

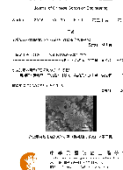


防蝕工程學會

防蝕工程

期刊網址：<http://www.anticorr.org.tw>

防蝕工程



10.6376/JCCE.201803_30(1).0001

氫擴散行為對高強度鋼材氫誘發延遲破裂之影響研究 Effect of Hydrogen Diffusion Behavior on Hydrogen-Induced Delayed Fracture of High Strength Steels

吳宗峯*¹、秋山英二²

Tsung-Feng Wu*¹, Eiji Akiyama²

摘要

對 9254 高強度彈簧鋼材而言，於 550°C 回火溫度下、不含釩之鋼材(9254-85)反較含釩鋼材(9254V-85)具有更高的延遲破裂臨界氫含量值。為解釋此一現象，本研究利用氫滲透試驗法(hydrogen permeation test)，探討氫擴散行為對高強度鋼材氫誘發延遲破裂之影響。試驗結果顯示，對 9254V-85 而言，氫由充氫端表面通過試片擴散至氧化端表面之時間(t_b)遠大於 9254-85，而飽和充氫電流密度($i_{H,\infty}$)遠小於 9254-85。亦即在無施力、可排除材料強度之因素下，9254V-85 中生成之 VC 析出物阻礙氫的擴散，導致氫的擴散速度較慢，且具有明顯之吸氫能力，使飽和充氫濃度降低，由此確認了 VC 析出物擁有額外之吸氫能力，而提升發生延遲破裂之臨界氫含量。然相較於不含釩的 9254 鋼材，前者因具有較高之抗拉強度，差排密度較高，拉伸過程中於差排附近聚集之氫原子隨差排移到至晶界處，而使延遲破裂發生所需之臨界氫含量降低，而上述兩者之因素之能力強弱，決定了 9254 高強度彈簧鋼材之氫誘發破裂敏感性優劣。

關鍵詞：9254 高強度彈簧鋼；氫滲透試驗；氫擴散行為；氫誘發延遲破裂。

Abstract

For 9254 high strength spring steels temper treated at 550°C, the steel without V-addition (9254-85) owns higher hydrogen threshold of delayed fracture than that with V-addition (9254V-85). In order to explain the above result, the effect of hydrogen diffusion behavior on hydrogen-induced delayed fracture of high strength steel was evaluated by hydrogen permeation test. The experimental results show that 9254V-85 owns longer t_b , which is the

收到日期：2017 年 7 月 15 日

修訂日期：2017 年 9 月 14 日

接受日期：2018 年 3 月 1 日

¹ 中國鋼鐵股份有限公司鋼鐵研究發展處，台灣

¹ Iron and Steel R&D Department, China Steel Corporation, Taiwan

² 東北大學 金屬材料研究所，日本

² Institute for Materials Research, Tohoku University, Japan

* 聯絡作者：152140@mail.csc.com.tw

time passing through the thickness of the steel, demonstrating a lower hydrogen diffusion rate. 9254V-85 also has a lower maximum hydrogen current density ($i_{H,\infty}$) than 9254-85. Both of the above were resulted in the effect of the formation of VC precipitation. VC precipitation owns extra hydrogen-trapped ability therefore promoting the threshold is thus confirmed. For 9254V-85, the threshold can also be lower due to its higher tensile strength. Higher strength makes more hydrogen move to the grain boundary because of a high dislocation density. The susceptibility of delayed fracture was determined to the competition of the positive effect on the increase of threshold from the hydrogen trap ability due to VC precipitation and the negative effect from higher strength stress of the vanadium containing steels with 550°C tempering temperature.

Keywords: 9254 high strength steel; Hydrogen permeation test; Hydrogen diffusion behavior; Hydrogen-induced delayed fracture.

1. 前言

於先前的研究中^[1]發現：於相同 550°C 回火熱處理下，不含釩之 9254 彈簧鋼材(9254)，其氫誘發破裂臨界氫含量值(H_c^*)反較含釩 9254 彈簧鋼材(9254V)為高(2.5 ppm vs. 1.9 ppm)，如圖 1 所示，推測於此回火溫度下，釩的添加雖可使鋼材生成擁有具額外吸氫能力之 VC 析出物，有助於提升發生氫脆之臨界氫含量，但亦因為釩的添加而使鋼材具有較高之抗拉強度，亦會使得氫脆發

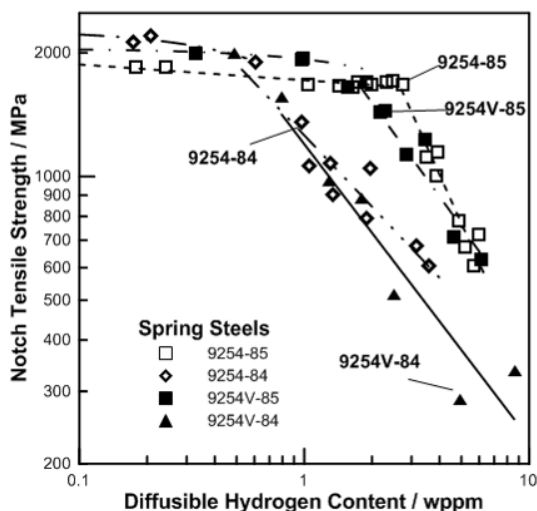


圖 1. 不同熱處理之 9254/9254V 鋼材發生斷裂之應力值與其氫含量間之雙對數關係圖^[1]。

Figure 1. Double logarithmic diagrams of FNS vs H_c of different thermal treated 9254/9254V spring steels^[1].

生所需之臨界氫含量降低，而上述兩者之因素之能力強弱，決定了 9254V-85 與 9254-85 之氫誘發破裂敏感性優劣。為驗證此一理論，於本研究中嘗試利用熱處理溫度的改變，使得 9254 及 9254V 具有相近的抗拉強度，且後者有 VC 析出物生成之條件下進行氫誘發破裂敏感性之試驗。

此外，為了進一步從學理上探討析出物對鋼材氫誘發破裂性質之影響，以下進行氫滲透試驗，將可得知不同熱處理鋼材中氫之有效擴散係數、滲透速率，以及捕集密度。此外，亦將藉由改變不同外加充氫電流密度及充氫溶液，探討此兩種因素對鋼材氫滲透電流密度之影響，並嘗試以此結果來解釋於不同充氫條件下、鋼材內部可擴散氫行為，以及對其氫誘發破裂敏感性之影響差異。由於氫滲透試驗乃為試片於靜態下進行，可用以探討 9254/9254V 鋼材於無施力、可排除材料強度之因素下，鋼材中有無 VC 析出物對於阻礙氫擴散行為之影響。

2. 實驗方法

2.1 材料及熱處理

本研究中所採用之 9254 高強度彈簧鋼，其合金成分分析結果如表 1 所示。其中 9254V 較 9254 而言，多添加了約 0.17% 的 V，而其他的合金成分大致相同。

表 1 9254 高強度彈簧鋼之編號及其化學組成。

Table 1 The designation and its chemical composition of 9254 spring steels used.

Designation of specimen	C	Si	Mn	P	S	N	Al	Cr	V
9254	0.54	1.46	0.70	0.008	0.003	0.0035	0.033	0.64	0.001
9254V	0.55	1.37	0.73	0.013	0.004	0.0056	0.041	0.65	0.168

unit: wt%

自現場取得之盤元為球化材，材料經矯直後切段，本研究中之氫誘發破裂敏感性評估部分，僅針對 9254V 高強度彈簧鋼進行較高之回火溫度條件，此為 880°C/60min 沃斯田鐵化+油淬，再進行 600°C/120 min 回火熱處理+水淬，稱此試片為 9254V-86，以利與先前研究中回火溫度為 400°C 之 9254/9254V-84 與回火溫度 550°C 之 9254/9254V-85 進行比較。而氫滲透試驗則針對 9254/9254V/84、85 等四種條件進行評估。

2.2 氫誘發破裂敏感性評估試驗法

此部分乃參照先前^[1]之研究方式，利用對環狀缺口圓棒試片進行充氫後，再以傳統之拉伸測試法(conventional stain rate testing, CSRT)進行拉伸，以得到不同充氫條件後所需之破斷應力，再利用昇溫脫離法(Thermal desorption spectrometer, TDS)進行該鋼材之氫含量量測，即可得鋼材發生斷裂之應力值與其氫含量間之關係圖。

2.2.1 試片加工

試棒採用環狀缺口圓棒試片，試棒示意圖如圖 2 所示，直徑 10 mm，長度為 80 mm，於試棒中央部分進行深度 2 mm 之環狀開槽，角度為 60°，而開槽前緣之 R 角半徑為 0.25 mm。

2.2.2 陰極充氫

試片之充氫方式選用電化學陰極充氫法，充氫之電解液包含 0.1M NaOH，以及添加不同濃度 NH₄SCN 之 3 wt% NaCl 溶液，其中 NH₄SCN 為毒化劑，用以增加充氫效率。將試棒放置於配置

好之溶液中，待測試棒為陰極，白金絲為陽極，以兩極式進行定電流密度充氫。充氫完成後將試片洗淨、乾燥，並盡快進行後續拉伸測試。若拉伸試驗與充氫試驗間隔 10 分鐘以上，需先將試片浸置於液態氮中，以避免試棒中之氫逸散。

2.2.3 利用 CSRT 法進行拉伸試驗

其拉伸速率約為 1 mm/min，於此狀況下，拉伸速率夠快，試棒中的氫於拉伸試驗中來不及擴散，每處之可擴散氫濃度為固定，臨界氫濃度即為材料之平均氫濃度。

2.2.4. 利用 TDS 分析鋼材之氫含量

切取已拉斷試片破斷面 10 mm 內之斷面進行可擴散氫含量分析，放置於可量測不同溫度下微量氫含量之 TDS 試驗儀中，自室溫開始，以 100°C/h 之升溫速度升溫至 600°C，並針對室溫升溫至氫含量快速降至 0 溫度時，其氫釋放速率曲線下的面積進行積分，即可得出此充氫條件下之臨界可擴散氫含量(H_{CSRT}=H_C)。

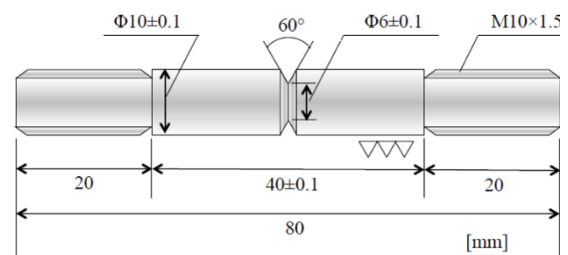


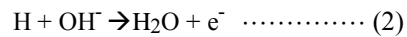
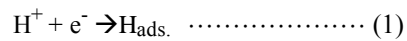
圖 2 環狀開槽試棒之示意圖。
Figure 2 Schematic diagram of a circumferentially notched round bar specimen.

2.3. 氫滲透試驗

由圖 1 斷裂之應力值與其氫含量間之雙對數關係圖中，可發現兩者於轉折點後之圖形呈現線性負相關，亦即 $\log y = a - n \log x$ ，表示斷裂應力值與鋼材內之可擴散氫含量呈現冪次法則(power law)關係，其一顯示鋼材內之可擴散氫含量愈多，發生破裂所需之臨界應力值愈低，再者顯示最大理論斷裂應力值與可擴散氫含量間為擴散所控制主導，應與氫於該鋼材內之擴散係數大小相關。

故以下嘗試利用氫滲透試驗，以所得之擴散係數值，探討鋼材擴散係數與臨界氫含量間之關連性。試驗依據 ASTM G148 規範^[2]進行，裝置示意圖如圖 3 所示，包含左側之外加陰極定電流之充氫半電池(charging cell, entering side)、右側之外加氧化定電位之氧化半電池(oxidation cell, detecting side)，以及兩者之間之待測試片(sample)所組成。由充氫端使氫離子經由電化學方式在試片表面形成吸附之氫原子($H_{ads.}$)，之後再擴散進入金屬基材(式(1))，並在氧化端離開時藉由氧化半

反應產生氧化電流(式(2))，由所得之結果可進行氫原子有效擴散係數之計算。氧化半電池裝置的環境建議為 0.1 M NaOH 溶液(式(2))，充氫半反應環境則與 2.2.2 之充氫溶液相同，而電位設定需另進行極化曲線，並觀察其鈍化範圍再進行決定。



此外，不同充氫溶液對其氫擴散行為之影響亦於本研究中進行探討。將試片置於特定溶液下，自外加較低陰極電位開始，待所反應之氧化端已達飽和氫滲透穩定電流值後，再提高其外加之陰極電位值，並重複上述步驟，由此即可獲得該材質於特定溶液下、不同外加陰極電位之飽和氫滲透穩定電流密度值，並以此結果探討與氫擴散性質間之關連性。

3. 結果與討論

3.1 材料機械性質量測結果

9254/9254V 彈簧鋼材經不同熱處理後之機械性結果如表 2 所示，由結果得知有無添加 V 之兩種 9254 彈簧鋼經 400°C 回火後之抗拉強度差異不大(2017 MPa vs. 1959 MPa)；然經較高溫回火溫度(550°C)處理後，含 V 之 9254V 於此溫度下已有 VC 之析出^[3]，於拉伸過程中阻礙差排之移動而導致較 9254 具有較高之抗拉強度(1368 MPa vs. 1194 MPa)。當回火溫度更高時(600°C)，因晶粒尺寸增大造成之強度下降抵銷掉因 VC 析出所造成之強度增加量，此時 9254V-86 之抗拉強度與 9254-85 相當(1194 MPa vs. 1222 MPa)，故以下可利用此兩種試樣來進行 VC 析出物對其氫誘發破裂敏感性之評估，而排除掉材料強度對其性質之干擾。

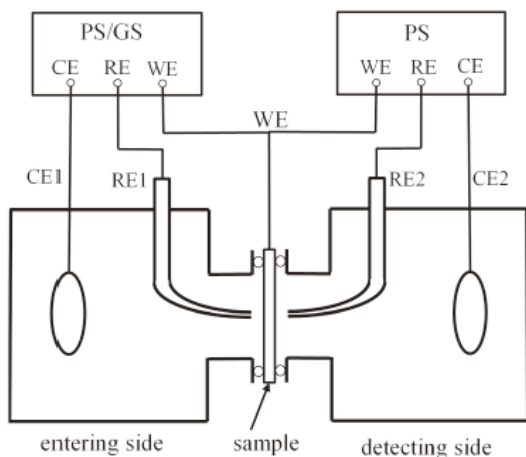


圖 3 ASTM G148 氫滲透試驗裝置之示意圖。
Figure3 Schematic diagram of hydrogen permeation test in accordance with ASTM G148.

表 2 9254 及 9254V 經不同淬回火熱處理條件後之機性量測結果。

Table 2 Mechanical properties of 9254 and 9254V spring steels with different thermal treatments.

	TS(MPa)	YS(MPa)	Elongation(%)	Reduction of Area(%)
9254-84	2017	1808	18.04	50.54
9254-85	1194	1028	11.20	43.39
9254V-84	1959	1749	11.76	51.77
9254V-85	1368	1258	10.80	36.77
9254V-86	1221	--	--	45.59

3.2 VC 析出物對氫誘發破裂敏感性之影響

圖 4 為五種不同回火熱處理後之 9254/9254V 彈簧鋼材發生斷裂之應力值與其氫含量間的關係圖，其中，9254-V86 之”氫含量-應力值”轉折點出現於氫含量為 4.1 ppm 時，明顯均較上述經 400°C、550°C 之 9254 及 9254V 鋼材之值為高。對於此 9254V 鋼材而言，於 600°C 回火溫度下(9254V-86)，

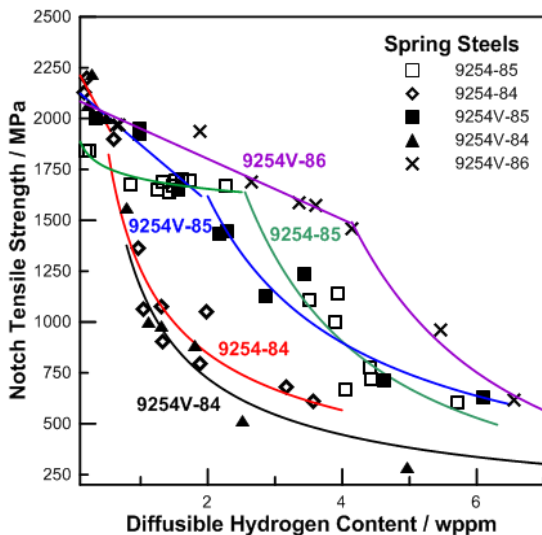


圖 4 不同熱處理之 9254/9254V 鋼材發生斷裂之應力值(NTS)與其氫含量(HC)間之關係圖。

Figure 4 Diagrams of NTS vs HC of different thermal treated 9254/9254V spring steels.

應與經 550°C 回火處理之鋼材(9254V-85)一樣，已有明顯之 VC 析出物生成，唯前者較高回火溫度之鋼材強度較後者為低，但此 9254V-86 與不含鈮、回火溫度為 550°C 之鋼材(9254-85)，則具有相近之強度。進一步再與以兩兩鋼種進行比對，嘗試探討強度與析出物對其延遲破性敏感性之影響。

9254V-85 vs. 9254V-86：兩者均有 VC 析出，然前者 TS 較高，其 Hc*明顯較低(2.5 vs. 4.1 ppm)，顯示 TS 的增加會造成 Hc*值降低，此結果與先前於不含鈮的鋼材中結果一致。

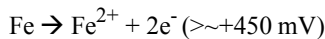
9254V-86 vs. 9254-85：兩者之 TS 相近，唯前者有 VC 析出，其 Hc*明顯較高之原因乃因 VC 析出導致額外之吸氫量，而使得 Hc*值增加。

由以上的討論中，已可清楚鑑別材料強度與 VC 析出物對鋼材發生沿晶破壞之臨界氫含量值之影響。其中，材料強度增加造成 Hc*下降，而 VC 析出物擁有額外的吸氫能力造成 Hc*增加，而此兩種變因之消長導致臨界 Hc*之差異。以 9254-85 vs. 9254V-85 之比較而言，兩者經相同之回火溫度後，後者因 VC 析出所造成之 Hc*值的提升效果，不及因 TS 上升造成之 Hc*下降之程度，故造成後者雖有 VC 析出物之生成，其臨界氫含量值仍較前者為低之結果。

3.3 氫滲透試驗結果

3.3.1 氫擴散係數與氫誘發延遲破裂間之關連性

於進行氫滲透試驗時，所選用之外加陽極電位需確保將擴散至氧化端的氫全部電解成離子，亦必須避免鐵發生電解反應，下列反應不能發生。



因此，外加之陽極電位除需在上述反應電位之下，並落於鈍化區範圍內，因此，需先針對材料於氧化端之 0.1 M NaOH 溶液中之電化學行為進行先期瞭解。

圖 5 為經不同回火處理之 9254/9254V 鋼材於 0.1M NaOH 溶液中之極化曲線圖，圖中顯示於 -0.2 V ~ 0.7 V vs. Hg/HgO 之電位範圍內出現明顯之鈍態區，且不同材料間之差異不大。故選用 0.1 V vs. Hg/HgO 為適合之氧化端外加陽極電位值。

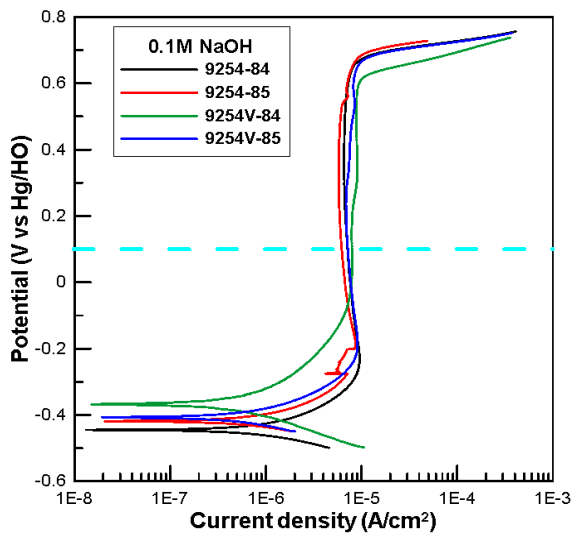


圖 5 不同熱處理之 9254/9254V 鋼材於 0.1M NaOH 溶液中之極化曲線圖。

Figure 5 Polarization curves of different thermal treated 9254/9254V spring steels in 0.1 M NaOH solution.

氫滲透試驗中之有效擴散係數(D_H)可利用 $t_L=0.63i_{H,\infty}$ 或 t_b 值來進行計算， t_L 及 t_b 值之定義如圖 6 所示。其公式分別為 $D_H = L^2 / 6 t_L$ (Time lag

法)及 $D_H = L^2 / 15.3 t_b$ 、 L 為試片之厚度(cm)^[4]。若有效擴散係數愈小，代表氫於此試片中愈不容易通過，亦即於金屬內氫愈不容易進行擴散。一般而言， t_b 值於實務上不易定義，於本研究中採用 Time lag 法來得出氫擴散係數值 D_H (cm^2/s)。

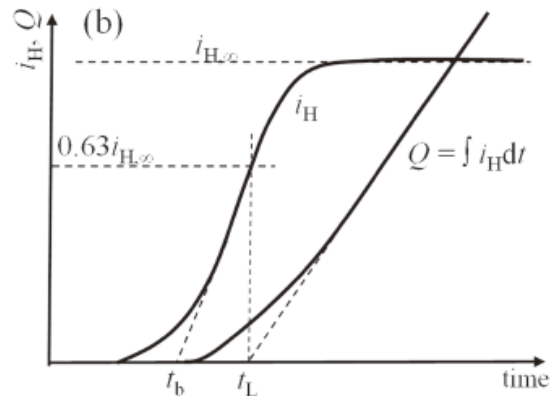


圖 6 不同變因對時間之關係圖， $i_{H,\infty}$ ：飽和氫滲透穩定電流值； Q ：氫滲透之總充氫電荷量； t_b ：突破時間； t_L ：滯滯時間^[4]。

Figure 6 Variation of concentration with time, $i_{H,\infty}$: steady permeation current, Q : amount of permeation charge, t_b : breakthrough time, t_L : lag time^[3].

圖 7 為不同 9254 鋼材於 3% NaCl + 3 g/L NH_4SCN 溶液中、固定外加電流密度(1 mA/cm^2) 下所得之氫滲透電流密度與時間之關係圖。於 t_b 值之結果顯示：9254V-85 >> 9254V-84 > 9254-84 > 9254-85， t_b 值愈大，氫由充氫端表面通過試片擴散之氧化端表面之時間愈長，表示氫的擴散速度愈慢，其中，9254V-85 之結果遠高於其他三者。若以 $i_{H,\infty}$ (飽和氫滲透穩定電流值)進行討論，結果為 9254V-85 << 9254V-84 < 9254-84 < 9254-85。若於相同充氫條件下，若有部分有氫被捕集，則會導致最大飽和氫反應電流值降低，此部分 9254V-85 之值遠小於其他三者。由先前之試驗結果中^[1]，得知 9254V 鋼材於經較高溫之 550°C 之回火溫度下，已有明顯之 VC 析出物生成、而於 400°C 下之析出並不明顯，而 9254 鋼材均無 VC

析出物。由上述 9254V-85 與其他不同熱處理鋼材於 t_b 值及 $i_{H,\infty}$ 具有明顯差異之現象推測，應均為 VC 析出物之析出所致，意謂 VC 析出物阻礙氫的擴散，導致氫的擴散速度較慢，且具有明顯之吸氫能力，而使飽和充氫濃度降低。

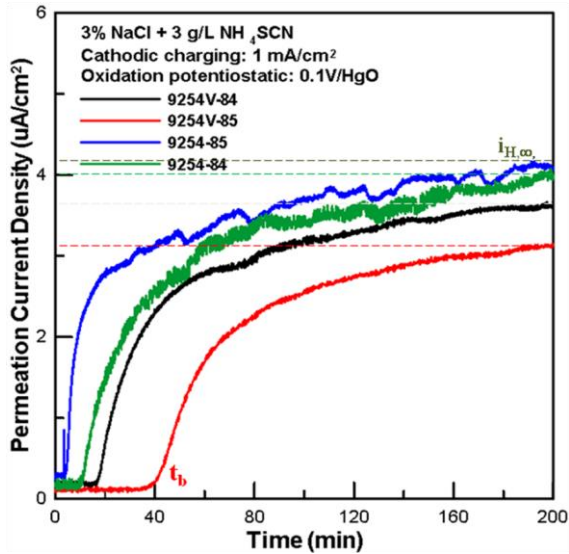


圖 7 不同熱處理之 9254/9254V 鋼材之氫滲透電流密度隨時間變化之曲線圖。

Figure 7 Diagrams of permeation current density vs. time of different thermal treated 9254/9254V spring steels in 0.1 M NaOH solution.

表 3 為將圖 7 之結果，利用 Time lag 法計算後所得之氫有效擴散係數值。由表中得知氫擴散係數由小至大依序為：9254V-85 <<9254V-84 <9254-84 < 9254-85，其結果與 t_b 值之結果一致，對於含 V 之 9254V 而言，550°C 之氫擴散係數明顯低於 400°C，乃因較高溫度時 VC 之析出阻礙

氫的擴散；而於施加相同回火溫度下，V 的添加於較高回火溫度(9254V-85 vs. 9254-85)的 D_H 差異，大於較低回火溫度(9254V-84 vs. 9254-84)，此乃因前者溫度下兩種材料所析出之 VC 析出物數量差異較大所致。由上述之討論中可確認 VC 析出物具有阻礙氫的擴散及捕集氫之效應。

3.3.2 溶液對氫擴散行為之影響

圖 8. 9254-85 鋼材於 3% NaCl + 3 g/L NH_4SCN 溶液中、外加不同陰極電位下所得之氫滲透流密度隨時間變化之關係圖。其中，黑色線表示於不同時間所外加之陰極電位，而紅色線則為於氧化端對應之氫滲透電流密度。分別於不同溶液中進行上述試驗，並擷取於不同外加陰極電流密度下所得之飽和氫滲透穩定電流值繪成圖 9。對相同鋼材而言，於相同充氫電流密度下：隨著 3% NaCl 溶液中 NH_4SCN 添加量之增加(0~3 g/L)，鋼材之飽和氫滲透濃度亦隨之增加，而於 0.1M NaOH 溶液中均較添加 NH_4SCN 之 NaCl 為差，此為溶液對其氫擴散行為之影響；於不同充氫電流密度下：隨著充氫電流密度之增加，飽和氫滲透濃度亦隨之增加，但於極大電流下(5 mA/cm²) 反呈下降，此為外加電流密度之影響，此乃因較大之陰極電流密度於試片充氫端具有較高之氫通量，造成較大之氫擴散驅動力所致，但更高充氫電流下造成 NH_4SCN 型態改變，造成溶液劣化、降低充氫能力。上述溶液與充氫電流密度值對氫擴散性質之結果，與先前^[1]進行試片陰極充氫所得之氫含量結果趨勢完全一致。

表3 不同9254/9254V鋼材於3% NaCl + 3 g/L NH_4SCN 溶液中，經計算所得之氫有效擴散係數值。

Table 3 The effective diffusion coefficients of different 9254/254V spring steels in 3% NaCl + 3 g/L NH_4SCN solution

	L (cm)	t_L (s)	D_H (cm ² /s)
9254-84	0.04	1605	1.66×10^{-7}
9254-85	0.04	804	3.31×10^{-7}
9254V-84	0.04	1754	1.52×10^{-7}
9254V-85	0.04	3169	8.41×10^{-8}

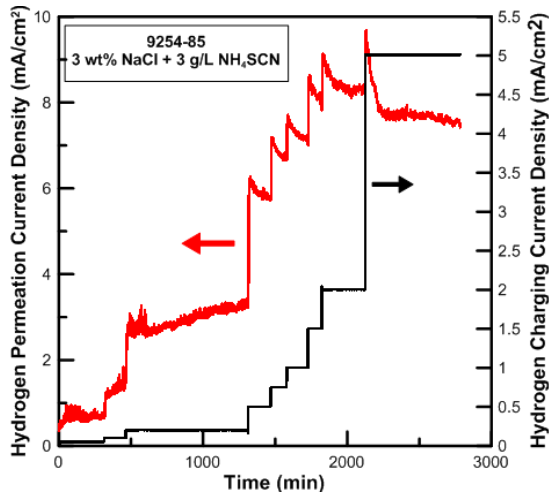


圖 8 9254-85 鋼材於 3% NaCl + 3 g/L NH₄SCN 溶液中、外加不同陰極電位下所得之氫滲透流密度隨時間變化之關係圖

Figure 8 Diagrams of permeation current density vs. time of 9254-85 spring steels in 3% NaCl + 3 g/L NH₄SCN solution with applying various cathodic potential.

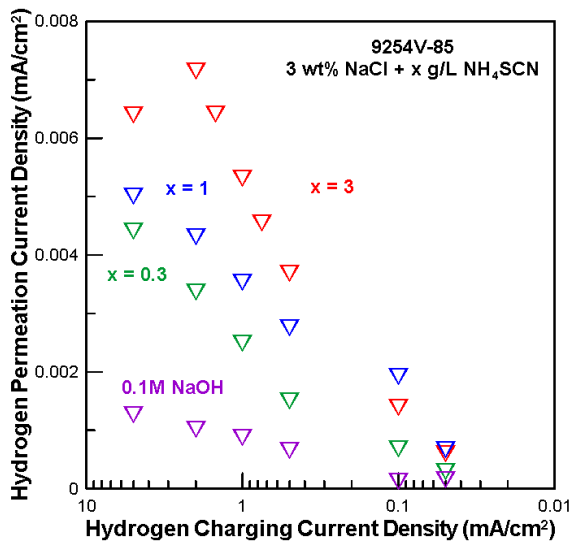


圖 9 9254V-85 於不同溶液中、外加陰極電流密度與飽和氫滲透穩定電流值之關係圖。

Figure 9 Diagrams of applying cathodic current density vs. steady permeation current density of 9254V-85 springs steels in various solutions.

3.4 綜合討論

文獻中^[3]曾利用平滑之棒狀試片，針對 TS=1.7~2 GPa 之 9254 與 9254V 彈簧鋼進行充氫後之 CSRT 測試，其鋼材氫含量與斷裂強度之關係如圖 10 所示。在此高強度下，抗拉強度差異對不含 V 之 9254 鋼材之氫脆臨界破裂含量之影響不大；然而，對含 V 之 9254V 而言，其臨界氫含量值明顯高於 9254 鋼材，此時，VC 的析出有助於降低其氫脆敏感性。對照本研究之結果，9254-84 及 9254V-84 亦均為 2 GPa 等級之強度，但兩者之氫脆敏感性差異不若文獻中明顯，本研究中所使用之沃斯田鐵化溫度為 880°C，較上述文獻之 900°C 為低，而較高之沃斯田鐵化溫度，可增加其固溶程度，而使後續回火處理時，可有較多析出物之生成，推測為此原因造成本研究與文獻結果之相異。

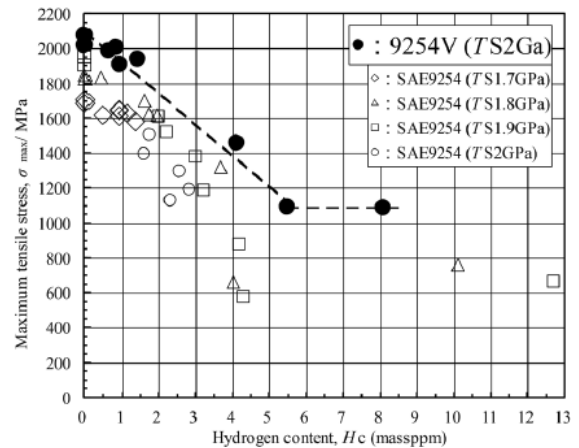


圖 10 抗拉強度為 1.7~2 GPa 之 9254/9254V 經 CSRT 試驗後，所得氫含量與斷裂強度間之關係圖^[4]

Figure 10 Diagrams of Maximum tensile stress vs. H_c of 9254/9254V spring steels with 1.7~2 GPa tensile stress obtain from CSRT tests^[4].

而 9254-85 及 9254V-85，屬於較低抗拉強度之 1.2~1.35 GPa 等級之鋼材，於先前之研究^[1]中

推測含 V 之 9254V-85 之氫脆臨界氫含量較 9254-85 為低的原因，乃前者因 VC 析出造成之材料吸氫能力增加使得氫脆敏感性較低之因素，仍較材料因強度增加所造成氫脆敏感性增加之因素為小所致。此部分已由比對擁有相近抗拉強度、但有/無 VC 析出物試樣之試驗結果(9254V-86 vs. 9254-85)獲得證實，具有 VC 析出物之前者，其 H_c^* 為 4.1 ppm，明顯較後者之 2.5 ppm 為高，顯示於相同之材料強度下，VC 析出物擁有額外吸氫能力之結果即可顯現出來。此外，9254-V86 之 H_c^* 亦較 9254V-85 為高(4.1 ppm vs. 1.9 ppm)，亦可說明於均有 VC 析出物存在的情況下，具較高機械強度之後者會明顯較低其 H_c^* 。

由於氫滲透試驗乃非在拉伸的狀態下進行測試，此時，差排因拉伸狀態而受 VC 析出物阻礙、導致差排移動不易的狀態不復存在，故可將其視為排除材料強度之因素下，單純探討鋼材中有無 VC 析出物對於阻礙氫擴散行為之影響。於試驗結果中顯示出含 VC 析出物之 9254V-85 較無 VC 之 9254-85 而言，具有較小的氫有效擴散係數值與較低的飽和氫滲透穩定電流值，可確認 VC 析出物具有阻礙氫的擴散及捕集氫之效應。此結果再一次驗證 VC 析出物與機械強度均為影響高強度鋼材氫誘發延遲破裂敏感性的重要因素。

4. 結論

1. 對於施加可使 VC 析出之溫度下、具相近抗

拉強度之 9254V-86 與 9254-85 彈簧鋼材而言，當排除機械強度之影響時，則可確認氫的添加可擁有額外吸氫之 VC 析出物，有助於提升發生氫脆之臨界氫含量。

2. 屬於非應力狀態下之氫滲透試驗中，9254V-85 具有最小的氫有效擴散係數、最低的飽和氫滲透穩定電流值，此乃因 VC 析出物阻礙氫的擴散，導致氫的擴散速度較慢，且具有明顯之吸氫能力，而使飽和充氫濃度降低所致。

參考文獻

- [1] “含鈮高強度鋼材之氫誘發破裂敏感性評估研究” 吳宗峯、秋山英二，防蝕工程，第29卷第4期，2016，第173頁。
- [2] ASTM G 148: Standard Practice for Evaluation of Hydrogen Uptake, Permeation, and Transport in Metals by an Electrochemical Technique, 2011.
- [3] “Evaluation of Susceptibility to Hydrogen Embrittlement for Vanadium Added Spring Steel with Tensile Strength of 2 GPa Class”, Masao Hayakawa, Hiroyuki Mizuno, Takeshi Suzuki, Atsushi Sugimoto and Minoru Honjo, Tetsu-to-Hagane, 101 (2015) p.33.
- [4] “Electrochemical Measurement for Hydrogen Entry and Permeation of Steel”, 水流徹，材料と環境，63, (2014) p.3.