

如何評估使用呼吸器病人的做功狀態

楊思雋 陳昌文¹ 張漢煜

國立成功大學醫學院附設醫院 內科部胸腔內科¹ 重症加護科

摘要

使用呼吸器最主要的原因是為了幫助氣體交換、減少呼吸功。然而，臨床醫師對於呼吸功大都只有些籠統的概念。本篇文章主要介紹：使用呼吸器病人的做功，不但可以從呼吸速率、每分鐘換氣量、呼吸型態及動脈血液氣體分析概略地來評估；更可以由坎貝爾圖 (Campbell's diagram)、壓力時間乘積 (pressure time product)、呼吸氧耗 (oxygen cost of breathing) 等生理方法來測量。此外，本文也回顧相關文獻，統整了臨床上、呼吸器設定上減少病人做功的方法，期能幫忙臨床醫師給予病人最適切的呼吸器治療。

關鍵詞：呼吸功 (Work of breath)
壓力時間乘積 (Pressure-time product)
呼吸氧耗 (Oxygen cost of breathing)

前言

臨床上，當病人進行呼吸器脫離訓練 (weaning) 時，我們常常會聽到呼吸治療師說：病人的呼吸功 (work of breath) 增加，又改回呼吸器控制模式。然而，什麼是「呼吸功」？臨床醫師大都只有籠統的概念。使用呼吸器，當然是要減少病人的呼吸功；然而，當病人和呼吸器不同步等情況發生時，使用呼吸器反而會增加呼吸功¹。本篇文章主要回顧過去的文獻，探討如何從臨床表現概略估計使用呼吸器病人的做功大小，闡述生理測量呼吸功的方法有哪些，並尋找臨床上降低呼吸功的方法。期待臨床醫師藉此能更了解如何評估使用呼吸器病人的做功狀態，讓病人獲得最舒適的呼吸器治療。

從臨床表現來評估使用呼吸器病人的做功

評估使用呼吸器病人的做功狀態最直接的方法是：從理學的檢查或實驗的診斷去推斷病人呼吸時是否費力，因為病人吸氣或呼氣時費力意味著他的呼吸功增加。Cohen 等學者研究七位拔管後因呼吸衰竭重新插管的患者²，發現吸氣肌肉的疲勞會先出現體表肌電圖的變化³，接著伴隨呼吸速率及每分鐘換氣量的提高，之後才出現胸腹呼吸運動反常 (abdominal paradox)，血中二氧化碳分壓的上升及呼吸酸中毒往往出現在呼吸速率及每分鐘換氣量開始往下下降之後。

根據上述臨床表現的變化，文獻建議²：當病人表現胸腹呼吸運動反常時，意味著吸氣肌肉已有一定程度的疲勞，臨床醫師這時須盡可

能地減少病人的呼吸功；而如果病人已經出現血中二氧化碳分壓的上升或呼吸速率的下降，立即地使用呼吸器治療則不可避免。

做功與基本的呼吸力學

在介紹生理測量呼吸功之前，我們必須先了解何謂「做功 (work，簡稱 W)」以及基本的「呼吸力學 (respiratory mechanics)」。

一、做功

以一定施力 (Force) 作用一段距離 (Distance) 即是做功的多寡。

$$W = \text{Force} \times \text{Distance} \dots\dots\dots (1)$$

既然壓力 (pressure，簡稱 P) 等同於在單位面積 (Area) 上的施力大小，我們可以把公式 (1) 替換成：

$$W = P \times \text{Area} \times \text{Distance} \dots\dots\dots (2)$$

而面積乘以距離等於體積 (volume，簡稱 V)，故公式 (2) 可被改成：

$$W = P \times V \dots\dots\dots (3)$$

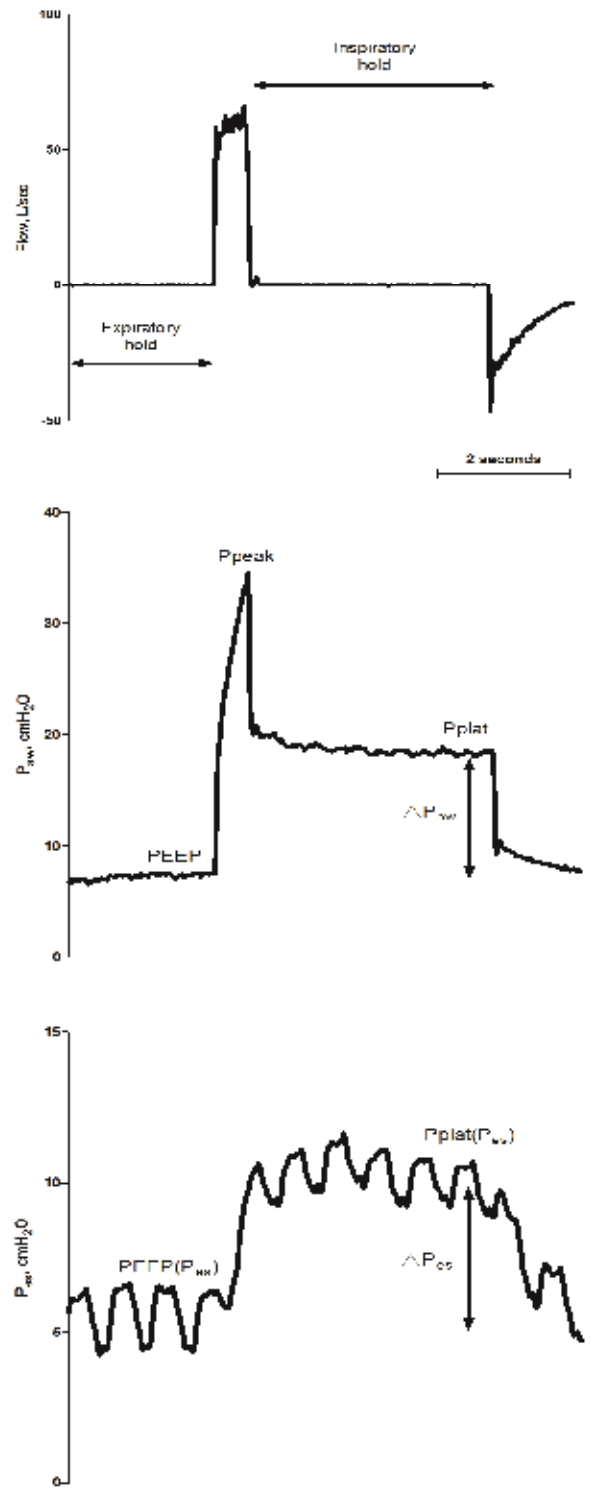
所以，做功等於施予的壓力與其造成的體積變化的積分。

$$W = \int_0^V P \cdot dV \dots\dots\dots (4)$$

從以上的公式我們可以很簡單地了解到：呼吸肌等量收縮 (isometric contraction) 時，呼吸功為零；當呼吸肌抵抗外在施力而出現位移的收縮時，才會出現正的呼吸功。

二、基本的呼吸力學

參照圖一，首先定義幾個名詞：(一) 肺泡壓簡稱 P_{alv} ，使用呼吸器的病人吸氣末暫停 (inspiratory hold) 時，由於密閉系統內無氣體流動，此時的高原氣道壓 (P_{plat}) 近似於肺泡壓 P_{alv} ；(二) 肋膜壓簡稱 P_{pl} ，這和我們放食道球量測到的食道壓 P_{es} 幾乎是相同的；(三) 靜態的胸壁彈性回復壓 (static elastic recoil pressure of the chest wall) 簡稱 P_{cw} ，在使用呼吸器的病人無自主呼吸胸壁肌肉放鬆時，我們先算出吸氣末暫停和呼氣末暫停時的食道壓壓差 (ΔP_{es})，用潮氣容積變化除之 ($\Delta V_t / \Delta P_{es}$) 得到靜態的胸



圖一：一位使用呼吸器病人的氣道壓壓差與食道壓壓差的量測。圖為病人無自主呼吸胸壁肌肉放鬆時，呼氣末暫停 (expiratory hold) 接著吸氣末暫停 (inspiratory hold) 的流速時間曲線 (上圖)、氣道壓 (P_{aw}) 時間曲線 (中圖)、食道壓 (P_{es}) 時間曲線 (下圖)。吸氣末暫停時的高原氣道壓 (P_{plat}) 減去呼氣末暫停時的呼氣末正壓 (PEEP) 可得到氣道壓壓差 (ΔP_{aw})；同理，吸氣末暫停和呼氣末暫停時的食道壓壓差為 ΔP_{es} 。 P_{peak} ，氣道峰壓。

壁順應性 (static chest wall compliance)，再用潮氣容積除以靜態的胸壁順應性才能夠得到靜態的胸壁彈性回復壓 P_{CW} ；(四) 靜態的肺彈性回復壓 (static elastic recoil pressure of the lung) 簡稱 P_L ，我們必須先用吸氣末暫停時的氣道壓與食道壓差減去呼氣末暫停時的氣道壓與食道壓差 ($\Delta P_{aw} - \Delta P_{es}$)，拿潮氣容積變化除之 ($\Delta V_t / (\Delta P_{aw} - \Delta P_{es})$) 得到靜態的肺順應性 (static lung compliance)，再取潮氣容積除以靜態的肺順應性的負值才得到靜態的肺彈性回復壓 P_L ，負值是因為它和 P_{CW} 及正壓呼吸時的氣道壓恰好是反方向的；(五) 呼吸肌收縮造成的壓力簡稱為 P_{mus} 。

在呼吸周期中的任何時間點，藉由牛頓第一定律可知：

$$P_{alv} = P_L + P_{pl} \dots \dots \dots (5)$$

$$P_{pl} = P_{CW} + P_{mus} \dots \dots \dots (6)$$

由公式 (6) 可知： $P_{mus} = P_{pl} - P_{CW} = P_{es} - P_{CW}$ ，意即呼吸肌收縮壓等於食道壓減去靜態的胸壁彈性回復壓。

坎貝爾圖 (Campbell's diagram)

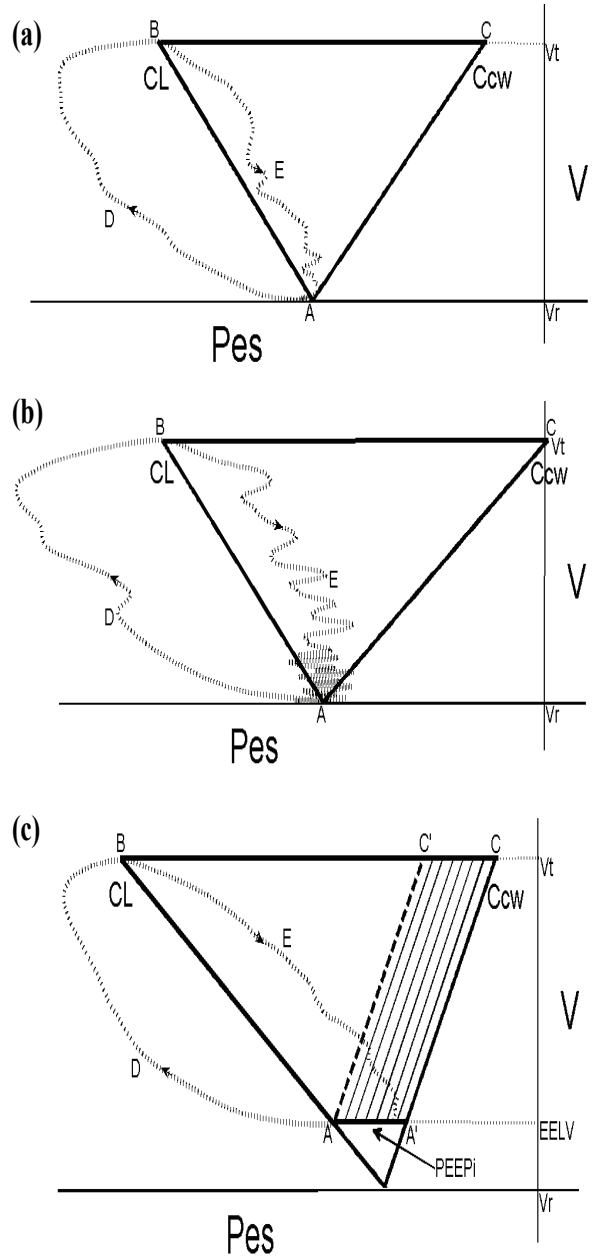
既然 $P_{mus} = P_{es} - P_{CW}$ ，我們套入公式 (4) 可得：

$$W_{mus} = \int_0^{V_t} P_{mus} \cdot dV = \int_0^{V_t} (P_{es} - P_{CW}) \cdot dV \dots \dots (7)$$

所以，如果我們畫一個圖形：橫軸為食道壓、縱軸為體積，用吸呼氣的食道壓變化對相對應的體積變化做積分，就可以得到病人的呼吸功，這就是鼎鼎有名的「坎貝爾圖」⁴⁻⁵，如圖二所示。吸氣時肌肉做功主要克服的施力有兩個⁶⁻⁷：其一為肺彈性回復力 (elastic recoil forces of the lung)，其二則為氣道阻力 (resistive forces)。胸壁彈性回復力 (elastic recoil forces of the chest wall) 在一般的潮氣容積範圍會幫助肺的撐開，故在吸氣時反倒是減少呼吸功。而呼氣則通常是被動的，吸氣時克服肺彈性回復力所做的功已足以在呼氣時克服氣道阻力。

當肺或胸壁順應性變差時，吸氣時克服肺或胸壁彈性回復力所做的功會上升，整體的呼吸功因而增加。而內因性呼氣末正壓會造成無

效做功 (ineffective work)，所須做的功也會上升。最後還有種情形就是：氣道的阻力很大，不僅吸氣時克服氣道的阻力所做的功增加，吸氣時克服肺彈性回復力所做的功已不足以在呼氣時



圖二：三位接受呼吸器脫離訓練病人的坎貝爾圖。 C_L ，靜態的肺順應性線； C_{CW} ，靜態的胸壁順應性線； V_t ，潮氣容積； V_r ，放鬆肺容積； $EELV$ ，有內因性呼氣末正壓 (簡稱 $PEEP_i$) 存在時的吐氣末肺容積。(a) 正常肺及胸壁順應性時的呼吸功等同於 $ADBCA$ 區塊的面積，包括了克服氣道阻力 ($ADBA$ 區塊) 與肺彈性回復力 ($ABCA$ 區塊) 所做的功；(b) 胸壁順應性變差時的呼吸功， $ABCA$ 區塊的面積增加，病人須做更多呼吸功；(c) 同理，肺順應性變差時 $ABC'A$ 的區塊面積也會增加；此外，內因性呼氣末正壓存在時增加的做功等同於斜線標記區塊的面積。

克服氣道阻力，呼氣時還要額外做個功克服它，如圖三。

呼吸功的單位為焦耳 (joules, 簡稱 J)，一焦耳的定義是把一公升 (liter, 簡稱 l) 的氣體推過十公分水柱壓力梯度所需的能量。我們通常用每公升換氣量的做功大小 (J/l) 來表示，也就是用每次呼吸的做功焦耳數除以該次呼吸的潮氣容積。正常值大概在 0.5 J/l 左右，0.3 到 0.6 J/l 之間都是可以接受的範圍⁸；急性呼吸窘迫症候群與慢性阻塞性肺病患者在成功拔管前量測到的平均值分別是 0.96 J/l 及 1.55 J/l⁹。另外一種表示方法則是：每分鐘的做功大小，又稱功率 (rate of work)，就是用每次呼吸的做功焦耳數乘以每分鐘換氣量，單位為 J/min。正常值大概在 2.4 J/min 左右¹⁰。Teixeira 等學者則提出呼吸

器脫離訓練前後呼吸功增加大於 0.12 J/l 可以預測拔管失敗¹¹。

其它量測使用呼吸器病人做功的方法

生理測量呼吸功的方法，除了傳統的坎貝爾圖，還有兩種方式：「壓力時間乘積 (pressure-time product, 簡稱 PTP)」及「呼吸氧耗 (oxygen cost of breathing, 簡稱 $\dot{V}O_2\text{resp}$)」。分別介紹如下：

一、壓力時間乘積 (PTP)

我們回過頭來看一下公式 (7)： $W_{\text{mus}} = \int_0^{V_t} P_{\text{mus}} \cdot dV$ ，假定吸氣過程中吸氣流速 (flow, 簡稱 \dot{V}) 是固定的，呼氣時又沒有額外的做功，該公式就可以被改成：

$$W_{\text{mus}} = \dot{V} \int_0^{T_i} P_{\text{mus}} \cdot dt = \dot{V} \int_0^{T_i} (P_{\text{es}} - P_{\text{cw}}) \cdot dt \dots\dots (8)$$

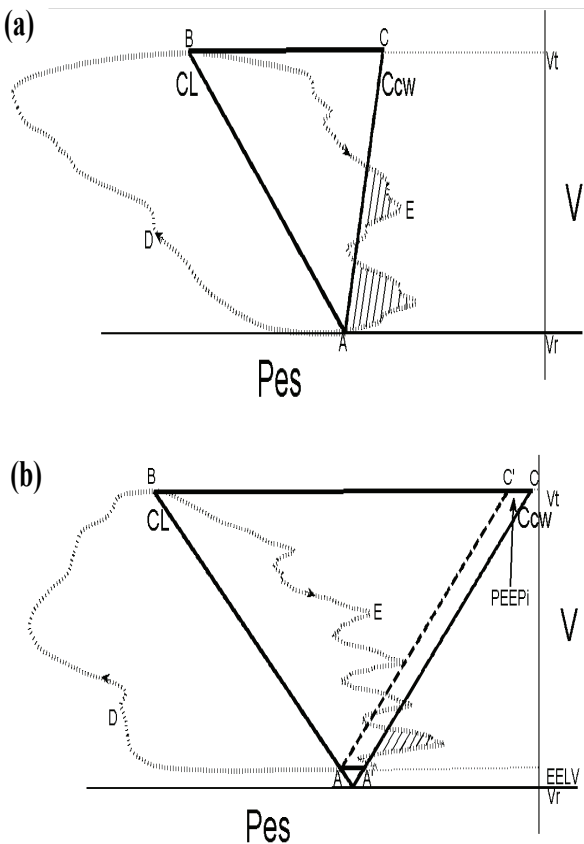
其中， T_i 為吸氣時間。由公式 (8) 可知： $\int_0^{T_i} (P_{\text{es}} - P_{\text{cw}}) \cdot dt$ 便可以忠實地反映出呼吸功的大小。而 $\int_0^{T_i} (P_{\text{es}} - P_{\text{cw}}) \cdot dt$ 也就是吸氣時的壓力時間乘積。所以，如果我們畫一個圖形：橫軸為時間、縱軸為壓力，用吸氣時食道壓與靜態的胸壁彈性回復壓的壓差變化對相對應的時間變化做積分，就可以得到病人的壓力時間乘積，如圖四¹²。從圖中一樣可看出，吸氣時肌肉做功主要得克服的施力有：氣道阻力，肺彈性回復力，以及內因性呼氣末正壓。

傳統上，我們會計算一分鐘壓力時間乘積的總和¹³，所以單位會是 $\text{cmH}_2\text{O} \cdot \text{sec}/\text{min}$ 。正常值大概在 $120 \text{ cmH}_2\text{O} \cdot \text{sec}/\text{min}$ 左右¹⁴；Jubran 等學者則提出¹⁵：在壓力支持 (pressure support) 呼吸器脫離訓練時，要盡量將一分鐘壓力時間乘積的總和控制在小於 $125 \text{ cmH}_2\text{O} \cdot \text{sec}/\text{min}$ 。

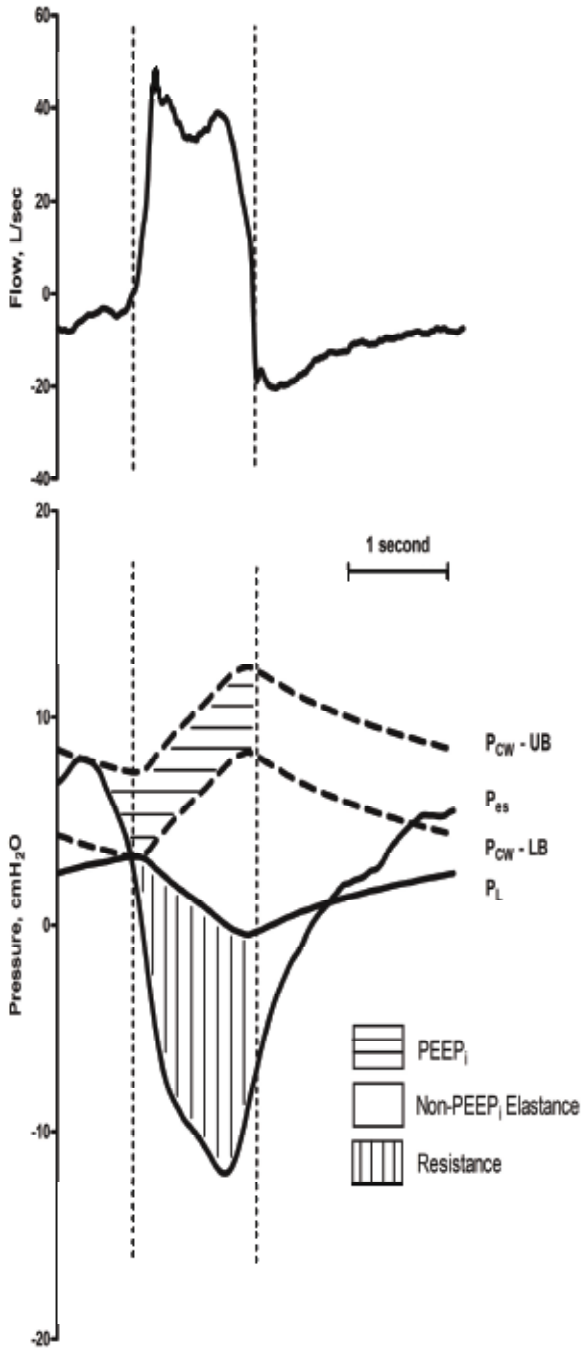
壓力時間乘積較坎貝爾圖的壓力體積乘積更容易繪製及計算；此外，對於有耗氧的呼吸肌等量收縮，壓力時間乘積較坎貝爾圖更能具體地表示呼吸肌肉的費力與否。

二、呼吸氧耗 ($\dot{V}O_2\text{resp}$)

呼吸肌的呼吸氧耗的定義是完全休息狀態的全身氧耗和呼吸狀態變化後的全身氧耗的差值 (簡稱 $\Delta\dot{V}O_2$)。我們量測全身氧耗 (簡稱 $\dot{V}O_2$) 的方式是用呼吸氣體交換法 (respiratory gas



圖三：二位接受呼吸器脫離訓練病人氣道阻力增加時的坎貝爾圖。(a) 當 ABEA 區塊部分落在 ABCA'A 區塊外側時，呼氣時就要另外做相當於圖中斜線標記區塊的功。(b) 同樣地，內因性呼氣末正壓存在時，不僅要多做圖中斜線標記區塊的功，還要加做等同於 AC'CA' 區塊面積的功。 C_L ，靜態的肺順應性線； C_{cw} ，靜態的胸壁順應性線； V_t ，潮氣容積； V_r ，放鬆肺容積；EELV，有內因性呼氣末正壓存在時的吐氣末肺容積。



圖四：一位接受呼吸器脫離訓練病人吸氣時的壓力時間乘積圖。上圖為流速時間曲線，下圖為食道壓 (P_{es}) 時間曲線；靜態的胸壁彈性回復壓 (P_{CW}) 與肺彈性回復壓 (P_L) 時間曲線也一併被繪出 (方法詳見內文)；縱軸的虛線代表吸呼氣交界流速等於零的時候。上界 (upper bound) 與下界 (lower bound) 的胸壁彈性回復壓時間曲線是平行的，只是起點不同。上界胸壁彈性回復壓 (P_{CW-UB}) 時間曲線的起點是食道壓開始往下掉的時候，下界胸壁彈性回復壓 (P_{CW-LB}) 時間曲線的起點則是流速等於零的時候。圖中橫線標記區塊等同於克服內因性呼吸末正壓所需的壓力時間乘積；白色區塊等同於克服靜態的肺彈性回復力所需的壓力時間乘積；縱線標記區塊等同於克服氣道阻力所需的壓力時間乘積。

exchange method)，也就是如下的公式：

$$\dot{V}O_2 = F_I O_2 \cdot \dot{V}_I - F_E O_2 \cdot \dot{V}_E \dots\dots\dots (9)$$

其中 F_IO₂ 和 F_EO₂ 分別是吸氣和呼氣時量測到的氧氣濃度，而 \dot{V}_I 和 \dot{V}_E 分別是吸氣和呼氣時的每分鐘換氣量。坊間就有採用此方法商用測量呼吸氧耗的間接熱量計 (indirect calorimeter)¹⁶。

呼吸氧耗的單位為 ml/L of ventilation，正常人的呼吸氧耗值介於 0.25 到 2.50 之間¹⁷；Manthous 等學者則發現¹⁸：重症的患者往往要高到其三至五倍之多。另外一種表示方法則是呼吸氧耗佔了多少百分比的全身氧耗，通常要小於 5%¹⁸；Lewis 等學者更發現¹⁹：在進行呼吸器脫離訓練時，若呼吸氧耗小於 15% 的全身氧耗可預測成功脫離。

呼吸氧耗和壓力時間乘積一樣，對於有氧耗的呼吸肌等量收縮，較坎貝爾圖更能具體地表示呼吸肌肉的費力與否；而且它不需要置放食道球量測肋膜壓。然而，在重症患者使用高吸氣氧氣濃度時，量測的誤差就會增加²⁰；此外，它和壓力時間乘積及坎貝爾圖不同的是它的值較會受到病人體重輕重、交感神經興奮、發燒等情況的影響；最後，呼吸氧耗通常只佔全身氧耗的一小部分，也就是說它算起來比較容易有誤差。

如何減少使用呼吸器病人的做功

會增加使用呼吸器病人呼吸功的因素很多，茲整理成表一。其中除了病人的因素須積極的治療疾病本身外，我們將分點探討呼吸器的設定上能否幫助減少病人的做功。

一、氣管內管的口徑大小

Brochard 等學者的研究比較插管的患者使用壓力支持為零、T 型管 (T-piece) 及患者拔管後自發性呼吸²¹，發現前兩者較後者的呼吸功率分別增加 32% 及 26%，這影響不僅和氣管內管的有無，還跟呼吸器的管路有關。此外，Bersten 等學者則認為選擇愈大口徑的氣管內管對於呼吸功的減少是有幫助的²²。而氣切管又相較於氣管內管更能減少呼吸功²³。

表一：增加使用呼吸器病人呼吸功的因素

| |
|---|
| 病人本身的因素 |
| 肺或胸壁順應性差 (如：急性呼吸窘迫症候群、大量胸腹水等) |
| 氣道阻力高 (如：阻塞性肺疾等) |
| 存在內因性呼氣末正壓 |
| 氣管內管口徑過小 |
| 呼吸器管路或潮溼器因素 |
| 呼吸器內鍵的設定 |
| 潮氣容積 ^a 或壓力支持的程度不足 |
| 呼氣末正壓設定不足 ^b |
| 使用壓力驅動 (pressure trigger) 或驅動敏感度不足 |
| 高峰流速 (peak flow) 或吸氣上升時間 (inspiratory rise time) 過慢 |
| 吸氣終結標準 (cyclining-off criteria) 過高或過低 |

^a 指在肺保護性通氣所容許的潮氣容積區間內。

^b 對於存在內因性呼氣末正壓的病人。

二、呼吸器管路或潮溼器

呼吸器管路的影響已如前述。潮溼器會不會對呼吸功造成影響呢？Iotti 等學者研究指出²⁴：人工鼻 (heat and moisture exchanger) 較之加熱潮溼器 (heated humidifier) 更增加呼吸功。

三、呼吸器內鍵的設定

(一) 潮氣容積或壓力支持的程度

理論上，急性呼吸窘迫症候群或急性肺損傷的患者應該要使用肺保護性通氣 (lung protective ventilation)，也就是潮氣容積的給予要盡可能的小。然而，在肺保護性通氣所容許的潮氣容積區間內，潮氣容積的大小會不會影響病人的做功呢？Kallet 等學者研究十位急性呼吸窘迫症候群或急性肺損傷的病人發現²⁵：當給予的潮氣容積小於 7 ml/kg 時，病人的呼吸功便有顯著地增加。

同樣地，在病人進行呼吸器脫離訓練時，壓力支持程度的提高，會讓病人的呼吸功減少²⁶；反之，如果壓力支持的程度不足，病人的呼吸功就會明顯地增加。

(二) 呼氣末正壓

Smith 等學者對十位存在內因性呼氣末正壓的病人的研究指出²⁷：適當的給予呼氣末正壓可以降低病人的呼吸功。

(三) 壓力驅動與流速驅動 (flow trigger)

在呼吸器部分輔助模式時，使用流速驅動較之壓力驅動更能減少病人的呼吸功已經是個共識²⁸⁻²⁹。而設定的驅動敏感度不夠，或著閾值過高，也會讓病人的呼吸功增加²⁹。

(四) 高峰流速與吸氣上升時間

高峰流速與吸氣上升時間是連帶影響的。當吸氣上升時間減少，高峰流速就會增加。吸氣時高峰流速增加並不是件壞事，但要小心氣道峰壓 (peak airway pressure) 過高。Bonmarchand 等學者研究十一位慢性阻塞性肺病使用壓力支持呼吸器脫離訓練的病人³⁰，發現高峰流速或吸氣上升時間愈快，病人的呼吸功愈小。另外，Chiumello 等學者研究急性肺損傷進入呼吸器脫離訓練的病人³¹，也有類似的結論。

(五) 吸氣終結標準 (cyclining-off criteria)

在病人使用壓力支持呼吸器脫離訓練時，有些呼吸器必須設定吸氣終結標準，也就是當吸氣的流速降至最高流速的多少百分比時，呼吸器會自動由吸氣轉成呼氣。Tokioaka 等學者收集了八位急性肺損傷或急性呼吸窘迫症候群的病人³²，都分別使用 1%、5%、20%、35%、40% 的吸氣終結標準，發現吸氣終結標準為 35% 或 40% 時，病人的吸氣做功有顯著的上升。Chiumello 等學者則對十三位慢性阻塞性肺病因肺炎而呼吸衰竭的病人做研究³³，卻發現相反的結果，無論壓力支持為 5 或 15 cmH₂O，吸器終結標準為 40% 較之 5% 時的吸氣之壓力時間乘積為低，其原因可能與存在內因性呼氣末正壓有關。

結 論

雖然坎貝爾圖、壓力時間乘積和呼吸氧耗較少臨床上的應用；但是從研究的立場來看，它們可以幫忙臨床醫師給予病人最適切的治療和最佳的呼吸器設定⁸。此外，了解它們後，臨床醫師對「呼吸功」就不再只是個籠統的了解。期待未來有更多的研究探討如何降低使用呼吸器病人的做功，進而增加呼吸器脫離率、減少呼吸器使用天數，甚至減少死亡率。

參考文獻

1. Ayres SM, Kozam RL, Lukas DS. The effects of intermittent positive pressure breathing on intrathoracic pressure, pulmonary mechanics, and the work of breathing. *Am Rev Respir Dis* 1963; 87: 370-9.
2. Cohen CA, Zagalbaum G, Gross D, Roussos C, Macklem PT. Clinical manifestations of inspiratory muscle fatigue. *Am J Med* 1982; 73: 308-16.
3. Gross D, Grassino A, Ross WR, Macklem PT. Electromyogram pattern of diaphragmatic fatigue. *J Appl Physiol* 1979; 46: 1-7.
4. Agostoni E, Campbell EJM, Freedman S. Energetics. In: Campbell EJM, Agostoni E, Newsom-Davis J, eds. *The respiratory muscles: mechanics and neural control*. 2nd ed. Philadelphia: Saunders 1970: 115-37.
5. ATS/ERS Statement on respiratory muscle testing. *Am J Respir Crit Care Med* 2002; 166: 518-624.
6. Bates JHT. Assessment of respiratory mechanics. In: Marini JJ, Slutsky A, eds. *Physiological basis of ventilatory support*. New York: Marcel Dekker 1998: 231-59.
7. Banner MJ, Kirby RR, Blanch PB. Differentiating total work of breathing into its component parts. Essential for appropriate interpretation. *Chest* 1996; 109: 1141-3.
8. Banner MJ, Jaeger MJ, Kirby RR. Components of the work of breathing and implications for monitoring ventilator-dependent patients. *Crit Care Med* 1994; 22: 515-23.
9. Levy MM, Miyasaki A, Langston D. Work of breathing as a weaning parameter in mechanically ventilated patients. *Chest* 1995; 108: 1018-20.
10. Cabello B, Mancebo J. Work of breathing. *Intensive Care Med* 2006; 32: 1311-4.
11. Teixeira C, Teixeira PJ, de Leon PP, Oliveira ES. Work of breathing during successful spontaneous breathing trial. *J Crit Care* 2009; 24: 508-14.
12. Jubran A, Tobin MJ. Pathophysiologic basis of acute respiratory distress in patients who fail a trial of weaning from mechanical ventilation. *Am J Respir Crit Care Med* 1997; 155: 906-15.
13. Roussos C, Zakyntinos S. Respiratory muscle energetics. In: Roussos C, ed. *The thorax, Part A*. New York: Marcel Dekker 1995: 686-749.
14. Barnard PA, Levine S. Critique on application of diaphragmatic time-tension index to spontaneously breathing humans. *J Appl Physiol* 1986; 60: 1067-72.
15. Jubran A, Van de Graaff WB, Tobin MJ. Variability of patient-ventilator interaction with pressure support ventilation in patients with chronic obstructive pulmonary disease. *Am J Respir Crit Care Med* 1995; 152: 129-36.
16. Nunn JF, Makita K, Royston B. Validation of oxygen consumption measurements during artificial ventilation. *J Appl Physiol* 1989; 67: 2129-34.
17. Donahoe M, Rogers RM, Wilson DO, Pennock BE. Oxygen consumption of the respiratory muscles in normal and in malnourished patients with chronic obstructive pulmonary disease. *Am Rev Respir Dis* 1989; 140: 385-91.
18. Manthous CA, Hall JB, Kushner R, Schmidt GA, Russo G, Wood LD. The effect of mechanical ventilation on oxygen consumption in critically ill patients. *Am J Respir Crit Care Med* 1995; 151: 210-4.
19. Lewis WD, Chwals W, Benotti PN, et al. Bedside assessment of the work of breathing. *Crit Care Med* 1988; 16: 117-22.
20. Ultman JS, Bursztein S. Analysis of error in the determination of respiratory gas exchange at varying FIO₂. *J Appl Physiol* 1981; 50: 210-6.
21. Brochard L, Rua F, Lorino H, Lemaire F, Harf A. Inspiratory pressure support compensates for the additional work of breathing caused by the endotracheal tube. *Anesthesiology* 1991; 75: 739-45.
22. Bersten AD, Rutten AJ, Vedig AE, Skowronski GA. Additional work of breathing imposed by endotracheal tubes, breathing circuits, and intensive care ventilators. *Crit Care Med* 1989; 17: 671-7.
23. Diehl JL, El Atrous S, Touchard D, Lemaire F, Brochard L. Changes in the work of breathing induced by tracheotomy in ventilator-dependent patients. *Am J Respir Crit Care Med* 1999; 159: 383-8.
24. Iotti GA, Olivei MC, Palo A, et al. Unfavorable mechanical effects of heat and moisture exchangers in ventilated patients. *Intensive Care Med* 1997; 23: 399-405.
25. Kallet RH, Campbell AR, Dicker RA, Katz JA, Mackersie RC. Effects of tidal volume on work of breathing during lung-protective ventilation in patients with acute lung injury and acute respiratory distress syndrome. *Crit Care Med* 2006; 34: 8-14.
26. Banner MJ, Kirby RR, Gabrielli A, Blanch PB, Layon AJ. Partially and totally unloading respiratory muscles based on real-time measurements of work of breathing. A clinical approach. *Chest* 1994; 106: 1835-42.
27. Smith TC, Marini JJ. Impact of PEEP on lung mechanics and work of breathing in severe airflow obstruction. *J Appl Physiol* 1988; 65: 1488-99.
28. Polese G, Massara A, Poggi R, Brandolese R, Brandi G, Rossi A. Flow-triggering reduces inspiratory effort during weaning from mechanical ventilation. *Intensive Care Med* 1995; 21: 682-6.
29. Aslanian P, El Atrous S, Isabey D, et al. Effects of flow triggering on breathing effort during partial ventilatory support. *Am J Respir Crit Care Med* 1998; 157: 135-43.
30. Bonmarchand G, Chevron V, Chopin C, et al. Increased initial flow rate reduces inspiratory work of breathing during pressure support ventilation in patients with exacerbation of chronic obstructive pulmonary disease. *Intensive Care Med* 1996; 22: 1147-54.
31. Chiumello D, Pelosi P, Taccone P, Slutsky A, Gattinoni L. Effect of different inspiratory rise time and cycling off criteria during pressure support ventilation in patients recovering from acute lung injury. *Crit Care Med* 2003; 31: 2604-10.

32. Tokioka H, Tanaka T, Ishizu T, et al. The effect of breath termination criterion on breathing patterns and the work of breathing during pressure support ventilation. *Anesth Analg* 2001; 92: 161-5.
33. Chiumello D, Polli F, Tallarini F, et al. Effect of different cycling-off criteria and positive end-expiratory pressure during pressure support ventilation in patients with chronic obstructive pulmonary disease. *Crit Care Med* 2007; 35: 2547-52.

How to Evaluate the Work of Breath in Mechanically Ventilated Patients?

Szu-Chun Yang, Chang-Wen Chen¹, and Han-Yu Chang

Division of Pulmonary Medicine, ¹Critical Care Medicine, Department of Internal Medicine, National Cheng-Kung University Hospital, Tainan, Taiwan

The main goal of mechanical ventilation is to restore the gas exchange and to reduce the work of breathing (WOB). However, most clinicians have only some general concepts for WOB. The WOB in mechanically ventilated patients can not only be evaluated from clinical presentations, but also from physiological methods such as the Campbell' s diagram, the pressure time product, and the oxygen cost of breathing. In addition, we also review the literatures and integrate ways to reduce the WOB in order to help clinicians providing the most effective use of mechanical ventilation. (*J Intern Med Taiwan* 2011; 22: 91-98)