

# 传 热 学

苏联С.Н. 萧林著

水利电力出版社

# 傳 热 学

苏联C.H. 簾林著

田本良翻譯 張正榮校訂

苏联高等教育部批准作为  
建筑工程学院“采暖和通風”专业的教科书

水利电力出版社

## 內 容 提 要

本书敘述下列各种傳热方法的基本原理：导热、对流傳热和辐射傳热。在各种傳热問題以及計算換热部件和設备时，本书都附有实例，并从理論上加

述。

本书是建筑工程学院“采暖和通风”专业大学的教科书。

С. Н. ШОРИН

### ТЕПЛОПЕРЕДАЧА

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО ЛИТЕРАТУРЫ  
ПО СТРОИТЕЛЬСТВУ И АРХИТЕКТУРЕ

МОСКВА 1952

## 傳 热 学

根据苏联国立建筑工程和建筑艺术出版社1952年莫斯科版翻譯

田本良翻譯 張正榮校訂

\*

640R160

水利电力出版社出版（北京西郊科学路二里沟）

北京市书刊出版业营业許可証出字第105号

水利电力出版社印刷厂印刷

新华书店科技发行所发行 各地新华书店經售

\*

850×1168 $\frac{1}{2}$ 开本\*10 $\frac{1}{2}$ 印張\*274千字\*定价(第10类)1.60元

· 1957年8月北京第1版

1960年8月北京第2次印刷(1,701—1,320册)

## 序 言

本書是作为 建筑学院学生的一門单独課程——傳热学的教本。

在學習采暖通風專業的各門課程时，傳热問題具有極其重要的意义。对于此專業的学生來說，傳热学教程乃是研究各种热現象的基本理論課程。

教本里的材料是这样來敘述的，除去使學生一般地熟悉热傳播的基本理論外，还要使他們能够掌握独立地解决实际問題的基木方法。

作者对 M.B. 基尔皮契夫院士，M.A. 米海也夫通訊院士对改进本書的宝贵建議和意見表示謝意。

对 K.D. 沃斯列辛斯基在校閱本書所进行的巨大工作，作者也表示深深的感謝。

# 目 录

序言	
緒論	5

## 第一篇 导 热

第一章 导热理論	16
§ 1. 导热过程的特性	16
§ 2. 导热微分方程式	16
§ 3. 导热过程的起始条件和边界条件	20
§ 4. 导热微分方程式的解法	22
第二章 导热系数	25
§ 5. 气体的导热系数	26
§ 6. 液体的导热系数	30
§ 7. 固体的导热系数	30
第三章 稳定状态时的傳热	35
§ 8. 經過平壁的傳热	36
§ 9. 經過管壁的傳热	40
§ 10. 埋于地層中的管子的傳热	47
§ 11. 埋于地層中的一排管子的傳热	53
§ 12. 棒的傳热計算	57
§ 13. 圓筋的傳热計算	62
§ 14. 房屋地板的傳热計算	64
§ 15. 屋角牆壁的傳热	71
第四章 物体的受热和冷却	72
§ 16. 平面壁的受热及冷却	72
§ 17. 圆柱体的受热和冷却	84
§ 18. 球体的受热和冷却	91
§ 19. 准则 $Bi$ 的数值很小 ( $Bi \ll 1$ ) 时物体的受热和冷却	97
§ 20. 准则 $Bi$ 的数值很大 ( $Bi \gg 1$ ) 时物体的受热和冷却	99
§ 21. 物体被加热或冷却的正常情况 (Г. М. 康德拉基也夫著)	102

§ 22. 半無限大的大塊固體的受熱和冷卻	107
§ 23. 材料的儲熱係數	109
<b>第五章 物體週期性的受熱和冷卻</b>	110
§ 24. 半無限大的大塊固體內週期性的熱傳播	111
§ 25. 厚度有限的平壁內溫度波的傳播	120
§ 26. 有傳熱存在時厚牆週期的受熱和冷卻	124
§ 27. 住屋外牆的熱穩定性	127
§ 28. 牆壁兩邊週期性的受熱和冷卻	129
<b>第六章 空氣中水分的析出和建築物圍護體的透氣性</b>	133
§ 29. 露點和物體冷卻的極限溫度	133
§ 30. 圍護體的透氣性	135

## 第二篇 對流換熱

<b>第七章 對流換熱的物理基礎和理論</b>	138
§ 31. 概述	138
§ 32. 對流換熱方程式	139
§ 33. 物理過程的相似理論	149
<b>第八章 帶熱體自由流動時的放熱</b>	158
§ 34. 帶熱體自由流動的特性	158
§ 35. 帶熱體自由流動時的對流換熱計算	162
<b>第九章 帶熱體強迫流動時的對流換熱</b>	173
§ 36. 強迫帶熱體流的特性	173
§ 37. 管內帶熱體在層流狀態下的對流放熱	179
§ 38. 流道內帶熱體在紊流狀態下的對流換熱	184
§ 39. 流道內帶熱體流動在過渡狀態下的對流換熱	187
§ 40. 對流換熱情況下流道內帶熱體平均溫度的計算	188
§ 41. 強迫橫向流過管面時的對流放熱	191
§ 42. 強迫縱向流過平板時的對流放熱	201
<b>第十章 對流換熱的水力學特性</b>	202
§ 43. 強迫帶熱體流中物體的阻力	202
§ 44. 換熱的流體動力理論	206
<b>第十一章 蒸汽凝結時的放熱</b>	210
§ 45. 概述	210
§ 46. 蒸汽膜層凝結的理論	211
§ 47. 各種因素對蒸汽凝結時放熱的影響	214
<b>第十二章 液體沸騰時的放熱</b>	217

§ 48. 概述 .....	217
§ 49. 液体沸騰时的放热系数 .....	219

### 第三篇 輻射換热

第十三章 輻射的物理基础及理論 .....	223
§ 50. 热輻射或溫度輻射 .....	223
§ 51. 基本概念及定义 .....	224
§ 52. 平衡热輻射定律(輻射热力学) .....	231
第十四章 被透明介質隔开的兩物体的輻射換热 .....	242
§ 53. 物体輻射換热的一般情况 .....	242
§ 54. 表面是平面而又互相平行的兩物体之間的輻射換热 .....	244
§ 55. 当一物体在另一物体的空腔内时兩物体的輻射換热 .....	246
§ 56. 任意放置在空中內的兩黑体間的輻射換热 .....	249
§ 57. 物体在空中內进行輻射交換的几何特征 .....	252
§ 58. 任意放置在空中內的兩灰体間的輻射換热 .....	262
§ 59. 当有反射外壳存在时兩物体的輻射換热 .....	263
第十五章 吸收性介質內的輻射換热 .....	270
§ 60. 理論基础 .....	270
§ 61. 吸收性介質內輻射能量傳遞的近似方程式 .....	278
§ 62. 各种介質的輻射能力和吸收率 .....	280
§ 63. 輻射介質与加热面的輻射換热 .....	288
§ 64. 吸收性介質平行層內的輻射換热 .....	291
§ 65. 夾層的輻射导热系数 .....	293
§ 66. 鍋爐燃燒室內的輻射換热 .....	295

### 第四篇 热交換器的計算

第十六章 加热設備中的傳热 .....	299
§ 67. 傳热的一般情况 .....	299
§ 68. 傳热系数 .....	302
§ 69. 加热面的計算 .....	304
§ 70. 帶热体最終溫度的計算 .....	307
§ 71. 混合式热交換器內的傳热 .....	310
§ 72. 房屋用輻射来采暖时的傳热 .....	312
§ 73. 空气调节时的換热特性 .....	316
附录 .....	319
参考文献 .....	341

## 緒 論

关于热傳播学說的發展历史，大家都知道是从 M.B. 罗蒙諾索夫那时候开始的。罗蒙諾索夫在証明了“热的全部基础是运动”以后，于 1744 年在其所著的“論热和冷的原因”中第一次提出了关于热的正确的观点。同时他也是第一个正确地把热傳播过程解釋是热从物体的这一小部分傳遞到另一小部分。罗蒙諾索夫第一次將热空气具有上升能力的法則，用来建立矿井的通風裝置和解决火焰爐內气体迁移的問題。在現代研究傳热时，罗蒙諾索夫这一方面的著作仍然被广泛地应用着。

19 世紀初，在傅里叶的著作里，曾經对固体中的热傳播过程做了深入的教学研究。尽管在导热機構的理解上，已經有了很多根本的改变；但傅里叶的这些著作，直到現在仍旧有它的意义。

1881—1882 年，A.F. 斯托列托夫在莫斯科大学所作的講演，曾对导热理論給以严格的闡述。这些講义被收集在卓越的俄罗斯物理学者全集第三卷里。这些文献，即使在現在，也还可以作为很好的教学参考資料。

在 19 世紀后半期，發現了輻射能的傳播和輻射能轉变为热能的規律。

物体的热輻射現象具有巨大的理論意义和实际意义；所以在傳热学教程內要用单独的一篇來講解它。

著名的俄国物理学者 B.A. 米海里松，在 19 世紀 80 年代对輻射能进行了重要研究。他指出：一切有关热輻射的規律，終归是以热力学第二定律作为根据。他所著的“固体光譜內能量分佈理論解釋的實驗”（1887 年），是在輻射的新的量子理論創建以前（1900 年）完成的。

早在 1873 年 H.A. 烏莫夫所發表的“論能的流动”，对現代研



究各种形式的能量轉移有很大的意义。

在研究能量轉移过程时可以广泛地运用烏莫夫的能流學說。

B.Б. 高立金在他所著的“論輻射能”(1893年)一書里，第一次引用了輻射温度的概念。

П. Н. 列別节夫的著作，包含某些光压力的实验証明的著作(1900年)在內，对于輻射能的全部學說有着特別重大的意义。光的物質本性的發現，奠定了輻射的电磁學說和量子學說的基础。这种發現的荣誉就属于这位偉大的学者。

以前仅被一些物理学者研究的热傳播現象，在20世紀初开始成为工程上的研究对象。这一类的工作，像 K.Б. 基尔什所进行的鍋爐內傳热的研究，以及 B.И. 格里涅維茨基和 A.A. 拉德茨格在热傳导对于蒸汽机和內燃机运行經濟性的影响方面的研究，都是当时(1904—1915年)在工程中应用傳热理論最傑出而且最完善的典范。

創立建筑热工學派的著名的采暖通風專家 B.M. 恰波林，研究了建筑热工方面与傳热有关的諸問題。

在學習采暖、通風、鍋爐設備及供气等这样一些專業課程时，傳热問題的研究具有非常重要的意义。所有这些專業課程，都列入建筑学院“采暖通風”專業的教學計劃。

房屋的采暖，可視為采暖設備的热流对抗室外空气的低温度波侵入室內的一种特殊的反作用。一年內室內温度高于室外空气温度所需維持的时间的長短，与当地的气候条件有关。在这种情况下，采暖設備所放出的热量，必須补足由房屋外壁發散到周圍介質中去的相应的热量損失。

在房屋采暖方面的燃料总消耗量，佔苏联国民經濟的燃料平衡的一大部分。所以与傳热計算有关的热力經濟問題，無論在選擇各种房屋合理的圍护体的結構上，或者在建立完善的房屋采暖系統上，都具有極重要的意义。

必須指出，人的体温調節过程，是借助于向周圍介質傳热来进行的。所以合理的房屋采暖系統的選擇，归根到底是与苏联一

向很注意的保护人类健康問題联系着的。

傳热对于房屋的通風也有很重要的意义。例如，房屋的自然通風是由于采用某种热源来加热流入的新鮮空气而發生的。在有人工通風設備时，也必須使流入屋內的新鮮空气受热或冷却。

在鍋爐裝置中，取得蒸汽或热水的过程，是由于燃料的燃燒产物將热量傳給水而發生的。在这种情况下，要决定所需的加热面，就必须进行或多或少的复杂的傳热計算。

现在，沒有任何一个技术部門会完全找不到換热現象的应用。在許多技术部門里，傳热問題起着决定性的作用。

由于工業需要而發展起来的換热學說，已經成为一門独立的学科——“傳热学”；这一門学科在苏联的高等学校內，从本世紀30年代起就作为一門普通技术課程来学习。

在第一个五年計劃里，技术的急剧發展，需要解决很多与各种形式換热有关的新問題。如果說傳热問題以及同热力学有关的輻射能諸定律在十九世紀已經形成的話，那么因液体和气体流动而傳遞热量的过程，包含很多种所謂对流換热現象在內，直到1925年还研究得很不够。这方面的工作是由M. B. 基尔比切夫院士开始的，他是研究热交換的苏維埃學派的奠基者，他并且制定了研究換热的新理論——相似理論和模化理論。

在最近30年內，苏維埃热工學派成功地解决了各种情况下有关換热的很多問題，并且拟出了研究导热、对流換热和輻射傳热的新方法。M. B. 基尔比切夫和M. A. 米海也夫在热力設備模化方面的著作；P. M. 康德拉基也夫所創造的正常热情况的方法方面的著作；Д. Л. 齐姆洛特和H. B. 瓦尔加夫契克有关气体及蒸汽的导热研究的著作；B. C. 魯克揚諾夫有关水力模型应用的著作以及M. A. 米海也夫所著的教科書“傳热学基础”，都获得了斯大林獎金。

实际的需要促使了各种热交換方式的研究卓具成效。因此特別應該記住斯大林的話——热烈地号召將理論和实践不断的联系起来的話：“科学底原理向来都是由实践，由經驗来考驗的。如

果科学和实践断絕了关系，和經驗断絕了关系，那它还算是什麼科学呢？……科学所以叫做科学，正是因为他不承認偶像，不怕推翻过时旧物，却很仔細傾听实践底呼声”<sup>①</sup>。

在前面提到过的罗蒙諾索夫所著的“論冷和热的原因”中写道：“如果一个較热的物体  $A$  与另一个較冷的物体  $B$  相接触，那么在接触点上物体  $A$  的質点比与其相隣的物体  $B$  上的質点轉动較快，而这些轉动得較快的質点就加速了物体  $B$  上的質点：第一个物体损失多少动能，第二个物体就获得多少动能”<sup>②</sup>。

热的傳遞可以由各种方法进行。例如，热由較热的部分轉移到另外部分。这种能量在物体內的轉移叫做导热。

不仅在固体內能發生导热，在液体及气体內也能發生。在这些情况下，液体或气体各部分可能的迁移使得热量的轉移过程大为复杂。

热量在流动介質中的轉移，是在气体或液体的个别区域内有温度差存在时發生的。

在这种情况下，流动的液体或气体的受热部分使热量轉移。这种热傳播的方法叫做对流换热。介質的流动可能是自然的，也可能是受迫的。自然流动，或自由流动，是在靠近物体表面处的介質局部受热或被冷却时發生的。介質受附加作用，例如受水泵或送風机的作用而产生受迫流动。根据介質流动的情况，將对流换热分为自然流动的和受迫流动的两种。

具有任何温度的各种不同的物体都能够輻射能量；这种能量是以光速在空間內傳播的。这些物体也能够吸收落在它上面的輻射能，并且將它变为热能，有时也轉变为其他形式的能。如果进行輻射换热的物体温度不同，那末由于輻射换热的結果，热便由一个物体傳至另一个物体。

① 斯大林：“列宁主义問題”第11版，中譯本人民出版社1953年版73頁。

② 参阅苏联科学院出版社1951年出版的M. B. 罗蒙諾索夫全集第二卷“物理和化学部分”1747—1752頁。

溫度差的存在是熱從一個物體傳遞到另一個物體，或由介質的某一部分傳到其它部分的共同條件。

上述各種熱傳遞的方式：導熱、對流換熱、輻射換熱——各有其本身的規律性。在着手詳細地研究各種熱傳遞的方式以前，需要簡略地介紹一下它們的規律性。

### a) 導 熱

在受熱不均勻的物體各部分的溫度趨向一致的過程里，由於導熱而產生熱流。在一般情況下，導熱理論就是研究物體各部分溫度隨時間而變化的關係。同時物體是被當做密實的不具有間斷結構的介質；而熱流的數量，也就是經過物層一定面積的熱量，與在熱量的轉移路程的單位長度上的溫度差成比例。

這個導熱理論的假設是由傅里葉提出的(1807年)；在數學上，用下式來作最簡單的描述：

$$Q = \lambda \frac{t_1 - t_2}{s} F \tau \text{ 大卡,} \quad (1)$$

式中  $Q$ ——在  $\tau$  時間內流經厚度為  $s$  的物層的熱量；該物層的兩邊溫度差為  $(t_1 - t_2)$ ，而該物層的面積為  $F$ 。表示物體導熱特性的比例係數  $\lambda$ ，稱為導熱係數，其數值由實驗來測定。如果方程式(1)中的數量都用工程單位來表示，則其單位為大卡/公尺·時·°C。

為了判別各種物體的導熱能力究竟有多大的差別，讓我們舉幾個導熱係數的極端數值：例如，在室溫下靜止空氣層的導熱係數為  $\lambda \approx 0.02$  大卡/公尺·時·°C；而銅卻具有  $\lambda \approx 350$  大卡/公尺·時·°C。根據導熱係數的數量將物體分為熱的良導體與不良導體。

如試驗所指出，物體的導熱係數不是一個常數。很多物體的導熱係數多少與溫度有關，也和其他因素有關。所以在研究導熱時，公式(1)只在溫度差很小時才可作為運算的基礎，因為在這種溫度差的範圍內，由於導熱係數隨溫度而變化所引起的誤差很小。

在誤差很大的情況下，這種變化就需要考慮。

在某些情況下，物體不能視為一個連續的整體。例如稀薄的气体(其中分子自由行程的長度超過了容器的尺寸)、碎塊或粉末狀的物體以及具有很大大空隙的物體等，都不能應用這種條件。但是在這些情況下，如果空隙或碎塊的大小和物體總的幾何尺寸比起來很小的話，我們可以成功地引用某些平均導熱系數的概念。大多數的固體、液體及氣體，在一般情況下可以有條件地認為是連續的介質。在這種條件下，對於導熱的研究，採用上述假設已足夠精確。上述假設的微分式可寫成下列形式：

$$dQ = -\lambda \frac{\partial T}{\partial s} dF dx. \quad (1')$$

在式中放置負號，是因為熱量向低溫方向傳播，因而在這個方向的溫度增量是負數。

以下一些概念對於導熱理論具有重要的意義：即“等溫面”、“溫度梯度”及“熱流”。為了便於通曉導熱理論，就需要在開始研究時將這些概念介紹一下。

**等溫面** 在具有熱傳播的物體內，在任何時刻都可以分割出以具有同一溫度  $T_i$  和  $T_{i+1}$  兩表面為界的許多層，並且在每一層的兩表面之間具有相同的溫度降  $\Delta T_i$  (圖 1)。這樣一些具有同一

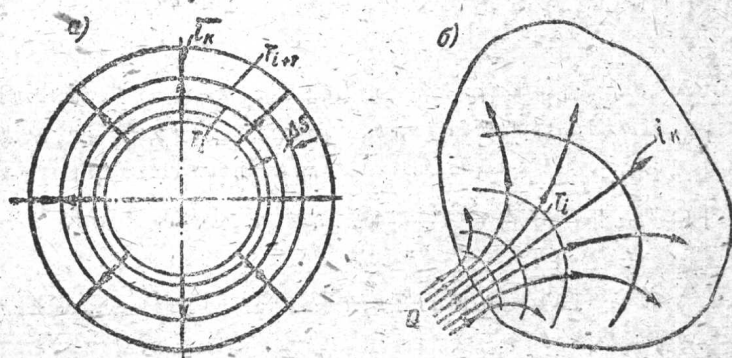


圖 1 等溫綫及熱流綫

a—在管壁的橫截面上；b—在物體表面上局部傳熱給物體時的情況。

温度的表面称为等温面。在任何时刻，所有等温面的综合就给出了物体内部温度分布的情况，亦即给出了物体内部温度场。物体在受热或冷却时，其各部分温度随时间而变化，因此，在每一瞬间等温面的位置也要发生变化。此时，温度场也将随时间而变化，或不稳定。也有温度场不随时间变化的情况，这种情况即为静止的，或稳定的热状态。

用任何平面来割切各等温面，则在截面的平面上就得出许多等温线来。图 1 中  $a$  所表示的即为由内向外传热时管壁横截面上的等温线。

温度梯度 很明显，热量不能沿着等温面传播，因为在这些方向温度没有变化。物体内部的热传播，只能由一个等温面朝向另一个温度较低的等温面进行。

在均一的物体内部，热量传播的最短路径显然是沿着等温面的法线方向。下面所示比值的极限，是研究物体导热时很重要的一个数量：

$$\left| \frac{\Delta T'}{\Delta s} \right|_{\Delta s \rightarrow 0} = \frac{\partial T'}{\partial s}$$

此量是沿着热传播方向温度变化的数量。这个矢量称为温度梯度，并用符号  $\text{grad } T'$  或  $\nabla T'$  表示。

比热流 利用温度梯度的矢量概念及方程式 (1)，就可以用下式来表示单位时间内流经单位面积的热量：

$$\vec{q} = -\lambda \text{grad } T' \text{ 大卡/公尺}^2 \cdot \text{时} \quad (2)$$

或

$$\vec{q} = -\lambda \nabla T'$$

$q$  称为比热流、热流密度或热流矢量。

矢量  $q$  在  $x, y, z$  轴上的投影称为矢量的分量：

$$\vec{q}_x = q \cos(q, x),$$

$$\vec{q}_y = q \cos(q, y),$$

$$\vec{q}_z = q \cos(q, z).$$

对于等温面法线方向的比热流，可用下式表示：

$$q_n = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \quad (2')$$

在热量从一个等温面向另一个等温面传播的路径上，各等温面法线的包络线叫做热流线，在物体内部，这些线的综合就明显地表示出热传播的景象。图 1a 中的等温线是同心圆，所以热流线就沿着半径方向。图 1b 为物体内部较复杂的热传播情况的热流线及等温线图。

### 6) 对流换热

在流动的带热体(液体或气体)内的传热，比较在不流动介质内的传热更为复杂。由于介质的局部受热或冷却而引起该介质各部分迁移的结果，使介质的温度趋向一致。这不仅是由于导热所致，同时也由于随着流动的被冷却或受热的部分使热量发生转移所致。这样的热量转移，叫做带热体在自由流动情况下的对流换热。在介质局部受热或被冷却时，其自由流动的速度不大。因此，自由流动时对流换热的强度一般都不大。为了把它加强，就必须采用使带热体受迫流动的方法，也就是用水泵、通风机或任何其他使运动强烈的机械来使流体流动。当带热体的流动速度足够大时，强迫流动时的对流换热要比自由流动时的对流换热剧烈得多。

物体表面及带热体流<sup>①</sup>之间的对流换热，称为对流放热或接触放热。

在研究对流放热时，基本上是采用牛顿——李赫曼所提出的定律；按照这个定律，由具有不变温度  $t_f$  的表面  $F$  的物体向具有不变温度  $t_0$  的周围介质在  $\tau$  时间内所放出的热量，可用下式来表示：

$$Q = \alpha(t_f - t_0)F\tau \text{ 大卡}, \quad (3)$$

<sup>①</sup> 这里带热体流的“流”的意思，相当于前面提到过的气流或液流等的“流”；原文为 поток。——校订者

式中  $\alpha$ ——比例常数，称为对流热系数或对流换热系数。此系数在大多数情况下是用实验方法来求出的，其单位为 大卡/公尺<sup>2</sup>·时·°。

实验指出，对流放热系数并不是常数，而是同很多描述介质的状态、流动情况以及物体形状和尺寸的参数有关的。为了判别对流放热系数之间的差别，让我们举几个在不同情况下的对流放热系数的数值。例如，在热的平板附近仅有自由流动的空气时的对流放热系数  $\alpha \approx 2$  大卡/公尺<sup>2</sup>·时·°C；而在同样的平板附近有强迫流动的空气时的对流放热系数就很大，它同空气流动的速度有关，约为 10, 20 大卡/公尺<sup>2</sup>·时·°，或者更大一些。

水在管内强迫流动时的  $\alpha$  可能达到 5000 大卡/公尺<sup>2</sup>·时·°C，或更大。而凝结在冷壁上的蒸汽或液体在热壁上沸腾时，其对流放热系数常常超过 10 000 大卡/公尺<sup>2</sup>·时·°C。

对流换热的研究同带热体流的流体动力学问题有关，在这种情况下，流体动力学具有决定性的意义。流体动力学是作为一门独立课程来研究的，其基本原理在这里认为已经知道了。

## б) 辐射换热

辐射换热不同于导热和对流换热，它是热的一种特殊传播方式。像其他形式的辐射一样，热辐射的载体也是电磁波，或者用另一种概念，即为以光速在空间传播的光子。在工程中遇到的普通温度下，热辐射主要是由波长大于 0.7 微米的电磁波构成的。各种不同物体的热辐射决定于它的热状态，亦即温度。但即使在同一温度下，各种物体的辐射能力也是不一样的。例如，在一定温度下，磨光的金属表面，比盖着氧化层的同一种金属表面所辐射的能量要小几十倍。在一定温度下，物体的辐射能力不可能超过某一最大值。在一定温度下，具有最大辐射能力的理想物体称为“绝对黑体”。一切实际物体的辐射能量仅为同一温度下绝对黑体辐射能量的一部分。

任何物体所辐射的能量，在一般情况下，部分地被周围介质



所吸收，部分地落于其他物体上，以及部分地散射到周圍的空間去。介質对于各种射綫的吸收能力亦不同，例如，絕对干燥的空气对于热射綫是完全透过的，而帶有水蒸汽的空气就能显著地吸收热射綫，特別在气層很厚时期更甚，例如地球上的大气層。固体及液体吸收热射綫的能力一般比較大，但这些物体同时也具有显著的反射能力。

处于透明介質中的各物体，如果具有不同的温度，則在物体之間就进行輻射換热。各种物体輻射換热的强度，依其温度、輻射力、吸收率、反射力、形狀、大小以及相对位置等而有所不同。

两个被透明介質所隔开的物体之間的輻射換热量，可写成下式：

$$Q_{1,2} = F_1 \rho_{1,2} A_{\text{ycl}} \times 4.9 \times 10^{-8} (T_1^4 - T_2^4) \text{大卡/时}, \quad (4)$$

式中  $F_1$  —— 与物体 2 进行輻射換热的物体 1 的面积；

$\rho_{1,2}$  —— 由物体 1 的表面放射出而落于物体 2 的表面上，輻射能量的百分数；

$A_{\text{ycl}}$  —— 进行吸收的物体的假定黑度系数(絕对黑体  $A=1$ )；

$T_1$  和  $T_2$  —— 物体 1 及 2 的温度。

物体温度的四次方相差越大，同时物体靠得越近，則輻射傳热量就越大。在各个热物体的温度相当高及其温度相差甚大的情况下，輻射傳热量能够达到很大的数量，常常超过对流传热量：

像在鍋爐和燃燒爐內就發生这种情况。但是也有些物体即使不具有很高的温度，而它的輻射傳热量也很显著。例如，屋用火爐的外表面把一大半的热量以輻射換热的方式傳給其四周；只有小部分热量是直接以对流換热方式傳給室内的空气。

### г) 复杂換热

在很多情况下，物体表面的換热是同时以对流及輻射来进行的，因此計算复杂換热的公式就写成下列形式：

$$\begin{aligned} Q_{\text{общ}} = Q_{\text{конв}} + Q_{\text{луч}} = F_1 \alpha_{\text{конв}} (t_F - t_0) \\ + F_1 \rho_{1,0} A_{\text{ycl}} \times 4.9 \times 10^{-8} (T_F^4 - T_0^4), \quad (5) \end{aligned}$$