

156488

基本館藏

工業爐理論基礎

上 冊

И. С. 那扎洛夫 著

东北工学院冶金系冶金爐教研組 譯



重工業出版社

工業爐理論基礎

上 冊

氣體力學

И. С. 那扎洛夫 著

東北工學院冶金系冶金爐教研組 譯

重工業出版社

本書係根據蘇聯國立黑色與有色金屬科技書籍出版社 (ГОСУ-ДЕРЖАСТВЕННОЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО ЛИТЕРАТУРЫ ПО ЧЕРНОЙ И ЦВЕТНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ) 出版的耶扎洛夫 (И. С. НАЗАРОВ) 著“工業爐理論基礎” (ОСНОВЫ ТЕОРИИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПЕЧЕЙ) 1941 年版譯出，可作高等工業學校冶金系同學和冶金工廠工程技術人員特別是從事冶金爐熱工工作的同志們的參考。

中譯本分上下兩冊出版。上冊內容為氣體力學，下冊為傳熱學。

參加本書翻譯工作的是東北工學院冶金系冶金爐教研組陸鍾武、陸伯之、任世輝、池桂馨、李峻等同志。並由陸鍾武和李承仁兩同志作俄文校對。

И. С. НАЗАРОВ
ОСНОВЫ ТЕОРИИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПЕЧЕЙ

ЧАСТЬ I
МЕХАНИКА ГАЗОВ
Металлургиздат (Москва 1941)

* * *

工業爐理論基礎

[上冊 氣體力學]

東北工學院冶金爐教研組 譯

重工業出版社 (北京灯市口甲45號) 出版
北京市書刊出版業營業許可証出字第〇一五號

* * *

重工業出版社印刷廠印

一九五五年九月第一版

一九五五年九月北京第一次印刷 (1-1,870)

一九五六年三月北京第二次印刷 (1,371 2,383)

開本 1092 × 1/25 • 168,000 字 • 7 $\frac{15}{25}$ 印張 • 定價 (9) 1.58 元

書號 6313

* * *

發行者 新華書店

上 冊 目 錄

原編者的話.....	4
作者的話.....	5
氣體力學緒論.....	6
第一章 壓 頭.....	18
第二章 各壓頭之間的關係.....	25
第三章 流體流動性質.....	33
第四章 壓頭損失.....	39
I 摩擦壓頭損失	39
II 局部阻力	46
第五章 氣體、蒸汽通過孔隙、噴嘴的流動.....	67
I 低壓下的氣體流動	67
II 高壓下的氣體流動	81
第六章 使氣體流動的裝置.....	95
I 自然通風	96
II 人工抽氣	101
III 噴射器的理論和計算.....	105
IV 鼓風機.....	121
第七章 氣體力學方面的計算例題.....	134
I 壓延用連續式加熱爐的氣體力學計算	134
II 平爐爐內氣體力學的計算	150
III 噴射管的計算	166
附錄：1 阻力係數	170
2 鼓風機的規格	180

原編者的話

向讀者推薦的本書包括十分詳細十分系統的材料。這些材料闡明了工業爐原理的基本問題，如像：氣體動力學、對流傳熱、傳導傳熱和爐膛內輻射傳熱等，對於冶金爐是最相宜的。

利用這些材料即可進行有關爐子設計和經濟方面的必要的計算與相當準確的技術計算。本書基本上供高等技術學校的學生和冶金工業企業的工程技術人員閱讀。書中某些章節（噴射、爐膛內輻射熱交換的條件分析等）係作者初次發表，對於爐子及氣體熱工專家也有一定的益處。至於書中各章所舉之例題，水平較低的亦可通曉。

但是，有必要指出本書的一些缺點，可惜這些缺點在編訂時沒有得到校正。首先，本書缺乏在最近的時期內國內許多學校（中央空氣流體動力學學院、中央鍋爐透平機學院、蘇聯熱工專科學校、蘇聯熱工專科學校烏拉爾分校、中央機器製造科學研究院、德涅泊爾—彼得羅夫斯克冶金學院、及科學院鋼設計局和研究所）所發表有關氣體動力學和傳熱方面的著作及國外研究家在許多問題理論水平較高的著作。其次，作者在個別的問題上闡述得較簡單，致使各複雜現象和過程的概念不甚全面。最後，由於作者很少指出所援引的參考資料，讀者對個別問題難於作深入的瞭解。

鑒於爐子理論方面的系統材料極感缺乏，我們認為本書的出版是適當的。我們希望本書對工廠工程技術人員提高業務水平能提供一定的幫助並成為高等學校學生「爐子原理」課的補充教材。

作者的話

工業爐已經存在數百年了，然而它們的構造和操作方面却不能認為是十分完善和符合最新技術的要求的。這種情況或許可作這樣的解釋，即爐子經濟乃是技術領域的一個特種部門，它要求統一地科學地處理爐子熱工的所有問題，而對這一點直到目前沒有給予應有的注意，結果爐子的工作往往停滯於較低的水平。

在現有的爐子中間，冶金生產用爐（平爐、軋鋼用爐、鍛造用爐等）是最常見的。但遺憾的是這些爐子的發展水平很低。

工業爐的正確的設計和操作，成品必要生產率和質量的保證諸問題首先是與爐內氣體流動過程和熱交換過程緊緊相聯繫着的。

如果說，熱過程在整個繁雜的冶金過程中在生產成品的總的耗費上是不足道的；那麼，就其對產品的生產率和質量的影響而言却是相當大的。這一點在斯達漢諾夫運動期間鮮明地實證了，當時爐子的工作能力很差，因而常常阻碍生產率的進一步提高。

瞭解氣體流動的規律和熱交換過程並善於把這方面的知識用來解決一系列實際問題是正確地設計和管理爐子的基礎。

本書的目的在於使讀者瞭解爐子氣體力學和工業爐傳熱過程的基礎及各節中的主要計算。

作者不苛求全面的敘述，只想簡要的闡明基本的概念，不把個別問題複雜化。

氣體力學

緒 論

在各種用途不同的工業爐裡，我們首先遇到的問題便是氣體流動的問題。

大部分爐子的熱能來源是固體、液體、及氣體燃料，它們燃燒以後會放出熱量，其產生之燃燒生成物在爐膛中應該儘可能地多放出一些熱能，以供材料的加熱或者加熱熔化之用。

燃燒生成物將其一部分熱能放出後就從爐膛裡排出去。

如果廢氣出爐溫度太高，則必須再將其中熱能收回。為此應將廢氣通入一個廢熱利用器中，然後再經過煙道排入大氣。

在廢氣流動的途中，管道系統對它有一定的阻力，所以必須加上一個力量才能把廢氣排出。氣體流動所受的阻力與一系列因素有關，主要的是氣體的流量，它的溫度，氣體通道的尺寸及形狀。很顯然，氣體流動所受的阻力是與爐子構造有密切聯繫的。如果氣體通道尺寸很大，那末氣體所受阻力就不會大，氣體流動所必須消耗的能量不大，那末這種爐子的建造費用就較大。反過來說，如果氣體通道尺寸很小，其建造費用不大，但是爲了要氣體流動需要很大的能量。顯然地，必定有這麼一個最合算的尺寸與阻力的配合。所以這個關鍵是須要我們詳細研究的。

熱交換過程與氣流的性質、速度及方向也有連繫。流動不同也能使熱交換改進或變壞，因而也影響到爐子的生產量。

熾熱的廢氣是否均勻地沖在被加熱體上這一問題，也與材料加熱的質量很有關係。

燃料燃燒時必需供給適量的空氣。燃燒時所能達到的高溫以及單位重量的被熱體所需的燃料消耗量是決定於燃料完全燃燒的程度及過剩空氣的。最合理的燃燒方法是要在最少的過剩空氣之下達到完全燃

燒，而這一層又首先與空氣和煤氣機械的混合程度有關。氣體流動的混合條件是有規律性的，並且決定於好些因素（速度，交角等）。

氣體在管道系統裡發生流動可以是自然流動——即由於熱的和冷的氣體的比重有差別，這流動也可以是人為的——即將氣體鼓入或吸出。以上兩種情況下，管道中的壓力是不一樣的，它可以比大氣壓力大或者小，但是爐子上好些地方是與大氣相通的，所以氣體可能從爐裡噴出氣體也可能吸進冷空氣。無論是那種情況都使爐子工作受到不良的影響。

由此看來工業爐內氣體流動是與很多因素有關的，同時它也在很大的程度上決定着爐子的構造，所以，研究氣體流動規律性是爐子熱工中的一個重要問題。然而，氣體流動的特徵是很複雜的，尤其是熱氣的流動更複雜，並且它也還沒有充分地被研究過。液體的流動與氣體流動相比起來是比較簡單的，不過它們的規律性有很多是相同的。液體流動的研究比較詳細得多，所以有好些問題能搬到氣體流動上去，不過，為了避免可能發生的錯誤，必須先來簡單地了解一下液體及氣體的各個性質及特點。

我們知道在物理學裡液體是被認為在實際上是不可壓縮的，而氣體則在壓力變化時其體積變化很大，並服從波爾定律 ($PV = \text{const.}$)。各種工業爐中為使氣體流動而加上的壓力與大氣壓相比起來是如此微小，以致於可以認為氣體的體積也與壓力無關，這樣也不會造成多大的誤差。這一情況使我們可以把氣體看作是液體，並把液體流動的一些定律用到氣體上去。

但是，氣體在爐內流動時其體積不是保持不變的，因為溫度變化時，體積發生了巨大的改變。液體在溫度改變時，其體積變化如此微小，以至於可以認為它沒有變化。

無論是氣體或液體都具有下列一個共同的性質，即很小的外力就能引起它形狀上任意的變化。而且祇有形狀變化不大時，消耗的能量才是很小。

形狀改變時要消耗的能量是因為在氣體和液體裡有內力。

如果切割出一個氣體的自由體積使其向兩個方向變形，那末由於

內力的存在，這氣體體積就反抗這個變形，這時所產生的應力是由切線應力及壓縮應力（Касательные и сжимающие）合成的。

如果這個氣體或液體體積被一個表面所限制，那末，還會添生一個張力（Растягивающие напряжения）。

這些應力的存在使得我們很難分析各種氣體液體流動時的一些規律性，所以爲了方便起見往往可以假設沒有這些應力。凡氣體或液體中沒有內應力的叫做「理想氣體或液體」。

理想氣體或液體具有絕對流動性，對於任何切割或變形都不加反抗，而實際氣體及液體中則有壓縮應力，張力及切線應力。

由於分子之間的吸力而造成質點之間的連接說明了壓縮應力。

大家都知道，相互的吸力乃與質量乘積成正比，與距離平方成反比。

氣體分子的質量比液體分子的小得多，同時氣體分子之間的距離比液體分子之間距離大得多，所以氣體分子之間的吸力與液體相比是很小的，可以略而不計。液體中的壓縮應力相當大，所以不能忽略。

張力祇有在幾種同質液體的分界線上才會產生（在不同類液體的接觸表面之間，或者在液體與固體的接觸面上）。它是分子對表面吸引的結果。由於這個力的緣故，各質點就像是儘力要向外分散，因爲作用於這液體界面上法線方向的力是由內向外的。大家知道，液體對於這種分散力的反抗是很小的，氣體更小。水力學中認爲在有限體積的液體中這些法線方向的分散力是等於零的。

應該指出，雖然這些內聚力（Сила сцепления）是很小的，但是在有些情況下，它們起着很大的作用，尤其是當液體的體積小而面積大的時候，例如毛細管中的流動以及有表面張力的現象中。一般情況下，這些力可以完全忽略不計。

與此相反，各種液體或氣體中隨其性質不同多少都具有一些切線應力，並且在大部分情況下是不能忽略不計的。

切線應力是表現於流體各質點在互相接觸，彼此滑過的時候，加速了或者減慢了本身的運動。由此可見，切線應力祇有在運動時才能產生，因爲靜止的液體或氣體中，滑動速度等於零，切線應力也沒

有。同時切線應力是不能將外力平衡的。

切線應力的作用與摩擦相似，因此它又叫做「摩擦力」。這種摩擦力，首先可以被看作是氣體或液體與固體之間的外摩擦力，例如，對於管壁及孔道的摩擦，或者對於在氣體或液體中運動物體的摩擦。然而，由於流體是與管壁接觸的，所以在壁面絕對光滑的情況下是沒有外摩擦力的。如果粗糙管壁表面上的突出超過了壁面上氣體或液體的薄膜層，那末外摩擦力能起很大的作用。

其次，摩擦力可以看作是流體內部各質點之間的摩擦力，因而這些力便叫做「內摩擦力」實際氣體或液體具有內摩擦力的這一性質叫做「粘性」^①。所以實際液體及氣體叫做「粘性的」，這是與理想的液體及氣體不同的。

實際氣體及液體在流動過程中其粘性力做着不可逆功，因此實際氣體及液體流動時有能量的散失。

日常生活中，把「較為粘稠的流體」就理解為較不易流動的液體，例如甘油和重油比水和酒精來得粘稠。粘性這概念不能和密度相混通，有些液體雖然密度極大，但粘性很小，例如水銀。

由於氣體或液體在流動時，有壓力及溫度的變化，所以必須明確內摩擦力怎樣隨着這些變數而改變。

根據氣體動力學原理，靜止狀態下的氣體分子有分子運動，無一定規則，而只服從於或然率。並且此時分子速度乃與絕對溫度的平方根成正比，而在恆溫下各種氣體的分子速度又與該氣體密度的平方根成反比。氣體愈輕，則其分子運動愈快，但是氣體分子的速度與氣體壓力無關，因為在恆溫下壓縮氣體我們只是使其分子靠攏並增加碰撞次數。

設有一個固體平板平行於另一個平板，它們之間隔有一薄層氣體，如果此氣體是靜止狀態，則分子的運動必定是向各方向無規則的運動，不可能發生任何內摩擦力，同樣地，如果此兩板之間各處的氣體完全以同一速度沿着平板運動，那也是沒有內摩擦力的。

現在要來考察一下，如果氣體的運動不是各處相同，而是在變化

① 「內摩擦力」「粘性」「流動性」及「膠合性」都指的同—事物。

着的，氣體分子將有何作為，例如，一塊固體平板在其本身平面內等速運動，而且與另一塊不動的平板保持平行，由實驗可知，這時氣體隨着運動的平板前進，並且由於一層到一層的內摩擦儘量把自己運動也傳給另一平板。在運動較快的一層氣體上有一個與運動方向相反的作用力，亦即減速之力，而在運動較慢的一層氣體上有一個使其加速的作用力。在此兩平板之間作一任意與它們平行的平面 P ，在此平面以下的一部分氣體受到其上部氣體的加速作用，而此上部氣體則又受到下層氣體的減速作用力。根據動力方程式，作用於物體之力等於此物體在單位時間裡動量之增量。由此可見，在兩層氣體之間，必然有了動量的交換。

由於與平板垂直的方向上氣體速度是不等的，故平面 P 以上的氣體含有較大之動量， P 以下的氣體動量較小，氣體分子藉助於其熱運動而在每秒鐘內由上傳到下的動量多於在同一時間內，向反方向由下向上穿過平面 P 的分子所傳送的動量。利用這些動量在單位時間單位面積上的代數和可算出的內摩擦力，因而可算出粘度係數。

計算結果得到氣體內摩擦係數的公式：

$$\eta = -\frac{1}{3} n m w l,$$

式中 n —單位體積中分子數目；

m —每個分子的質量；

l —分子平均自由程；

w —分子運動平均速度。

m 和 w 與氣體之種類及溫度有關，而 n 及 l 乃與氣體壓力有關。

氣體壓力變化後， $n \times l$ 乘積不變，因為氣體如果被壓縮了一半後，其密度加大一倍，則從這層進入另一層的氣體分子增多一倍，但它們推進的深度亦小了一半。由此得到著名的結論（馬克斯威爾定律，закон Максвелла），即氣體的內摩擦力與其壓力無關，在濃密狀態或稀疏之下都是一樣。這個馬克斯威爾定律已得到在中等壓力下實驗的證明。

在高壓及高度真空下，由於分子間作用力而有誤差。

根據上述公式，內摩擦係數 η 必定是與分子平均速度成正比的，亦即是與絕對溫度 T 的平方根成正比的。實際上實驗也證明 η 是隨溫度而增加的，但是 η 的變化似乎更來得快些。蘇德亮特(Сутерлянд)指出，這誤差乃由於在計算自由程時忽略分子間吸力而造成，根據他的意見應有下式成立：

$$\eta = \eta_0 \frac{AT^{\frac{3}{2}}}{T+C},$$

式中 A 及 C 為常數。

由此可知，氣體內摩擦係數決定於溫度，並隨溫度升高而增加，而與氣體壓力無關。

液體粘度的原理，尤其是它與溫度的關係，到目前為止還沒有完全透徹，雖然最近已經提出了各種不同的理論，希羅哥夫(Широков)企圖根據分子動力學建立液體粘性原理，按照這原理，液體內摩擦係數亦用與馬克斯威爾的氣體公式相似的式子計算。液體粘性乃隨溫度增加而降低。

影響液體及氣體流動特性的不是等於 $\frac{\eta}{g}$ 的粘度係數，而是內摩擦係數與氣體或液體的重度相除所得之商，即 $\nu = \frac{\eta}{\gamma}$ ，它叫做動粘度係數。

我們說，氣體的體積隨壓力及溫度的變化很大，而液體的體積隨溫度與壓力變化很小，這只是當此壓力與大氣壓相比起來不太大的時候才是對的。也可以說，在一定條件下氣體的體積像液體一樣也是不變的。

氣體內摩擦力隨溫度升高而升高，而液體則降低。

巴斯加定律：沿某一方向作用於液體上的外部壓力必定會向各方向傳遞，並保持力的大小不變，這定律亦適用於氣體。

氣體質點所受外部壓力高出大氣壓力的部分我們叫做「靜壓力」，不過它可以是正的也可以是負的。如是負的，那末這便是大氣壓與此較小壓力之差。

柏呂薩克定律：在恆壓下，氣體體積與絕對溫度成正比，而其重

度 (Удельные вес) 與絕對溫度成反比。

設攝氏溫度為 t 度，則絕對溫度為 $T = 273 + t$ 。氣體溫度每增加 1°C 其體積增加原體積的 $\alpha = \frac{1}{273} = 0.00367$ 倍 (恆壓下)。

氣體從 0° 加熱到 t° ，其體積由 V_0 變為 V_t ，則

$$V_t = V_0 (1 + \alpha t) .$$

氣體溫度從 t_1° 增加到 t_2° ，其體積由

$$V_{t_1} = V_0 (1 + \alpha t_1)$$

變為

$$V_{t_2} = V_0 (1 + \alpha t_2) .$$

由此可得到下列公式，如已知 t_1° 時氣體體積則可算出 t_2° 時之氣體體積，即：

$$V_{t_2} = V_{t_1} \frac{1 + \alpha t_2}{1 + \alpha t_1} = V_{t_1} \frac{T_2}{T_1} .$$

恆壓下 t° 時氣體重度為

$$r_t = r_0 \frac{1}{1 + \alpha t} .$$

如已知 t_1° 時之氣體重度，則 t_2° 時之重度為

$$r_{t_2} = r_{t_1} \frac{1 + \alpha t_1}{1 + \alpha t_2} = r_{t_1} \frac{T_1}{T_2} .$$

r_0 — 0° 時760毫米水銀柱下氣體重度，一般叫做「換算的重度」，而 r_t 叫做「真正的重度」。在表1中為各種氣體之重度 (在 0° 時760毫米水銀柱下)。

表 1

氣 體 名 稱	化 學 式	γ_0 公斤/米 ³
氫.....	H ₂	0.0899
氧.....	O ₂	1.429
氮.....	N ₂	1.251
一氧化碳.....	CO	1.251
二氧化碳.....	CO ₂	1.977
甲烷.....	CH ₄	0.7168
二氧化硫.....	SO ₂	2.927
空氣.....	—	1.293
氣體燃料.....	—	0.5—1.2
燃燒生成物.....	—	1.3—1.34

例：試求空氣在 $t=1400^\circ\text{C}$ 時之重度

解，這可按下列式計算

$$\gamma_t = \frac{\gamma_0}{1 + \alpha t} = \frac{1.293}{1 + \frac{1400}{273}} = 0.211 \text{ 公斤/米}^3.$$

馬利奧特定律：在恆溫下，氣體單位體積（單位重量的體積）與其壓力之乘積不變，即

$$PV = \text{常數}.$$

如設氣體原有狀況為標準狀態即壓力為 P_0 體積為 V_0 ，而最後之狀態——壓力為 P 體積為 V ，則根據馬利奧特定律可知，

$$P_0 V_0 = PV,$$

即氣體體積與壓力之間有下列關係

$$V = V_0 \frac{P_0}{P},$$

例：設氣體原有狀態為一大氣壓 $P_0 = 10333$ 毫米水柱，最後狀態——壓力高於大氣壓為正 10 毫米水柱即 $P = 10333 + 10 = 10343$ 毫米水柱，則體積

隨壓力的改變為

$$V = V_0 \frac{10333}{10343} = 0.998V_0,$$

可知體積縮小極少，儘可略而不計。當氣體壓力高出或低於大氣壓 300 毫米水柱時，再假設體積不隨壓力變化，就會引起誤差約 3%。

克萊畢龍公式：克萊畢龍公式包括兩個定律：給呂薩克定律及馬利奧特定律，它規定了氣體體積隨溫度及壓力的變化關係，克萊畢龍公式可一般寫成如下形式：

$$PV = RT,$$

式中 R —氣體常數。

各氣體的氣體常數可參見表 2。

表 2

氣 體 名 稱	氣 體 常 數 R
氧.....	26.52
氫.....	420.90
氮.....	30.13
一氧化氮.....	30.30
二氧化氮.....	19.28
水蒸汽.....	47.10
空氣.....	29.27

設在壓力為 P_1 ，溫度為 T_1 時氣體體積為 V_1 ，則壓力為 P_2 溫度為 T_2 時其體積為：

$$V_2 = V_1 \frac{P_1 T_2}{P_2 T_1},$$

同理其重度為：

$$\gamma_2 = \gamma_1 \frac{P_2 T_1}{P_1 T_2}.$$

如果已知氣體在 0° 及 760 毫米水銀柱之下之體積，而要計算在

t° 及 $P = P_0 \pm h$ 時該氣體的體積（其中 h 的單位不是毫米水銀柱而是毫米水柱），則：

$$V_t = V_0 (1 + \alpha t) \frac{10333}{10333 \pm h};$$

$$r = r_0 \frac{1}{1 + \alpha t} \frac{10333 \pm h}{10333}.$$

氣體流量，流速及管道斷面面積三者之間的關係。

設 W —氣體平均速度 米/秒

V —氣體每秒流量 米³/秒

ω —氣體在其中流動的管道斷面 米²

此三者之間的關係可用下式表示之

$$W = \frac{V}{\omega} \text{ 米/秒}$$

在管道斷面面積不變的條件下，氣體流速的變化規律與體積改變相同。

在恆壓的條件下，氣體速度與溫度之關係如下：

$$W_t = W_0 (1 + \alpha t) \text{ 米/秒}$$

式中 W_t —在 t° 時氣體真正的速度 米/秒

W_0 —在 0° 及 760 毫米水銀柱下氣體的速度 米/秒

因此，爲要把 t° 時氣體流速換算成標準狀況下之速度，即 0° 及 760 毫米水銀柱之速度，可用下式

$$W_0 = \frac{W_t}{1 + \alpha t}$$

如已知 t_1 時氣體速度，則可求得 t_2 時之速度，即

$$W_{t_2} = W_{t_1} \frac{1 + \alpha t_2}{1 + \alpha t_1} = W_{t_1} \frac{T_2}{T_1}.$$

如果說氣體的體積是隨壓力變化的，那末顯然的，其流速也是以同樣的關係在變化的，即

$$W_{t,p} = W_0 (1 + \alpha t) - \frac{P_0}{P}.$$

也就是說，壓力 P 愈大，氣體速度愈小，因為氣體體積變小了。

阿基米德原理：阿基米德原理對於固體和液體是如此敘述的，就是說，任何浸在液體中的物體都將失去部分重量，其數值剛好等於它排開水之重量。此原理亦能用到氣體上來。

設有一容器高為 H 米，截面為 ω 米²，其下部為開口，其中充滿 t° 之熱氣，四周乃是 0° 之冷空氣，由於熱氣輕於四周之冷空氣，所以它要向上浮起。向上浮之力等於其排開空氣之重量減去此氣體本身之重量。

設 r_0 —冷空氣重度 公斤/米³；

r_t — t° 下熱氣體之重度 公斤/米³

則熱氣所排開冷空氣之重量為

$$G_1 = H\omega r_0 \text{ 公斤,}$$

而替代空氣的熱氣之重量為

$$G_2 = H\omega r_t \text{ 公斤.}$$

熱氣向上浮起之力等於

$$h = G_1 - G_2 = H\omega (r_0 - r_t) \text{ 公斤.}$$

為將此力換算為單位面積（即 1 米²）上之壓力，只要將等號右端除以 ω ，則

$$h = H (r_0 - r_t) \text{ 公斤/米}^2.$$

單位：在學習氣體力學及傳熱定律中，會遇到很多公式，不易記憶。因此必須在學習本課程前特別注意各情況下所用之各個單位制度。

為避免在計算中發生錯誤，也必須了解公式中每一項之單位，因為單位可以告訴我們每一項具體的概念。