

淺談殘留應力由來及消除之方法

郭俊毅

材料的破壞是因當下所承受力的總和超過材料可忍受之強度而產生，而力的總和是來自於外加之力與材料本身殘留應力相疊加，意謂著殘留應力變小時，材料可承受的外加之力便可增加，意即此時材料將變得相對安全。

一般於製造、加工與銲接過程等均會使材料產生不均勻的塑性變形而存有殘留應力；另外在熱處理時，由於淬火、回火的加溫和冷卻過程，也會造成金屬相組織的改變而產生殘留應力。其中拉伸殘留應力容易產生應力腐蝕龜裂，此為自然龜裂、遲延破壞的主因，例如鋼結構在低溫狀況下，殘留應力若為張力，則對該結構之龜裂擴張抵抗強度極端不利；若對反覆荷重來說，則會使疲勞限度下降，對腐蝕疲勞也有害處。

由上所述，殘留應力是金屬構件裂開或損壞的重要原因，極大的影響金屬構件之材料性質以及材料的尺寸精度穩定性，故消除殘留應力成為一項十分重要的課題。

工件在製造過程中，將受到來自各種加工製程等因素的作用與影響，殘留應力是當物體沒有外部因素作用時，在物體內部保持平衡而存在的應力。凡是沒有外部作用，物體內部保持自相平衡的應力，稱為物體的彈性應力。而材料內部因“儲存應變能”產生的殘留應力型式分為三級：第一級為巨觀殘留應力；第二級為晶粒與晶粒之間交互作用所造成的儲存應變能；第三級則是微觀

殘留應力。

另常見的材料製程包含鑄造、鍛造、銲接、塑性加工與熱處理等，因金屬融化後再度凝固冷卻收縮所造成的應力為所有製程之冠，故以銲接所造成的殘留應力最大，其殘留應力來源可分成四大類(以鋼結構製程為例，如圖一)：

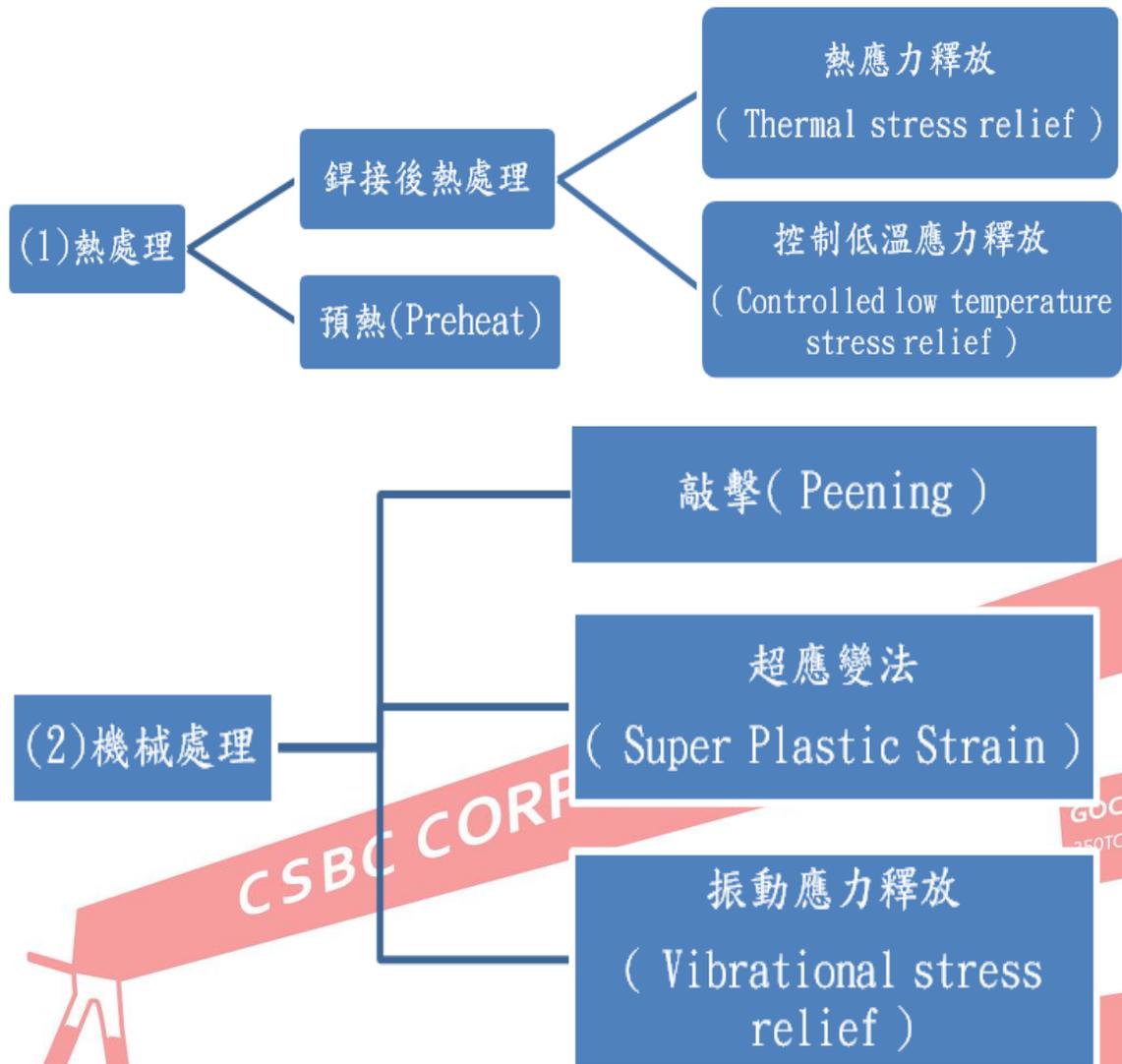
- 1、 熱應力：材料由於溫度變化所產生的緩和累積收縮之應力，例如正常化、切割、銲接、熱整與鑽孔。
- 2、 相變應力：由沃斯田鐵相由淬火相變化形成麻田散鐵造成體積急速膨脹之應力，例如鋼板切割、熱整與銲接。
- 3、 塑性加工應力：幾乎任何材料塑性加工的過程，都會對造成材料內部殘留應力的累積，而殘留應力的累積，對於後續的加工、產品的品質有重大的影響。最典型的例子是加工變形，使得產品的尺寸與原先設計不符合，或者必須消除應力後才能在進行下一步驟的加工，以免應力累積超過降服點造成材料破壞，因此應力消除在精密的工程中必不可少。例如熱滾軋製程、矯直、鑽孔與組裝等造成工件塑性變形所造成的應力。
- 4、 凝固收縮應力：主要為銲接製程所造成的應力，因銲接過程是急驟加熱與冷卻的作用，在熔融金屬與銲接母材的附近產生熱應變，由熱應變產生熱應力，就物理性質而言，所有的材料都具有熱脹冷縮的特性，當材料受到加熱時，會產生熱膨脹。在銲接過程中，銲接熱源所造成之溫度場是極不均勻的，從熱源中心動輒兩、三千度的高溫，到母材上的常溫，可見其溫

度梯度非常大，此不均勻的熱應力便是銲件殘留應力的主要來源。



圖一 鋼構結構製程導入殘留應力

現行各工件及結構之精度要求極高，成形加工後若沒有消除殘留應力將會直接影響工件的品質與精度要求。故了解完殘留應力來源後，接下來就是探討如何消除殘留應力，目前消除殘留應力的方法很多，可分成熱處理與機械處理兩大類六種(如圖二)，概述如後：

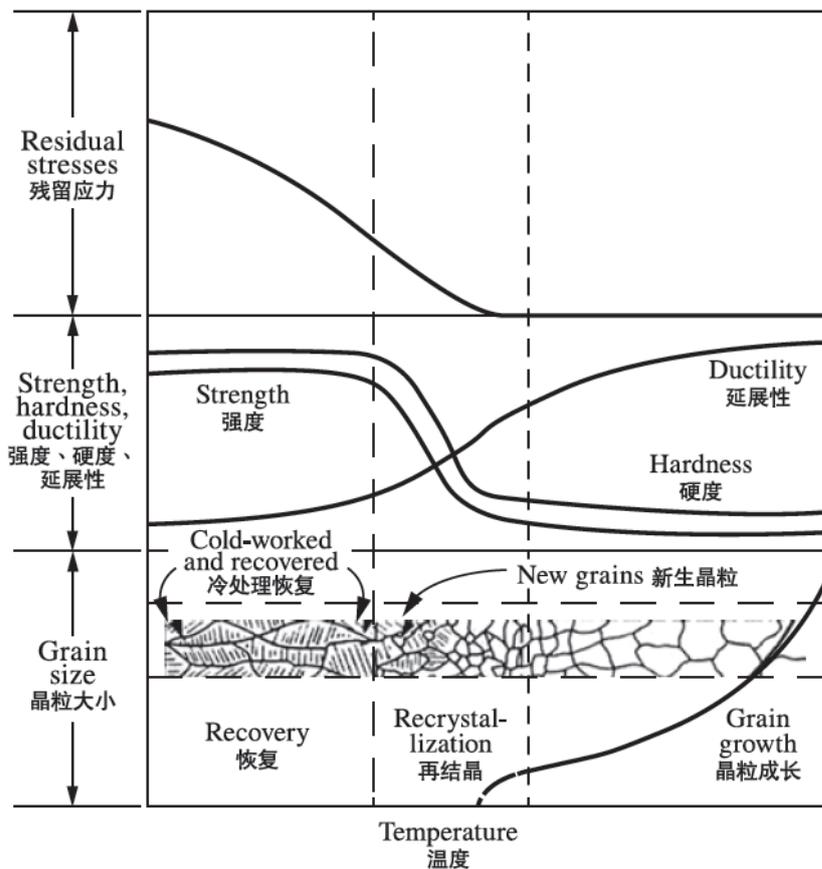


圖二 消除殘留應力方法

- 1、應力消除退火：其一為弛力退火，溫度高效果愈好，但應控制在材料的相變化溫度以下，昇、降溫速度也需適當，特點為效果佳，通常可消除 80% 以上的殘留應力；其二為完全退火，使結構物均勻地加熱至某一適當再結晶溫度，然後持溫一段時間，材料在高溫時產生再結晶，晶粒重新成長，釋放殘存於材料內部的應力。
- 2、低溫應力釋放：一般銲接結構物的體積都相當的龐大，無法進入退火爐實施應力釋放處理，故發展在距銲道兩側約 100mm 左右之母材，加熱至 150

~200°C左右，隨即冷卻之，來降低沿著鐸道方向的殘留應力。主要是因為在鐸道附近加熱，使之膨脹收縮，對鐸道產生拉伸應力，使鐸道產生塑性變形，以減少鐸道上幾近降伏強度的殘留應力。因為其加熱溫度低於熱處理，因此稱之為低溫應力釋放。

- 3、預熱：施鐸之前先對母材均勻加熱，使鐸接時的冷卻速率減緩，降低鐸件之溫度梯度，自然可減少鐸接熱應力，減少鐸後殘留應力。但必須注意的是，不同的材料、尺寸及不同的操作環境，各有不同的預熱溫度。一般在多層鐸接中，先施鐸的鐸道餘溫對後來施鐸的鐸道可能會有預熱作用，適當的控制間隔時間可提高鐸件的品質與減少殘留應力產生。
- 4、敲擊法：此方法是最易實施的方式，即對鐸道進行錘擊的工作，使鐸道表面產生壓縮的塑性應變，產生壓縮應力，消除殘留在鐸道上之拉伸應力。
- 5、超應變法：與低溫應力釋放相似，不同之處為一個利用熱量來產生拉應力，一為利用機械對鐸道拉伸，外加應力與殘留在鐸道上的應力若超出降伏應力，會產生塑性變形，釋放超出降伏應力的多於應力，待外加應力移去後，由於有部份之殘留應力由塑性變形所釋放，因而降低了殘留的拉伸應力。
- 6、振動應力釋放：利用振動的力量與材料內部的殘留應力疊加，此材料的內應力超過降伏點而造成材料微小的塑性變形(micro strain)，藉著反覆振盪使差排滑移而降低材料內部的應變能。



圖三、溫度對殘留應力之影響

目前較為普遍的應力消除方法是熱處理，使材料處於高溫狀態發生相變化，使原子重新排列、再結晶而消除殘留應力，若是處理得當，甚至可使材料內部之內應力完全消除(如圖三)。然而雖熱處理的效果優異，幾乎可以完全消除材料內部的殘留應力，但必須耗費龐大的能源，因為要使材料緩慢的升溫與降溫，往往需要很長的處理時間，除此之外，設備也必須能夠容納待處理物件，因此處理大型工件的設備的容積必須很龐大，造價也相當高昂，也造成成本上極大的負擔。

國防工業構件在製造過程中會經歷切割、機械加工、銲接、矯直、組裝等工序，這些製程的加總會導入極大的殘留應力，均會造成零組件施工後的大量

應力殘留，此殘留在內部的應力會對工件造成傷害，所以依賴振動消除殘留應力方法時效製程來達成增強製造品質與壽命。而因應國艦國造計畫新研發之 CRHS 56 鋼材因不經預熱及高降伏強度的特性，銲接時容易導致高殘留應力，為消除殘留應力，如採用熱處理法，則易產生「應力消除龜裂(再熱龜裂)」現象，故不適合採用熱處理方式消除殘留應力；而一般船舶用 5000 系列鋁鎂合金屬加工硬化型，非屬熱處理型鋁合金，且因導熱性快，銲接後一樣未進行應力消除，易導致殘留應力影響後續船艦使用壽期。

國艦國造政策刻正執行也勢在必行，因此研究出具有節約能源、無污染、成本低、高效率、操作方便等優點的新式消除殘留應力方法刻不容緩，希望台船公司能夠藉著國艦國造的機會，研究出更多嶄新的科技工法，在帶領著造船業前進的同時，也能提升我國海軍艦艇的建造技術及使用壽期，更提升船體的安全性。

本篇文章由郭俊毅少校及洪智仁工程師共同撰擬

參考文獻：

1. 陳宏志，〈銲接結構強度學〉，復文書局，1995。
2. 潘純致，〈殘留應力之含意〉，機械月刊第十四卷第五期，頁 169-174，1988。
3. 韋仁旌，〈以熱處理方式消除射出成形製品殘留應力之研究〉，交通大學碩士論文，頁 16，2008。
4. 李平雄、黃郁婷，〈機件原理〉，華興文教，2020。
5. 廖信智，〈不同振盪頻率對殘留應力消除之研究〉，中興大學碩士論文，頁 10，2006 年。