

【應用科研】預力處理簡介

2018-12-01 02:46:00

原文網址：<http://blog.udn.com/MengyuanWang/120675025>

我在哈佛念研究所的時候，有一位室友是在美國長大的臺灣華裔，那時在MIT念博士，他的父親則是GE噴射引擎（Jet Engine）部門的工程師。有次聊天問起他父親手上的工作項目是什麼，他說GE内部的數學模型發現，從1950年代設計的J79（國軍在79年斷交時第一次想買F16，美國建議用老式的J79發動機來降級，避免刺激中共，結果國軍嫌它太老，就不了了之）到當代（1980年代末期）的F101和F110，所有的性能進步，似乎都來自於新材料，設計上的改動完全沒有助益（為了適應新材料所作的設計改動，算是材料的功勞），所以GE啟動了一個研究計劃，要分析到底真是如此，還是模型有問題，他的父親就是研究小組的成員之一。

我後來沒有機會追問，所以這個研究的最終結論為何，我也不知道。不過現代機械性能的進步，大半來自材料，是一個普遍的現象。而材料性能的進步，除了本身配方的演進之外，工藝上的處理也有很大的貢獻。

在材料的強化處理中，最老的之一就是預力處理，而且應用相當廣汎。不過隨著工業和材料的不同，英文上的用詞也不一樣，例如Autofrettage或者Prestressed，所以一般人不會聯想在一起。然而它們的物理原理，其實是共通的，所以我在這裏一並討論。

我所知道最早的預力處理，是所謂的Prince Rupert's Drop（魯伯特之淚）；它的製造很簡單：把熔融的玻璃掉下一滴到水裏冷卻，就自然形成一顆玻璃淚珠。這在16世紀文藝復興時期，很自然地玻璃工匠偶然發現（據說最早發生在荷蘭），到17世紀初期，傳到Prussia，然後又被Prince Rupert帶進英國。

Prince Rupert並不是賣首飾的，他是神聖羅馬帝國的王子伯爵，對科學很有興趣。Prince Rupert's Drop的意義也不在於形狀美麗，而在於它的奇異力學性質：雖然用普通玻璃製成，卻可以承受鐵錘的猛力敲擊而不碎，所以震驚了當時的英國科學界。17世紀的英國物理學家，基本上都研究過這個現象，但是因為研究機械預力必須以斷裂力學（Fracture Mechanics）為基礎，它的機制一直到1920年才被完全瞭解。



要用鈍性壓力打破Prince Rupert's Drop，必須用上液壓機

簡單來說，玻璃是一種很硬但是很脆的材料，它的破壞過程雖然以納秒（Nanosecond）計，但是仍然分好幾個步驟，其中第一個步驟是衝擊波或靜壓力在表面創造裂紋，其後裂紋才逐步傳播擴散。

那麼Prince Rupert's Drop是如何阻止破壞呢？答案在於迅速冷卻所產生的預力。淬火過程中，玻璃的表面很快冷卻，於是先收縮隨即固化，然而內部暫時還處在熔融膨脹的狀態，所以固化的表面積是基於高溫膨脹的體積而得的。等到內部也慢慢冷卻，開始收縮之時，表面卻早已固定了，於是內部和外部的分子與分子之間間距都不等於室溫下的常態，所產生的強大分子力就是所謂的預力。內部的分子要求表面再擠一擠，表面的分子卻要求內部站寬一些。換句話說，Prince Rupert's Drop的表面層一直承受著來自於自身內部的緊縮壓力。

當玻璃遭受鈍性（這裏的鈍性假設在於破壞力只到達表面，如果破壞力能深入內部，例如子彈或者錐形錘，那麼預力就沒有保護作用）外力擊打的時候，所謂的裂紋就是表面的分子被衝擊波完全分開；但是Prince Rupert's Drop的表面分子原本就很擠，任何裂紋的形成，都必須先剋服來自內部的緊縮預力。這種分子力在微觀下是非常強大的，結果是裂紋很難形成，那麼自然就沒有後續的傳播擴散，玻璃也就完整無缺。

20世紀的科學家明白了這個原理之後，很快就有了工程上的應用，也就是所謂的強化玻璃（Strengthened Glass）。用快速冷卻很難生產出所需的特定形狀，所以工藝上轉為化學方法，例如把製成的玻璃板泡在鉀鹽之中，讓鉀原子慢慢滲透進入玻璃表層，取代原有的鈉原子。因為鉀原子比鈉原子大一點，所造成的表面層同樣是很擠的，結果是同樣的緊縮預力。汽車和飛機的擋風玻璃都是如此製成，然後再夾上柔性材料，避免在外力過大，玻璃碎裂之後，破片飛出傷人。電視和手機的玻璃面板，也同樣是經過預力強化處理。康寧的Gorilla Glass（大猩猩玻璃），基本上就是精益求精的強化玻璃，在配方和生產工藝的細節上，經過多個世代的修改，但是其基本原理，還是如上所述。

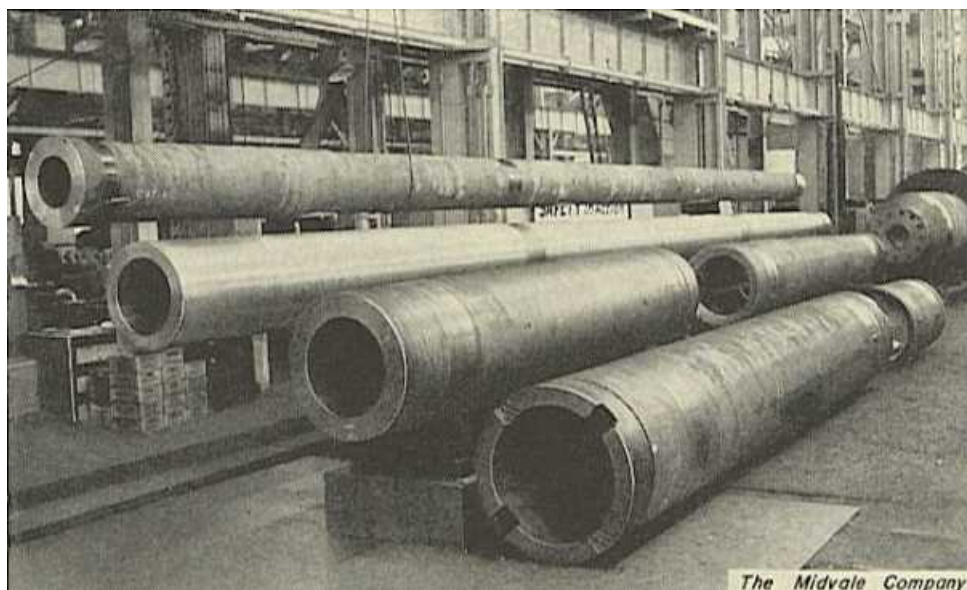
在土木工程上，水泥同樣有容易裂開的毛病，所以也就同樣可以用預力來強化。例如水平方向的水泥結構，在承重之後會有向下彎曲的趨勢，所以上半部被擠壓，而下半部被拉伸；一般是在水泥結構的下半部加上鋼筋來抗拒這個拉力，但是水泥本身基本沒有抗拉的能力，結構稍微彎曲之後就會裂開。照理說，鋼筋是有彈性的，承重離開之後會恢復原狀；然而水泥的裂紋卻不會消失，結果是雨水和氧氣得以接觸到內部的鋼筋，使之開始生鏽，長久下來，整個結構就會弱化、甚至坍塌。解決的辦法是把鋼筋稍微拉長，利用它的收縮彈性來產生壓縮水泥的預力，那麼任何拉力就必須先剋服這個預力，才能產生水泥的裂紋。這個方法叫做Prestressed Concrete（預應力混凝土），普遍使用在各種大型工程，尤其是橋梁上。實際應用上又分兩種：先張法和後張法，其差別在於拉長鋼筋是在水泥固化之前或之後來做的，物理原理則是完全同樣的。

另一個預力強化的重要應用，在於炮管的製造。火藥產生強大的膛壓，如果炮身不夠堅固，就會炸膛，而炸膛的過程，也是從內表層的裂紋開始。小型火器的身管口徑小、曲率大，天生就比較不容易炸膛，再加上對價格比較敏感，所以可以不做預力強化處理。但是大口徑火炮就不一樣，尤其是19世紀末、20世紀初的海軍炮，從6寸炮開始，如果不做好預力強化，對己方人員的危害就比對敵方還大。

最早的炮管預力強化技術比較原始粗暴，叫做Built-Up Gun（多層疊加炮？）。它先把炮管分成3-5層（最內層叫做Lining，最外層叫做Jacket，中間的叫做Tube，由內而外分成A、B、C，B Tube又可以是Hoop或Wire，詳見下文），分別製造，這其中外層的內徑總是比內一層的外徑稍微小一點（而且其實不一定是完全均勻的，亦即除了Lining的內徑之外，讓炮口端口徑略小；這是為了避免內管跟著炮彈一起發射出去）。然後從最內層開始，先把外管加熱到400°C左右（這

裏的考慮重點是要有足夠的受熱膨脹，但是又遠低於熔點，不影響鋼材的力學性質），因為膨脹使內徑暫時略大於內管的外徑，因此可以套在一起，再讓它們一起冷卻，然後再加下一層外管，周而復始。因為外層希望內層緊縮些，因而產生的預力同樣可以起防止裂紋之效。

在1892年，英國海軍採用了新一代的發射藥，叫做Cordite，其能量密度有很大的飛躍，所以對炮管的抗壓能力也有了更高一級的要求。當時的煉鋼技術，不足以產生足夠強度的鋼管，即使用了既有的多層設計，炮管仍然無法承受那麼高的膛壓。於是英國人把B Tube改爲用承受著拉力的鋼絲纏繞而成；鋼絲因為晶體結構方向和纏繞時的高拉力，可以產生更大的緊縮預力。當時日本海軍對英國人亦步亦趨，所以也引進了這門特別技術。其他的海軍，包括德、法、美、俄等等，則選擇對傳統的鋼套技術做繼續改進，例如把B Tube分成若干段，以方便做額外的強化處理，這些段落叫做Hoop，他們的海軍炮就叫做Hoop Gun（鋼套炮），而英日用的鋼絲叫做Wire，所以他們的炮叫做Wire-Wound Gun（鋼絲炮）。



上圖是美國海軍16寸50倍徑Mark 7艦炮（用在Iowa級戰列艦上，是美國最後的大口徑艦炮）的身管部件，由上到下分別是Lining、A Tube、構成B Tube的Hoops和Jacket

到了1920年代，一方面由於煉鋼技術的進步，另一方面因為前面提到的對斷裂力學和預力理論的突破，Hoop Gun的抗壓能力達到了Wire-Wound Gun的同一級別。這裏的技術細節在於Hoop和A Tube都可以先做Autofrettage（身管自緊，詳見下文）處理，而其在應用上的後果是性能進步了，價錢卻保持在顯著低於鋼絲的等級。英國海軍那時很缺錢，只好從善如流，花了幾年額外的時間來重新開發Hoop Gun。而英日之間的關係已經沒有3、40年前那麼好了，所以日本人沒有拿到新的技術，只能繼續發展他們的Wire-Wound Gun，一直到大和級的18寸主炮，仍然用的是鋼絲預力技術。

在國外的軍迷圈子裏，有一個傳說，說鋼絲炮雖然抗壓能力強，但是軸向的強度弱（因為一圈鋼絲和另一圈鋼絲之間，顯然是沒有任何強度可言的），所以用久了之後，炮身會因為重力而彎曲，射擊精度也不佳。我找不到任何實證（英軍的鋼絲炮，長度倍徑總是稍低於其他同期海軍的鋼套炮，但這不是決定性的證據，可能有其他的考慮因素），所以這有可能是早年Hoop Gun擁護者腦補出來的Urban Myth（現代傳說）；Hoop Gun真正的優勢，應該還是價錢。

二戰後，航母取代了戰列艦在艦隊中的核心地位，大口徑海軍炮的發展也就因而結束。現代最先進的身管火炮是中口徑炮，例如155毫米榴彈炮和120/125毫米坦克炮。這些口徑不須要用到多層結構，前面提到的身管自緊技術已經足夠了。所謂的身管自緊，是先把炮管適當加熱，然後從管內施加高壓；因為這個壓力受鋼材層層阻擋，越往外越弱，所以可以控制為只超出內層材料的彈性極限而產生塑性壓縮形變（同時內徑會增加，一般在6%以下）。一旦壓力被解除，結果同樣

是內層的原子擠在一起，承受預力，可以抵抗裂紋的產生。最早這個身管自緊技術用的是液壓油來產生高壓，後來進步為改口徑超出炮管原內徑的固態硬杆强行穿過。共軍似乎是在80年代才從西方（中共的155毫米和105毫米炮技術都來自奧地利，所以最可能是它）引進這項硬杆自緊技術，然後消化吸收改進；俄國因為沒有引進新軍工技術的機會，在這方面可能已經落後於中方。

【後註】我在正文裏忘了提，還有一個很常見的預力處理技術，就是噴丸：把高硬度的彈丸連續擊打在材料上，壓縮其外層。這同樣使表層的原子擠在一起，產生預力，可以抵抗裂紋的發生。它的應用很廣，包括渦輪葉片和飛機蒙皮都可以如此強化。

3 条留言

狐禪

2018-12-01 20:00:00

現在又有self-healing的材料出現。這是我看過最神奇的材料科學進展。最早知道這回事是小學三年級讀一本科幻小說時。

“

那些自修復材料都還是實驗室裏的玩物，能否實用存疑。

南山臥蟲

2018-12-04 10:52:00

說起新型材料 / 玻璃淚珠，我第一反應是：王兄可否談談 - - T1000？液態金屬，絕對吸睛呀。

“

Shape-Memory Alloy（形狀記憶合金）聽起來很好玩，但是幾十年下來還是實驗室裏的玩物，基本沒有實際上的應用。這是因為工業應用必然有強度和壽命上的要求，而這些合金是達不到的。我一再發文討論類似的議題，就在於教育群眾有關現實和科幻的差別。形狀記憶合金屬於後者。

schrodingier's cat

2019-10-11 01:51:00

坦克炮身管寿命还是很短，只有数百发，除了电渣重熔身管自紧内壁镀铬技术还有别的办法提高吗？还是因为其他技术成本问题或者影响精度而弃之不用？

“

已經到達人類材料技術的極限；美軍正想改用更強的發射藥，代價就是壽命進一步降低。