

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

Effects of Different Quenching Temperatures and Different Holding Time on the Mechanical Properties of SKD61 and Its Modified Steels

朱致成¹

Chi-Chen Chu

朱柏翰¹

Po-Han Chu

周挺正²

T.C Chen

陳永傳^{1*}

Y.C Chen

摘要

本實驗以不同淬火溫度、不同持溫時間，將 SKD61 之規範鋼以及改良鋼以高速氣冷方式實施淬火，再回火至相同硬度後比較其衝擊值，並透過顯微組織之觀察，以了解鋼料的淬火溫度、持溫時間和合金元素配置對機械性質的影響，並探討何種熱處理及合金配置對機械性質有最佳的結果。

關鍵詞：熱作工具鋼、淬火、回火、顯微組織、衝擊值

1. 前言

熱作工具鋼是國內工業應用最廣且最重要的高合金特殊鋼之一，由於熱作模具必需在高溫下使用，對於模具工業來說，特別注重耐衝擊性、高溫強度、高溫韌性等。熱作工具鋼的種類繁多，這些材料性質的改變，主要取決於材料內部的晶粒大小、合金種類、結晶結構、相分佈等組織的變化。而使用最普遍的鋼種為 SKD61，但是 SKD61 因為 V 含量過高的關係，二次高溫回火後容易在晶界上產生太多 VC 碳化物析出，造成材料韌性上的損失。本實驗以 SKD61 的規範鋼及其改變合金成份的改良鋼做為此實驗之研究試片，改變其淬火溫度及持溫時間，以期在高溫二次回火之後有良好的韌性及硬度。

以往對於熱作工具鋼已進行了不少研究^(1,2,3,4)，而 SKD61 具有良好的韌性與抗高溫疲勞性能，能承受溫度驟變，適宜在高溫下長期工作。而工業上使用時，由於淬火爐過大，產生的溫度不均溫情形對鋼材造成一定程度的影響，故本實驗以不同淬火溫度、不同持溫時間、不同回火溫度、不同回火持溫時間，將不同合金配置的鋼料淬火回火到 48HRC 的硬度下，比較其韌性值以及顯微組織，以了解鋼料淬火時的淬火溫度、持溫時間和合金元素配置對機械性質的影響，並探討何種熱處理及合金

配置對機械性質有最佳的結果。

2. 實驗方法

本實驗用試片為 10.5mm×10.5mm×75mm 之長方體試片，上方鑽有兩孔，一孔吊掛試片用，一孔放置熱電偶。材料方面為四種熱作合金工具鋼，Z 為 SKD61 之規範鋼，A、B、C 為 SKD61 之改良鋼，鋼種成分如表 1 所示。

淬火的條件是四種鋼材在 1000°C、1010°C、1020°C、1030°C 下保持 30 分鐘、60 分鐘、120 分鐘，之後將試片拉至爐管的低溫區，再以 2m/sec 之高速氣體通入淬火爐內淬火，以溫度記錄器記錄實驗過程中試片的溫度曲線，以確保試片淬火的冷速是否足夠，圖 1 為淬火冷卻曲線。淬火後之試片以洛氏硬度機量測鋼材表面硬度，再放入中溫鹽浴爐內進行高溫回火，回火後試片再以洛氏硬度機量測回火後的鋼材表面硬度。

本實驗要求試片回火後硬度在 48HRC 左右，故需在每種淬火條件下試作出一片試片，再以試片根據合金元素配置去找尋適當的回火溫度，由於淬火後試片隨著淬火溫度高低及持溫時間長短而硬度有所不同，故在進行回火時必須施以兩次以上回火來達到所需之硬度值，而完成回火之試片再以水冷式高速砂輪切割機裁切成適當大小，並研磨加工成衝擊試片，加工好之衝擊試片再施以 Charpy 衝擊試驗而得到衝擊值，同時利用切割下來之剩餘試片經鑲埋、研磨、拋光處理後，以微硬度試驗機量測鋼材中心硬度，量測完的試片以 3% Nital 腐蝕液進行腐蝕，之後再以光學顯微鏡觀察顯微組織，並拍攝照片。

3. 結果與討論

3.1 淬火後硬度分析

試片經過各條件淬火後，使用洛氏硬度試驗機量測試片表面硬度，其結果如圖 2 所示。根據參考文獻⁽²⁾之研究，SKD61 以 1000°C 持

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

表 1.各鋼材的合金配置(wt%)

鋼種	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V	Ni	Cu	Al	Co
規範鋼 Z	0.384	0.942	0.401	0.009	0.001	5.216	1.178	0.797	0.083	0.045	0.016	0.009
改良鋼 A	0.327	0.325	0.412	0.011	0.019	5.544	1.374	0.473	0.111	0.069	0.015	0.010
改良鋼 B	0.342	0.287	1.108	0.008	0.001	5.662	2.199	0.549	0.078	0.057	0.001	0.002
改良鋼 C	0.376	0.182	0.469	0.008	0.001	5.118	2.119	0.540	0.071	0.051	0.022	0.015
SKD61 的規格 成分	0.32 ~ 0.42	0.8 ~ 1.2	< 0.5	< 0.03	< 0.03	4.5 ~ 5.5	0.8 ~ 1.2	-	-	-	-	-

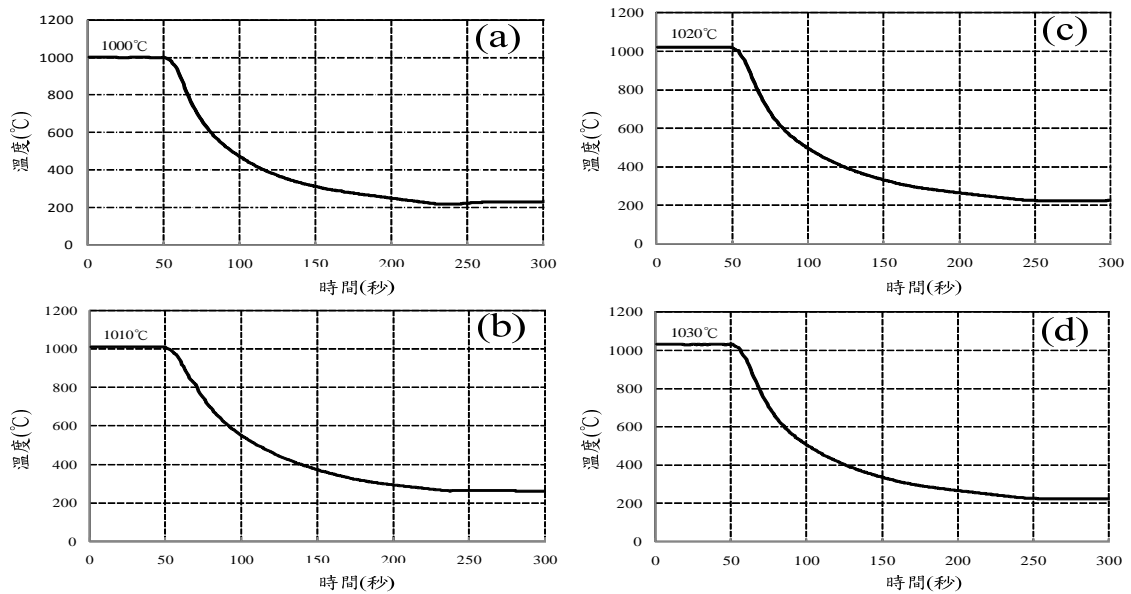


圖 1.鋼料試片在淬火溫度(a)1000°C、(b)1010°C、(c)1020°C、(d)1030°C持溫後，以高速氣體施以冷卻時，其溫度與時間的關係

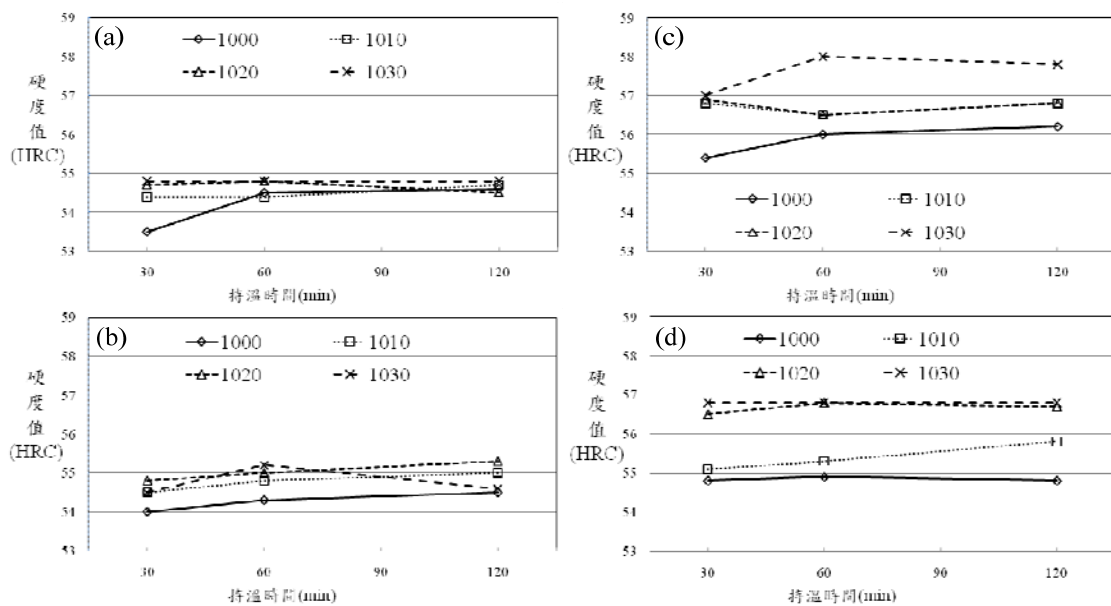


圖 2.試片以各種條件淬火後的硬度，(a)規範鋼 Z、(b)改良鋼 A、(c)改良鋼 B、(d)改良鋼 C

溫 30 分鐘淬火後的硬度約為 53.5HRC，持溫 60 分鐘淬火後的硬度約為 54HRC。本實驗的規範鋼 Z 以相同熱處理條件淬火後的硬度如圖 2(a)所示，符合 SKD61 在 1000°C 淬火時的硬度。淬火條件造成的影響可分兩部分來看，一部分是淬火持溫時間對硬度造成的影響，另一部分是淬火溫度對硬度造成的影響。先由持溫時間不同來看，當淬火溫度為 1000°C 時，改良鋼 A 持溫 30、60、120 分鐘的硬度為 54.0HRC、54.3HRC、54.5HRC，與規範鋼 Z 硬度值差不多，可從圖 2(b)看得出來硬度隨著持溫時間增加而增加。改良鋼 B 在 1000°C 持溫 30、60、120 分鐘後的硬度各為 55.4HRC、56HRC、56.2HRC 也是隨著時間增加，其硬度曲線如圖 2(c)所示。改良鋼 C 在 1000°C 持溫 30、60、120 分鐘後的硬度各為 54.8HRC、54.9HRC，54.8HRC，由圖 2(d)可發現硬度並無隨著時間增加的趨勢。再看淬火溫度造成的影響，規範鋼 Z 以 1000°C、1010°C、1020°C、1030°C 分別持溫 30 分鐘淬火後的硬度有著隨溫度上升而硬度增加的趨勢，改良鋼 A 以 1000°C、1010°C、1020°C、1030°C 分別持溫 30 分鐘淬火後的硬度大約在 1010°C~1020°C 持溫時有最佳硬度，分別看改良鋼 A 持溫 60 分鐘及 120 分鐘的硬度分佈亦可發現，大約在 1020°C 左右持溫有著最佳硬度值，且硬度值與規範鋼 Z 的硬度差異不大。由圖 2(c)可知改良鋼 B 在 1000°C、1010°C、1020°C、1030°C 淬火後的硬度曲線皆有隨溫度上升而硬度增加的趨勢，硬度最高可達 58.1HRC。圖 2(d)顯示改良鋼 C 以 1000°C、1010°C、1020°C、1030°C 分別持溫 30 分鐘淬火後的硬度亦隨溫度上升，且從 1010°C 到 1020°C 淬火時，硬度上升的幅度非常明顯。

由圖 2 可看出，在延長持溫時間的情況下，低淬火溫度比高淬火溫度的硬度值有較顯著的增加。而在高淬火溫度情況下，高合金成分的改良鋼 B、C 因為合金碳化物多，仍可在較高的淬火溫度下，抑制晶粒成長，故可保有較高的硬度。前人研究中⁽²⁾，合金元素 Cr、Mo、V 隨著溫度上升，固溶在基底的量會隨之增加，但是在持溫時間超過 45 分鐘之後，固溶的量並無太明顯之增加。故淬火溫度上升所增加的硬度值會比持溫時間所增加的硬度值來得大，且持溫時間增加，還有可能帶來晶粒粗大，故在各個溫度下，選用持溫時間 1 小時會是最佳選擇。

改良鋼 A、B、C 與規範鋼 Z 的差別是合金元素的配置，由表 1 的各材料合金元素分析顯示，改良鋼 A、B、C 相較於規範鋼 Z 來說 V 和 Si 的含量較低，改良鋼 B、C 的 Mo 和改良鋼 B 的 Mn 含量明顯較改良鋼 A 和規範鋼 Z 來得高。Cr、Mo、Mn 是讓 TTT 曲線右移最

重要的合金元素，故在相同冷速淬火下，由於改良鋼 B、C 的合金量較多，硬化能亦較大，對於冷速的要求較低，所以 Mn、Mo 含量較多的改良鋼 B、C 在相同氣冷淬火下的硬度值會較 A、Z 來得高。且因為 Mn 對增加硬化能及抑制晶粒成長的效果較顯著，故有著較高 Mn 含量的改良鋼 B，其硬度會比改良鋼 C 的硬度來得高。從參考文獻⁽⁵⁾的實驗結果顯示，淬火溫度在 940°C 以上時，V 含量的多寡對淬火硬度的影響相當小。比較規範鋼 Z 與改良鋼 A，雖然規範鋼 Z 的 V 含量幾乎為改良鋼 A 的兩倍，但結果顯示改良鋼 A 的淬火硬度與規範鋼 Z 並無顯著差異。

3.2 回火條件分析

本實驗每一個試片回火後的目標硬度皆在 48±0.5HRC 的範圍內。回火條件的選擇則隨著鋼種、淬火溫度和持溫時間的不同有明顯差異。由參考文獻^(3,4)中，可以推測規範鋼 Z 和改良鋼 A、B 經 1020°C 及 1030°C 持溫 30 分鐘淬火後的回火溫度。在回火時間的選擇上，持溫 1.5~2 小時是較適合的回火時間，可讓試片的韌性較佳。

文獻⁽⁶⁾中，顯示合金元素 Cr、Mo、V 對回火二次硬化有很強的作用。本實驗所用之改良鋼 A 降低了 Si、V 含量，增加了 Cr、Mo 的含量，其中 V 含量的減少會讓二次回火後的硬度稍低。而參考文獻⁽³⁾的實驗結果顯示，當 Cr 的含量較高，Cr 會因為形成合金碳化物的關係大量減少，讓 Cr 原子在回火麻田散鐵組織中抵抗軟化的能力降低。改良鋼 B 相對於規範鋼 Z，大量增加了 Mo 含量，故在回火條件的表現上有著明顯的不同，以本實驗設定的 592°C 回火溫度，對 1000°C 持溫 30、60、120 分鐘的淬火試片可回火兩次後即達到硬度為 48±0.5HRC，但隨著淬火溫度的提升，Mo 溶入組織的量增加，在回火溫度沒有增加時，無法以二次回火就達到目標硬度值，需再經過第三次回火才能達到 48HRC。而淬火時間 120 分鐘的熱處理條件會讓淬火後的組織晶粒粗大，故第三次回火時間會稍減。改良鋼 C 相較於規範鋼 Z，其 Si 含量降至 0.18%，V、Cr 的含量也稍減，而 Mo 的含量和改良鋼 B 差不多，都是將近兩倍的量，表現在回火條件上則為回火溫度的提升，且回火溫度隨著淬火溫度的提升而增加。並且如同改良鋼 B 的硬度曲線在持溫 120 分鐘後，因為晶粒粗大而導致回火後硬度的下降。而改良鋼 C 比改良鋼 B 的回火溫度要高的原因，推估是改良鋼 C 內的 Mn 含量較少而使改良鋼 C 內沃斯田鐵殘留量比改良鋼 B 內的殘留量少⁽³⁾，進而影響到回火溫度的選擇。

3.3 金相組織

圖 3~6 是各鋼材經各種淬火回火條件後的顯微組織。由圖可知，各鋼種的組織皆有著隨淬火溫度上升而逐漸粗大的趨勢，規範鋼 Z 的 V 含量是最多的，V 易與 C 形成碳化鈦 VC，而 VC 固溶溫度高，具有抑制晶粒成長的效果，故規範鋼 Z 相較於低 V 量的改良鋼 A、B、C 擁有最小的晶粒。而 V 含量較低的改良鋼 B、C 之組織就明顯較大，可從圖 5、6 可發現改良鋼 B 相較於改良鋼 C 的組織較細緻，因為 Mn 含量對於抑制晶粒粗化有顯著的影響⁽⁷⁾，所以 Mn 含量較高的改良鋼 B 的組織會比改良鋼 C 的組織來得細緻。

3.4 韌性分析

圖 7 是四種鋼材經不同條件熱處理後的衝擊值，先看改良鋼 A 經不同條件淬火並回火到硬度為 48HRC 時的衝擊值可知，改良鋼 A 在較低淬火溫度如 1000°C、1010°C 條件下的衝擊值隨著持溫時間的增加有非常顯著的提升，由先前的硬度試驗發現，合金元素在較低淬火溫度時溶入基地的速度較慢，故淬火溫度較低的試片會隨著持溫時間的增加，其衝擊值會有著明顯增加的趨勢。在較高的淬火溫度 1030°C 條件下，合金溶入的量增加，其衝擊值會較淬火溫度 1000°C 下的衝擊值來得高，不過由於淬火溫度較高，持溫時間增長後，晶粒粗化效果明顯，故持溫時間拉長後對衝擊值的影響反而沒有在淬火溫度 1000°C 時來得明顯。而在同樣持溫時間 30 分鐘下，淬火溫度越高，衝擊值越高，其趨勢與硬度的表現，大致上有相關性。而改良鋼 A 在 1030°C 下持溫 2 小時的淬火條件下有最高的衝擊值。

由圖 7 看改良鋼 B 經不同條件淬火並回火到 48HRC 的衝擊值部分，發現在淬火條件 1000°C 下的試片衝擊值最高，其原因可能是因為在 1000°C 時 Mo 溶入的量較少。參考文獻⁽⁸⁾指出 Mo 的含量在 0.75% 以上時，對衝擊值有不良影響，而改良鋼 B 在 1000°C 的淬火硬度顯示合金元素並無完全溶入基地組織，使得 Mo 對韌性的影響降低，故衝擊值反而較淬火溫度在 1010°C~1030°C 之試片為高。再比較淬火溫度 1010°C~1030°C 時持溫時間對衝擊值的影響，改良鋼 B 以 1010°C~1030°C 淬火的試片，其衝擊值對於淬火持溫時間的增加並無明顯趨勢，而淬火條件 1030°C 下的衝擊值相當平均，大致上也較淬火溫度 1010°C、1020°C 時的衝擊值高，其原因可能為在 1030°C 下，合金元素溶入的量較多，適量的 Mn 抑制晶粒粗大化，進而降低 Mo 對衝擊值的影響。

再探討改良鋼 C 經不同條件淬火並回火到 48HRC 的衝擊值，由圖可知，改良鋼 C 的衝擊值表現上與改良鋼 B 類似，兩鋼材在淬火

溫度 1000°C 持溫時間 30 分鐘下的衝擊值皆有良好的表現，但隨著持溫時間的增加，衝擊值隨之下降，其原因為改良鋼 C 的合金元素 Mn 含量相對於改良鋼 B 要少，所以改良鋼 C 對晶粒粗化上的抵抗力較差，隨著持溫時間的增加，晶粒會明顯粗化，所以衝擊值較差，而在淬火溫度 1010°C 以上，觀察硬度趨勢，發現合金元素溶入基地的量增加，衝擊值亦隨著硬度值而產生變化。改良鋼 C 在淬火溫度 1010°C 持溫 120 分鐘下有最高衝擊值，觀察改良鋼 C 之顯微組織後發現，淬火條件 1020°C、1030°C 的晶粒較 1010°C 的晶粒來得粗，故淬火條件 1000°C、1010°C 之試片衝擊值並不會比淬火溫度較高時來得低，且由於淬火溫度的提高，合金元素溶入的量增加，Mo 對於韌性上有不好的影響，故即使添加了 V 和 Mn，在較高淬火溫度下(如淬火溫度 1030°C)的試片，在衝擊值表現上無法像較低溫淬火時的衝擊值高。

4. 結論

1. 本實驗利用 2m/sec 之高速氣體對工件進行淬火，冷卻速率介於空冷與油冷之間，與工業上使用真空爐淬火的冷卻速率相當。
2. 合金含量較多的改良鋼 B、C 在相同氣冷淬火下的硬度值較改良鋼 A 和規範鋼 Z 來得高。而隨著淬火溫度的上升，淬火後的硬度值大多隨之提升，但淬火時間的長短則對改良鋼 B、C 之淬火硬度的影響較小。
3. 由於 Mn 有抑制晶粒成長及增加硬化能的效果，故有著較高 Mn 含量的改良鋼 B，其硬度會比改良鋼 C 的硬度來得高。且在衝擊值的表現上，改良鋼 B 亦比改良鋼 C 的衝擊值要高。
4. 在回火條件的選擇上，有較高淬火硬度的鋼材，回火的溫度不一定較高，而與合金的配置有關。合金含量較低的規範鋼 Z，回火溫度並不隨著淬火溫度和持溫時間的提升而有著明顯的增加，回火持溫時間也不隨著淬火溫度和持溫時間的不同而有顯著差別。改良鋼 B、C 相對於規範鋼 Z，大量增加了 Mo 含量，所以隨著淬火溫度的提升，Mo 溶入基地的量增加，導致回火軟化抵抗增加，因此在回火溫度沒有增加時，無法以二次回火就達到目標硬度值 48HRC，需經過第三次回火，硬度才能達到目標值。
5. 在顯微組織的表現上，隨著淬火溫度提升及持溫時間的增加，晶粒大小亦隨之增加。且晶粒大小受合金元素影響很大，由於規範鋼 Z 的 V 含量較高，所以擁有最小的晶粒。而 Mn 含量對於抑制晶粒粗化有顯著的影響，所以 Mn 含量較高的改良鋼 B 的組織會比改良鋼 C 的組織來得細緻。
6. 合金元素含量較高的改良鋼 B、C，淬火持溫時間的長短和淬火溫度的高低對衝擊值的

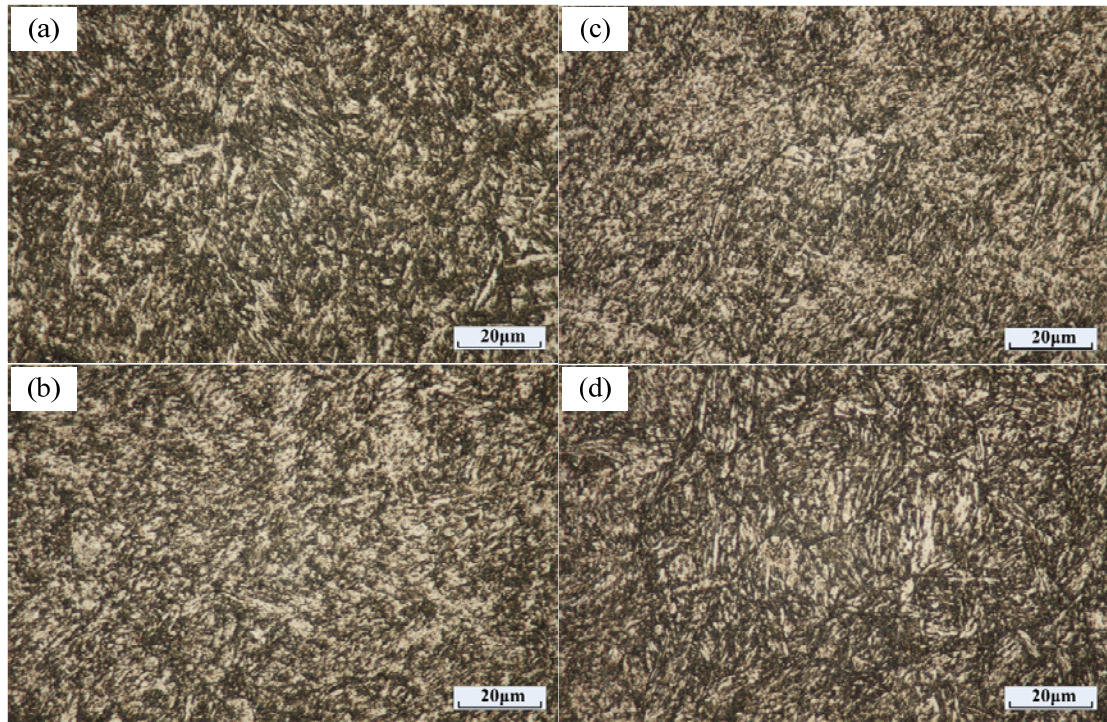


圖 3.規範鋼 Z 在(a)1000°C、(b)1010°C、(c)1020°C、(d)1030°C 持溫 120 分鐘後淬火，並經回火後之顯微組織

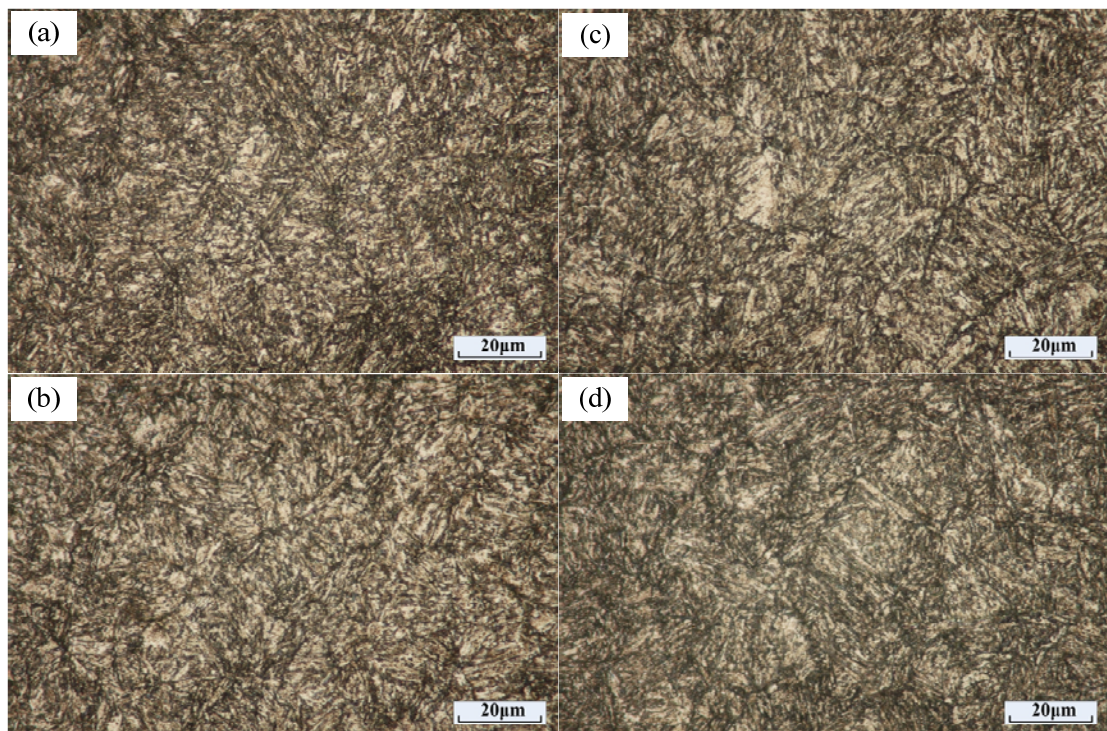


圖 4.改良鋼 A 在(a)1000°C、(b)1010°C、(c)1020°C、(d)1030°C 持溫 120 分鐘後淬火，並經回火後之顯微組織

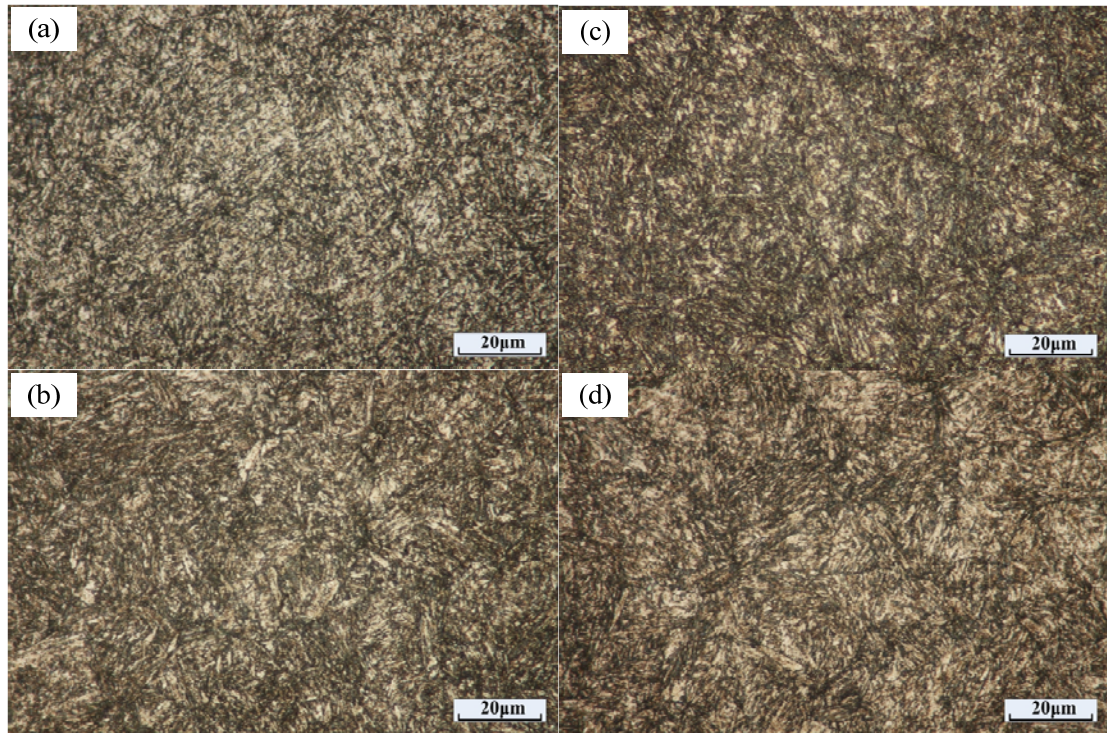


圖 5.改良鋼 B 在(a)1000°C、(b)1010°C、(c)1020°C、(d)1030°C持溫 120 分鐘後淬火，並經回火後之顯微組織。

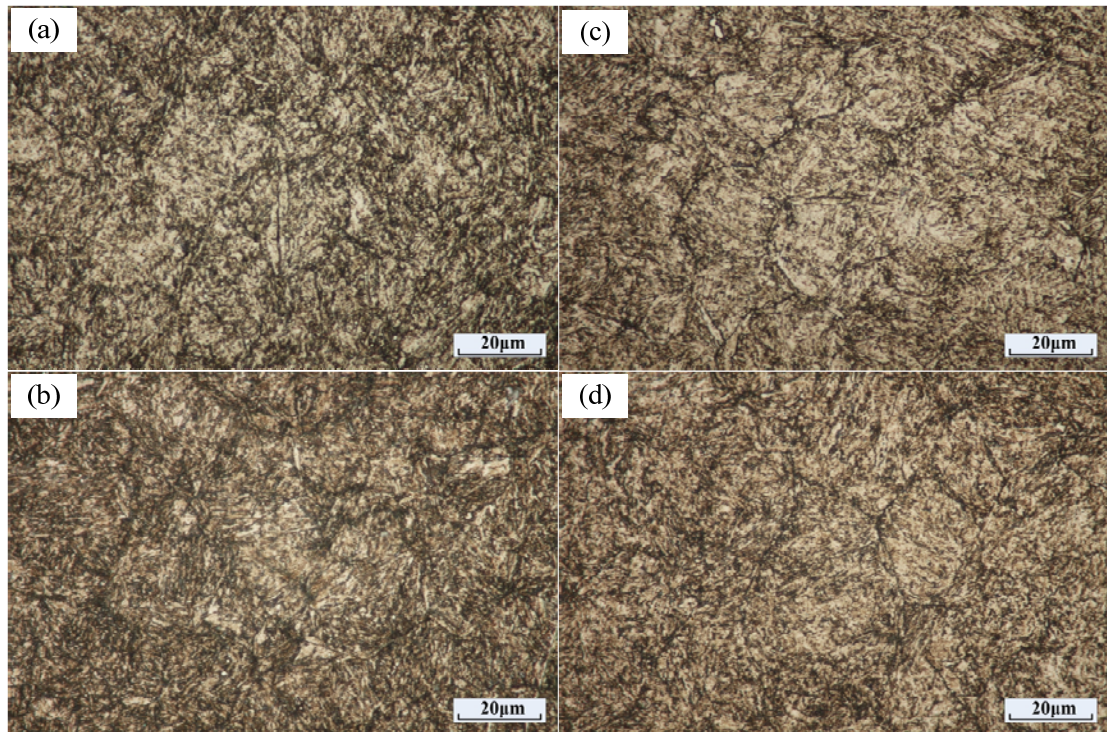


圖 6.改良鋼 C 在(a)1000°C、(b)1010°C、(c)1020°C、(d)1030°C持溫 120 分鐘後淬火，並經回火後之顯微組織

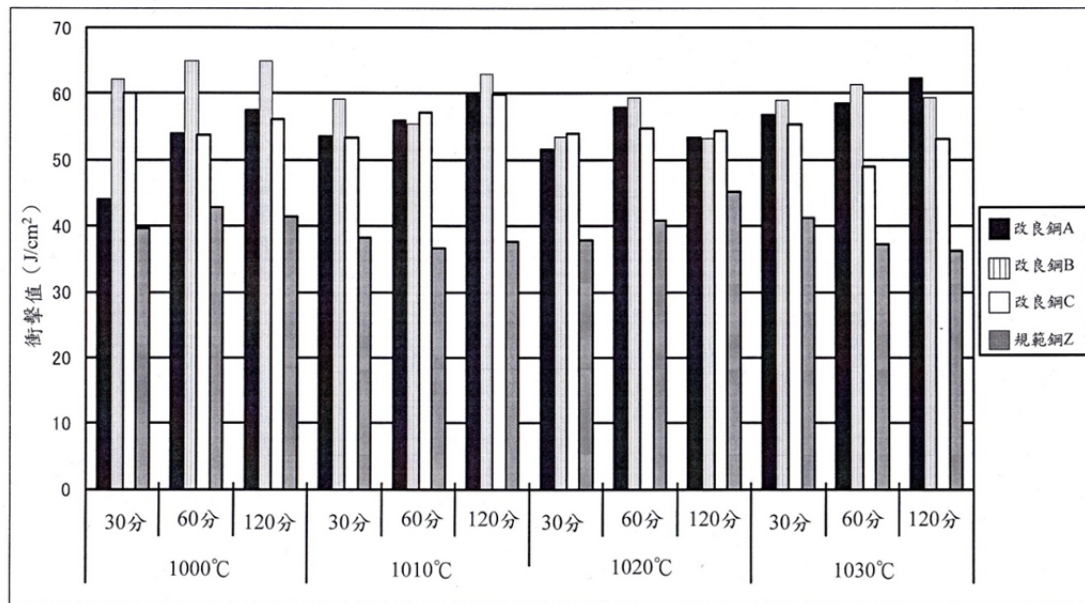


圖 7. 各種鋼料經不同條件熱處理後的衝擊值比較

影響較小，大多可以具有一定的衝擊值；而合金元素含量較低的改良鋼 A，淬火持溫時間的長短對衝擊值影響很大，尤其是當淬火溫度較低時。

7. V 和 Mn 是對韌性非常重要的合金元素，V 和 Mn 含量較高的改良鋼 B、C 之衝擊值幾乎都比改良鋼 A 的衝擊值高。由於合金配置的不同，改良鋼 C 的回火溫度雖然較改良鋼 B 來得高，但在衝擊值的表現上卻較改良鋼 B 來得差。

8. 改良鋼 B、C 的 Mo 含量很高，而 Mo 含量 0.75% 以上則會對韌性造成不良影響，故在淬火溫度 1000°C 持溫 30 分鐘的淬火條件下，Mo 的固容量已經足夠，若溫度再提高，會增加 Mo 的固容量，但不見得對韌性有利。

參考文獻

1. 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學研究所，碩士論文，pp.21~25、55~56，2010
2. 王文雄、李訓杰、吳錫侃，“AISI H13 熱作模具鋼之熱處理”，金屬熱處理，第 36 期，pp.15~30，1993
3. 吳佳霖、李驊登、紀竹旺，“熱作工具鋼系之高溫特性探討”，金屬熱處理，第 86 期，pp.15~24，2005
4. 高一之、林群新、陳建成、敖仲寧，“熱作工具鋼 H10、H11、H12、H13 材料特性之比較”，金屬熱處理，第 57 期，pp.44~50，1998
5. 黃巧伶，“彈簧鋼材的顯微組織及機械性質”，國立台灣大學材料與工程學研究所，碩士論文，pp.48~58，2006
6. 余煥騰，“有關工具鋼熱處理之探討”，金屬熱處理，第 65 期，pp.58~73，2000
7. 林國璋，“低錳鑄鋼之淬火-回火熱處理與金相顯微組織及機械性質關係之研究”，逢甲大學機械工程學系，碩士論文，pp.30~48，2002
8. 楊義雄，熱處理導論-應用篇，全華科技圖書，pp.61~95，1994