

# 淬火冷卻速率對熱作工具鋼JIS SKD61及其改良鋼種 之機械性質的影響

## Effects of Different Quenching Cooling Rates on the Mechanical Properties of JIS SKD61 and Its Modified Steels

辛翰鈞<sup>1</sup> 楊富程<sup>1</sup> 周挺正<sup>2</sup> 陳永傳<sup>1\*</sup>  
H. G. Shin F. C. Yang T. C. Chou Y. C. Chen

### 摘要

本研究以 SKD61 之規範鋼及其改良鋼種為實驗材料，以固定的淬火溫度和保溫時間，並用四種不同的冷卻速度施以淬火，之後進行硬度測試與金相組織觀察，接著回火至相同硬度並比較其衝擊值，最後探討淬火冷卻速度與合金元素配置對機械性質的影響。

研究結果顯示，淬火時碳化物的析出會影響鋼種的硬度與韌性表現，淬火冷速較快的試片碳化物析出較少，其淬火後硬度較高，且回火後韌性也較佳。此外，合金元素碳、鉻、錳含量較多的鋼種，淬火硬度也較佳；合金元素鉻、鉬、鈮對抗回火軟化效果較為顯著，故回火至相同硬度所需的溫度較高。影響鋼料韌性的因素除了回火硬度之外，合金元素配置、淬火冷速與韌性亦有密切關係。例如回火硬度較低、添加適量錳元素、以較快冷速淬火，在這 3 種情況下皆可提升韌性。

關鍵詞：工具鋼、淬火、回火、衝擊值、  
機械性質

### Abstract

In this study, the effect of four different quenching cooling rates on the mechanical properties, and microstructure of SKD61 and its modified steels, were investigated. The constant quenching temperature was set at 1020°C, and holding time was 30 min. After quenching, specimens were tempered to the target hardness of 46 HRC, and then, the impact toughness of these specimens was measured.

As results, the precipitation of carbides will affect the hardness and impact toughness; the specimens which were cooled faster during quenching had fewer carbides and the higher hardness and impact toughness. Besides, the specimens which contained more carbon, chromium and manganese had the higher hardness. The specimens which contained more chromium, molybdenum and vanadium required higher temperatures to temper to the hardness of 46 HRC. The factors of impact toughness include the hardness after tempering, configuration of the alloy composition, quenching cooling rates, etc. So, impact toughness can be improved by tempering to the lower hardness, adding the appropriate amounts of manganese and quenching at a faster cooling rate.

Key word : Tool steel, Quenching, Tempering, Impact toughness, Mechanical properties

### 1. 前言

SKD61 是國內外最常用的熱作工具鋼，但其高溫抗軟化能力稍嫌不足，又因其合金成分鈮含量較高，導致在二次回火時容易在晶界上析出 VC 碳化物，影響其韌性表現，故本論文以 SKD61 以及改良其合金成分之鋼種當研究對象。

本研究針對各種不同合金成分的鋼材，施以不同條件的熱處理，其中合金成分以鈷、錳、鉻、鉬以及鈮的含量變化較大，藉由施以不同的熱處理條件，找出其最佳的機械性質，熱處理方面主要為淬火與回火兩大部分，其中

<sup>1</sup> 國立台灣大學機械工程學研究所

<sup>2</sup> 鋼緯工業股份有限公司

\*聯絡作者 e-mail: chen735@ntu.edu.tw

淬火部分，溫度為 1020°C，持溫 30min，淬火冷卻分為 1020°C-700°C、700°C-500°C 和 500°C-300°C 三階段共 4 個淬火條件，如表 1 所示。

Table1. Time required at different quenching stages

條件編號	1020°C →700°C 所需時間 (分)	700°C →500°C 所需時間 (分)	500°C →300°C 所需時間 (分)
1.	31	30	49
2.	26	22	34
3.	17	14	22
4.	43	26	26

各淬火條件分別為工業上大型工件淬火時中心部位的冷卻時間，例如：條件 1 的冷卻時間相當於模具尺寸 300x400x600 mm 的中心冷卻時間；條件 2 的冷卻時間相當於模具尺寸 200x400x600mm 中心的冷卻時間；條件 3 的冷卻時間相當於模具尺寸 100x400x600 mm 中心的冷卻時間；條件 4 則是由改良鋼種 D 之 CCT 曲線推測所得的冷卻時間；回火部分，溫度設定在 600°C 左右，並進行兩次(或兩次以上)回火，回火後的目標硬度為 HRC46±1。

## 2. 實驗理論

### 2.1 淬火冷卻速率對機械性質之影響

不同的淬火冷速會產生不同的組織，其機械性質也會有所不同，圖 1 為 SKD61(或 H13) 鋼種之 CCT 曲線圖。

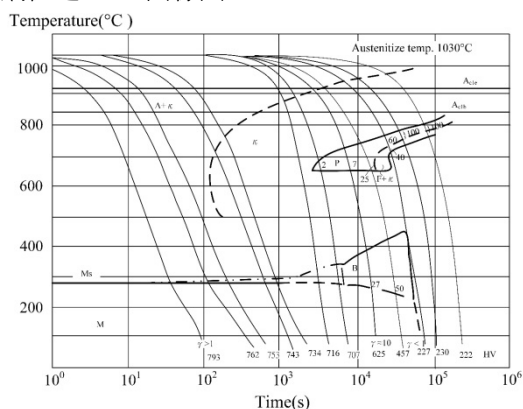


Fig.1 CCT diagram of SKD61 (H13)

由圖可知冷速較快的淬火可避免晶界碳化物的產生，較慢冷速則會產生變韌鐵，碳化物也會析出。淬火冷卻後所生成的組織粗分為波來鐵、麻田散鐵與變韌鐵，波來鐵成長過程為先在沃斯田鐵晶界上形成核，再成長為碳化物與肥粒鐵層狀組織，波來鐵又可由冷卻速率快慢依序分為微細波來鐵(fine pearlite)、中等波來鐵(medium pearlite)和粗波來鐵(course pearlite)三種，冷速越快其組織越細緻，波來鐵層間的

距離與強度和硬度也有關，間距越小，強度與硬度越高。麻田散鐵因為沃斯田鐵狀態下冷卻速率快、時間短而無法讓固溶在沃斯田鐵的碳及時析出，而是留在麻田散鐵中，而碳固溶在晶格中會產生顯著的應變，此應變造成其硬度、強度都大幅度提升，變韌鐵與波來鐵都是由碳化物與肥粒鐵構成，但生長過程不一樣。在較高溫形成的變韌鐵稱為上變韌鐵，在較低溫形成的變韌鐵則是下變韌鐵，分辨上、下變韌鐵可以由碳化物的析出位置辨別，上變韌鐵的碳化物析出在肥粒鐵外側，下變韌鐵的碳化物則是析出在肥粒鐵內部。淬火時若有波來鐵與變韌鐵的產生皆會使鋼材在相同硬度下的韌性(衝擊值)變差，無碳化物析出的麻田散鐵則是韌性最佳。在冷卻過程中發生的變態可能不只一種，由 CCT 圖可推測其組織，再由金相組織圖去印證。

工業上採用的冷卻方法通常為連續冷卻，其方法為將加熱後鋼料放入較低溫介質中，藉由不同的冷卻介質(空氣、油、水)使鋼料達到不同的冷卻速率，文獻[1]指出 SKD61 淬火冷速需要在 100 秒內從沃斯田鐵溫度降至 650°C，才能避免碳化物在沃斯田鐵晶界析出，而不同合金含量也會影響變態溫度。

### 2.2 合金元素對淬火的影響

淬火最主要的效果就是提高其硬度，也就是生成麻田散鐵，影響淬火硬度最主要的元素就是碳含量，碳含量越多其淬火硬度越高，當碳含量小於 0.2%時，無法達淬火硬化，而大於 0.6%時硬度不再有顯著提高[2]，當碳含量超過 0.6%淬火硬度曲線趨於平緩，硬度幾乎不變。合金元素的添加大多會抑制碳的擴散速率，減緩波來鐵及變韌鐵的變態，有利於麻田散鐵的形成。

除了較高的淬火溫度會增加殘留沃斯田鐵含量之外，碳含量的影響也很大，固溶於基地的碳含量每增加 1%，殘留沃斯田鐵增加約 50%，錳、鉻、鉬和鎢等合金元素也會影響。與淬火相關的還有硬化能(Hardenability)，即鋼材能被淬火硬化的能力，也稱之為淬火性，合金元素的種類與含量皆會影響硬化能，其中會顯著增加淬火性的元素有鉬、釩、鉻、錳、鎳，其可延遲沃斯田鐵變態成肥粒鐵，使變態曲線圖(CCT)向右移，即淬火時冷速不需太快即可淬硬，淬火效果較好。

### 2.3 合金元素對回火的影響

回火為淬火後重要的熱處理程序，硬度與韌性需兼具，受合金元素含量的影響極深，主要有以下二項：

#### (1) 回火軟化抵抗

麻田散鐵回火時因為鎳、錳、矽不會生成碳化物而是固溶在肥粒鐵中，此時會延遲碳

化物的析出與凝集，使得抵抗回火軟化效果增加，隨著合金元素的增加，回火到相同硬度需要較高的回火溫度[3]，因此合金鋼回火溫度較高，回火後殘留內應力較少韌性也較佳。

### (2) 高溫回火脆性

高溫回火脆性分為兩種，(1)回火時效脆性，為一次脆性，含鎳、鉻、錳合金元素的鋼種在回火溫度介於 500°C-550°C 回火，持溫長時間會產生回火時效脆性；(2)回火徐冷脆性，為二次脆性，含鎳、鉻、錳合金元素的鋼種在回火溫度介於 550°C-650°C 回火後，若徐冷則產生回火徐冷脆性。

## 3. 實驗方法

本研究主要是以添加不同合金含量的熱作工具鋼做熱處理，並探討淬火冷速對其機械性質之影響，其化學組成如表 2 所示。

Table2. Chemical composition of Steels

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V	Ni	Cu	Al	Co
Steel A	0.399	0.230	0.478	0.006	0.001	5.225	2.145	0.557	0.068	0.051	0.020	0.012
Steel B	0.352	0.341	0.407	0.012	0.002	5.638	1.405	0.484	0.073	0.068	0.017	0.010
Steel C	0.355	0.319	0.424	0.010	0.001	5.679	1.414	0.490	0.058	0.064	0.048	0.011
Steel D	0.378	0.213	0.549	0.012	0.001	4.942	1.957	0.454	0.081	0.062	0.007	0.011
Steel E	0.400	0.968	0.444	0.007	0.001	5.248	1.390	0.954	0.186	0.092	0.022	0.018
SKD61	0.32~ 0.42	0.8~1. 2	<0.5	<0.03	<0.03	4.5~ 5.5	1.0~ 1.5	0.8~ 1.2	-	-	-	-

## 4. 結果與討論

### 4.1 淬火冷卻曲線

本實驗利用 PID 程式溫度控制器控制試片的持溫時間、冷卻時間，以達到目標淬火條件。淬火時以溫度記錄器記錄試片的溫度(每分鐘記錄一點)，所得到的冷卻曲線如圖 2 所示，冷卻曲線分成 1020°C-700°C、700°C-500°C 和 500°C-300°C 三階段，因為各階段的冷速不同，條件 1 與條件 2 分別在 700°C、500°C 有溫度曲線的轉折，且各階段的冷速皆為斜率一定的直線；因為條件 3 冷速最快，其第三階段 500°C-300°C 冷卻方式為爐內空冷並將淬火爐上下兩端的耐火綿移開增加其通風效果，因此冷卻曲線並非直線，而是平滑曲線；條件 4 其三階段的冷卻曲線斜率相差不大，因此並無明顯的曲線轉折點。此外，條件 4 從淬火持溫 1020°C 降至 500°C 附近花費時間最長；整體而言，從淬火持溫 1020°C 降至 300°C 所花費的時間以條件 1 最長，而條件 3 最短。

架設淬火、回火設備，量測爐管內溫度分布後，調整上、中、下三段輸出功率使其均溫區大於試片長度。淬火過程中以 PID 程式控制器

控制持溫時間、降溫時間，並且用溫度記錄器記錄試片的溫度變化。熱處理主要分為淬火、回火兩部分。淬火後試片切取一小段，經由鑲埋、研磨、拋光後，以硬度試驗機測量其中心硬度，並做金相組織觀察，其餘部分繼續做回火處理。回火目標硬度為 46±1HRC，需根據其淬火條件、合金成分配置找到適當的回火溫度，以便進行 2 次回火後達目標硬度。回火後試片以水冷式高速砂輪切割機裁切成適當尺寸，經研磨加工成衝擊試片，並做衝擊試驗而得其衝擊值，其餘試片再做金相組織觀察，最後綜合其硬度、溫度冷卻曲線圖、衝擊值、金相顯微。

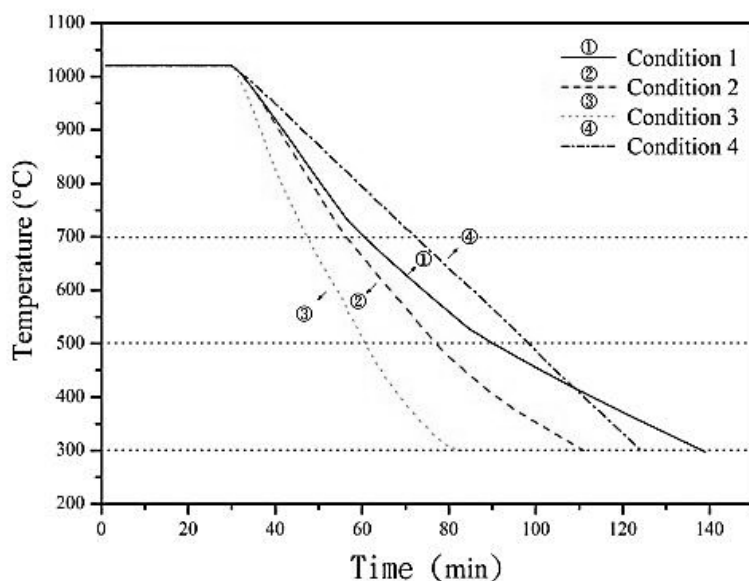


Fig.2. The cooling curve on the different quenching conditions

#### 4.2 各鋼種之硬度分析

本論文未經熱處理前的試片硬度如表 3 所示。

Table3. The hardness of steels before the heat treatment

Steel	Hardness(HRB)
Steel A	84.1
Steel B	92.5
Steel C	98.1
Steel D	101.5(25.6HRC)
Steel E	88.2

因為考慮試片在實施熱處理時表面可能產生氧化層或脫碳層而影響其硬度，故採用維克氏硬度試驗機測試試片中心硬度作為淬火後硬度值。在相同冷速下分析各鋼種的硬度表現，圖 3 為相同淬火冷速下不同鋼種的硬度比較圖，條件 1 冷速下鋼種 B 有最佳的硬度而鋼種 E 則最差；條件 2 冷速下鋼種 D 有最佳硬度而鋼種 E 也是最差；條件 3 冷速下鋼種 A 和 D 同時擁有最佳硬度值，鋼種 E 表現依然最差；條件 4 冷速下鋼種 A、D 硬度值較高且相差不多，而鋼種 E 硬度最差。綜合以上，可以明顯發現鋼種 E 在各種淬火冷速下其硬度表現皆不如其他鋼種，且在條件 4 冷速下其硬度差值可達 4.6HRC。由表 2 觀察其合金成分配置，其中鉬元素相較於其他鋼種其含量較低，而矽、釩含量較其他鋼種含量高，鉬在淬火時可顯著增加硬化能，可以讓材料不需要很快的冷速下也可得到良好的硬化效果；而矽會提高沃斯田鐵化溫度[4]，故鋼種 E 的淬火溫度需較其他鋼種高；此外，釩會和基地中的碳形成碳化物，且不易在淬火溫度固溶基地，因此鋼種 E 基地中的碳含量較低，因而推測鋼種 E 在 1020°C 淬火後硬度表現較差。

#### 4.3 淬火後顯微組織觀察

從淬火後顯微組織中，選出硬度最佳的鋼種 D 和硬度較差的鋼種 E 做為代表，由圖 4 中可以發現基地組織大致為麻田散鐵組織和散佈在基地中的碳化物，鋼種 D 在條件 1 冷速下其顯微組織可以明顯看到許多碳化物，而在條件 3 冷速下碳化物則減少許多，從 SKD61 CCT 曲線圖可知道冷速越慢的情況下其切過碳化物生成區間越長，因此碳化物有足夠的時間可以析出，由硬度去做比較，可發現碳化物越多會造成硬度表現越差。由圖 4(c)可

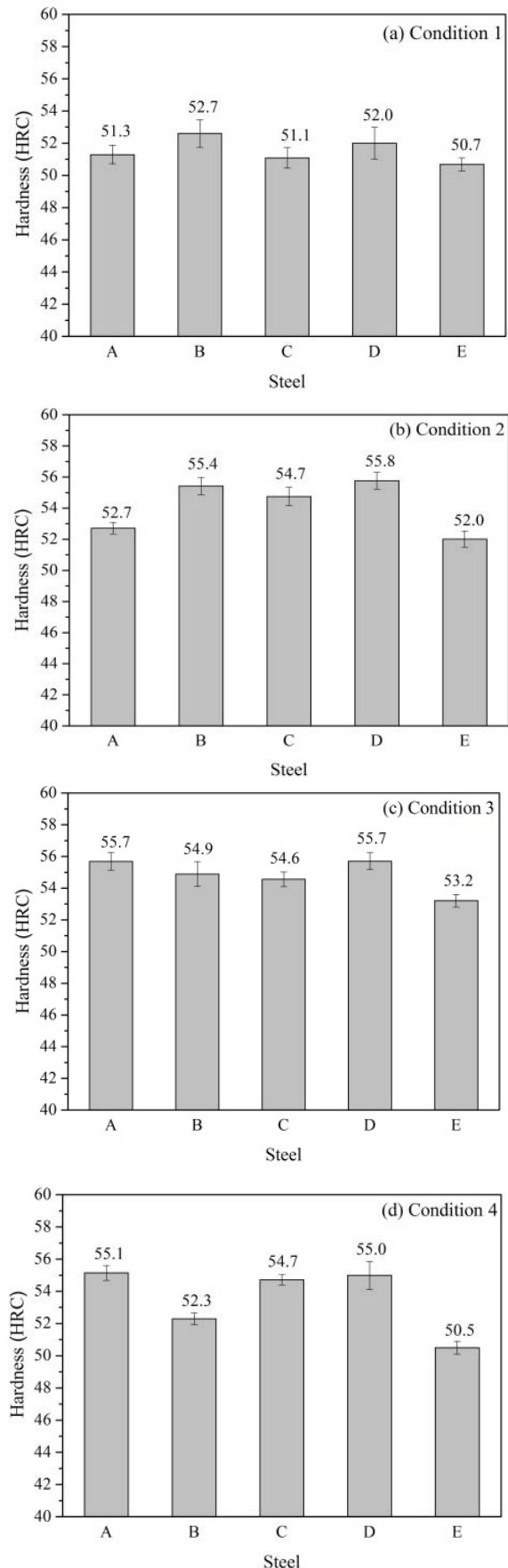


Fig.3 The hardness of steels on the different quenching conditions



知，鋼種 D 由沃斯田鐵化溫度降溫至 700°C 即使花費 17 分鐘(條件 3)，還是足以避免碳化物的生成。圖 5 為鋼種 E 以不同冷速淬火後的顯微組織，可發現在不同冷速中，鋼種 E 的碳化

物分佈差異不大，但在圖 5(d)可以看到晶界上有少許受腐蝕較深的區塊，此為變韌鐵組織，這可能是鋼種 E 在條件 4 冷速下硬度不佳的原因。

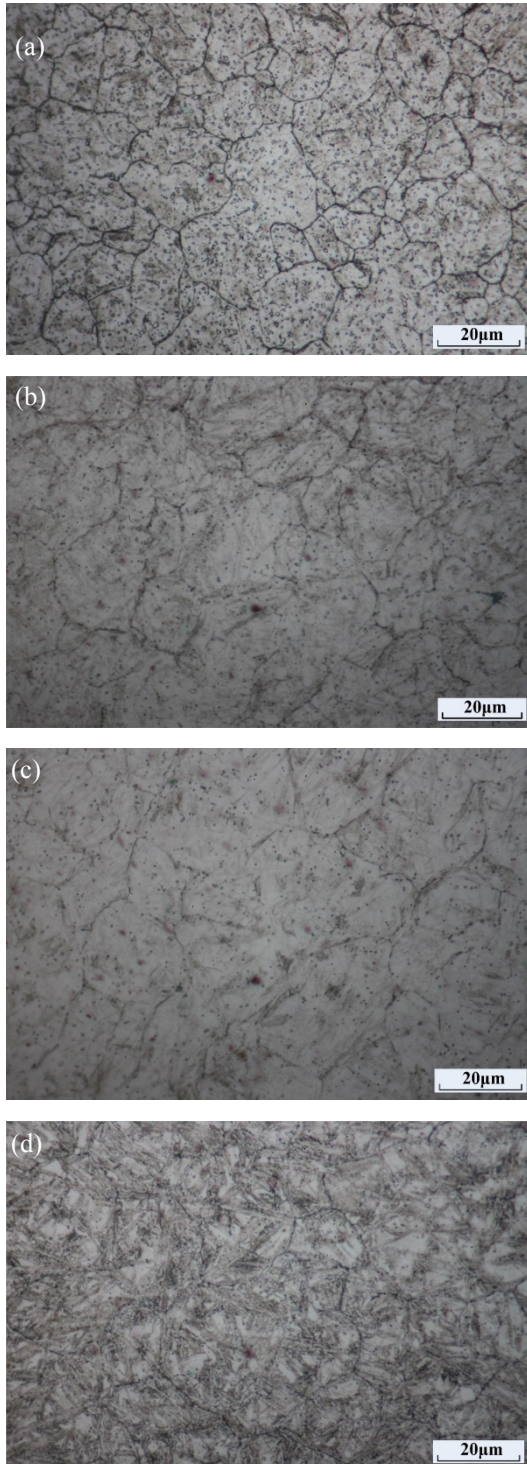


Fig.4 The microstructure of Steel D on the different quenching conditions:(a)condition 1 (b)condition 2 (c)condition 3 (d)condition 4

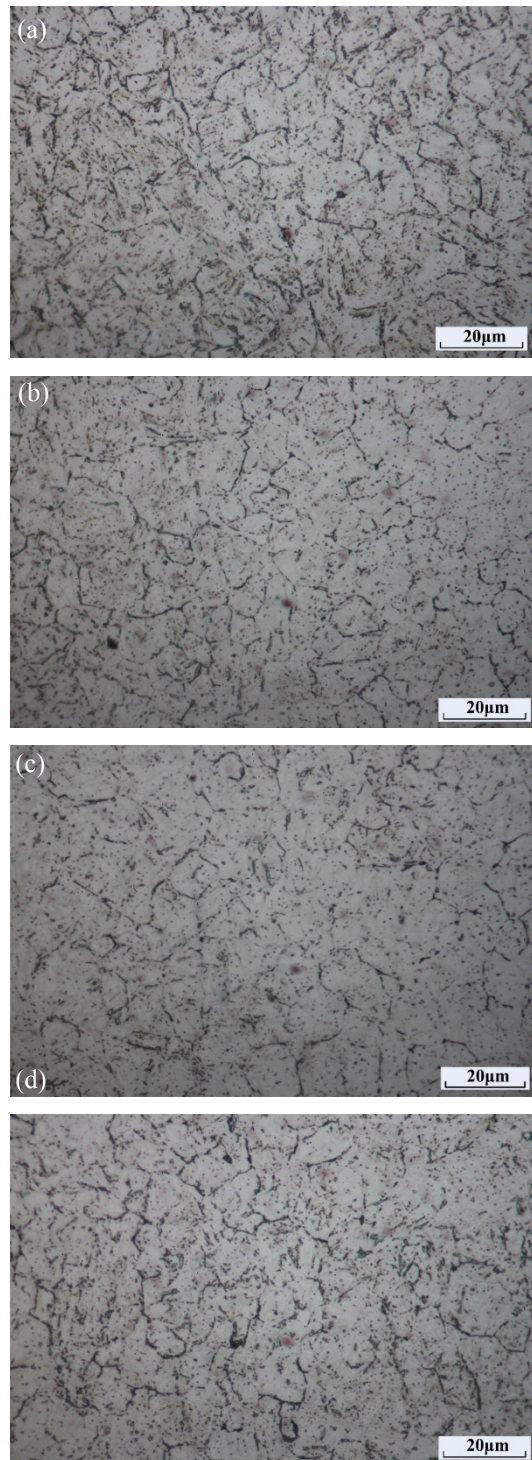


Fig.5 The microstructure of Steel E on the different quenching conditions:(a)condition 1 (b)condition 2 (c)condition 3 (d)condition 4



#### 4.4 淬火回火後韌性分析

本實驗影響試片衝擊值的可能因素為：  
(1) 淬火冷卻速率過慢，使碳化物的析出影響衝擊值表現；(2) 合金元素的配置對衝擊值的影響。

本論文中各試片淬火回火後的韌性以擺捶式 Charpy 衝擊試驗機進行試驗，所得衝擊值來做韌性比較，由圖 6 中可發現在條件 1 的冷速下，鋼種 A、B 的韌性表現較佳而鋼種 C、D 表現較差，其中鋼種 F 因為回火條件控制不當，其回火硬度降至 44.1HRC，故鋼種 E 的衝擊值在本論文中僅供參考；在條件 2 的冷速下，鋼種 B 韌性表現最佳而鋼種 C 韌性表現最差；在條件 3 的冷速下，鋼種 D 韌性表現最佳而鋼種 C 韌性表現最差；在條件 4 的冷速下也是鋼種 D 韌性表現最佳，鋼種 F 韌性表現最差。綜合以上的衝擊值變化可以發現幾個現象：

(1) 由相同冷速下去分析各鋼種表現，可以明顯發現在條件 3 的冷速下各鋼種的韌性均較佳，而條件 3 冷速最快，由此可知較快的淬火冷速對韌性有正向的影響，先前有提到 SKD61 熱作工具鋼在淬火時從沃斯田鐵化溫度降溫至 650°C 需要在 100 秒內完成，才不會有碳化物析出[1]，而本實驗的最快冷速也無法達到此條件，因此皆有碳化物析出，冷速越慢的情況下，碳化物的析出量越多，相對的冷速較快時碳化物析出較少，故韌性較佳。

(2) 條件 1 冷速下各鋼種韌性表現較差，由表 1 可以發現條件 1 冷速從 500°C 降溫至 300°C 冷速最慢，控制在 49 分鐘左右，相對於其他條件慢許多。先前由 Toshio 研究中提到低於 500°C 時冷速為 300°C/hr，碳化物會沿著沃斯田鐵晶界析出，也會造成晶粒的成長與碳化物密度的增加，而條件 1 在 500°C 以下的冷速僅約為 245°C/hr，推測此為其韌性表現不佳的原因。

(3) 鋼種 D 除了在條件 1 冷速下韌性表現較差外，其餘條件冷卻速率下其表現不是最佳就是次佳，而鋼種 C 則是在各條件冷速下韌性表現皆為最差，由表 2 可知道鋼種 D 與其他鋼種合金配置的差異。以下說明為鋼種 D 的合金錳、釩和鋁元素對其韌性影響：

a. 鋼種 D 中錳元素相較於其他鋼種其含量較高，而錳元素可使晶粒細微化的效果進而提高韌性的表現。

b. 鋼種 D 中釩元素相較其他鋼種其含量低，研究中提到釩的碳化物完全溶解後會造成晶粒大幅度的成長，造成韌性下降，釩含量較低與鋁含量較多可使衝擊韌性較佳[5]，其結果與本論文實驗衝擊值相符。

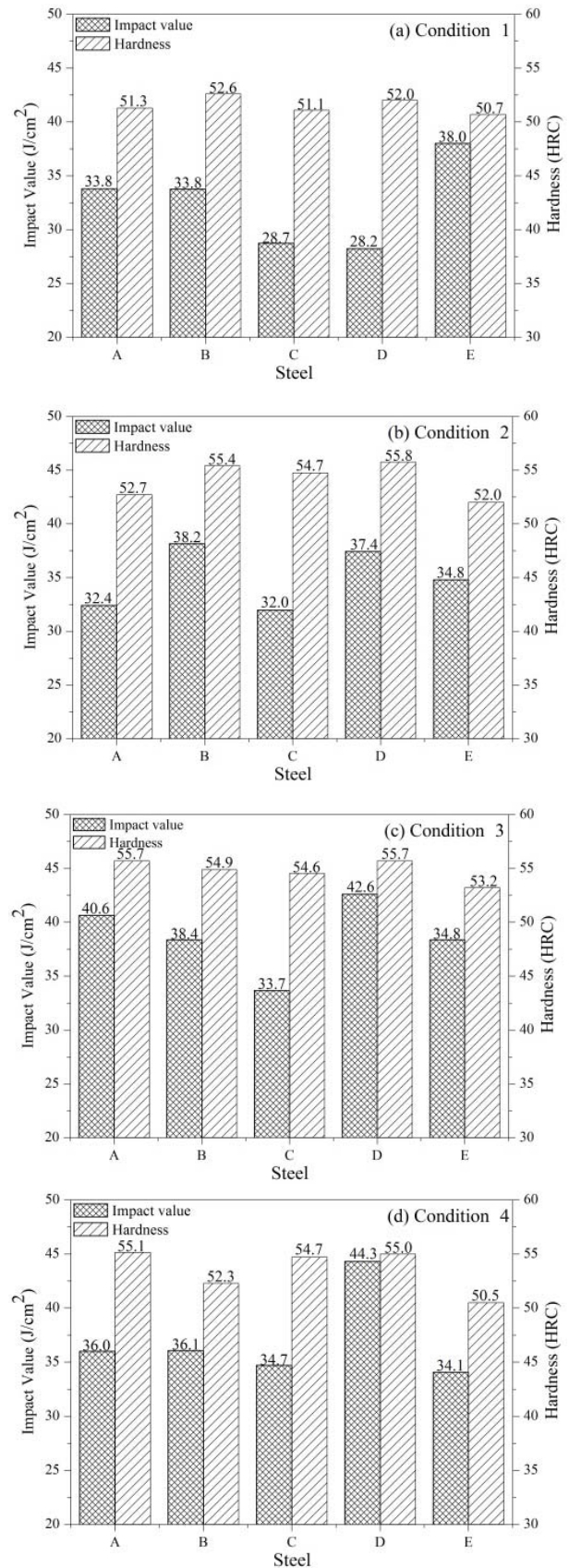


Fig.6 The impact value of steels on the different quenching conditions

#### 4. 結論

- (1) 淬火冷卻速率越快的試片，其淬火狀態的晶界上越少碳化物的析出，冷速較慢的試片碳化物析出量較多。
- (2) 釩、矽含量偏高，鉬含量偏低的鋼種 E 在各種淬火冷速中，淬火後的硬度值表現相較於其他鋼種皆較差。
- (3) 鋼種 D 有較高的錳、鉬元素含量，較低的釩元素含量，錳元素有抑制晶粒的成長與提高硬化能的效果，此外，高鉬低釩的合金含量其韌性較佳，因此鋼種 D 的淬火硬度表現較佳，且在衝擊值的表現也大多優於其他鋼種。
- (4) 冷速從 500°C 降至 300°C 時間越長，其越有充分時間使晶粒成長與碳化物密度增加，因此 500°C 降至 300°C 此階段的冷卻速率越慢其韌性表現越差。
- (5) 要避免 SKD61 生成碳化物，其冷速需在 100 秒內從淬火溫度冷卻至 650°C，而改良鋼種 D 由沃斯田鐵化溫度降至 700°C 即使花費 17 分鐘，所析出的碳化物量還是很少，故鋼種 D 的淬火冷卻速率不需要太快即可避免碳化物的生成，此對工業上大型工件的淬火冷速選擇會有較大的彈性。

#### 參考文獻

1. Karl-Erik Thelning : Steel and its heat treatment , Butterworths Published , pp. 296.
2. 黃振賢，金屬熱處理，文京圖書公司，2000
3. 黃振賢，機械材料，文京圖書公司，1990
4. C. Kaynak , A. Ankara , T. J. Baker , “Initiation and early growth of short fatigue cracks at inclusions” , Materials Science and Technology , 1996 , pp. 421-426.
5. Jian Zhou , Dang-shen MA , Hong-xiao Chi , Zai-zhi Chen , Xiang-yang LI , “Microstructure and Properties of Hot Working Die Steel H13MOD” , Journal of Iron and Steel Research International , Vol.20 , 2013 , pp. 117-125.