

SCM435 鋼製螺栓回火條件與其機械性質相互關係之研究

*成建德¹ 林東毅^{1,2}

¹ 國立高雄大學化學工程及材料工程系 ² 國立高雄大學扣件及鋼鐵技術研究中心

扣件製程中實行熱處理，其目的是為了使材料內部或者表面層的組織發生變化進而達到所預期的機械強度及品質特性。本研究以材質為鉻鉬高強度鋼 JIS SCM435、尺寸 M14、牙距 2.0 的螺栓進行一系列的熱處理，其目的是為了要找出不同回火條件下與其對應的機械性質之間的關係，找出此關係後再利用此關係進行預測或控管製程之動作。本研究開頭先從文獻中找線索，探討最初由 Hollomon 和 Jaffe 所提出的回火關係式，並深究其最原始的關係式的組成元素，而後再實際以實驗數據應用於 Hollomon 和 Jaffe 所提出的回火關係式中，找出其癥結點所在。最後提出一個新的計算回火程度當量的數學模組，此模組與 H-J 方程式的不同點在於 H-J 回火參數所描述的是硬度與回火條件間的間接關係，而本文所提出的數學模組為硬度與回火條件間的直接關係。

關鍵字：SCM435、扣件、H-J 方程式、回火、硬度

1、前言

近年來金屬產業製品對於產品品質的要求與日俱增，而於其中的扣件業也逐漸被重視，扣件產業為我國的隱形冠軍企業，非常具有國際競爭力以及發展潛力。目前，台灣對於需具備高強度、高精度、高抗疲勞、高抗腐蝕能力的扣件（如：核能級、風力發電級、火力發電級等）這些高級數扣件的生產水準及研發能力還尚待考驗。因此，個人認為台灣扣件產業方向不該再重操舊業以“量”為本，而更該往“質”為方向去發展才是永續經營的關鍵之所在。

熱處理製程在扣件生產過程中對於機械強度的貢獻占了絕對重要的地位，為能更精準掌握扣件在熱處理過程中所產生的行為反應，甚至達到預測之效，因此，深入研究並探討在熱處理時所設定的溫度及時間與機械性質之間的相互關係是必要的。本研究之宗旨在於與產業界結合以找出其研究價值，因此，本研究之目的可分成三個重點：(1) 找出量測回火程度當量的方法後，可由既定的回火條件計算出與其對應的機械性質，達到製程管理之目的；(2) 為了達到所要求的機械性質，可以由量測回火程度當量的方法來計算出未知的回火條件，達到預測製程參數之目的；(3) 可利用量測回火程度當量的方法，達到售後服務的成效。例如：產品售出後的時間對於機械性質的影響以及客戶使用環境溫度與時間的影響。

John Herbert Hollomon 和 Leonard D. Jaffe 於 1945 年定量化了回火程度“degree of tempering”【1】使之於一個數學表示式中展現如式 1 所示。

$$M = T(c + \log t) \quad (\text{式 1})$$

式中 M 為 H-J 回火參數，T 為絕對溫度，C 為鋼之常數（此值頗具爭議性），t 為時間單位（可為秒或小時）。同時 Hollomon 和 Jaffe 認為一個期望的回火硬度值可以通過不同的回火途徑，亦即不同的時間及溫度組合來實現。Hollomon 和 Jaffe 為了描述在回火過程中的溫度、時間及硬度的關係，他們假定硬度 H 是 $t \times e^{-Q/RT}$ 的函數，即如式 (2) 所示，

此式可用參數式的描述改寫成式 (3) 【2】。

$$H = f(M) = f[T(c + \log t)] \quad (\text{式 2})$$

$$H = f(t \times \exp^{-Q/RT}) \quad (\text{式 3})$$

H-J 回火參數是一個利用回火的時間及溫度間的關係來量測回火程度當量的方法，且已被使用於廣泛的回火條件，溫度範圍橫跨了 95°C 到 750°C 【3-4】，時間從 0.6 秒到 100 小時之間 【3,5】。H-J 回火參數在實際應用上常被用來當成一軸來使用，如圖 (1) 所示 【1-4,6】。

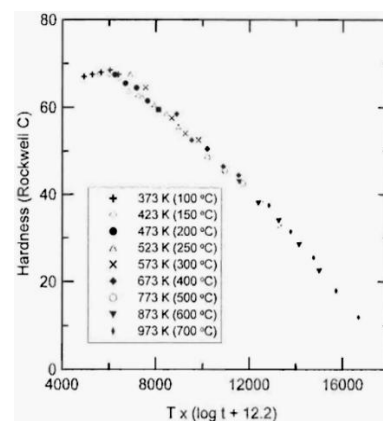


圖 (1) 回火硬度隨 H-J 回火參數變化 【39】

根據 Hollomon 和 Jaffe 的解釋，C 值只會隨著鋼的含碳量變化。然而，Roberts、Grobe 及 Moersh 在其文獻【1】提出了對於 C 值的疑慮“inexplicable variation of C.”。基於 Jaffe、Cohen、Robert 等學者們獨立的商議下，決定將 C 值取平均值，因此，C 值以 20 的數目大小被使用在以小時為單位的 H-J 方程式中。在同一篇文獻【3】中，Cohen 提供了一個在有系統性的改變鋼的化學成份時，C 值無法有一貫性的書面討論。另外，Grange 和 Baughman 【6】發現有四種或以上的因素，使 C 值在一種合金鋼中會隨硬度改變而改變。為了解決 C 值本質的問題，他們選擇一個單一的 C 值，此 C 值至少可以使用在他們的鋼中，這個以不斷的實驗並從中獲

取經驗的法則來選擇 C 值的方法，在文獻上是一種常見的普遍方法，因為其回火的數據可以快速的被互相比較。G.A. Thomas, J.G. Speer, D.K. Matlock, G. Krauss, R.E. Hackenberg 【7】根據 Hollomon 和 Jaffe 所發表的研究中【1】的其中一個實驗數據，嘗試使用圖式法探討 H-J 回火參數的本質，結果顯示 C 值會隨著硬度的改變而改變，因此找出 C 值的變化會比直接強行找出一個固定的 C 值更好，結論為 C 值在 Hollomon 及 Jaffe 的回火參數模組中並無法獲得很好的適用。

2、實驗方法

本次實驗材料為 SCM435、尺寸 M14、牙距 2.0 的螺絲 (已先行球化處理及軋牙成型) 如圖 1.1 所示，使用分光儀測得其實際化學成份如表 1.1 所示。

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
0.34	0.21	0.60	0.015	0.006	0.02	0.93	0.15

表 1.1 本次實驗螺絲實際化學成份 (%)



圖 1.1 M14-P2.00x80 內六角螺絲

圖 1.2 為實驗流程圖，實驗結果將與 H-J 方程式以及新的測量回火程度當量的方法結合探討。熱處理流程參數設定如圖 1.3 所示，此為 SCM435 螺絲的一般生產製程中，為達到 12.9 級的機械強度而設定出的參數。圖中“X”值表示此次研究的回火條件參數設定，回火條件參數設定如表 1.2 所示，此回火溫度範圍屬於第三階段之溫度。此系列回火條件之設定是為了要更精確的找出一般扣件規範中的強度等級區間的硬度變化關係，以最高等級 12.9 級為基準 (此等級硬度為最高故其回火溫度相較於其它級數會較低) 依此向 10.9 及 8.8 級推進，隨著回火溫度逐漸提高，進而從中找出其硬度變化與回火條件之間的關係。

12.9 級、M14 之回火溫度 (最硬，以此溫度為基準)

↓ 10.9 級

↓ 8.8 級

溫度 (°C)	時間 (分)						
460	30	45	60	75	90	105	120
480	30	45	60	75	90	105	120
500	30	45	60	75	90	105	120
520	30	45	60	75	90	105	120
540	30	45	60	75	90	105	120
560	30	45	60	75	90	105	120

15

表 1.2 回火條件參數設定

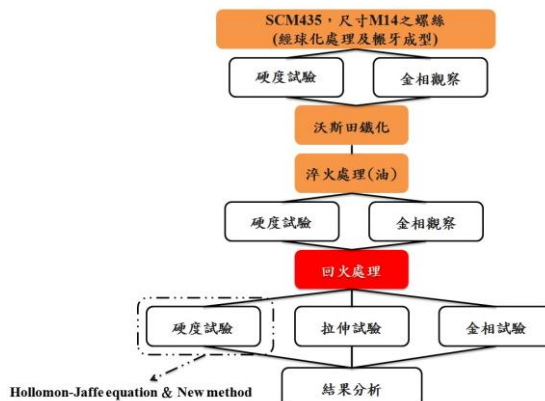
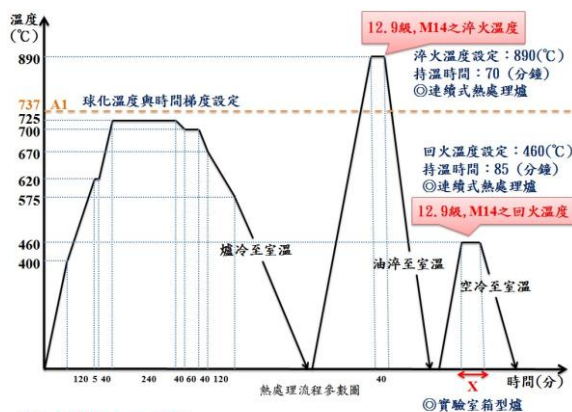


圖 1.2 實驗流程



(X: 本次實驗之回火參數)

圖 1.3 熱處理流程參數設定

3、結果與討論

3.1 金相組織

為了找出回火過程硬度變化的關係，前後熱處理製程參數必須要統一，為了達到此目的所以首先對於製程後的金相觀察是必要的。(一般扣件工廠對於扣件級數規範所要求而設定出的熱處理參數基本上都是固定的，所以可於製程後收集建立金相數據庫)

3.1.1 初始組織 (球化退火)

經過球化後的顯微組織為此研究之初始組織，以 3%Nital 浸蝕，如圖 3.1 所示。圖 3.1 中可觀察到球化碳化物均勻分佈在肥粒鐵基地上。在此初始階段的硬度表現為 95HRB 約等於 16HRC。

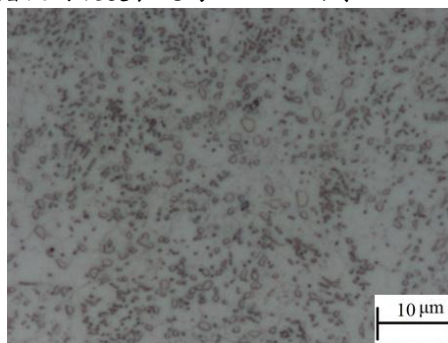


圖 3.1 SCM435 球化組織，3%Nital etching，OM

3.1.2 淬火組織

經過油淬後的組織顯像，先以 1%Na₂S₂O₅ 溶液浸蝕，在光學顯微鏡下的成像如圖-3.2 所示，由此圖中可觀察到大規模的混合物結構，其組成以片狀的麻田散鐵為主，殘留沃斯田鐵、變韌鐵及游離碳化物等次之。在此淬火階段的硬度表現為 52.5HRC。

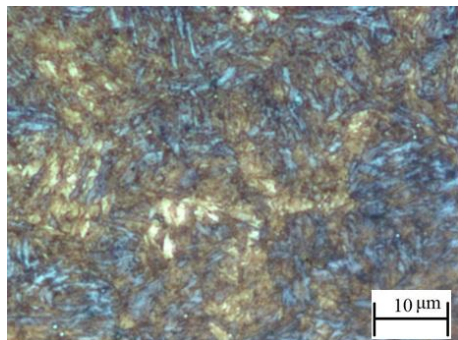


圖 3.2 SCM435 淬火組織，焦亞硫酸鈉溶液 etching，OM

3.1.3 回火組織

圖 3.3 及圖 3.4 為回火金相照片，其回火溫度為 460°C，回火時間分別為 90 及 120 分鐘，由於回火組織較難浸蝕出很好分辨且清楚的組織成像，所以先以 3%Nital 進行預浸蝕，此預浸蝕之目的是要輕微的顯現肥粒鐵晶界及回火麻田散鐵組織，接著，再以飽和 Picral 浸蝕，以飽和 Picral 進行最後浸蝕的目的是要顯現肥粒鐵與雪明碳鐵的交界。由圖 3.3 及圖 3.4 中可發現淬火所造成的麻田散鐵結構經過回火後，形成回火麻田散鐵的型態以及肥粒鐵加碳化物的混合物。在此回火階段的硬度表現會在後續硬度試驗的章節中展現。

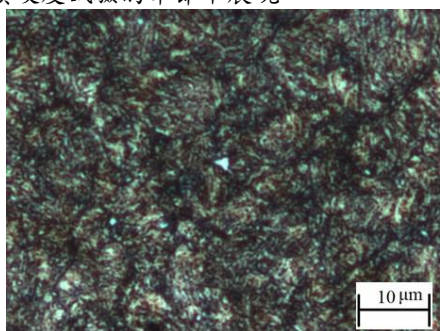


圖 3.3 回火組織，回火溫度 460°C、90 分，OM

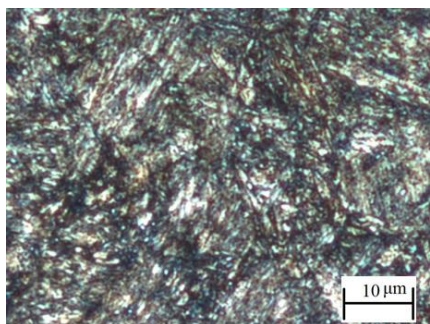


圖 3.4 回火組織，回火溫度 460°C、120 分，OM

3.2 硬度試驗

3.2.1 質量效應

SCM435 鋼製螺栓在不同回火溫度下，回火硬度隨時間的變化如圖 3.5 至圖 3.10 所示，本研究之硬度試驗於螺栓的取樣位置如圖 3.11 所示，硬度試片壓痕位置如圖 3.12 所示。由圖 3.5 至圖 3.10 硬度曲線圖中，可發現螺栓中心硬度相對於中心至外圍之間位置的硬度有明顯落差，中心至外圍之間位置的硬度值為四個點的平均值。造成內外硬度落差的主因為螺栓本身的質量效應 (mass effect) 所引起的，其定義為因鋼料的尺寸大小不同，熱處理的效果會產生差異的現象稱之【8】。

因探討方向著重在產業應用的層面上，於後整體硬度數據處理作法為將整個面的硬度平均取其值，故本研究的硬度數據只適用於 SCM435 鋼製尺寸 M14-P2.00×80 的螺栓。本研究對於 H-J 回火參數之應用以及新的量測回火程度當量的方法，其所代入之硬度數據亦同。

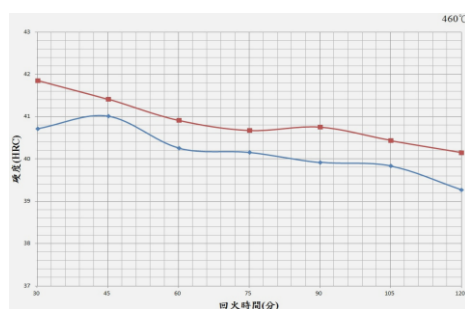


圖 3.5 SCM435 鋼在回火溫度 460°C，回火硬度隨時間變化

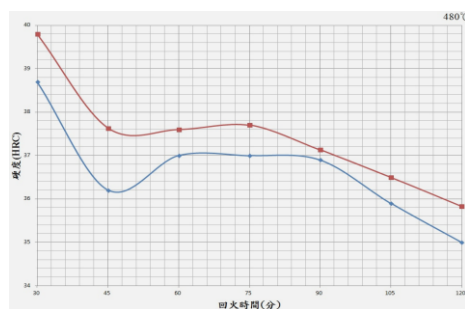


圖 3.6 SCM435 鋼在回火溫度 480°C，回火硬度隨時間變化

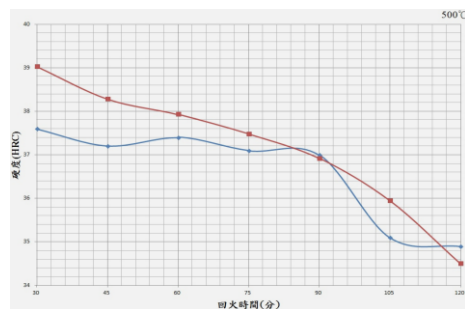


圖 3.7 SCM435 鋼在回火溫度 500°C，回火硬度隨時間變化

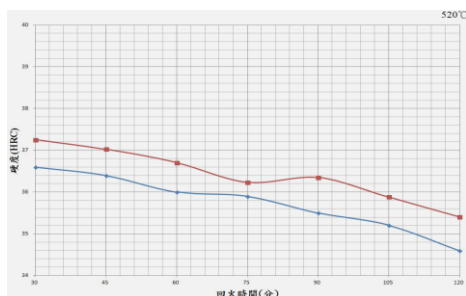


圖 3.8 SCM435 鋼在回火溫度 520°C，回火硬度隨時間變化

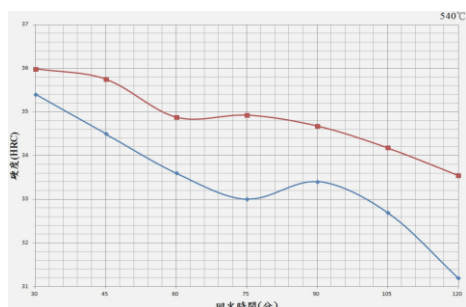


圖 3.9 SCM435 鋼在回火溫度 540°C，回火硬度隨時間變化

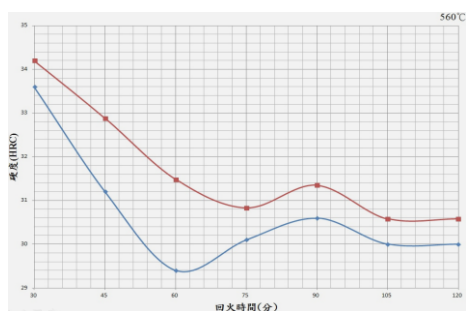


圖 3.10 SCM435 鋼在回火溫度 560°C，回火硬度隨時間變化

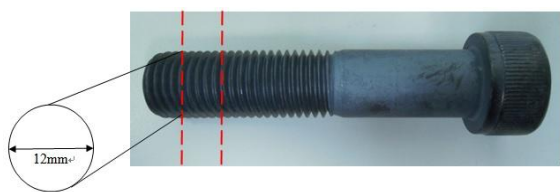


圖 3.11 金相及硬度試片取樣位置

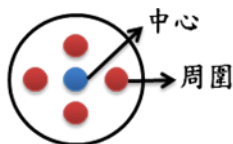


圖 3.12 硬度試驗壓痕位置

3.2.2 回火硬度變化階段

圖 3.13 為 SCM435 鋼在不同回火溫度下回火，其硬度隨時間的變化（等溫回火過程），由此硬度試驗結果可將回火區分成三階段，此回火三階段的分法與一般文獻所區分的回火階段（非等溫回

火）意義不同，本研究是在一般文獻中所提及的回火第三階段的回火溫度中進行回火，並將在此回火過程中的硬度變化情形進一步分成三階段描述。

(1) 回火第一階段：硬度快速降低，且降低幅度很大，但對應的時間卻很短。(2) 回火第二階段：碳原子繼續從麻田散鐵中脫溶，但是脫溶析出的量都大為減少，硬度下降趨緩。(3) 回火第三階段：隨著麻田散鐵中的碳濃度趨於平衡狀態，並且當回火鋼中析出的碳化物達到飽和時（即碳化物體積總量恆定不變），此時就可被認為進入第三階段。在回火第三階段中，隨著時間的延長，則會開始發生碳化物的聚集長大、各種碳化物間的相互轉換，此過程受固態長程擴散所控制，亦即主要受時間因素控制，因此硬度降低極為緩慢。

另外當回火時間固定(30分)如圖 3.14 所示，隨著溫度的升高，硬度成線性的降低，由此可知此鋼種在此溫度範圍內，無二次硬化現象。

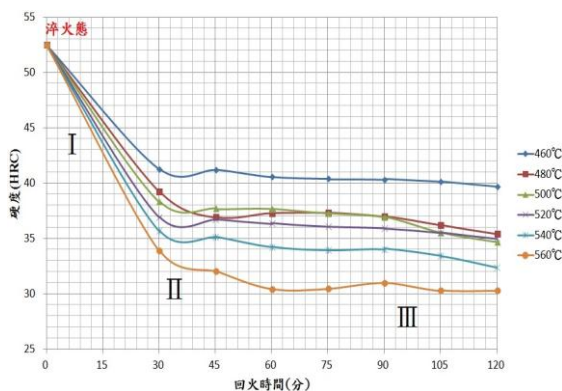


圖 3.13 SCM435 鋼在不同回火溫度下回火硬度隨時間變化

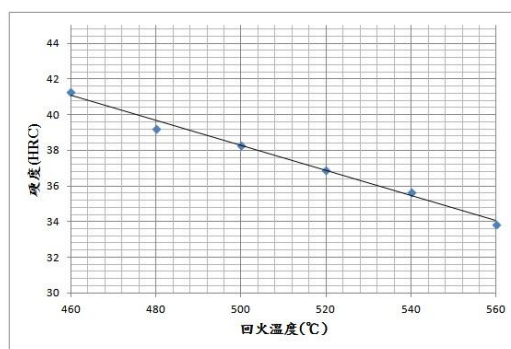


圖 3.14 SCM435 鋼在固定時間下(30分)回火硬度隨溫度變化

3.2.3 Hollomon-Jaffe 回火參數之應用

雖然 Hollomon-Jaffe 的回火參數模組中的 C 值有爭議性，並且已被證實 C 值不是一個固定的常數，而是會跟隨著硬度變化。但在此章節中還是要使用 Hollomon-Jaffe 回火參數模組分析，以茲比較。

前言部分有提到 Hollomon 和 Jaffe 認為一個期望的回火硬度值可以通過不同的回火途徑，亦即不同的時間及溫度組合來實現。由該假定出發他們得出硬度值 H 為回火參數 (M) 的函數，進而推導出

回火參數與回火時間和溫度的關係式如式 (1) 所示。經由 Hollomon 和 Jaffe 的假定，一個期望的硬度值可由不同回火途徑來達成的結果，於是產生了下式 (4)：

$$T_1(c + \log t_1) = T_2(c + \log t_2) \quad \text{式 (4)}$$

此方程式中 C 值對於個別的鋼種而言為一常數，故可以經過簡單計算改寫成式 (5)：

$$C = \frac{T_2 \log t_2 - T_1 \log t_1}{T_1 - T_2} \quad \text{式 (5)}$$

本研究找出在不同的回火條件下具有相同硬度值的回火條件，將這些回火條件代入到式 (5) 以求出 C 值，最後發現符合此條件共有三組參數。第一組：回火溫度 480°C 時間 60 分鐘以及回火溫度 500°C 時間 75 分鐘發現有極相近的硬度值，分別為 37.3 HRC 及 37.29 HRC，硬度差距 0.01 HRC，經由式 (5) 之計算找出 C 值為 -3.7455 (以小時為計算單位)。第二組：回火溫度 480°C 時間 45 分鐘以及回火溫度 520°C 時間 30 分鐘發現有極相近的硬度值，分別為 36.92 HRC 及 36.93 HRC，硬度差距 0.01 HRC，經由式 (5) 之計算找出 C 值為 3.61 (以小時為計算單位)。第三組：回火溫度 500°C 時間 105 分鐘以及回火溫度 520°C 時間 105 分鐘發現有極相近的硬度值，分別為 35.53 HRC 及 35.54 HRC，硬度差距 0.01 HRC，經由式 (5) 之計算找出 C 值為 -0.24 (以小時為計算單位)。

C 值為負值是因為其回火條件不符合 Hollomon 和 Jaffe 所期望的回火條件。第一組 C 值為負值的原因經由學生推測，極有可能為實驗誤差所導致的，因為此結果違背常理。第三組 C 值為負值的原因經由學生推測，可能是此兩種回火條件可能已經進入回火第三階段如圖 3.13 所示，加上其溫度差距不大，所以硬度值會趨於一平衡值。第二組極有可能為 SCM435、M14、P2.00×80 螺栓的 C 值。但是不論如何，重點還是放在於 C 值會隨硬度而改變的這一事實。表 3.1 為利用此法將所求得的 C 值 (3.61) 代入 H-J 方程式中，目的為檢驗 H-J 回火參數的適用性。將代入方程式後所求得的回火參數 P 值與回火條件整理成表，結果顯示相近的硬度值 (表中同一顏色之框內) 其回火參數並不會相近，由此可知此回火參數並不適用於本研究之 SCM435 鋼製螺栓。

另一種方法為在回火參數 $M = T (\log t + c)$ 中，直接使用 Hollomon 和 Jaffe 所提到被計算出兩種不同的固定值的 C 值，就合金鋼而言分別是 20(單位為小時)和 15.96(單位為秒)代入式 (1) 中求得回火參數後，再結合本研究的回火條件整理如表 3.2 及表 3.3 所示。

計算結果顯示相近的硬度值其回火參數 (M) 並不會相近，Hollomon 及 Jaffe 的回火參數方程式無法有效的正確描述本次研究的 SCM435 鋼製螺栓的回火過程。

C = 0.0596 (以秒為單位計算)

T/K	u/s													
	1800		2700		3600		4500		5400		6300		7200	
	HRC	p	HRC	p	HRC	p	HRC	p	HRC	p	HRC	p	HRC	p
733	41.29	2430	41.22	2559	40.59	2650	40.42	2721	40.34	2780	40.14	2829	39.72	2871
753	39.25	2496	36.92	2629	37.30	2723	37.35	2796	37.02	2855	36.20	2906	35.42	2949
773	38.32	2562	37.74	2699	36.67	2795	37.29	2870	36.96	2931	35.53	2983	34.70	3028
793	36.93	2629	36.72	2768	36.35	2867	36.07	2944	35.93	3007	35.54	3060	35.00	3106
813	35.69	2695	35.13	2838	34.24	2940	33.97	3019	34.04	3083	33.44	3137	32.38	3184
833	33.90	2761	32.04	2908	30.44	3012	30.47	3093	30.98	3159	30.29	3214	30.29	3263

C = 3.61 (以小時為單位計算)

T/K	uh													
	0.5		0.75		1		1.25		1.5		1.75		2	
	HRC	p	HRC	p	HRC	p	HRC	p	HRC	p	HRC	p	HRC	p
733	41.29	2425	41.22	2555	40.59	2646	40.42	2717	40.34	2775	40.14	2824	39.72	2867
753	39.25	2491	36.92	2624	37.30	2718	37.35	2791	37.02	2851	36.20	2901	35.42	2945
773	38.32	2558	37.74	2694	36.67	2791	37.29	2865	36.96	2927	35.53	2978	34.70	3023
793	36.93	2624	36.72	2764	36.35	2863	36.07	2940	35.93	3002	35.54	3053	35.00	3101
813	35.69	2690	35.13	2833	34.24	2935	33.97	3014	34.04	3078	33.44	3133	32.38	3180
833	33.90	2756	32.04	2903	30.44	3007	30.47	3088	30.98	3154	30.29	3210	30.29	3258

表 3.1 SCM435 鋼硬度值及回火參數在不同回火溫度下隨時間的變化 (C 值為實驗計算值)

T/K	u/s													
	1800		2700		3600		4500		5400		6300		7200	
	HRC	p	HRC	p	HRC	p	HRC	p	HRC	p	HRC	p	HRC	p
733	41.29	14084	41.22	14213	40.59	14305	40.42	14376	40.34	14434	40.14	14483	39.72	14526
753	39.25	14469	36.92	14601	37.30	14695	37.35	14768	37.02	14828	36.20	14878	35.42	14922
773	38.32	14853	37.74	14989	36.67	15086	37.29	15161	36.96	15222	35.53	15273	34.70	15318
793	36.93	15237	36.72	15377	36.35	15476	36.07	15553	35.93	15616	35.54	15669	35.00	15715
813	35.69	15622	35.13	15765	34.24	15866	33.97	15945	34.04	16009	33.44	16064	32.38	16111
833	33.90	16006	32.04	16153	30.44	16257	30.47	16337	30.98	16403	30.29	16459	30.29	16507

表 3.2 SCM435 鋼硬度值及回火參數在不同回火溫度下隨時間的變化 (以秒為單位計算)

T/K	uh													
	0.5		0.75		1		1.25		1.5		1.75		2	
	HRC	p	HRC	p	HRC	p	HRC	p	HRC	p	HRC	p	HRC	p
733	41.29	14439	41.22	14568	40.59	14660	40.42	14731	40.34	14789	40.14	14838	39.72	14880
753	39.25	14833	36.92	14965	37.30	15060	37.35	15132	37.02	15192	36.20	15243	35.42	15286
773	38.32	15227	37.74	15363	36.67	15460	37.29	15534	36.96	15596	35.53	15647	34.70	15692
793	36.93	15621	36.72	15760	36.35	15860	36.07	15936	35.93	15999	35.54	16052	35.00	16098
813	35.69	16015	35.13	16158	34.24	16260	33.97	16338	34.04	16403	33.44	16457	32.38	16504
833	33.90	16409	32.04	16555	30.44	16660	30.47	16740	30.98	16806	30.29	16862	30.29	16910

表 3.3 SCM435 鋼硬度值及回火參數在不同回火溫度下隨時間的變化 (以小時為單位計算)

3.2.4 一個新的量測回火程度當量的方法

3.2.4.1 扣件熱處理製程參數

鋼的回火是一個由介穩態 (麻田散鐵 + 殘留沃斯田鐵) 趨向穩定平衡態 (肥粒鐵 + 球狀碳化物) 轉變的擴散控制相變態過程。回火硬度可以用來描述介於完全硬化 (淬火態) 及完全軟化 (退火態) 之間的任一狀態，僅用一個硬度值無法明確描述相對於淬火態的軟化程度或相對於退火態的硬化程度，因此，定義“扣件熱處理製程參數”的概念如圖 3.15 所示，圖中 H_p 為扣件熱處理製程參數， H_0 為淬火態硬度， H_1 為回火態硬度， H_∞ 為球化態硬度，此一定義對於一個會經過球化處理、淬火及回火處理的扣件製程具有其指標性。根據此一定義，所有鋼

的 H_p 值將介於“0”（完全硬化態）和“1”（完全軟化態）之間。

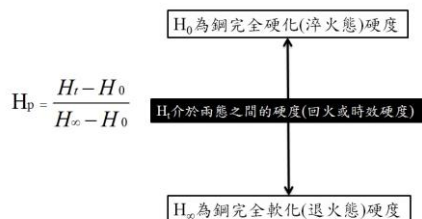


圖 3.15 扣件熱處理製程參數 (H_p) 概念

本研究 SCM435 鋼製螺栓經硬度試驗測定其淬火和球化退火態硬度值分別為 52.5HRC 及 16HRC，根據實驗結果其 H_p 值隨時間及溫度變化如圖 3.16 所示。由圖 3.16 可觀察出 (1) 在一固定時間下，溫度愈高其 H_p 值愈大；(2) 在一固定溫度下， H_p 值隨著回火時間的增長而增大。並且 H_p 值愈大則鋼的軟化進行的愈快，560°C 的軟化進行的最快。

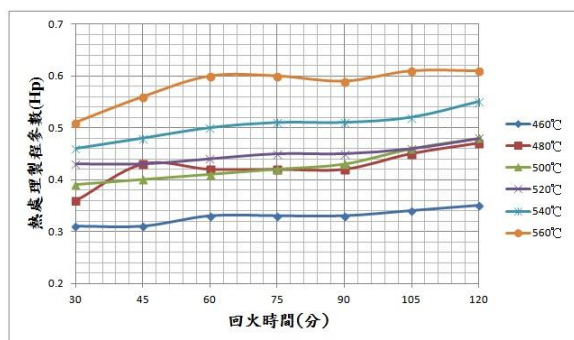


圖 3.16 SCM435 扣件熱處理製程參數隨時間及溫度變化

3.2.4.2 回火動力學關係

一個描述擴散控制固態相變態的動力學關係，於 1939 年由 Johnson 和 Mehl [9] 及 Avrami [10-12] 所提出。此關係被廣泛的用來描述金屬材料中的固態相變態動力學以及在結晶的動力學 [13-17]，並且於連續冷卻變態 (CCT) 的建構上也獲得成功 [18]。目前，對於結晶動力學的研究大都採用實驗室的 DSC 方法，借助等溫結晶 Johnson-Mehl-Avrami 方程式來描述，對於非等溫結晶動力學，也常常借用 Johnson-Mehl-Avrami 方程式來進行修正。其中涉及到一個指數 n ，其與結晶的成核方式和增長方式有關，JMA 相轉換反應速率式如式 (6) 所示。

$$x = 1 - \exp(-kt)^n \quad \text{式 (6)}$$

式 (4-6) 中 X 為時間 t 時的生成物的含量， k 為速率常數，與溫度相關， n 為反應級數 (Avrami 參數)，與反應機構有關。Johnson-Mehl-Avrami 方程式簡單的說就是描述固態物質如何從一種相轉變到另一種相的變化 (也就是相變態)。

Zhang, Z [19] 利用 Johnson-Mehl-Avrami 方程

式進而提出鋼的回火時間、溫度及硬度三者回火參數間的動力學關係如式 (7) 所示，Zhang, Z 認為此式即可代表著熱處理製程的動力學關係。

$$\tau_v = 1 - \exp(-(Dt)^m) \quad \text{式 (7)}$$

$$D = D_0 e^{-\frac{Q}{RT}} \quad \text{式 (8)}$$

式 (7) 中 τ_v 為回火比 “tempering ratio” (此值與本研究之扣件熱處理製程參數概念相同)； t 為回火時間 (秒)； D 值受回火溫度控制並服從 Arrhenius 擴散方程式如式 (8) 所示； m 為軟化指數，其值取決於鋼的化學成份和回火前的熱處理履歷。

將扣件製程熱處理參數與動力學及擴散學之關係式結合如式 (9) 所示。

$$H_p = \frac{H_t - H_0}{H_\infty - H_0} = 1 - \exp(-(Dt)^m) \quad \text{式 (9)}$$

經由代入實測硬度值，在經由一連串聯立方程式的計算，圖 3.17 所示為回火溫度 460°C、時間為 1800 及 3600 秒的回火條件，將其參數代入進行計算，可以發現到計算值與實測硬度值有很好的吻合。為了要驗證此方法之可靠信，所以在此回火溫度代入不同時間 (1800 及 7200 秒) 及其所對應的硬度值進行計算如圖 3.18 所示，其計算結果與實驗值也同樣都有很好的吻合性。由此可知，此方法可以很好的適用於模擬 460°C 的回火硬度值表現。

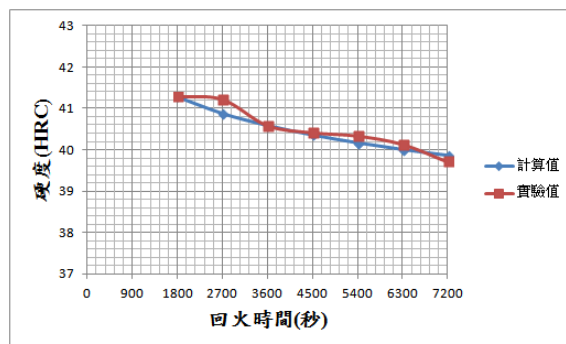


圖 3.17 回火 460°C、1800 及 3600 秒的回火條件參數之計算值與實驗值

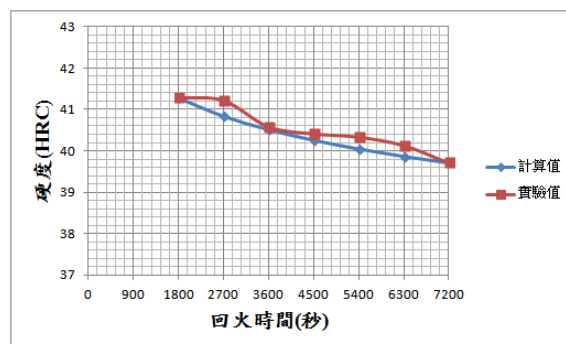


圖 3.18 回火 460°C、1800 及 7200 秒的回火條件參數之計算值與實驗值

依序將所設計之回火條件及其對應的實驗硬

度值代入計算所得之計算值的變化曲線，與實驗硬度值的變化曲線比較如圖 3.19 至圖 3.23 所示，回火溫度 460、480、520、540°C 其計算值與實驗值之比較均有良好的吻合性，回火溫度 500、560°C 之吻合性較差，觀察實驗值之硬度變化可能為人為因素所致。

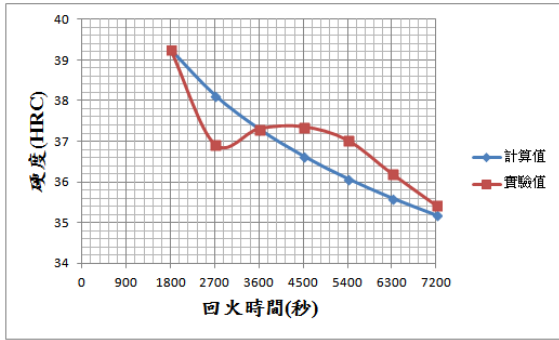


圖 3.19 回火 480°C、1800 及 3600 秒的回火條件參數之計算值與實驗值

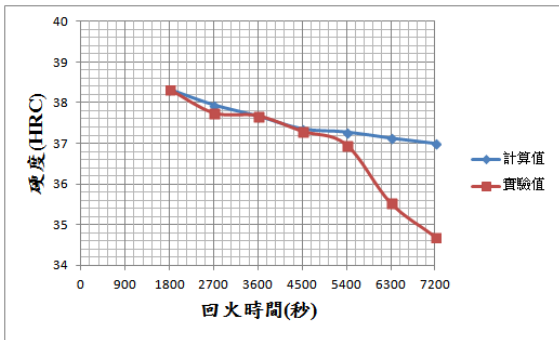


圖 3.20 回火 500°C、1800 及 3600 秒的回火條件參數之計算值與實驗值

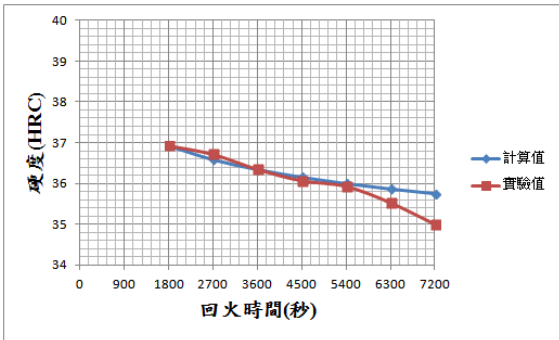


圖 3.21 回火 520°C、1800 及 3600 秒的回火條件參數之計算值與實驗值

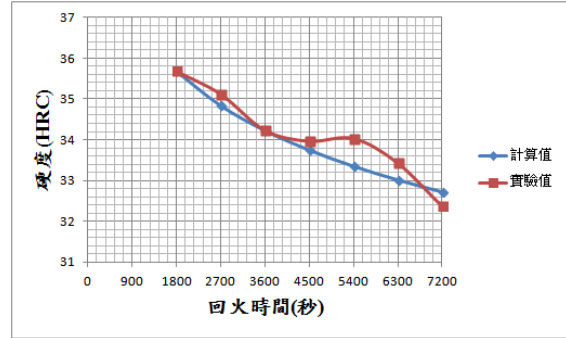


圖 3.22 回火 540°C、1800 及 3600 秒的回火條件參數之計算值與實驗值

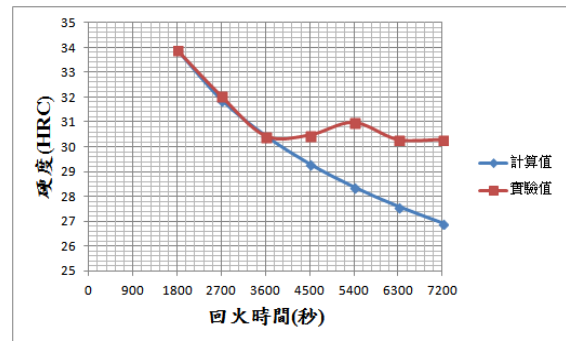


圖 3.23 回火 560°C、1800 及 3600 秒的回火條件參數之計算值與實驗值

應用回火條件為溫度 460°C、時間 1800 及 3600 秒這組計算值，將回火時間拉長至 2×10^4 小時以及 2×10^{10} 小時進行硬度預測，其硬度變化表現會趨向於球化退火態之硬度值如圖 3.24 所示。這是由於扣件熱處理製程參數之數學模組設定的行為表現，其本質為將當回火時間拉長至無限遠時，則硬度值將會趨近於球化退火態。

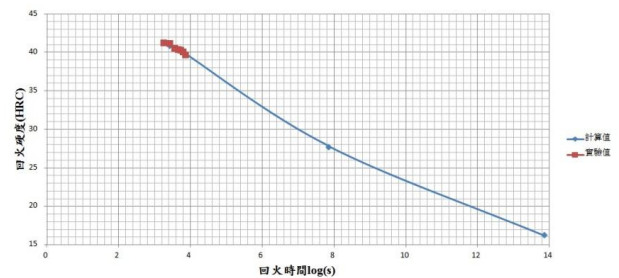


圖 3.24 460°C、1800 及 3600 秒的回火條件之計算值預測

3.3 拉伸試驗

本實驗採用 ISO898-1 中 12.9 級、尺寸為 M14、牙距為 2.0 之扣件拉伸試驗規範。圖 3.25 為回火抗拉強度隨回火時間及溫度的變化圖，由圖可觀察到隨著回火時間的增長其抗拉強度會緩慢的降低。

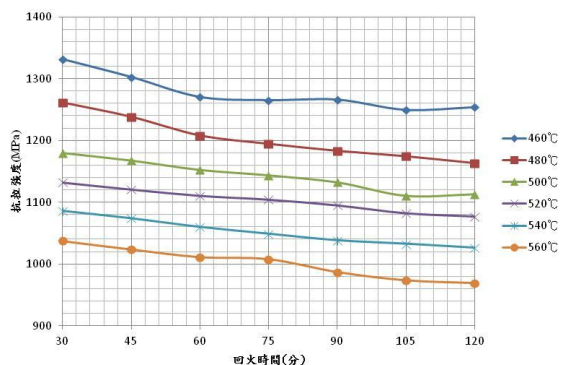


圖 3.25 SCM435 鋼製螺栓回火抗拉強度隨時間、溫度變化

在中碳低合金鋼的回火過程中一個固定的回火溫度下，其硬度值以及抗拉強度會有相近的對照關係，回火硬度值之變化圖 3.26 與回火抗拉強度圖 3.25 之變化可互相比對進而找出所對應之機械強度。

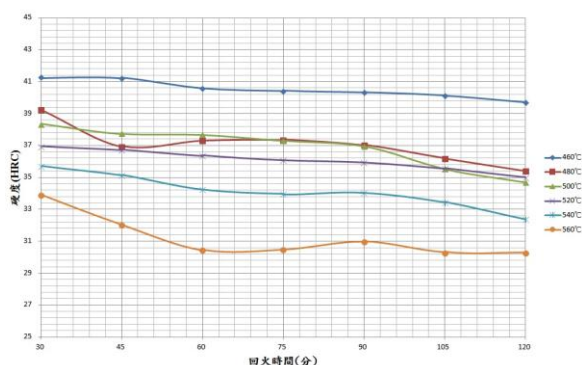


圖 3.26 SCM435 鋼製螺栓回火硬度變化

4、結論

(一) Hollomon 及 Jaffe 對於其回火參數方程式 $M=T(C+\log t)$ 中，用平均所有 C 值的方式來解決 C 值不是一個固定常數的問題，此作法俱有爭議性，經由對於文獻的探討，得知藉由使用數學圖式法可以成功的描述 Hollomon 及 Jaffe 所推出的回火參數模組的行為。

(二) SCM435 鋼製螺栓於不同的回火條件下與其相對應的硬度結果 Hollomon 及 Jaffe 的回火參數方程式 $M=T(C+\log t)$ 計算，並以 Hollomon 及 Jaffe 所提出適用於合金鋼的 C 值大小 20 代入方程式中，結果顯示相近的硬度值其回火參數 (M) 並不會相近，Hollomon 及 Jaffe 的回火參數方程式無法有效的正確描述 SCM435 鋼的回火過程。

(三) SCM435 鋼在溫度範圍 460 至 560°C 之間沒有產生二次硬化的現象，並且在此溫度範圍內，根據文獻可以將隨著回火時間加長所引起的硬度變化分成三個階段來解釋。本實驗結果為在球化退火態的硬度為 95HRB 下進行沃斯田鐵化溫度 890°C 得油淬處理，所得的平均硬度為 52.5HRC，而後在經溫度 460 至 560°C、時間範圍 30 至 120 分回火，

所得的平均硬度在 30 至 41HRC 之間。

(四) 回火溫度 460°C、時間 30 至 120 分，所對應的抗拉強度為 1331.43 至 1254.03MPa；回火溫度 560°C、時間 30 至 120 分，所對應的抗拉強度為 1037.49 至 969.13 MPa。隨著回火溫度的上升，抗拉強度會下降。

(五) 扣件熱處理製程參數 (Hp) 可以明確描述回火狀態的鋼相對於淬火態的硬化程度或是相對於退火態的軟化程度，由此參數的概念結合本實驗數據可知在回火溫度 560°C 相較於其它較低的回火溫度，其相對於退火態的軟化程度是最高的，並且，Hp 值與抗拉強度成反比。

(六) 一個描述回火溫度、時間以及與其相對應的硬度的關係式，可以假設經由透過扣件熱處理參數的概念，結合 Johnson-Mehl-Avrami 方程式描述其動力學關係在以 Arrhenius 方程式中的擴散係數代入，最後所得的方程式雖然經由文獻及實驗證實可以精確的描述回火過程中的關係，但是其組成的各項元素還是需要進行更進一步的深究。

5、致謝

感謝晉禾公司提供相關實驗材料及機械設備。

6、參考文獻

- [1]. J. H. Hollomon and L. D. Jaffe, "Time-Temperature Relations In Tempering of Steel", Trans. AIME, vol. 162, pp. 223-249 (1945)
- [2]. Janjušević Zoran, Gulišija Zvonko, Mihailović Marija, Patarić Aleksandra, "The investigation of applicability of the Hollomon-Jaffe equation on tempering the HSLA steel", Chemical Industry & Chemical Engineering Quarterly, Vol.15, pp.131-136 (2009)
- [3]. G. A. Roberts, A. H. Grobe, and C.F. Moersch, "The Tempering Of High Alloy Tool Steels", Trans. ASM, 39, pp.521-548 (1947)
- [4]. C. S. Wright and R. S. Irani, "Towards Equilibrium During Tempering A High-Speed Steel", Journal of Materials Science. 19, pp.3389-3398 (1984)
- [5]. J. D. Wong, "A Comparison of Conventional and Induction Tempered Steels", M.S. Thesis, Colorado School of Mines (2001)
- [6]. R. A. Grange and R.W. Baughman, "Hardness of Tempered Martensite in Carbon and Low Alloy Steels", Trans. ASM., 48, pp.165- 197 (1956)
- [7]. G.A. Thomas, J.G. Speer, D.K. Matlock, G. Krauss and R.E. Hackenberg, "Time-Temperature Equivalence in Martensite tempering", Conference: Int'l Conf. Martensite Transformations (ICOMAT-08), Los Alamos National Laboratory (LANL), United States (2008)
- [8]. 金重勳編著, "機械材料", 復文書局發行, (2007)
- [9]. W.A. Johnson, R.F. Mehl, Trans. Am. Inst.

- Mining, Metall. Petroleum Eng. Incorporated 135, pp.458 (1939)
- [10]. M. Avrami, J. Chem. Phys. 7, 1112 (1939)
- [11]. M. Avrami, J. Chem. Phys. 8, 224 (1940)
- [12]. M. Avrami, J. Chem. Phys. 9, 184 (1941)
- [13]. G. Béranger, G.Henry, G.Sanz, Le Livre De L'acier, Technique & Documentation , Lavoisier , Paris (1994)
- [14]. J. Majta, J.G. Lenard, M. Pietrzyk, ISIJ Int. 36, 1102 (1996)
- [15]. A. Borrego, G.G. Doncel, Mater. Sci. Eng. A252, 152 (1998)
- [16]. M. Takahashi, H.K.D.H. Bhadeshia, Mater. Sci. Technol. 6, 603 (1990)
- [17]. T. Tsuchiyama, Y. Miyamoto, S. Takaki, ISIJ Int. 41, 1052 (2001)
- [18]. “ASM Handbook” , Vol. 4: Heat Treating, ASM International, (1991)
- [19]. Zhang. Z,Delagnes.D, “ Microstructure evolution of hot-work tool steels during tempering and definition of a kinetic law based on hardness measurements” , Materials Science and Engineering Vol.380 (1-2), pp.222-230 (2004)