK5、SK7 與模具鋼 SKD61 在 (A) 原材、(B) 淬火後、(C) 淬火回火後的組織下，功率與掃描速度對硬化層厚度的影響，當其他雷射加工參數不變時，雷射功率增加時，硬化深度也會跟著增加，但是硬化深度的增加有一極限，功率密度太高，材料表面溫度便會超過熔點而熔融。在相同功率與相同的光束半徑之下，掃描速度對硬化層厚度有較大的影響，掃描速度增快，硬化層厚度有下降的趨勢。

5.2 雷射能量密度與鋼材組織對硬化層厚度的影響

如圖 7 所示為不同鋼材組織下雷射光能量密度對硬化層厚度的影響，淬火後的組織下，提高能量密度，所得之硬化層厚度會跟著變大。尤其以 SK7 鋼材最為明顯。由於淬火後組織已有碳化物溶入基地中，再經雷射硬化處理，等於是二次硬化，加上淬火後組織較為均勻，碳化物較微細，經雷射硬化處理，硬化層厚度較大。

5.3 硬化層硬度分佈的影響

如圖 8-10 所示為 SK3、SK5、SK7 在不同組織下經由雷射相變硬化處理後，表層硬度分佈圖，淬火後及淬火-回火後的試片的有明顯的過渡區存在，(硬度值介於 HV500-600)，SK7 經由雷射相變硬化處理後，硬化層的厚度較小。且 SK7 原材經由雷射相變硬化處理後，硬度突降的趨勢不如 SK3、SK5 來的激烈。在淬火組織比較上，在硬化層的部分都有硬度微降的趨勢，以 SK3 較為明顯。在淬火回火組織的表現上也是如此。如圖 11 所示為模具鋼 SKD61 不同組織下的硬度分佈圖，影響模具鋼 SKD61 硬化的要素，主要取決於碳化物是否溶入基地中，

要使硬度提高，勢必要高於沃斯田鐵化溫度以上，(一般淬火溫度都高達 1000°C 以上)，目的是要使碳化物溶入沃斯田鐵之中，才有硬化的效果。

5.4 雷射相變硬化處理後之顯微組織

如圖 12-14 所示分別為 SK3、SK7 與 SKD61 原材、淬火後與淬火回火後經由雷射相變硬化處理後的顯微組織，可看出原材硬化區為麻田散鐵組織，過渡區有微細碳化物分佈，底材則有球狀碳化物均勻散佈其中。淬火後的試片表層組織結構可分為三部分，硬化區、過渡區及底材，硬化區為麻田散鐵組織，其組織與底材相比較下，可以看出其麻田散鐵中，碳化物分佈較少，但硬度卻比底材高，其原因在於經雷射相變硬化處理後使得碳化物大多都溶入基體之中，過渡區有為回火麻田散鐵且有微細碳化物分佈，底材組織為麻田散鐵組織。觀察淬火-回火後再經由雷射相變硬化處理後的試片之顯微組織，可看出表層組織結構可分為三部分，硬化區、過渡區及底材，硬化區為麻田散鐵組織且有微細碳化物分佈其中，過渡區組織為回火麻田散鐵且有微細碳化物分佈，底材組織為回火麻田散鐵組織。

5.5 溫度場的模擬與硬化深度預測及探討

5.5.1 溫度場的模擬與硬化深度預測及探討

(一) 溫度場模擬與雷射熱處理

雷射熱處理與傳統熱處理主要的差異之一是前者可以精確控制熱輸入量，並選擇在工件微小或局部的區域來實施。針對此一特性本研究將嘗試以雷射熱源在 SK3、SK5、SK7、SKD61 鋼材進行局部硬化探討雷射製程參數對鋼材硬化深度之預測及溫度場模擬，並藉著溫度場之模擬來探討硬化層之硬度及厚度與溫度的關係。

(二) 以數學模式預測雷射硬化深度

本研究對溫度場之計算本是據 Ashby 提出之近似分析解方程式加以修正 ((2) 式)。至於 z_0 、 κ 的求法，則是以淬火之試片之硬化深度 Z_C 、 Y_C (實驗值) 作為校正 z_0 、 κ 的參考點。由於 Z_0 、 κ 非常數，會隨處理速度、功率而改變，因此針對每一個雷射條件都必須重新修正。選擇淬火試片之用意在於淬火後麻田散鐵組織，其碳原子分佈最均勻，因此當受熱區達到沃斯田鐵化溫度時，可假設它在短暫時間內迅速完成沃斯田鐵化反應，於冷卻時再變態成為麻田散鐵。基於以上的假設，淬火試片於硬化深度 z_0 的位置 (即 Z_C 所對應之熱歷程尖峰溫度 T_P 應為該材料的沃斯田鐵化溫度。將 $Z=Z_C$ ， $T=T_P$ ， $Y=0$ 代入 (2) 式即可解出 z_0 ，而 κ 常數則是利用 (2) 式中，將 Z 項的方程式消去，將 Y_C 代入方程式中，以便解出常數 κ 。

5.5.2 溫度場之計算與修正

圖 15 所示分別為 SK3、SK7 與 SKD61 之淬火試片，以數學計算出的溫度場分佈，圖中虛線表示沃斯田鐵化溫度值的等溫線。深色區域為硬化區。圖 16 為

數學模式與金像照片相比較之結果，其外型大致上與金像照片的硬化區外型相符合，此一結果是因為溫度場之計算事先經過修正。

5.5.3 硬化效果及硬化深度評估

圖 17 為 SK3、SK5 與 SK7 淬火後試片經雷射相變硬化處理，溫度場分布之比較，由圖 17 (A)、(B)、(C) 可以看出隨著掃描速度的增加，溫度分布有下降趨勢，尤其以 SK7 (C) 最為明顯。由圖 18 (A)、(B)、(C) 可比較出，SK3 原材及淬火回火後的組織，達到硬化的溫度遠較淬火後的試片高，而 SK7 則最不明顯。由圖 18(C) 可看出 SKD61 鋼材硬化溫度有大幅提高的趨勢。由於 SKD61 鋼材的熱傳導差，擁有合金碳化物 (Cr-C)，較一般雪明碳鐵難溶入基體中，所以一般鋼材淬火後，經雷射掃描後，沃斯田鐵化區域也就等於硬化區，但富含合金成分的 SKD61 則無法適用於此一準則。

6. 結論

碳工具鋼 SK3、SK5、SK7 與模具鋼 SKD61 經雷射相變硬化處理後，硬化層的深度會隨著雷射掃描速度的提升而降低，而隨著雷射功率的增加而增加。淬火後的組織 (麻田散鐵)，其雷射相變硬化層，遠較淬火-回火者 (回火麻田散鐵) 及原材 (球化組織) 大，經雷射硬化處理後的硬化層厚度來的大。尤其以 SK7 鋼材最為明顯。原材經過雷射相變硬化處理後，其硬化層的硬度普遍比淬火後的試片及淬火-回火後的試片低，且硬度突降的趨勢也較大。由於雷射處理時的加熱速率快，保溫時間短，因此造成臨界硬化溫度顯著高出 A_{C1} 或 A_{C3} 變態點。此現象亦與材料最初的組織有關，組織越粗大或越不均勻，需要越高的硬化溫度才能達到硬化效果。

7. 參考文獻

1. Joe. E. Miller, "Laser hardening at Saginaw Steering Gear", Metal Processing, May, 1977.
2. Charles Wick, "Laser Hardening, Manufacturing Engineering", June, 1976.
3. 賴文郎, "雷射熱處理及其應用", 金屬熱處理, 18 期, 民國 76 年, pp1-15.
4. 敖仲寧, "金屬材料的雷射加工", 金屬熱處理, 28 期, 民國 79 年, pp.5-19. 賴文郎, "雷射熱處理及其應用", 金屬熱處理, 18 期, 民國 76 年, pp1-15.
5. 丁勝懋, "雷射加工導論, 中央圖書出版社", 第 3 版, 民國 80 年, pp.38-59.
6. 韋孟育, "雷射表面處理鋼材之製程及疲勞裂痕成長特性", 國立台灣大學材料與工程學研究所博士論文, 民國 79 年, pp.9-56.
7. Arata, "CO₂ Laser Absorption Characteristics of metal, Plasma", Electron and Laser Beam Technology, pp.234-345.
8. M. A. Ashby, E. Easterling, "The Transformation Hardening of Steel Surface by Laser beam", Acta Metal, Vol.32, 1984, pp.1935-1948.
9. M. A. Ashby, E. Easterling, "A Second Report on Diagrams of Microstructure and Hardness for Heat Affected Zones in Welds", Acta metal, Vol.32, 1984, pp.1949-1962.

8. 計畫成果自評

本研究以不同的條件 (包含雷射加工參數, 材料因素等) 將鋼料施以雷射表面相變硬化處理, 由處理後鋼料表層的顯微組織及硬度分佈, 探討各製程參數對硬化效果的影響, 進而對不同鋼料分別找出其雷射硬化處理的最佳條件。並以近

似分析解法配合實驗數據對溫度場加以修正，期能簡化雷射硬化深度之預測模式。完成本計畫已達到下列目標：

- (1) 瞭解雷射光的功率大小、掃描速度、離焦量等加工參數對經雷射表面相變硬化處理之鋼料的硬化深度、顯微組織及機械性質之影響。
- (2) 瞭解鋼料的顯微組織及化學組成對雷射相變硬化層之厚度及硬度的影響。
- (3) 瞭解鋼料表層的合金元素含量及對雷射表面相變硬化效果的影響。
- (4) 瞭解雷射束有效半徑及吸收率的計算方法。
- (5) 瞭解如何以近似解法建立溫度場的方式來預測經雷射表面硬化處理後鋼料的硬化深度。

對於參與計畫的研究生已學到雷射表面相變硬化的原理以及雷射加工機的操作技術，並瞭解如何從溫度場的分析預測雷射硬化深度的方法。此外，對電子顯微鏡與電子微探儀的應用及金相試片之製作、顯微組織之觀察、微硬度之測試等亦更熟悉瞭解，對其日後研究工作的進行有很大的助益。

9.附圖

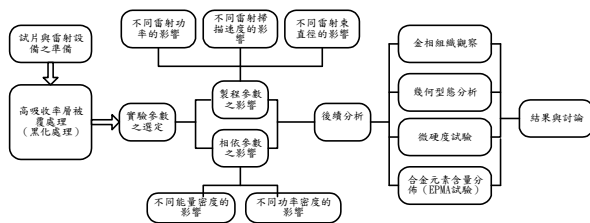
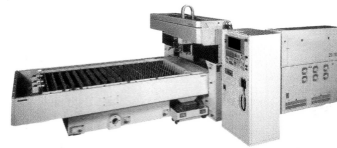
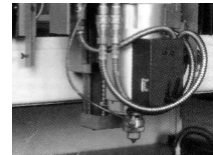


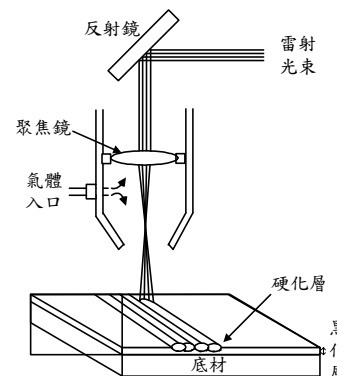
圖 1 實驗流程圖



(A) CO₂ 雷射加工機



(B) 雷射加工頭
統示意圖



(C) 雷射加工系

圖 2 雷射加工系

統

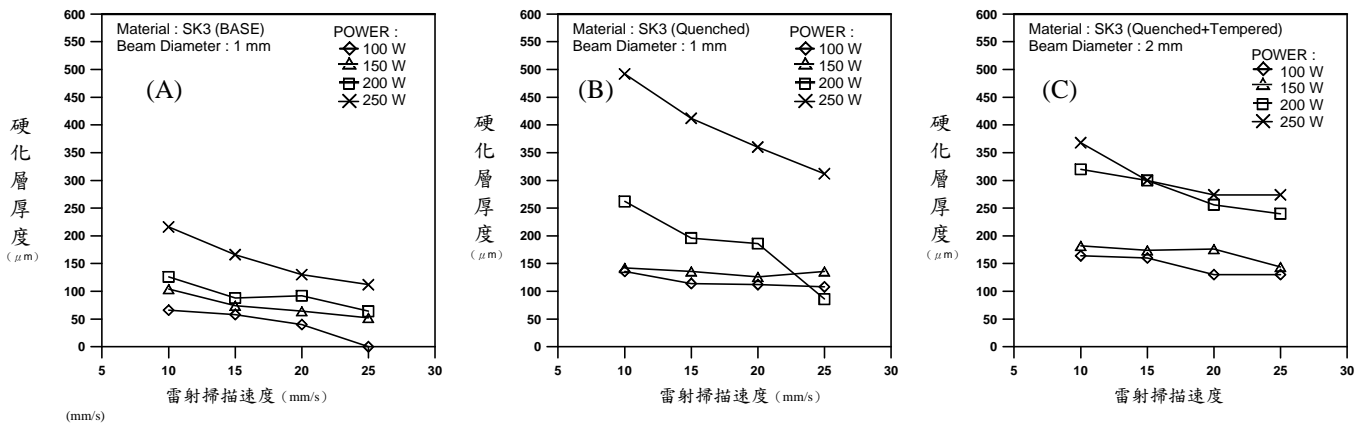
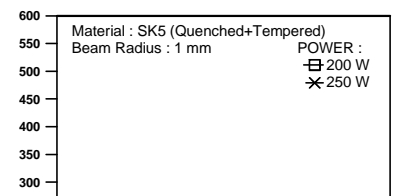
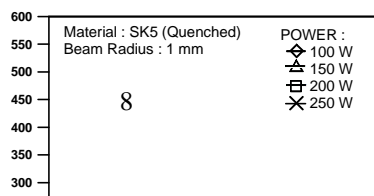
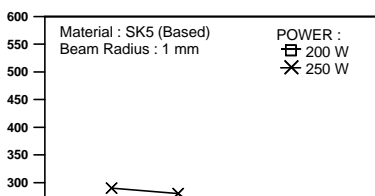


圖 3 碳工具鋼 SK3 在不同組織下，功率與掃描速度對硬化層厚度的影響



硬化層厚度
(μm)

(A)

硬化層厚度
(μm)

(B)

硬化層厚度
(μm)

(C)

(mm/s)

雷射掃描速度 (mm/s)

雷射掃描速度 (mm/s)

雷射掃描速度

圖 4 碳工具鋼 SK5 在不同組織下，功率與掃描速度對硬化層厚度的影響

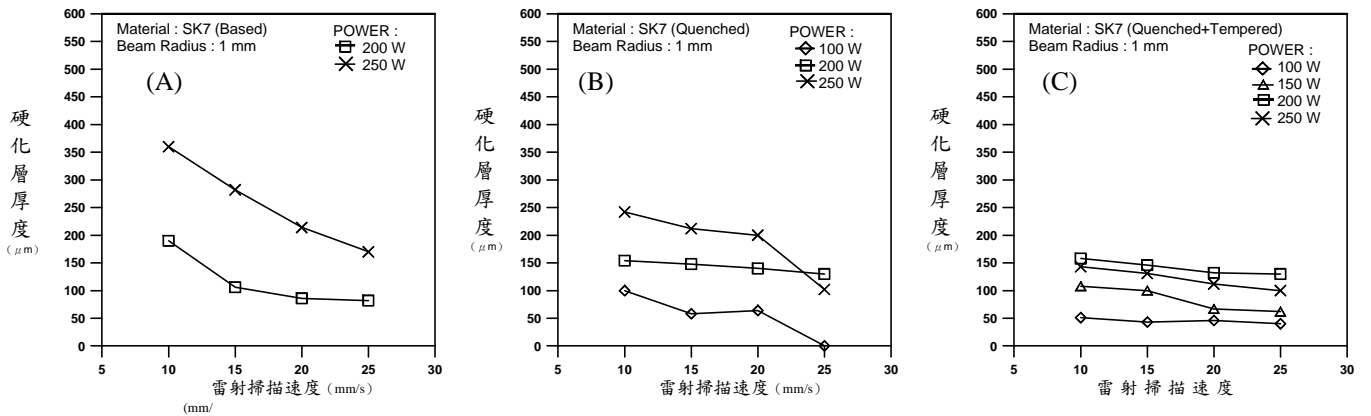


圖 5 碳工具鋼 SK7 在不同組織下，功率與掃描速度對硬化層厚度的影響

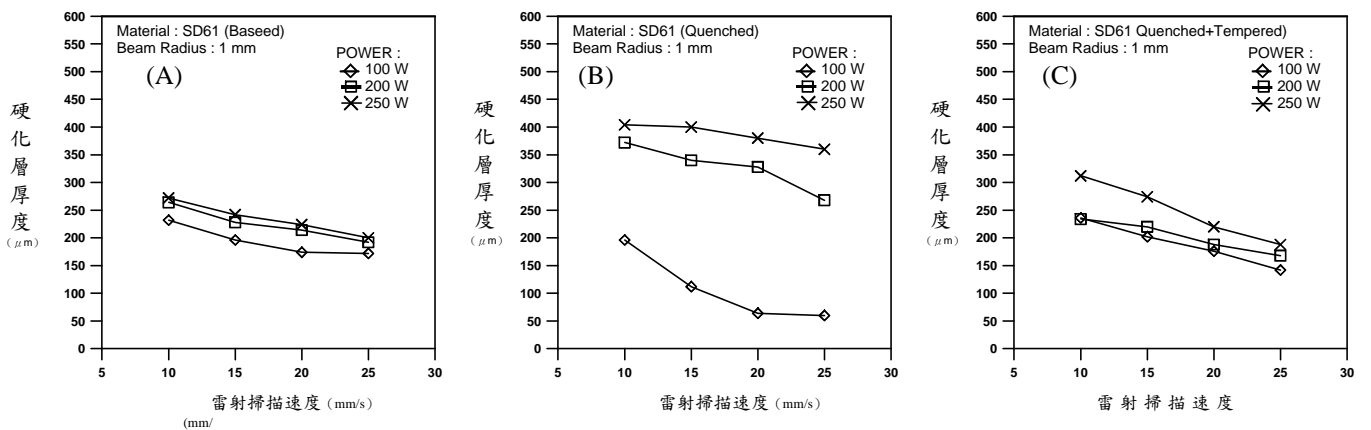
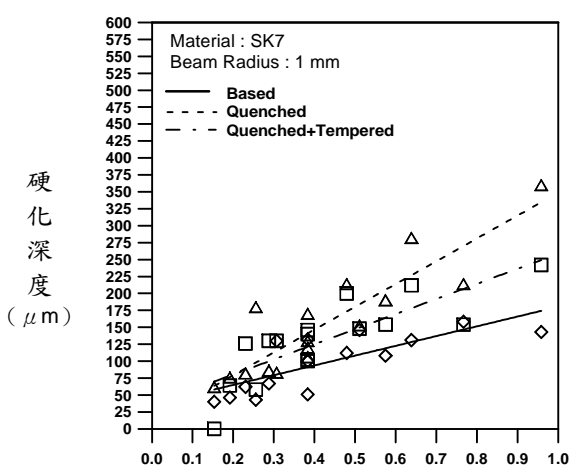
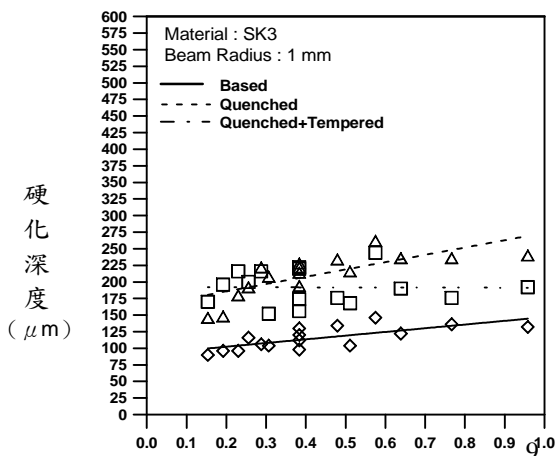


圖 6 模具鋼 SKD61 在不同組織下，功率與掃描速度對硬化層厚度的影響



能量密度 ($10^2 \times \text{J/mm}^2$) 能量密度 ($10^2 \times \text{J/mm}^2$)
 圖 7 SK3、SK7 在不同組織下雷射能量密度對硬化層厚度的影響

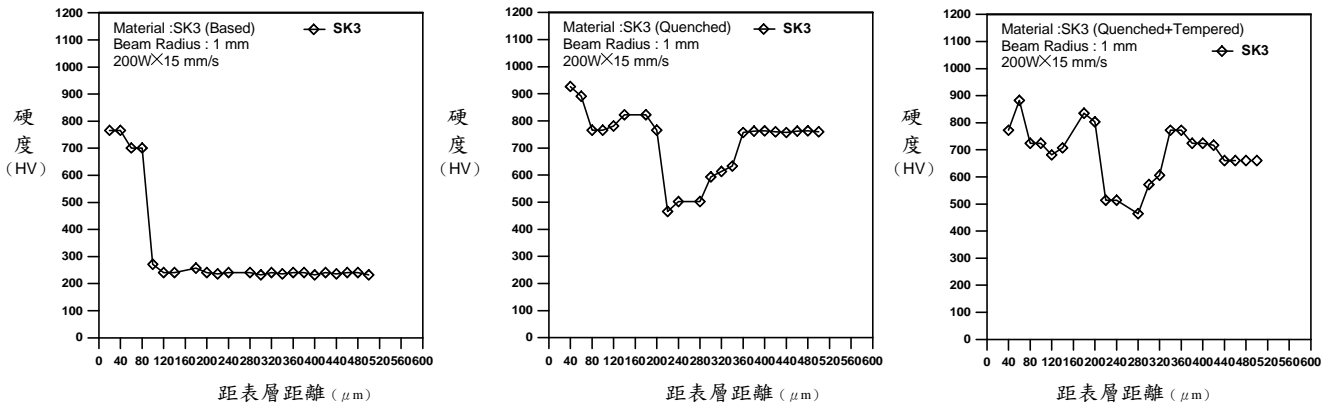


圖 8 SK3 經雷射相變硬化處理後，表層硬度分佈圖

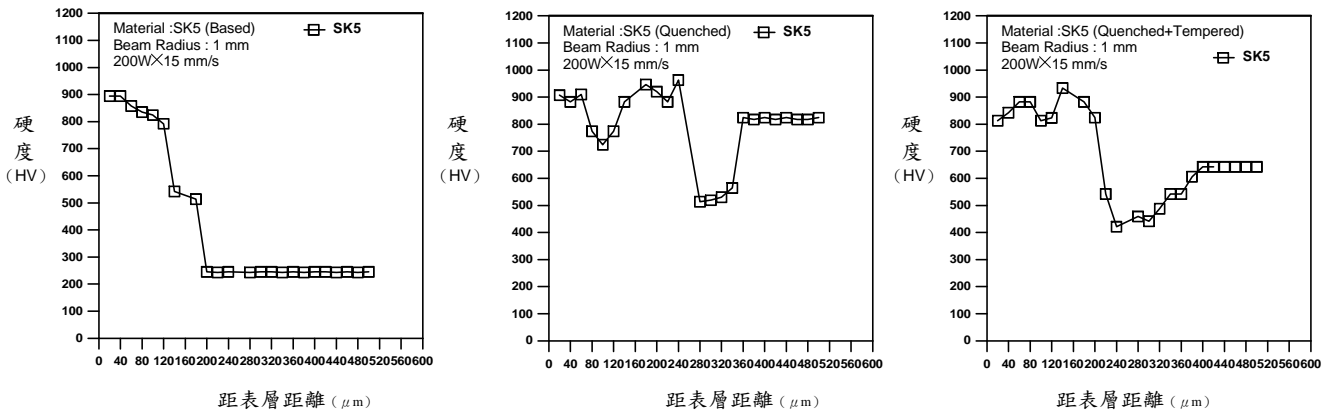


圖 9 SK5 經雷射相變硬化處理後，表層硬度分佈圖

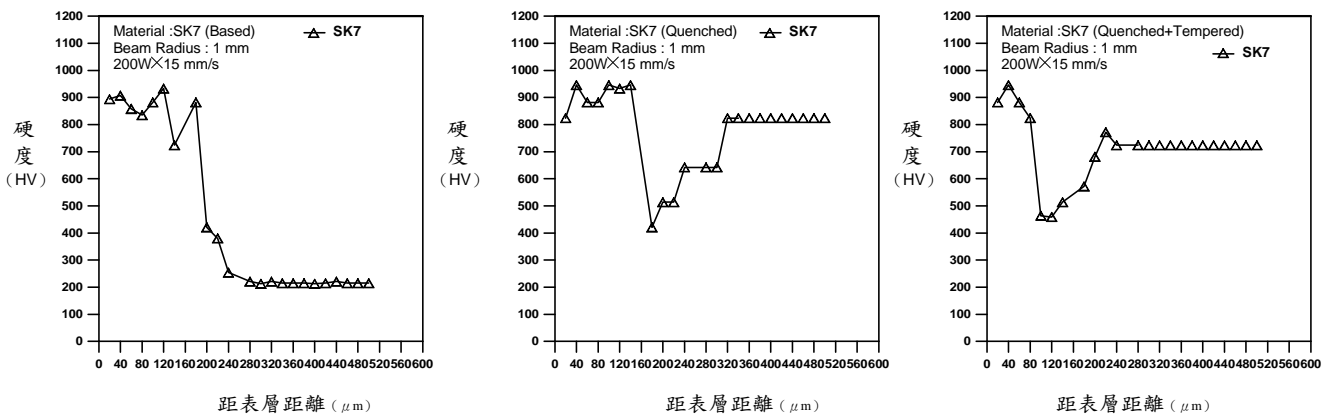
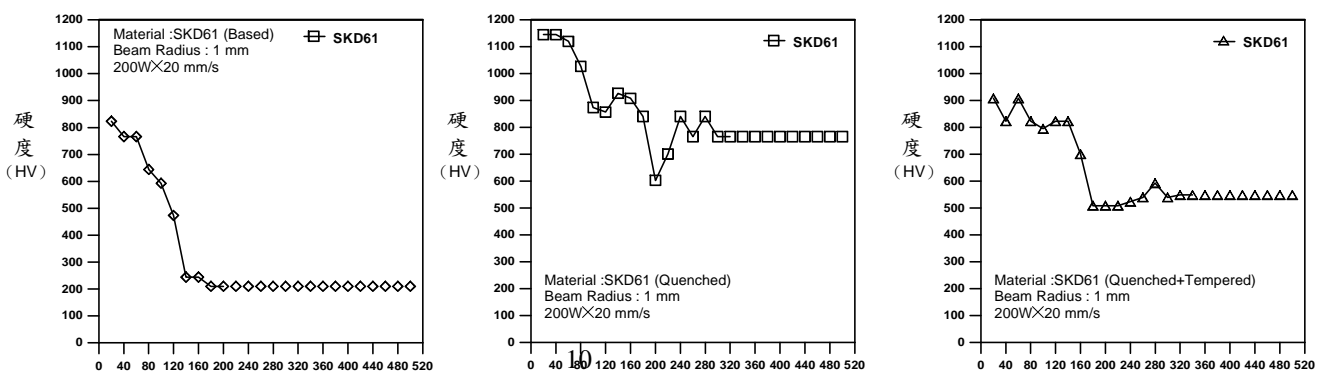


圖 10 SK7 經雷射相變硬化處理後，表層硬度分佈圖



距表層距離 (μm)

距表層距離 (μm)

距表層距離 (μm)

圖 11 SKD61 經雷射相變硬化處理後，表層硬度分佈圖

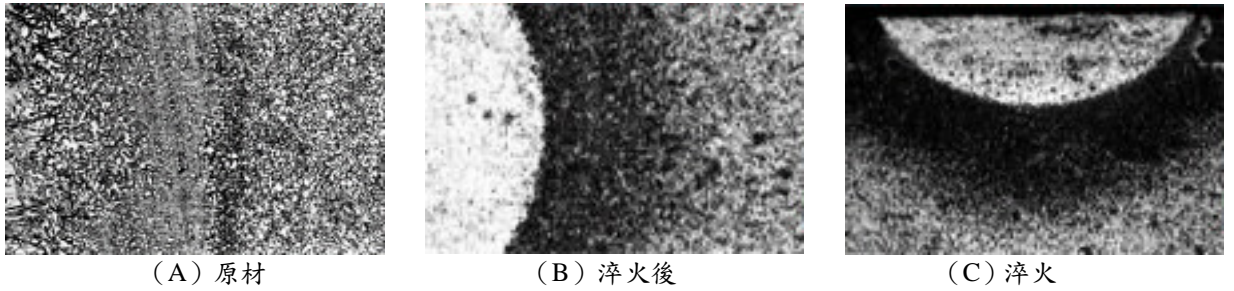


圖 12 SK3 鋼材經過雷射相變硬化處理後的顯微組織

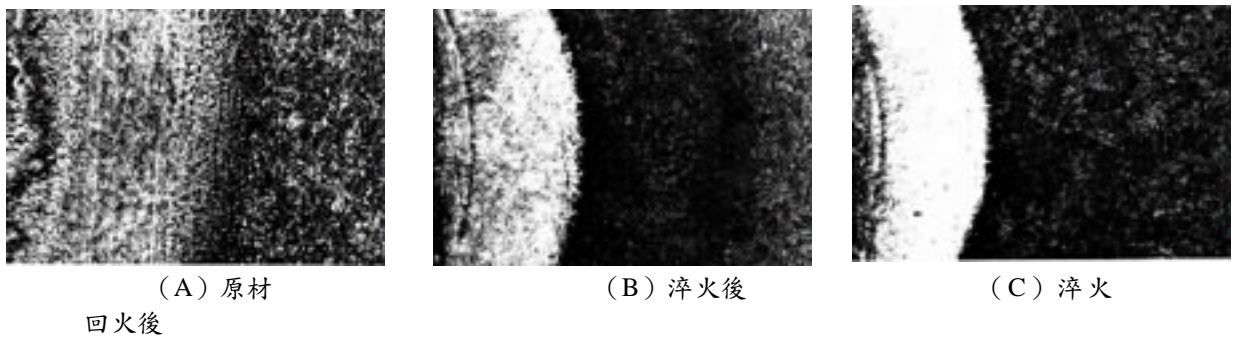


圖 13 SK7 鋼材經過雷射相變硬化處理後的顯微組織

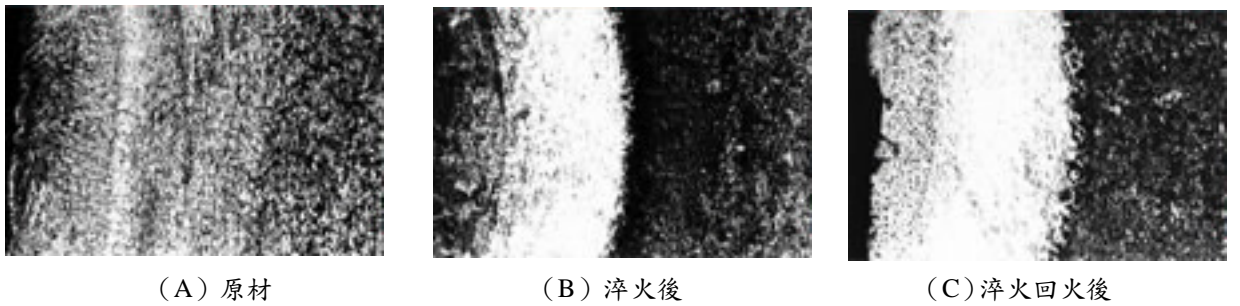


圖 14 SKD61 鋼材經過雷射相變硬化處理後的顯微組織

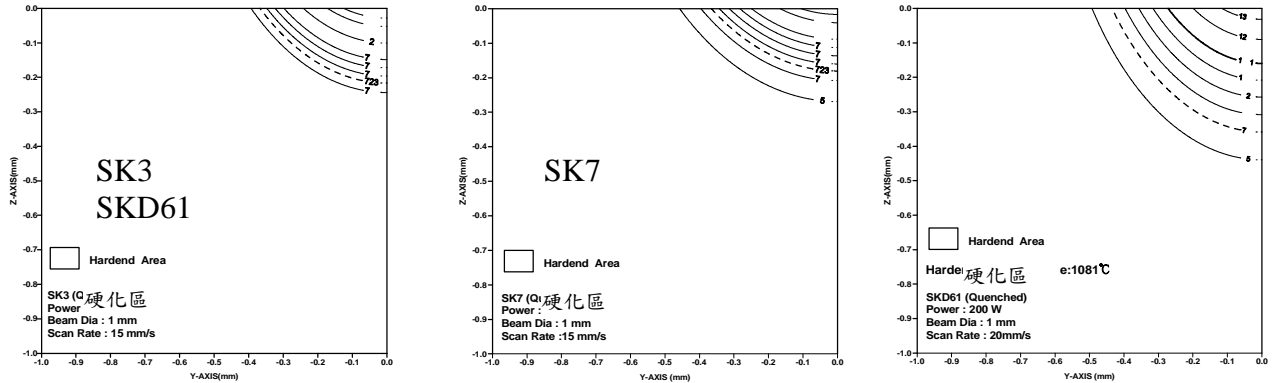
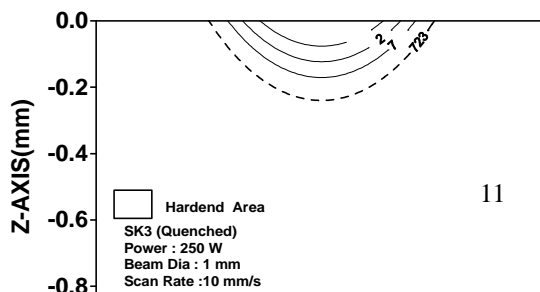


圖 15 SK3、SK7、SKD61 淬火試片在不同條件下，以數學計算出的溫度場分佈圖



----723°C

(A)

(B)

50 μm

圖 16 數學模式與金像照片相比較之結果

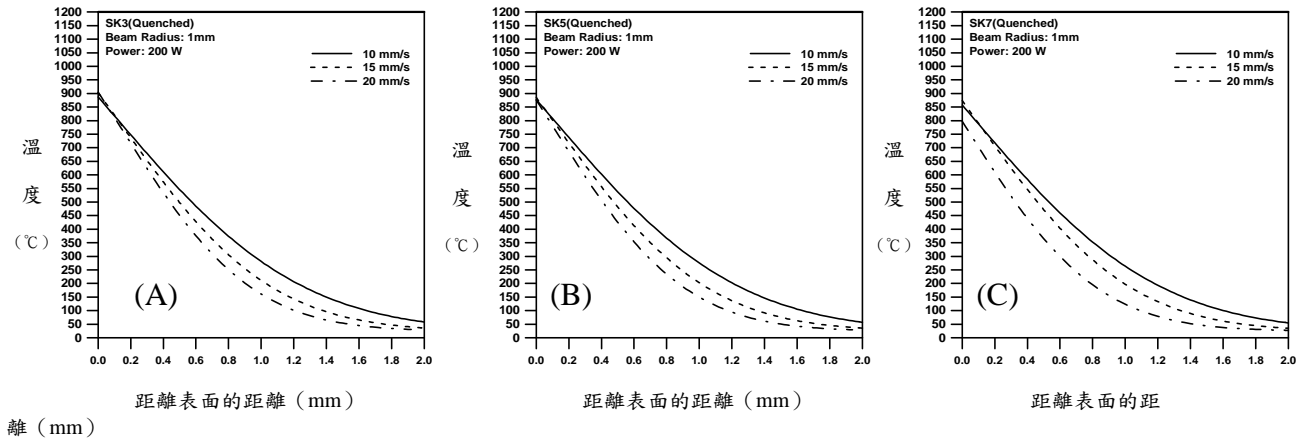


圖 17 SK3、SK5、SK7 淬火後試片經雷射相變硬化處理，軸向溫度場分布之比較

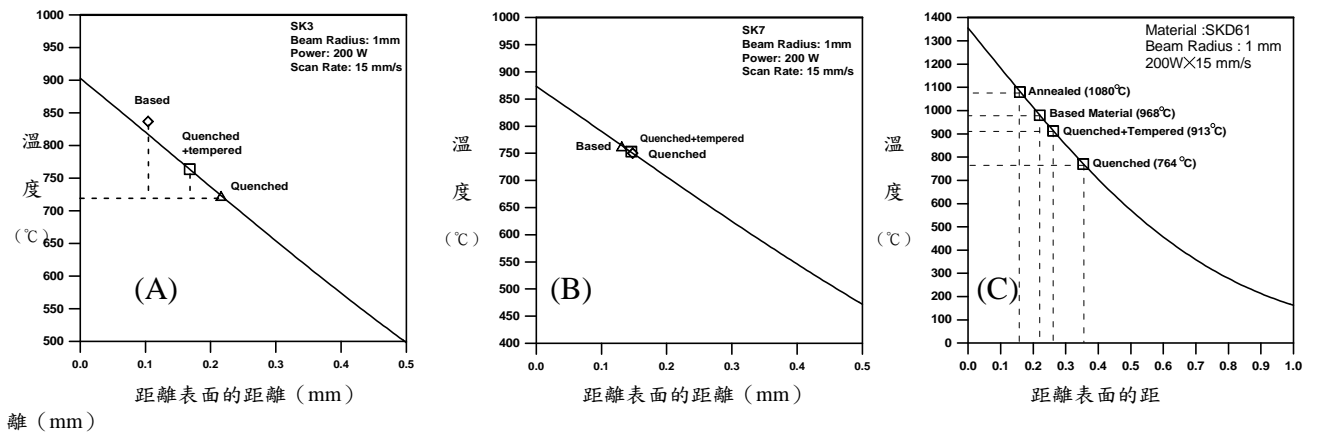


圖 18 SK3、SK7 與 SKD61 之原材、淬火後及淬火-回火後試片經雷射表面相變硬化處理後，軸向溫度場分布之比較

可供推廣之研發成果資料表

可申請專利 可技術移轉

日期：92年

9月18日

國科會補助計畫	計畫名稱：雷射表面改質處理之研究 計畫主持人：陳永傳 台灣大學機械工程學研究所教授 計畫編號：NSC-91-2216-E-002-021 學門領域：表面技術
技術/創作名稱	碳工具鋼與模具鋼之雷射表面相變硬化處理
發明人/創作人	江國安
技術說明	中文： 雷射相變硬化處理是利用雷射高能量密度的特性，將鋼料表面薄層迅速加熱至沃斯田鐵變態溫度以上，隨後藉由鋼料本身的導熱能力迅速將熱量帶走，使表層變態生成麻田散鐵，而達到表面硬化。
	英文： The surface transformation hardening occurs due to rapid heating and cooling rate. A hard film is developed on the surface of steel owing to the martensite transformation. The laser heat treatment improves the hardness , wear resistance and fatigue properties.
可利用之產業及可開發之產品	各種鋼料的表面硬化處理及局部熱處理： 1. 熱處理業 2. 模具業 3. 鐘錶業
技術特點	雷射表面改質處理是以雷射束為熱源，其功率密度較傳統的處理方式為高。而且，以雷射束加熱容易控制加熱範圍，可作定點加熱，因此也適用於精密零件的局部表面改質處理。此外，實施雷射表面改質處理還具有母材變形量小、處理時間短、改質層組織微細、硬度均勻且可視需要作彈性調整等特點。
推廣及運用的價值	1. 精密零件的局部硬化處理 2. 薄件的表面硬化處理

1. 每項研發成果請填寫一式二份，一份隨成果報告送繳本會，一份送

貴單位研發成果推廣單位（如技術移轉中心）。

2. 本項研發成果若尚未申請專利，請勿揭露可申請專利之主要內容。

3. 本表若不敷使用，請自行影印使用。