

# 震動消除殘留應力技術在鋼結構件之應用

王家祥、吳威德

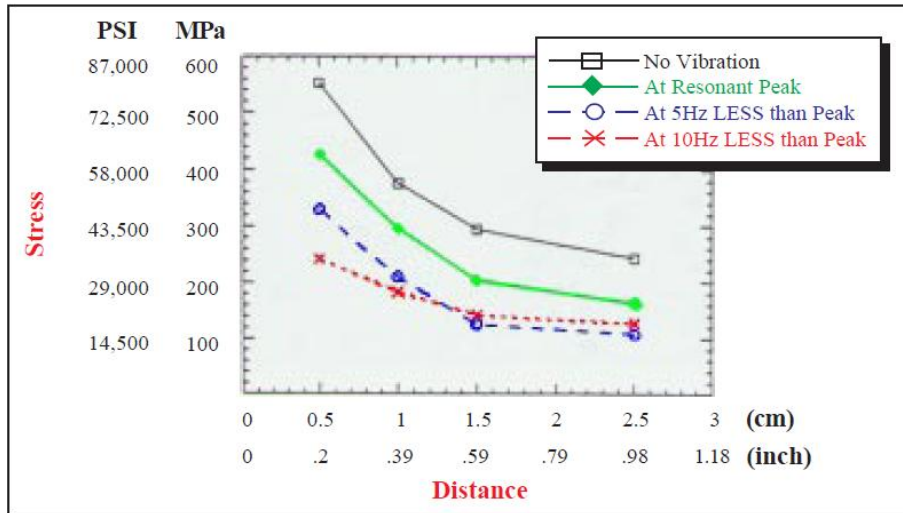
國立中興大學材料科學與工程學系

鋼結構製造過程中會經歷切割、機械加工、銲接、矯直、組裝等工序，而這些製程的加總會導入極大的殘留應力，如塑性加工的應力、固液態轉變的凝固收縮應力、加熱冷卻時溫度梯度的熱應力、高溫到常溫之相變態應力等，此均會造成鋼結構件施工後的大量應力殘留，此殘留在內部的應力對鋼結構件造成的傷害，輕者則導致日後的變形，重者則造成鋼結構件龜裂破壞，此對生命財產安全的考量不得不防，但國內鋼結構從業人員對此之認知相當薄弱，故在此撰文介紹。因為鋼結構件均相當巨大，又必須考慮應力消除後不能影響鋼結構件的機械性能，故適用於鋼結構件殘留應力消除的方法以震動方式較熱處理方式為佳，故本文著墨於震動消除殘留應力在鋼結構件的介紹。

## 一、震動消除殘留應力技術

震動技術的起源乃自從 1950 年代起，美國海軍、德軍利用共振測試船體及飛機結構的穩定性，並意外地發現震動亦可消除材料內部的殘留應力。以震動消除殘留應力有許多的好處，最大的好處沒過於材料不會變形，其他如再也不必像大形熱處理爐必需動輒數千萬方能搞定設備，處理時間也可以大幅縮短且無高溫氧化的困擾，還有僅需極小的能源便可對大型工件做應力消除，故在 1960 年代，震動消除殘留應力的研究如雨後春筍般紛紛地發表，可是殘留應力的量測並無標準，雖然震動確實可以消除殘留應力。

1970 年 Bonal Corporation 發表了以震動消除殘留應力的理論、方法及設備，後稱之為 Meta-Lax Technology (metal relaxation technology) 與 1960~1970 年間發表的技術最大的不同點在於 Meta-Lax Technology 完全是使用頻率的控制而已，所以疲勞的危險可以降低，並大大地簡化製程使震動消除應力變成真正簡單好用的方法，其頻率大異於先前的共振頻率，而是使用次共振頻率來消除殘留應力，即略低於共振的頻率，定義為共振振幅 1/3 時的頻率或低於共振頻 10Hz 的頻率，以其理論看來頻率欲接近共振頻率（但不超過）則效果愈好，如果在 10Hz 內振幅衰減很快速的話，就選擇共振振幅 1/3 時的頻率為次共振頻率，Meta-Lax Technology 的理論認為殘留應力所束縛住的原子以應變存在晶格內造成晶格扭曲，振盪可以提供一個力量使原子動能提高便能脫離束縛而減少晶格應變消除殘留應力，如圖一，在小於共振頻 10Hz 的頻率消除殘留應力的值達到最大，剛好在共振頻的頻率消除殘留應力效果最差。

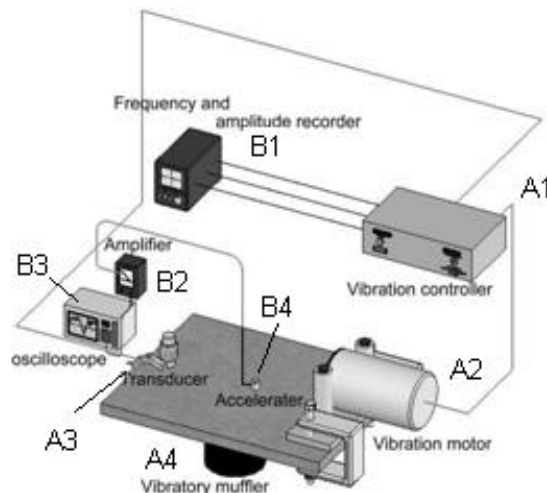


圖一 相對於共振頻的各種頻率與殘留應力的關係圖

## 二、震動系統

圖二是一個完整的震動系統，包含了震動器與其它震動的量測儀器，可以對整個平台的震動作精確的分析。實際使用的架構可以簡單化，僅需圖二A組這幾項基本的元件即可使用，主要是利用一個震動器，輸出震動馬達所需要的電流，而不同技術的震動馬達，頻率與振幅可能需個別調整，當然如何調整則依據振幅感測器傳回的數值分析，決定好參數後，即可對結構或工件進行震動處理。

目前本研究室關於震動應力消除技術已發展出相當優異的成果，經過實際驗證，效果優於共振頻與次共振頻的應力消除理論，但可惜並無商品化，反觀大陸在國家的支持下蓬勃發展，而顯得殊為可惜。



圖二 完整的震動系統，A1：震動控制器 A2：震動馬達 A3：振幅感測器 A4：吸震墊; B1：頻譜記錄器 B2：訊號放大器 B3：示波器 B4：加速規。

### 三、震動消除殘留應力技術在鋼結構件之應用

熱處理是目前最常使用的應力消除方法，雖然效果優異但仍有許多不足之處。最大的問題在於熱處理爐的容積無法容納大工件，如大樓鋼構或某些大型結構，而高精密度的機械零件，熱處理之後將無可避免地面臨變形、材料軟化等問題，這些例子不適合採用熱處理的方法來釋放殘留應力，也因此震動應力消除技術是另一個絕佳的替代方案。

震動應力消除技術是施加震動的力量在具有殘留應力的物體上，藉由反覆變化的應力作用在材料上，使其殘留應力釋放。在大多數的情況下，100%的應力消除是沒有必要的。而震動處理後，雖然只是降低30~40%的殘留應力，但卻能帶來極大的效益，例如材料變的更好加工、疲勞壽命大幅增加、材料耐腐蝕等等的優點。震動應力消除技術由於其節省能源的特性，便宜的設備成本還有其無可取代的特性，使得它在工業界有著無可取代的地位，廣泛地應用在造船、航太、汽車工業裡頭，也漸漸地成為某些特殊產品的指定製程，如圖三。其與熱處理的比較如下表一所示(以鋼結構件為例)。

表一 鋼結構件熱處理與震動法消除殘留應力之比較

	熱處理	震動法
設備價格	昂貴，數百萬~數千萬元不等	便宜，數十萬設備適用大部分情況
操作成本	昂貴，每公斤成本約3元或更高	便宜，每公斤成本約0.1元或更低
操作手續	設定簡單，可照表操課	較複雜，需教育訓練
操作時間	長，約數小時~數十小時不等	短，約數十分鐘~幾小時不等
副作用	會形成氧化皮膜、鏽皮	常溫操作，無氧化膜、鏽皮困擾
材料成分	脫碳、合金元素氧化使材料變質	常溫操作，無元素擴散氧化等問題
機械性質	使材料軟化，強度降低	幾乎不影響
加工變形	會導致變形，不適合成品	完全不變形，適合各階段應力消除
效果	約可消除80%的應力	約消除30~40%應力

鋼結構板材做過熱處理後，因表面積占的比率太高去除了氧化層後會減輕許多重量，而且若有不均於受熱的情況通常會變形，使材料處理過後會發生更多的麻煩，但使用震動消除應力法，非但沒有氧化膜的困擾，還不會變形。但有一個問題，震動消除應力的好處不是試片不會變形？現在卻用使材料發生應變來消除應力，是否會造成材料變形？因為這項製程所用的臨界應變很小，是必須以 strain gage 才能量出的 microstrain，當然也不可能超過降伏點，造成永久的變形，由以上看來若採用應變控制是最完美的解決方案，沒有實作的原因是在於應變控制的困難，震動的裝置會以 strain gage 傳回的數據進行分析來決定是否要增強或降低力量，好把應變量控制在理想範圍內，他們使用條狀的試片來分析，故僅傳回單一軸向的應變數據，如果是立體的試片則會傳回三個軸向的應變值，而且立體的

試片應變的形式相形之下更為複雜，所以一般以 Meta-Lax Technology 作為震動消除殘留應力的製程，如圖四。

這項技術的優點不少，應用於加工完成後的應力釋放，相對於傳統的熱處理，經濟、省時、不易變形、無高溫氧化問題、機械強度僅略微降低、設備輕便短小等為其最大優點。

震動時效的另一種描述是：通過模擬情況讓以後可能產生的變形與開列提前釋放。所以，時效時也可先分析鋼構工件的工況再找出合適的振型及振幅去模擬情況。這樣，時效後時效參數若穩定下來，在該情況下就不會產生變形。



圖三 震動技術消除鋼結構件內部殘留應力



圖四 Meta-Lax 技術消除大型鋼結構件殘留應力

## 五、今後的發展

自從震動應力消除技術在 1993 年被中國大陸的國家科委列為"國家級科技成果重點推廣計畫"項目後，經過 6 年國家經貿委又將其列入全國重點推廣項目，目前可說是百花齊放，中國大陸現在已經有相當多的"震動時效"設備廠商，也投入了許多研究人力，但最早商品化並成功行銷的就屬美國的 Bonal Corporation 了，在 1970 年代就發表了其理論、方法及設備，稱之為 Meta-Lax Technology (metal relaxation technology) 使用次共振頻率(sub-resonant frequency)來消除殘留應力，雖然其能量吸收的理論缺乏實驗證據支持，但其操作簡單容易上手。話說科技始終來自於人性，太複雜的理論與操作終究對於推廣並無幫助，但其操作人員仍須經過訓練。目前本研究團隊的最新的技術可由震動的波形快速分析最佳的震動參數，可由自動化儀器設備協助操作人員決定震動參數，並且得到更優異的效果，已取得國內與美國專利，可惜仍無商品化，歡迎各界有興趣的公司企業合作開發或洽談技術轉移。

震動技術仍然未臻完美，並不能達到媲美傳統熱處理的效果，雖有許多的疑點仍待解開，但由前人研究的成果顯示這條路是可行的。今後將朝向改善品質與簡化製程兩大方向進行，而應用的範圍也會擴大，例如應用於人體工學，可以消除疲勞。應用於鋼結構材料可減少偏析與提升機械性質。應用於鋼結構件銲接可以降低銲接變形與偏析、熱裂等等不良影響，如圖五。以學術觀點來看，找出震動消除殘留應力的機構也是一個有趣的題目，除了純學術的討論外，對於將震動轉變為有益的利用，會有極大的幫助。一般認為震動後材料的機械強度變低了，但其實只是下降了極小的量，可謂為瑕不掩瑜。





圖五 Meta-Lax 技術運用於鋼結構件銲接