

錳元素對 TWIP 鋼熱軋後材料性質影響之研究

Effect of Mn elements on the properties of TWIP steels after hot rolling

章凱斌^a 潘永村^b 楊勝閔^c 林東毅^c 王惠森^a

^a義守大學材料科學與工程學系 ^b中鋼公司 ^c國立高雄大學化學工程及材料工程學系
Kai-bin Jhang^a, Yeong-Tsuen Pan^b, Sheng-Mien Yang^c, Dong-Yih Lin^c, Hwei-Sen Wang^a

^aDepartment of Materials Science and Engineering, I-Shou University

^bChina steel

^cDepartment of Chemical and Materials Science and Engineering, National University of Kaohsiung

近年來由於人們生活水平提高，對汽車安全性及環保意識更加重視，所以藉由開發高強度及高延展性的鋼材，來提升汽車的安全性也可達到輕量化之作用，有助於地球永續之發展。本研究利用熱力學方式計算 19、24wt% 的錳元素於 Fe-Mn-C 系 TWIP 鋼之疊差能，且經由合金設計、熔煉、熱軋及固溶化退火，對 TWIP 鋼顯微組織及機械性質進行探討，實驗結果顯示，經退火後，鋼材內有退火雙晶的存在，平均晶粒尺寸大約 80um，經拉伸試驗後 T.S. x El. 可達 70000MPa% 以上且呈現延性破壞，硬度值大約為 HRB 80，結構主要是沃斯田鐵(γ 相)與 ϵ -麻田散鐵組成。

關鍵字：熱軋、TWIP 鋼、顯微組織

1. 前言

綠色材料是目前世界各大鋼廠重要研發方向之一，因此德國、日本鋼廠近年來均致力於開發出高強度、高延性之鋼材，如日本引導鋼鐵業朝向超細晶化，降低合金元素添加達到超高強度之方向研究；德國工業沿革則以輕量誘發塑性鋼為主導，利用誘發塑性，之特性可大幅提升強度與延性又稱為智慧型鋼材可提供汽車減重降低污染物之排放，達到綠色材料與生活環境結合的特色，有助於地球永續之發展。而鋼鐵材料具備可回收再利用之特性，因此提昇鋼鐵工業在全球的競爭性將是非常重要之課題；以目前鋼鐵歷史發展，從早期注重延展性優良之高錳鋼到 1950 時期開發出的高強度與高延展性相變誘發塑性鋼與近期的雙晶誘發塑性鋼材，可看出誘發塑性鋼，為目前世界各大鋼廠重要研發方向之一，汽車用鋼之發展圖⁽¹⁾，如圖 1 所示，因為具備了誘發塑性之功效，雙晶誘發塑性鋼將是未來鋼鐵工業的領導核心之一。

雙晶誘發塑性(Twinning induced plasticity, TWIP)：係指當外力作用時，部分晶粒產生剪斷變形，此時發生雙晶變形之部分與未發生雙晶變形之間，原子排列會以鏡面對稱的方式呈現，雙晶晶界可視為高能障區域，阻止差排移動，即為變形雙晶引起快速的加工硬化效果⁽²⁾。而頸縮的蔓延將會被延遲或阻礙，所以另一個新的頸縮區域將產生在另一個位置，但頸縮的擴散又將再一次被此高強度及變形雙晶阻止，如此多次的頸縮機構導致伸長率的提升⁽³⁾，這就是所謂的 TWIP 效應。變形雙晶產生時，拉伸應變導致快速的加工硬化⁽⁴⁾，當變形雙晶繼續產生，增加的應變導致應變硬化的增加，這也是 TWIP 效應有如高韌性的原因。

TWIP 鋼會隨著錳含量的改變而呈現不同的顯微結構與機械性質，本實驗主要是針對 TWIP 鋼分別添加 19wt%、24wt%，探討錳對材料的顯微結構與機械性質之影響。

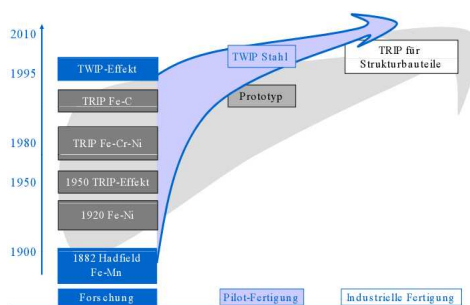


Fig. 1 汽車用鋼之發展圖⁽¹⁾

2. 實驗方法

實驗流程主要有合金設計、真空熔煉、熱軋延、熱處理、顯微分析、機械性質等如圖 2 所示；本實驗是以真空感應熔煉爐(VIM)進行熔煉，熔煉及鑄造均在氬氣氛下進行，澆鑄成 500 mm×160 mm×160 mm 的鑄錠。其成份如表 1 所示。

熔煉完成之鋼胚進行 1250°C，持溫 1 小時均質化處理，再將材料熱軋成 4.5mm 厚的板材，完軋溫度為 920°C。接著將熱軋板材施以固溶化退火處理(氬氣保護氣體下，於 1050°C 持溫 20 分鐘，接著以空冷方式冷卻至室溫)如圖 3 所示。

將退火之 4.5mm 熱軋板沿著軋延方向裁切，加工製成拉伸試片，拉伸試片尺寸如圖 4 所示，以 $6.67 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$ 拉伸速率進行測試。

硬度試驗是使用洛氏硬度機分別對熱軋後之試片進行硬度測試，使用荷重 100kgf，壓痕器為 1/16" 之鋼球。分別將不同錳含量之試片，藉由鑲埋、研磨、拋光等步驟，最後利用蝕刻液(4% Nital)，進行顯微結構的觀察。顯微結構分析是使用 OM、SEM 分別觀察晶粒尺寸及拉伸破斷面等，再利用 XRD 進行相鑑定。

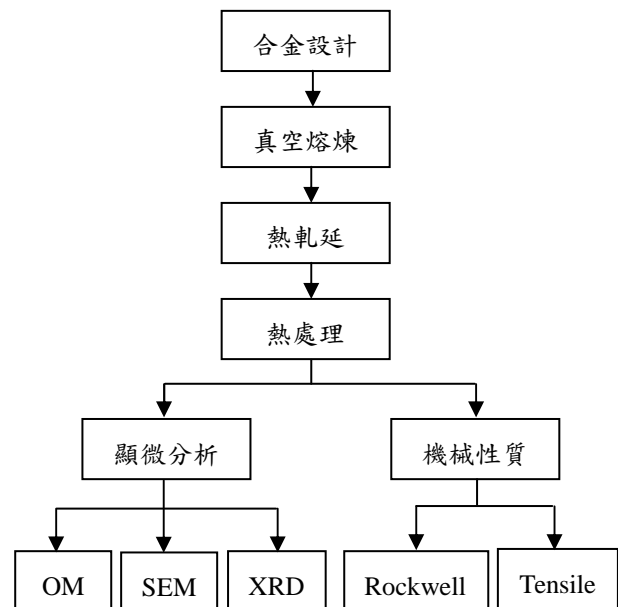


Fig. 2 實驗流程

Table 1 化學成份 (wt%)

	19Mn	24Mn
C	0.62	0.6
Mn	19.2	24.7
Si	0.24	0.22
Al	0.007	0.006
P	0.021	0.020
S	0.008	0.007
N	0.011	0.009
B	0.0001	0.0001
Fe	Bal	Bal

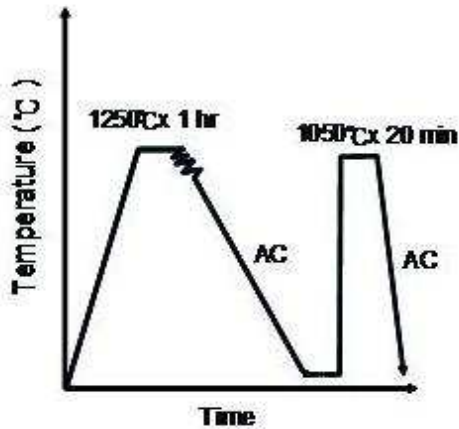


Fig. 3 熱軋延及熱處理流程

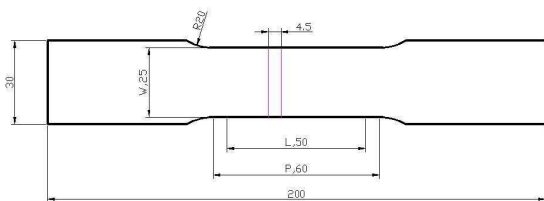


Fig. 4 拉伸試片示意圖

疊差能之熱力學計算

疊差能是指當一完整差排分解為兩部分差排時，兩部分的應變能總合小於完整差排的應變能，因此兩部分差排之間存一排斥力使兩部分差排分開，降低系統的應變能。由文獻回顧可知因為無論雙晶或 ϵ -麻田散鐵都是因為疊差所構成，因此 Olson and Morrison 提出 ϵ -麻田散鐵的疊差能可用在最密堆積平面上形成兩層 hcp 疊差結構之模式來計算⁽⁴⁾。如下式所式

$$\Gamma = 2\rho \Delta G^{\gamma \rightarrow \epsilon} + 2\sigma$$

ρ : density of atoms in a close packed plane (111) in moles per

unit area

$\Delta G^{\gamma \rightarrow \epsilon}$: difference of molar free energy (γ and ϵ phases)

σ : coherent interfacial energy (γ and ϵ phases)

3. 結果與討論

3.1 錳元素對疊差能之影響

本實驗是在固定溫度下改變錳含量進行疊差能計算之探討，根據文獻⁽⁵⁾指出，錳元素對疊差能有相當程度的增加，而疊差能的改變接間會影響到結構，根據文獻⁽⁶⁾指出，疊差能低到高之變化為 α' -麻田散鐵 \rightarrow ϵ -麻田散鐵 \rightarrow 雙晶 \rightarrow 部分差排 \rightarrow 差排之結構關係。利用熱力學方式計算 19Mn 和 24Mn 之疊差能為 17.7mJ/m² 和 29.2mJ/m²。

3.2 顯微組織

TWIP 鋼熱軋的顯微組織如圖 5 所示，可觀察道沃斯田鐵晶粒為等軸晶之型態，等軸晶的出現是因為完軋溫度約 920°C，經熱軋變形之扁平沃斯田鐵有足夠的時間和溫度，使其能充分進行再結晶所致。經 1050°C 持溫 20 分鐘的固溶退火材之顯微組織，可發現到相當多的退火雙晶如圖 6 所示，當錳含量為 19wt% 增加到 24wt% 時，晶粒尺寸從 87.4um 增加至 75.2um，由此可知錳含量增加晶粒尺寸有下降之趨勢，如圖 7 所示。

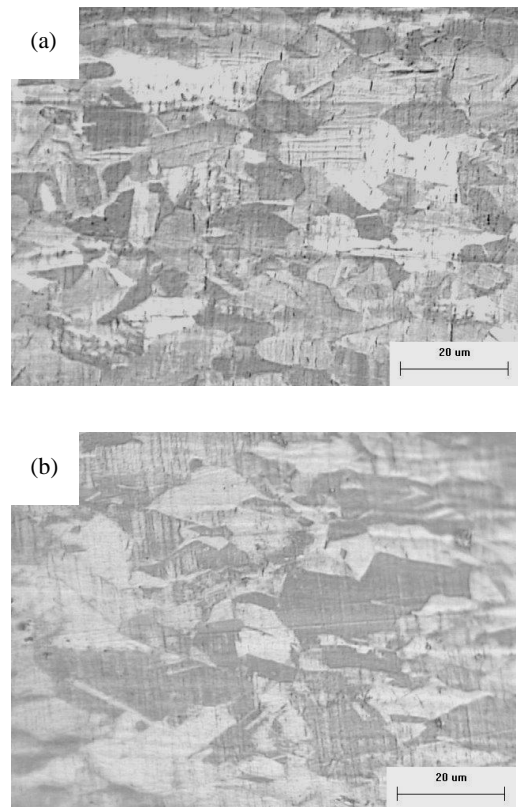


Fig. 5 TWIP 鋼經熱軋後之顯微組織(a)19Mn (b)24Mn

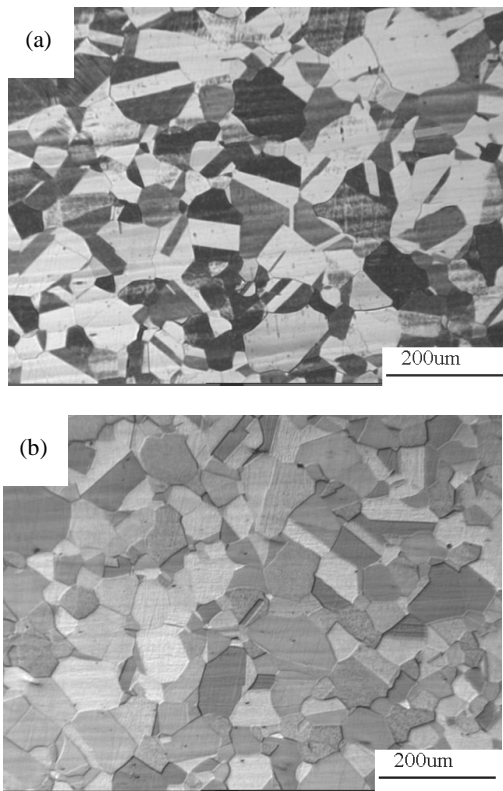


Fig. 6 TWIP 鋼經熱軋退火後之顯微組織(a)19Mn (b)24Mn

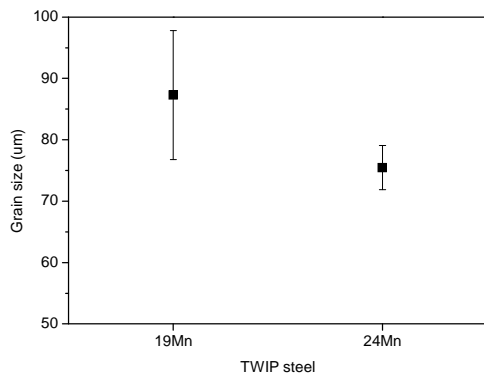


Fig. 7 熱軋退火鋼材之平均晶粒尺寸

3.3 XRD 分析

利用 XRD 分析 TWIP 鋼之結晶構造，分析後的數據再使用 JCPDS card 進行比對，如圖 8 所示，可得知 19Mn 與 24Mn 主要是沃斯田鐵(γ)相組成，這是由於錳元素會穩定沃斯田鐵⁽⁷⁾，添加一定比例後鋼材在室溫下為沃斯田鐵結構，而進一步確認是否有其它結構，將掃描角度縮小為 42~54 度以每分鐘 0.5 度進行掃描，選擇這角度做分析主要考量到 ϵ -麻田散鐵及肥粒鐵結構的主要優選 peak，發現到 19Mn 鋼材中有微量 ϵ -麻田散鐵結構，而 24Mn 鋼材中沒發現 ϵ -麻田散鐵結構，由此可推斷錳含量的添加會提高疊差能，當疊差能增加後間接會影響 ϵ -麻田散鐵的相轉換。

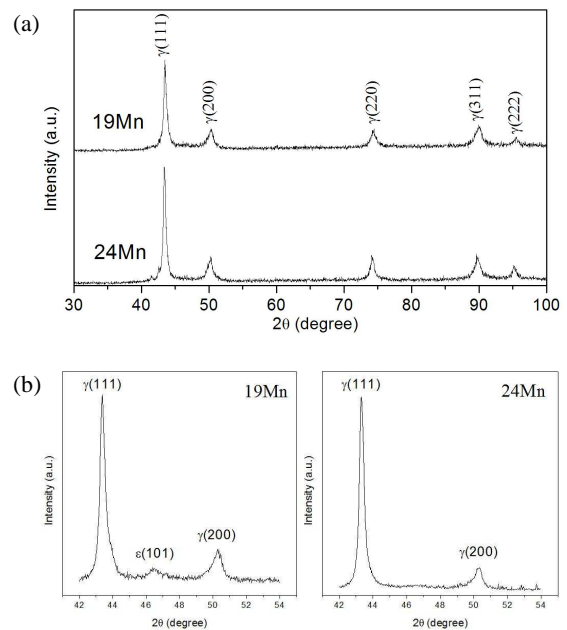


Fig. 8 熱軋退火鋼材之 XRD 分析(a)每分鐘 2 度掃描 (b) 每分鐘 0.5 度掃描

3.3 拉伸試驗

TWIP 鋼經固溶退火之拉伸性質比較，拉伸速率設定為 $6.67 \times 10^{-3} S^{-1}$ 如圖 9 所示，19Mn 與 24Mn 的抗拉強度分別為 872.5 MPa 與 841.7 MPa，即隨著 Mn 含量增加，抗伸強度(T.S.)則有下降的趨勢，與 R. Song 等人所研究之結果相符⁽⁸⁾；Y.S. 大約在 280Mpa，錳含量的增加並無明顯地差異，伸長量(Total El.)方面，19Mn 與 24Mn 分別為 78.1% 與 83.7%，T.S.×El. 為應力-應變曲線下所包含的面積，可用來表示材料韌性之依據，T.S.×El. 又分別為 68101MPa% 與 70456 MPa%，推測 19Mn 抗拉強度較高是因疊差能較低，變形機制介於 ϵ -麻田散鐵與雙晶機制之間，但較偏向 ϵ -麻田散鐵故強度較高相對伸長量會較低，24Mn 因疊差能落在雙晶變形機制中，所以 24Mn 的 T.S.×El. 會優於 19Mn。

金屬材料在常溫加工時，隨加工程度之增加，材料強度也會隨之增加，這種現象稱為加工硬化(work hardening)或應變硬化(strain hardening)。如圖 10 所示，可知 TWIP 鋼拉伸試驗的情況，加工硬化指數(n-value)隨應變增加而快速增加最後趨於定值，以 5-45% 之數據回歸代入之 $\sigma = k\epsilon^n$ 公式即可得到 n 值，當錳含量為 19Mn 增加至 24Mn，n 值大約為 0.57 並無太大之差異。

經拉伸試驗後之應力應變曲線圖發現到 Portevin-LeChatelier (PLC) 現象，如圖 11 所示，根據文獻所示，此現象又稱之動態時效應變(DSA)，此現象會在低疊差能的沃斯田鐵鋼材經由變形過程中出現，對鋼材的機械性質會有相當程度之影響。在低疊差能合金的變形過程中，碳錳原子組合會阻礙部分差排滑移，當部分差排通過局部置換及間隙原子的位子時，其八面體位置將會改變為四面體位子之 FCC 結構，在相同滑移平面上部分差排會受到應力而移動且集中到單一平面上，加工硬化隨之提高⁽⁹⁾。在 19Mn 應力應變曲線圖中，觀察到 PLC 現象且很明顯，24Mn 的 PLC 現象相對較弱；推測因 19Mn 疊差能相對較低，使得差排較易分解為部分差排，分解後的部分差排與八面體結構碰觸因此產生 PLC 現象，24Mn 由於疊差能較高使得差排較不易分解為部分差排，所以 PLC 現象減弱。

試片經拉伸試驗後，利用 SEM 對試片破斷面觀察，如圖 12 所示。一般材料可分為延性破壞和脆性破壞，這兩種不同錳含量的鋼材皆呈現 dimple 延性破裂的特徵，其中可觀察到 19Mn 延性破壞的晶粒較大，24Mn 晶粒較小，19Mn 的

dimple 深度較淺，24Mn 的漩渦狀組織較為緻密，推測與雙晶結構有關聯性，如何藉由雙晶結構影響機械性質將於後續分析深入研究。

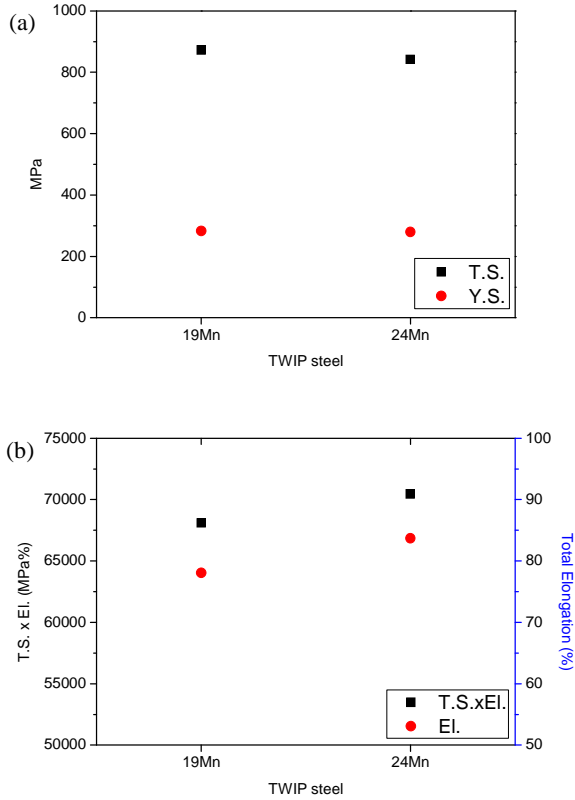


Fig. 9 熱軋退火鋼材之拉伸試驗(a)拉伸強度和降伏強度 (b)延展性和 T.S. × El.

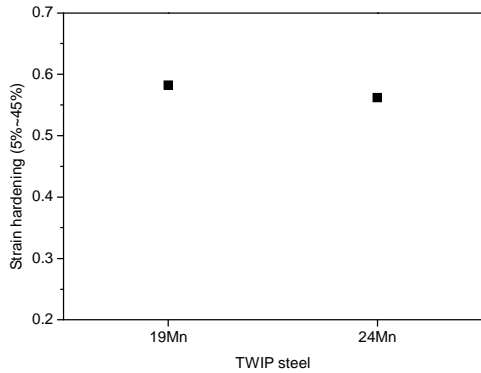


Fig. 10 熱軋退火鋼材之應變硬化指數

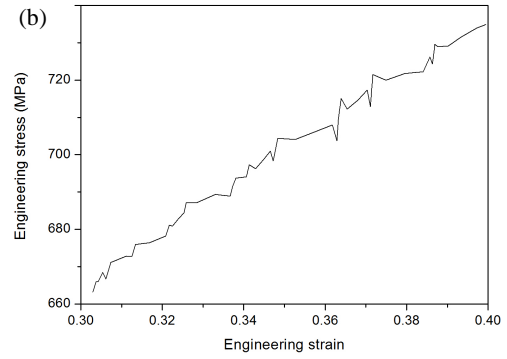
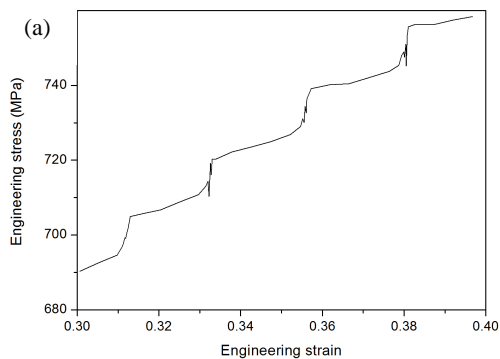


Fig. 11 熱軋退火鋼材之 PLC 現象(a)19Mn (b)24Mn

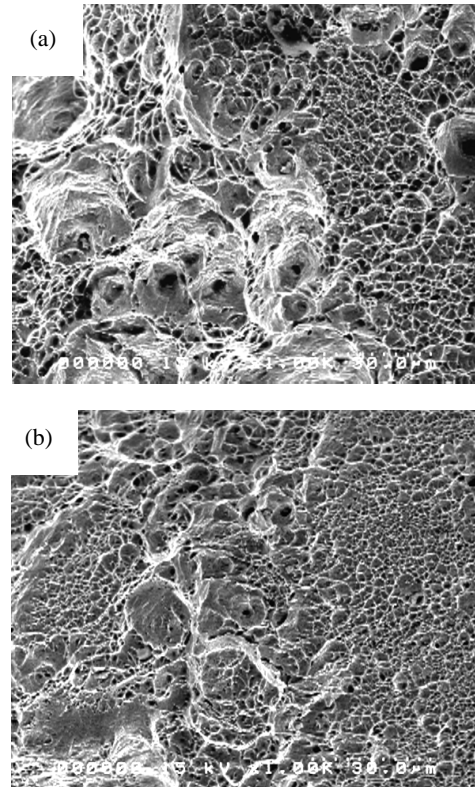


Fig. 12 熱軋退火鋼材之拉伸破斷面(a)19Mn (b)24Mn

3.5 硬度試驗

TWIP 鋼之硬度值是使用洛氏硬度機進行測試，結果如圖 13 所示，當錳含量從 19wt% 增加至 24wt% 時，硬度從 HRB83.5 下降至 HRB79.7，硬度有稍微下降的現象，這與文獻⁽¹⁰⁾相似。以疊差能的觀點而言，增加錳含量將會提高疊差能的值，故形成 ϵ -麻田散鐵的量會下降，因此當錳含量增加至 24wt% 時， ϵ -麻田散鐵相比比例會低於 19Mn，此結果直接反應於硬度值之表現。

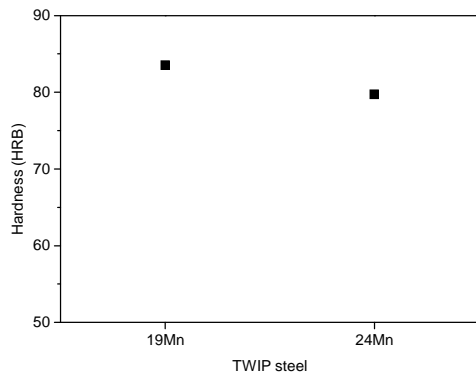


Fig. 13 熱軋退火鋼材之硬度值

4. 結論

1. 錳含量改變對 TWIP 鋼經熱軋退火後會產生退火雙晶；退火後之晶粒尺寸約介於 75 - 90 μm 。
2. 由拉伸試驗可知，經熱軋退火後之不同錳含量的 TWIP 鋼，19Mn 與 24Mn 的拉伸強度分別為 844 Mpa 與 797 Mpa；YS 大約皆為 330Mpa；Total El. 方面，19Mn 與 24Mn 分別為 78.1%與 83.7%，T.S. x El. 又分別為 68101MPa%與 70456 MPa%。
3. XRD 繞射結果可知，TWIP 鋼主要為沃斯田鐵(γ 相)組織，其中 19Mn 鋼材中有微量 ϵ -麻田散鐵結構。
4. TWIP 鋼經洛氏硬度試驗後發現，隨著錳含量增加硬度有下降之趨勢，硬度值大約介於 HRB 79~83。

5. 參考文獻

- [1] Bleck, W., J. Imlau, and K. Phiu-on, 05_RWTH_20_Jahre_WeFo_081107_Bleck.pdf. 07. November 2008.
- [2] Bouaziz, N. Guelton, Material Science and Engineering, A319-321(2001), pp. 246-249
- [3] Y.G. Kim, J.M. Han, J.S. Lee, Metallurgical Transaction A, Vol 17,(1986), pp. 2097-2098.
- [4] Olson, G.B. and M. Cohen, Metall. Trans., 1976. 7A, pp. 1897-1904.
- [5] A. Dumaya, J-P. Chateau, S. Allain, S. Migot, O. Bouaziz, Materials Science and Engineering A, 2008. 483-484, pp. 184-187.
- [6] J. W. Christian, S. Mahajan, Deformation twinning. Progress in Materials Science, 1995. 39, pp. 1-157.
- [7] A.S. Hamada, , Manufacturing, Mechanical Properties and Corrosion Behaviour of High-Mn TWIP Steels. Faculty of Technology, Department of Mechanical Engineering, University of Oulu, 2007.
- [8] R. Song, D. Ponge, D. Raabe, ISIJ International, Vol. 45 (2005), pp. 1721-1726
- [9] Lei CHEN, Han-Soo KIM, Sung-Kyu KIM, B. C. DE. COOMAN, Localized Deformation due to Portevin–LeChatelier Effect in 18Mn–0.6C TWIP Austenitic Steel. ISIJ International, 2007. 47(12), pp. 1804-1812.
- [10] 陳勝榮, 陳永昆, 鋼鐵製造與基本特性. 棒線產品之特性及應用-工程技術研討會, 2000.