

# 熱膨脹法 扣件達人講座

## 大型螺栓的同步緊固

文/ 福岡俊道

### 前言

在使用其他方法而無法同時緊固大型螺栓或多支螺栓時，熱膨脹法就能派上用場。此法是在中空螺栓中插入棒狀的加熱器，透過加熱使螺栓伸展。因此在緊固特性上，此法和張力法(透過油壓使螺栓伸展)有許多類似之處。此外，此法可以緊固住的螺栓尺寸並沒有限制，且使用的工具較便宜。藉由這些特性，此法廣泛應用在同時緊固住多支發電渦輪機箱的專用螺栓，或是用於水電用的水車或大型幫浦的緊固作業。本文將解說熱膨脹法的緊固原理，並指出有效的適用範圍和緊固的方針。

### 緊固原理

圖一顯示的是緊固實驗中將螺栓加熱器裝入中空螺栓時的狀態。將螺栓的耦合螺紋部位的那一側朝上筆直置放，然後將加熱器置入螺栓孔穴的中央。採用螺栓加熱器的緊固程序是由4個步驟構成，如圖2所示。

- 步驟1:** 將用來緊固的物件，也就是中空螺栓，裝到被緊固物上，然後插入螺栓加熱器。
- 步驟2:** 按鈕啟動螺栓加熱器，加熱直到螺栓的延展程度達到目標值。如此就能在螺栓的頭部座面形成「間隙」，此間隙與螺栓的延展量等同。
- 步驟3:** 施加適量的著座扭力，讓螺栓的頭部座面與被緊固物的表面密合。
- 步驟4:** 透過自然冷卻或強制冷卻，讓螺栓收縮產生軸力。

當在步驟4中螺栓，針對步驟2中發生的延展量，產生相對應的收縮量時，就會生成螺栓軸力。若設定著座扭力，使其值能在螺帽座面上產生10 MPa以上的平均表面壓力的話，就能得到安定的軸力。在這一點來說，張力法也是如此。

### 軸力—加熱溫度關係式

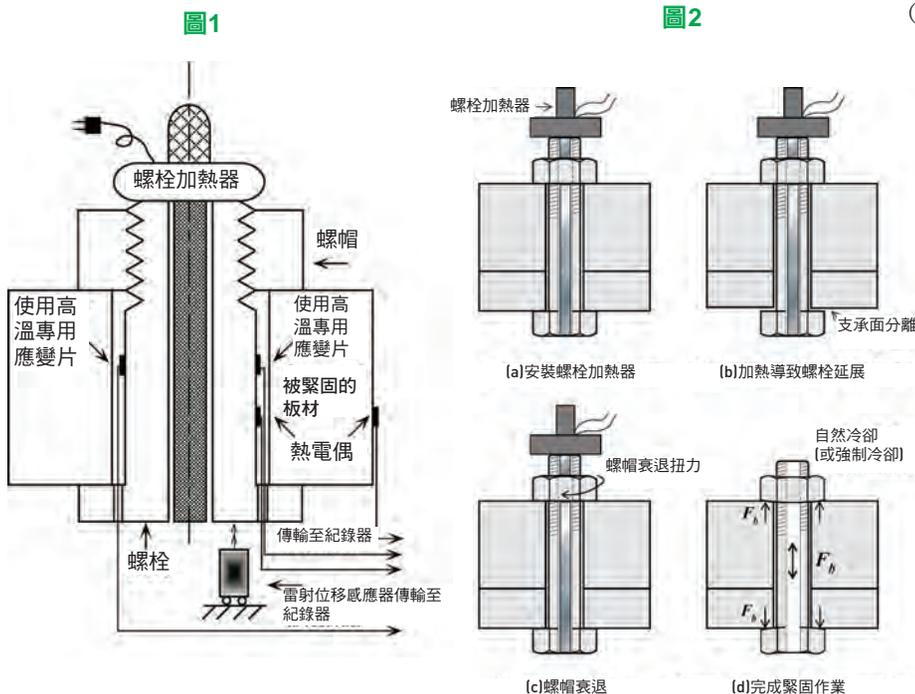
若要以高精密度施加軸力，就必須用到螺栓加熱溫度和產生之軸力的關係式。此公式是就由以下的關係導引出來的：「熱膨脹產生的螺栓延展量 $\delta$ ，是等同於栓合物體(締結體)各部位軸方向變形量之和，其中這些變形量是由發生的」。若將螺栓材料的線性膨脹係數定為 $\alpha_b$ ，將栓合物體的握持長度(grip length)定為 $L_f$ ，將螺栓的平均升溫值定為 $\Delta T_b$ ，就能透過以下公式計算出螺栓的延展量 $\delta$ 。

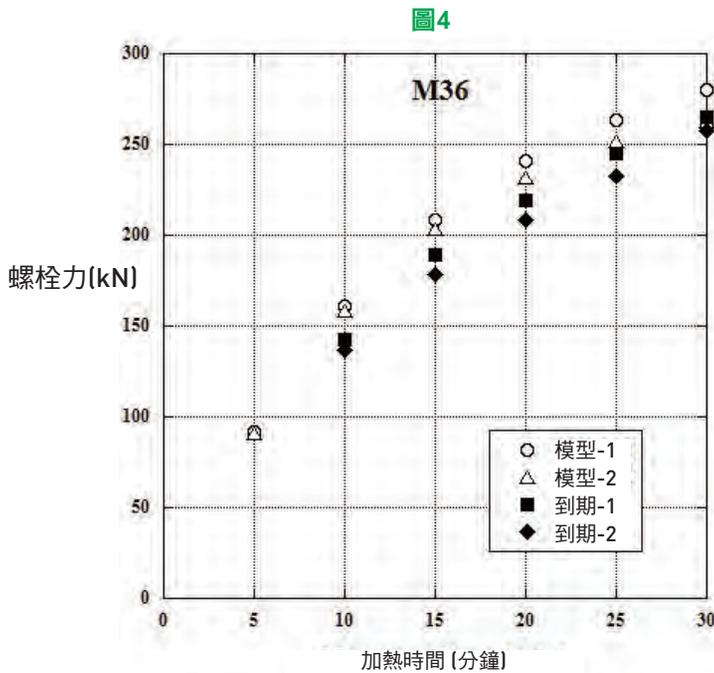
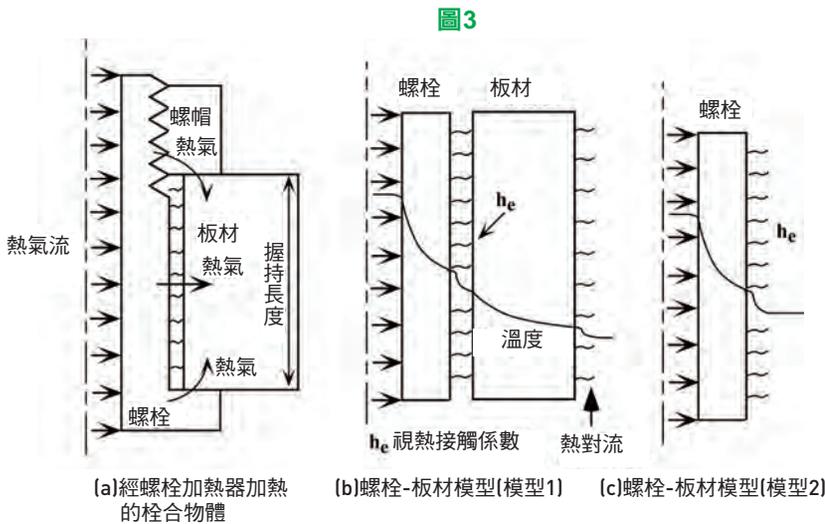
$$(1) \delta = \alpha_b \Delta T_b L_f$$

舉例來說，碳鋼，將線性膨脹係數定為 $11.8 \times 10^{-6}$ ，將加熱溫度(也就是平均升溫值)定為 $200^\circ\text{C}$ ，將握持長度定為 $32\text{mm}$ ，那麼 $0.076\text{mm}$ 。若栓合物體材質是不鏽鋼，將線性膨脹係數改為 $17.3 \times 10^{-6}$ ，那麼螺栓的延展量就會是 $0.11\text{mm}$ 。螺栓軸力 $F_b$ 所形成的栓合物體(締結體)各部位軸方向變形量之和，可以藉由我投稿的第二篇專文中「螺紋栓合物體的剛性」章節所解說的「構成螺紋栓合物體的5個彈簧常數( $k_{th}$ 、 $k_s$ 、 $k_{cyl}$ 、 $k_{hd}$ 、 $k_f$ )」來顯示出來。將螺栓軸力 $F_b$ 除以彈簧常數之後就會變成螺栓的延展量。由此，我們可以導引出以下公式。

$$(2) \alpha_b \Delta T_b L_f = F_b \left( \frac{1}{k_{th}} + \frac{1}{k_s} + \frac{1}{k_{cyl}} + \frac{1}{k_{hd}} + \frac{1}{k_f} \right)$$

針對目標軸力 $F_b$ 決定好栓合物體的形狀和材質後，就能透過以上公式計算出所需的加熱溫度 $\Delta T_b$ 。在這裡，由於 $\Delta T_b$ 是螺栓軸部的平均上升溫度，所以不容易在緊固作業中測量出來。有一個方法可以作為對策，就是先得出以下三樣要素之間的關係：容易測溫的螺栓螺紋前端、螺帽的表面溫度、螺栓軸部的平均溫度。此外，若要求得所需的加熱時間，那麼像是差分法(Finite Difference Method, FDM)和有限要素法(Finite Element Method, FEM)這類的數值解析就會很有效。圖3顯示的手法是將栓合物體變成擁有同心圓的中空原圓筒。首先，利用一次元差分法(one-





dimensional FDM)得出中空螺栓的半徑方向溫度分布。接著，利用材料力學的理論，透過溫度的分布計算出螺栓的延展量。如此，就能導引出加熱時間與所發生之軸力這兩者之間的關係式。圖4比較解析結果和實驗結果。不論是模型1或模型2，都可以用相當高的精密度推論兩者之間的關係。

## 適用範圍與緊固方針

### < 適用範圍 >

- 1) 栓合物體採用公稱直徑大的螺栓：熱膨脹法是唯一的方法可以緊固住公稱直徑非常大的螺栓。雖然熱膨脹法使用中空螺栓，但由於中空直徑小，所以強度方面沒什麼特別的問題。
- 2) 栓合物體須通時緊固多支螺栓：若使用螺栓和同數量的加熱

器，就能夠同時緊固多支公稱直徑大的螺栓。此時就能排除掉我將在下一小節解說的軸力變異，將螺栓逐一緊固時常會出現軸力變異的問題。

3) 握持長度很長的栓合物體：由於熱膨脹法是利用螺栓握持部位加熱時延展與冷卻收縮之間的差距來緊固住物體，所以若握持長度很長的話就希望能以高精密度來緊固。

### < 緊固方針 >

1) 透過栓合物體的規格和形狀，利用公式(2)算出所需的加熱溫度 $\Delta T_0$ ，才能再算出目標軸力 $F_b$ 。若可能的話，可先透過簡單的數值分析來算出大概的加熱時間。

2) 對應加熱溫度 $\Delta T_0$ 的螺栓延展量 $\delta$ 可透過公式(1)計算出來。將 $\delta$ 除以螺紋間距 $P$ 然後再乘以360度，換算成螺帽迴轉角度後將它定為緊固作業的指標。

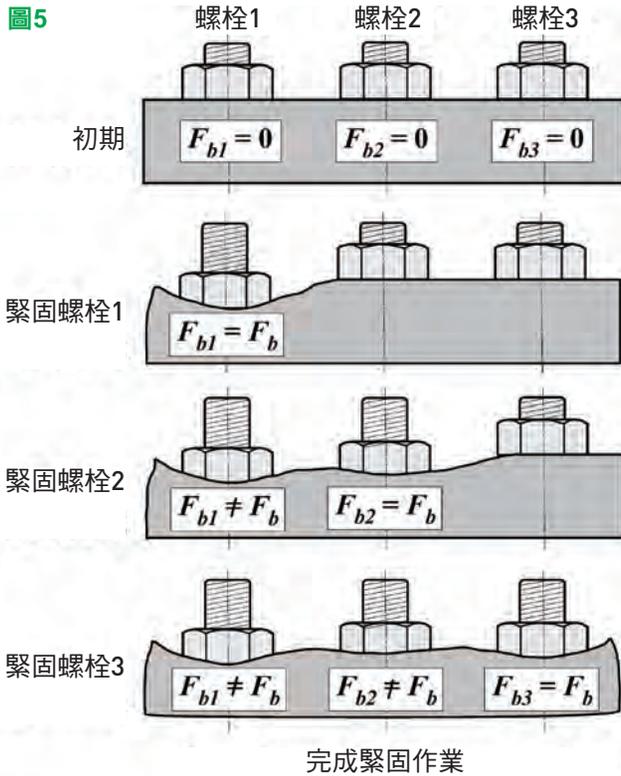
3) 將螺栓裝入栓合部位，然後開始加熱。量測螺栓的特定部位，例如螺栓的螺紋前端部位，當溫度上升值接近 $\Delta T_0$ 的同時，開始螺帽的著座作業。

4) 讓加熱器保持插入的狀態，同時執行著座作業，讓螺帽的迴轉角度變成方針(2)中求得的值。著座扭矩的設定值，是要能讓螺帽座面的平均表面壓力超過10 MPa。

移除加熱器並開始緊固作業時，必須要多加注意，因為急遽的冷卻會讓螺栓收縮，產生的軸力也會變小。方針(3)當中測量到的 $\Delta T_0$ 會依據測定的部位產生差異，所以終究只是個參考值。通常都是採用螺帽迴轉角度或是螺栓延展量來做為作業的指標。

## 多支螺栓的緊固和彈性相互用

將螺栓逐一緊固的過程中，已經完成緊固的螺栓有可能會發生軸力的變異。這種現象稱為「彈性相互作用」。圖5是透過有限要素法(Finite Element Method, FEM)解析出將3支螺栓以同一軸力 $F_0$ 逐一緊固的過程，然後將得出的變形模式放大顯示出來。將螺栓1、螺栓2、螺栓3照順序緊固時，儘管都是用目標軸力來緊固每一支螺栓，由於螺栓周圍的變形會相互影響，軸力會產生變異。若與管材專用法蘭一樣，被緊固物中含有像墊片一樣剛性低的材料，那麼將螺栓置於同心圓上時，就會出現很明顯的彈性相互作用。現在已有人提出一個手法來做為解決彈性相互作用的對策，此手法能以有限要素解析來求得一套緊固程序，讓螺栓依序緊固時產生的軸力變異轉變成最終的螺栓軸力。



### 結論

現階段，熱膨脹法是適用於特定栓合部位的緊固方式。另一方面，近年的研究也顯示此法也能適用於將螺栓橫向或傾斜放置的狀況。此外，也有人開發出能利用高頻電磁波加熱來縮短所需時間的螺栓加熱器。期望本文能有助於擴大使用熱膨脹法。

### 參考文獻

- 1 · Toshimichi Fukuoka, “Threaded Fasteners for Engineers and Design – Solid Mechanics and Numerical Analysis –”, pp.117-132, CORONA Publishing Co. Ltd. (2015).
- 2 · Fukuoka, T. and Xu, Q., 2002, “Finite Element Simulation of the Tightening Process of Bolted Joint With a Bolt Heater,” Journal of Pressure Vessel Technology, Vol.124, pp.457-464.
- 3 · Fukuoka, T. and Takaki, T., 2003, “Finite Element Simulation of Bolt-Up Process of Pipe Flange Connections With Spiral Wound Gasket,” Journal of Pressure Vessel Technology, Vol.125, pp.371-378.