

設計管道熱絕緣的 速算圖解法

清華大學副教授王補宣著

電力工業出版社

設計管道热絕緣的速算圖解法

清华大学 副教授王补宣著

•
459R104

電力工業出版社出版(北京府右街26号)

北京市書刊出版業營業許可證出字第032号

北京市印刷一厂排印 新华書店發行

•
787×1092 $\frac{1}{32}$ 开本 * 2印張 * 36千字

1957年1月北京第1版

1957年1月北京第1次印刷(0001—6,100册)

統一書号: 15036·394 定价(第10类)0.32元

92.54074

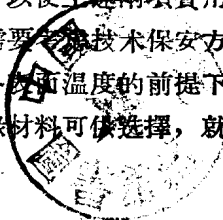
119

12

21693 / 13 前 言

热絕緣在国民經济的很多部門里都有广泛的应用。在很多場合下，应用热絕緣的結果，在降低热損失的同时，由于維持了工作流体的适宜温度，使工艺过程能够加速进行，因而提高了热設備的生产率或改进了产品的质量。有时，热絕緣的宗旨还不是从經濟性的观点出發，而是为了要促成技术过程实现的可能性，例如，电厂中充气煤粉管的热絕緣就是要防止因温度显著降低、热风中的水分凝結而引起煤粉黏合的作用。为了改善劳动条件和保障技术安全起見，在工作室內热設備或热管道的周圍安裝热絕緣也是一种必要的有效措施，以便把外表面温度限制在 50°C 以下。

对于所选定的絕緣材料，設計热絕緣的計算任务之一就是要合理选择热絕緣的厚度。此时，如果热絕緣的目的是为了节约燃料，那末，在經濟上就应该考虑兩方面的費用：(1)全年热損失的价值；(2)安裝热絕緣的投資在使用年限內每年所应攤还的資金。增加热絕緣的厚度，可以使热損失降低，但热絕緣的初置費用則跟着增加。所以，确定經濟上最有利的絕緣厚度必須对不同厚度进行試算，然后看哪一种厚度可以使上述兩項費用的总和最小。选择热絕緣的厚度常常需要考慮技术保安方面的条件，要在限定热損失和热絕緣外表面温度的前提下适当照顧經濟性。如果有好几种热絕緣材料可供选择，就应该对每一种热絕緣



材料分別計算，確定其中經濟性最高的某種材料最合宜的絕緣厚度。這種計算，對於管道熱絕緣就顯得非常繁複。因此，利用速算圖來協助求解具有很大的實用價值。

在文獻中，可以找到相當數量的用來直接圖解架空管道單層熱絕緣最經濟厚度的速算圖 [4—8]①。這些圖只有在熱絕緣的目的是單純地為了節約燃料、而且熱絕緣材料已經選定的情況下才能充分體現它的優越性，如果要核算熱絕緣的外表面溫度和相應的熱損失、以及全年工作費用，就只好再依靠計算。在我國，新品種的熱絕緣材料正在不斷出現，對於採用不同材料的經濟性的比較，這些圖並不能發揮它應有的作用。在文獻中也可以找到另外一些圖，主要用它圖解各種不同絕緣厚度下熱損失的大小和熱絕緣外表面的溫度，然後根據經濟性的計算來選擇熱絕緣最適宜的材料和厚度。文獻 [3] 所提供的圖就屬於這一類性質，這種圖用來核算架空管道單層熱絕緣的熱損失和外表面溫度還比較方便，只是求熱損失時需要簡單的計算。但在設計中，首先所知道的往往是所限定的熱損失的大小，在這種場合下，利用文獻 [3] 的圖，仍然會感到由於試算範圍的難於估計，試算工作量可能很大。文獻 [9] 提供了分別計算熱損失和外表面溫度的輔助圖、以及確定架空管道和地下管道單層熱絕緣的最經濟厚度的速算圖，由於它採用無因次的綜合量作為變量，圖的形式已大為簡化，但實際應用起來仍不感方便，而且文內的討論基本上偏重於核算所已經給定的管道的熱損失。對於某種常用的或特殊的产品，

① 引號 [] 內的數字表示所附錄的參考文獻的順序。

热絕緣材料的制造厂家有时亦乐于供給关于架空管道所專用的近似速算圖[10]，便于使用部門在确定絕緣厚度时直接圖解相应于各种不同厚度时的热損失及其价值；这类圖应用起来好像很簡便，但只局限于特定材料，而且使用情况远离所假定的正常情况时，会产生相当大的誤差。

除了速算圖以外，在一些手册，特別像專門性的絕緣手册文献[1]中，可以找到用列表的方式，列出几种管徑的某几种絕緣厚度、在所假定的外界介質温度以及某些特定的材料导热系数和管面温度下架空管道热絕緣的热損失。由于数据的有限，查閱时常常要用好几次插入法，所以很难准确。自然，如果根据这种初步估計出来的絕緣厚度，再利用文献[3]的圖，可以比較迅速地求得可靠的結果。

所有上面所引述的速算圖表都只适用于單層热絕緣。可是，各种絕緣材料会有它一定的适用范围。为了更有效地提高热絕緣的經濟性，尽可能就地取材，避免用远地运来的絕緣材料起見，有时要采用兩層或多層不同材料的复合热絕緣。尤其是高温管道，就常会在紧靠金屬管面的热絕緣內層采用硅藻土或硅藻土与石棉的复制品一类能耐高温的絕緣材料，使內層热絕緣的厚度能够保証与外層相接触面的温度降低到外層热絕緣材料所能承受的温度極限，以便作为外層热絕緣材料的保护層。选择这种多層热絕緣时，計算的工作量显然要比單層热絕緣更大。

本書中的分析和討論，就是要找到合理的速算圖和速算方法，使管道單層热絕緣的設計能够进一步簡化。并且也能有助于管道多層热絕緣的計算。

1467456

3

目 录

前 言

架空管道热絕緣的速算圖解法	5
1. 管道热絕緣計算的基本原理	5
2. 表面放热系数	8
3. 單層热絕緣的最經濟絕緣厚度	15
4. 單層热絕緣的速算圖解法	19
5. 多層复合热絕緣的速算圖解法	31
地下管道热絕緣的速算圖解法	34
1. 地下敷設的一般概念	34
2. 單管無槽敷設时热絕緣的速算圖解法	36
3. 單管不通行槽內敷設时热絕緣的速算圖解法	46
4. 多管敷設地下管道热絕緣的速算圖解法	53
結束語	61
参考文献	62

72.54074

119

12

216593 / 13 前言

热絕緣在国民經济的很多部門里都有广泛的应用。在很多場合下，应用热絕緣的結果，在降低热損失的同时，由于維持了工作流体的适宜温度，使工艺过程能够加速进行，因而提高了热設備的生产率或改进了产品的质量。有时，热絕緣的宗旨还不是从經濟性的观点出發，而是为了要促成技术过程实现的可能性，例如，电厂中充气煤粉管的热絕緣就是要防止因温度显著降低、热风中的水分凝結而引起煤粉黏合的作用。为了改善劳动条件和保障技术安全起見，在工作室內热設備或热管道的周圍安裝热絕緣也是一种必要的有效措施，以便把外表面温度限制在 50°C 以下。

对于所选定的絕緣材料，設計热絕緣的計算任务之一就是要合理选择热絕緣的厚度。此时，如果热絕緣的目的是为了节约燃料，那末，在經濟上就应该考虑兩方面的費用：(1)全年热損失的价值；(2)安裝热絕緣的投資在使用年限內每年所应攤还的資金。增加热絕緣的厚度，可以使热損失降低，但热絕緣的初置費用則跟着增加。所以，确定經濟上最有利的絕緣厚度必須对不同厚度进行試算，然后看哪一种厚度可以使上述兩項費用的总和最小。选择热絕緣的厚度常常需要~~考虑~~技术保安方面的条件，要在限定热損失和热絕緣外表面温度的前提下适当照顧經濟性。如果有好几种热絕緣材料可供选择，就应该对每一种热絕緣

材料分別計算，確定其中經濟性最高的某種材料最合宜的絕緣厚度。這種計算，對於管道熱絕緣就顯得非常繁複。因此，利用速算圖來協助求解具有很大的實用價值。

在文獻中，可以找到相當數量的用來直接圖解架空管道單層熱絕緣最經濟厚度的速算圖 [4—8]①。這些圖只有在熱絕緣的目的是單純地為了節約燃料、而且熱絕緣材料已經選定的情況下才能充分體現它的優越性，如果要核算熱絕緣的外表面溫度和相應的熱損失、以及全年工作費用，就只好再依靠計算。在我國，新品種的熱絕緣材料正在不斷出現，對於採用不同材料的經濟性的比較，這些圖並不能發揮它應有的作用。在文獻中也可以找到另外一些圖，主要用它圖解各種不同絕緣厚度下熱損失的大小和熱絕緣外表面的溫度，然後根據經濟性的計算來選擇熱絕緣最適宜的材料和厚度。文獻 [3] 所提供的圖就屬於這一類性質，這種圖用來核算架空管道單層熱絕緣的熱損失和外表面溫度還比較方便，只是求熱損失時需要簡單的計算。但在設計中，首先所知道的往往是所限定的熱損失的大小，在這種場合下，利用文獻 [3] 的圖，仍然會感到由於試算範圍的難於估計，試算工作量可能很大。文獻 [9] 提供了分別計算熱損失和外表面溫度的輔助圖、以及確定架空管道和地下管道單層熱絕緣的最經濟厚度的速算圖，由於它採用無因次的綜合量作為變量，圖的形式已大為簡化，但實際應用起來仍不感方便，而且文內的討論基本上偏重於核算所已經給定的管道的熱損失。對於某種常用的或特殊的产品，

① 引號 [] 內的數字表示所附錄的參考文獻的順序。

热絕緣材料的制造厂家有时亦乐于供給关于架空管道所專用的近似速算圖[10]，便于使用部門在确定絕緣厚度时直接圖解相应于各种不同厚度时的热損失及其价值；这类圖应用起来好像很簡便，但只局限于特定材料，而且使用情况远离所假定的正常情况时，会产生相当大的誤差。

除了速算圖以外，在一些手册，特別像專門性的絕緣手册文献[1]中，可以找到用列表的方式，列出几种管徑的某几种絕緣厚度、在所假定的外界介質温度以及某些特定的材料导热系数和管面温度下架空管道热絕緣的热損失。由于数据的有限，查閱时常常要用好几次插入法，所以很难准确。自然，如果根据这种初步估計出来的絕緣厚度，再利用文献[3]的圖，可以比較迅速地求得可靠的結果。

所有上面所引述的速算圖表都只适用于單層热絕緣。可是，各种絕緣材料会有它一定的适用范围。为了更有效地提高热絕緣的經濟性，尽可能就地取材，避免用远地运来的絕緣材料起見，有时要采用兩層或多層不同材料的复合热絕緣。尤其是高温管道，就常会在紧靠金屬管面的热絕緣內層采用硅藻土或硅藻土与石棉的复制品一类能耐高温的絕緣材料，使內層热絕緣的厚度能够保証与外層相接触面的温度降低到外層热絕緣材料所能承受的温度極限，以便作为外層热絕緣材料的保护層。选择这种多層热絕緣时，計算的工作量显然要比單層热絕緣更大。

本書中的分析和討論，就是要找到合理的速算圖和速算方法，使管道單層热絕緣的設計能够进一步簡化。并且也能有助于管道多層热絕緣的計算。

目 录

前 言

架空管道热絕緣的速算圖解法	5
1. 管道热絕緣計算的基本原理	5
2. 表面放热系数	8
3. 單層热絕緣的最經濟絕緣厚度	15
4. 單層热絕緣的速算圖解法	19
5. 多層复合热絕緣的速算圖解法	31
地下管道热絕緣的速算圖解法	34
1. 地下敷設的一般概念	34
2. 單管無槽敷設时热絕緣的速算圖解法	36
3. 單管不通行槽內敷設时热絕緣的速算圖解法	46
4. 多管敷設地下管道热絕緣的速算圖解法	53
結束語	61
参考文献	62

架空管道热絕緣的速算圖解法

1. 管道热絕緣計算的基本原理

被絕緣后的管道热損失的計算，是通过無限長圓筒壁穩定傳热計算的典型实例。这种計算的基本公式在任何

“傳热学”書籍里都有詳尽的介紹，所以在这里，只对它作簡單的引述，作为深入分析的基础。

參看圖 1，令：

d_0 代表管的內直徑 [公尺]；

d_1 代表管的外直徑和热絕緣的內直徑 [公尺]；

d_2 代表热絕緣的外直徑 [公尺]；

λ 代表热絕緣材料的导热系数 [大卡/公尺-小时- $^{\circ}\text{C}$]；

δ 代表热絕緣的厚度，即

$$\delta = \frac{1}{2} (d_2 - d_1) \text{ [公尺]};$$

t_1 代表管内流体的温度 [$^{\circ}\text{C}$]；

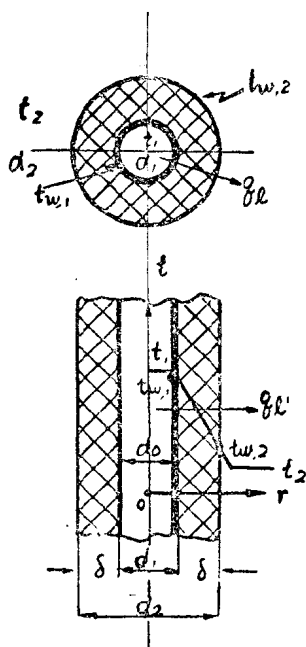


圖 1 通过單層热絕緣的管道热損失

t_2 代表周圍介質(空氣)的溫度, $[^{\circ}\text{C}]$;

$t_{w,1}$ 代表管壁溫度 $[^{\circ}\text{C}]$;

$t_{u,2}$ 代表熱絕緣的外表面溫度 $[^{\circ}\text{C}]$;

α_2 代表熱絕緣外表面到周圍介質的放熱系數 [大卡/公尺²-小時- $^{\circ}\text{C}$];

α_1 代表管內流体到管壁內表面的放熱系數 [大卡/公尺²-小時- $^{\circ}\text{C}$];

q_l 代表每單位長度的管道熱損失 [大卡/公尺-小時]。

則

$$q_l = \frac{t_1 - t_2}{\frac{1}{\pi d_0 \alpha_1} + \frac{1}{2\pi\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\pi d_2 \alpha_2}}, \quad (1)$$

或採用“熱阻力”的觀念，可以把上式改寫為：

$$q_l = \frac{t_1 - t_2}{\Sigma R};$$

這裡， ΣR 代表熱量由管內流体傳到周圍介質的總熱阻力。嚴格地說， ΣR 應該是下列四部分依次串聯的熱阻力的總和：由流体到管壁內表面的放熱熱阻力，管壁導熱熱阻力，絕緣層的導熱熱阻力，由熱絕緣外表面到周圍介質的放熱熱阻力。如果絕緣層的內表面沒有和管壁外表面相密接，還會有接觸熱阻力。不過，金屬的導熱系數大，管壁和管徑比起來又顯得很薄，所以管壁的導熱熱阻力小到完全可以忽略；至於接觸熱阻力，設計時都算在絕緣層的熱阻力項下，只在估計熱絕緣材料的導熱系數時才彙總地考慮它的影響。這樣，如同式(1)所指出，在管道熱絕緣計

算中將會遇到兩種型式的热阻力：表面热阻力 $1/\pi d_0 \cdot \alpha_1$ 和 $1/\pi d_2 \cdot \alpha_2$ ，絕緣層热阻力 $\frac{1}{2\pi\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1}$ 。其中，以絕緣層的热阻力佔总热阻力的主要部分。

当管内流体为飽和蒸汽时， α_1 可取 10 000 [大卡/公尺²-小时-°C]，而且蒸汽的压力和速度越大， α_1 的值也愈高；如果管内流体是水， $\alpha_1=2\,000-4\,000$ [大卡/公尺²-小时-°C]。 α_1 这样高的值，表明飽和蒸汽管和水管热絕緣計算中管的內表面热阻力是如此的小，可以完全不予考虑。此时，式 (1) 將簡化为：

$$q_l = \frac{\pi(t_1 - t_2)}{\frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_2 \cdot d_2}}. \quad (2)$$

从圖 1，可以看到：在稳定热状态时，每單位時間內管内流体所傳給管壁的热量、絕緣層所傳导的热量、以及由热絕緣外表面所傳給周圍介質的热量都相等。因此，可得：

$$q_l = \pi d_0 \cdot \alpha_1 (t_1 - t_{w,1}); \quad (3)$$

$$q_l = \frac{2\pi\lambda(t_{w,1} - t_{w,2})}{\ln \frac{d_2}{d_1}}; \quad (4)$$

$$q_l = \pi d_2 \cdot \alpha_2 (t_{w,2} - t_2). \quad (5)$$

如果能够知道管壁外表面溫度，亦即被絕緣的表面溫度 $t_{w,1}$ ，不管管内是什么流体，就永远可以写出下式：

$$q_l = \frac{\pi(t_{w,1} - t_2)}{\frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_2 \cdot d_2}}. \quad (6)$$

当流体是饱和蒸汽或水时,由于 α_1 很大,根据式(3)可以認為 $t_{w,1} \approx t_1$, 因而同样能得到近似式(2)。对于过热蒸汽, $t_{w,1}$ 总不会低于蒸汽的饱和温度,一般可取 $t_1 - t_{w,1} \approx 10^\circ\text{C}$, 文献[7]; 蒸汽的压力和流速越高,这种温差將越小,如果就認為 $t_{w,1} \approx t_1$, 由一定的 d_2 計算 q_1 或根据限定的 q_1 計算 d_2 , 都得到偏于保守的比較高的数字, 所以从設計的安全观点来看, 是可以被容許的, 文献[11]。

总的說来, 計算热絕緣时, 應該根据安裝热絕緣的目的, 从技术保安或節約燃料的观点出發, 首先确定所能容許的热損失 q_1 的限額, 这方面的討論已經超出了主題的範圍。 d_1 和 t_2 都是已知量, 于是, 假定 $t_{w,1} \approx t_1$, 文献[2], 或适当估計 $t_{w,2}$, 只要能够求得 α_2 , 就可以依照 q_1 和 $t_{w,2}$ 的限定值, 直接用式(2)或式(6), 或联解式(4)和式(5), 对所选择的某种材料确定热絕緣所必需具有的最小厚度 δ_m 。

2. 表面放热系数

关于由热絕緣外表面到周圍自然气流的放热系数 α_2 的計算, 过去已經进行过很多研究。但从文献中可以找到三类不同的处理方式: (1)認為 α_2 不仅要取决于 $t_{w,2} - t_2$, 而且也 and 热絕緣的外直徑 d_2 有关, 文献[5, 11, 12]; (2)近似地把 α_2 看成是 $t_{w,2} - t_2$ 的綫性函数, 例如 $t_{w,2} = 0 - 150^\circ\text{C}$ 时, 文献[1]建議取 $\alpha_2 = 8.1 + 0.045(t_{w,2} - t_2)$, 而 M.A. 米海耶夫文献[2]建議取 $\alpha_2 = 8.4 + 0.06(t_{w,2} - t_2)$; (3)直接把 α_2 当做常量, 并且取 $\alpha_2 \approx 10$ [大卡/公尺²·小时· $^\circ\text{C}$], 文献[10, 13]。为了寻求速算圖解的合理基础, 就需要首先对

这种分歧作出适当的分析和比較。

根据式(6), 对于一定的 $t_{w,2}$, α_1 越大, 同样外直径的絕緣热損失 q_l 越大; 或限定 q_l 时 α_2 越大, 热絕緣所需要的外直径 d_2 就愈大。因此, 从設計安全的观点出發, 宁可合理选用 α_2 比較高的数字。

热絕緣外表面的总放热系数 α_2 是輻射放热系数 α_{n2} 和对流放热系数 α_{c2} 兩項之和, 即:

$$\alpha_2 = \alpha_{n2} + \alpha_{c2}. \quad (7)$$

其中, 輻射放热系数 α_{n2} 可由下式計算:

$$\alpha_{n2} = 4.96 \times 10^{-8} \cdot \epsilon \cdot \frac{[T_{w,2}^4 - T_2^4]}{t_{w,2} - t_2}.$$

此处, ϵ 代表热絕緣外表面的黑度, 一般可取 $\epsilon = 0.925$, [1, 2];

T' 代表絕对温度或 $T' = t + 273$, [$^{\circ}K$]; ($\Delta T' \equiv \Delta t$).

所以, $\alpha_{n2} = 4.6 \times 10^{-8} [T_{w,2}^3 + T_{w,2}^2 \cdot T_2 + T_{w,2} \cdot T_2^2 + T_2^3]$ 。在实际情况下, $T_{w,2}$ 和 T_2 相差不大, 如果取 $T_m = \frac{1}{2}(T_{w,2} + T_2)$, 則 $10^{-8} [T_{w,2}^3 + T_{w,2}^2 \cdot T_2 + T_{w,2} \cdot T_2^2 + T_2^3]$ 可以近似地簡化成 $4 \times 10^{-8} \cdot T_m^3$, 或。

$$\alpha_{n2} = 0.184 \left(\frac{T_m}{100} \right)^3. \quad (8)$$

無数实验数据綜合的結果, 表明自然对流的放热系数 α_c 可按下列准則公式計算 文献[2, 12]:

$$Nu = C \cdot (Gr \cdot Pr)^n.$$

这里, 对于热絕緣來說,

$$Nu = \frac{\alpha_{c2} \cdot d_2}{h_m};$$

$$G_r = \frac{\beta_m \cdot g \cdot d_2^3 (t_{w,2} - t_2)}{\nu_m^2};$$

$$P_r = 0.722;$$

$$\nu_m \text{ 为 } t_m = \frac{t_{w,2} + t_2}{2} \text{ 时空气的动黏度 [公尺}^2\text{/秒];}$$

$$\lambda_m \text{ 为 } t_m \text{ 时空气的导热系数 [大卡/公尺-小时-}^\circ\text{C];}$$

$$\beta_m \text{ 为 } t_m \text{ 时空气的容积膨胀系数, 或}$$

$$\beta_m = \frac{1}{t_m + 273} \text{ [1/度];}$$

C 和 n 是取决于 $(G_r \cdot P_r)$ 值大致范围的常数。

$$\text{当 } G_r \cdot P_r = 500 - 2 \times 10^7 \text{ 时, } C = 0.54, n = \frac{1}{4};$$

$$G_r \cdot P_r > 2 \times 10^7 \text{ 时, } C = 0.135, n = \frac{1}{3}.$$

$$\text{或 } G_r \cdot P_r = 500 - 2 \times 10^7 \text{ 时,}$$

$$\alpha_{c2} = A_1 \left(\frac{t_{w,2} - t_2}{d_2} \right)^{\frac{1}{4}}; \quad (9)$$

$$G_r \cdot P_r > 2 \times 10^7 \text{ 时,}$$

$$\alpha_{c2} = A_2 (t_{w,2} - t_2)^{\frac{1}{3}}. \quad (10)$$

A_1 和 A_2 都只取决于空气热系数的大小:

$$A_1 = 0.54 (\beta_m \cdot g \cdot P_r)^{\frac{1}{4}} \cdot \frac{\lambda_m}{\nu_m^{\frac{1}{4}}};$$

$$A_2 = 0.135 (\beta_m \cdot g \cdot P_r)^{\frac{1}{3}} \cdot \frac{\lambda_m}{\nu_m^{\frac{1}{3}}}.$$

圖 2 表示在不同的 t_m 时所計算出来的空气的 A_1 和 A_2 的值。

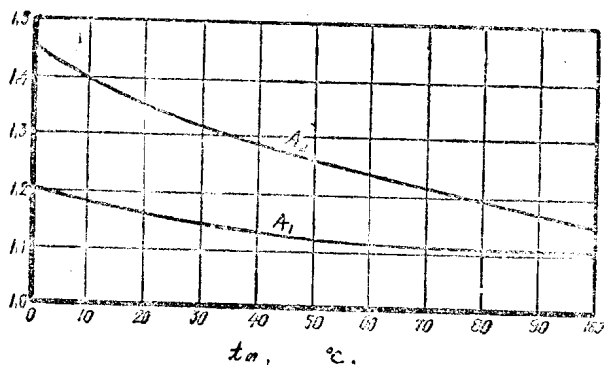


圖 2 空氣 $A = f(t_m)$

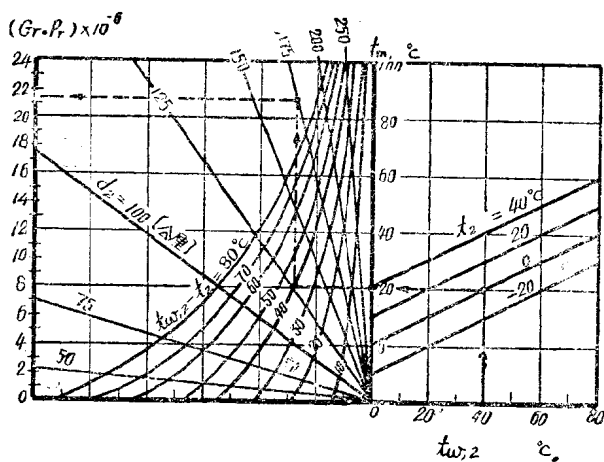


圖 3 空氣 $(G_r \cdot P_r)$ 值的速算圖

現在已經很明顯，只是在

$$(G_r \cdot P_r) = 0.722 \frac{\beta_m g d_2^3 (t_{w,2} - t_2)}{\gamma_m^2} > 2 \times 10^7,$$

亦即給定 $t_{w,2}$ 和 t_2 、 d_2 增加到超過某種特殊的數值，或對