

淬火冷卻速度及回火持溫時間對熱作工具鋼 機械性質之影響

Effects of Different Quenching Cooling Rates and Tempering Holding Times on the Mechanical Properties of Hot Work Tool Steels

朱柏翰¹ 吳咏翰¹ 周挺正² 陳永傳^{1*}
P.H. Chu Y.H. Wu T.C. Chou Y.C. Chen

摘要

本研究是以改變 SKD61 規範鋼中某些合金元素含量的五種改良鋼為實驗材料，在固定的淬火溫度和保溫時間下，用不同的冷卻速度淬火，再以 590°C 鹽浴爐分成 0.5hr、3hr、6hr、10hr 四個不同的回火持溫時間，各施以兩次回火，完成後水冷至室溫。最後量測各試片之硬度和衝擊值，比較不同熱處理條件下各材料的機械性質，並以光學顯微鏡、SEM 與 EPMA 分析各試片之顯微組織與化學組成，探討淬火冷卻速度和回火持溫時間對各材料的影響。

結果顯示，淬火冷速較快的試片其硬度和衝擊值幾乎都比淬火冷速較慢的試片高。此外，影響衝擊值主要有三個因素：(1) 硬度值的下降使韌性變好；(2) 回火時間增長或淬火冷速變慢，使較多碳化物在晶界上生成，造成韌性下降；(3) 合金成份在回火時對韌性的影響。此三個因素在不同的回火持溫時間下的效果強弱各不同。

關鍵詞：熱作工具鋼、機械性質、淬火、回火、衝擊值

Abstract

In this study, the effect of different quenching cooling rates and tempering holding times on the mechanical properties of hot work tool steels was investigated. SKD61 and its modified steels were used as experimental materials. Quenching temperature and holding time are fixed at 1030°C and 1hr, respectively. There are two kinds of cooling rate during quenching. After quenching, specimens were dipped in a 590°C salt bath for tempering, with four different holding times of 0.5, 3, 6 and 10 hours. All specimens were tempered twice. Then the hardness and impact toughness of these

specimens were measured. In addition, the microstructure and chemical compositions were examined using OM, SEM and EPMA, and the relationships between different heat treatment parameters and mechanical properties were revealed.

As results, the specimens which were cooled faster during quenching have higher hardness and impact toughness mostly, and the specimens which contained more carbon, chromium and manganese possess higher hardness value. It was found out that there are three main factors affecting the impact toughness value: (1) Impact toughness increases due to the decrease of hardness. (2) Impact toughness decreases because of the precipitation of carbides on the grain boundaries, when the tempering holding time gets longer or the quenching rate becomes slower. (3) Impact toughness was influenced by the alloying element of steel during tempering. The effect of the three factors will vary with the tempering holding time.

Key words: Hot work tool steel, Mechanical properties, Quenching, Tempering, Impact toughness

1. 前言

鋼鐵工業一向都是扮演國家工業發展中不可或缺的角色，鋼鐵工業負起提供各個製造業優良母材的責任。好的材料必須要對正確的原物料做出適當的處理及加工，使其表現出來的性質能達到最佳化並符合使用時的需求，而熱處理這個技術對於鋼鐵工業來說是相當重要的一個環節。本論文所探討的材料以熱作工具鋼為主。其種類很多，最普遍的鋼種為 SKD61(H13)，其特性為材料要具有高淬透性

¹國立台灣大學機械工程學研究所

²鋼緯工業股份有限公司

*連絡作者 e-mail : chen735@ntu.edu.tw

Table 1 Chemical compositions of steels.

Steel	Concentration of alloying element (wt%)								
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V	Fe
A	0.381	0.237	0.425	0.006	0.001	5.048	2.129	0.530	bal.
B	0.375	0.418	0.571	0.006	0.001	5.251	2.336	0.599	bal.
C	0.352	0.341	0.407	0.012	0.002	5.638	1.405	0.484	bal.
D	0.355	0.312	1.109	0.010	0.002	5.757	2.185	0.556	bal.
E	0.369	0.524	0.687	0.015	0.001	5.595	1.180	0.564	bal.

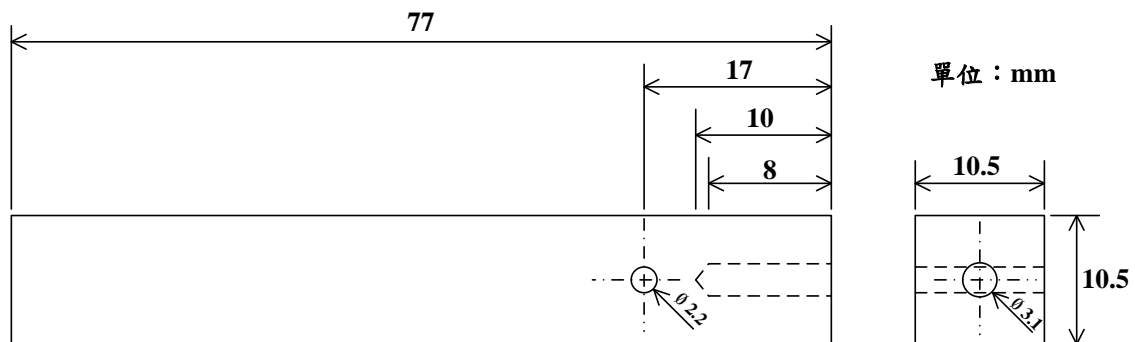


Fig.1 Dimension of specimen

、足夠的高溫強度、良好的耐磨性和韌性、優秀的抗熱裂能力和耐熔損性能等等。各種不同的合金成份配置也會影響其熱處理前後的表現，它最主要的應用領域在壓鑄、鍛造和擠壓等高溫製程環境中，該材料在製造業是非常常見的，故本文以 SKD61(H13)之化學組成為基礎而改變其中某些合金元素的含量之鋼材當研究對象。

本研究的目的是在對各種不同合金配置的鋼鐵材料，施以不同條件的熱處理，並觀察各材料在熱處理後的機械性質表現和顯微組織的差異⁽¹⁾，進而找出不同的熱處理條件和機械性質表現的關連性。其中的合金配置以碳、矽、錳、鉻、鉬、釩的改變較為明顯。在熱處理方面主要是有淬火和回火兩個部份，承接本實驗室學長鄒君⁽²⁾及朱君⁽³⁾之論文研究，取其中某些條件當固定參數而改變其他參數，以作更深入的研究。例如在淬火方面，淬火的溫度和持溫時間是固定的(1030°C×1hr)，改變的是在於其淬火時的半冷時間有長短之分，也相當於是淬火冷速的不同。而在回火部分，回火的

溫度也是固定的(590°C)，並都對材料做兩次回火，只是在持溫時間上有所不同，有分 0.5、3、6、10hr 四個不同的條件。簡言之，本實驗主要探討下列三種熱處理參數對熱作模具鋼機械性質的影響：(1)淬火冷卻速率(或半冷時間)、(2)回火的持溫時間、(3)各材料不同的合金元素配置。在實驗的最後會根據各試片所得到的硬度、衝擊值等機械性質和金相觀察，以及搭配其他文獻輔助，找出對這一系列熱作模具鋼最佳的熱處理條件，並瞭解不同合金配置對熱處理的影響。

2. 實驗方法

2.1 實驗試片製作與成分分析

本研究主要是對五種合金成分配置不同之熱作模具鋼做不同條件的熱處理，並對處理後之各試片進行機械性質的測試。進行熱處理前會先將原材以分光儀作成分分析，以瞭解其化學組成。其成分如表 1 所示。再來是將試片加工成如圖 1 的尺寸，圖中右端的盲孔是用來放入熱電偶之測溫端，使試片之實際溫度能被

溫度記錄器所偵測到，貫穿孔是用來加熱時吊掛試片用。

2.2 熱處理-淬火

本實驗淬火之設備圖如圖 2 所示。淬火溫度是 1030°C，持溫時間為 1hr。在淬火前先將試片掛置於爐管較低溫部分，並通入氮氣約 20 分鐘以趕除爐管內的空氣。隨後將試片放置於預先量測好之均溫區，也就是淬火溫度之 1030°C 的區域，持溫 1hr 後進行淬火。本實驗之淬火分兩種條件，主要為淬火速度有快慢之分，快的為強制氣冷，其冷卻方式是以經空氣壓縮機壓縮後的高壓空氣吹冷，從淬火溫度 1030°C 冷至 520°C (半冷時間) 約 1 分 12 秒，平均冷速約為 7°C/sec，隨後持續以強風冷卻約 3 分鐘後取出試片。另外慢的則為半冷時間約 90 分鐘的淬火，冷卻方式為降低爐子之輸出功率，以達成半冷時間為 90 分鐘的條件。半冷時間定義為從淬火溫度降至一半溫度所需的時間。試片從爐中取出後以電風扇吹冷至室溫。

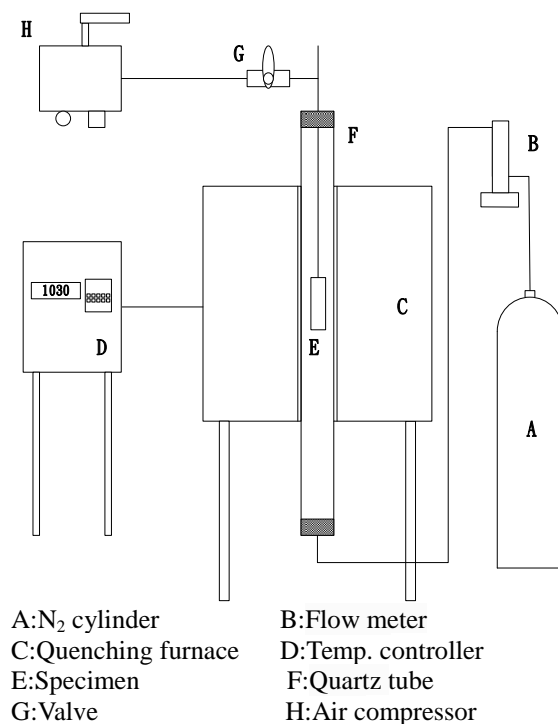


Fig.2 Quenching equipments

2.3 熱處理-回火

本實驗回火之設備圖如圖 3 所示。將淬火試片一一依照不同的回火條件實施回火，回火的步驟一開始是先將回火爐鹽浴中的均溫區量測好，在預定的回火溫度區架設好不銹鋼網，以方便之後試片置於其上。本次回火溫度固定為 590°C，回火持溫時間有四種不同條

件，分別為 0.5hr、3hr、6hr 和 10hr，並且都回火兩次。第一次回火完後隨即將試片丟入水中冷卻，取出後去除表面髒汙和烘乾後再做第二次回火。

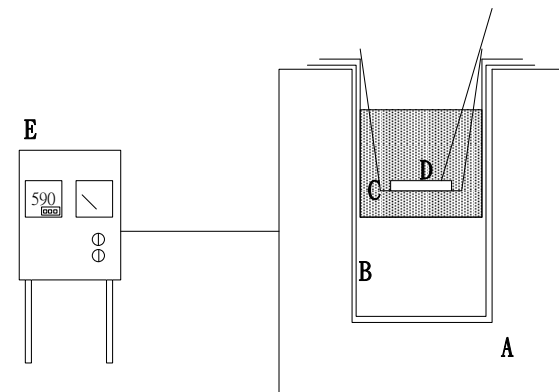


Fig.3 Tempering equipments

2.4 試片分析

2.4.1 硬度測試

回火完成後之試片用 200 號之砂紙將表面氧化層去除並磨亮，再來用 Akashi ATK-F1000 洛氏硬度試驗機量測其硬度，或是切取一部分試片鑲埋成塊，用 Akashi HM-113 維克氏微硬度試驗機量測內部的硬度分佈，每次都打三個點取其平均做為該試片硬度值。

2.4.2 衝擊測試

本實驗之衝擊試驗選用 Charpy 衝擊試驗，將待測材料製作成規定尺寸之試片，以擺錘衝擊試片。一開始先將試片擺置好，U 型槽背對擺錘，再來把擺錘升至規定的角度後使其自然落下，擺錘因位能轉換為動能而將試片擊斷，衝擊值為試片破斷時單位面積所吸收之能量，單位為 J/cm²。

2.4.3 顯微組織觀察

本實驗試片以 Nital (97 ml 酒精 + 3 ml 硝酸) 腐蝕液浸泡適當時間後，利用 OM、SEM 及 EPMA 觀察不同熱處理條件下，試片內部顯微組織的差異，並探討顯微組織和機械性質的關係以及合金成分配置不同對顯微組織的影響。

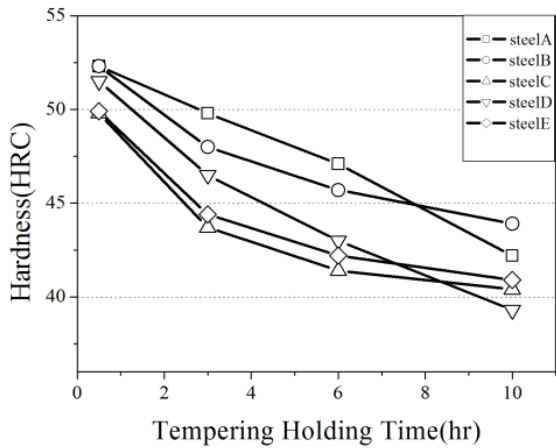


Fig.4 Hardness of all steels quenched by high pressure air and tempered for different holding times

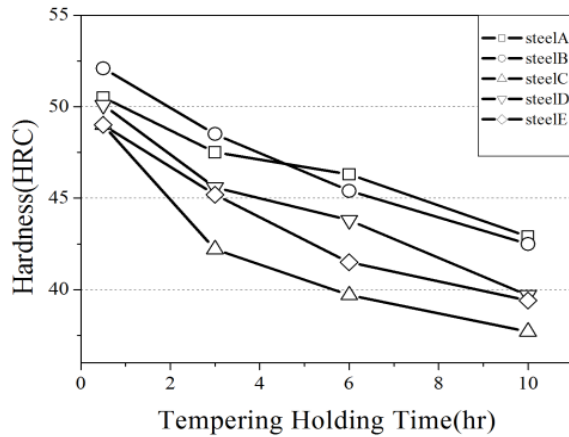


Fig.5 Hardness of all steels quenched by lowering output power and tempered for different holding times

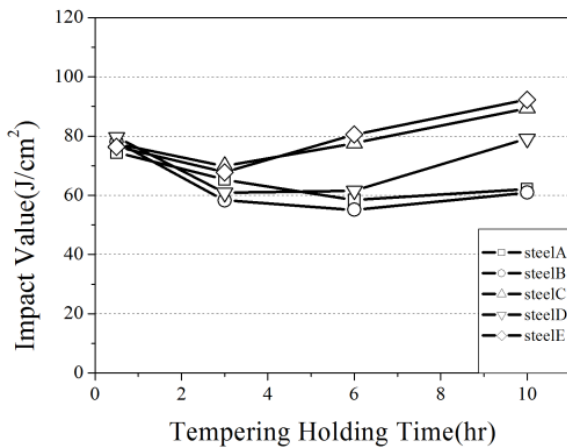


Fig.6 Impact value of all steels quenched by high pressure air and tempered for different holding times

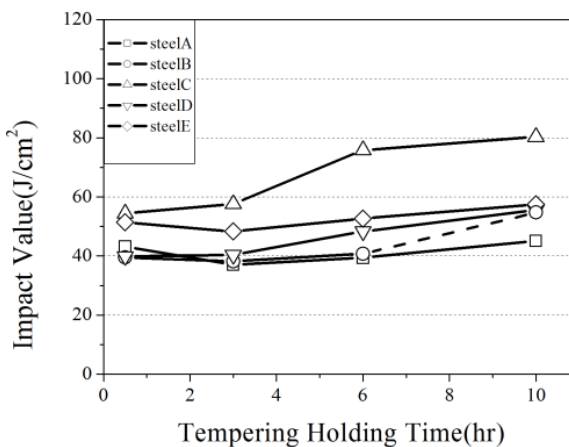


Fig.7 Impact value of all steels quenched by lowering output power and tempered for different holding times

3. 結果與討論

3.1 淬火回火後硬度分析

圖 4、圖 5 為在固定淬火冷卻速度下比較不同鋼種 和不同回火持溫時間對硬度的影響。圖 4 為各鋼料試片經強制氣冷淬火，再實施回火時，其硬度與回火時間的關係；圖 5 為各鋼料試片經半冷時間 90min 淬火，再實施回火時，其硬度與回火時間的關係。由以上兩圖可以發現以下現象：(1)很明顯的各鋼種強制氣冷淬火的試片經不同時間回火兩次的硬度值會隨著回火時間增長而下降，而半冷時間 90 分鐘的試片也有類似的現象。(2)回火條件固定下，經強制氣冷淬火後的試片硬度值表現幾乎都高於半冷時間 90 分鐘處理的試片，證實了冷速快對於熱處理後硬度值的表現有正向的幫助。但另一方面，在這兩種冷速差異極大的

淬火處理下，試片的硬度值並沒有很大的差距，從圖中可發現，淬火冷速慢的試片和淬火冷速快的經回火後硬度值相比，普遍上也只有 1HRC 左右的不同。(3)在圖 4 和圖 5 可以發現在硬度值的表現上，鋼種 A、B、D 都為前三名，從合金成份配置觀察發現，鋼種 A、B、D 所含有對淬火性有正向幫助的成份如鉬、錳、鉻、矽、釩等元素比例相對其他鋼種都比較多，其中以鉬對材料的淬火性幫助最大。而合金成分配置表中的鋼種 A、B、D 的鉬含量比其他鋼種高上不少，由此現象可推斷出含較多鉬的材料淬火回火後的硬度值會較好。

3.2 淬火回火後韌性分析

圖 6、圖 7 為在同一淬火冷卻速度下各鋼

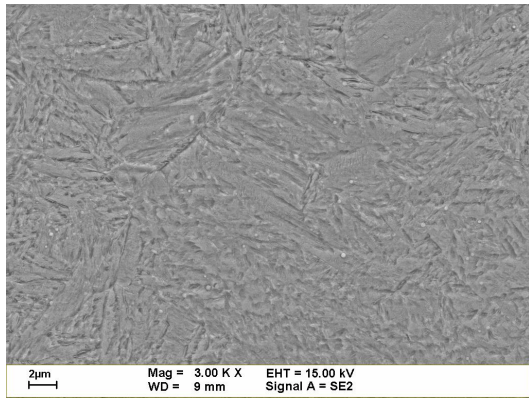


Fig.8 Steel B quenched by high pressure air and tempered twice for 0.5hr

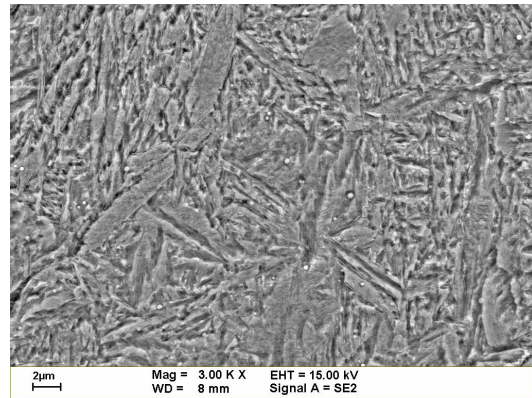


Fig.9 Steel B quenched by high pressure air and tempered twice for 3hr

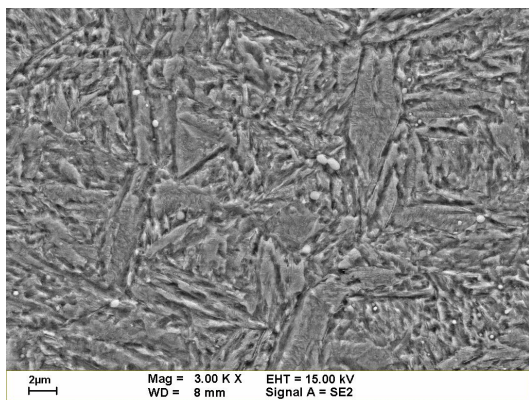


Fig.10 Steel B quenched by high pressure air and tempered twice for 6hr

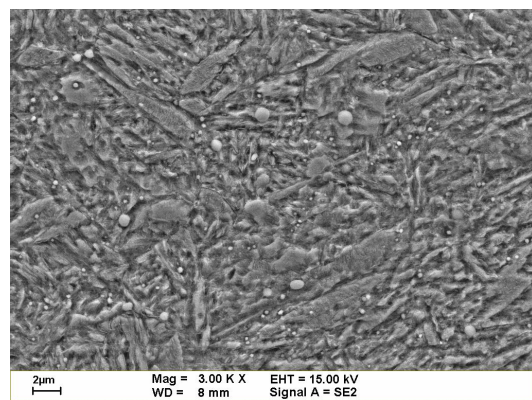


Fig.11 Steel B quenched by high pressure air and tempered twice for 10hr

種衝擊值的比較。圖 6 為各鋼料試片經強制氣冷淬火，再實施回火時，其衝擊值與回火時間的關係；圖 7 為各鋼料試片經半冷時間 90min 淬火，再實施回火時，其衝擊值與回火時間的關係。

本論文在探討衝擊值的變化主要分為三個因素：(1)硬度值的下降使韌性變好衝擊值提升；(2)回火時間增長或淬火冷速變慢，使較多碳化物在晶界上生成，造成韌性下降衝擊值降低；(3)合金成份在回火時對韌性的影響。綜合以上兩圖可發現以下現象：(1)回火條件固定下，經強制氣冷淬火後的試片衝擊值表現都高於半冷時間 90 分鐘淬火的試片，發現冷速快對於熱處理後衝擊值的表現有正向的幫助，也與文獻⁽⁴⁾、文獻⁽⁵⁾、文獻⁽⁶⁾結果呼應。(2)強制氣冷條件的試片隨回火持溫時間增加，衝擊值回升的點普遍比半冷時間 90 分鐘的試片還要晚。之前有提到說本次實驗影響衝擊值的因素有硬度值和碳化物析出在晶界的影響，而在衝擊值轉折處即為兩者影響衝擊值效果達平衡的時候。故在此可判斷出淬火方式為半冷時間 90 分鐘的試片由於在淬火冷卻過程中就有碳

化物析出，對韌性的影響比較早發生，故其在進行回火持溫時間較短的情況下，碳化物析出對韌性影響的效果會比強制氣冷條件的試片還早達到平衡，這也就是淬火冷速慢的條件，其衝擊值回升點比較早的原因。(3)鋼種 C 和鋼種 E 的韌性表現都有別於鋼種 A、B、D，前者的韌性都表現得比較好，原因除了該兩鋼種的硬度值較低外，合金成份對於碳化物析出的影響也是重點，在此推論當一鋼種碳化物析出的驅動力較強時，脆化的發生會比較明顯。釩、鉬、鎢及鉻元素對碳化物的生成作用都很明顯，而錳元素據有使晶粒細微化的作用可使韌性提高。關於碳化物析出使韌性下降的元素我們針對釩、鉬和鉻去討論。由表 1 可發現鋼種 A、B、D 的鉬含量明顯較多，鎢則是高出些許，雖然鋼種 C 和鋼種 E 的鉻及釩含量不一定較低，但也影響不了鉬含量之差距所造成的影響。在此可推論雖然鉬元素對於回火脆性有抑制的效果，但當過量的添加使其碳化物大量析出在晶界上，脆化效果會很明顯，此現象在圖 6 可以清楚的觀察到鋼種 C、E 和鋼種 B、D 在回火持溫時間為 3 小時的降幅有很大的不同。

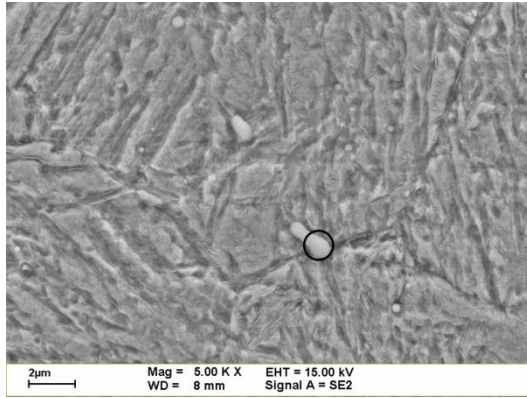


Fig.12 The carbides precipitated on the grain boundaries

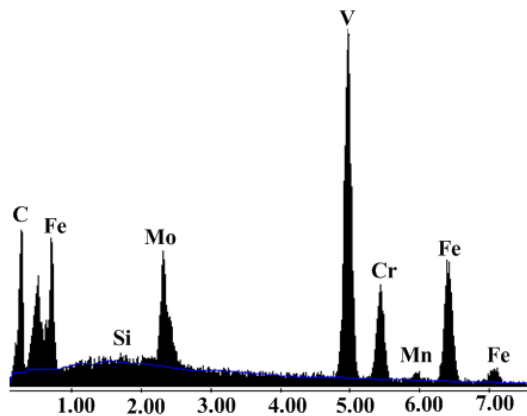


Fig.13 Chemical compositions analysis of the carbide

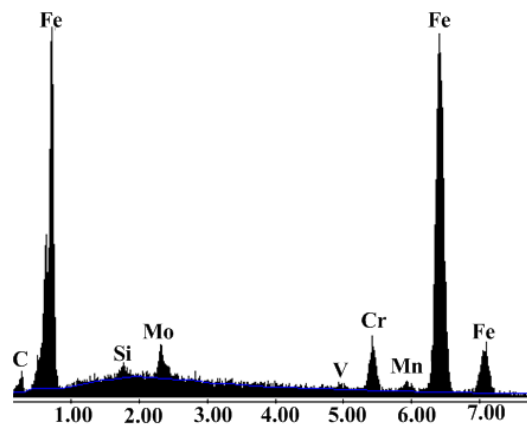


Fig.14 Chemical compositions analysis of matrix

3.3 淬火回火後顯微組織觀察

本論文淬火回火後之顯微組織觀察主要為檢驗韌性分析時所提到粒狀碳化物的析出和回火持溫時間增長時碳化物析出的多寡，此外還會配合一些成份分析以提供更有力的證據。

3.3.1 回火持溫時間增長造成碳化物析出在晶界上的現象

取鋼種 B 淬火方式為強制氣冷經不同回火持溫時間處理後的試片做 SEM 觀察，如圖 8~圖 11 所示，回火時間依序為 0.5hr、3hr、6hr、10hr，可發現隨回火持溫時間拉長，組織中的粒狀碳化物析出增多，且在晶界上的可能性也越大。

3.3.2 碳化物之分析

在以上四個試片裡挑較明顯的粒狀碳化物做成份分析，如圖 12~圖 14。圖 12 為該粒狀碳化物，圖 13 為以該碳化物為中心做直徑 1µm 的成分分析，圖 14 為基地組織的成分分析，比較此兩圖發現，圖 13 的鉻、鉬、釩、碳之含量顯著高於圖 14，由此可知碳化物主要是由鉻、鉬、釩的碳化物組成。

4. 結論

1. 本實驗材料中含有較多碳、鉻、錳元素的材料，其淬火回火後的硬度值也都較高。
2. 影響衝擊值主要為三個因素：(1)硬度值的下降使韌性變好，衝擊值提升；(2)回火時間增長或淬火冷速變慢，使較多碳化物在晶界上生成，造成韌性下降，衝擊值降低；(3)合金成份在回火時對韌性的影響。其中因素(1)在整個回火過程中都佔有一定的影響力，但其在回火持溫時間較短時影響力會小於因素(2)，所以才會有脆化的現象產生。
3. 由於淬火冷速快慢不同，回火時試片發生脆化的時間點也會不同，淬火冷速較快的試片，回火持溫時間 3~6 小時為其脆化明顯的區段。
4. 淬火冷速慢的試片，脆化發生時間大多在 0.5~3 小時的區段，亦或是不會有脆化發生。
5. 淬火冷速快的條件其衝擊值都會優於淬火冷速慢的條件。
6. 釩、鉬及鉻含量較多的材料，在一開始回火時，脆化的現象都會比較明顯，原因是由於其析出碳化物的驅動力強，生成晶界碳化物的可能較大。
7. 鉬雖然有防止回火脆性的效果，但若超過一定的含量之後，由於其會促進碳化物的析出，反而會對衝擊值產生不好的影響。

參考文獻

1. Toshino Okuno, "Effect of Microstructure on the Toughness of Hot Work Tool Steels, AISI H13, H10, and H19", Trans. Iron Steel Inst. Jpn. Vol. 27, No. 1, Jan. 1987, pp. 51-59

2. 鄒易康，“可控制冷速之熱處理設備及其在熱作工具鋼淬火之應用”，國立台灣大學機械工程研究所，碩士論文，2010
3. 朱致成，“淬火溫度及持溫時間對 SKD61 及其改良鋼種之機械性質的影響”，國立台灣大學機械工程研究所，碩士論文，2011
4. 西村富隆(黃紹雄譯)，“淬火冷卻速度對於模具鋼之硬度及韌性之影響”，金屬熱處理，第 54 期，1997，pp. 85-89
5. S.Mayer, C.Scheu, H.Leitner, H.Clemens and I.Siller, “Influence of the Cooling Rate on the Mechanical Properties of a Hot-work Tool Steel”, BHM, Vol. 152, Issue:5, 2007, pp. 132-136
6. 胡翔，林顏盛，黃正安，馮干江，許玉賢，“5Cr2NiMoVSi 大截面熱作模具鋼的組織及回火脆化”，金屬學報，Vol. 23，No. 5，1987，pp. 369-373