

肌肉收縮的能量學對於運動訓練的應用

陳相榮

壹、前言

人體運動的產生乃是肌肉收縮牽引骨骼的結果。肌肉收縮包括了三種不同却彼此相關的作用：第一為中樞神經系統的衝動加諸於肌肉的刺激，第二為供應肌肉收縮能量的化學變化，第三為肌纖維結構因素的重新排列，成為較短型態。由上可知，肌肉收縮的原動力在於能量供應與轉換，進而言之，人本身為一種「人體引擎」(Human engine)，體內與生命有關的各種生理現象都必須消耗能量，舉凡呼吸動作、血液循環，甚至舉手投足、吃飯、運動等，都得仰賴能量予以推動。人體的能源，雖直接貯藏於細胞體內，然而為了維持生命現象的恒定性，非自體外不斷地補給能量不可。

本文將以肌肉收縮能源為中心，從其能量供應與轉變的路徑來探尋運動訓練的應用原理，這是做為一個體育從業人員或運動指導者最為切身的重要知識。

貳、三磷酸腺核的性質與作用

肌肉收縮的直接能源來自高能磷酸結合——三磷酸腺核(ATP)的分解，這是今天已明瞭的事實，但這個答案直到 1962 年始由大衛斯(Davies)加以證實。有關化學能量的問題早自十九世紀初葉即有許多學者研究。法國的貝納爾(Claude Bernard, 1813~78)從動物澱粉與乳酸的關係予以追蹤，終於在 1859 年實驗獲知，動物體內所含有的動物澱粉因肌肉活動而迅速消失。1907 年佛力查(Fletcher, W.M)和霍普金斯(Hopkins, E.G.)自青蛙實驗發現，肌肉內的動物澱粉與產生的乳酸成比例減少。之後，希爾(Hill, A.V.)和梅耶霍夫(Meyerhof, O.F.)於 1927 年共同發現肌肉收縮的能源動物澱粉所產生的乳酸與消失的動物澱粉是等量的，並且得知動物澱粉分解成乳酸係在乏氧狀態下發生，如肌肉在充分氧氣供應下，只有 $\frac{1}{5}$ 乳酸氧化成水和二氧化碳，其餘 $\frac{4}{5}$ 再綜合成動物澱粉。1930 年蘭斯家(Lundsgaard)發現肌肉中毒後雖無法使動物澱粉分解為乳酸，但磷酸肌素可以產生分解，故認為磷酸肌素為肌肉收縮的能源。至 1936 年，羅門(Lohmann, K.)發現磷酸化合物三磷酸腺核，並自肌肉浸出液之實驗獲知，磷酸肌素分解之前三磷酸腺核先行分解，所產生的二磷酸腺核與磷酸肌素所產生的磷酸再結合為三磷酸腺核的連鎖反應，亦即羅門反應(Lohmann reaction)。

三磷酸腺核(Adenosine triphosphate, 簡稱ATP)為儲存在細胞中的一種不安定的化學化合物，也是生物學的能量交換上非常重要的物質。ATP的分子是由腺鹼(Adenine)、核糖(Ribose)及三個磷酸鹽元素所構成的化合物。核糖之後，如連接一個磷酸基時，即構成單磷酸腺核(AMP)；如連接兩個磷酸基時，即構成二磷酸腺核(ADP)；如連接三個磷酸基時，則構成三磷酸腺核(ATP)。

ATP末端的兩個磷酸基為高能磷酸鍵(High energy Phosphate bonds)，以~符

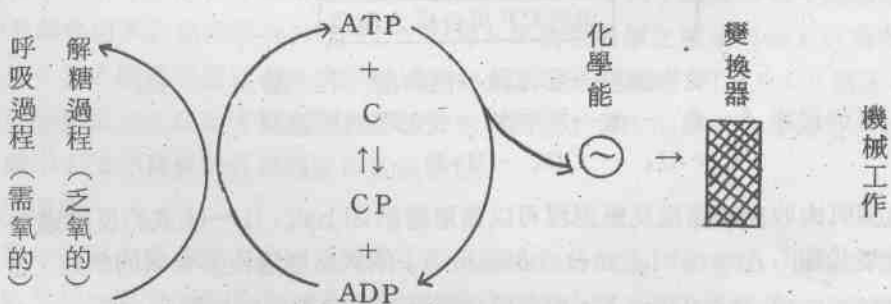
號表示之。ATP的磷酸基裡游離一分子磷酸時，即成爲ADP，再游離一分子磷酸後成爲AMP，細胞中經常有ATP、ADP、AMP三種分子存在。

ATP 儲存在所有細胞的細胞質和核漿裡，需要能量予以運作的全部生理機轉均直接得自ATP 儲存。它可以利用食物裡的游離能合成高能磷酸鏈，然後又可從這些鏈裡釋放到許多生理功能程序中，故ATP被稱爲能的轉運站，哈伯（Harold Harper）更把ATP稱爲細胞的錢幣（Currency of the cell），因它可再三被花費又可重新製造。總之，ATP最主要的用途有三點：（一）可用於合成重要的細胞元素，（二）可用於肌肉收縮，（三）可用於活性輸送（Active transport）穿越細胞膜。

叁、肌肉收縮的能量供應

肌肉收縮的直接能源爲ATP分解所產生的能量，亦即在ATP所具有的三個磷酸基之中，最後兩個爲高能磷酸結合，當ATP水解時，游離一分子磷酸（ $\sim P$ ），即成爲ADP，並產生大量能量（8000 cal），這種能量由化學能轉變成機械能被用於肌肉收縮。

然而，身體的肌肉中所儲存的ATP量畢竟有限，僅能維持最大的肌肉收縮不到一秒鐘，因此在ATP分解的同時，必須不斷的有新的ATP合成，這種緊急機轉有賴於另一種在肌肉中含量較多的高能磷酸化合物——磷酸肌素（Creatine phosphate，簡稱CP）。當CP分解時即成爲磷酸和肌素以及大量能量，這種能量可促使ATP分解所產生的ADP與CP分解的磷酸再綜合成ATP。如ATP在肌肉收縮時快速分解，那麼必須繼續不斷的自儲存的CP裡分解並釋放能量，使ADP與P再合成ATP以因應需要，直到CP耗盡爲止。這個反應過程爲： $ADP + CP \rightleftharpoons ATP + C$ ，就是羅門反應（Lohmann reaction），如圖一。因爲ATP與CP的分解爲乏氧的（Anaerobic）反應，也不產生乳酸又稱爲非乳酸機轉（Alactacid mechanism）。從羅門反應可知ATP雖可藉由CP分解再合成，但若CP耗盡後即無能爲力，故必須依賴另一種能源予以補充，此即動物澱粉（Glucogen）分解的能量可再合成CP。



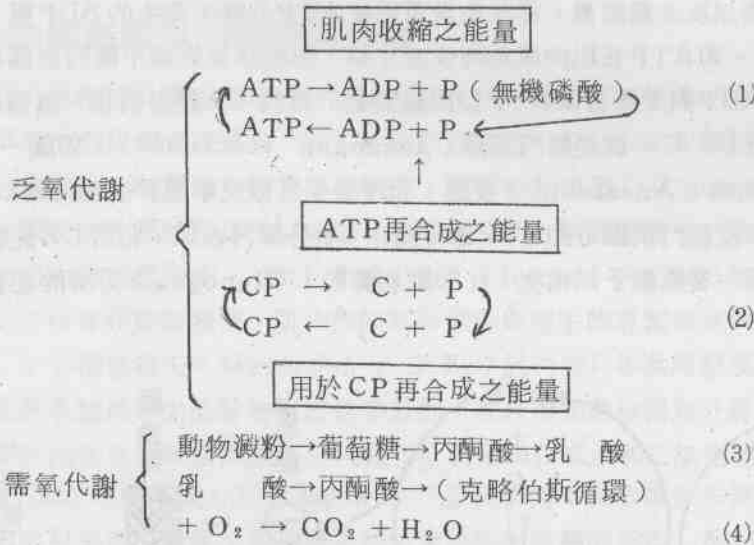
圖一、表示羅門反應之能量遊離

動物澱粉爲葡萄糖的一種儲存形成，主要的供應是在肝臟及肌肉。動物澱粉的分解可分爲兩種過程：一爲無氧的情況下，動物澱粉分解至乳酸爲止的醱酵解過程（Glycolysis）；一爲有氧的情況下，自乳酸分解爲 CO_2 和 H_2O 的呼吸過程（Respiration）。兩種過程互

爲比較，最大不同點爲：前者(一)不需氧氣，(二)產生較少量的ATP，(三)僅用碳水化合物（動物澱粉或葡萄糖）做爲燃料，此外，這個過程的終產物爲乳酸，故稱爲乳酸機轉（lactacid mechanism）或乳酸系統（the lactic acid system）；後者(一)必須有氧的充足供應，(二)產生較大量的ATP，(三)能使用三大營養素（碳水化合物、脂肪及蛋白質）爲燃料，此過程最後氧化成 CO_2 和 H_2O ，故稱爲需氧機轉（Aerobic mechanism）或氧氣系統（The Oxygen System）。茲將兩種過程進一步說明如下：

(一)醱酵過程 動物澱粉在乏氧下分解時，先分解爲葡萄糖，經磷酸六碳糖、磷酸三碳糖，丙酮酸以至成爲乳酸。簡言之，醱酵作用即是葡萄糖分子分解爲兩個分子丙酮酸之意。在這過程約可產生 4 莫耳ATP，其中 2 莫耳用於葡萄糖早期分解，故淨得 2 莫耳ATP。另外此過程所釋放能量有助於CP的合成。由於這個過程的終產物是乳酸，通常新鮮狀態的肌肉所含乳酸祇不過 0.015% 而已，一旦達到 0.3% 時，肌肉的收縮勢將終止，故乳酸乃成爲限制運動的重要因素。

(二)呼吸過程 動物澱粉在醱酵過程分解產生的乳酸，在氧氣供應下，一部分經由丙酮酸進入克略伯斯循環（Krebs cycle）完全氧化成 CO_2 和 H_2O ，並釋放能量使其餘 $\frac{1}{2}$ 乳酸再合成動物澱粉。在此過程可淨得 38 莫耳ATP。由此可知，動物澱粉在氧化代謝所產生的能量要比乳酸系統高十九倍。



有關肌肉收縮的能量反應過程可以簡單歸納如上式，(1)~(3)式的反應過程不需要氧，故稱爲乏氧代謝（Anerobic metabolism）；(4)式反應過程需要氧的供應，故稱爲需氧代謝（Axerobic metabolism）。而兩種代謝過程共有動物澱粉糖化（Glycogenolysis）與醱酵解（Glycolysis）的共同徑路。在乏氧情況，僅能經(3)式分解至乳酸爲止，並產生少量能量，但在氧氣供應下則如(4)式之反應，供給較大量能量。從以上能量供應過程可知每個過程之主要目的在於獲得ATP，蓋因肌肉收縮的最直接原動力即是ATP分解所產生的能量，而ATP除了肌肉細胞的含量外，主要是由三種路徑提供，亦即(2)式非乳酸機轉（ATP-CP系統）、(3)式乳酸機轉（醱酵解過程）以及(4)式需氧機轉（氧氣系統）。

肆、乏氧與需氧運動的生理反應

所謂乏氧的運動，其能量供應徑路包含非乳酸機轉（ATP—CP系統）和乳酸機轉；需氧運動係指需氧機轉的能量供應。

一、非乳酸性運動

瑪格麗亞（Margaria）認為ATP與CP的能量容量，每Kg體重相當於100 cal，能量產生速度大約是13 cal/Kg 體重/sec，故能量最大限度動員的時間約為7.7秒。例如短距離之起跑衝刺，投擲及跳部等僅需數秒來完成的運動，都需應用這種能量供應系統，像這種極短時間而劇烈的運動，非但不需氧氣供應，同時也是供給肌肉應用最為快速的ATP來源。由於這種系統的運動並不受到醣酵解過程和氧化過程的影響，當然不致發生乳酸積聚，故稱非乳酸性運動。像這種數秒鐘的運動，肌肉中的ATP和CP含量即成為限制非乳酸運動能力之因素。通常肌肉中ATP、CP含量與肌肉量成比例，因此短距離運動腿部肌肉的發達至為有利。

二、乳酸性運動

此過程的能量容量約為230 cal/Kg 體重，能量產生速度為7 cal/Kg 體重/sec，故最大限度動員時間約33秒，如加上ATP與CP的持續時間7.7秒，總共為41秒左右。例如100 m～400m 短距離全力賽跑時，所需能量僅賴ATP與CP之分解當然不足，加上氧氣幾乎無法供應情況下，勢必動用乳酸機轉再合成ATP及CP。由於其最終產物為乳酸，因此這種數十秒的全力運動即為乳酸性運動。自其能量供應機轉而言，肌肉中的動物澱粉量及耐酸能力即為限制乳酸運動能力的因素。

從身體資源（Physical resources）的立場而言，最大氧債（Maximum Oxygen debt）即為乏氧的運動能力之指標。在負荷強度較大無法成立穩定狀態的運動，氧攝取量無法符合氧需要量，運動中所引起的氧不足額（Oxygen deficit）需在恢復期內予以償還，像這種運動後超出安靜時的氧攝取量即為氧債。而在強度較低穩定狀態雖可以成立的運動，運動初期也會產生氧不足額，待穩定狀成立時氧的供求即可平衡。運動中氧不足額時期中，主要是以非乳酸機轉和乳酸機轉提供ATP。因此，氧債依乳酸之積聚與否，分為非乳酸性及乳酸性氧債。非乳酸性氧債旨在提供能量以補充運動時被耗盡的ATP及CP儲存；乳酸性氧債則在提供能量以補充運動中被耗盡的動物澱粉，促使乏氧的醣酵解過程產生可逆反應，亦即轉變運動中大部分積聚的乳酸還原為動物澱粉。

三、需氧性運動

需氧性運動能力的大小，其關鍵在於氧氣的充分供應，易言之，即是氧氣的輸送系統為最重要的生理因素，這種氧氣輸送包含心血管系統及呼吸系統的機能。一般而言，在低於最大速度的長時間運動時，其能量供應以需氧機轉佔據優勢，從而能有充分時間輸送氧氣給肌肉細胞，順序自運動中供給大部分ATP。

自身體資源而言需氧性運動能力以最大氧攝取量（Maximum Oxygen intake）為最重要指標，在持續性運動中，氧攝取量如能符合氧需要量，則運動即可繼續下去，直至需氧機轉的能源被耗盡為止。

伍、能量供應比例對於運動訓練的應用

輕度運動時，所需能量幾乎是得自需氧的過程，因為仰賴肌肉中所儲存的氧加上來自呼吸循環的氧，即可供應需求。中等強度運動時，乏氧的過程提供運動初期的能量，直到需氧的過程接替完全供應能量需要為止，這種運動初期氧攝取量的緩慢增加，係因呼吸循環系統的緩慢調整，亦即氧氣運送系統對運動緩慢調整之故。運動更為劇烈時，乏氧的過程勢將取而代之，換言之，當工作負荷增加時，乏氧的能量代謝即擔負更大任務。然而乏氧代謝的結果，必將使得血液中乳酸積聚，運動被迫停止。

運動時的能量供應，乏氧反應和需氧反應均可供應 ATP，但比例輕重則依運動強度與時間而異。短時間強度大的運動，如 100 m、200 m、400 m 等，其能量供應途徑以乏氧反應佔主要部分，亦即由非乳酸機轉（ATP-CP 系統）及乳酸機轉來供應。但長時間低於最大強度（Submaximal）的運動，諸如 5000 m、10000 m 和馬拉松等，其能量供應主要是由需氧機轉供給。乏氧反應可能在運動初期未達穩定狀態之前及最後衝刺階段參與供應，但所佔比例很少。在乏氧與需氧運動兩類型中間的項目時，其能量供應路徑究竟那一種能量所佔比較大，是很難決定的問題。主要原因是，迄今為止到底那一種因素決定能量產生過程之路徑，本質上還不清楚。故而實驗結果往往不盡相同，以致相等距離、時間的運動項目，乏氧與需氧路徑所佔比例也不同。

根據阿斯特蘭（Astrand, P. O.）所做報告，以最大努力所做的大肌肉運動項目時，分別自需氧及乏氧過程所提供的能量。工作時間自 10 秒增至 2 分時，乏氧能量比需氧能量更為重要，大約在 2 分時，乏氧與需氧能量之百分比為 50 比 50，隨着延長工作時間需氧能量漸趨重要。他並認為一個人同時取得需氧及乏氧過程的最高能力是罕有之事，因此表一的分析不宜奉為圭臬。（參照表一）

加賀谷令被測者用各種不同速度在電動測跑器跑至精疲力竭（All-out running on a treadmill）實驗，發現速度大持久時間較短的運動，氧攝取量的比例較低，持久時間越長則氧攝取量的比例越高。而且認為在 3 分鐘左右時，氧攝取量與氧債比例約各佔 50%。

表一 最大努力運動時自需氧和乏氧過程所提供的能量及百分比

（採自 Textbook of work physiology 1970）

過 程	工 作 時 間 （最大努力）							
	10秒	1分	2分	4分	10分	30分	60分	120分
乏氧的								
千 卡	25	40	45	45	35	30	20	15
百 分 比	85	65-70	50	30	10-15	5	2	1
需氧的								
千 卡	4	20	45	100	250	700	1300	2400
百 分 比	15	30-35	50	70	85-90	95	98	99
總 計	29	60	90	145	285	730	1300	2400

另外 Mathews 和 Fox 之觀點，1500 公尺和 2 英哩（3200 公尺）的徑賽項目，自乏

氧和需氧路徑所供應能量百分比大約相等，但得自需氧的能量比例稍多。（參看圖一）。尼特（ Nett ）與魯賓遜（ Robinson ）兩人的所做報告（表二）與上面幾人之觀點甚為接近。

表二 各種不同距離徑賽項目氧需要量以及氧攝取量與氧債之比例

Nett; Robinson			
項 目	全 部 氧 需要量(ℓ)	得 自 氧 攝取量(ℓ)	得 自 氧 債 (ℓ)
馬拉松	763.0	745.0	18.0
2hr15min		97.5%	2.5%
10000m	178.0	160.0	18.0
29:00min		90%	10%
5000m	90.0	72.0	18.0
		80%	20%
2mi	40.0	22.0	18.0
9:00min		55%	45%
1500m	38.0	20.0	18.0
3:40min		52.5%	47.5%
800m	27.6	9.6	18.0
1:45min		35%	65%
800m	27	9.0	18.0
2:00min		33.3%	66.6%
400m	22.1	4.1	18.0
45:0sec		18.5%	81.5%
200m	20.0	1-2	18-19
		5-10%	90-95%
100m	8-10	0	8-10
		0%	100%

圖一 為徑賽項目需氧及乏氧能源所佔百分比



做為一個運動教練在擬定訓練計劃時，首先要考慮的先決問題為運動項目或運動時間的能量供應，究竟是乏氧反應或需氧反應為主，然後才致力於訓練乏氧或需氧的能力，如果兩種反應所佔重要性接近時，在實施上較為困難，但應使用乏氧及需氧兩種訓練原理，所佔比例多者較為加強才是。茲以表三 440 碼及馬拉松項目為例，440 碼選手除了花費 5% 時間發展

氧氣系統外，其餘 95% 時間致力發展 ATP-CP 和乳酸系統；馬拉松選手需以 10% 時間發展 ATP-CP 及乳酸系統，另外 90% 時間用來發展氧氣系統。表三雖為徑賽運動而設計，但對其他項目可以運動時間為標準，如以 4~5 分的游泳項目為例，那麼參考表三訓練比例，速度 20%，氧氣系統 25% 及乏氧能量系統 55%，訓練的原理並無改變。

表三 用於發展各種徑賽項目之三種能源系統的訓練時間百分比 (Wilt)

項 目	時 間 (分:秒)	速 度 (ATP-PC 系統)	乏氧的能量 (速度+乳 酸系統)	需氧的能量 (氧氣系統)
馬 拉 松	135:00至180:00	5%	5%	90%
6 英 里	30:00至 50:00	5	15	80
3 英 里	15:00至 25:00	10	20	70
2 英 里	10:00至 16:00	20	40	40
1 英 里	4:00至 6:00	20	55	25
880 碼	2:00至 3:00	30	65	5
440 碼	1:00至 1:30	80	15	5
220 碼	0:22至 0:35	95	2	5
100 碼	0:10至 0:15	95	3	2

採自 Fall, H. B. (ed.) : Exercise Physiology. New York, Academic Press, 1968, P.411

陸、結 論

肌肉乃是一種將化學能轉變成機械能的機器。當肌肉收縮之直接能源 ATP 分解時，即產生大量能量使肌纖維收縮。在供應 ATP 的能源上，包含非乳酸機轉，乳酸機轉和需氧機轉。前兩個系統屬於乏氧的過程，後一個系統則屬於需氧過程。

非乳性的機轉 (ATP-CP) 最多約能維持 7 秒，應用瞬發力的運動，如跳部項目、起跑等能量供應得自這個系統。乏氧的能量供應 (非乳酸加乳酸機轉) 約能持續 41 秒，凡短時間而強度大的運動項目，如短距離，其能量供應主要是乏氧代謝。需氧的機轉可以持續較長時間，凡長時間強度較低運動，如馬拉松，主要是由需氧反應供應能量。另外，介於需氧與乏氧反應之間的運動，訓練計劃應根據佔優勢的能量路徑特別強化。

根據實驗得知，如欲促進乏氧的能力，最好的訓練方法是以最大努力持續約 1 分鐘，休息 4~5 分，反覆 4~5 次。相對的，在低於最大強度下持續 3~5 分，以相等時間休息或輕度活動後再三反覆，即可增進需氧能力。

1. DeVries, H.A. : Physiology of Exercise for Physical Education and Athletics, 1975, Wcb Company Publishers.

2. Karpovich, P.V., and Sinning, W.E.: Physiology of muscular activity,

- 1971, W. B. Saunders Co.,
3. Astrand, P. O., and Rodahl, K.: Textbook of Work Physiology, New York, 1970, McGraw-Hill Book Co.,
 4. Guyton, A. C.: Textbook of Medical Physiology, 1971 W. B. Saunders Co.,
 5. Mathews, D. K., and Fox, E. L.: The Physiological Basis of Physical Education and Athletics, W. B. Saunders Co., 1971.
 6. Johnson, W. (ed) : Science and Medicine of Exercise and sports. Harper & Row, Publishers, New York, 1960.
 7. Morehouse, J. E., and Miller, A. T. : Physiology of Exercise, St., Louis, 1971. The C. V. Mosby Company.
 8. Fred Wilt : Training for Competitive Running in Fall, H. B. (ed.) : Exercise Physiology New York, Academic Press, 1968. P.395-413
 9. David R. L. : Physiology and Physical Education in Physical Education An interdisciplinary Approach, The Macmillan Co., New York, 1972.
 10. R. Margaria : Basic energy Changes in different muscular activities, in Proceedings of international Congress of Sport Sciences, 1964. P.158-165.
 11. Tuttle, W. W., and Schottelius, B. A. : Textbook of Physiology, 1969.
 12. 石井喜八等：運動生理學概論，大修館，1975.
 13. 石河利寛：走る本，徳間書店，1975.
 14. 眞島英信：生理學，文光堂，1967.
 15. 猪飼道夫：運動生理學入門，體育の科學社，1967.
 16. 名取禮二：現代スポ・ツ生理學，日本體育社，1968.
 17. 朝比奈一男，中川功哉：運動生理學，大修館1969.
 18. 猪飼道夫，廣田公一：運動の生理，大修館書店，1966.
 19. 猪飼道夫，杉本良一，石河利寛：スポ・ツの生理學，同文書院，1960.
 20. 猪飼道夫編著：身體運動の生理學，杏林書院，1973.
 21. 猪飼道夫編：人體生理學，大修館書店，1969.
 22. 兒玉俊夫等：スポ・ツ醫學入門，南山堂，1965.
 23. 石河利寛，猪飼道夫譯：運動の生理學，ベ・スポ・ル・マガジン社，1963.
 24. 伊藤信義：體育醫學概説，東山書房。
 25. 淺見俊雄，窪田登共譯：體力づくり教本，ベ・スポ・ル・マガジン社，1972.

26. 石河利寛：スポーツとからだ，岩波新書。
27. 阿久津邦男：運動生理学序説，犀書房，1974.
28. 古藤高良：走の科学，不昧堂，1975.