



National Ilan University

國立宜蘭大學工程學刊第7期，1-17頁，2011年12月
Bulletin of Collage of Engineering, National Ilan University, NO.7, P.1-17, December.. 2011

Bulletin of Collage
Of Engineering
<http://engineering.niu.edu.tw/main.php>

銅合金的高溫機械特性

陳大智¹ 向志偉²

¹ 國立宜蘭大學機械與機電工程學系研究所副教授

² 國立宜蘭大學機械與機電工程研究所研究生

摘要

本研究目的針對 CnSn 0.15%銅合金線的高溫機械特性進行實驗分析，由實驗的結果可得到不同溫度下的抗拉強度、真應力真應變圖，然後再將不同溫度的數據製成圖表，利用曲線擬合(Curve Fitting)的方式找出在各個溫度真應力真應變曲線的擬合方程式。實驗結果發現抗拉強度隨溫度的上升而下降，伸長率則是當合金銅達到銅的再結晶溫度後會大幅的增加。

本研究所提供的溫度與真應變真應力擬合方程式，為合金銅之高溫機械特性的關係式，經由擬合方程式可由溫度迅速的取得該溫度下之真應變真應力的圖形，並將所得的數據提供數值模擬分析使用。

關鍵詞: 應變硬化指數、高溫拉伸、CuSn 0.15%銅錫合金線

*通訊作者 E-mail :dcchen @ niu.edu.tw



High Temperature Mechanical Properties of the Copper Alloy

Da-Chih Chen¹ Chih-Wei Hsiang²

**1. Associate Professor, Department of Mechanical and ElectroMechanical Engineering ,
National Ilan University**

**2. Graduate Student, Department of Mechanical and ElectroMechanical Engineering,
National Ilan University**

ABSTRACT

The high temperature mechanical properties of CuSn 0.15% copper alloy wire are presented in this paper. The high temperature tensile strength with respect to the true strains show in different temperatures from environment temperature 25°C to 600°C. The curve-fitting method is used to achieve the mathematical relation equations for those true stress strain curves.

From the true stress strain curves, one can clearly see the tensile strength decreases while the environment temperature raised and the elongation rates of copper alloy will increase while the environment temperature exceed the recrystallization temperature of the CuSn 0.15% copper alloy.

The curve fitted mathematical relation equations for the true stress strain relations of the copper alloy are in terms of temperature only. Therefore one can have the mechanical properties of the CuSn 0.15% copper alloy by putting the required temperature to these curve fitted mathematical relationships.

Keywords: Strain hardening exponent, High-temperature tensile test, CuSn 0.15% copper alloy wire

***Corresponding author E-mail :** dcchen @ niu. edu. tw

前言

近年來科技進步，生活的品質的要求逐漸提高，對於視覺聽覺的要求也相當講究，因此高級視聽的產品越來越多，相對檔案的容量也越來越大，更由於網路的傳播因此在資料傳輸的品質和速度上需求越來越高，然而傳輸的品質和速度跟傳輸的線材有很大的相關聯。線材的好壞除了取決於材料外，其形狀和特性也是極為重要的部分。其中集膚效應[Nan, 2005]現象對線材的影響甚大(圖 1)，集膚效應是指當交變電流通過導體時，電磁、電場在導體內部產生漩渦，與原來的電流互相抵消越靠近導體（漩渦）中心，電磁、電場越強，被抵消的電流越多，最後導致導體內部的電流分佈不均勻，中心部分幾乎沒有電流通過，只有導體邊緣（皮膚）的部分才有電流通過。且越是高頻率運動的電子越走到導體表面。

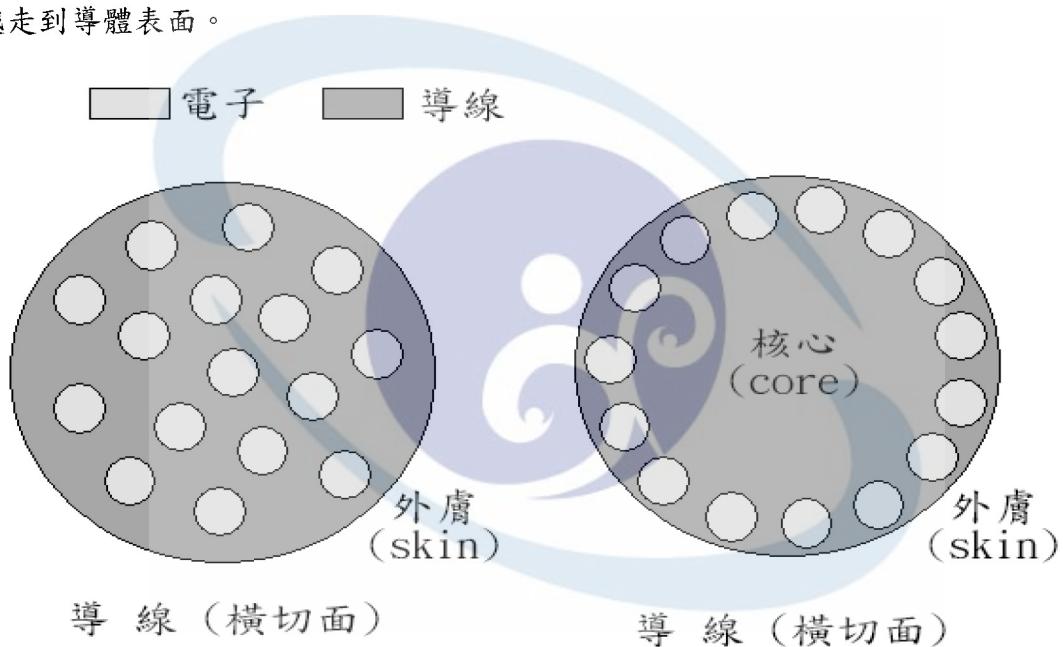


圖 1 集膚效應

因此導線越細可以讓相同大小截面積的線材包含更多條細導線，在總截面積不變的情況下，其外膚因而增加，因此隨外膚的增加就可以增加高頻電流和電壓的傳輸效率。集膚效應也可以用來說明為導體中交變電磁場的強度，隨著外部高頻電磁波進入導體的徑向深度而成指數遞減。但因集膚效應導體表面本身的磁場強度最強，使得外部高頻電磁波對導體本身的磁場影響較小。

在線成型加工時，要使銅線材達到微米(micrometer)以下的線徑時，使用傳統的模具抽拉，因抽拉過程中線材的斷面積太小沒有足夠的抗拉力克服模具表面與線材外膚間的摩擦力，因此無法採用模具抽拉來完成銅線材的細化，必須經由無模拉伸法(dieless

drawing)[Furushima, Manabe, 2007]的方式完成。無模拉伸主要藉由高溫使材料軟化且增加延展性來使銅線材能夠減少應變硬化的效果。目前可以藉由數值模擬分析軟體來模擬無模拉伸的狀況及過程並找出較佳的拉伸方式，但在高溫加工的數值模擬分析時卻苦無材料的高溫機械特性，使得模擬的結果不具有可靠性。本研究主要是以拉伸實驗的方式取得銅線高溫的機械特性，提供溫度與應變硬化關係圖和溫度與材料強度關係圖，作為銅線在高溫時的基本材質特性，以供模擬分析軟體使用。

一. 文獻回顧

2-1 銅及銅合金

銅是人類最早也最廣泛使用的非鐵金屬之一。在金屬材料中，銅及銅合金應用範圍僅次於鐵和鋼。在非鐵金屬材料中，其產量僅次於鋁。銅具有良好的導電和導熱的特性且耐蝕性極佳。銅和其合金原子堆積結構都為面心立方結構(FCC)，強度與硬度較低，冷熱加工性質優良且強韌、富延展性，溫度於 $100^{\circ}\text{C} \sim 350^{\circ}\text{C}$ 開始軟化， $150^{\circ}\text{C} \sim 250^{\circ}\text{C}$ 開始再結晶至 350°C

回復原來狀態， 600°C 以上則完全退火[許源泉，2005]。

銅的導電性良好常被用來製造電器的導體、電纜心線、輸電線、配電線等，在銅加入不同的微量元素對導電率會有不同的效果，根據文獻[機械工程手冊/電機工程手冊編輯委員會，2002]由圖 2 可以看出當銅加入銀(Ag)、鎘(Cd)影響最小，其中磷(P)影響導電率最大；圖 3 為各種銅合金的導電率受溫度影響變化趨勢圖[賴耿陽，1977]。

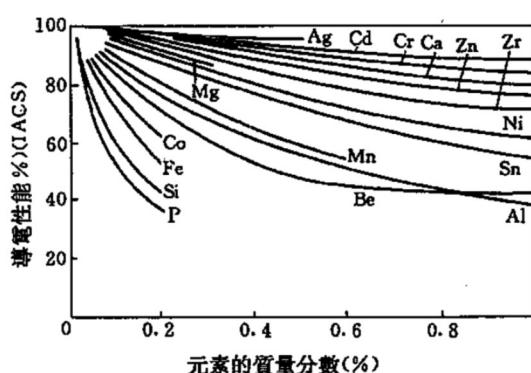


圖 2 雜質對銅導電率影響

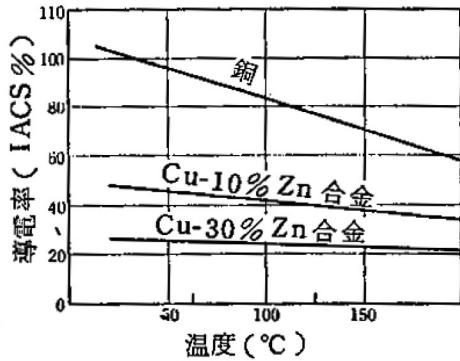


圖 3 溫度對銅導電率影響

2-2 工程應力和應變(Engineering Stress and Strain)

材料的原始長度 l_0 ，原始截面積 A_0 ，原始直徑 D_0 ，荷重 F ，試驗後長度 l 、截面積 A 、直徑 D ，伸長量 Δl ，工程應變(engineering strain ε)，可由下述方程式定義[徐景福，1985]:

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (1)$$

由於試驗中材料體積不變

$$AL = A_0 L_0 \quad (2)$$

故工程應力(engineering stress σ)，定義如下

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (3)$$

2-3 真應力和真應變(True Stress and Strain)

長度和截面積在拉伸試驗過程中是持續的變化，由實驗材料在實驗過程的變化中，我們發現 CnSn 0.15%銅合金線的縮頸現象和鋼材的收縮現象不同，呈較均勻的收縮方式收縮，直到材料即將斷裂前才會迅速大幅收縮。因此真應變 ε_t 的定義是對於瞬時長度來定義真應變[徐景福，1985]。真應變表示如下

$$\varepsilon_t = \sum \frac{l_1 - l_0}{l_0} + \frac{l_2 - l_1}{l_1} + \frac{l_3 - l_2}{l_2} + \dots \quad (4)$$

簡化得到

$$\varepsilon_t = \int \frac{l}{l_0} \frac{dl}{l} = \ln \frac{l}{l_0} \quad (5)$$

真應力是指荷重 F 除以當時的截面積 A ，非原始截面積 A_0 ，如下所示

$$\sigma_t = \frac{F}{A} \quad (6)$$

真應變 ε_t 與工程應變 ε 間的關係為

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{l}{l_0} - 1 \quad (7)$$

$$\varepsilon + 1 = \frac{l}{l_0} \quad (8)$$

$$\varepsilon_t = \ln \frac{l}{l_0} = \ln(\varepsilon + 1) \quad (9)$$

真應力 σ_t 與工程應力 σ 間的關係為

$$\sigma_t = \sigma(\varepsilon + 1) \quad (10)$$

二. 實驗流程與材料

3-1 實驗流程

本實驗要探討銅合金線在高溫的機械特性，使用的測試方法為拉伸試驗，實驗溫度是由 25、100、200 至 600°C，每升溫 50°C 做拉伸試驗，並記錄荷重元上的即時荷重、測量拉斷後銅合金線的伸長量和記錄最大荷重，再透過計算得到真應力、真應變，最後再畫出各溫度真應力-真應變圖、溫度-抗拉強度圖、溫度-伸長率圖，然後再用 Matlab 中曲線擬合(Curve Fitting)的功能找出各個溫度真應力-真應變的擬合方程式，最後將不同溫度的擬合的方程式的系數與溫度作圖，並找出溫度與系數之擬合方程式。

3-2 實驗材料

本實驗是使用 1mm CuSn 0.15% 作為實驗材料。表 3.1 為其錫含量及其室溫下的機械性質與電性。

表 1 材料性質

特性 成份	編號 銅 錫	CuSn 0.15% 其餘 0.10 - 0.20
抗拉強度(MPa)		467.3
導電率(IACS%)		83.1

三. 結果與討論

4-1 真應力真應變曲線圖

經由真應力-真應變圖可以算出拉伸試驗後的各項機械特性，如抗拉強度、伸長率。從圖 4 和圖 5 可以看出隨著溫度上升伸長率也會隨之上升，反之抗拉強度隨溫度上升而下降。

從圖 4,5 中，在低於 410°C 之強度和伸長率變化較不明顯，但在高於 410°C 之強度和伸長率變化很大。因此 410°C 為本實驗材料的再結晶溫度。

圖 6 為 25°C 至 400°C 的真應力-真應變圖未看出發生動態再結晶的情況，其真應力-真應變圖初期會隨上升緩慢，直達到應變硬化影響明顯時真應力會急速的上升到最大值後急速破斷。圖 7 為 410°C 至 600°C 的真應力-真應變圖，由圖 7 中的抖動現象可判定此時材料發生動態再結晶，真應力隨真應變增加而增加，當達到一應力值後會上下震盪，此時即發生動態再結晶的現象。

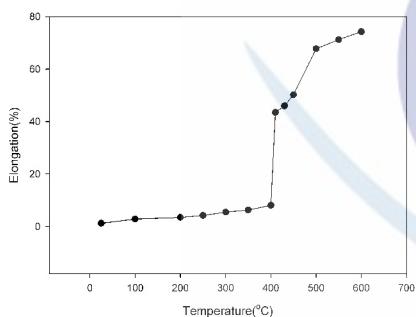


圖 4 伸長率-溫度圖

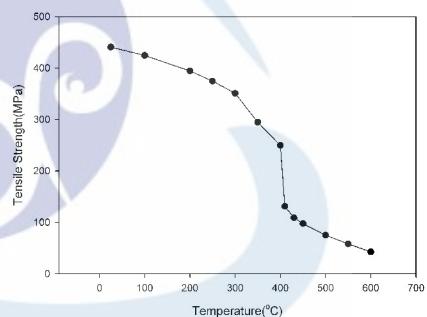


圖 5 抗拉強度-溫度圖

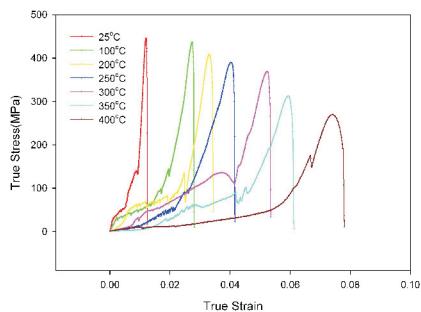


圖 6 溫度 25°C - 400°C 真應力真應變圖

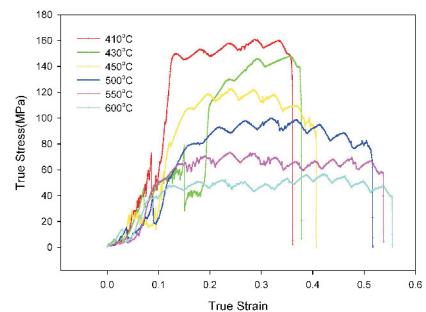


圖 7 溫度 410°C - 600°C 真應力真應變圖

4-2 多項式曲線擬合

所以本研究使用 MATLAB 找與實驗結果最相近曲線。經由多次的曲線擬合，以多項式的曲線擬合與實驗結果最為貼近。材料在 410°C 之後發生再結晶，其真應力-真應變圖與 410°C 之前不同，因此分成兩組不同的多項式方程式下去擬合，(A)25°C-400°C 的曲線的真應力都隨著真應變增加而增加，直到真應力達到最高點後就急速下降破斷(圖 8 到圖 14)。(B)410°C-600°C 的曲線初期也如前述的曲線類似，一直到達到再結晶發生時曲線就會開始震盪(圖 15 到圖 20)。因此本研究利用不同的多項式作擬合，擬合多項式之後各系數再與溫度作曲線擬合，找出系數與溫度之擬合方程式。

下列為 25°C-400°C 擬合的方程式，主要是五次多項式如下所示：

$$\sigma_t = a_l(T)\varepsilon_t^5 + b_l(T)\varepsilon_t^4 + c_l(T)\varepsilon_t^3 + d_l(T)\varepsilon_t^2 + e_l(T)\varepsilon_t$$

溫度 $T = 25^\circ\text{C}$

$$\begin{aligned} \sigma_{25} = & 1.62 \times 10^{13} \varepsilon_{25}^5 - 3.90 \times 10^{11} \varepsilon_{25}^4 + 3.65 \times 10^9 \varepsilon_{25}^3 - 1.5 \times 10^7 \varepsilon_{25}^2 \\ & + 3.62 \times 10^4 \varepsilon_{25} \end{aligned} \quad (11)$$

如圖 8

溫度 $T = 100^\circ\text{C}$

$$\begin{aligned} \sigma_{100} = & 3.33 \times 10^{10} \varepsilon_{100}^5 - 1.9 \times 10^9 \varepsilon_{100}^4 + 9.33 \times 10^7 \varepsilon_{100}^3 - 1.69 \times 10^6 \varepsilon_{100}^2 \\ & + 1.41 \times 10^4 \varepsilon_{100} \end{aligned} \quad (12)$$

如圖 9

溫度 $T = 200^\circ\text{C}$

$$\begin{aligned} \sigma_{200} = & -5.56 \times 10^{10} \varepsilon_{200}^5 + 6.17 \times 10^9 \varepsilon_{200}^4 - 1.9 \times 10^8 \varepsilon_{200}^3 + 1.94 \times 10^6 \varepsilon_{200}^2 \\ & + 3.37 \times 10^2 \varepsilon_{200} \end{aligned} \quad (13)$$

如圖 10

溫度 $T = 250^\circ\text{C}$

$$\sigma_{250} = 7.53 \times 10^8 \varepsilon_{250}^5 + 5.91 \times 10^7 \varepsilon_{250}^4 + 1.74 \times 10^6 \varepsilon_{250}^3 + 1.72 \times 10^4 \varepsilon_{250}^2$$

$$+9.00 \times 10^2 \varepsilon_{250}^2 \quad (14)$$

如圖 11

溫度 $T = 300^\circ\text{C}$

$$\begin{aligned} \sigma_{300} = & 8.37 \times 10^9 \varepsilon_{300}^5 - 7 \times 10^8 \varepsilon_{300}^4 + 1.67 \times 10^7 \varepsilon_{300}^3 - 5.83 \times 10^4 \varepsilon_{300}^2 \\ & + 2.35 \times 10^3 \varepsilon_{300} \end{aligned} \quad (15)$$

如圖 12

溫度 $T = 350^\circ\text{C}$

$$\begin{aligned} \sigma_{350} = & 5.79 \times 10^8 \varepsilon_{350}^5 - 5.80 \times 10^6 \varepsilon_{350}^4 - 8.79 \times 10^5 \varepsilon_{350}^3 + 1.48 \times 10^4 \varepsilon_{350}^2 \\ & + 1.57 \times 10^3 \varepsilon_{350} \end{aligned} \quad (16)$$

如圖 13

溫度 $T = 400^\circ\text{C}$

$$\begin{aligned} \sigma_{400} = & 4.56 \times 10^8 \varepsilon_{400}^5 - 3.8 \times 10^7 \varepsilon_{400}^4 + 1.17 \times 10^6 \varepsilon_{400}^3 - 1.99 \times 10^4 \varepsilon_{400}^2 \\ & + 8.74 \times 10^2 \varepsilon_{400} \end{aligned} \quad (17)$$

如圖 14

下列為 $410^\circ\text{C}-600^\circ\text{C}$ 擬合方程式，為七次多項式如下所示：

$$\begin{aligned} \sigma_t = & a_2(T) \varepsilon_t^7 + b_2(T) \varepsilon_t^6 + c_2(T) \varepsilon_t^5 + d_2(T) \varepsilon_t^4 + e_2(T) \varepsilon_t^3 + f_2(T) \varepsilon_t^2 \\ & + g_2(T) \varepsilon_t \end{aligned}$$

溫度 $T = 410^\circ\text{C}$

$$\begin{aligned} \sigma_{410} = & 5.66 \times 10^7 \varepsilon_{410}^7 - 7.52 \times 10^7 \varepsilon_{410}^6 + 3.87 \times 10^7 \varepsilon_{410}^5 - 9.60 \times 10^6 \varepsilon_{410}^4 \\ & + 1.13 \times 10^6 \varepsilon_{410}^3 - 5.05 \times 10^4 \varepsilon_{410}^2 + 1.00 \times 10^3 \varepsilon_{410} \end{aligned} \quad (18)$$

如圖 15

溫度 $T = 430^\circ\text{C}$

$$\begin{aligned}\sigma_{430} = & -6.2 \times 10^7 \varepsilon_{430}^7 + 8.52 \times 10^7 \varepsilon_{430}^6 - 4.63 \times 10^7 \varepsilon_{430}^5 + 1.24 \times 10^7 \varepsilon_{430}^4 \\ & - 1.68 \times 10^6 \varepsilon_{430}^3 + 1.05 \times 10^5 \varepsilon_{430}^2 - 1.81 \times 10^3 \varepsilon_{430}\end{aligned}\quad (19)$$

如圖 16

溫度 $T = 450^\circ\text{C}$

$$\begin{aligned}\sigma_{450} = & 2.31 \times 10^7 \varepsilon_{450}^7 - 3.4 \times 10^7 \varepsilon_{450}^6 + 2.01 \times 10^7 \varepsilon_{450}^5 - 5.71 \times 10^6 \varepsilon_{450}^4 \\ & + 7.95 \times 10^5 \varepsilon_{450}^3 - 4.58 \times 10^4 \varepsilon_{450}^2 + 1.12 \times 10^3 \varepsilon_{450}\end{aligned}\quad (20)$$

如圖 17

溫度 $T = 500^\circ\text{C}$

$$\begin{aligned}\sigma_{500} = & 1.74 \times 10^6 \varepsilon_{500}^7 - 3.01 \times 10^6 \varepsilon_{500}^6 + 1.96 \times 10^6 \varepsilon_{500}^5 - 5.79 \times 10^5 \varepsilon_{500}^4 \\ & + 6.50 \times 10^4 \varepsilon_{500}^3 + 5.44 \times 10^2 \varepsilon_{500}^2 + 74.87 \varepsilon_{500}\end{aligned}\quad (21)$$

如圖 18

溫度 $T = 550^\circ\text{C}$

$$\begin{aligned}\sigma_{550} = & -1.45 \times 10^6 \varepsilon_{550}^7 + 2.92 \times 10^6 \varepsilon_{550}^6 - 2.40 \times 10^6 \varepsilon_{550}^5 + 1.02 \times 10^6 \varepsilon_{550}^4 \\ & - 2.32 \times 10^5 \varepsilon_{550}^3 + 2.52 \times 10^4 \varepsilon_{550}^2 - 5.49 \times 10^2 \varepsilon_{550}\end{aligned}\quad (22)$$

如圖 19

溫度 $T = 600^\circ\text{C}$

$$\begin{aligned}\sigma_{600} = & -5.12 \times 10^5 \varepsilon_{600}^7 + 1.22 \times 10^6 \varepsilon_{600}^6 - 1.15 \times 10^6 \varepsilon_{600}^5 + 5.34 \times 10^5 \varepsilon_{600}^4 \\ & - 1.26 \times 10^5 \varepsilon_{600}^3 + 1.26 \times 10^4 \varepsilon_{600}^2 - 44.34 \varepsilon_{600}\end{aligned}\quad (23)$$

如圖 20

多項式的係數和溫度擬合的擬合方程式一樣是以 410°C 為分界，在擬合時，其中 25°C 和 430°C 的系數與其他的數值差異甚大，因此將這兩點去除後作曲線擬合。主要分為 100°C - 400°C 的多項式系數和溫度曲線擬合(圖 21 到圖 25)、 410°C - 600°C 的多項式和溫度曲線擬合(圖 26 到圖 32)。

下列為 100°C-400°C 多項式系數和溫度曲線擬合方程式：

系數 $a1(T)$

$$a1(T) = -2.37T^5 + 3.48 \times 10^3 T^4 - 1.98 \times 10^6 T^3 + 5.39 \times 10^8 T^2 \\ - 6.88 \times 10^{10} T + 3.18 \times 10^{12} \quad (24)$$

如圖 21

系數 $b1(T)$

$$b1(T) = 0.27T^5 - 3.93 \times 10^2 T^4 + 2.21 \times 10^5 T^3 - 5.96 \times 10^7 T^2 \\ + 7.53 \times 10^9 T - 3.43 \times 10^{11} \quad (25)$$

如圖 22

系數 $c1(T)$

$$c1(T) = -9.93 \times 10^{-3} T^5 + 14.28 T^4 - 7.94 \times 10^3 T^3 + 2.12 \times 10^6 T^2 \\ - 2.65 \times 10^8 T + 1.20 \times 10^{10} \quad (26)$$

如圖 23

系數 $d1(T)$

$$d1(T) = 1.20 \times 10^{-4} T^5 - 0.17 T^4 + 93.53 T^3 - 2.47 \times 10^4 T^2 \\ + 3.06 \times 10^6 T - 1.39 \times 10^8 \quad (27)$$

如圖 24

系數 $e1(T)$

$$e1(T) = 1.24 \times 10^{-7} T^5 - 1.50 \times 10^{-4} T^4 + 6.60 \times 10^{-2} T^3 - 12.51 T^2 \\ + 8.60 \times 10^2 T + 9.47 \times 10^2 \quad (28)$$

如圖 25

下列是 410°C - 600°C 多項式系數與溫度之擬合方程式：

系數 $a2(T)$

$$a2(T) = -6.22 \times 10^{-2} T^4 + 1.12 \times 10^2 T^3 - 7.09 \times 10^4 T^2 + 1.78 \times 10^7 T - 1.28 \times 10^9 \quad (29)$$

如圖 26

系數 $b2(T)$

$$b2(T) = 0.15 T^4 - 2.97 \times 10^2 T^3 + 2.11 \times 10^5 T^2 - 6.41 \times 10^7 T + 6.93 \times 10^9 \quad (30)$$

如圖 27

系數 $c2(T)$

$$c2(T) = -0.12 T^4 + 2.34 \times 10^2 T^3 - 1.75 \times 10^5 T^2 + 5.56 \times 10^7 T - 6.51 \times 10^9 \quad (31)$$

如圖 28

系數 $d2(T)$

$$d2(T) = 3.90 \times 10^{-2} T^4 - 80.06 T^3 + 6.07 \times 10^4 T^2 - 2.01 \times 10^7 T + 2.45 \times 10^9 \quad (32)$$

如圖 29

系數 $e2(T)$

$$e2(T) = -6.04 \times 10^{-3} T^4 + 12.66 T^3 - 9.82 \times 10^3 T^2 + 3.34 \times 10^6 T - 4.17 \times 10^8 \quad (33)$$

如圖 30

系數 $f2(T)$

$$f2(T) = 3.93 \times 10^{-4} T^4 - 0.85 T^3 + 6.74 \times 10^2 T^2 - 2.35 \times 10^5 T$$

$$+ 3.03 \times 10^7 \quad (34)$$

如圖 31

系數 $g2(T)$

$$g2(T) = -8.07 \times 10^{-6} T^4 + 1.79 \times 10^{-2} T^3 - 14.62 T^2 + 5.22 \times 10^3 T$$

$$- 6.87 \times 10^5 \quad (35)$$

如圖 32

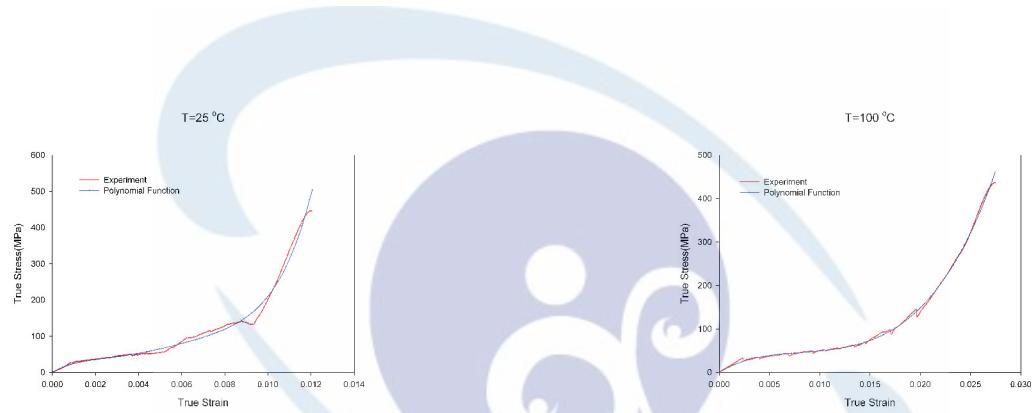


圖 8 25°C 真應力真應變曲線圖

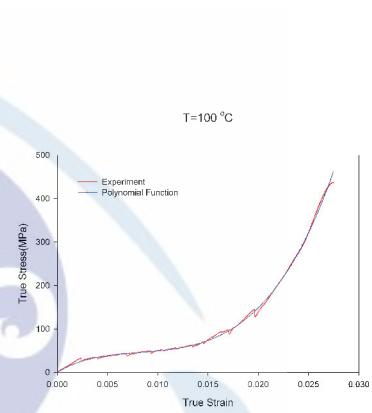


圖 9 100°C 真應力真應變曲線圖

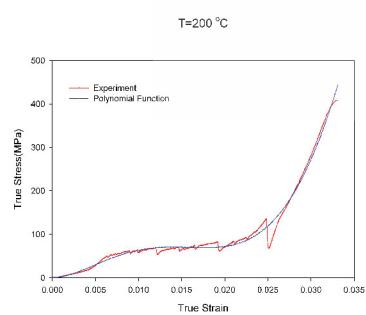


圖 10 200°C 真應力真應變曲線圖

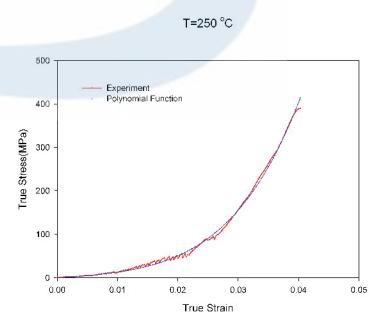


圖 11 200°C 真應力真應變曲線圖

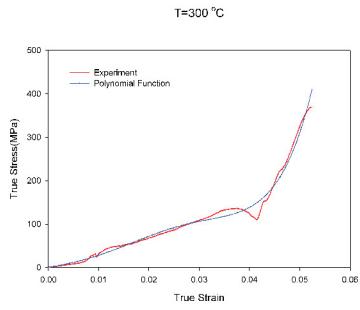


圖 12 300°C 真應力真應變曲線圖

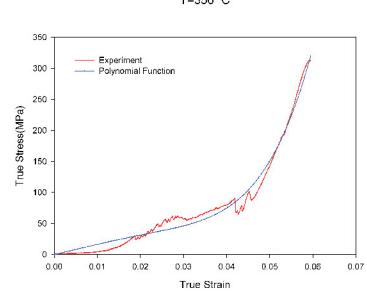


圖 13 350°C 真應力真應變曲線圖

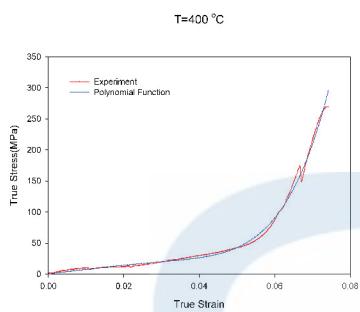


圖 14 400°C 真應力真應變曲線圖

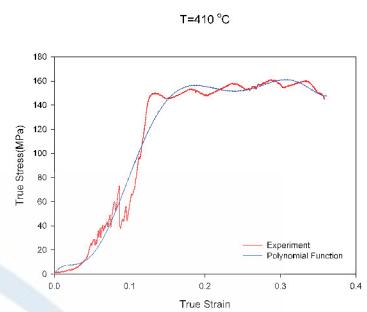


圖 15 410°C 真應力真應變曲線圖

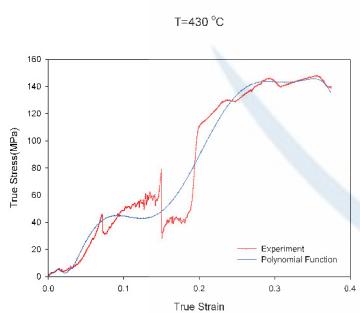


圖 16 430°C 真應力真應變曲線圖

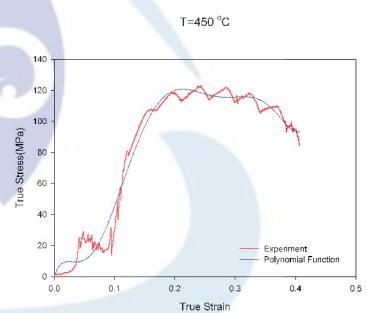


圖 17 450°C 真應力真應變曲線圖

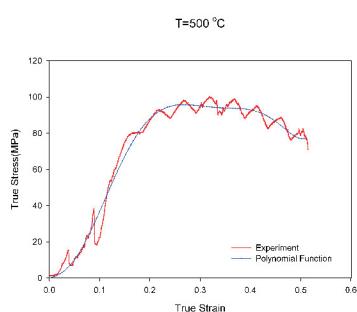


圖 18 500°C 真應力真應變曲線圖

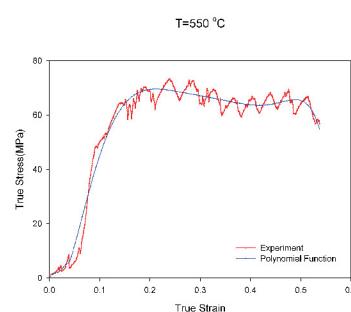


圖 19 550°C 真應力真應變曲線圖



圖 20 550°C 真應力真應變曲線圖

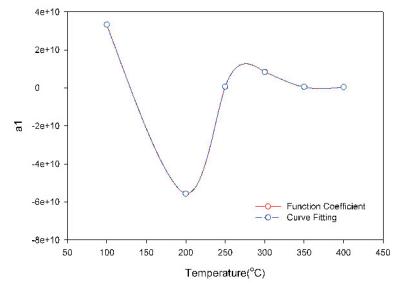


圖 21 系數 a_1 與溫度擬合曲線圖

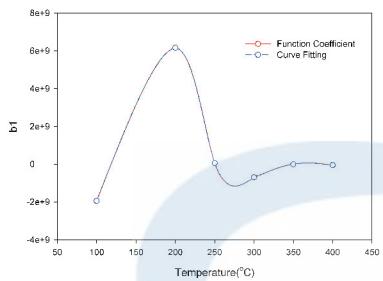


圖 22 系數 b_1 與溫度擬合曲線圖

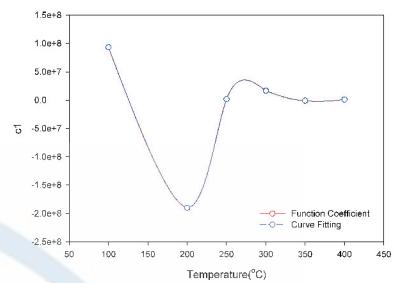


圖 23 系數 c_1 與溫度擬合曲線圖

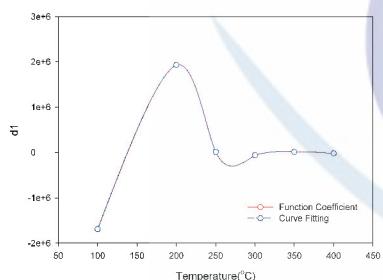


圖 24 系數 d_1 與溫度擬合曲線圖

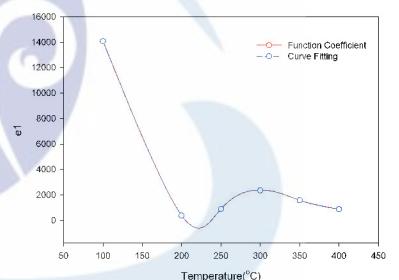


圖 25 系數 e_1 與溫度擬合曲線圖

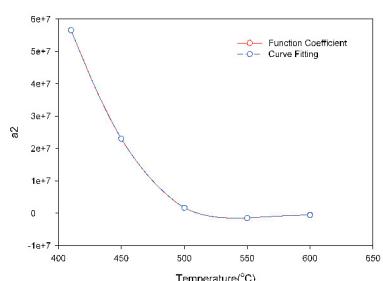


圖 26 系數 a_2 與溫度擬合曲線圖

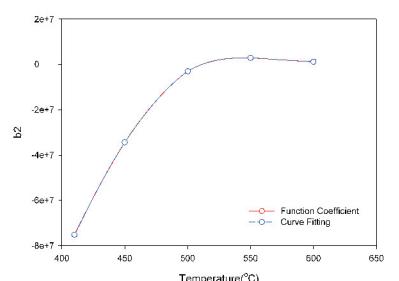


圖 27 系數 b_2 與溫度擬合曲線圖

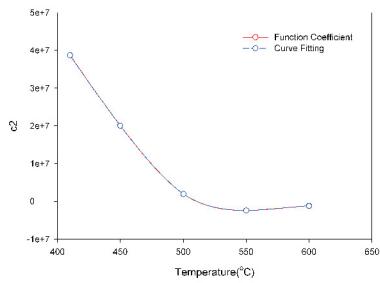


圖 28 系數 c_2 與溫度擬合曲線圖

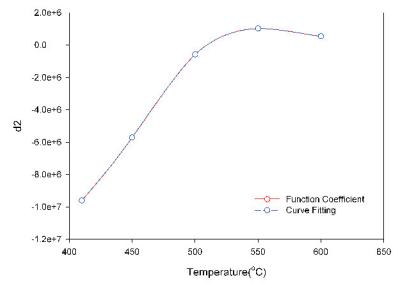


圖 29 系數 d_2 與溫度擬合曲線圖

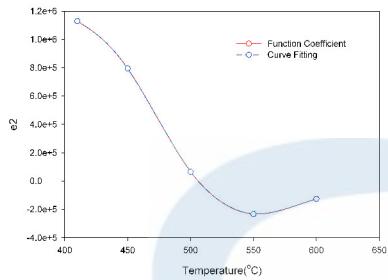


圖 30 系數 e_2 與溫度擬合曲線圖

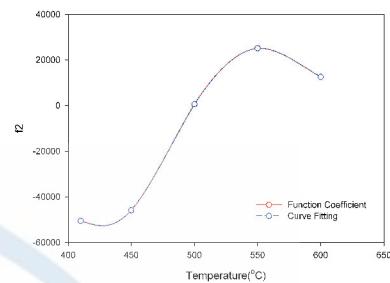


圖 31 系數 f_2 與溫度擬合曲線圖

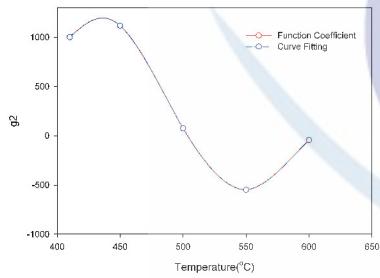


圖 32 系數 g_2 與溫度擬合曲線圖

五. 結論

本研究探討 CuSn 0.15% 銅合金線的高溫機械特性，試驗溫度從 25°C 到 600°C 以定速的狀態下作拉伸試驗，實驗可得到抗拉強度、真應力、真應變，製成圖表後再利用曲線擬合(Curve Fitting)找出各個真應力真應變擬合方程式和方程式系數與溫度的擬合方程式。根據實驗結果可以得到以下幾點結論。

1. 拉伸試驗結果顯示抗拉強度會隨溫度上升而下降，伸長率在 410°C 之前沒有太大的變化，410°C 之後會有明顯的伸長，很顯然 410°C 為再結晶溫度。

2. 室溫和高溫的真應力真應變曲線有不同的特徵，室溫的曲線較平順，高溫時會發生震盪的現象，是因為發生動態再結晶所導致。
3. 本文用曲線擬合(Curve Fitting)找出多項式擬合的真應力真應變擬合方程式、真應力真應變方程式系數與溫度的擬合方程式。經由設定的溫度，可以藉系數擬合方程式找出該溫度的真應力真應變擬合方程式，作為數值模擬分析時的參數。

參考文獻

- T. Furushima, K. Manabe, 2007, “Experimental study on multi-pass dieless drawing process of superplastic Zn–22%Al alloy microtubes”, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 187-188, pp.236-240.
- X. Nan, 2005, “An Equivalent Complex Permeability Model for Litz-Wire Windings” , *Industry Applications Conference*, Vol. 3, pp.2229–2235..
- 徐景福, 1985, 金屬材料與試驗法, 復文書局, 台南市, 台灣.
- 許源泉, 2005, 塑性加工學, 全華書局, 台北市, 台灣.
- 賴耿陽, 1977, 非鐵合金鑄物, 復漢書局, 台南市, 台灣.
- 機械工程手冊/電機工程手冊編輯委員會, 2002, 金屬材料, 五南, 台北市, 台灣.