

DT  
446  
4428.1  
100  
225296

# 國立勤益科技大學

機械工程系

碩士論文

用於低壓直流應用之形狀記憶合金  
電熱式電斷路器之研發

Development of Shape Memory Alloy  
Electrothermal Circuit Breakers for  
DC Low Voltage Application

指導教授：潘吉祥 教授

研究 翔



中華民國一〇〇年七月

國立勤益科技大學圖書館



225296

# 國家圖書館

## 博碩士論文電子檔案上網授權書

本授權書所授權之論文為授權人在國立勤益科技大學機械工程系 99 學年度第 2 學期取得碩士學位之論文。

論文題目：用於低壓直流應用之形狀記憶合金電熱式電斷路器之研發  
指導教授：潘吉祥

茲同意將授權人擁有著作權之上列論文全文（含摘要），非專屬、無償授權國家圖書館，不限地域、時間與次數，以微縮、光碟或其他各種數位化方式將上列論文重製，並得將數位化之上列論文及論文電子檔以上載網路方式，提供讀者基於個人非營利性質之線上檢索、閱覽、下載或列印。

上列論文為授權人向經濟部智慧財產局申請專利之附件或相關文件之一（專利申請案號：\_\_\_\_\_），請於\_\_\_\_\_年\_\_\_\_\_月\_\_\_\_\_日後再將上列論文公開或上載網路。

因上列論文尚未正式對外發表，請於 101 年 8 月 16 日後再將上列論文公開或上載網路。

授權人：莊凱翔

親筆簽名及蓋章：

莊凱翔



民國 100 年 8 月 18 日

電話：0988-067867 傳真：

聯絡地址：新北市三重區永順里10鄰永安北路一段3巷18號3樓

E-Mail：j.kaishiang@gmail.com

# 國立勤益科技大學

## 博碩士論文全文上網授權書

(提供授權人裝訂於紙本論文書名頁之次頁用)

本授權書所授權之論文為授權人在國立勤益科技大學  
機械工程系 設計 組 99 學年度第 2 學期取得碩士學位之  
論文。

論文題目：用於低壓直流應用之形狀記憶合金電熱式電斷路器之研  
發  
指導教授：潘吉祥

### ■ 同意

本人具有著作權之論文全文資料，非專屬、無償授予本人畢業學校  
圖書館，不限地域、時間與次數，以微縮、光碟或數位化等各種方  
式重製與利用，提供讀者基於著作權法合理使用範圍內之線上檢  
索、閱覽、下載及列印。

論文全文上載網路公開之範圍及時間：

校內區域網路	■ 中華民國 101 年 8 月 16 日公開
校外網際網路	■ 中華民國 101 年 8 月 16 日公開

授權人：莊凱翔

簽名：莊凱翔

中華民國 100 年 8 月 18 日

國立勤益科技大學  
研究所碩士班  
論文口試委員會審定書

本校            機械工程系            碩士班            莊凱翔            君

所提論文            用於低壓直流應用之形狀記憶合金電熱式電斷路器之研發

合於碩士資格水準，業經本委員會評審認可。

口試委員：            潘吉祥           

           張厚銘           

           劉晉嘉           

指導教授：            潘吉祥           

系（所）主管： 

機械工程系	蔡明義
主任	

中華民國 一〇〇 年 七 月

# 用於低壓直流應用之形狀記憶合金 電熱式電斷路器之研發

學生：莊凱翔

指導教授：潘吉祥 博士

國立勤益科技大學 機械工程系 碩士班

## 摘要

隨著科技發展 3C 產品的種類越來越多也越精密，在電源供應方面皆使用低壓直流電，因此本研究製作一個適用於低壓直流且體積小、可感應小電流變化進行過載保護的形狀記憶合金電熱式電斷路器，對 3C 產品提供多一層保護。

本研究之電斷路器主要元件有形狀記憶合金致動器與雙穩態結構，此種設計方式可免除為了使形狀記憶合金致動器能夠精準定位的複雜性控制分析，且有利於縮小電斷路器的體積。針對形狀記憶合金和雙穩態結構進行實驗量測，設計出可承受不同過載電流的電斷路器，以用於不同條件下的過載保護。經實驗證明當系統迴路發生故障，該電斷路器能在電流達到過載設定值時跳脫，有效保護負載元件並可迅速回復供電。

**關鍵字：**形狀記憶合金、電熱、雙穩態結構、斷路器。

# **Development of Shape Memory Alloy Electrothermal Circuit Breakers for DC Low Voltage Application**

**Student: Kai-Shiang Juang**

**Advisor: Chi-Hsiang Pan Ph.D.**

**Department of Mechanical Engineering  
National Chin-Yi University of Technology**

## **ABSTRACT**

DC low voltages are applied to the precise 3C products more and more. Therefore, an electrothermal circuit breaker using shape memory alloy is developed to protect over power or short circuit of 3C products. The main components of the novel electrothermal circuit breaker to function at a predetermined current threshold are shape memory alloy actuators and a bistable structure. The construction of the circuit breaker is compact and can be miniaturized easily. By altering the design parameters of the solenoid or bistable structure or contact latch, an array of circuit breakers are available to detect a variety of current thresholds. The circuit breaker can be reset automatically and immediately to restore power without delay.

**Keywords:** Shape Memory Alloy, Electrothermal, Bistable Structure, Circuit Breaker

## 致謝

兩年的研究所生活即將進入尾聲，感謝這段期間給予我幫助及鼓勵的人。首先要感謝我的恩師潘吉祥教授對我的指導與訓練，讓我再研究能力及處事能力上精進不少，在此獻上最誠摯的謝意。再來感謝偉大的爸爸、媽媽在精神上的支持與經濟上的援助，讓我在求學路途上無後顧之憂。還有感謝在我最後半年衝實驗時一路相挺的女友品清，感謝妳的體諒與包容讓我可以順利的完成學業，妳也要加油喔！最後感謝實驗室的學長姐，盈斌、小朱、欽隆、志偉、川豪、魷魚、小白，跟你們一起討論研究常常讓我有所啟發。感謝志俞老大哥，無論在研究或處事上都給了我許多建議，感謝昀廷，常常分享你精彩的人生故事，以及有你在無論去哪都有免費的車子及司機，雖然你不常出現但我還是能感受到你精神上的支持...。感謝學弟育賢，有你在實驗室裡增添了不少樂趣，當然你還欠我一隻哆啦A夢模型記得補上！感謝三位夥伴在小弟的求學路上一路相陪，以後記得常聯絡。

# 目 錄

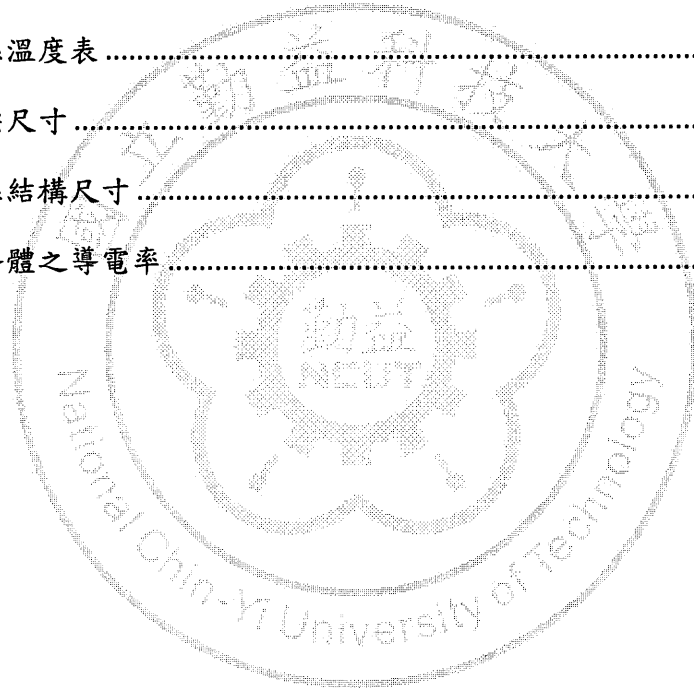
摘 要 .....	i
ABSTRACT .....	ii
致 謝 .....	iii
目 錄 .....	iv
表 目 錄 .....	vi
圖 目 錄 .....	vii
第一章 緒論 .....	1
1.1 前言 .....	1
1.2 文獻回顧 .....	1
1.3 研究動機與目的 .....	3
1.4 論文架構 .....	4
第二章 電熱式電斷路器作動原理 .....	5
2.1 前言 .....	5
2.2 形狀記憶合金致動器作動原理 .....	7
2.2.1 形狀記憶合金起源 .....	11
2.2.2 形狀記憶合金的組成與製造 .....	13
2.2.3 形狀記憶合金的變形原理 .....	15
2.2.4 形狀記憶效應及擬彈性效應 .....	18
2.3 雙穩態結構作動原理 .....	19
2.3.1 柔性連結系統 .....	22



2.3.2 雙穩態機制介紹 .....	22
第三章 電熱式電斷路器之設計與製造 .....	24
3.1 構想設計 .....	24
3.2 形狀記憶合金致動器之設計分析與製造 .....	26
3.2.1 實驗材料與設備介紹 .....	27
3.2.2 形狀記憶合金製造與量測 .....	29
3.2.3 量測結果與討論 .....	35
3.2.4 致動器的選用及性能測試 .....	48
3.3 雙穩態結構之設計分析與製造 .....	50
3.3.1 雙平行彎曲梁設計與量測 .....	50
3.3.2 量測結果與討論 .....	52
3.3.3 雙穩態結構的選用 .....	58
3.3.4 雙穩態結構製造 .....	59
3.4 移動式接觸開關之設計分析與製造 .....	60
3.5 電熱式電斷路器組裝 .....	62
第四章 電熱式電斷路器之測試與討論 .....	64
4.1 過載電流測試與模擬實驗 .....	64
4.2 短路測試 .....	66
4.3 環境溫度測試 .....	67
第五章 結論與未來展望 .....	68
參考文獻 .....	70

## 表目錄

表 2.1	形狀記憶合金的起源與發展史.....	12
表 2.2	具有形狀記憶效應的鐵系合金.....	13
表 2.3	具有形狀記憶效應的非鐵系合金.....	14
表 2.4	Ni-Ti 合金與 Cu-Zn-Al 合金比較表.....	14
表 3.1	形狀記憶合金樣品形態.....	30
表 3.2	相變態溫度表.....	36
表 3.3	彎曲梁尺寸.....	51
表 3.4	雙穩態結構尺寸.....	59
表 3.5	各種導體之導電率.....	60



## 圖目錄

圖 1.1	各類型的斷路器 .....	3
圖 2.1	熱動式斷路器作動原理 .....	5
圖 2.2	熱動電磁式斷路器作動原理 .....	5
圖 2.3	直熱式斷路器作動原理 .....	6
圖 2.4	間熱式斷路器作動原理 .....	6
圖 2.5	混合式斷路器作動原理 .....	6
圖 2.6	微夾持系統與 SMA 圓弧形致動器 .....	7
圖 2.7	仿生鰭彎曲結構與微型機器魚原型 .....	8
圖 2.8	仿生蚯蚓機器人 .....	8
圖 2.9	內視鏡彎曲作動與作動原理 .....	9
圖 2.10	人工肛門括約肌作動圖 .....	9
圖 2.11	組合式微型泵與作動原理 .....	9
圖 2.12	微型血管泵浦與作動原理 .....	10
圖 2.13	可多方向性彎曲的機械導管 .....	10
圖 2.14	機器蝙蝠實體與翅膀結構 .....	10
圖 2.15	線狀記憶合金製作過程 .....	15
圖 2.16	形狀記憶效應之晶格結構圖 .....	16
圖 2.17	晶格形狀之轉變示意圖 .....	16
圖 2.18	麻田散體相比例與溫度關係圖 .....	17
圖 2.19	形狀記憶效應 .....	18
圖 2.20	擬彈性效應 .....	19

圖 2.21 雙穩態結構作動示意圖 .....	19
圖 2.22 形狀記憶合金微驅動雙穩態結構 .....	20
圖 2.23 靜電驅動雙穩態微型致動器與電磁驅動雙穩態微型致動器 .....	20
圖 2.24 恆定力雙穩態結構 (CFBM) 模型 .....	21
圖 2.25 封閉式雙穩態結構 .....	21
圖 2.26 X 和 Y 方向的雙穩態結構與作動示意圖 .....	22
圖 2.27 雙穩態機制的平衡示意圖 .....	23
圖 3.1 形狀記憶合金電熱式電斷路器構想圖 (a) 正面 (b) 背面 .....	25
圖 3.2 電熱式電斷路器作動原理圖 (a) 通路 (b) 斷路 .....	25
圖 3.3 實驗流程圖 .....	26
圖 3.4 Ti <sub>50%</sub> -Ni <sub>50%</sub> 形狀記憶合金與螺栓治具 .....	27
圖 3.5 高溫加熱爐 .....	27
圖 3.6 微拉力計 .....	28
圖 3.7 TES-1313 溫度錶 .....	28
圖 3.8 高溫熱處理 .....	29
圖 3.9 螺旋型形狀記憶合金(a)麻田散體相(b)沃斯田體相 .....	29
圖 3.10 熱處理 400°C (a) 爐冷 (b) 水冷 .....	30
圖 3.11 (a) 熱處理 500°C (b) 熱處理 600°C .....	31
圖 3.12 致動時間量測圖(a)未通電(b)通電 .....	31
圖 3.13 致動溫度量測圖 .....	32
圖 3.14 表面升溫量測圖 .....	32
圖 3.15 散熱速度量測圖 .....	33

圖 3.16 拉伸阻力量測圖(a)未拉伸(b)逐步拉伸 .....	33
圖 3.17 致動力量測圖 .....	34
圖 3.18 疲勞測試圖 .....	34
圖 3.19 致動時間比較圖 .....	35
圖 3.20 表面升溫比較圖 .....	37
圖 3.21 散熱速度比較圖 .....	38
圖 3.22 拉伸阻力比較圖-熱處理 400°C .....	40
圖 3.23 拉伸阻力比較圖-熱處理 500°C .....	40
圖 3.24 拉伸阻力比較圖-熱處理 600°C .....	41
圖 3.25 拉伸阻力比較圖-爐冷 .....	41
圖 3.26 拉伸阻力比較圖-空冷 .....	42
圖 3.27 拉伸阻力比較圖-水冷 .....	42
圖 3.28 致動力比較圖-熱處理 400°C .....	44
圖 3.29 致動力比較圖-熱處理 500°C .....	44
圖 3.30 致動力比較圖-熱處理 600°C .....	45
圖 3.31 致動力比較圖-爐冷 .....	45
圖 3.32 致動力比較圖-空冷 .....	46
圖 3.33 致動力比較圖-水冷 .....	46
圖 3.34 疲勞測試圖 .....	47
圖 3.35 500°C-爐冷的形狀記憶合金致動器 .....	48
圖 3.36 致動力與溫度量測圖 .....	48
圖 3.37 合金溫度上升趨勢圖 .....	49

圖 3.38 致動力上升趨勢圖 .....	50
圖 3.39 彎曲梁設計圖 .....	51
圖 3.40 彎曲梁曲率半徑圖 (a) I 型 (b) II 型 (c) III 型 .....	51
圖 3.41 雙穩態結構作動示意圖 (a) 垂直 (b) 偏擺 .....	52
圖 3.42 雙穩態結構力-位移圖 .....	53
圖 3.43 彎曲梁力-位移量測圖 .....	53
圖 3.44 雙穩態結構力-位移圖 (長度 22mm) .....	55
圖 3.45 雙穩態結構力-位移圖 (長度 23mm) .....	55
圖 3.46 雙穩態結構力-位移圖 (長度 24mm) .....	56
圖 3.47 雙穩態結構力-位移圖 (曲率 I 型) .....	56
圖 3.48 雙穩態結構力-位移圖 (曲率 II 型) .....	57
圖 3.49 雙穩態結構力-位移圖 (曲率 III 型) .....	57
圖 3.50 雙穩態結構設計圖 .....	59
圖 3.51 雙穩態結構成品 .....	60
圖 3.52 雙穩態結構作動方式 .....	60
圖 3.53 移動式接觸開關 (a) 固定端 (b) 移動端 .....	61
圖 3.54 接觸開關組裝方式 (a) 通路 (b) 斷路 .....	61
圖 3.55 電熱式電斷路器組裝圖(背面) .....	62
圖 3.56 電熱式電斷路器組裝圖(正面) .....	63
圖 3.57 電熱式電斷路器 (斷電狀態) .....	63
圖 4.1 過載電流測試 .....	64
圖 4.2 模擬負載系統迴路圖 .....	65

圖 4.3 過載模擬實驗圖 .....	65
圖 4.4 瞬間過電流測試 (週期 2 秒) .....	66
圖 4.5 瞬間過電流測試 (週期 1 秒) .....	66
圖 4.6 瞬間過電流測試 (跳脫) .....	66
圖 4.7 環境溫度模擬實驗圖 (a) 高溫 (b) 低溫 .....	67



# 第一章 緒論

## 1.1 前言

隨著科技發展 3C 產品種類繁多，這些產品在電源供應方面皆使用低壓直流電，因為與交流電相比直流電更能有效的降低電力在傳輸中的損失，增進能源使用效率且電流轉換器體積小重量輕適於輕薄短小之電器產品。隨著現今環保意識抬頭與綠能科技發展，為了因應現代高效率 3C 產品的需要、綠色能源的使用比率逐年升高、節能減碳的呼籲等等[1]，在未來使用低壓直流電的產品將越來越多。因此在低壓直流電使用率上升過程中，電斷路器將成為重要的討論課題之一，因為當系統的負載端或是發電裝置出現故障時，電斷路器必須迅速跳脫接點以避免影響整個系統或造成負載元件損壞，達到過載保護的目的。目前市面上最常使用的電斷路器為無熔絲開關，但體積龐大不便裝置於小型負載元件上，加上可承受的過載電流不足以對小電流的負載元件進行保護。因此本研究製作一個適用於低壓直流且體積小、可感應小電流變化進行過載保護的電熱式電斷路器，對 3C 產品提供多一層保護。

本研究將以形狀記憶合金作為致動器，針對其材料特性作基礎量測分析，並應用於自行設計的雙穩態結構上，完成適用於低壓直流之電熱式電斷路器。

## 1.2 文獻回顧

斷路器 (Circuit Breaker, CB)，又稱為遮斷器為一種過電流保護裝置，通常用於配線上使用之總開關與分電流控制開關，主要用作短路保護和防止嚴重超載，當使用電流超過額定值時斷路器會迅速跳脫接點達到過載保護的目的。



低壓斷路器容量範圍很大，其中最常見為無熔絲開關，較大型容量之低壓斷路器最常見的是空氣斷路器。

世界上最早的斷路器出現於 1885 年，它是一種由刀開關和過電流脫扣器的組合。1905 年，具有自由脫扣裝置的空氣斷路器誕生。1930 年隨著科學技術的進步，電弧原理的發現和各種滅弧裝置的發明逐漸形成了目前的機構。50 年代末電子元件的興起產生了電子脫扣器，20 世紀末由於小型化電腦的發展和普及，又有智慧型斷路器的問世。

如圖 1.1 (a) 為目前市面上最常使用的無熔絲開關，可分為熱動式、熱動電磁式及完全電磁式三種，工作溫度必須在攝氏 40°C 以下環境使用，若超過 40°C 時開關之過載電流值會降低，使開關過載電流無法精確地動作會有不小的誤差存在。

如圖 1.1 (b) 為低壓空氣斷路器，其控制採用電動操作方式，一般採用大容量之無熔絲開關，因體積龐大操作不易故採用低壓空氣斷路器，雖然其價位較高但由於操作方便及安全之理由，故目前有取代無熔絲開關之趨勢。

如圖 1.1 (c) 為電磁開關，利用電磁吸力作用促使主接點開關做為電動機啟動及過載控制，輔助接點開關以控制電路動作，具有可高頻率的做電源開啟與切斷控制，經常運用於電動機做為控制對象。

如圖 1.1 (d) 為栓型保險絲，當控制電路發生短路時熔絲會燒毀本體內部的石英粉碳酸粒，其它種類的消弧器材能立即將熔斷之熔絲消弧，並經由彈簧將熔斷指示片彈出。

如圖 1.1 (e) 為積熱電驛，功能為負載的過載保護用並不具備負載短路保護功能，可分為直熱式、間熱式、混合式。

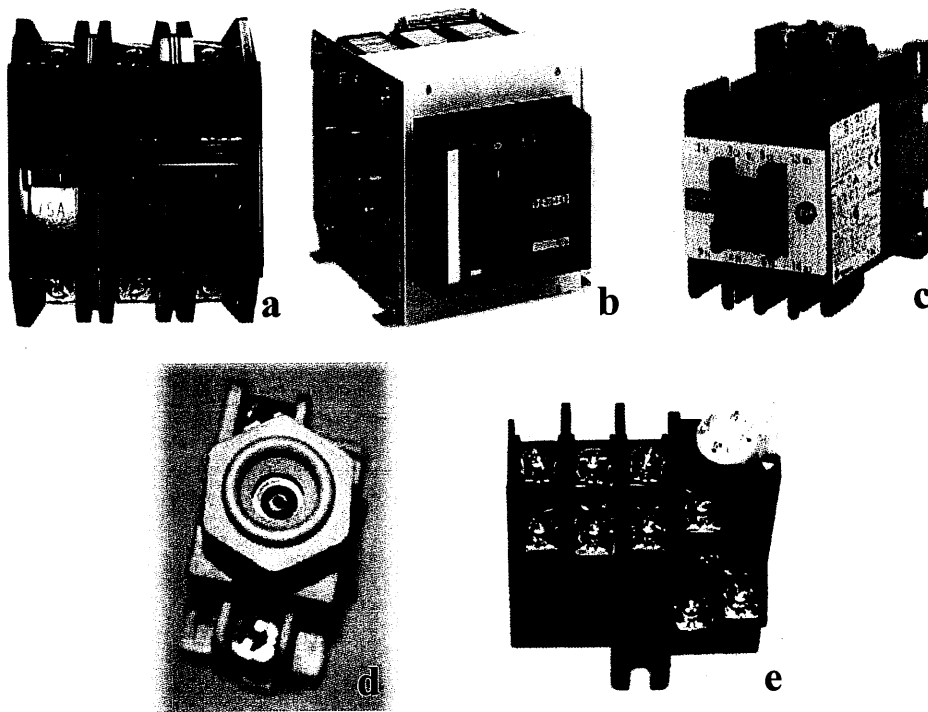


圖1.1 各類型的斷路器[2]

Seungki Hong 等人[3]利用有限元素法分析無熔絲開關內部電磁力驅動器的磁場和動態特性，達到遠程控制的需求。

### 1.3 研究動機與目的

近年來使用直流電源來驅動的 3C 產品越來越多，相較於交流電使用直流電更能有效的降低電力在傳輸中的損失，增進能源使用效率。再加上現今綠色能源科技的提倡，直流電的運用範圍將越來越廣。因此在低壓直流電使用率上升過程中電斷路器將成為重要的討論課題之一，不過目前市面上電斷路器的使用皆以交流為主，直流斷路器的使用並不常見。

因此本論文藉由形狀記憶合金的形狀記憶效應製作致動器並進行各種基本特性的量測實驗，隨後與設計的雙穩態結構(Bistable structure)做結合，透過實驗結果去驗證此電熱式電斷路器的可行性，完成適用於低壓直流且體積小、可感應小電流變化進行過載保護的電熱式電斷路器，對 3C 產品提供多一層保護。

## 1.4 論文架構

本論文共分為五個章節來作介紹：

第一章 緒論，主要在介紹電斷路器的發展歷史及說明本研究的動機目的。

第二章 電熱式電斷路器作動原理與相關文獻回顧，開始先介紹市面上電熱式電斷路器的作動原理，接著分別對形狀記憶合金及雙穩態結構的作動原理做詳細介紹。

第三章 電熱式電斷路器之設計與製造，針對預設計的電斷路器進行說明，並分別對形狀記憶合金致動器、雙穩態結構及移動式開關進行設計分析、製造，最後組裝完成本研究之電熱式電斷路器。

第四章 電熱式電斷路器之測試與討論，將完成的電斷路器進行各項測試以證明本斷路器之可行性。

第五章 結論與未來展望，針對本研究進行最後的資料整理，將成果分享並計劃未來研究發展方向。

## 第二章 電熱式電斷路器作動原理

### 2.1 前言

目前市面上使用電熱式驅動的低壓電斷路器其作動原理如下[2]：

#### 無熔絲開關-熱動式

利用雙金屬片原理製成，當負載電流超過額定電流時雙金屬片會因為膨脹係數不同呈現彎曲現象，進而觸動跳脫元件中斷電源供給。因雙金屬片遇熱彎曲是累積熱的結果，所以不適用於瞬間爆衝電流的短路保護只能做過載保護用。



圖2.1 熱動式斷路器作動原理

#### 無熔絲開關-熱動電磁式

使用雙金屬片遇熱彎曲特性作過載保護，原理同熱動式另以電磁場吸持方式做短路保護，如當線路短路時因線路瞬間產生大電流，磁場大可迅速吸引可動鐵心，以觸動跳脫元件將負載電流切斷達到短路保護的目的。

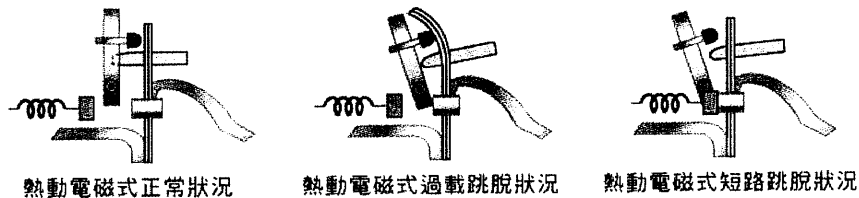


圖2.2 熱動電磁式斷路器作動原理

### 積熱電驛-直熱式

電流直接通過雙金屬片，利用雙金屬片受熱會彎曲的特性推動絕緣板來開關接點。其優缺點為：反應靈敏、容易故障。

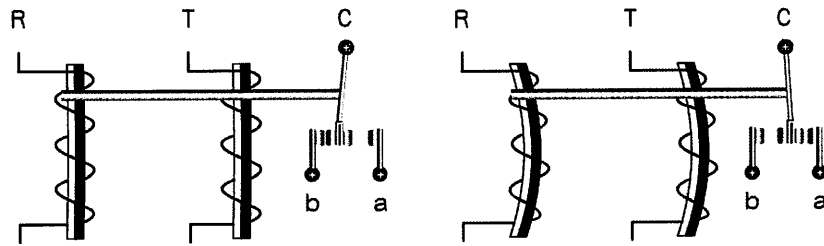


圖2.3 直熱式斷路器作動原理

### 積熱電驛-間熱式

電流通過電熱絲時其產生的熱量致使旁邊的雙金屬片受熱彎曲，推動絕緣板來開關接點。其優缺點為：反應較差、不易故障。

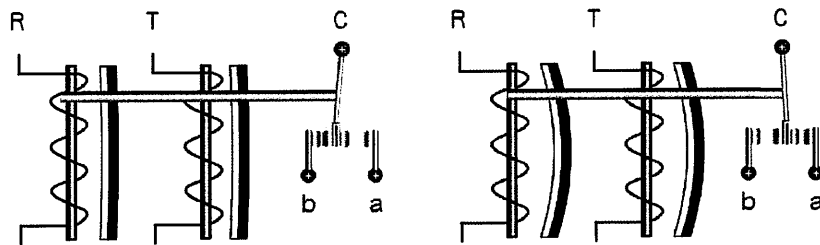


圖2.4 間熱式斷路器作動原理

### 積熱電驛-混合式

電流通過電熱絲及雙金屬片，兩者同時產生的熱量使雙金屬片受熱彎曲推動絕緣板來開關接點。其優點為：反應靈敏、不易故障。

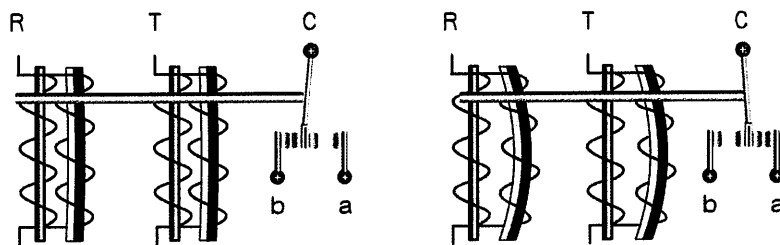


圖2.5 混合式斷路器作動原理

## 2.2 形狀記憶合金致動器作動原理

致動器必須提供足夠的驅動力來使機構執行動作，以目前致動器的設計方式可分為流體式、熱能式、壓電式、電磁式及形狀記憶合金等方式。壓電式驅動的優點為位移精度極高但所需的能量也偏高，再考慮到致動器本身的尺寸大小、作動行程及環境限制下壓電式驅動確實有不足之處[4]。

有別於傳統使用馬達及其他零組件驅動，不但機構不易微型化且易產生噪音，形狀記憶合金具有體積小、耐腐蝕性佳、高能量密度、高驅動力、較大的驅動行程以及較小驅動能等優點，在設計上可避免增加致動器的複雜度容易微型化，因此適合用來當做致動器。本文將使用形狀記憶合金做為電斷路器的致動器，以利在有限的工作空間下進行靈活的作動。至今形狀記憶合金已被應用於各種不同類型機構的致動器上，其應用方面如下所述：

許志成[4]利用形狀記憶合金做致動器發展出微型夾持系統，夾持器以PU之撓性材料作為基材，使用邊緣區間統計演算法取得夾持器開口大小的訊息，藉此控制夾持器的開口大小來達到監控夾持力量的目標，如圖2.6所示。

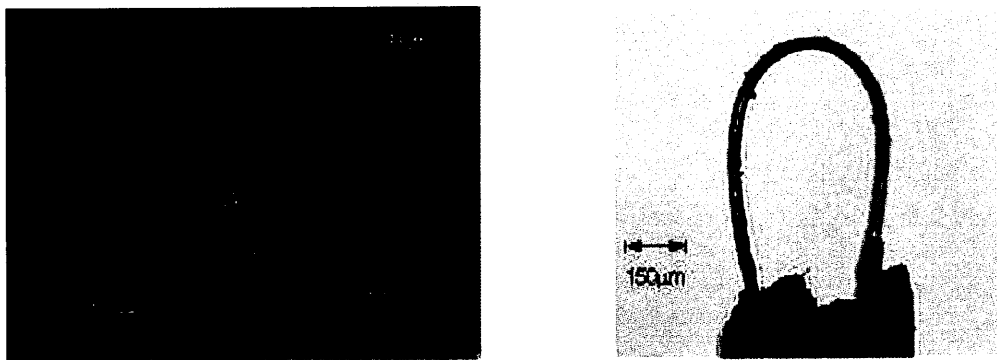


圖2.6 微夾持系統與SMA圓弧形致動器

Wang Zhenlong 等人[5]利用形狀記憶合金製作一個靈活的仿生魚鰭，並透過無線頻率控制驅動微型機器魚在水中游動，如圖 2.7 所示。

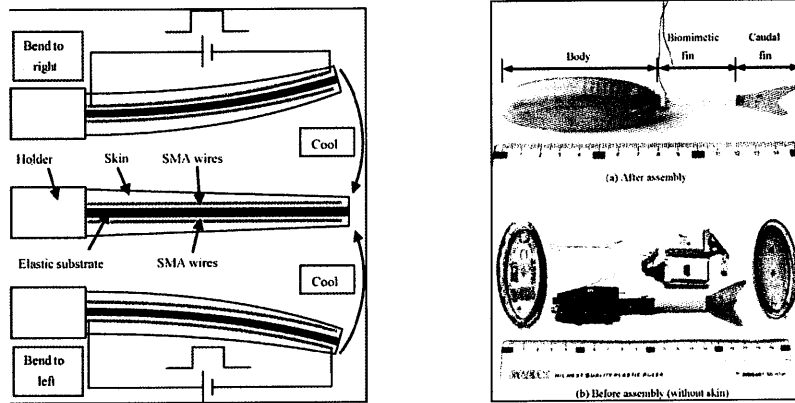


圖2.7 仿生鰭彎曲結構與微型機器魚原型

B.K. Kim 等人[6]使用形狀記憶合金搭配矽膠波紋管製造仿生蚯蚓，形狀記憶合金驅動器在波紋管中發揮收縮和擴展的動作模仿蚯蚓肌肉動作，內建電源供應系統使用無線控制仿生蚯蚓作動，如圖 2.8 所示。

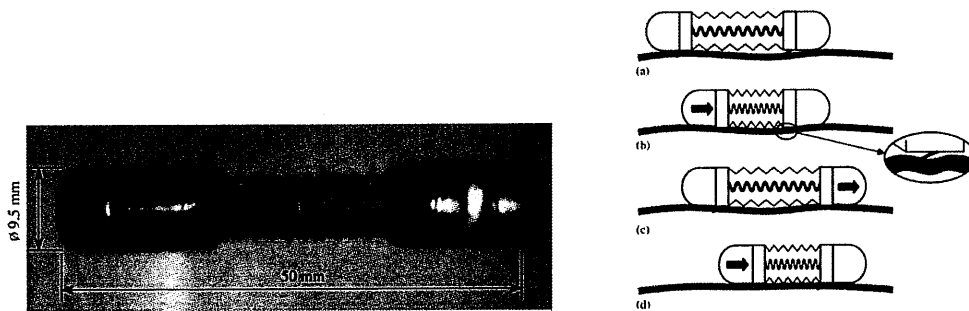


圖2.8 仿生蚯蚓機器人

S. Maeda 等人[7]藉由形狀記憶合金驅動器製作出一個結構簡單小型化可做大角度彎曲的內視鏡，如圖 2.9 所示。

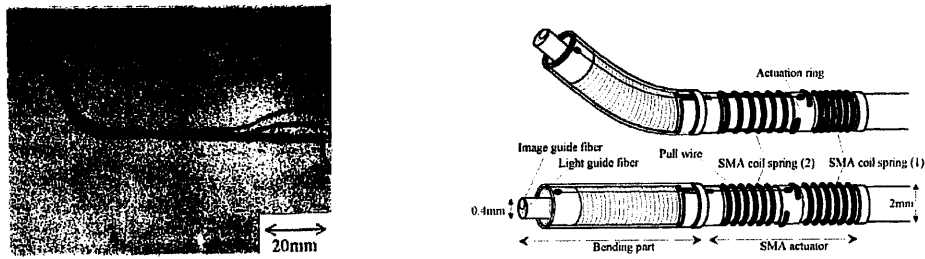


圖2.9 內視鏡彎曲作動與作動原理

T. Okuyama 等人[8]針對大便失禁的患者設計出人工肛門括約肌，使用形狀記憶合金作為致動器，如圖 2.10 所示。

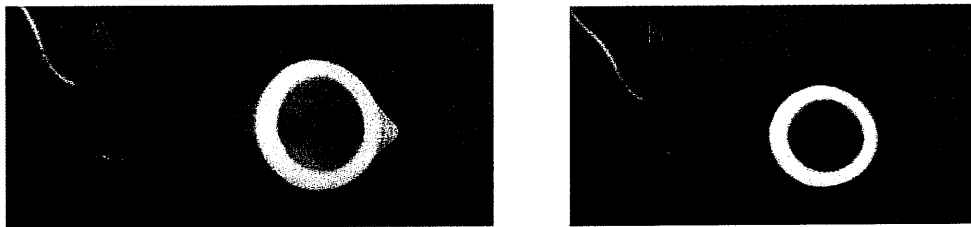


圖2.10 人工肛門括約肌作動圖

X. Sun 等人[9]發展一個新型的微泵蠕動模型使用形狀記憶合金彈簧驅動器模擬腸道蠕動，藉由控制形狀記憶合金的收縮達到控制微流量和流量的比例的效果，如圖 2.11 所示。

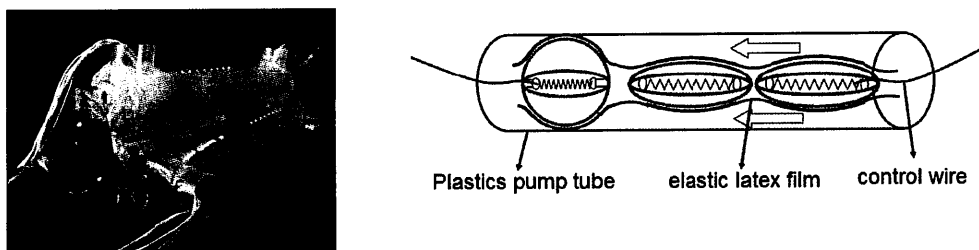


圖2.11 組合式微型泵與作動原理

Guo Shuxiang 等人[10]使用形狀記憶合金作為驅動器設計出微型血管泵浦，其優點為靈活性佳、驅動電壓低、反應速度快，如圖 2.12 所示。



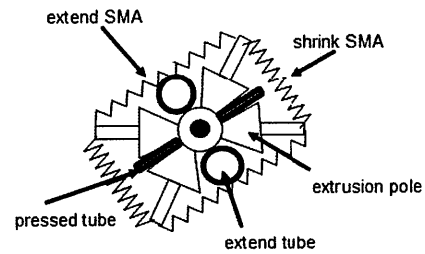
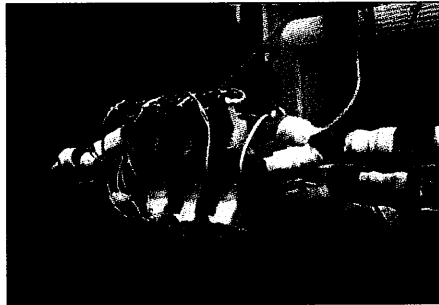


圖2.12 微型血管泵浦與作動原理

Fu Yili 等人[11]製作一個可多方向性彎曲的機械導管，藉由形狀記憶合金驅動，如圖 2.13 所示。

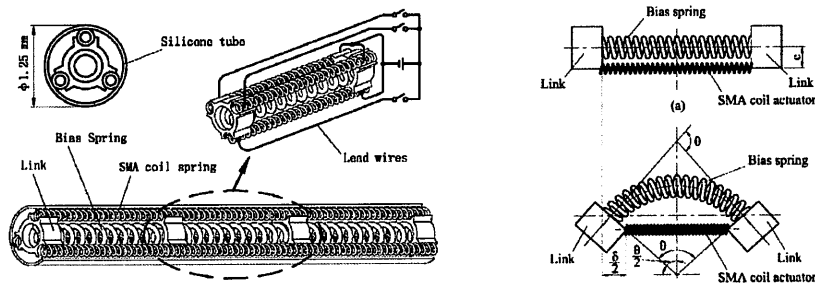


圖2.13 可多方向性彎曲的機械導管

G. Bunget 等人[12]製作的機器蝙蝠擁有形狀記憶合金的節狀四肢肌肉，此肌肉會對電流產生的熱有敏感的作用，熱會刺激形狀記憶合金絲使得它們像「金屬肌肉」一樣收縮，如圖 2.14 所示。

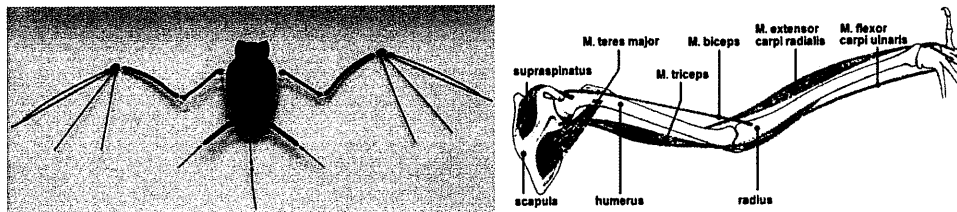


圖2.14 機器蝙蝠實體與翅膀結構

### 2.2.1 形狀記憶合金起源

一般金屬在某種變形範圍內(彈性限度內)，外力一但除去後就可恢復原狀，但如果施加超過彈性限度以上的應力，即使除去應力亦無法使其完全恢復原狀，形狀記憶合金(Shape Memory Alloy, SMA)是一種能夠記憶原有形狀的合金材料，依照其物理特性可分為形狀記憶效應(Shape Memory Effect, SME)和擬彈性效應(Pseudo Elasticity, PE)[13-15]。

#### 形狀記憶效應(Shape Memory Effect)

此類合金在熱處理的過程中可以藉由治具來設定原始形狀，之後當合金在一特定的溫度下受到有限度的塑性變形時，可藉由加熱的方式使合金恢復到原始的形狀，而此種現象稱為形狀記憶效應(Shape Memory Effect)。

#### 擬彈性效應(Pseudo Elasticity)

此類合金在受到極大的外力時擁有相當大的彈性應變量，而除去外力後又可恢復到變形前的形狀，而此種現象稱為擬彈性效應(Pseudo Elasticity)或超彈性(Superelasticity)。

起先由 1938 年美國哈佛大學的 Greninger 和麻省理工學院的 Mooradian 發現，黃銅(銅、鋅合金)的麻田散體相會伴隨溫度的變化產生形狀記憶效應。1951 年 L.C.Chang 和 T.A.Read 用 X 光觀察到 Au-Cd 合金中相變態的可逆性；兩年後，在 In-Ti 合金中也發現了此種獨特現象。1963 年美國海軍研究所 Buehlery 在研究原子比之 Ti-Ni 合金中巨觀形狀變化時發現 Ti-Ni 合金也具有形狀記憶效應，此時才引起材料界與工業界的重視。

隨後也陸續發現 Cu-Al-Ni、Cu-Zn-Al 等合金皆具有此種效應。1980 年由美國 Wayman 等人研究 Ti50%-Ni50%-X-CuX 合金系統之 TEM 的觀察，1990 年日本 Nam 等人對 Ti-Ni-Cu 系列做出廣泛的研究，因此形狀記憶合金用途種類相當廣泛，被視為極具應用潛力之智能性材料，如人工關節、微致動器、仿生昆蟲、機器人...等，利用表 2.1 可以看出形狀記憶合金的發展歷史[14-16]。

表 2.1 形狀記憶合金的起源與發展史[4,13,17]

年份	地點	發現人	合金種類	發現特性
1951	美國伊利諾大學	L.C. Chang & T.A. Read	Au-Cd 合金	形狀記憶效應(Shape Memory Effect)
1953	英國	Burkar & Read	In-Tl 合金	擬彈性效應 (Pseudo Elasticity)
1953~1963	一度受世人重視，但由於實用性不大，使得這項研究沉寂一段時間			
1963	美國海軍兵器研究所	W.J. Buehler	Ti-Ni 合金	形狀記憶效應(Shape Memory Effect)
1963 到 1980	再度受世人重視，並進行結晶學及材料科學等研究，但由於當時淬取技術及單晶化技術不成熟，因此對形狀記憶合金的特性始終無法掌握			
1980 之後	有關 Ti-Ni 合金各項基本特性幾乎都已達到可應用的階段			

## 2.2.2 形狀記憶合金的組成與製造

形狀記憶合金種類繁多，就基本元素合金來分就有十種以上，若再把添加各種合金元素算在內數量更達上百種以上，因此在製作記憶合金時要考慮成本、用途、使用壽命等因素，設計出適當的記憶合金使合金發揮最佳性能。

形狀記憶合金可分成鐵系合金和非鐵系合金。鐵系合金包括 Fe-Pt、Fe-Pd、Fe-Ni-C、Fe-Mn-Si 等，其晶體結構均為不規則的面心立方結構(FCC，12Face-centred cubic) 如表 2.2 所示，非鐵系合金包括 Ag-Cd、Cu-Zn、Ti-Ni、In-Tl 等，其晶體結構均為體心立方結構(BCC，Body-centredcubic)，統稱為  $\beta$  相合金如表 2.3 所示。

$\beta$  相合金可依其成份分成以下兩種：

第一種稱為  $\beta_2$  相，如 Ti-Ni 合金即屬於此類，成分比例為 50：50

第二種稱為  $\beta_1$  相，如 Cu-Zn 合金即屬於此類，成分比例約為 60：40

最常被使用的形狀記憶合金為 Ni-Ti 合金與 Cu-Zn-Al 合金，如表 2.4 所示，Ni-Ti 合金的回復應力為 Cu-Zn-Al 合金的兩倍，其它特性也比 Cu-Zn-Al 合金優異 [16,17]。

表 2.2 具有形狀記憶效應的鐵系合金[14-17]

合金	成分	結晶結構變化
Fe-Pt	~25%Pt	FCC-BCT
Fe-Pd	~30%Pt	FCC-FCT
Fe-Ni-C	33%Ni，4%C	FCC-BCT
Fe-Mn-Si	30%Mn，5%Si	FCC-HCP

表 2.3 具有形狀記憶效應的非鐵系合金[16,17]

合金	成分	結晶結構變化
Ag-Cd	44%~49%Cd	B2-2H
Au-Cd	50%Cd	B2-2H
Cu-Zn	41%Zn	B2-R
Ti-Ni	49%~51%Ni	B2-R
In-Tl	21%Tl	FCC-FCT

表 2.4 Ni-Ti 合金與 Cu-Zn-Al 合金比較表[16,17]

分類	Ni-Ti合金	Cu-Zn-Al合金
回復應力	最大40 kgf/mm <sup>2</sup>	最大20 kgf/mm <sup>2</sup>
回復應變	最大8%	最大4%
疲勞壽命	107	104
耐蝕性	良好	不好
加工性	不容易	容易
形狀記憶處理	容易	困難

形狀記憶合金種類繁多，特性也大不相同，能影響合金特性的製造變數很多，如鉗鍋的潔淨度、熱處理溫度、退火溫度、退火時間以及合金的混合比例等等，不同條件所搭配製造出的合金其特性也不同。影響形狀記憶合金最重要的關鍵就是麻田散體相的轉換溫度，轉換溫度會因晶粒尺寸、熱循環次數、外加應力等因素而改變，其中合金成份的改變對麻田散體相的轉換溫度影響最大，因此正確的成份控制及均勻的品質非常重要。

下面是簡要的線狀記憶合金製作流程[13,14,17]：

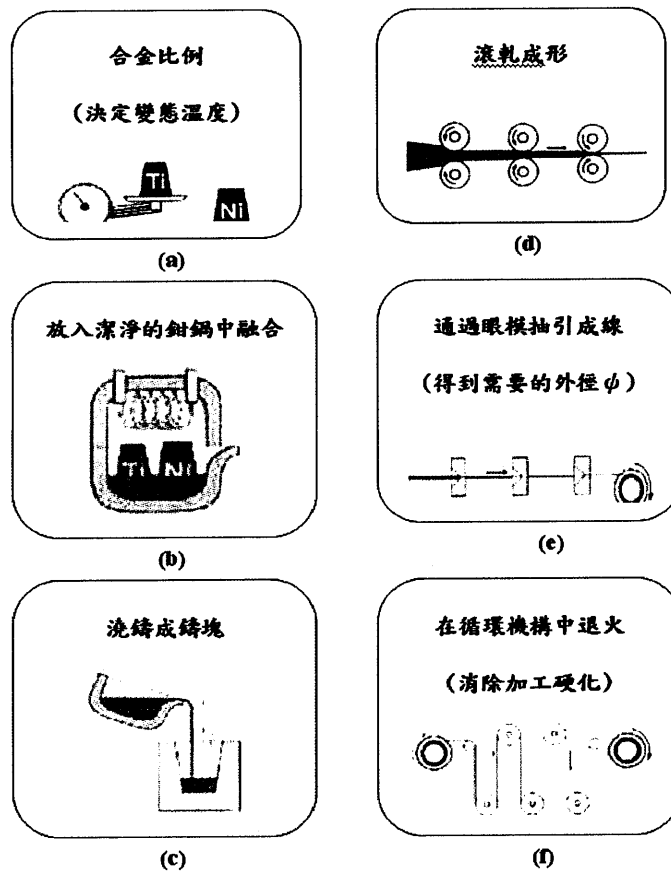


圖2.15 線狀記憶合金製作過程

### 2.2.3 形狀記憶合金的變形原理

形狀記憶合金在受到外力變形後能夠藉由原子晶體結構上的溫度變化使自身形狀恢復[18-20]，在晶體結構上有兩種狀態分別為沃斯田體相和麻田散體相：沃斯田體相(Austenite)也稱之母相，指記憶合金在高溫相時的晶格狀態，而麻田散體相(Martensitic)則是指記憶合金在低溫相時的晶格狀態，也就是當形狀記憶合金在低溫麻田散體相受到變形時，藉由外部加熱使形狀記憶合金達到高溫沃斯田體相(母相)，合金即立刻恢復到其原始形狀。其內部晶格結構如圖 2.16 所示[13,16]。

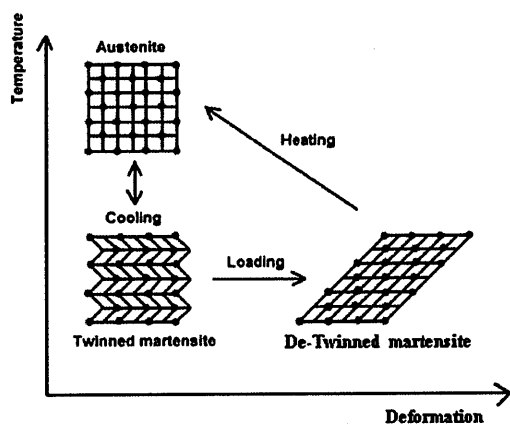


圖2.16 形狀記憶效應之晶格結構圖

### 形狀記憶合金的麻田散體相變態

形狀記憶合金的麻田散體相屬於『熱彈性型』，所謂的熱彈性麻田散體相轉換即是原來生成的 M 晶將隨溫度的下降或外加應力施加而成長，再隨著加熱或去除外加應力而沿原來的成長路徑收縮恢復，如圖 2.17 所示，沃斯田體相以方形表示，而麻田散體相則以菱形表示[14,15]。

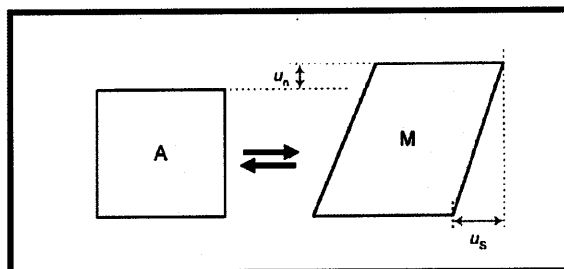


圖2.17 晶格形狀之轉變示意圖

熱彈性型麻田散體相變態和非熱彈性型麻田散體相變態不同之處在於一般鋼鐵中變態遲滯溫度達數百度之多，但在形狀記憶合金中變態遲滯溫度僅有 20°C 左右。其中主要原因是在鋼鐵中麻田散體相變態的非化學自由能相當大，但對形狀記憶合金而言，此種非化學自由能幾乎小到可以忽略，就因為形狀記憶合金的此種特色，使其變態具有可逆性造成形狀記憶合金的形狀回復特性[14,15]。

## 形狀記憶合金的溫度效應

形狀記憶合金的兩種效應與溫度有密切關係，本節將解釋溫度與相變態的相互關係，如圖 2.18 所示。

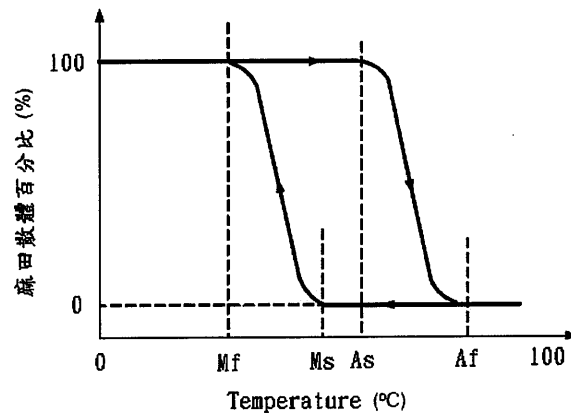


圖 2.18 麻田散體相比比例與溫度關係圖

由圖說明當形狀記憶合金溫度低於麻田散體相變態結束溫度(Mf)時，其內部皆為麻田散體(100%)，隨溫度上升麻田散體相會逐漸變態成沃斯田體相，直到沃斯田體相變態結束溫度(Af)以上即完全變態為沃斯田體相，此時的形狀記憶合金內部完全無麻田散體成份存在(0%)；當合金冷卻時其麻田散體相百分比又會由 0% 慢慢增加至 100%，即完成相變態[13,15]。

因此要具有形狀記憶效應的合金應需具備下列幾種特性[13,17,21]：

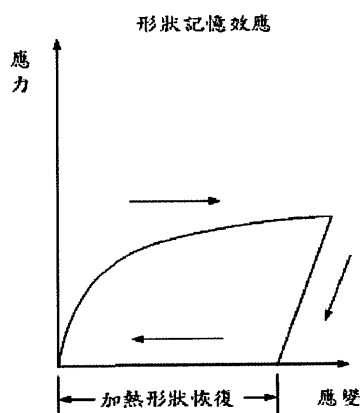
- (1) 相變態模式屬於滯熱變態(Athermal Transformation)。
- (2) 相變態模式在結晶學上具有可逆性。
- (3) 低溫相為熱彈性麻田散體(Thermoelastic Martensite)。
- (4) 麻田散體內部的次組織為雙晶或疊差。
- (5) 相變態過程中無差排滑移之不可逆塑性變形。
- (6) 母相及麻田散體相皆為序化結構。



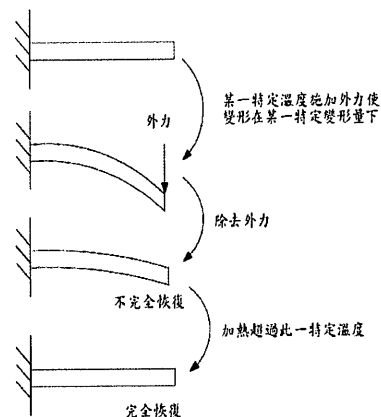
## 2.2.4 形狀記憶效應及擬彈性效應

### 形狀記憶效應

水的三態變化即是水內部原子重新排列而產生的現象，此種現象稱為相變態。形狀記憶效應即是由相變態所產生的現象。低溫時為麻田散體相(Martensite)，高溫時為沃斯田體相(Austenite)，當合金處於麻田散體相時受到有限度的塑性變形後，進行加熱動作使其超過臨界溫度時會產生逆變態此時合金內部處於沃斯田體相，同一時間外型恢復到變形前的形狀[4,13,16,17,21]。



(a)應力應變關係圖



(b)受力與回復示意圖

圖2.19 形狀記憶效應

依其記憶效應又可分為單向形狀記憶、雙向形狀記憶、全向形狀記憶三種。

### 擬彈性效應

擬彈性也稱做超彈性(Superelasticity)，此類合金在受到極大的外力時擁有相當大的彈性應變量，而除去外力後發生逆變態又可恢復到變形前的形狀[4,13,16,17,21]。

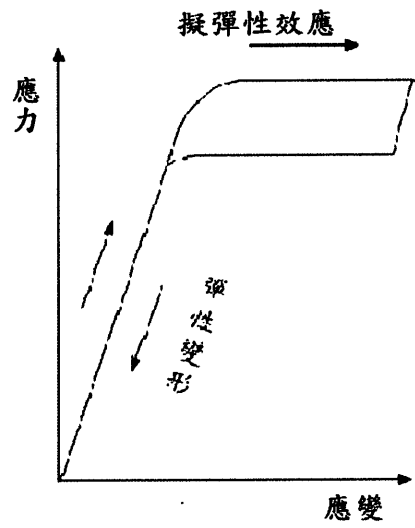


圖2.20 擬彈性效應

### 2.3 雙穩態結構作動原理

所謂的雙穩態結構(Bistable Structure)意指該結構具有雙穩態機制，在有限的範圍內不需藉由外力的幫助便可維持於一個穩定位置上，受到外力後會彈跳至下一個穩定位置，該結構可在這兩種穩定的位置上相互切換。此種在兩種不同位置上皆擁有穩定狀態的結構稱之為雙穩態結構，如圖 2.21 所示。

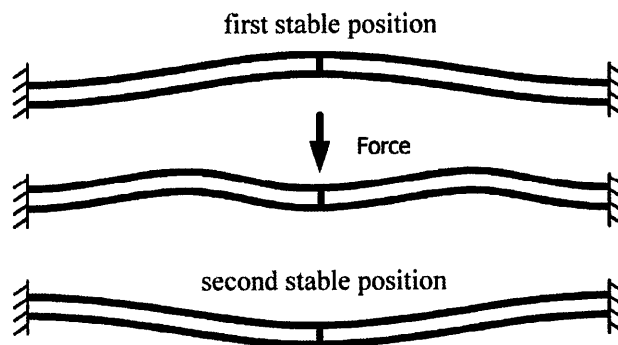


圖2.21 雙穩態結構作動示意圖[22]

由於雙穩態結構擁有簡單容易微型化、高重複性的定位、結構重量輕、結構控制簡單、驅動能量低、使用彎曲梁作為柔性傳動結構可減少摩擦，避免能量損失以及不需要輸入額外的能量便能使該結構維持於一個穩定的位置上、可以保持常開或關閉狀態等等優點，目前已被應用於多種穩態機制中。例如：繼電器、微控制閥門、洗髮水瓶蓋、碰撞感測器、光學系統切換開關等等，另外在 MEMS 方面也有出色的應用。以下文獻中皆有應用到雙穩態結構：

J. Barth 等人[23]將形狀記憶合金作為彎曲梁及外力驅動源，利用磁鐵吸力來訂定穩定位，製作出一形狀記憶合金微驅動雙穩態結構，如圖 2.22 所示。

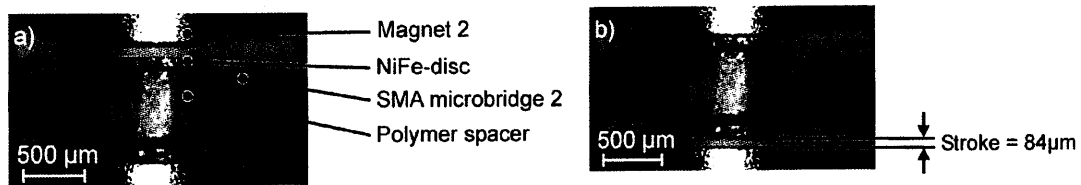


圖2.22 形狀記憶合金微驅動雙穩態結構

Y. Gerson 等人[24]、D.A. Wang 等人[25]皆使用微機電半導體製程技術製作一個雙穩態微型致動器，並藉由分析軟體分析其性能，如圖 2.23 所示。

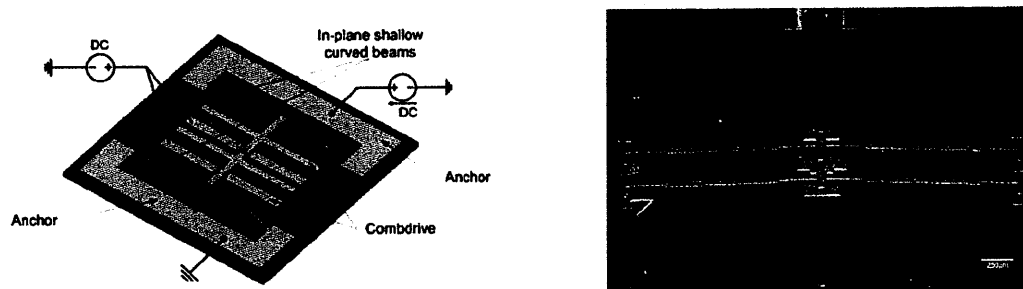


圖2.23 靜電驅動雙穩態微型致動器與電磁驅動雙穩態微型致動器

Pham Huy-Tuan 等人[26,27]設計一種新型的恆定力雙穩態機制 (CFBM)，藉由有限元素分析來探討此結構的恆定輸出力以及移動範圍，未來可應用於各種設備的過載保護裝置，如圖 2.24 所示。

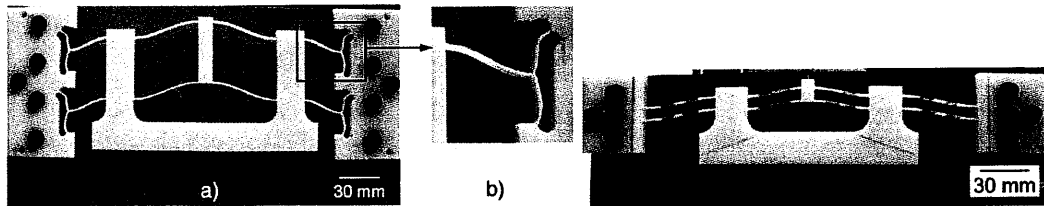


圖2.24 恆定力雙穩態結構 (CFBM) 模型

B.J. Hansen 等人[28]使用塑料片切割出一個封閉式的雙穩態結構，利用離心力作為驅動力完全不需仰賴電力，未來可應用於動能式感測開關，如圖 2.25 所示。

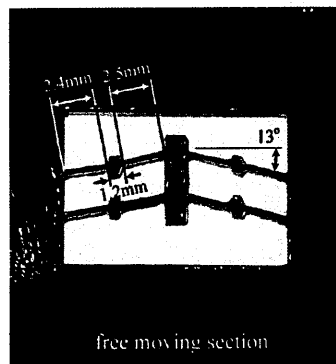


圖2.25 封閉式雙穩態結構

J.S. Han 等人[29]製造一個擁有 X 和 Y 方向的雙穩態結構，它提供了四種穩定的平衡位置，藉由實驗量測分析其性能，未來可應用於多方向性的光學系統切換開關，如圖 2.26 所示。

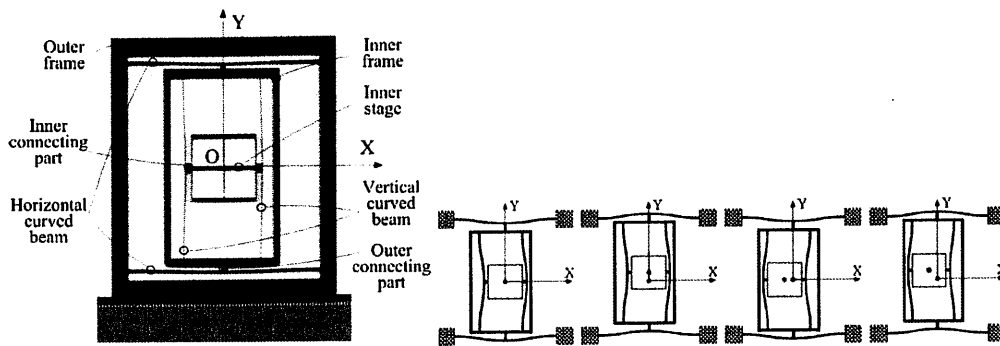


圖2.26 X和Y方向的雙穩態結構與作動示意圖

### 2.3.1 柔性連結系統

有別於一般傳統利用關節或鏈條，雙穩態結構使用彎曲梁作為結構與結構之間的柔性連結系統，結構在運動過程中彎曲梁可將應變能做有效的儲存與釋放，由於連結的零件數目減少可減少裝配時間、簡化製造流程可降低成本，在應用方面擁有體積小、重量輕、容易安置於微小結構上、磨損量低、設計簡單降低維修次數、可靠性精確度高等等優點，基於以上優點柔性連結系統常被應用於微小尺寸的設計上[30]。

### 2.3.2 雙穩態機制介紹

雙穩態機制擁有兩個穩定的平衡狀態與一個不穩定平衡狀態，該機制在一般情況下無需借助外力幫助便可停留在穩定平衡的位置上，當受到外力施以超過臨界點的力量干擾時，會由一穩定位置經過不穩定位置移動到另一個穩定位置上，該機制可在這兩種穩定的平衡狀態上相互切換。此種現象可藉由圖 2.27 來做解釋 [30-32]。

小球在崎嶇的山路上擁有四種可能的狀態，當球在狀態一、二的位置時為穩定平衡狀態，此時受到外界力量的干擾小球也只會產生些許的振盪，並繼續停留在狀態一、二的位置上，當球在狀態三的位置時為不穩定平衡狀態，此時只需一點點的干擾變能驅使小球往狀態一或二的位置做大位移量的移動。

擁有雙穩態機制的結構不需透過彈簧或其它的驅動裝置，便可將應變能儲存於柔性關節中作為驅動的能量。

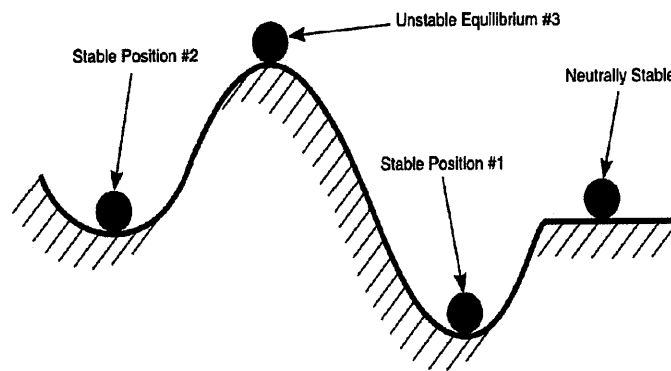


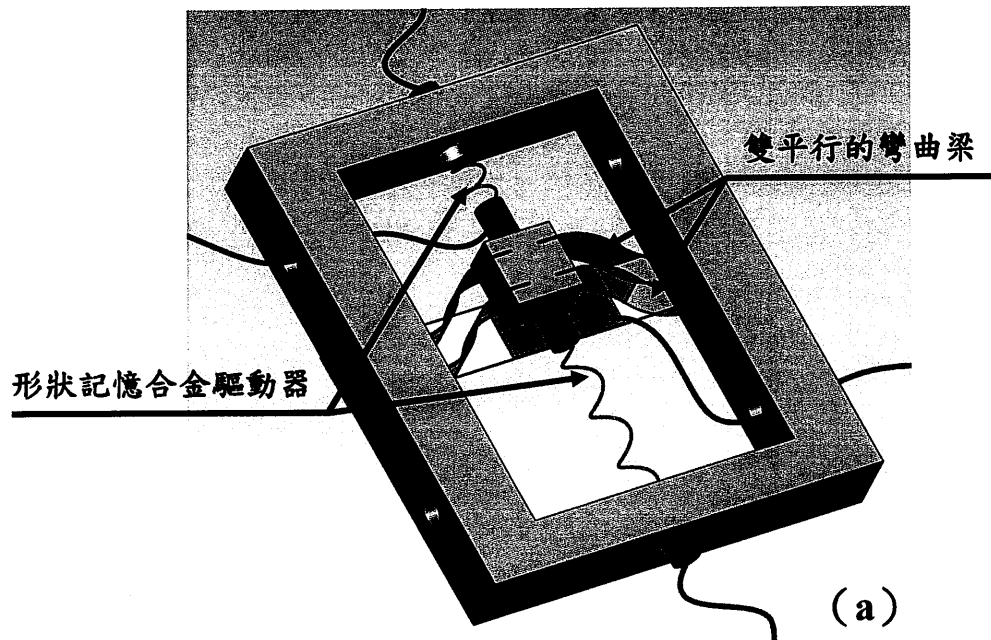
圖2.27 雙穩態機制的平衡示意圖

## 第三章 電熱式電斷路器之設計與製造

### 3.1 構想設計

有別於以往形狀記憶合金驅動的執行器，本研究使用形狀記憶合金與雙穩態結構互相結合，製作出電熱式電斷路器。該斷路器因為雙穩態效應使結構擁有高精確重複性的定位特性，可免除以往為了使形狀記憶合金驅動器能夠精準定位的複雜性控制分析，此種組合充分發揮雙方的優點。

該電斷路器主體為雙穩態結構，使用雙平行的彎曲梁做為外部結構與中央結構的连接，一來可使中央結構保持於中心線上、二來可防止中央結構面扭曲，在中央結構上下兩側各擁有一條形狀記憶合金做為致動裝置，用來驅動雙穩態結構使其可於兩個穩定位置上進行開路與斷路動作，並於中央結構背面裝設移動式接觸開關，該開關與斷電端的形狀記憶合金作串連形成一迴路，復電端的形狀記憶合金則自成一迴路作復電時使用，其構想如圖 3.1 所示。



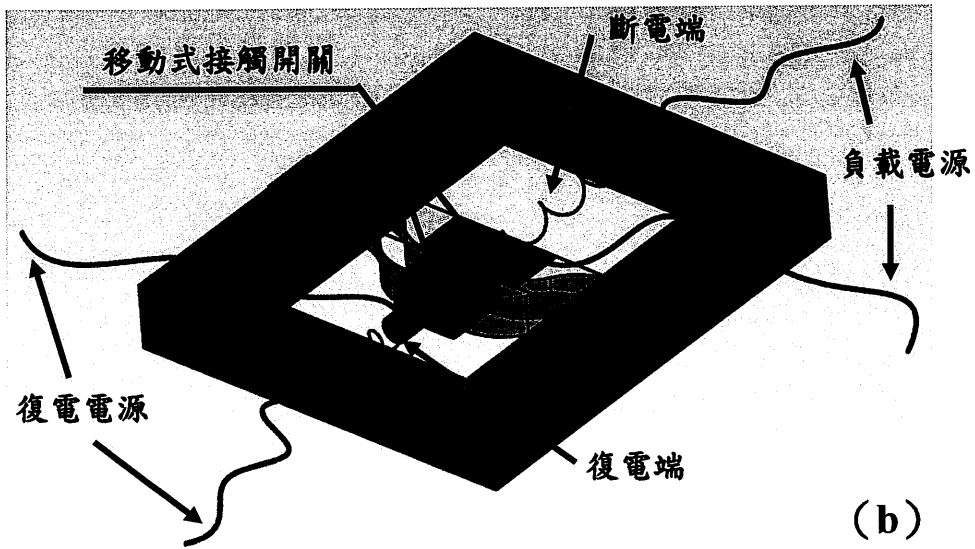


圖3.1 形狀記憶合金電熱式電斷路器構想圖 (a) 正面 (b) 背面

如圖 3.2 所示，作動原理是利用形狀記憶合金會隨著溫度改變產生驅動力的特性，當負載迴路出現故障，流經形狀記憶合金的負載電流逐漸上升時會造成合金溫度上升產生驅動力，驅動力將伴隨著電流的上升而升高，直到累積足夠的力量時便能驅動雙穩態結構進行切換，將迴路切斷達到保護負載元件的目的。排除故障後可起動復電開關，藉由輸入短暫的高壓電流驅使雙穩態結構切換回復通路。

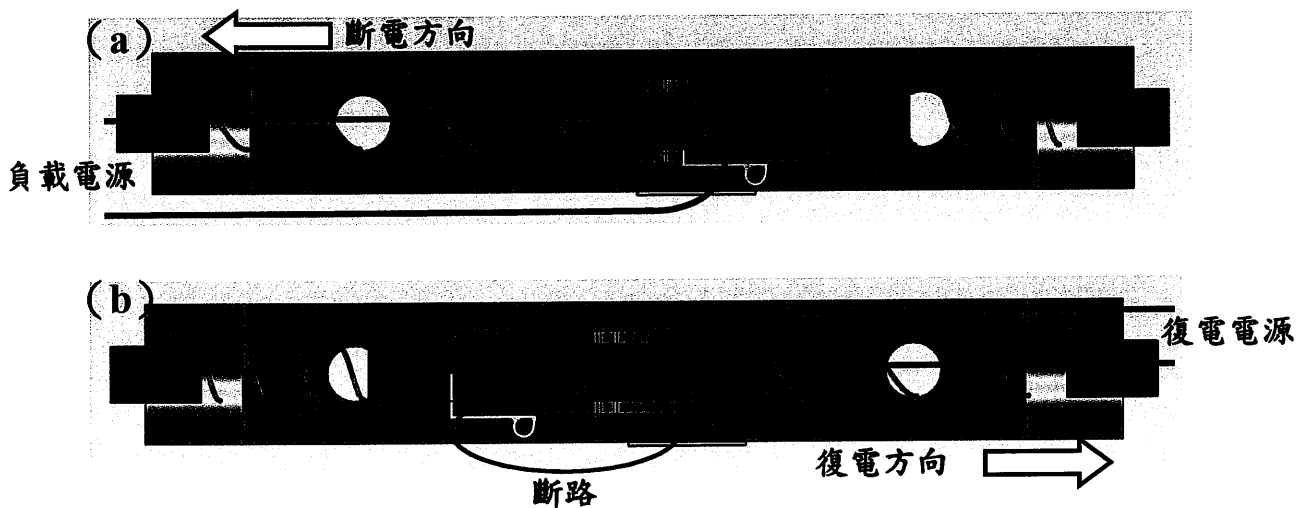


圖3.2 電熱式電斷路器作動原理圖 (a) 通路 (b) 斷路



### 3.2 形狀記憶合金致動器之設計分析與製造

本節主要是探討形狀記憶合金在不同的熱處理方式下對其性能有何影響，本研究所使用的形狀記憶合金為  $Ti_{50\%}-Ni_{50\%}$  的線狀記憶合金(SMA)，其線徑為 0.25mm。首先對形狀記憶合金做不同溫度的熱處理，分別為 400°C、500°C、600°C 其熱處理時間為 15 分鐘，接著將治具拿出再對每種熱處理溫度下的記憶合金分別使用爐冷、空冷、水冷三種方式冷卻，針對這些形狀記憶合金進行致動時間、致動溫度、致動力、拉伸阻力、散熱速度、疲勞測試以及相同加溫條件下表面上升的溫度做量測，並針對實驗數據進行比較，最後選擇適當性能的形狀記憶合金作為致動器使用。

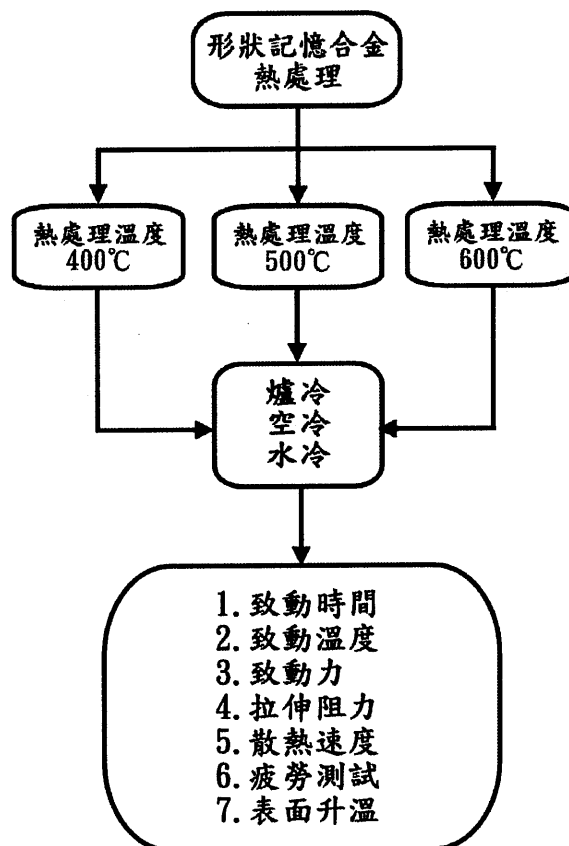


圖3.3 實驗流程圖

### 3.2.1 實驗材料與設備介紹

本實驗將對螺旋型的形狀記憶合金進行量測，使用的材料為  $\text{Ti}_{50\%}\text{-Ni}_{50\%}$ 、直徑 0.25mm 的形狀記憶合金，初始形狀為直線，治具為直徑 4mm、螺距 0.7mm 的螺栓，如圖 3.4 所示。

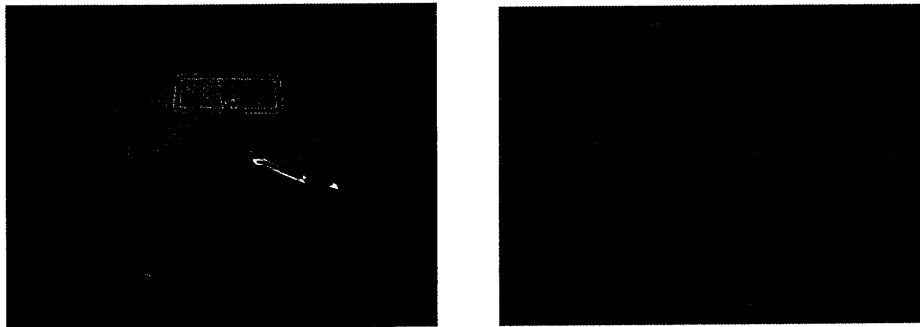


圖3.4  $\text{Ti}_{50\%}\text{-Ni}_{50\%}$ 形狀記憶合金與螺栓治具

高溫加熱爐：主要用於形狀記憶合金的形狀熱處理，如圖 3.5 所示。

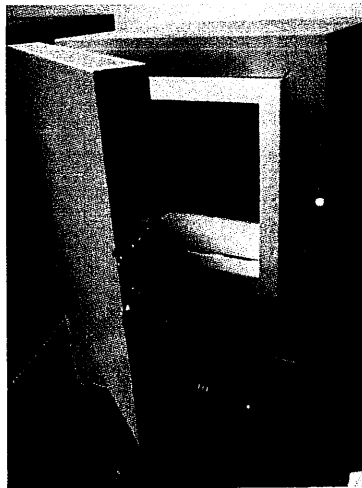


圖3.5 高溫加熱爐

**微拉力計：**本實驗使用 FGP-0.5 微拉力計，可透過前端的感測器執行推力或拉力雙向測試，可依量測需要更換前端接頭，擁有 1000 次/秒的瞬間數值讀取速度，提升精確度。可任意切換 kg(g)、N、lb(oz)三種單位，搭配廠商軟體可在 EXCEL 環境下進行數值下載、時間力量曲線圖的繪製及統計分析，如圖 3.6 所示。

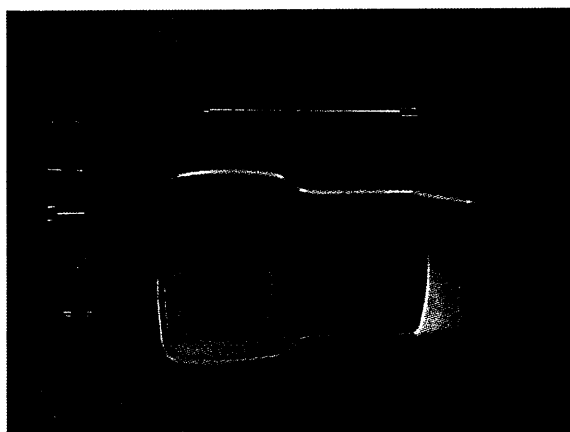


圖3.6 微拉力計

**溫度錶：**本實驗使用 TES-1313 溫度錶，可用於量測物體表面溫度擁有攝氏°C、華氏°F、絕對溫度切換功能，解析度： $0.1^{\circ}\text{C}/^{\circ}\text{F}/\text{K} < 200$ 、 $1.0^{\circ}\text{C}/^{\circ}\text{F}/\text{K} \geq 200$ ，測溫棒有 TP-K01、TP-K02、TP-K03 三種其量測功能各不相同，如圖 3.7 所示。



圖3.7 TES-1313溫度錶

### 3.2.2 形狀記憶合金製造與量測

#### 高溫熱處理

高溫加熱爐常被用於金屬的退火成型，當然形狀記憶合金也不例外。形狀記憶合金必須透過外在環境加熱藉由高溫促使合金內部的晶格重新組合，達到形狀記憶的目的。由於一開始記憶合金的形狀為直線，必須先將形狀記憶合金纏繞在螺旋治具上，藉由治具的形狀將合金固定，接著將高溫加熱爐的溫度分別上升至 $400^{\circ}\text{C}$ 、 $500^{\circ}\text{C}$ 、 $600^{\circ}\text{C}$ 之後再把纏有形狀記憶合金的治具放入爐內，其熱處理時間為15分鐘，接著將治具拿出再對每種熱處理溫度下的記憶合金分別使用爐冷、空冷、水冷三種方式冷卻便大功告成，如圖3.8、3.9所示。

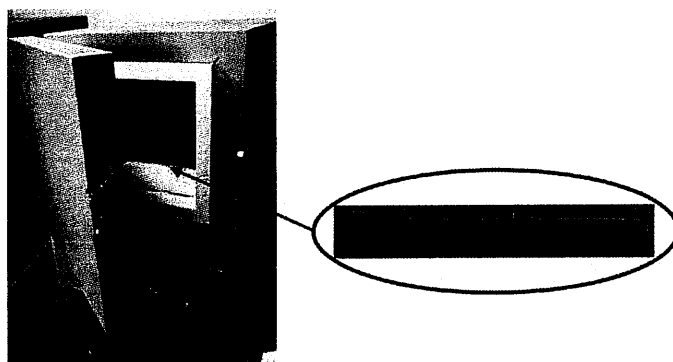


圖3.8 高溫熱處理



圖3.9 螺旋型形狀記憶合金(a)麻田散體相(b)沃斯田體相

#### 實驗樣品性能量測

本節將針對透過不同熱處理方式的形狀記憶合金進行量測，首先將熱處理後的形狀記憶合金樣品進行初步觀察記錄，如表3.1所示。可知當形狀記憶合金經

過 400°C 熱處理後合金表面為金色、富彈性較難拉伸，其中水冷的樣品螺旋與螺旋的間距最小。而 500°C 熱處理後的樣品合金表面呈現藍色、略有彈性容易拉伸，其螺距 0.7mm 與治具相同。600°C 熱處理後的樣品合金表面呈現灰色、無彈性，其螺距 1mm 與治具相差甚多，如圖 3.10、3.11 所示。

表 3.1 形狀記憶合金樣品形態

	爐冷	空冷	水冷
400°C	顏色：金色 螺距：0.8mm 拉伸性：彈性佳 難拉伸	顏色：金色 螺距：0.7mm 拉伸性：彈性佳 難拉伸	顏色：金色 螺距：0mm 拉伸性：彈性佳 難拉伸
500°C	顏色：藍色 螺距：0.7mm 拉伸性：略有彈性 易拉伸	顏色：藍色 螺距：0.75mm 拉伸性：略有彈性 易拉伸	顏色：藍色 螺距：0.75mm 拉伸性：略有彈性 易拉伸
600°C	顏色：灰色 螺距：1mm 拉伸性：無彈性 易拉伸	顏色：灰色 螺距：1.5mm 拉伸性：無彈性 易拉伸	顏色：灰色 螺距：1mm 拉伸性：無彈性 易拉伸

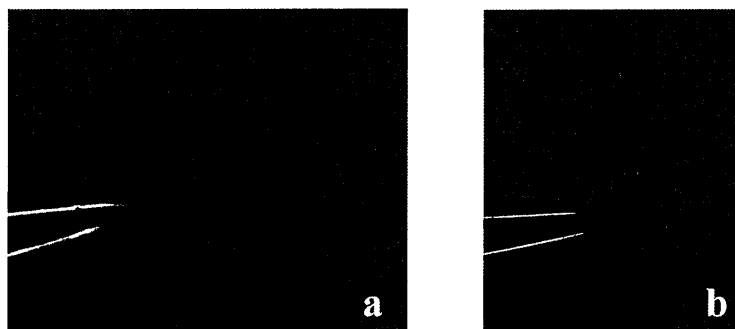


圖3.10 熱處理400°C (a) 爐冷 (b) 水冷

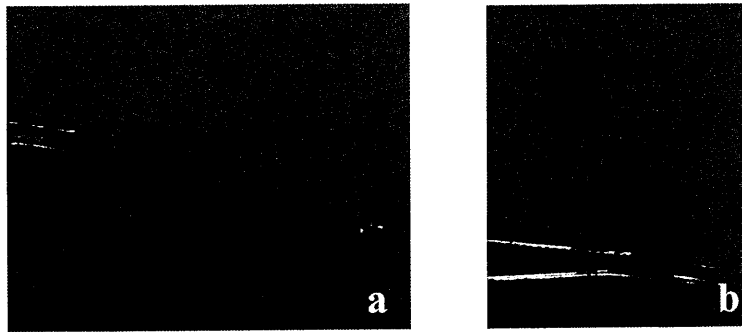


圖3.11 (a) 熱處理500°C (b) 熱處理600°C

### 致動時間

此實驗利用通電加熱的方式使形狀記憶合金溫度上升進行相變態，藉此測量合金的致動時間，樣品圈數為4圈將其拉長至25mm後通以1A電流開始量測，如圖3.12所示。

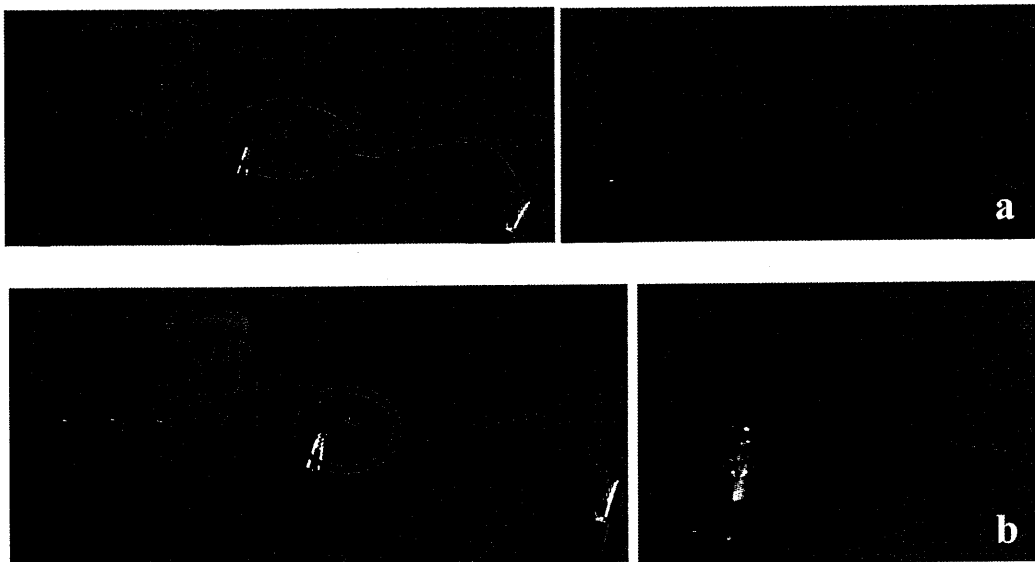


圖3.12 致動時間量測圖(a)未通電(b)通電

### 致動溫度

此實驗利用水的溫度來使形狀記憶合金溫度上升進行相變態，藉此測量合金的致動溫度，藉由數位溫度錶判讀水溫先將水溫升至  $60^{\circ}\text{C}$ ，接著使其慢慢冷卻並在  $50^{\circ}\text{C}$  開始將形狀記憶合金樣品依序丟入水中，觀察合金相變態的反應情況。每  $5^{\circ}\text{C}$  為一個測量點直到降至  $35^{\circ}\text{C}$  為止，如圖 3.13 所示。

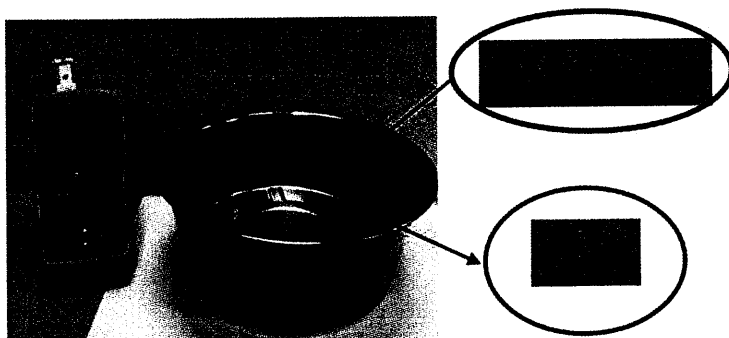


圖3.13 致動溫度量測圖

### 表面升溫

此實驗利用通電加熱的方式使形狀記憶合金溫度上升，再由數位溫度錶測量合金表面的上升溫度，通以  $1\text{A}$  電流持續  $5$  秒後記錄合金溫度，樣品圈數為  $4$  圈，如圖 3.14 所示。

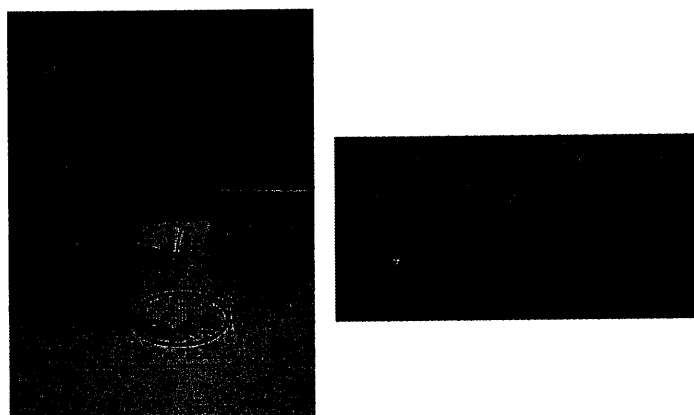


圖3.14 表面升溫量測圖

### 散熱速度

此實驗利用通電加熱的方式使形狀記憶合金溫度上升至  $100^{\circ}\text{C}$ ，再由數位溫度錶測量當合金表面溫度降至  $30^{\circ}\text{C}$  時所需的時間，通以 1A 電流、樣品圈數為 4 圈，如圖 3.15 所示。

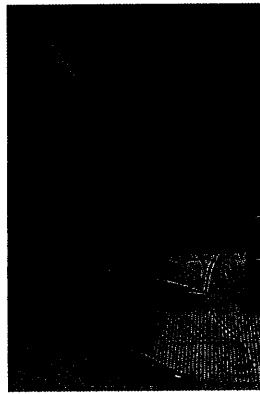


圖3.15 散熱速度量測圖

### 拉伸阻力

此實驗利用微拉力計量測當形狀記憶合金未通電(麻田散體相)的情況下，若要將其拉長時所需的力，每拉伸 2mm 記錄一次數據共拉伸 20mm，如圖 3.16 所示。

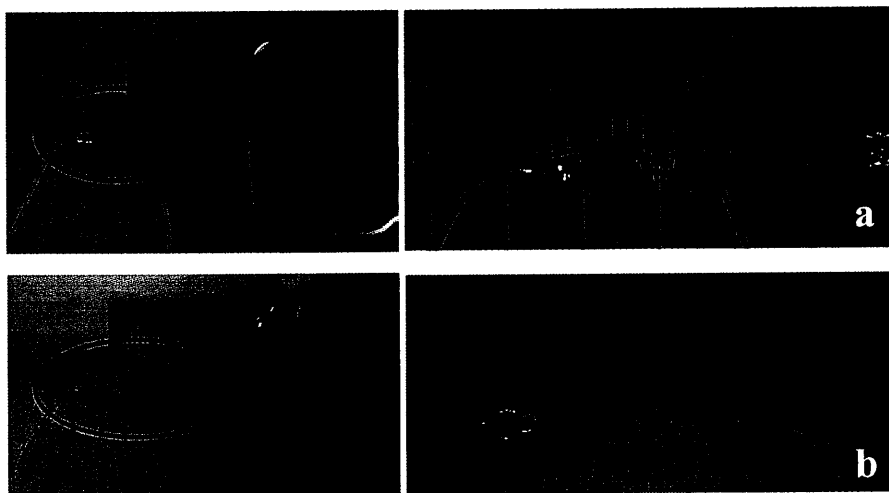


圖3.16 拉伸阻力量測圖(a)未拉伸(b)逐步拉伸



### 致動力

此實驗將形狀記憶合金拉長後通以電流，使其溫度上升進行相變態(沃斯田體相)，利用微拉力計量測記憶合金於各種長度下所能提供的致動力，每拉伸 2mm 記錄一次數據共拉伸 20mm，供應電流 1A 持續 5 秒，如圖 3.17 所示。

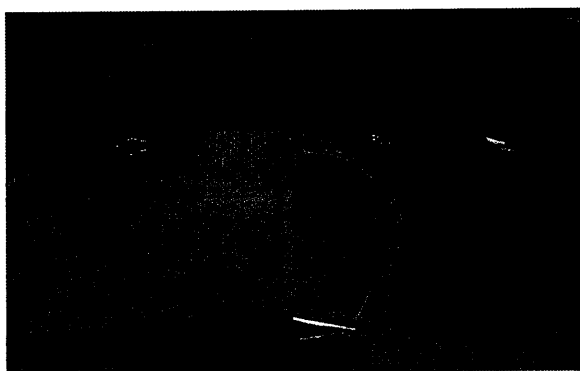


圖3.17 致動力量測圖

### 疲勞測試

此實驗將形狀記憶合金懸掛於梁上並掛重 50g 的砝碼，通以 1A 的電流使合金溫度上升進行相變態(沃斯田體相)，將砝碼上提之後進行冷卻使合金再度被拉長，此流程循環 10 次後將記憶合金拆下，通電加熱後量測其螺距是否有因作動疲勞而改變，如圖 3.18 所示。

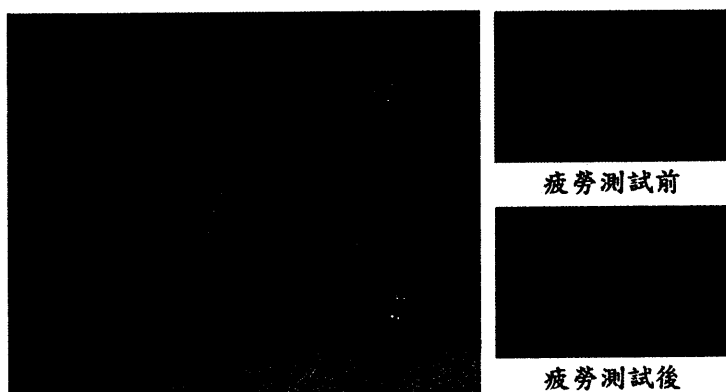


圖3.18 疲勞測試圖

### 3.2.3 量測結果與討論

#### 致動時間

如圖 3.19 所示，以相同熱處理溫度來看，水冷樣品的合金致動速度最快、爐冷次之、空冷最慢，熱處理 600°C 的樣品除外，由於形狀記憶合金經過 600°C 的高溫處理再加上使用爐冷方式冷卻，使得熱處理時間拉長以致於記憶合金的金屬特性改變，造成致動速度變慢。由以上可知形狀記憶合金在高溫熱處理過後使用水冷方式冷卻，其致動時間最短。

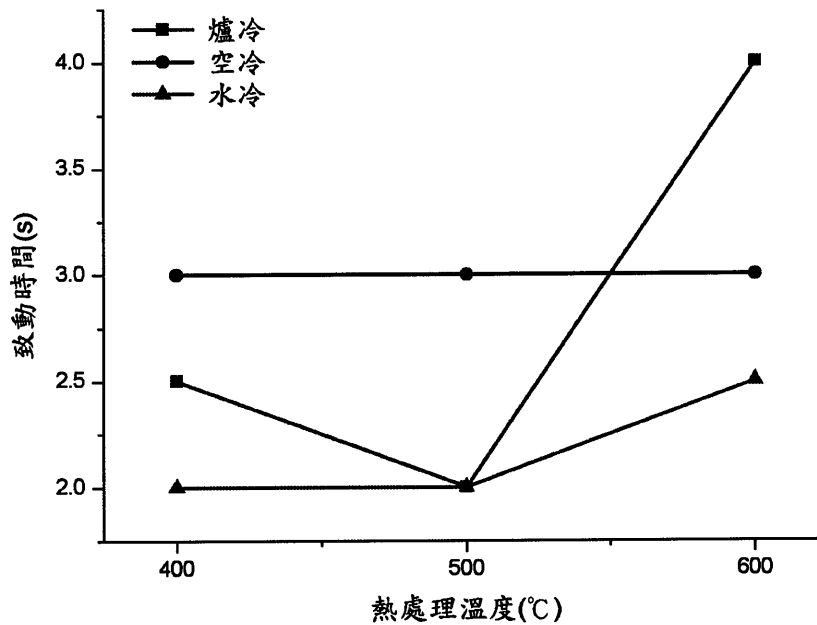


圖3.19 致動時間比較圖

## 致動溫度

本實驗將測試經過不同熱處理方式的形狀記憶合金，起使相變態溫度為何。由於先前已經抓出大概的致動溫度範圍，所以從 50°C 開始測試依序的測量點為 47.5°C、45°C、42.5°C、40°C、38°C、36°C，結果顯示熱處理 600°C 和 500°C 的記憶合金其最低致動溫度為 42.5°C，熱處理 400°C 的記憶合金以水冷樣品最佳，其最低致動溫度為 36°C，如表 3.2。

表 3.2 相變態溫度表

	50°C	47.5°C	45°C	42.5°C	40°C	38°C	36°C
熱處理400°C-爐冷	●	●	●	◎○	○	※	※
熱處理400°C-空冷	●	●	●	◎	◎○	○	※
熱處理400°C-水冷	●	●	●	●	◎○ 螺距1mm	◎○ 螺距2mm	○
熱處理500°C-爐冷	●	◎	○	※	※	※	※
熱處理500°C-空冷	●	●	●	○	※	※	※
熱處理500°C-水冷	●	●	●	○	※	※	※
熱處理600°C-爐冷	●	○	※	※	※	※	※
熱處理600°C-空冷	●	●	●	○	※	※	※
熱處理600°C-水冷	●	●	○	※	※	※	※

- 致動速度快(完全相變態)，◎致動速度慢(完全相變態)，◎○致動速度慢(相變態不完全)  
○達到相變態反應溫度(相變態不完全)，※無法致動

## 表面升溫

如圖 3.20 所示，無論哪種冷卻方式皆以熱處理 400°C 的記憶合金溫度最高、500°C 次之、600°C 的最低。若以相同熱處理溫度來看，水冷樣品的合金表面溫度最高、爐冷次之、空冷最低，而熱處理 600°C 的樣品除外。由於形狀記憶合金經過 600°C 的高溫處理再加上使用爐冷方式冷卻，使得熱處理時間拉長以致於記憶合金的金屬特性改變，造成升溫速度變慢表面溫度降低。由以上可知在有效溫度範圍內，形狀記憶合金熱處理溫度越低其表面溫度越高，其中以水冷方式冷卻的形狀記憶合金表面溫度最高。

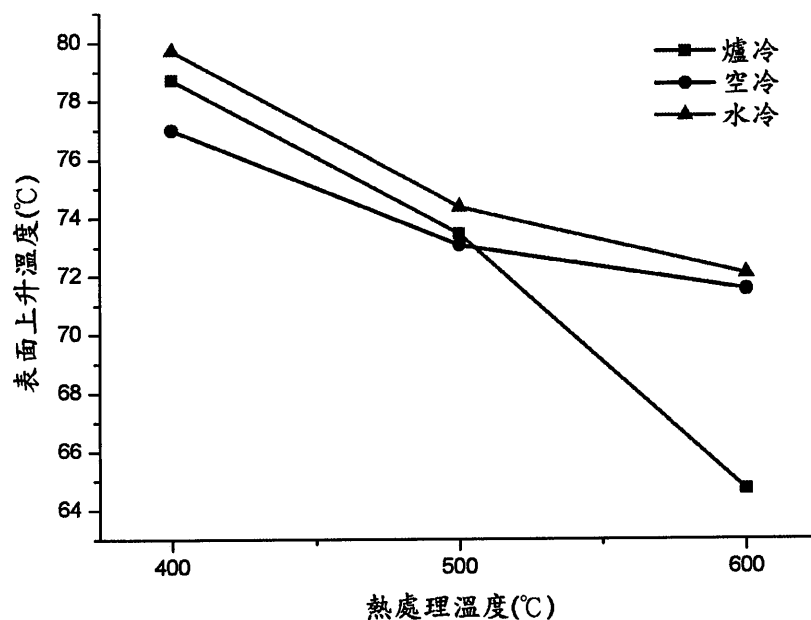


圖3.20 表面升溫比較圖

### 散熱速度

如圖 3.21 所示，無論哪種冷卻方式皆以熱處理 600°C 的記憶合金散熱速度最快、500°C 次之、400°C 的最慢。若以相同熱處理溫度來看，水冷樣品的合金散熱速度最快、爐冷次之、空冷最慢，熱處理 600°C 的樣品除外，由於形狀記憶合金經過 600°C 的高溫處理再加上使用爐冷方式冷卻，使得熱處理時間拉長以致記憶合金的金屬特性改變，造成散熱速度變慢。由以上可知在有效溫度範圍內，形狀記憶合金熱處理溫度越高其散熱速度越快，另外以水冷方式冷卻的形狀記憶合金散熱速度最快。

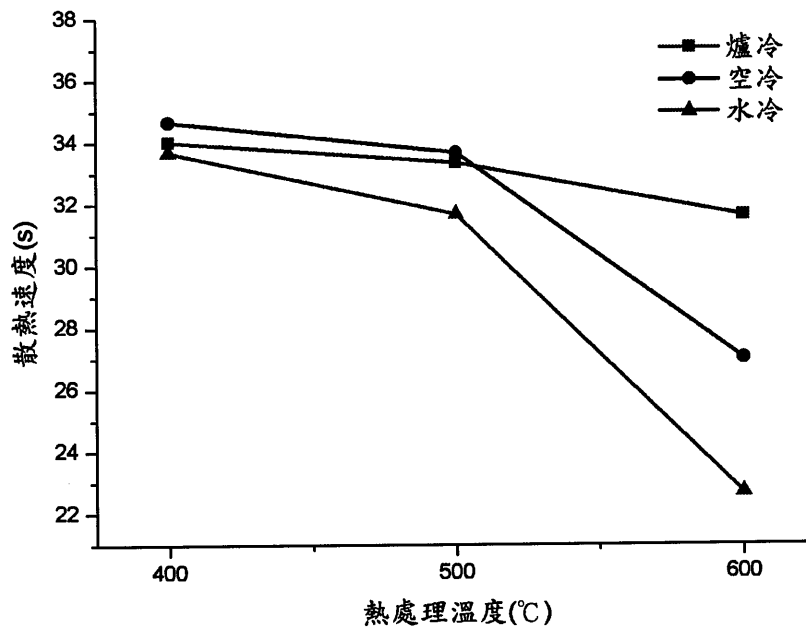


圖3.21 散熱速度比較圖

## 拉伸阻力

本節分別以熱處理溫度和冷卻方式這兩種角度，來比較形狀記憶合金的拉伸阻力。如圖 3.22、3.23、3.24 所示，此三張圖分別以相同的熱處理溫度來觀察在冷卻方式不同的情況下，形狀記憶合金的拉伸阻力有何差異。

- 在熱處理 400°C 時以空冷記憶合金的拉伸阻力最高、水冷次之、爐冷最低。
- 在熱處理 500°C 時也是以空冷記憶合金的拉伸阻力最高、水冷次之、爐冷最低。
- 在熱處理 600°C 時則是以水冷記憶合金的拉伸阻力最高、空冷次之、爐冷最低。

如圖 3.25、3.26、3.27 所示，此三張圖分別以相同的冷卻方式來觀察在熱處理溫度不同的情況下，形狀記憶合金的拉伸阻力有何差異。

- 不論使用何種方式冷卻，皆是熱處理 400°C 的記憶合金拉伸阻力最高、500°C 次之、600°C 最低。

由以上可知在有效溫度範圍內，形狀記憶合金熱處理的溫度越低其拉伸阻力越高，爐冷後的形狀記憶合金拉伸阻力最低。熱處理 500°C 的記憶合金無論哪種冷卻方式其阻力皆相當，合金性能相當穩定，可初步推斷 500°C 為 Ti<sub>50%</sub>-Ni<sub>50%</sub> 記憶合金最適合的熱處理溫度。熱處理 400°C-水冷的記憶合金，其阻力可於短距離內大幅提升。

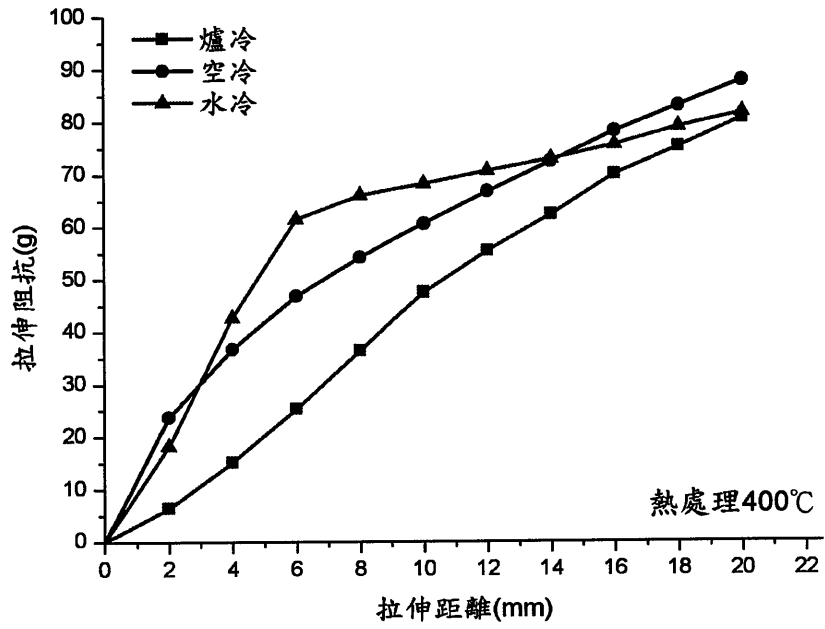


圖3.22 拉伸阻力比較圖-熱處理400°C

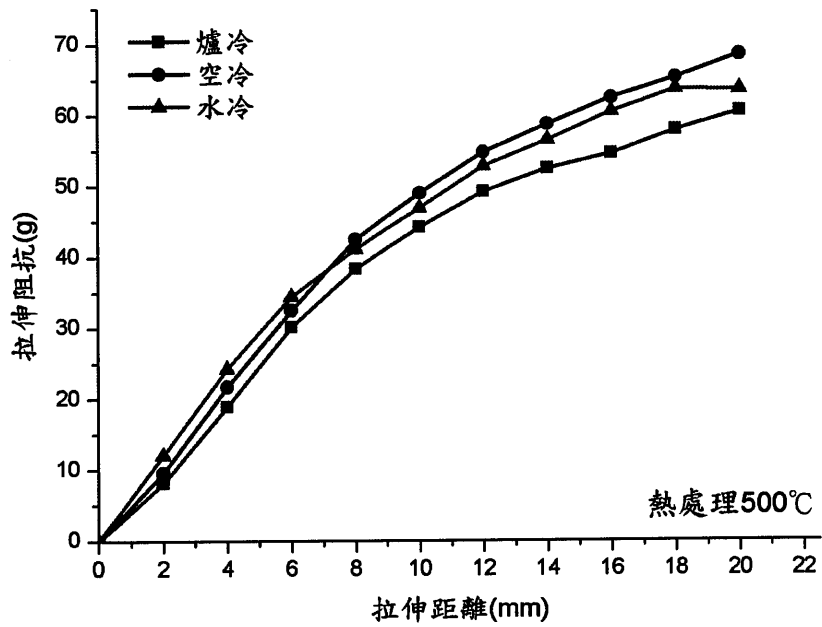


圖3.23 拉伸阻力比較圖-熱處理500°C

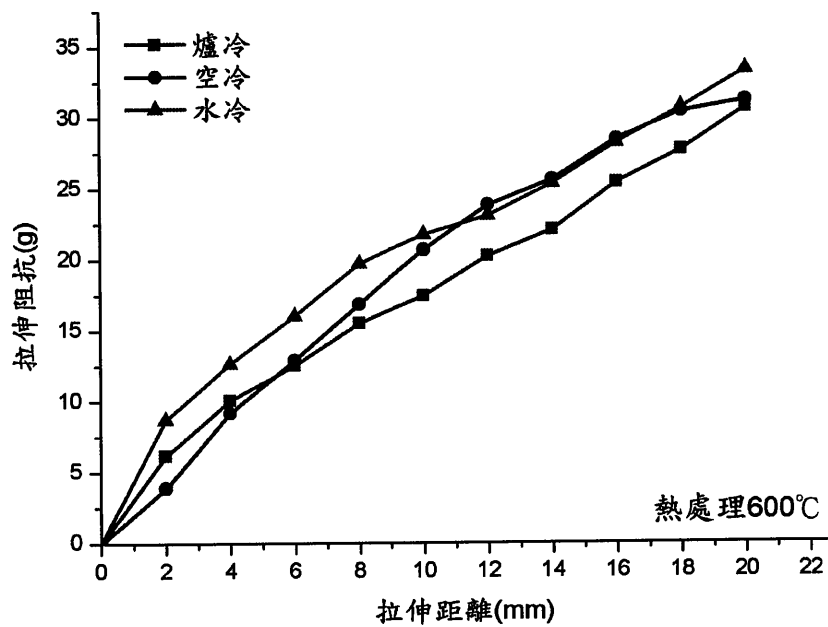


圖3.24 拉伸阻力比較圖-熱處理600°C

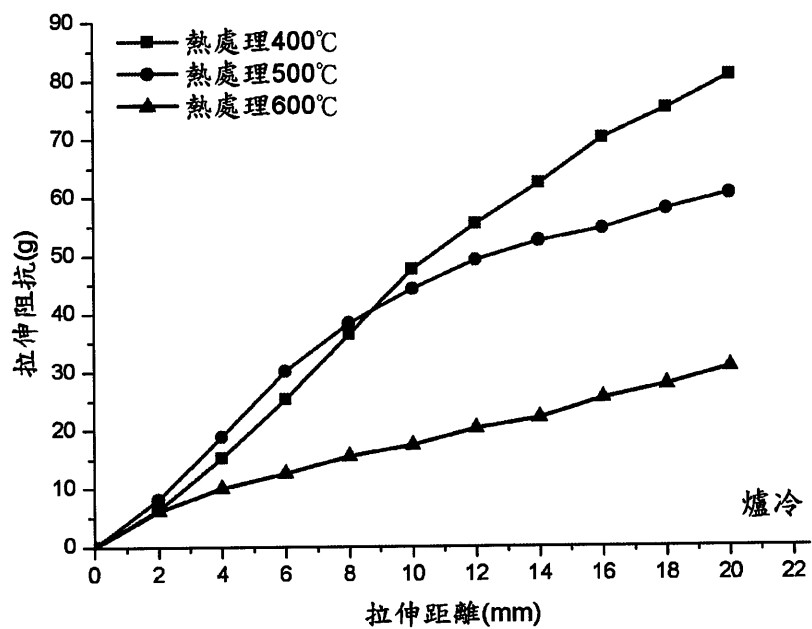


圖3.25 拉伸阻力比較圖-爐冷



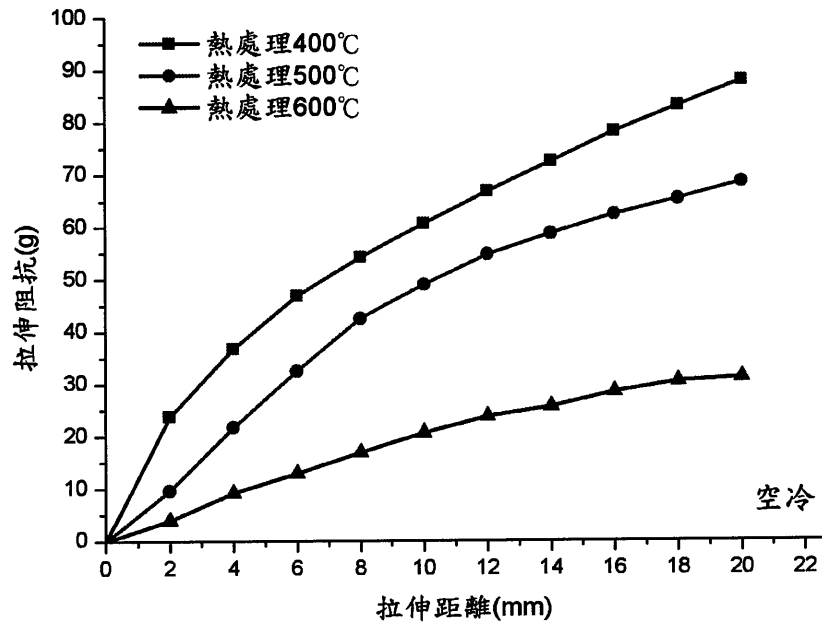


圖3.26 拉伸阻力比較圖-空冷

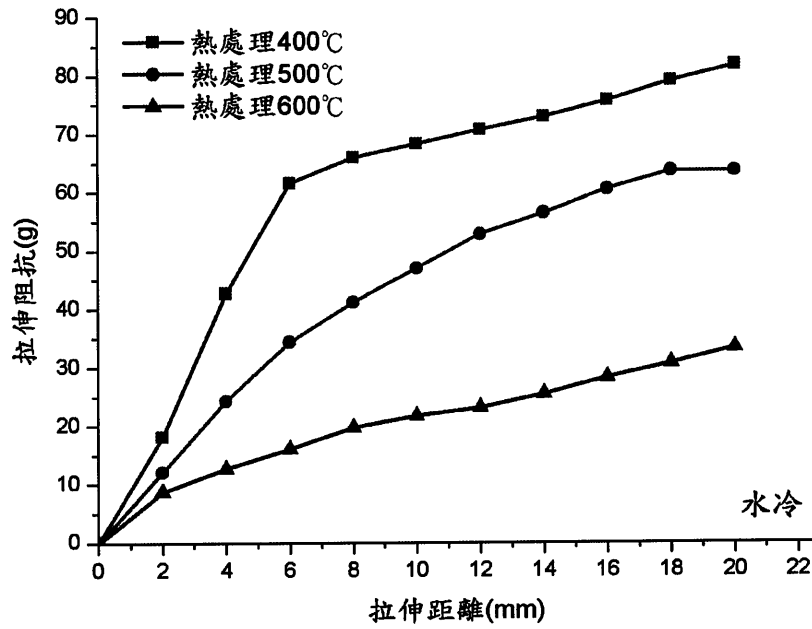


圖3.27 拉伸阻力比較圖-水冷

## 致動力

本節分別以熱處理溫度和冷卻方式這兩種角度來觀察，形狀記憶合金的致動性能。如圖 3.28、3.29、3.30 所示，此三張圖分別以相同的熱處理溫度來觀察，在冷卻方式不同的情況下形狀記憶合金的致動力有何差異。

- 在熱處理 400°C 時以水冷記憶合金的致動力最高、空冷次之、爐冷最低。
- 在熱處理 500°C 時以水冷記憶合金的致動力最高、空冷及爐冷則致動力相當。
- 在熱處理 600°C 時則是以爐冷記憶合金的致動力最高、水冷次之、空冷最低。

如圖 3.31、3.32、3.33 所示，此三張圖分別以相同的冷卻方式來觀察，在熱處理溫度不同的情況下形狀記憶合金的致動力有何差異。

- 在爐冷時以熱處理 500°C 的記憶合金致動力最高、400°C 次之、600°C 最低。
- 在空冷時熱處理 400°C 和 500°C 的記憶合金致動力相當、600°C 最低。
- 在水冷時熱處理 400°C 和 500°C 的記憶合金致動力相當、600°C 最低。

由以上可知形狀記憶合金水冷後的致動力會比空冷來的好。熱處理 600°C 的記憶合金不管使用哪種冷卻方式其致動力都相當低。熱處理 500°C 的記憶合金不管使用哪種冷卻方式其致動力都差異不大，合金性能穩定，可斷定 500°C 為 Ti<sub>50%</sub>-Ni<sub>50%</sub> 記憶合金最適合的熱處理溫度。熱處理 400°C 的記憶合金使用水冷卻後，其致動力可於短距離內大幅提升。

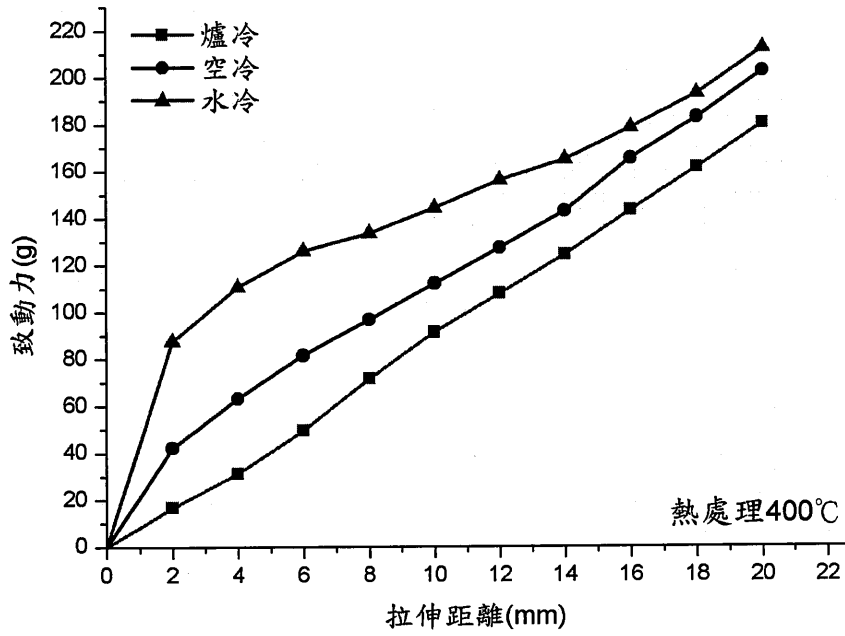


圖3.28 致動力比較圖-熱處理400°C

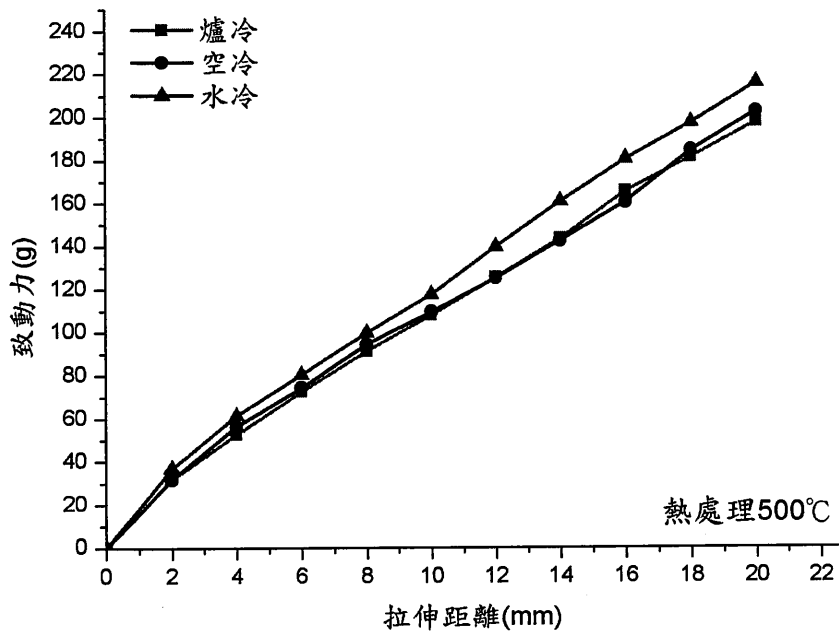


圖3.29 致動力比較圖-熱處理500°C

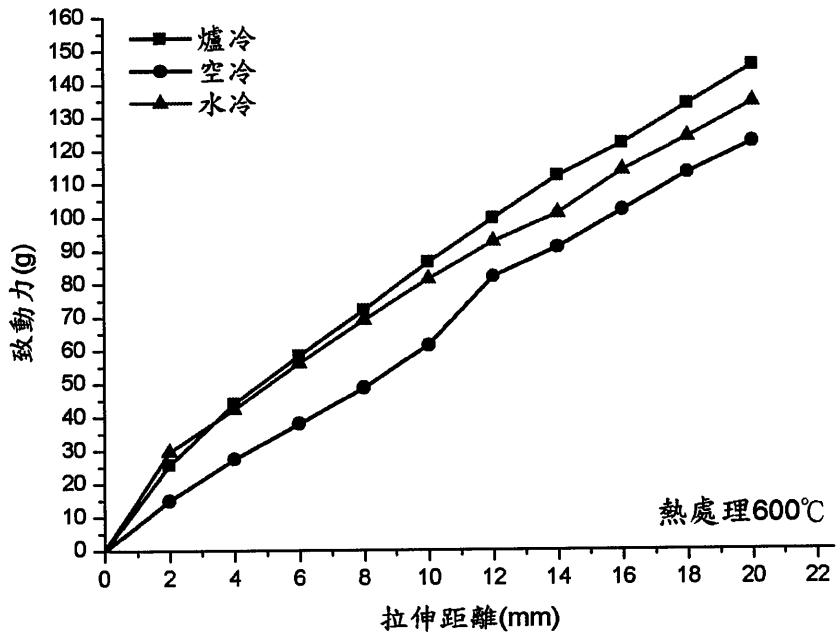


圖3.30 致動力比較圖-熱處理600°C

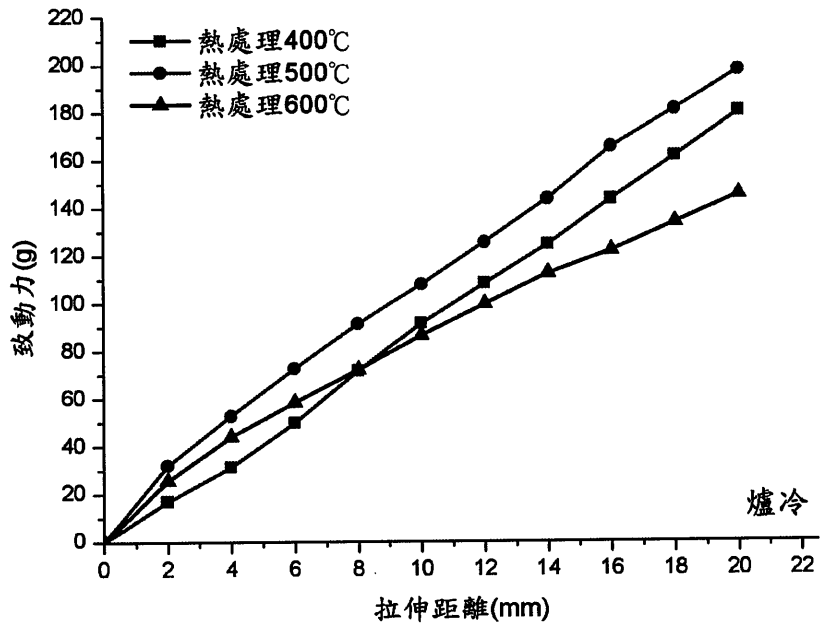


圖3.31 致動力比較圖-爐冷

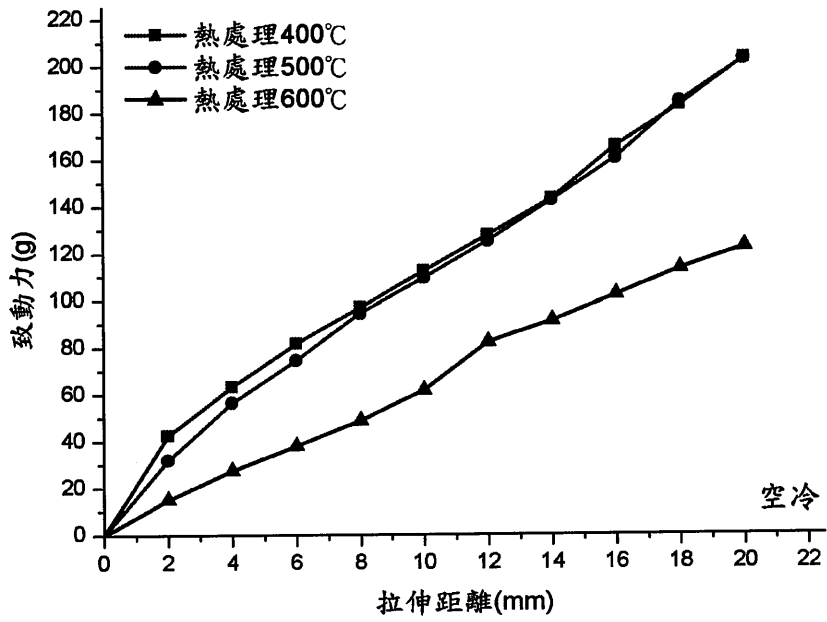


圖3.32 致動力比較圖-空冷

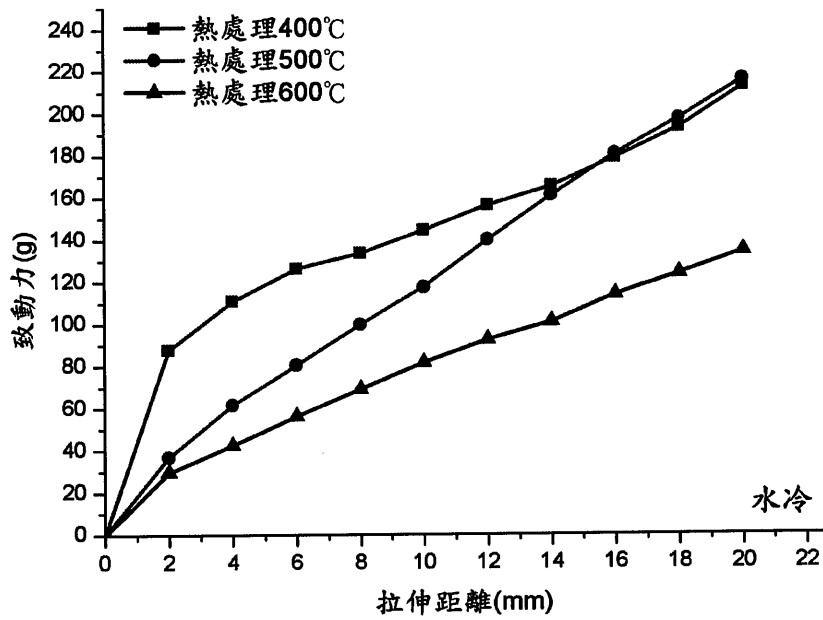


圖3.33 致動力比較圖-水冷

### 疲勞測試

如圖 3.34 所示，熱處理 400°C 和 500°C 的形狀記憶合金變形量低且記憶效果佳，其中以水冷的記憶合金效果更為優異，而 600°C 的合金記憶效果差、有效作動次數少、變形量大。由以上可知在有效溫度範圍內，形狀記憶合金熱處理溫度越低變形量越小，可承受的作動次數較多越能保持記憶效果。

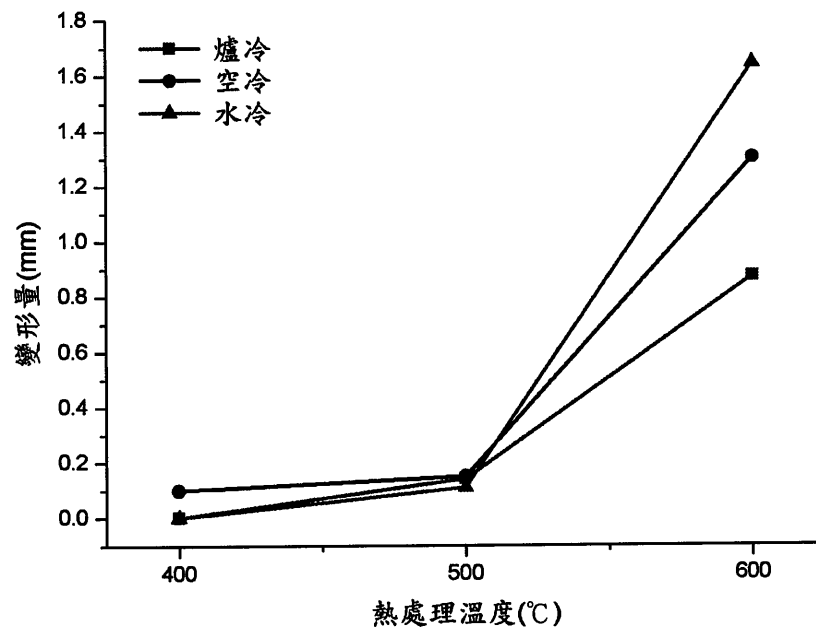


圖3.34 疲勞測試圖

### 3.2.4 致動器的選用及性能測試

透過實驗分析可知熱處理 500°C-爐冷的形狀記憶合金擁有變形量小、致動時間快、致動力高、拉伸阻力小等優點，故本斷路器選用熱處理 500°C-爐冷的形狀記憶合金作為致動器，長度為 3.5 圈兩側皆使用端接頭連接，如圖 3.35 所示。



圖3.35 500°C-爐冷的形狀記憶合金致動器

#### 表面升溫及致動力

如圖 3.36 所示，本實驗將量測記憶合金致動器安裝於斷路器上時，通以不同電流其致動力與溫度的上升趨勢。藉由此實驗就可以看出，在不同電流下斷路器完成作動所需的時間及溫度。先將記憶合金拉長至 28mm 固定之後，開始通以 0.6A、0.7A、0.8A、0.9A、1A、1.2A、1.4A、1.6A 的電流各持續 30 秒，溫度錶每 1.5 秒取一次數據、微拉力計每 0.1 秒存取一次數據。

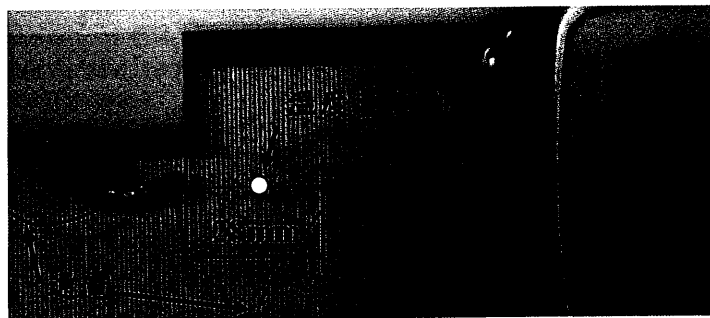


圖3.36 致動力與溫度量測圖

由圖 3.37、3.38 可知當通電達 15 秒之後溫度上升的趨勢將逐漸平緩，溫度達 46°C 時輸出力量約為 100g、65°C 時約為 200g、100°C 時約為 300g 為致動器最大輸出力量，之後就算溫度繼續提升致動力也不會再增加。若要記憶合金致動器輸出約 200g 的拉力時，需要輸入 0.9A 以上的電流。輸入電流 0.9A 時需要約 9 秒的時間而輸入 1.6A 只需 2 秒，可見輸入電流越大記憶合金升溫速度就越快，可以更快達到所需的驅動力，但溫度上升過高會造成形狀記憶合金燒毀失去其效應，所以依照需求選擇適當的輸入電流才可將形狀記憶合金的優點發揮出來。

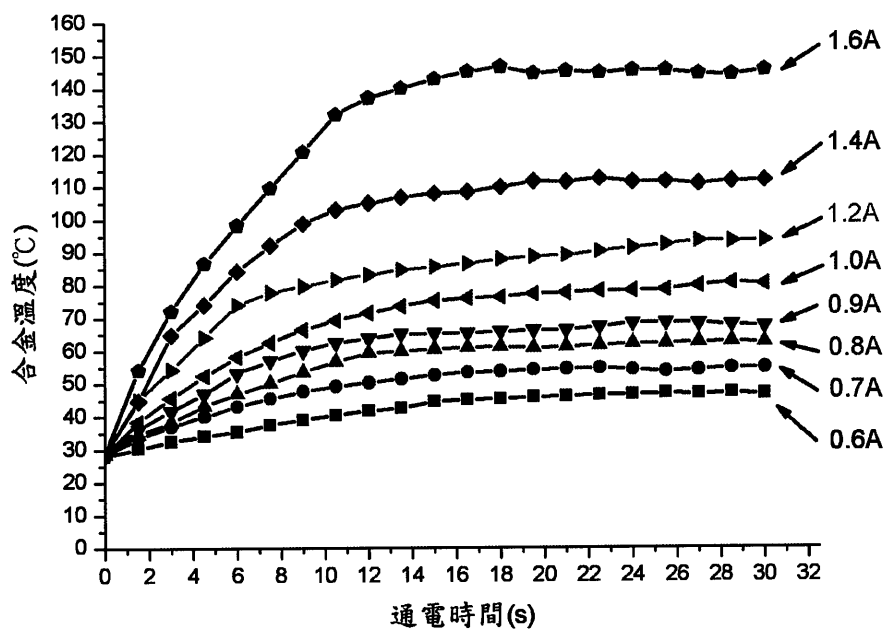


圖3.37 合金溫度上升趨勢圖



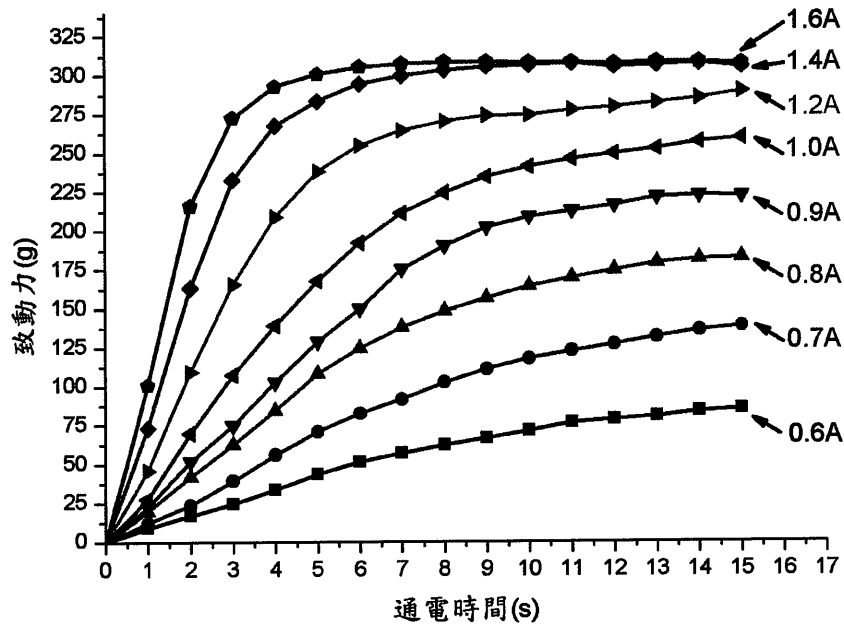


圖3.38 致動力上升趨勢圖

### 3.3 雙穩態結構之設計分析與製造

本節將設計數種不同曲率半徑和長度的雙平行彎曲梁，並進行力-位移的量測，最後選擇一組性能較佳的作為本實驗使用之斷路器結構。

#### 3.3.1 雙平行彎曲梁設計與量測

如圖 3.39 所示，本實驗設計一組治具用來固定雙平行彎曲梁，彎曲梁使用聚乙烯對苯二甲酸酯 (Polyethylene Terephthalate, PET) 製作，尺寸為  $B\text{mm} \times 6\text{mm} \times 0.25t$  相關尺寸如表 3.3 所示，A 尺寸為雙平行彎曲梁的彎曲曲率如圖 3.40 所示，B 尺寸為雙平行彎曲梁的原始長度，除了 A、B 尺寸為本實驗的變動參數，其他尺寸將設定為固定值。藉由 A 與 B 的 3 種變數互相搭配，可配出 9 種不同特性的彎曲梁，透過實驗可知改變參數下對彎曲梁特性的影響。

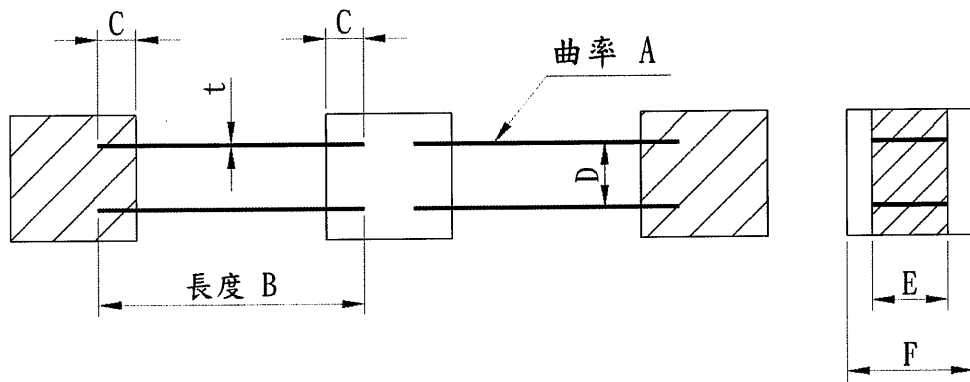


圖3.39 彎曲梁設計圖

表 3.3 彎曲梁尺寸

	A	B	C	D	E	F	t
尺寸 (mm)	I 型、II 型、III 型	22、23、24	3	5.15	6	10	0.25

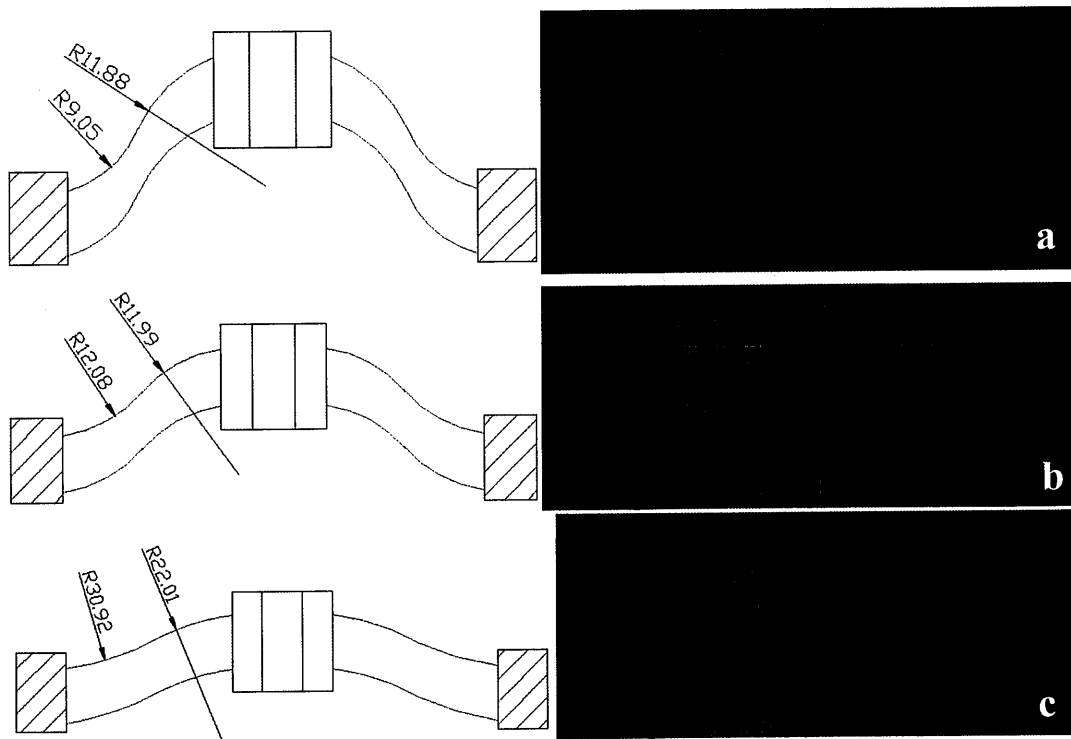


圖3.40 彎曲梁曲率半徑圖 (a) I 型 (b) II 型 (c) III 型

### 3.3.2 量測結果與討論

如圖 3.41 (a) 為雙穩態結構於第一穩態 (A) 切換到第二穩態 (C) 的垂直作動過程，其結構的彈力曲線趨勢如圖 3.42 所示。起初要使結構作動必須施以超過  $F_1$  的力量才可將結構從 A 點穿過 B 點移動到 C 點的位置，若要再將結構切換回來，則必須施以超過  $F_2$  的力量才可使結構由 C 點移回到 A 點的位置。但是若雙穩態結構在作動過程中發生偏擺現象 (如圖 3.41 (b)) 則會使臨界力量  $F_1$  與  $F_2$  降低。

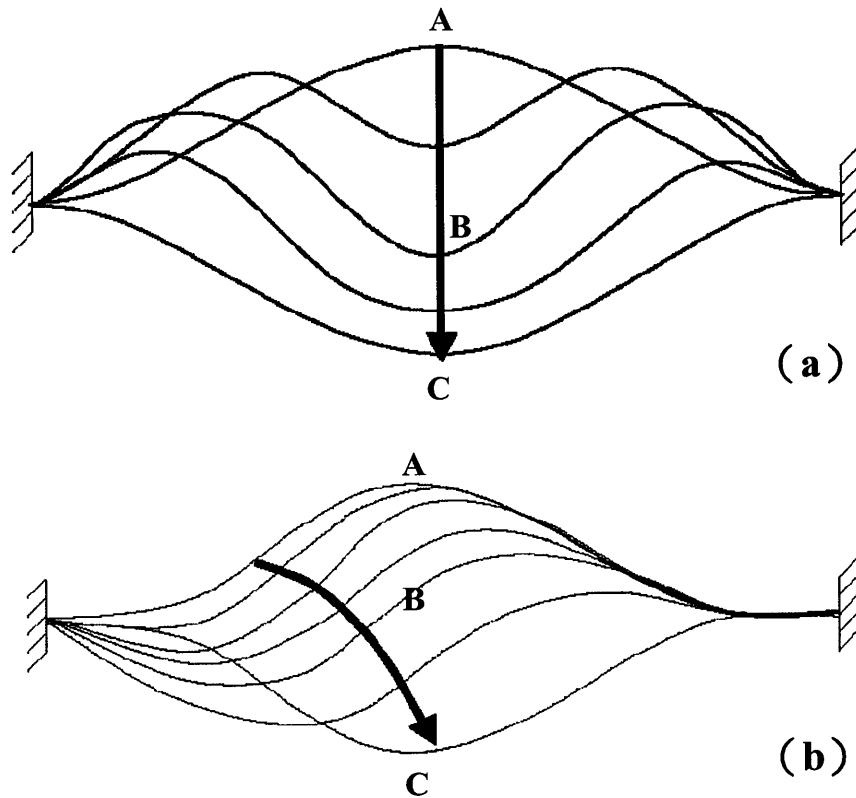


圖3.41 雙穩態結構作動示意圖 (a) 垂直 (b) 偏擺 [33]

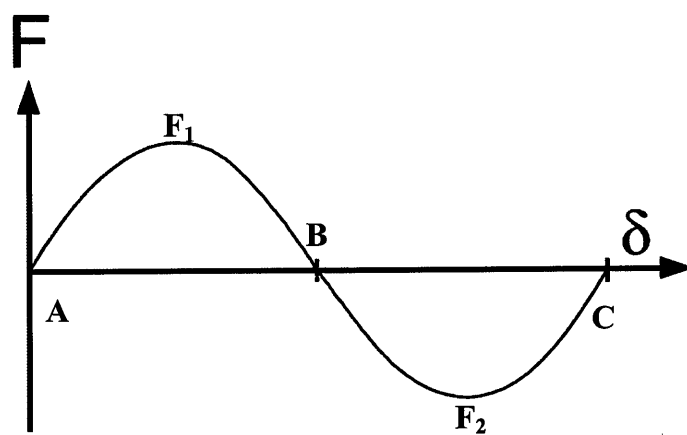


圖3.42 雙穩態結構力-位移圖[34]

本實驗將量測搭配各種不同彎曲梁的雙穩態結構，於不同位置時為了回到穩態位置雙平行彎曲梁所產生的彈力，如圖 3.43 所示。微拉力計感測端與中央結構互相連接固定，之後對微拉力計施加力量使其向左移動，藉此量測彎曲梁所產生的彈力，每移動 1mm 記錄一次數據。

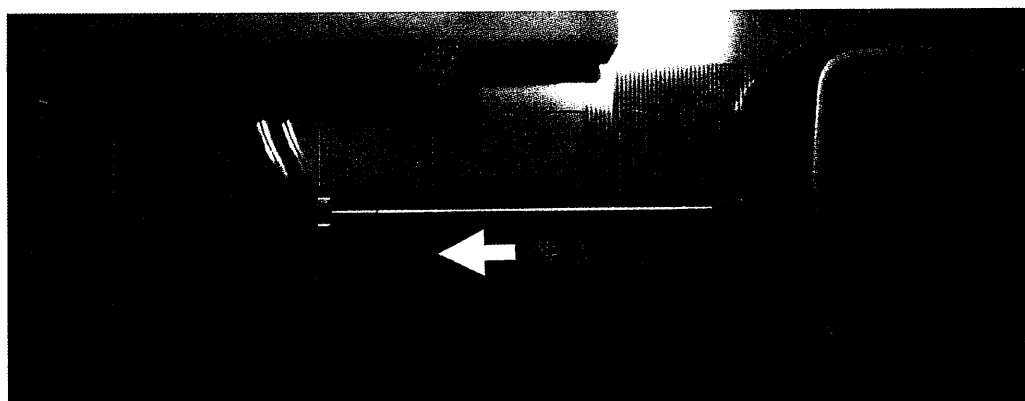


圖3.43 彎曲梁力-位移量測圖

如圖 3.44 - 3.49 可看出在固定彎曲梁長度，改變曲率半徑、固定曲率半徑，改變彎曲梁長度下，對整體雙穩態結構的彈力有何影響。當長度固定時其曲率半徑越小，結構位移行程越長其致動時所需的力也越高，曲率半徑越大時結構位移行程越短，其致動時所需的力也越低，如圖 3.44、3.45、3.46 所示。當曲率半徑固定時其長度越短，致動時所需的力也越高，長度越長致動時所需的力越低，而結構整體位移行程改變不大，如圖 3.47、3.48、3.49 所示。由以上可知改變曲率參數對於雙穩態的位移行程影響較大，長度參數的改變影響較小。

另外由實驗曲線中可以發現，當彎曲梁長度為 22mm 時只有 III 型曲率的雙穩態結構，由第一穩態切換到第二穩態時其最大推拉力相當，而 I 型及 II 型曲率的雙穩態結構，其第一穩態的致動推力皆高於切換到第二穩態時的拉力。當彎曲梁長度分別為 23mm、24mm 時，只有 I 型曲率的雙穩態結構會出現這種推力高於拉力的效應，II 型、III 型曲率的雙穩態結構由第一穩態切換到第二穩態時其最大推拉力皆相當。

造成此種最大推力高於拉力的情況，其原因為在彎曲梁長度不夠的情況下，隨著曲率半徑縮小會造成中央結構與兩旁結構的間距縮短，當結構進行移動到中段時，會因為彎曲梁的變形空間不夠造成彎曲梁出現折痕失去彈性，以致於切換到第二穩態時出現拉力降低的現象。由以上可知不同的彎曲梁長度必須搭配合適的曲率才能充份發揮出雙穩態結構的效果。

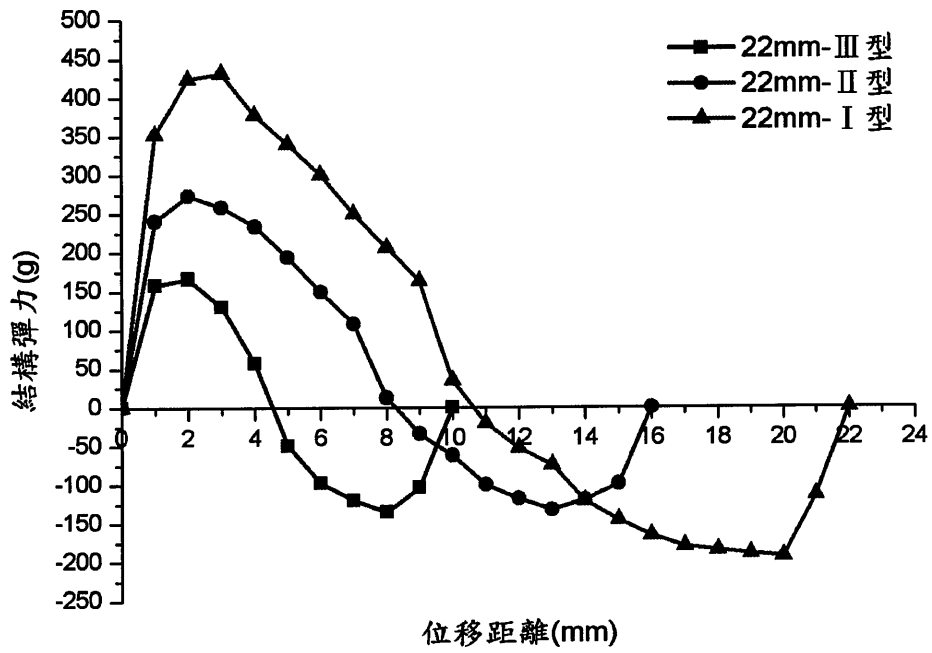


圖3.44 雙穩態結構力-位移圖 (長度22mm)

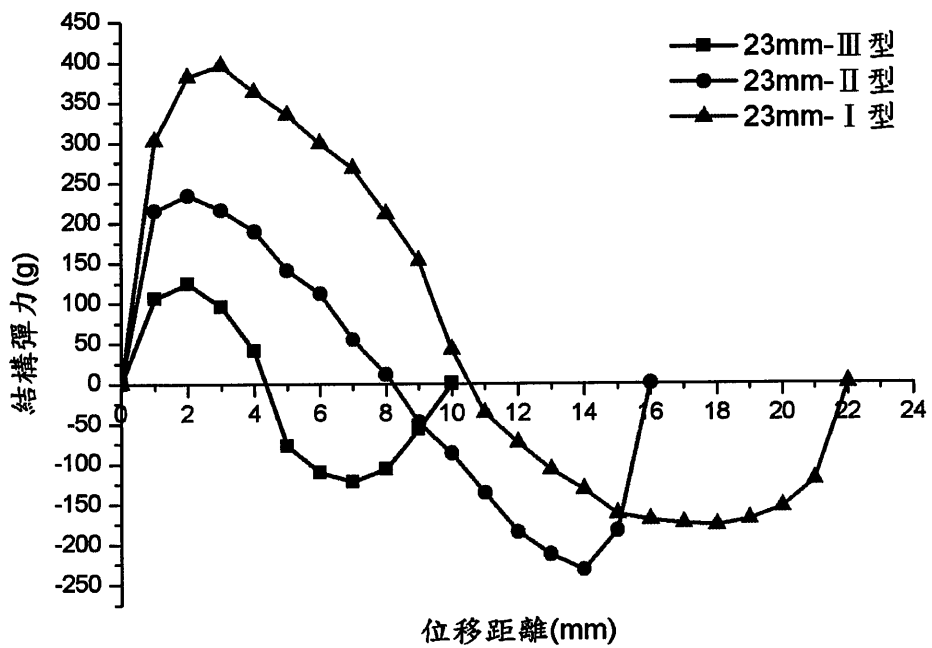


圖3.45 雙穩態結構力-位移圖 (長度23mm)

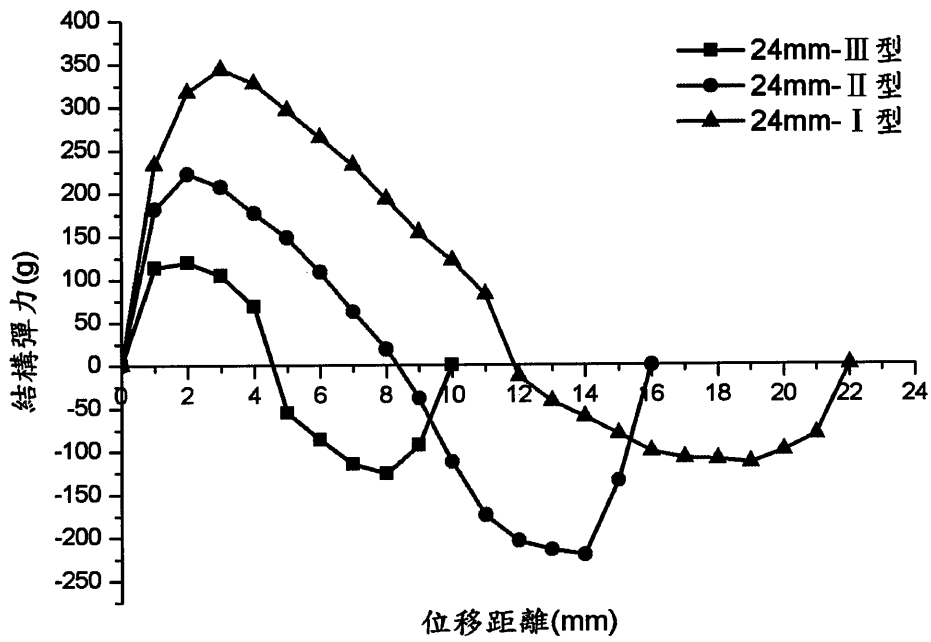


圖3.46 雙穩態結構力-位移圖 (長度24mm)

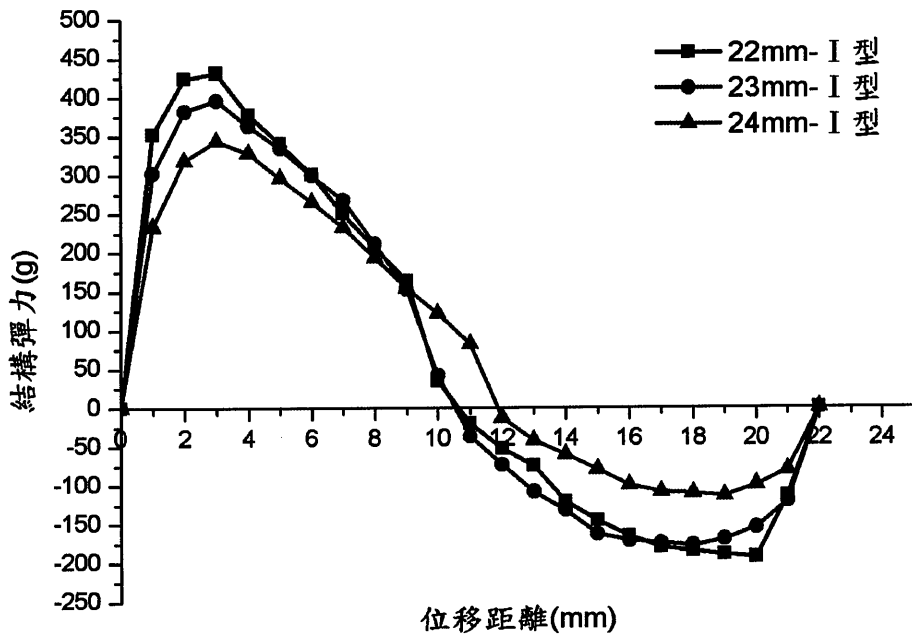


圖3.47 雙穩態結構力-位移圖 (曲率 I 型)

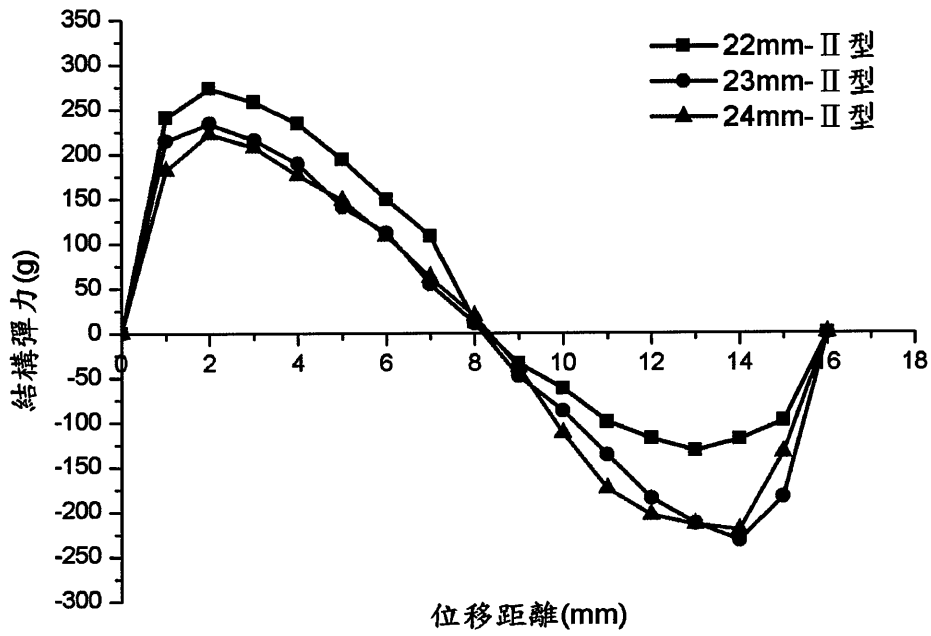


圖3.48 雙穩態結構力-位移圖 (曲率II型)

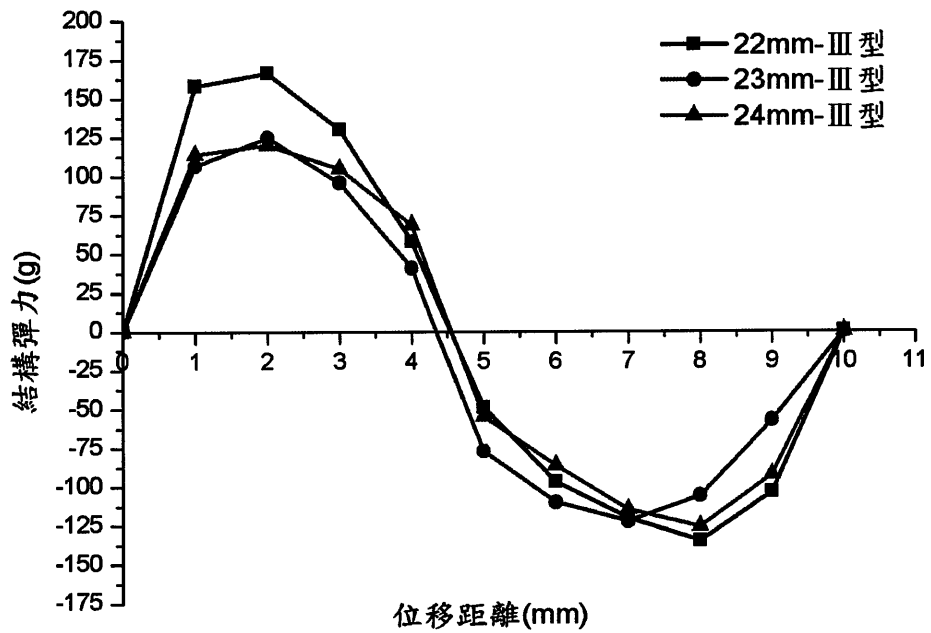


圖3.49 雙穩態結構力-位移圖 (曲率III型)



### 3.3.3 雙穩態結構的選用

由以上實驗可得知只有 22mm-III 型、23mm-II 型 III 型、24mm-II 型 III 型的雙穩態結構在作動時能發揮出雙穩態機制的效果，其中 III 型結構的驅動力大約都位於 100g 附近，而形狀記憶合金致動器只需達 46°C 時便可輸出約 100g 的力量，此時結構移動中若不幸發生偏擺的現象，將造成電斷路器未達設定過載電流前提早作動（偏擺現象發生時會造成結構最大致動力降低約 20g 左右），所以在此僅考慮 23mm-II 型與 24mm-II 型的結構。而此兩種結構的驅動力相差不大，最大的差別在於結構移動 1mm 時所需的驅動力以 23mm-II 型需求較高，更能防止斷路器未達設定電流前移動過多或受偏擺影響提早作動，故本研究選用 23mm-II 型的雙穩態結構作為電斷路器的切換裝置。

本研究將利用 SolidWorks 設計雙穩態結構，藉由 RP 快速原型製作技術製作出成品，如圖 3.50 所示。整體結構使用環氧樹脂製作大小為 70mm x 60mm x 10t，彎曲梁則使用聚乙烯對苯二甲酸酯（polyethylene Terephthalate, PET）製作，尺寸為 23mm x 6mm x 0.25t、曲率 II 型。對於雙穩態結構在設計方面要避免使用單彎曲梁，建議使用雙平行的彎曲梁代替，一來可使中央結構保持於中心線上、二來可防中央結構面扭曲[35-37]。

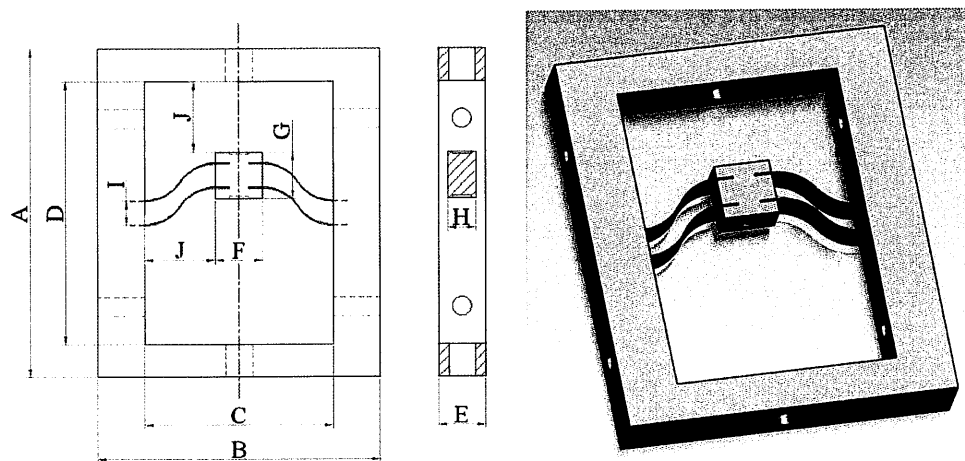


圖3.50 雙穩態結構設計圖

表 3.4 雙穩態結構尺寸

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
尺寸 (mm)	70	60	40	56	10	10	10	6	5.15	15

### 3.3.4 雙穩態結構製造

本研究設計之雙穩態結構尺寸微小加工不易，由於 RP 快速原型加工技術是以堆疊的方式將材料堆積成型，其優點在於沒有切削加工的形狀限制，任何複雜的形狀都可以成型，也不需任何夾治具來輔助固定工件，所以選用此加工方式製作模型結構。其材料為環氧樹脂，彎曲梁則選用塑膠薄片其材料為聚乙烯對苯二甲酸酯 (PET)，該材料在極短的長度下依然具有很好的撓曲性 ( $E = 2960 \text{ MPa}$ )，適合作雙穩態結構的彎曲梁，成品如圖 3.51 所示。其作動行程為 16mm，移動達 8.5mm 時會自動切換。

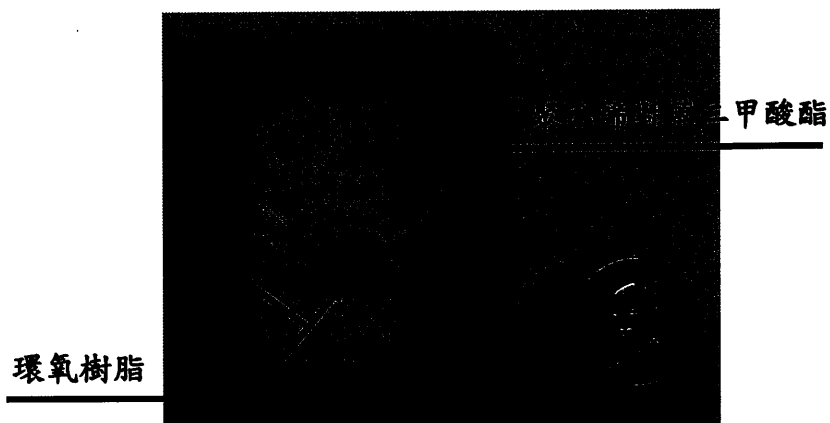


圖3.51 雙穩態結構成品

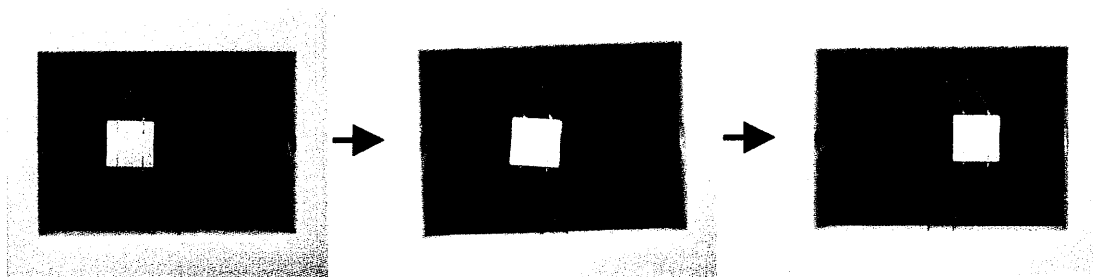


圖3.52 雙穩態結構作動方式

### 3.4 移動式接觸開關之設計分析與製造

由表 3.5 可知最佳的導電金屬依序為銀、銅、金，由於銅的價格低、取得容易故本斷路器的移動式接觸開關將使用銅為製作材料。

表 3.5 各種導體之導電率

金屬	銀	銅	金	鎢	黃銅	鐵	白金
導電率 (S/m)	$6.3 \times 10^7$	$5.85 \times 10^7$	$4.25 \times 10^7$	$1.82 \times 10^7$	$1.56 \times 10^7$	$1.07 \times 10^7$	$0.94 \times 10^7$

本斷路器所使用的移動式接觸開關，尺寸規格與組裝方式如下圖所示。由於雙穩態結構必須位移 8.5mm 之後才會自動切換位置，故 8.5mm 的設計是為了確保雙穩態結構在通過中點後才斷電，避免未達切換位置前結構些許的移動，使迴路斷斷續續供電容易造成元件毀損。

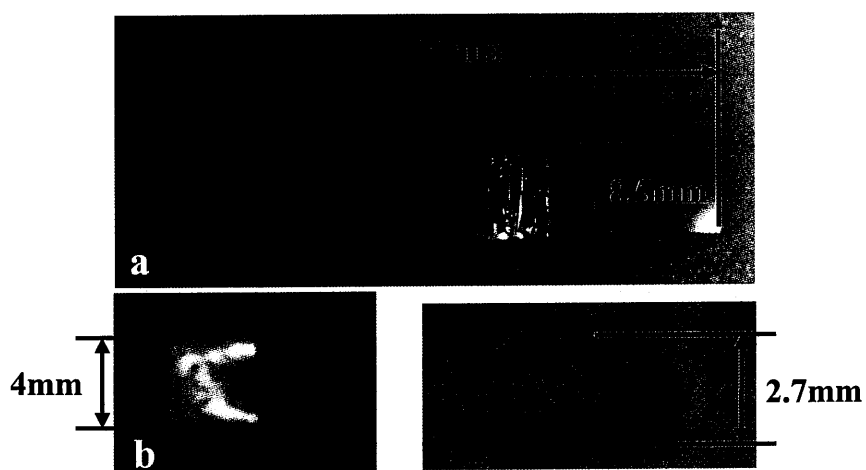


圖3.53 移動式接觸開關 (a) 固定端 (b) 移動端

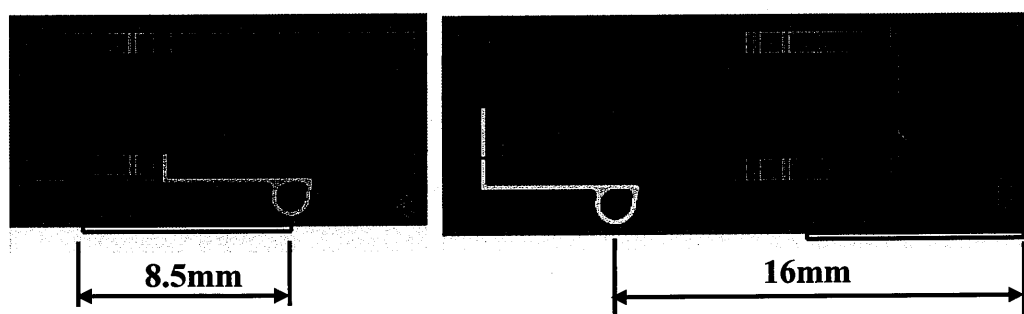


圖3.54 接觸開關組裝方式 (a) 通路 (b) 斷路

### 3.5 電熱式電斷路器組裝

本斷路器選用熱處理 500°C-爐冷的形狀記憶合金作為致動器，長度為 3.5 圈，兩側皆使用端接頭與雙穩態結構連接，再來將移動式接觸開關安裝於雙穩態結構上，如圖 3.55 (a)(b) 所示，先將致動器與移動式接觸開關（移動端）安裝至雙穩態結構上，並將移動式接觸開關（移動端）與斷電端致動器一端連接，再將移動式接觸開關（固定端）與（移動端）作接觸結合形成一迴路便大功告成。

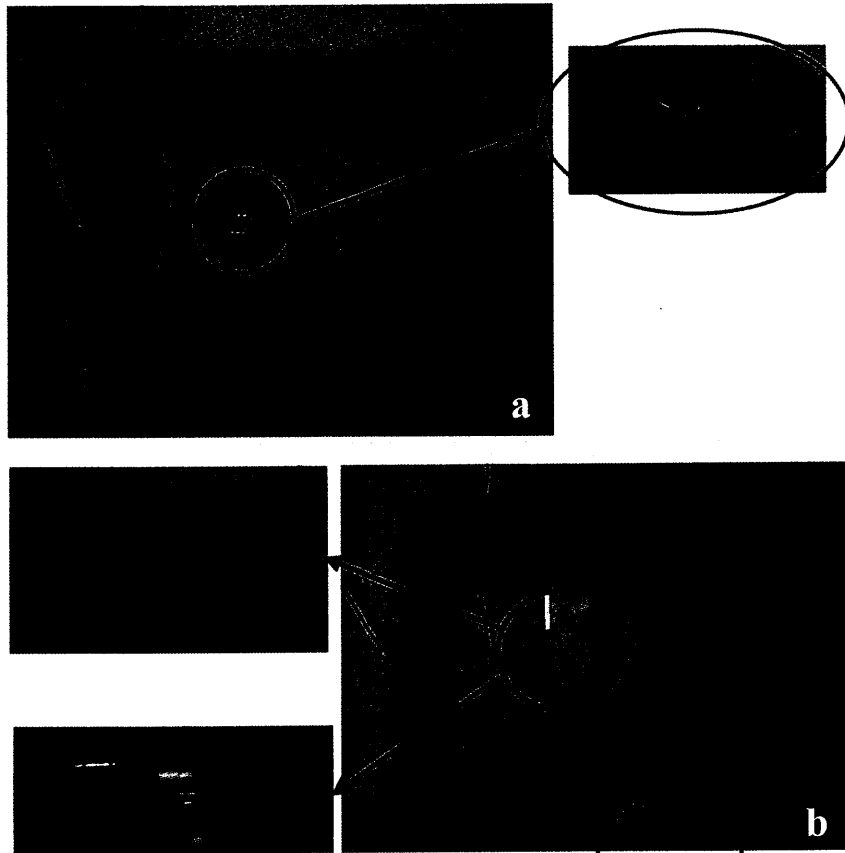


圖3.55 電熱式電斷路器組裝圖(背面)

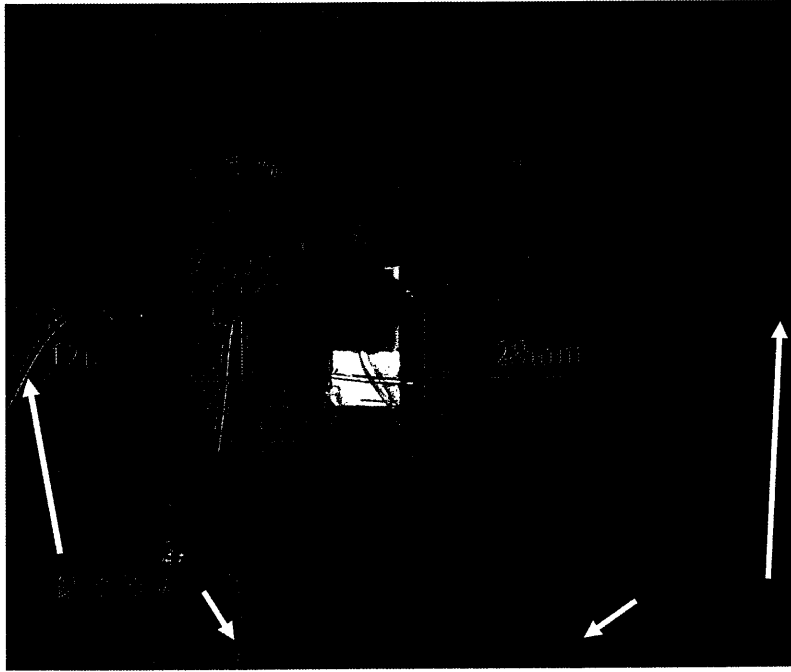


圖3.56 電熱式電斷路器組裝圖(正面)

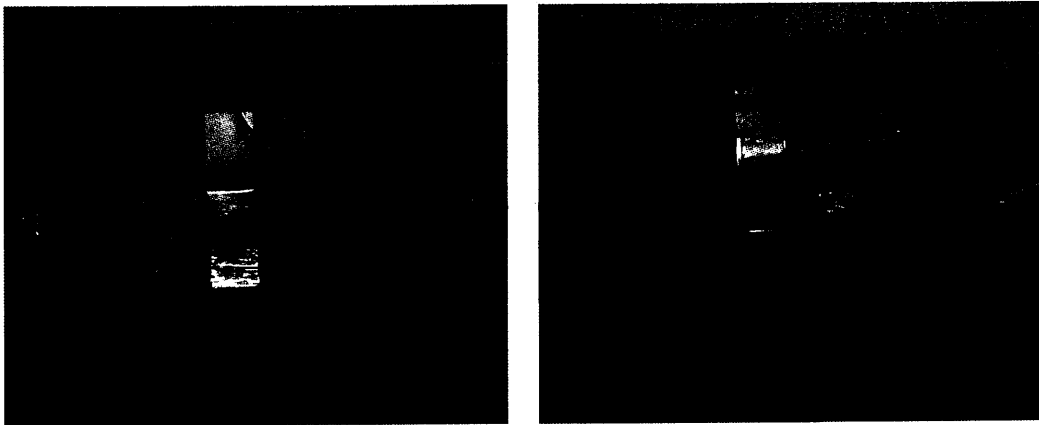


圖3.57 電熱式電斷路器 (斷電狀態)

## 第四章 電熱式電斷路器之測試與討論

### 4.1 過載電流測試與模擬實驗

首先測試電熱式斷路器的過載電流以及未達過載電流前其結構是否會移動，可以發現當電斷路器承受 0.8A 的電流時，結構會移動約 0.6mm 但未達切換位置依然保持通路，如圖 4.1 (a)，而當電斷路器承受 0.9A 的電流時，結構會開始移動直到 8.5mm 時切換造成斷路，如圖 4.1 (b) (c)，整體作動時間約 13 秒。

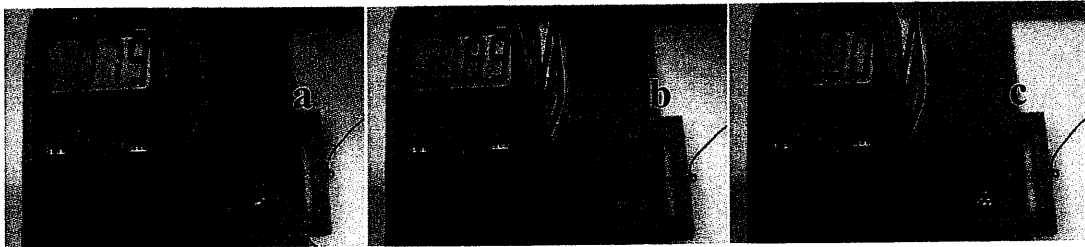
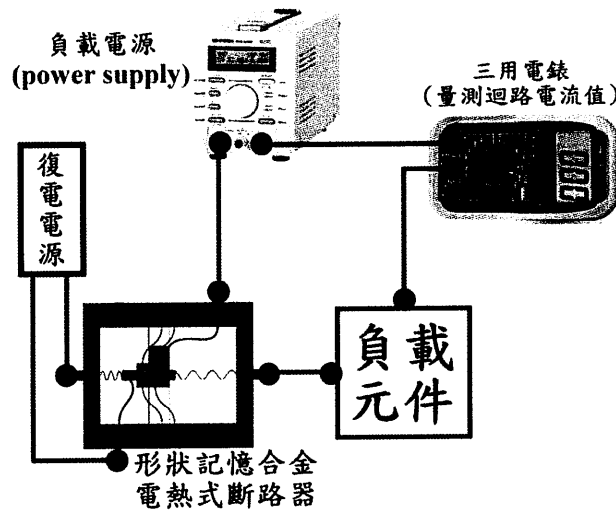


圖4.1 過載電流測試

接著將電斷路器套用至設計的負載迴路系統，觀察電斷路器是否能在系統電流發生過載時進行斷路動作，達到保護負載元件的功效。電源供應器為系統主電源、負載元件則使用燈泡代替、復電電源使用 9V 的電池代替，如圖 4.2 所示。



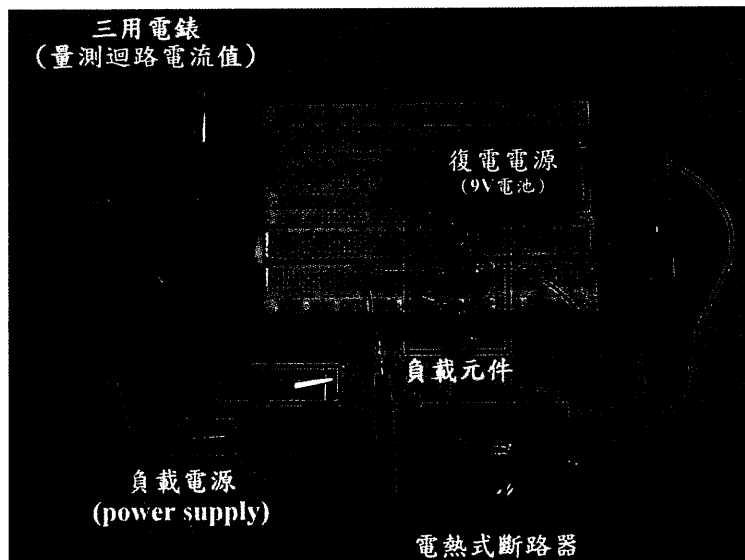


圖4.2 模擬負載系統迴路圖

如圖 4.3 所示，起初慢慢增加電流值達到 0.7A 燈泡作動，持續一段時間後系統發生短路故障，電流提升至 0.9A 此時電流已達到燈泡所能負荷的臨界值，幾秒後電斷路器產生作動切斷電源，成功的保護燈泡免於燒毀，排除故障後啟動復電開關讓斷路器回復通路狀態，復電速度約 0.54 秒而斷電及復電時接觸開關並無火花產生。

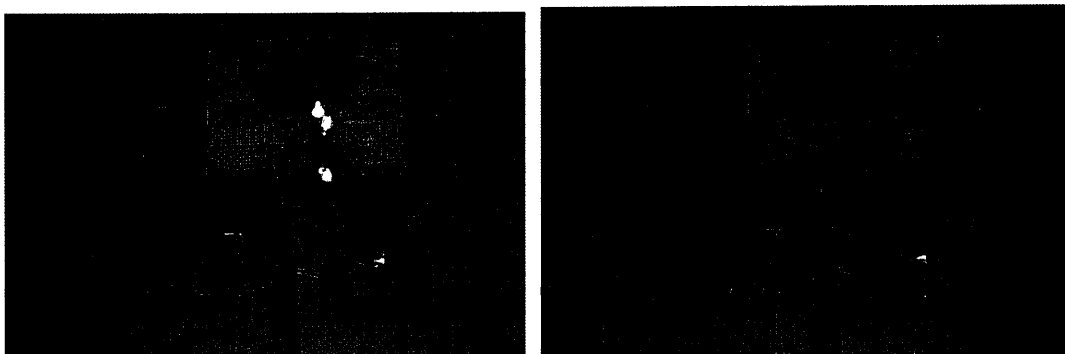


圖4.3 過載模擬實驗圖



## 4.2 短路測試

本實驗將測試電路系統在運作的過程中如果發生瞬間的電流爆衝狀況，電斷路器是否會因此而跳脫。起初電流為 0.8A 持續 12 秒之後，將電流瞬間提升至 1.1A 再降回 0.8A 週期為 1 秒及 2 秒，如圖 4.4、4.5 所示。當瞬間電流週期為 2 秒時電斷路器經過 12 秒後才作動，週期為 1 秒時電斷路器經過 8 秒就作動了，而當瞬間電流爆衝達到 1.45A 時電斷路器會即時跳脫，如圖 4.6 所示。

由以上可知當瞬間爆衝電流發生過於密集時，會造成致動器升溫速度高於散熱速度使電斷路器跳脫，所以只要瞬間電流值不超過 1.45A，以及發生頻率不要太密集的情況下電斷路器是不會跳脫的。

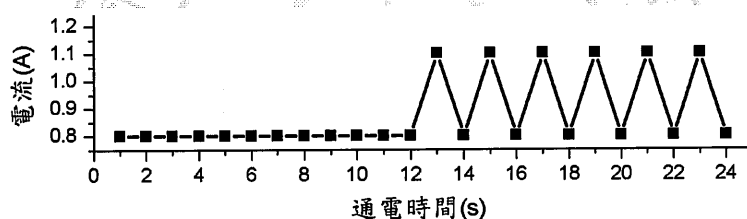


圖 4.4 瞬間過電流測試 (週期2秒)

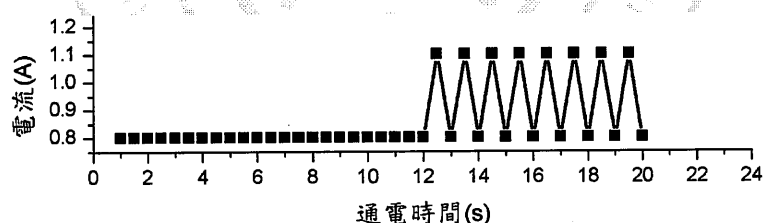


圖 4.5 瞬間過電流測試 (週期1秒)

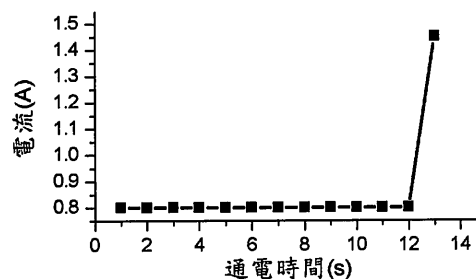


圖 4.6 瞬間過電流測試 (跳脫)

### 4.3 環境溫度測試

本實驗將測試電熱式斷路器於高溫及低溫環境時，其設定的過載電流值是否改變。如圖 4.7 (a) 為模擬高溫環境下對電斷路器的影響，起初先將環境溫度升至  $35^{\circ}\text{C}$  接著開始對電斷路器輸入電流，當電流提升至  $0.7\text{A}$  時電斷路器跳脫，比原先設定的  $0.9\text{A}$  少了  $0.2\text{A}$ 。如圖 4.7 (b) 為模擬低溫環境下對電斷路器的影響，起初先將環境溫度降至  $20^{\circ}\text{C}$  接著開始對電斷路器輸入電流，當電流提升至  $1.0\text{A}$  時電斷路器跳脫，比原先設定的  $0.9\text{A}$  多了  $0.1\text{A}$ ，由此可知電斷路器的過載電流值會受到環境溫度的影響而有所改變。

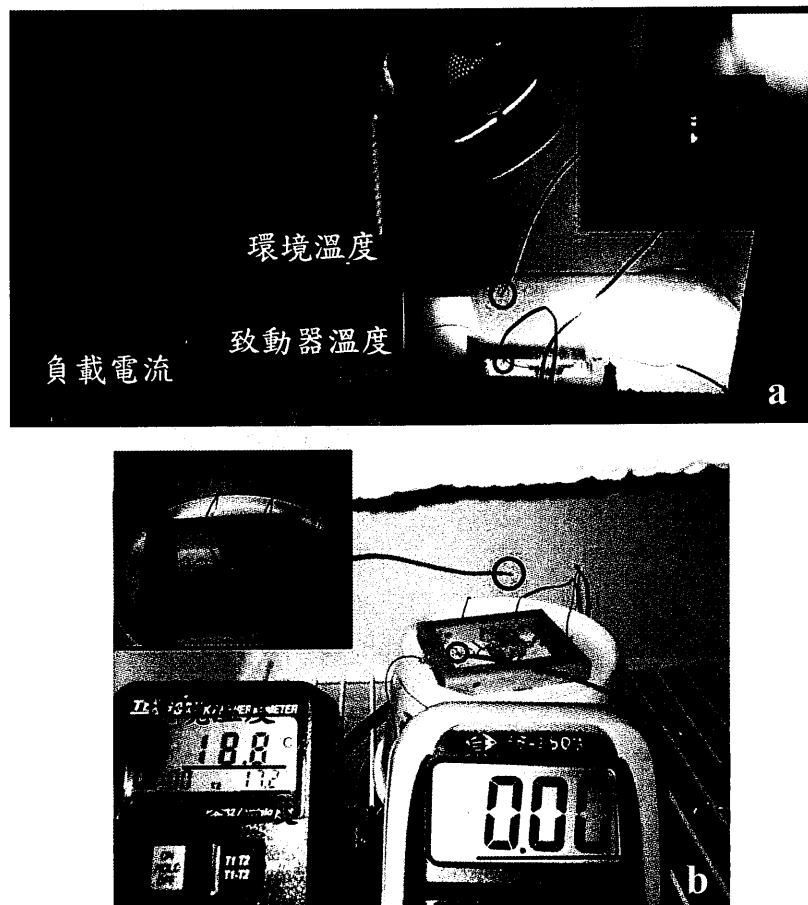


圖4.7 環境溫度模擬實驗圖 (a) 高溫 (b) 低溫

## 第五章 結論與未來展望

本研究使用形狀記憶合金作為致動器，搭配雙穩態結構設計出一種電熱式電斷路器，經過一連串的實驗分析可得知以下結論：

### 形狀記憶合金致動器

1. 在有效熱處理溫度範圍內，形狀記憶合金冷卻方式以水冷的致動力最高、致動時間最短、致動溫度最低、散熱速度最快其次為爐冷，但水冷拉伸阻力高而爐冷拉伸阻力低，如應用層面拉伸阻力影響不大可採用水冷方式冷卻，空冷性能不穩定不採用。
2. 經過不同溫度熱處理以及不同冷卻方式所製造出的形狀記憶合金，以 500°C-爐冷的效果最好，擁有形狀記憶性佳、變形量小、致動時間快、致動力高、拉伸阻力小等優點，且不管使用哪種冷卻方式其致動力都差異不大品質穩定。
3. 輸入電流越大會使形狀記憶合金升溫速度越快可以更快提升致動力，當致動力提升到最高時，就算合金溫度繼續上升其致動力也不會再增加，而且溫度上升過高會造成形狀記憶合金燒毀失去其效應，所以依照需求選擇適當的輸入電流才可將形狀記憶合金的優點發揮出來。

### 雙穩態結構

1. 使用雙平行的彎曲梁做為外部結構與中央結構的連接，可使中央結構保持於中心線上以及防止中央結構面扭曲。
2. 無論改變彎曲梁的長度或曲率半徑，皆會影響驅動雙穩態結構時所需的力量，當長度越短或曲率半徑越小時，就需要更大的力量才能驅動雙穩態結構進行切換動作，而改變曲率參數對於雙穩態的位移行程影響較大，長度參數改變影響較小。

3. 雙穩態結構在作動時若彎曲梁的變形空間不夠，會使彎曲梁出現折痕失去彈性，造成該結構最大推力高於拉力的情況。為了避免此種情況發生，不同的彎曲梁長度就必須搭配合適的曲率半徑，才能充份發揮出雙穩態結構的效果。

### 電熱式電斷路器

1. 電斷路器的設定過載電流值會受到環境溫度的影響而有所改變。
2. 藉由改變雙穩態結構參數或形狀記憶合金長度，即可製作不同過載電流的電斷路器。
3. 當瞬間爆衝電流發生過於密集時，會造成致動器升溫速度高於散熱速度造成電斷路器跳脫。
4. 致動器安裝時應置於中線上，以避免雙穩態結構在作動時發生偏擺現象，造成電斷路器未達設定過載電流前跳脫。

### 未來展望

1. 針對電熱式電斷路器在環境溫度改變下，其設定過載電流改變的問題進行改善。
2. 將本研究之電熱式斷路器進行設計改良，並實際應用於3C產品測試其實用性。
3. 加入有限元素分析，以助於得到不同型態的雙穩態結構設計參數，並針對不同變態溫度的形狀記憶合金進行實驗分析，以利於將來設計出不同用途的電熱式電斷路器。

## 參考文獻

1. 吳財福，『綠色能源直流供電系統介紹』，中正講座，台灣，2009。
2. 內湖高工教材庫：[http://content.edu.tw/vocation/ee/tp\\_nh/body.htm](http://content.edu.tw/vocation/ee/tp_nh/body.htm)
3. Hong Seungki, Bae Byung-Jun, Cho Dong-Jin, Jung Hyun-Kyo, " Design of electromagnetic force driving actuator (EMFA) and linkage for molded case circuit breaker ", Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2010 .
4. 許志成，『形狀記憶合金驅動具力量感測器微夾爪之閉迴路控制』，碩士論文，國立成功大學機械工程學系，台灣、台南，2007。
5. Wang Zhenlong, Hang Guanrong, Li Jian, Wang Yangwei, Xiao Kai, " A micro-robot fish with embedded SMA wire actuated flexible biomimetic fin ", Sensors and Actuators A: Physical, Volume 144, 2008 .
6. B.K. Kim, M.G. Lee, Y. P. Lee, Y.I. Kim, G.H. Lee, " An earthworm-like micro robot using shape memory alloy actuator ", Sensors and Actuators A: Physical, 2006 .
7. S. Maeda, K. Abe, K. Yamamoto, O. Tohyama, H. Ito, " Active Endoscope with SMA (Shape Memory Alloy) Coil Springs ", IEEE, Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), 1996 .
8. T. Okuyama, T. Yambe, Y. Hayashi, R. Ohi, " Development of an implantable artificial anal sphincter using a shape memory alloy ", Journal of Pediatric Surgery, 2004 .

9. X. Sun, Y. Hao, S. Guo, X. Ye, X. Yan, "The Development of a New Type of the Compound Peristaltic Micropump", IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, Bangkok, Thailand, 2008.
10. Guo Shuxiang, Sun Xuesong, K. Ishii, Guo Jian, "SMA Actuator-based Novel Type of Peristaltic Micropump", Information and Automation, ICIA 2008. International Conference on, 2008.
11. Fu Yili, Li Xianling, Liu Hao, Liang Zhaoguang, Ma Xin, "Kinematics of Micro Bending Robot Using Shape Memory Alloy for Active Catheter", Robotics and Biomimetics, IEEE International Conference on, 2006.
12. G. Bunget, "A Biologically-Inspired Micro-Air Vehicle for Flapping Flight - Kinematic Modeling", Master's Thesis, 2007.
13. 林振寧,『形狀記憶合金之彈性係數的溫度效應之研究』,碩士論文,大同大學機械工程系,2005。
14. 朱瑩馨,『形狀記憶合金於動態人造花藝之研究』,碩士論文,國立勤益科技大學機械工程系,台灣、台中,2010。
15. 王盈斌,『形狀記憶合金微型致動器之設計製造與應用』,碩士論文,國立勤益科技大學機械工程系,台灣、台中,2009。
16. 蔡豐銘,『形狀記憶合金之有限元素分析』,碩士論文,國立雲林科技大學機械工程研究所,台灣,2004。
17. 張銘菘,『形狀記憶合金之有限元素分析』,碩士論文,國立雲林科技大學機械工程研究所,台灣,2008。

18. 蔣龍仁，李江浩，徐永富，王文雄，『血管支架用 TiNi 形狀記憶合金之多階段相變態研究』，行政院國家科學委員會專題研究計畫，國立台灣大學，2006。
19. H. Morawiec, " Two-stage martensitic transformation in NiTi alloys caused by stress fields ", J. Phys., 1997 .
20. J. Michutta, Ch. Somsen, A. Yawny, A. Dlouhy, G. Eggeler, " Elementary martensitic transformation processes in Ni-rich NiTi single crystals with Ni<sub>4</sub>Ti<sub>3</sub> precipitates ", 2006 .
21. 胡友文，『形狀記憶合金力學特性之研究』，碩士論文，大同大學機械工程研究所，台灣，2006。
22. J. Qiu, J.H. Lang, A.H. Slocum, " A curved-beam bistable mechanism ", Journal of Microelectromechanical Systems, 2004 .
23. J. Barth, B. Krevet, M. Kohl, " A bistable SMA microactuator with large work output ", Transducers, 2009 .
24. Y. Gerson, S. Krylov, B. Ilic, " Electrothermal Bistability Tuning in a Large Displacement Micro Actuator " , Journal of Micro mechanics and Microengineering, 2010 .
25. D.A. Wang , H.T. Pham , Y.H. Hsieh , " Dynamical switching of an electromagnetically driven compliant bistable mechanism " , Sensors and Actuators A: Physical, (SCI), 2009 .
26. Pham Huy-Tuan, Wang Dung-An, " A constant-force bistable mechanism for force regulation and overload protection " , Mechanism and Machine Theory, (SCI), 2011 .

27. Pham Huy-Tuan, Wang Dung-An, " A quadristable compliant mechanism with a bistable structure embedded in a surrounding beam structure ", *Sensors and Actuators A: Physical*, (SCI), 2011 .
28. B.J. Hansen, C.J. Carron, B.D. Jensen, A.R. Hawkins, S.M. Schultz, " Plastic latching accelerometer based on bistable compliant mechanisms ", *Smart Mater Struct*, 2007 .
29. J.S. Han, C. Muller, U. Wallrabe, J.G. Korvink, " Design, Simulation, and Fabrication of a Quad-stable Monolithic Mechanism with X- and Y-Directional Bistable Curved Beams ", *ASME J. Mech. Des*, 2007 .
30. Cherry Brian-B, Howell Larry-L, Jensen Brian-D, " Evaluating three-dimensional effects on the behavior of compliant bistable micromechanisms ", *J. Micromech. Microeng.*, 2008 .
31. L. Howell, " *Compliant Mechanisms* ", Wiley-IEEE, 2001 .
32. D.L. Wilcox , L. L. Howell , " Fully Compliant Tensural Bistable Micromechanisms (FTBM) ", *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2005 .
33. J. Rossiter, B. Stoimenov, T. Mukai, " A self-switching bistable artificial muscle actuator ", *SICE-ICASE International Joint Conference*, Busan Korea, 2006 .
34. Ishii Hiroya , Ting Kwun-Lon , " SMA Actuated Compliant Bistable Mechanism ", 2004 .
35. J. Qiu, J.H. Lang, A.H. Slocum, " A curved-beam bistable mechanism ", *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2004 .



36. M. Vangbo, "An Analytical Analysis of a Compressed Bistable Buckled Beam", 1998 .
37. M. Vangbo, Y. Bäcklund, "A Lateral Symmetrically Bistable Buckled Beam", J. Micromech. Microeng., 1998 .

