

# 超高強度車門防撞鋼管用鋼開發

涂睿帆、林守杞、潘永村、黃議興

(台灣中鋼公司, 鋼鋁研究發展處, 81233高雄市小港區中鋼路1號)

**摘要:** 車門防撞鋼管已是現今汽車必要之安全部件, 其強度高達1470MPa 以上, 無法藉由一般熱軋鋼材常用之強化機構來達成, 故需使用淬火熱處理來強化。本文主要介紹高週波淬火條件參數, 對CSC 15B22防撞鋼管用鋼機械性質、硬度及抗延遲破裂性的影響。結果顯示CSC 15B22高週波淬火之組織以麻田散鐵為主, 拉伸斷面皆為延性凹窩組織, 其硬度可穩定達到HV500以上, 抗拉強度約1600~1760MPa, 伸長率約14-16%, 可滿足車門防撞鋼管之性質需求。延遲破裂試驗結果顯示在YS應力下, CSC 15B22具有良好的抗延遲破裂性。

**關鍵字:** 防撞鋼管、錳硼鋼、超高強度、高週波感應熱處理

## Development of Ultra High Strength Steels for Automobile Door Impact Tube

Yeong-Tsuen PAN, Jui-Fan TU, and Ching-Yuan HUANG

(Steel Product Development Section, Steel and Aluminum R & D, China Steel Corp., Kaohsiung 81233, Taiwan)

### Abstract

Door impact tube is the necessary safety part for modern automobiles. The minimum required tensile strength of steel for door impact tube is 1470 MPa, which can not be reached by normal strengthening mechanisms used for hot rolled strips. Therefore, the quenching treatment is often used for producing such an ultra high strength steel. The effect of high frequency induction heat treatment parameters on the mechanical properties, hardness, and delayed fracture resistance of CSC 15B22 steel will be described in this paper. The results show that the microstructure of quenched 15B22 steel is martensite and the tensile fracture surface is mainly composed of ductile dimples, offering the hardness higher than HV 500, tensile strength up to 1600 ~ 1760MPa associated with total elongation of 14-16%, which can fully satisfy the automobile door impact tube requirement. The delayed fracture test indicates CSC 15B22 steel tube features an excellent delayed fracture resistance when loading stress is under yield strength.

Key words: door impact tube, MnB steel, ultra high strength, high frequency induction heat treatment

### 1 前言

今日汽車的發展在輕量化及安全性考量下, 人們對於車體安全部件(safety parts)的強化越來越重視, 防撞鋼樑即列屬於安全部件之一, 其功能在於避免乘客直接受到側邊撞擊的威脅及強化車體受側撞後防止車門變形鎖死的能力, 高強度防撞鋼樑已成為現今轎車的必要配備(如圖 1 所示)。

根據美國聯邦汽車安全標準 (FMVSS, Federal Motor Vehicle Safety Standard) No.214 規範, 多數車廠已制定防撞鋼樑用鋼之性能要求: 拉伸強度須  $\geq 110\text{kg/mm}^2$ 、降伏強度  $\geq 80\text{kg/mm}^2$  及伸長率  $\geq 10\%$ 。低碳 Mn-B 鋼具有優良之淬火硬化性, 淬火後能符合此性質之要求。<sup>[1,2]</sup>

防撞鋼管製程係採電阻銲(Electric Resistance Welding, ERW)<sup>[3]</sup>, 如圖 2 所示。其生產流程為: 熱軋鋼捲經分條機裁成鋼管所需寬度之鋼帶, 再經製管機之多道輥輪加工成管狀, 在鋼管接合前通過一高頻感應線圈(高週波熔接機), 使鋼板邊緣產生渦電流並加熱至半熔融狀態, 接著通過一對銲接輥輪將熔融區接合並擠出餘料, 即成一鋼管。

防撞鋼樑可透過高週波感應加熱淬火製程來達到硬化效果。感應加熱技術具有快速、清潔、節能、易於自動化和線上生產、生產效率高等特點, 是綠色環保型加熱工藝之一。此外, 透過高壓噴水淬火, 使鋼材之淬火冷速大幅提昇, 相較於傳統的浸泡水淬, 其淬火硬度及強度能增加, 更有效地提升防撞鋼樑輕量化目的。

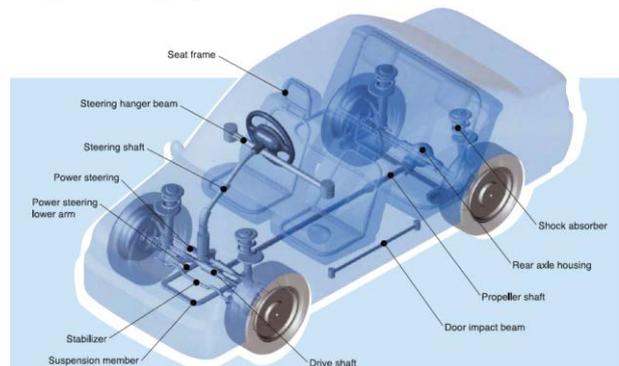


圖 1 車門防撞鋼樑  
Fig.1 Door impact beam in an automobile.

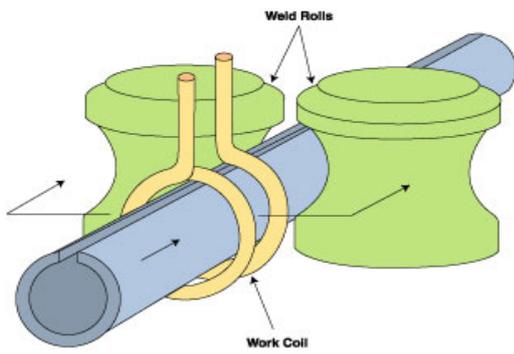


圖 2 防撞鋼管電阻銲製程示意圖

Fig.2 Schematic illustration of ERW process for steel tubing

感應加熱原理乃藉由感應之渦電流產生焦耳熱，其渦電流之加熱深度  $\delta$  與工作頻率  $f$  間呈以下關係：

$$\delta(cm) = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho}{\mu f}} \dots\dots\dots(1)$$

式中  $\rho$ ：電阻率( $n\Omega\text{-cm}$ )； $f$ ：頻率(Hz)； $\mu$ ：導磁率。

其中 63.2% 渦流分佈高度集中在物件表面，且渦電流強度隨具表面距離增大而急劇下降。由於渦流產生的熱量與渦流強度平方成正比，故從表面向心部，熱量的下降要比渦流下降得更快。計算證明，86.5% 的熱量發生在深度  $\delta$  薄層內<sup>[4]</sup>。

防撞鋼樑因強度超高，具有較高的氫脆 (hydrogen embrittlement) 敏感性。即其在冶煉、加工、熱處理、酸洗和電鍍等過程中，或在含氫介質中長期使用時，材料因吸氫或氫滲而造成機械性能嚴重劣化，而容易發生脆斷的現象。氫脆對於機械性能的影響如下：氫對金屬材料的降伏強度和拉伸強度影響不大，但卻使延伸率及斷面收縮率嚴重劣化，疲勞壽命明顯縮短，衝擊韌性值顯著降低。於低拉應力下(<TS or YS)持續作用，材料會於一段時間後發生脆斷，故亦稱之為延遲破裂(delayed cracking)。

文獻指出<sup>[5]</sup>，儲存於試片中的氫原子可分為 200 °C 以下之可擴散氫及高溫測得之不可擴散氫，如圖 3 所示。室溫下可擴散氫能於試片中擴散，乃因材料內部之弱鍵結能(bonding energy)氫陷阱無法強力捕捉氫原子，使氫容易擴散至應力集中區造成鋼材發生氫脆；而不可擴散氫則因高鍵結能之氫陷阱將氫原子抓牢而使之不易於常溫下擴散，故對鋼材氫脆現象並無影響。因此若能控制材料中俘獲氫的陷阱(trap site)，使侵入鋼材中的氫俘獲變成不可擴散氫，如此便能提昇鋼材之抗延遲破裂能力。

氫於鋼鐵中之固溶度極小，可依據 Sievert's Law 計算之( $C = 0.00185 \sqrt{P} \exp(-3400/T)$ )，於 1 atm 的外部氫壓及室溫條件下，固溶氫之計算值約 0.01~0.02ppm<sup>[6]</sup>。

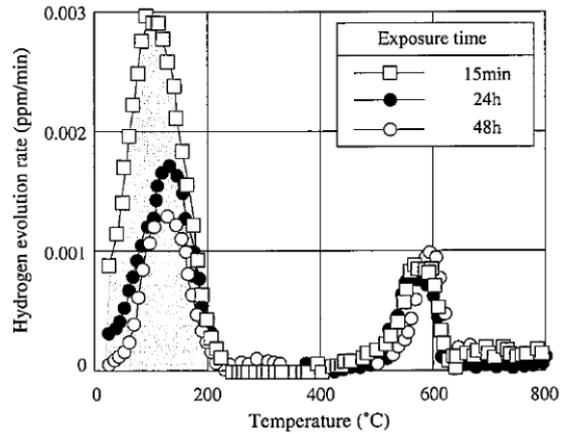


圖 3. 儲存於試片中的氫原子形式

Fig. 3 Effect of exposure time in air at room temperature after hydrogen charge on hydrogen evolution curves as obtained by thermal analysis of hydrogen-charged specimens

假若金屬內部出現缺陷(如圖 4<sup>[7]</sup>)，缺陷尖端周圍會產生一應力場，此應力場分別為“外加應力與殘留應力的應力和”及“基材整合力”，因整合力大故缺陷裂縫不會成長；當材料內部出現氫原子時，使缺陷尖端的應力場發生變化，其“外加應力及殘留應力的應力和”會多增加了氫引發之應力，此時基地整合力也會因吸氫而減弱，兩種應力不平衡而造成缺陷裂縫擴張。這些缺陷包括有晶格中之晶界、差排、第二相及材料內部孔洞等，其與氫間之鍵結能亦有文獻研究，其中殘留沃斯田鐵之鍵結能約 40.4 kJ/mole，麻田散鐵或變韌鐵界面鍵結能約 28.1 kJ/mole，差排之鍵結能約 19.2 kJ/mole，微孔之鍵結能約 27.6 kJ/mole<sup>[8]</sup>。

本研究之目的即為探討高週波淬火條件參數，對 CSC 15B22 防撞鋼管用鋼機械性質、硬度及抗延遲破裂性的影響。

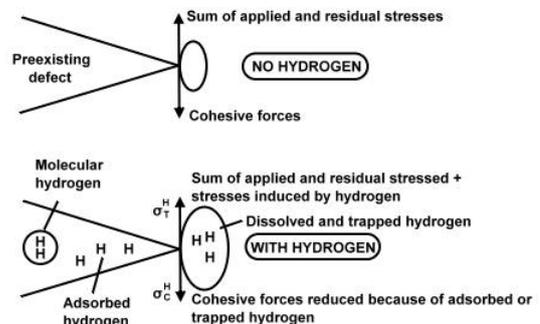


圖 4. 氫在金屬內部缺陷造成之效應

Fig.4 Effects of hydrogen on preexisting defects<sup>[7]</sup>

## 2 實驗方法

本研究使用之素材為中鋼現場煉鑄之 15B22 熱軋鋼捲，其為典型之 MnB 鋼 (0.22C-1.2Mn-22ppmB 並添加 Cr, Ti)。其經過 ERW(Electric Resistance Welding) 製成 31.8mm\*2.0 mm 鋼管，再透過不同高週波加熱淬火條件，以獲得全淬火之麻田散鐵組織。這些不同淬火條件參數如表 2 所列，淬火溫度 (850/900/950/1000 °C)、升溫速率 (400/800 °C/s)，高週波加熱頻率固定於 300kHz。熱處理後之 500mm 長鋼管進行拉伸試驗，比較不同條件淬火鋼管之拉伸強度、降伏強度及伸長率性能。此外，也對鋼管截面作 Hv 硬度量測，瞭解硬度分佈狀況。熱處理後之晶粒尺寸變化則利用 OM 觀察，並觀察組織是否完全變態。防撞鋼材之延遲破裂性能則參照 NSC 評估法，先將恆應力試片浸泡於 5%HCl 溶液後，迅速於定荷重(選定為降伏應力)下進行延遲破裂評估。此外，亦利用電化學充氫及電鍍鎳方法，將恆應力試片充入不同量的氫原子且防止氫原子從試片之表面擴散出，同樣地於降伏應力下觀察防撞鋼材發生延遲破裂時之最大允許氫含量。氫含量以 LECO DH603 氫分析儀來分析。

表 1 不同感應加熱淬火條件參數

Table 1 Various induction heating parameters

Quenching Temp.	Heating rate	
	400 °C/s	800 °C/s
850 °C	A	E
900 °C	B	F
950 °C	C	G
1000 °C	D	H

## 3 結果與討論

### 3.1 鋼管素材組織及性能

圖 5 為 ERW 銲接 15B22 鋼管之素材金相組織，其為典型的肥粒鐵及波來鐵熱軋組織。圖 5 也顯示素管表面有約 20 μm 之脫碳層，判斷是由熱軋製程時所產生的。素管材未經熱處理前之硬度約 HRB 91-93、降伏強度約 592MPa、抗拉強度約 676MPa、伸長率約 20%。

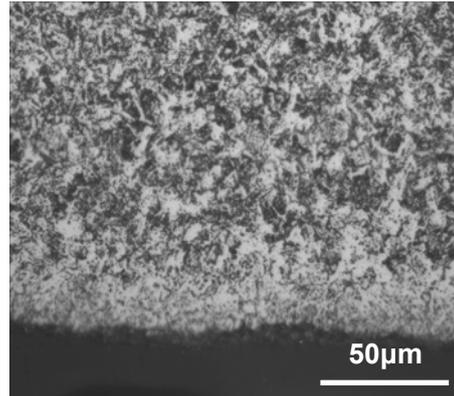


圖 5 ERW 銲接 15B22 鋼管之素材金相組織

Fig. 5 Optical micrograph of as-received 15B22 steel tube

### 3.2 拉伸性質及管厚硬度分佈

圖 6 顯示 Φ31.8mm x 2.0mm CSC 15B22 防撞鋼管經 300kHz 不同高週波淬火製程所得之鋼管拉伸性能。圖中結果顯示，高週波淬火後鋼管強度及伸長率等性能皆符合基本要求—降伏強度 ≥ 1180MPa，拉伸強度 ≥ 1470 MPa，伸長率 ≥ 6%。由於高週波淬火處理具有急速加熱 (400 °C/s/800 °C/s) 高壓噴水冷卻等優點，熱處理後所得之淬火麻田散鐵組織非常細緻，故拉伸性能表現皆優越於一般熱處理所得之基本性能。從拉伸性能趨勢看來，15B22 鋼材於 900 °C 上進行淬火處理能達到強度之最高峰值，加熱至 1000 °C 則有強度削弱現象，較慢速加熱速率下此現象較為明顯。伸長率性能皆大於 12%，無明顯趨勢分佈。

圖 7 為 15B22 鋼管之截面硬度分佈。不同的淬火條件中，防撞鋼材於 900 °C 上溫度淬火之硬度達一穩定值 (≥HV500)；而 850 °C 火鋼材硬度則偏低，且硬度由鋼管表面向管內逐漸遞減，此現象於高升溫速率 (800 °C/s) 下越明顯。

### 3.3 淬火組織及先前沃斯田鐵晶粒觀察

圖 8 為 CSC 15B22 鋼管高週波熱處理後之 TEM 及 OM 組織照片。圖中顯示，熱處理鋼管呈現典型的淬火態低碳板條狀麻田散鐵，麻田散鐵基地中存在大量相變差排且無任何回火碳化物或殘留碳化物出現。由低倍率 OM 圖可知，經高週波淬火所得之麻田散鐵組織極細緻，故鋼管之拉伸性能表現極佳 (強度及伸長率)。此也說明了 2.0mm 鋼管雖然部分硬度未達到硬度要求，其強度仍能超過基本要求。

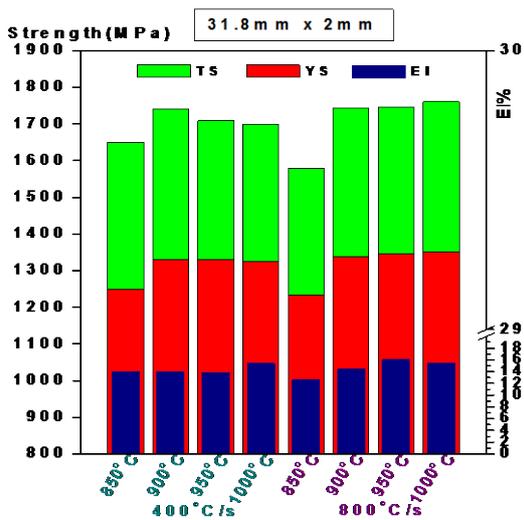


圖 6 不同高週波淬火製程所得之防撞鋼管拉伸性能  
Fig. 6 Tensile properties of induction heated and quenched 15B22 at various induction heating conditions

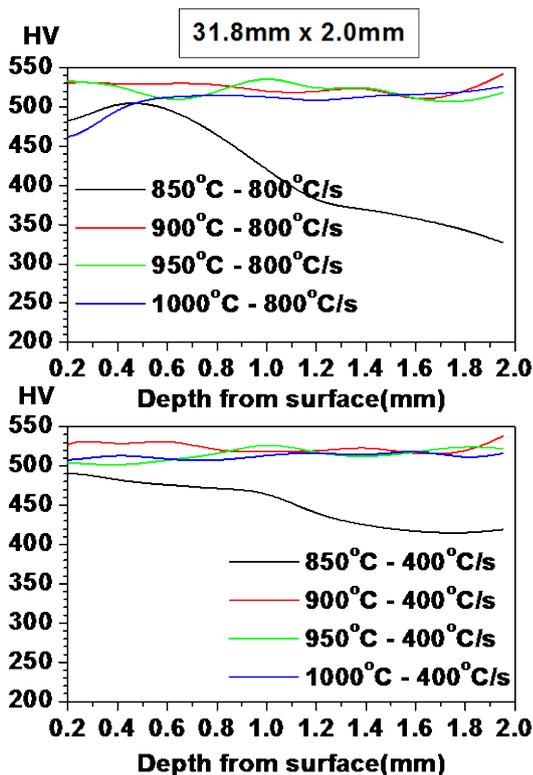


圖 7 15B22 鋼管之截面硬度分佈。

Fig. 7 The hardness distributions of various induction quenched 15B22 door impact beams in the cross section direction.

圖 9、10 為 15B22 鋼管於各淬火條件熱處理後之原先沃斯田鐵晶粒尺寸變化。隨淬火溫度越高及升溫速率越慢，原先沃斯田鐵晶粒則越大。溫度的影響比升溫速率的影響明顯，乃

因高週波感應加熱速率極快速所致。也使得高週波加熱淬火之晶粒尺寸較一般傳統爐淬火小，約 2.5~8 $\mu$ m。因此，高週波淬火後鋼管伸長率高( ) 抗拉强度高( )。

### 3.4 拉伸破斷面觀察

圖 11 為 CSC 15B22 淬火鋼管經拉伸試驗後之破斷形貌。結果顯示斷面皆呈延性之凹窩組織，由凹窩組織之尺寸及凹窩深度可推知此鋼料為高強度及延韌性佳之材料。

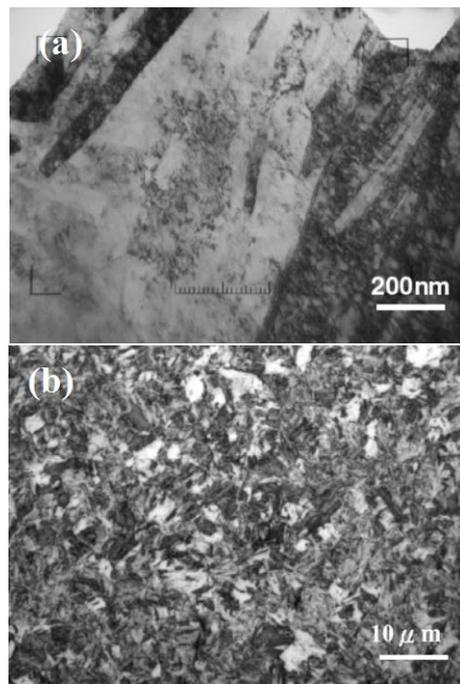


圖 8 CSC 15B22 鋼管高週波熱處理後之 (a)TEM 及(b)OM 照片。

Fig. 8 Microstructures of induction quenched CSC 15B22 : (a)TEM and (b)OM 。

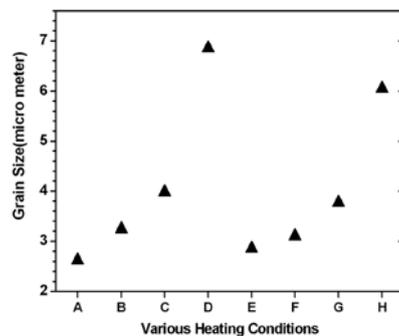


圖 9 15B22 鋼管於各淬火條件熱處理後之原先沃斯田鐵晶粒尺寸變化。

Fig.9 The variation of prior austenite grain size of quenched 15B22 steel tubes on various induction heating conditions.

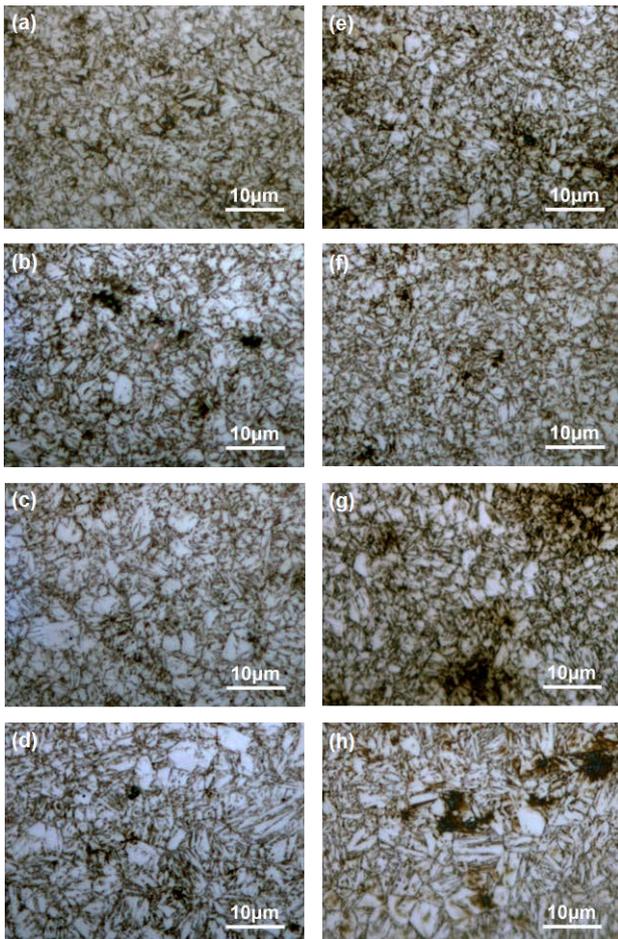


圖 10 15B22 鋼管於各淬火條件熱處理後之先前沃斯田鐵晶粒照片。  
Fig.10 The micrographs of prior austenite grain sizes of various condition quenched 15B22 steel tubes.

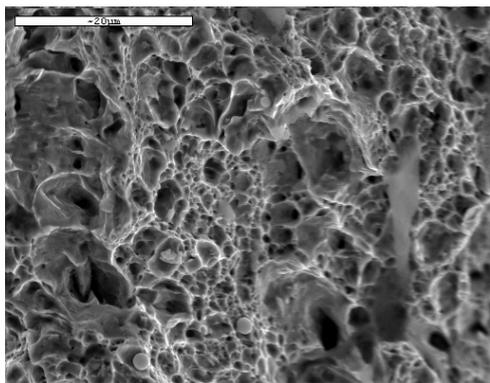
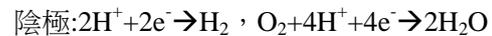
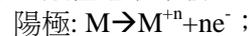


圖 11 CSC 15B22 淬火鋼管經拉伸試驗後之破斷形貌。  
Fig. 11 the fracture morphology of 15B22 steel tube by induction quenching.

### 3.5 防撞鋼樑延遲破裂性能評估

圖 12 為 NSC 延遲破裂評估的方法<sup>[9]</sup>，將鋼材加工成缺口試片，其應力集中因子為 4.6，於室溫下浸泡至 5% HCl 溶液中 30 分鐘，之後

迅速將之架設於恆應力試驗機上進行恆應力拉伸試驗，觀察不同應力下試片是否有斷裂的情形。酸性溶液中發生了以下反應：



恆應力試驗結果顯示，高週波熱處理之 CSC 15B22 鋼材於降伏應力下經 3 個月仍未斷裂，說明此鋼料之抗延遲破裂性能佳。

為定量出 15B22 防撞鋼材於降伏應力下發生延遲破裂之臨界氫含量，本實驗將電化學試驗及恆應力試驗結合，利用電化學陰極充氫將氫充入恆應力試片中，並用電鍍鎳將氫保護於試片中於降伏應力下觀察是否發生延遲破裂。實驗所用之電解液為 0.1N 之硫酸溶液，於  $10\text{mA}/\text{cm}^2$  之電流密度下將試片置於陰極進行電化學充氫，陰極發生了  $H^{+} + e^{-} \rightarrow H_{\text{adsorption}}$  反應。此外，為使氫滲入試片內的效果提昇，電解液中添加了微量之氧化砷(砒霜  $As_2O_3$ )來抑制氫原子結合成氫氣。

圖 13 為 15B22 鋼材吸/釋氫曲線。結果顯示 CSC 15B22 鋼材經電化學充氫 30 分鐘後達 4.3ppm 飽和氫含量。而圖(b)釋氫曲線可知，氫原子於室溫大氣中會不斷從鋼材中釋放出來，經 24hr 後，試片中的氫原子幾乎全部釋放出來，僅剩 0.68ppm。說明了淬火態的 15B22 鋼材內並無捕捉氫原子的高能量陷阱，使得電化學充入的氫原子皆為可擴散氫。

結合充氫/電鍍及恆應力拉伸試驗方法，將恆應力試片充入不同氫量(1.44 / 2.45/ 3.73/ 4.3ppm)並電鍍一鎳層以防止氫釋出試片，施予降伏應力拉伸，觀察 100 小時內試片是否發生脆斷。試驗結果發現充入 4.3ppm 氫於試片中，於降伏應力下試片會發生斷裂，經 SEM 觀察斷面結果顯示皆呈脆性的劈裂面形貌，如圖 14 所示。然而，若含氫量  $\leq 3.73\text{ppm}$  之試片，於降伏應力下作恆應力試驗 100 小時皆不發生斷裂。由此說明 CSC 15B22 淬火鋼材於降伏應力作用下鋼材內部允許之氫含量可達 3.73ppm 而不發生氫脆。

## 4 結論

(1) CSC 15B22 經過適當的高週波淬火處理，硬度可穩定達到 HV500 以上，抗拉強度範圍約 1600-1760MPa，伸長率 14-16%，可以充分滿足車門防撞鋼樑之拉伸性質及硬度要求。高週波淬火後之組織以淬火麻田散鐵為主，其先前沃斯田鐵晶粒尺寸  $2.5\text{-}8\mu\text{m}$ ，拉伸後破斷面皆為延性凹窩組織，顯示具有優良延性。

(2)採用 NSC 延遲破裂評估試驗證實 CSC 15B22 防撞鋼樑具有優良之抗延遲破裂性能。透過電解充氫法及恆應力試驗，定義出降伏應力下 15B22 鋼材發生延遲破裂現象之臨界氫含量為 3.73ppm。也發現防撞鋼樑組織無高能量之氫陷阱，故侵入之氫皆為擴散氫，得注意鋼材使用環境。

**參考文獻:**

[1] Moto Sato, Yukihiro Utsumi and Kenichi Watanabe, R&D Kobe Steel Engineering Reports, vol. 57 No.2 (Aug. 2007), pp. 23-26.  
 [2] Hiroto Tanabe and Kazumasa Yamazaki, United States Patent no. 5181974, Jan. 26, 1993.  
 [3] <http://www.thefabricator.com/>  
 [4] G. E. Totten, G. R. Garsombke, D. Pye, and R. W. Reynoldson, Steel Heat Treating Handbook, eds. G. E. Totten and M. A. H. Howes, 1997, Marcel Dekker, Inc., New York, NY, p. 795-800.  
 [5] Shingo YAMASAKI, Manabu KUBOTA and Toshimi TARUI, Nippon Steel Technical Report No. 80, July 1999, pp. 50-55.  
 [6] Kiuchi, K. and McClellan: Acta Metall., Vol. 31, 1983, p. 961.  
 [7] A. W. Thompson and I.M. Berstein, Ed., TMS-AIME, 1980, p 291.  
 [8] J.L.GU, K.D. Chang, H.S.Fang and B.Z. Bai, ISIJ International, vol. 42(2002), no. 12, pp. 1560-1564.  
 [9] H. Tanabe, A. Miyasaka, K. Yamazaki, T. Iwasaki and H. Akada, Nippon Steel Technical Report No. 64, January 1995, pp. 55-61.

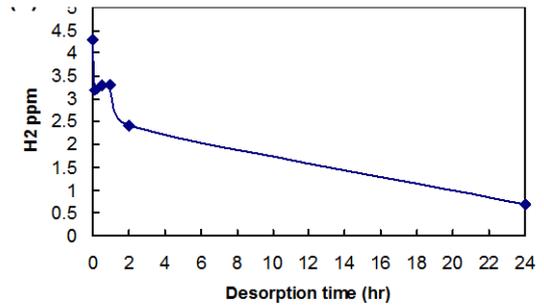
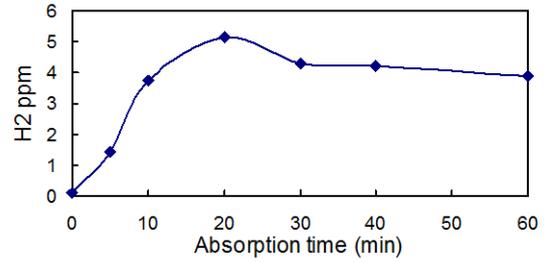


圖 13 15B22 鋼材吸/釋氫曲線。  
**Fig.13 (a) The hydrogen absorption curve and (b) the hydrogen desorption curve of quenched 15B22 steel by an electrochemical charging and an atmosphere discharging.**

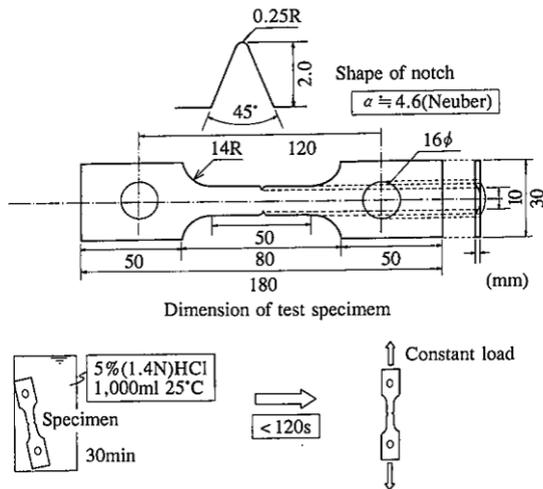


圖 12 NSC 延遲破裂評估的方法<sup>[9]</sup>  
**Fig.12 Schematic illustration of the NSC delayed fracture test<sup>[9]</sup>**

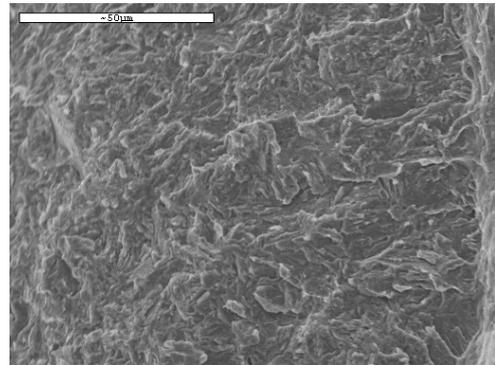


圖 14 充氫 4.3ppm 試片之恆應力拉伸破裂面照片  
**Fig. 14 The fractography of the constant load tested specimen with 4.3ppm of hydrogen.**