

100 級合金鋼吊鉤材料之開發研究

洪榮德* 林新智** 林昆明*** 楊政修*** 連聰賢**** 曾莉雅***

Steven Hung H.C. Lin K.M. Lin C.H. Yang T.S. Lien L.Y. Tseng

*振鋒企業股份有限公司

**台灣大學 材料科學與工程學系

***逢甲大學 材料科學與工程學系

****行政院勞工委員會職業訓練局中區職業訓練中心

摘要

本研究調整 8620 合金鋼之化學成分並添加適量合金元素，藉以提高其淬火硬化能及抗拉強度等機械性質。實驗結果顯示本研究新配製之三種合金鋼皆顯現優異的淬火硬化特性、高強硬度及延韌性破壞等性質。其實體吊鉤之機械性質均符合 100 級安全吊鉤的規範要求，甚至優於國外目前製造生產的 100 級安全吊鉤，應用上將具有高度的競爭優勢。

關鍵詞：100 級吊鉤、合金鋼、硬化能、機械性質、延性破壞

Abstract

The chemical compositions of SAE 8620 alloy steels were modified and some alloy elements were slightly added to improve the alloy's hardenability and mechanical properties. Experimental results show that all three designed alloy steels exhibit excellent hardenability, high strength and hardness, and ductile fracture behavior. The lifting components, being made of these three new designed alloy steels, are all well qualified to be used as the grade 100 lifting components. Their mechanical properties are even better than those of grade 100 lifting components manufactured by the foreign companies.

Keywords: Grade 100 lifting chain and fittings, Hook, HSLA steels, Hardenability, Mechanical property, Ductile fracture, SAE 8620

1. 前言

起重用安全吊鉤具的使用已有近百年的歷史，舉凡建築工程、土木建設工程、工業

物流工程、運輸安全工程、石化工程、海上油探工程、採礦工程、捕漁工業、碼頭海事工程、木材採伐工程、各類起重機起吊作業、運動場膜結構建築、橋樑工程等均需使用。目前起重用安全吊鉤採用的材質屬於高強度低合金鋼，依照抗拉強度之不同，可以區分為 50kgf(500MPa) 級、60kgf(600MPa) 級、70~100kgf(700~1000MPa) 級合金鋼。現階段使用的安全吊鉤材料以 80 級鎳鉻鉬鋼(Nickel-Chromium-Molybdenum Steel)為主。鎳鉻鉬鋼之淬火硬化效能非常好，且不易發生脆裂，耐熱性佳，同時又可防止回火脆性之缺點，因此鎳鉻鉬鋼為構造用鋼中之最重要鋼種【1,2】，起重用的安全吊鉤即採用鎳鉻鉬鋼來製造。基於安全性的考量，避免吊鉤在超過負載時突然斷裂，因此對吊鉤材料的延韌性有嚴格的要求。增加碳含量雖可增加強硬度，但卻會嚴重降低延韌性，因此一般使用低含碳量的 SAE 8620 合金鋼材來製造 80 級安全吊鉤。

對於 80 級安全吊鉤之品質檢測規範均依據美國 ASTM A-952-02 及歐盟 EN1677-2000 來實施。(1)吊鉤成形方式必須採用鍛造，鍛件必須全數通過磁粉探傷的非破壞檢測，材質並經分光儀材質分析確定，規範上規定使用之合金鋼材質，至少須包含 Ni, Cr, Mo 三種合金元素中之兩種以上，且其化學成份的限定標準為(Ni 0.4%, Cr 0.4%, Mo 0.15, Al 0.025)，非金屬含量限定(P 0.030%, S 0.030%)。(2)沃斯田體結晶粒度：依 EN ISO 643 測試標準，測試結果晶粒度應大於 5。(3)機械性質測試有：製造驗證力試驗(MPF)：2×WLL(Working Load Limit)；破斷力試驗(BF)：4×WLL；彎曲試驗(Bending Test)；動態疲勞試驗(Fatigue Test)：

1.5×WLL，施以 20000Cycle 動態疲勞試驗。(註:特殊型號應作低溫試驗(-40)測試。所有測試件均應施以 400 回火 1 小時後再測試以確保品質)。目前國際市場上起重用的安全吊鉤主要為 80 級的產品，但是由於吊鉤使用範圍廣泛，因此為因應不同需求，國內外廠家均積極研發更高強度、高破斷韌性、具備良好的加工性等性能的材料，將產品的強度由 80 級提昇至 100 級，使產品具有更高的機械性質以達到更高的安全性目標並提高產品的附加價值。目前美國 ASTM 已訂出 100 級合金鋼材規範【3-7】(雖然歐盟尚未明確訂出 100 級 EN-規範)，即是在符合 80 級之品質檢測規範下，將 WLL(Working Load Limit)提高，在相同的形狀尺寸下具備有較高的強度。本研究即針對 100 級合金鋼吊鉤材料之合金設計、熱機處理、特性分析等方面進行研究與探討，期盼經由材料的創新研發，製程技術的建立，藉以提高產品的附加價值，提升企業形象與競爭力，進而建立國內吊鉤產業永續發展與優質經營的重要根基。

2. 實驗方法

本實驗所使用之母材料為中鋼公司所生產的 SAE 8620 合金鋼，先以分光儀進行成份鑑定，再利用真空感應熔煉爐 (Vacuum Induction Melting , VIM) 將母材料熔化並添加適量合金元素，所鑄合金錠直徑約 100 mm，長度約 700 mm。鑄錠先經 1200 、 24 小時均質化後，再依照不同實驗測試之需要於 1200 將直徑分別鍛成 60、50、35 mm。後續以機械加工方式製成適當尺寸與形狀之試片。

合金熱處理係依吊鉤材料的標準程序來實施，即先以鹽浴爐進行 900 、 1 小時的正常化處理，使組織回復正常狀態。再升溫至 900 維持 20 分鐘後水淬於鹽水中，最後再施予 400 、 1 小時的回火處理。

合金經正常化與調質處理後，分別進行相關特性分析。應用光學顯微鏡 (OM) 做金相觀察，檢測其晶粒組織、微觀結構分佈等。以洛氏硬度計檢測合金經不同階段熱處理後之硬度值，每試片測試 5 點以上並取其平均值。應用喬米尼 (Jominy) 硬化能試驗【8,9】，比較各種不同合金成份鋼種的硬化能。拉伸試驗檢測其抗拉強度、降伏強度與斷面縮率

等機械性質，拉伸試片依 ASTM E 8M-01 標準規範製作【10】，拉伸破斷面以掃描式電子顯微鏡 (SEM) 觀察。另外將合金材料製成吊鉤實體並實施吊鉤拉力強度測試。吊鉤實體之製作係將合金棒於 1200 施以熱鍛成形後空冷。後續再施以正常化處理以消除過熱組織，並應用機械加工製成吊鉤成品，實施淬火回火之調質處理與噴砂作業而完成吊鉤實體之製作。

3. 結果與討論

3.1 逆向分析與合金設計

國外廠家已提供三種符合 100 級強度之安全吊鉤實體，因此先應用分光儀逆向分析這些 100 級吊鉤之合金成分，並配合比較 80 級吊鉤之化學成分，作為後續研究之合金設計參考。逆向分析之結果如表 1 所示，由表 1 可看出 100 級吊鉤之合金材料含有較高的合金元素，包括 Mn、Cr、Ni 等。

表1 100 級吊鉤之合金成份分析結果

Lifting Hooks Elements (wt%)	SAE 8620	G 100-1	G 100-2	G 100-3
C	0.19~0.20	0.19~0.21 1	0.19~0.22 2	0.19~0.21 1
Si	0.21~0.22	0.25~0.30 0	0.25~0.29 9	0.25~0.28 8
Mn	0.80~0.90	1.00~1.20 0	1.02~1.20 7	0.99~1.10 9
Cr	0.46~0.47	0.69~0.71 1	0.68~0.70 6	0.68~0.70 1
Ni	0.44~0.49	0.47~0.53 3	0.46~0.52 2	0.46~0.51 1
Mo	0.15~0.16	0.09~0.12 2	0.09~0.11 2	0.09~0.11 2

合金鋼可藉由添加不同的合金元素而提升其各種特殊性質，包括機械強度、硬化能、抗蝕性等等。例如鎳(Ni)可增加淬火回火後之衝擊韌性。錳(Mn)、鉻(Cr)、鉬(Mo)等元素可提高鋼之硬化能；且因其碳化物於固溶體內很安定，使麻田散鐵不易回火軟化。故此等元素之添加，可以提升合金鋼之硬化能、回火軟化抵抗性與抗拉強度等機械性質【11】。這些材料特性的改善將有效提升 100 級吊鉤的相關性能，故本研究之 100 級吊鉤用合金鋼即是以 8620 合金(80 級合金鋼)為基

礎材料，再添加適量之上述合金元素，藉以提昇合金鋼之相關性質，使其達到符合 100 級吊鉤材料之性能要求。

經合金設計與熔煉配製之新鋼種如表 2 所示並說明如下。合金 Y-1 之合金成分多調配在 8620 合金之成分上限，而 Mn 和 Mo 含量則比 8620 成分上限再多約 0.1wt%。合金 Y-2 的 Cr 比合金 Y-1 再多 0.1 wt%，Mo 則多約 0.05 wt%。合金 Y-3 較合金 Y-1 多 0.1 wt% 的 Mo 和 Mn。

表 2. 新配製合金鋼之成份分析結果

	合金 Y-1	合金 Y-2	合金 Y-3
C	0.21~0.22	0.20~0.21	0.21~0.22
Si	0.22~0.24	0.22~0.23	0.22~0.23
Mn	0.99~1.03	1.02~1.09	1.14~1.19
Cr	0.56~0.74	0.73~0.80	0.63~0.67
Ni	0.57~0.66	0.58~0.69	0.57~0.60
Mo	0.33~0.39	0.34~0.45	0.40~0.47

3.2 顯微組織與硬度

圖 1 與圖 2 分別顯示 100 級合金鋼吊鉤 (G 100-3, 國外廠家提供) 及 8620 合金鋼棒 (中鋼提供) 之截面金相圖。圖 1 清楚顯示 100 級合金鋼吊鉤無論邊緣或心部均為針狀的回火麻田散鐵組織，顯示其有足夠的硬化能使心部組織也可完全淬火硬化，由沃斯田鐵變態成麻田散鐵組織。而 8620 (80 級) 合金鋼棒經淬火、回火後在表面局部已有肥粒鐵組織出現，如圖 2(b) 所示，且肥粒鐵的量隨深度增加而漸增，顯示 8620 合金鋼之硬化能較小，無法於淬火過程完全由沃斯田鐵變態成麻田散鐵組織。圖 3 顯示三種新配製合金鋼經過淬火回火後的金相組織。三種新配製合金鋼經過淬火回火後，於直徑 30 mm 試棒的整個截面中皆呈現均勻的回火麻田鐵組織，此結果顯示三種新配製合金鋼的淬火硬化能很高，其顯微組織與國外提供的 100 級合金鋼吊鉤相類似。

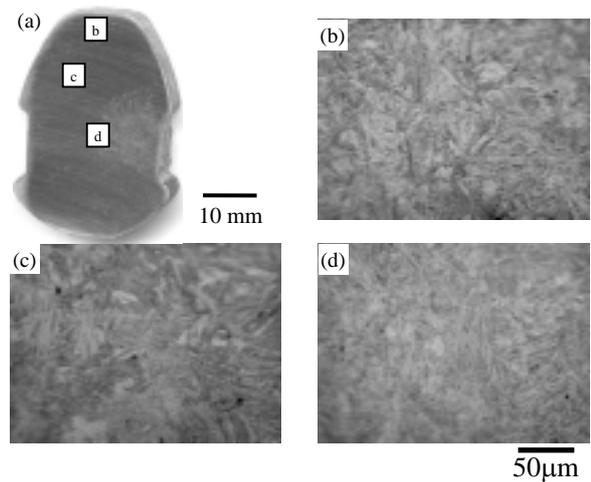


圖 1. 100 級合金鋼吊鉤經淬火、回火後之截面金相圖，(b)、(c)、(d) 分別對應於(a) 中位置之金相組織

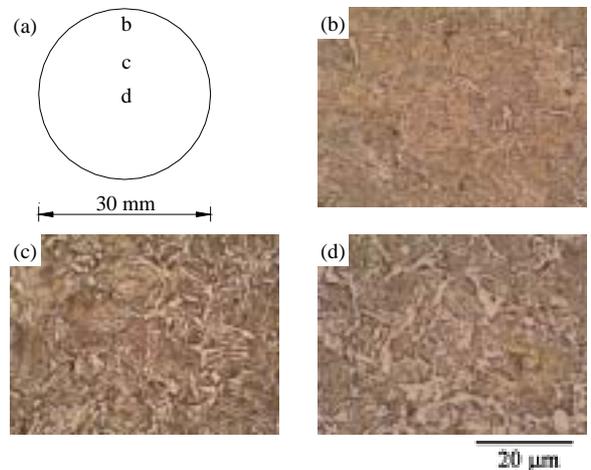


圖 2. 8620 合金鋼棒經淬火、回火後之截面金相圖，(b)、(c)、(d) 分別對應於(a) 中位置之金相組織

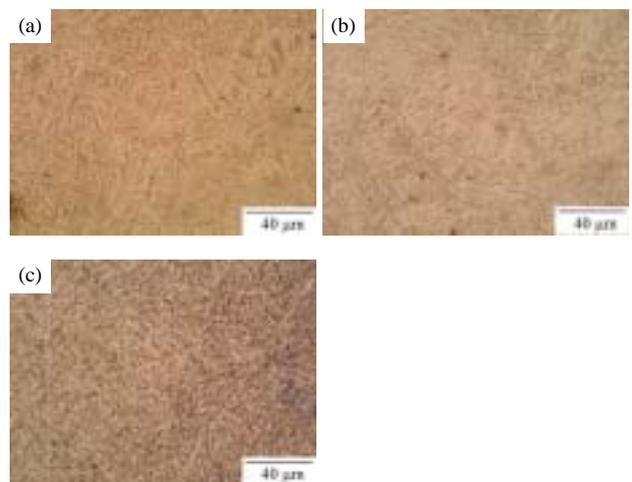


圖 3. 三種新配製合金鋼經過淬火回火後的金相顯微組織 (a) 合金 Y-1 (b) 合金 Y-2 (c) 合金 Y-3

表 3 顯示直徑 30mm 的 8620 合金鋼試棒、國外之 100 級合金鋼吊鉤與本研究新配製之三種合金鋼，經 900 淬火、400 回火後之截面硬度。由表 3 看出，8620 合金鋼試片中心與邊緣的硬度相差很大，顯示 8620 合金鋼的硬化能較小，受質量效果的影響很大；然而國外之 100 級合金鋼吊鉤與本研究新配製之三種合金鋼卻都顯示較高且均勻的硬度分佈，此結果與顯微組織的觀察結果相一致。由表 3 亦可發現，本研究新配製合金鋼之淬火回火後硬度比國外之 100 級合金鋼吊鉤高，合金鋼心部硬度達 HRC39 以上，顯示新配製合金鋼之硬化能優良且具有良好的回火抵抗性，其抗拉強度應均可達到 100 級合金鋼安全吊鉤之標準【12】。

表 3. 8620 合金鋼試棒與 100 級合金鋼吊鉤經淬火回火後之截面硬度

合金鋼種類	硬度(HRC)			
	試片中心	邊緣(間隔 5 mm)		
8620	25.4	28.8	31.6	33.1
100-3	37.9	37.9	37.9	38.0
合金 Y-1	39.4	41.5	41.1	42.7
合金 Y-2	39.1	42.3	43.3	43.3
合金 Y-3	42.0	42.9	43.8	43.4

3.3 喬米尼硬化能試驗

圖 4 顯示 8620 及三種新配製合金鋼之喬米尼硬化能曲線。圖中顯示三種新配製合金鋼之硬化能皆遠大於 8620 合金鋼，即使是遠離淬火端仍然具有 HRC25 之硬度，尤其是合金 Y-3 更可高達 HRC35 之硬度。

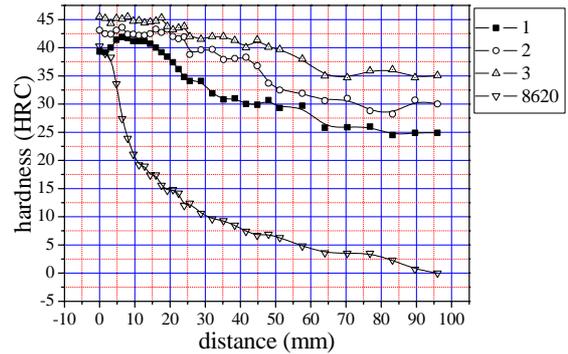


圖 4. 8620 及三種新配製合金鋼之喬米尼硬化能曲線

3.4 靜態拉伸試驗

將 8620 及三種新配製合金鋼做成標準試棒，經 900 淬火、400 回火後進行拉伸試驗，試驗結果如圖 5 及表 4 所示。由圖 5 及表 4 清楚顯示，三種新配製合金鋼之抗拉強度皆大於 8620 合金鋼，高達 1300 MPa。雖然三種新配製合金鋼之抗拉強度大幅增加，但仍然維持相當優異的延伸率及斷面縮率，故符合 100 級合金鋼吊鉤材料的性能要求。

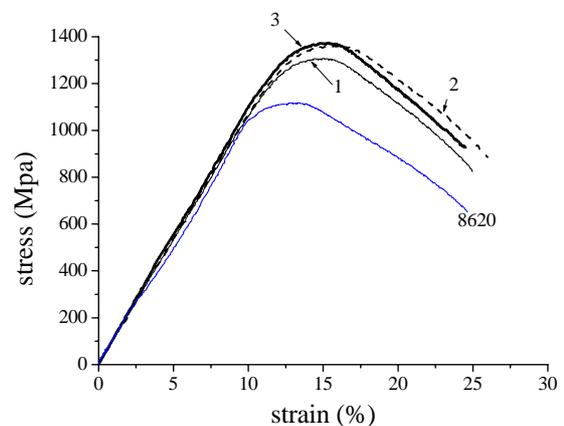


圖 5. 8620 及三種新配製合金鋼之拉伸試驗曲線圖

表 4. 8620 及三種新配製合金鋼之性質比較

性質	抗拉強度 (Mpa)	延伸率 (%)	斷面縮率 (%)
8620	1118	24.7	64.85
Y-1	1307	25.0	57.75
Y-2	1360	26.0	55.49

Y-3	1385	24.5	55.36
-----	------	------	-------

3.5 破斷面分析

圖 6 顯示 8620 及三種新配製合金鋼於拉伸試驗破斷後之巨觀斷面型態。由圖中可發現三種新配製合金鋼的斷面均與 8620 合金鋼相同，呈現中等延性金屬之典型杯錐狀破壞型態。



圖 6. 8620 及三種新配製合金鋼於拉伸試驗破斷後之巨觀斷面型態

圖 7 顯示 8620 及三種新配製合金鋼於拉伸試驗破斷後，應用 SEM 觀察之破斷表面型態。由圖中可發現 8620 與三種新配製合金鋼的破斷表面皆呈現穴窩組織(dimples)，是延性破壞的典型表徵。

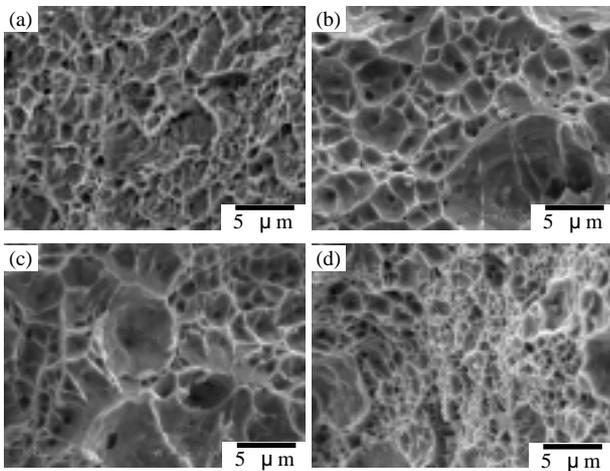


圖 7. 8620 及三種新配製合金鋼應用 SEM 觀察之破斷表面型態 (a) 8620 (b) 合金 Y-1 (c) 合金 Y-2 (d) 合金 Y-3

3.5 實體吊鉤試驗

實體吊鉤試驗係將合金鋼依照標準程序製成實體吊鉤後進行相關機械性質測試。本研究之實體吊鉤以編號 8-025-10 為標準型體

(如圖 8 所示)，其相關機械性質之測試結果列於表 5。由表 5 顯示本研究新配製之三種合金鋼吊鉤，其拉力強度均超過 100 級標準 (Breaking force: $4 \times \text{Work Load Limit} = 158 \text{ kN}$) 並符合製造驗證力規範 (MPF: $2 \times \text{Work Load Limit} = 79 \text{ kN}$ 下之變形量 $< 1\%$)。由表 5 亦可發現，本研究新配製之三種合金鋼吊鉤之機械性質優於國外提供之 100 級相同型號之吊鉤，應用上將具有高度的競爭優勢。另外，本研究新配製之三種合金鋼吊鉤 (8-025-10 型號)，以 5.925 公噸、3.3Hz 參數進行疲勞測試，經過 20000 次疲勞測試並未發生破壞，符合 100 級安全吊鉤之疲勞測試規範標準。

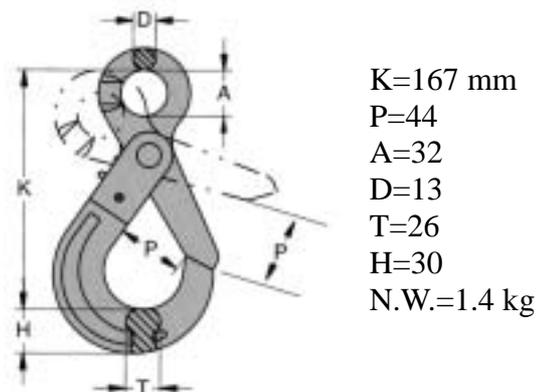


圖 8. 編號 8-025-10 安全吊鉤之標準型體

4. 結論

本研究新配製之三種合金鋼吊鉤，其化學成分與機械性質均符合 100 級安全吊鉤的規範要求。這三種合金鋼皆顯現優異的淬火硬化特性、高強硬度及延韌性破壞等性質。實體吊鉤之機械性質甚至優於國外目前製造生產的 100 級安全吊鉤，應用上將具有高度的競爭優勢。

表 5 實體吊鉤之規範標準及測試結果

		MPF	最大拉力(kN)
ASTM 規範	80 級 (Size-10)	$< 1\%$	126
	100 級 (Size-10)	$< 1\%$	158
本研究之實體吊鉤	Y-1	0.04	167.4
	Y-2	0.05	177.2
	Y-3	0.08	187.3
國外之 100 級	G 100-1	0.06	180.1
	G 100-2	0.02	154.4

100 級 吊鈎	G 100-3	0.03	155.5
-------------	---------	------	-------

致謝

本研究係結合振鋒公司與逢甲大學之產學研發案，研發過程獲得許多先進的幫忙，旭陽科技公司葉明堂副總協助合金熔煉、逢甲大學精密製造中心鄧永宜老師**協助試片製作**、**三英鋼鐵公司協助合金鋼之熱鍛作業**等等，一併致上萬分謝意。

參考文獻

1. 唐文聰，鋼鐵材料選用要領，全華科技圖書股份有限公司
2. 蔡大和、江益璋，金屬材料組織，全華科技圖書股份有限公司
3. “Standard Specification for Forged Grade 80 and Grade 100 Steel Lifting Components and Welded Attachment Links”, Designation: A 952/A 952M-20.
4. “Components for Slings-Safety, Part 1: Forged Steel Components, Grade 8”, SVENSK STANDARD SS-EN 1677-1.
5. “Components for Slings-Safety, Part 2: Forged Steel Lifting Hooks with Latch, Grade 8”, SVENSK STANDARD SS-EN 1677-2.
6. “Components for Slings-Safety, Part 3: Forged Steel Self-Locking Hooks, Grade 8”, EUROPEAN STANDARD EN 1677-3.
7. “Components for Slings-Safety, Part 4: Links, Grade 8”, EUROPEAN STANDARD EN 1677-4.
8. 黃振賢，「機械材料」，文京出版。
9. 黃振賢，「金屬熱處理」，文京書局，1985
10. “Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials [Metric]”, Designation: E 8M-01.
11. 王仰舒，鋼鐵材料，全華科技圖書公司
12. 王超然、胡傳炘，「新編國際常用金屬材料手冊」，北京工業大學出版社