

房屋围护部分的 建筑热工学

K. 中. 福 庚 著

建 筑 工 程 出 版 社

房屋圍护部分的建筑热工学

譚天祐、梁紹儉 譯

建筑工程出版社出版

• 1957 •

內容提要 本書詳盡地敘述了下列建築熱工學的問題：建築材料的热工性能、在穩定熱流及不穩定熱流情況下的熱傳導、平面及空間溫度場的計算、圍護結構的空氣滲透性、圍護結構個別部分熱工狀況的特徵、在圍護結構中具有蒸汽水分及液態水分的濕度狀況。

本書為了說明內容，還舉有許多的例題。

本書可作為設計工程師在實際工作中的指南。

原本說明

書 名 СТРОИТЕЛЬНАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА
ОГРАЖДАЮЩИХ ЧАСТЕЙ ЗДАНИЙ
編 著 者 К.Ф. ФОКИН
出 版 者 Государственное издательство литературы
по строительству и архитектуре
出版地點 及 年 份 Москва——1954

房屋圍護部分的建築熱工學

譚天祐、梁紹儉 譯

*

建築工程出版社出版（北京市阜成門外南禮士路）

（北京市書刊出版業營業許可證出字第062號）

建築工程出版社印刷廠印刷·新華書店發行

書號660 255千字 850×1168 1/32 印張97/8

1957年12月第1版 1957年12月第1次印刷

印數 1—1,360冊 定價（11）2.40元

譯 者 的 話

本書系根据 1954 年莫斯科国立建筑出版社出版的技术科学副博士 К. Ф. 福庚所著的“房屋围护部分的建筑热工学”增訂三版譯出的。

在翻譯方面，苏联专家 А. А. 連斯基同志的热情帮助和鼓舞，对完成本書的翻譯工作起着重大的作用，我們謹此致謝。

在校訂方面，我們感謝西安建筑工程学院采暖通风教研組鄭惠春和叶龙以及物理教研組刘立本老师对我們的帮助。

本書的第一篇第一、二、三、五、六、七章及第二篇第一、二、四章是由譚天祐同志翻譯的，本書的第一篇第四、八章及第二篇第三章是由梁紹儉同志翻譯的。

本書在翻譯和校訂期間虽然得到了各方面的帮助，但是由于我們的水平不高，难免有不当之处，敬請讀者指教。

目 录

前 言	7
主要符号	9
序 言	11

第一篇 热 傳 导

第一章 热傳导的基本概念和热傳导方程式	13
第一节 导热	14
第二节 对流傳热	18
第三节 輻射傳热	19
第二章 建筑材料的热工性質	23
第一节 空隙度及容重	24
第二节 湿度	25
第三节 导热性	27
第四节 热容量	38
第五节 热輻射	39
第三章 在稳定热流情况下的热傳导	40
第一节 圍护結構傳热阻的計算	42
第二节 空气間层	61
第三节 圍护結構内部溫度的計算	69
第四节 具有强烈輻射时圍护結構內表面溫度的計算	76
第四章 溫度場和它的計算	84
第一节 平面溫度場	85
第二节 空間溫度場	94
第三节 溫度場的电力模型	105
第五章 不稳定热流情况下的热傳导	107
第一节 有限差分法	107

第二节	在不稳定条件下, 传热过程的模型試驗	120
第三节	热同化	122
第四节	热稳定	133
第五节	太阳辐射的作用	146
第六节	室外空气的计算温度	158
第六章	外圍护結構保温質量的规范	162
第一节	传热阻的规范	162
第二节	热稳定的规范	166
第七章	空气渗透	168
第一节	材料的空气渗透性	171
第二节	圍护結構的空气渗透性	173
第三节	圍护結構的空气渗透阻的规范	182
第四节	計算带通风空气間层的圍护結構	184
第八章	外圍护結構个别部分的热工特征	190
第一节	墙的外角及其保暖	191
第二节	圍护結構的聯結	198
第三节	导热的嵌入体	201
第四节	窗洞	204

第二篇 湿度状况

第一章	外圍护結構湿度状况的一般概念	210
第一节	外圍护結構湿度状况的意义	210
第二节	在外圍护結構中出現水分的原因	212
第二章	凝結和水蒸汽的吸收	214
第一节	空气的湿度	214
第二节	水分在圍护結構上的凝結	219
第三节	防止在圍护結構表面上产生水分凝結的措施	221
第四节	吸收	223
第三章	蒸汽水分对圍护結構的受潮作用	228
第一节	蒸汽渗透性	228
第二节	在水蒸汽扩散的稳定条件下湿度状况的計算	232
第三节	在水蒸汽扩散不稳定条件下湿度状况的計算	244

第四节	防止圍护結構中水分凝結的措施	254
第五节	无閣樓屋頂的湿度狀況	260
第四章	在圍护結構中液相水分的轉移	265
第一节	O. E. 弗拉索夫教授的毛細扩散原理	266
第二节	建筑材料中水分的轉移	270
第三节	在圍护結構中有液态水分时湿度狀況的計算	273
第四节	液相水分及汽相水分共同轉移的計算	283
附 录 1—7	参考表	302

前 言

本書是我1937年出版的“建筑热工学”第二版修改和补充而成的。在修改本書时，曾考虑到在建筑热工学領域內近几年来祖国科学研究工作的情况。在分析和评价这些工作时，一般地可以说，这些工作的特点是深入而詳尽地分析了建筑热工学上的問題，同时除理論研究以外，还包括有重要的实验資料。

苏联共产党第19次代表大会关于1951~1955年苏联发展第五个五年计划的指示中，制定了苏联今后建筑的偉大计划，其中指出：必須“在城市和工业建筑方面，更坚决地运用新的有效的砌墙材料……”^①。因此，研究这些材料的性能，其中包括热工性能，乃是本書所反映的迫切任务。

本書与第二版比較，作了下列的修改和补充。

由于作者在外圍护結構湿度状况方面的研究工作，建筑热工学中这一章比前一版增加了很多，因此，本書分成了两篇：第一篇——包括热傳导的問題；第二篇——包括湿度状况的問題。

第一篇中加入了第二版內沒有包括的下列問題：平面和空間溫度場的計算；空气渗透性及在热工方面它对圍护結構的影响的計算；用有限差分法来計算热流不稳定时圍护結構的溫度变化；用技术科学博士Л. А. 西蒙諾夫的方法来計算房間中的热稳定問題；用技术科学副博士А. М. 什克洛維尔的方法来計算圍护結構中溫度波动衰减的問題。在个别章节中介绍了热傳导的基本概念和公式。在書中有本書作者所研究出来的确定室外空气計算溫度的新方法。由于补充了新的問題和本書篇幅的限制，不得不縮減本書本篇其他問題的闡述。

^① “苏联共产党第19次代表大会关于1951~1955年苏联发展第五个五年计划的指示”，人民出版社1953年版，第10頁。

在本書第二篇中补充了蒸汽扩散及液态水分毛细扩散时，在不稳定情况下围护结构的湿度状况的计算。改写了关于计算其中有通风空气间层的围护结构湿度状况的问题。在本篇中尽量不缩减第二版的内容。

在本书中包括有大量解释本书中所阐述的计算方法的具体数字的例题，以便读者很好地掌握本书中的材料。

在本书末的参考书籍中，载有编写本书时所应用的参考书来源，以及本书中所没有叙述的问题。

作 者

主 要 符 号

本書中采用了下列主要符号和因次:

- | | |
|---|---|
| <p>Q——热量或热流(仟卡; 仟卡/平方公尺; 仟卡/平方公尺·小时)。</p> <p>t——空气温度(度)。</p> <p>t_B——室内空气温度(度)。</p> <p>t_H——室外空气温度(度)。</p> <p>T——绝对温度〔度 ($T = t + 273^\circ$)〕。</p> <p>τ——材料的温度或围护结构表面的温度(度)。</p> <p>τ_B——围护结构内表面的温度(度)。</p> <p>τ_H——围护结构外表面的温度(度)。</p> <p>τ_p——露点温度(度)。</p> <p>A_t——空气温度的波动振幅(度)。</p> <p>A_z——表面温度的波动振幅(度)。</p> <p>λ——材料导热系数(仟卡/公尺·小时·度)。</p> <p>λ_g——空气的当量导热系数(仟卡/公尺·小时·度)。</p> <p>c——材料的比热(仟卡/公斤·度)。</p> <p>g——材料的比重(公斤/立方公尺)。</p> <p>γ——材料的容重(公斤/立方公尺)。</p> | <p>a——导温系数(平方公尺/小时) ($a = \frac{\lambda}{c\gamma}$)。</p> <p>$p$——材料的空隙度(%)。</p> <p>$s$——材料的热同化系数(仟卡/平方公尺·小时·度)。</p> <p>S——围护结构或其单个层的表面的热同化系数(仟卡/平方公尺·小时·度)。</p> <p>C——材料的辐射系数〔仟卡/平方公尺·小时 ($\frac{\text{度}}{100}$)⁴〕。</p> <p>k——围护结构的传热系数(仟卡/平方公尺·小时·度)。</p> <p>R_0——围护结构的传热阻(度·平方公尺·小时/仟卡)。</p> <p>R——围护结构或其单个层的热阻(度·平方公尺·小时/仟卡)。</p> <p>α_K——对流传热系数(仟卡/平方公尺·小时·度)。</p> <p>α_H——辐射传热系数(仟卡/平方公尺·小时·度)。</p> <p>α_B——感热系数〔仟卡/平方公尺·小时·度 ($\alpha_B = \alpha_K + \alpha_H$)〕。</p> <p>$R_B$——感热阻〔度·平方公尺·小时/仟卡 ($R_B = \frac{1}{\alpha_B}$)〕。</p> <p>$\alpha_H$——放热系数(仟卡/平方公尺</p> |
|---|---|

·小时·度 ($\alpha_H = \alpha_K + \alpha_{II}$)]。

R_H ——放热阻 [度·平方公尺·小时/仟卡 ($R_H = \frac{1}{\alpha_H}$)]。

D ——单个层的热惰性指数 (无因次)。

W ——空气量 (公斤或公斤/平方公尺·小时)。

v ——空气流动速度 (公尺/秒)。

Δp ——空气压力差 (公厘水柱高)。

i ——材料的空气渗透系数 (公斤/公尺·小时公厘)。

R_H ——单个层的空气渗透阻 (公厘·小时·平方公尺/公斤)。

e ——水蒸汽分压力 (公厘水银柱高)。

E ——水蒸汽最大分压力 (公厘水银柱高)。

f ——空气绝对湿度 (克/立方公尺)。

φ ——空气相对湿度 (%)。

ω_B ——材料重量湿度 (%)。

ω_0 ——材料体积湿度 (%)。

μ ——材料的蒸汽渗透系数 (克/公尺·小时·公厘)。

R_H ——单个层的蒸汽渗透阻 (公厘·小时·平方公尺/克)。

ξ ——材料的蒸汽比容量 (克/公斤·公厘)。

ξ_0 ——材料的相对蒸汽容量 (克/公斤)。

β ——材料的导水系数 (克/公尺·小时%)。

P ——水蒸汽量 (克/平方公尺·小时)。

G ——液态水分量 (克/平方公尺·小时)。

δ ——围护结构或其单个层的厚度 (公尺)。

F ——面积 (平方公尺)。

V ——体积 (立方公尺或立方公分)。

Z ——时间 (小时或昼夜)。

序 言

建筑热工学是“建筑物理”课程中的一部分，在建筑物理中，除热工学外，尚包括建筑光学和声学。建筑热工学在建筑物理中占有很显著的地位。

在建筑热工学中主要的部分是经过房屋围护结构的热传导，其中包括空气渗透问题。建筑热力学的另外一部分是与热传导过程有密切联系，同时其意义并不亚于热传导的围护结构湿度状况。

建筑热力学的知识是建筑工作者合理地设计房屋外围结构所必需的。在现代的建筑中以及在第 19 次党代表大会关于 1951~1955 年苏联发展第五个五年计划的指示中所拟定的现代建筑进一步工业化中，建筑热工学具有特别巨大的意义。

在广泛地运用装配式工业化结构中，要求设计者利用最合理的材料组合的新的结构处理方案。

取决于房屋外围结构的热工性质的有：1) 在冬季房间所损失的热量，这具有很大的经济意义；2) 在冷藏室内——夏季进入室内的热量，因而需要冷却装置的能力和经营管理冷却装置的经费；3) 当采暖系统不均匀放热时室内空气温度随时间的变化，这具有极大的卫生意义；4) 夏季防止太阳使房间过热，这在卫生上有很大意义，特别在苏联的南部地区是如此；5) 围护结构内表面的温度，在围护结构的表面上形成凝结水的可能性就取决于该温度，出现凝结水的现象无论从卫生上或损坏围护结构表面上的装饰来看都是不允许的；6) 围护结构的湿度状况，这对于降低围护结构隔热性质和耐久性有极大的意义。

具有热传导时，围护结构中所发生的过程的清晰概念和能够利用相应的计算方法，就使设计者有可能保证外围结构所要求的质量。“建筑热工学”的内容就是叙述所有这些问题。

在苏联，“建筑热工学”这门科学是最近25~30年由苏联学者们的劳动所创立的，他们的工作保证了苏联在这门科学世界领域中占优先的地位。

苏联B.Д.馬琴斯基教授是“建筑热工学”的創始者。1928年他所出版的“民用建筑热工原理”一書，是这门科学中第一个专门著作。技术科学博士O.Е.弗拉索夫的工作对发展建筑热工学有着巨大的影响，特别是他的关于热稳定的杰出著作及湿度状况方面的工作。

根据O.Е.弗拉索夫热稳定理論，技术科学副博士A.М.什克洛維尔研究出了圍护結構內温度波动衰减及建筑物內空气温度波动衰减的計算方法。而技术科学博士Л.А.西蒙諾夫研究出了火爐采暖时室內空气温度波动的实用計算方法。本書作者研究出了蒸汽水分及液态水分使圍护結構受潮时，圍护結構潮湿状况的实用計算方法，以及圍护結構內温度場的計算方法。科学技术副博士P.Е.布里林格研究了圍护結構的空气渗透問題，同时正在进行建筑材料中水分轉移的研究工作。技术科学博士Л.А.謝尔克教授在自己的著作——“工业与民用建筑学”中广泛地应用了建筑热工学。技术科学副博士B.М.伊林斯基在建筑热工学的基础上創造了設計圍护結構的理論，同时也研究了一些建筑气候学問題。

在苏联研究建筑热工学的科学机关有：中央工业建筑科学研究所(从1927年开始)、建筑科学院(从1945年开始)、建造部科学研究所、公用事业科学院、全苏化学科学研究所，还有很多加盟共和国科学研究部門。

在建筑热工学的领域中，苏联学者们的共同努力創造了苏联的先进学派，并在繼續地使其完善。

第一篇 热 傳 导

第一章 热傳导的基本概念和热傳导方程式

在某一介質中，只是当在一些个别地方的温度有了差異时，才能够产生热轉移。介質中的温度差是产生傳热現象的必要条件，同时，热轉移的方向是由高温流向低温。

当房屋内部的空气与房屋周围的室外空气之間具有温度差时，就会产生通过該外围护結構（外墙、窗、屋頂、地板）的傳热。冬天，在采暖房屋中，傳热是經過外围护結構由室内向室外进行，房屋所损失的热量由各种采暖系統来补充。冷藏室中，以及在夏天其他房屋中，傳热是通过外围护結構以相反的方向进行，即流向室内。在冷藏室中，是利用冷却机来維持必需的空气温度。在其他房屋中，是利用通风机来降低温度，而在用途特殊的房屋中，則利用空气調節的系統自动地保持必需的空气温度。

傳热方式分三种：导热（或傳导）、对流和輻射。

导热——导热無論在固态介質中，或在液态和气态介質中都会产生，但是，純粹的导热只是在密实的固体中才能够見到。导热是一种分子現象，这种現象是由在分子接触时依次地傳遞物体分子的动能所組成。在固体（电介質）及液体中，以彈性波来轉移，在气体中，以原子或分子的扩散，而在金屬中，以电子的扩散来导热。絕大多數的建筑材料不是密实的固体，而是有孔的，在固体的孔內将会产生其他方式的傳热；但是，在热工計算中，可以認為在固体材料中热的傳导只是按导热的規律来进行。

对流——对流只在液态及气态介質中产生。对流是以液体或气体状态运动的分子来进行热轉移。这里需要分开两种对流的方式：自然的，在介質中的运动是取决于温度差，因而也取决于介

質的不同密度；及強制的，強制對流的分子運動是由外界的機械作用（將不同介質混合、通風機吹風等）所引起的。

輻射——只有在氣態介質及真空中才產生輻射。熱輻射是在互相輻射的兩個表面間以電磁波的形式轉移能量，同時，也產生了能量的雙重轉化：熱能轉化成輻射出熱量的物體表面上的輻射能，輻射能轉化成吸收輻射熱量的物體表面上的熱能。

通過房屋圍護結構的熱傳導，主要是由導熱來完成。對流及輻射傳熱是產生在空氣間層中，以及產生在使結構與室內及室外空氣隔離的表面附近。

第一節 導 熱

在導熱的分析理論中，完全不考慮物質的分子構造，在這裡，不是將物質看成分子的總和，而看成是整體的物質。

為了導出導熱的微分方程式，首先研究一下一度溫度場問題的情況，即只研究沿一個座標軸綫的熱運動情況。這種情況是在通過無限長的平面牆壁進行熱傳導的時候所產生的。將該牆壁分成厚度為 dx 的無限薄的層，該層中的溫度變化值為 dt 。假如，該層的溫度不隨時間而變化，即為穩定的熱流，那麼，在 1 小時內，通過該層 1 平方公尺的面積的熱量等於：

$$Q_1 = -\lambda \frac{dt}{dx},$$

式中 λ ——介質的導熱係數（仟卡/公尺·小時·度）。比例 $\frac{dt}{dx}$ 稱作溫度梯度，其因次為度/公尺。方程式右端的負號，是表示熱的運動方向流向低溫（負的溫度梯度）。

在一般情況下（不穩定的傳熱條件），當熱流通過所分出的這一層時，熱流的大小會產生變化。為了決定熱流在該層中的變化值，需要將上式 dx 加以微分，這時得：

$$\frac{dQ_1}{dx} = -\lambda \frac{d^2t}{dx^2}. \quad (a)$$

当温度随時間改变时，热流大小的变化与該层的吸热和放热有关。在 dZ 時間內，将厚度为 dx 层的温度提高到 t 时所需要的热量 dQ_2 ，将与該层的等于 $c\gamma dx$ 的比热成比例，即：

$$dQ_2 = -c\gamma dx \frac{dt}{dZ},$$

式中 c ——材料层的比热（仟卡/公斤·度）

γ ——材料的容重（公斤/立方公尺）。

方程式右侧所加的負号是表示薄层的温度提高与其吸热及热量的减少有关（ dQ_2 ——負值）。

最后的方程式可以用偏导数的形式写出：

$$\frac{\partial Q_2}{\partial x} = -c\gamma \frac{\partial t}{\partial Z} \quad (6)$$

并同时表明材料层內的热流改变是由于該层內蓄存的热量的結果。

因为，当层內沒有內部热源时，热流的改变只是該层吸热的結果，所以 $\frac{\partial Q_1}{\partial x}$ 和 $\frac{\partial Q_2}{\partial x}$ 应当相等，由此，从 (a) 及 (6) 式中得：

$$\frac{\partial t}{\partial Z} = \frac{\lambda}{c\gamma} \cdot \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} \quad (1)$$

这就是一度温度場热流运动，即沿一个座标軸綫上的导热微分方程式。

$\frac{\lambda}{c\gamma}$ 值称为材料的“导温系数”，用字母 a 表示，因次为平方公尺/小时。

方程式 (1) 的物理意义如下：方程式的左端是介質的温度随時間的变化；方程式右端的导数是温度梯度的空間变化。因此，方程式 (1) 表明，在介質的每一点上温度随時間的变化与温度梯度的空間变化成比例。导温系数 $a = \frac{\lambda}{c\gamma}$ 就是这一比例常数，因此，它的物理意义在于，它說明了在介質各点上温度均衡的速度。 a 值越大，物体在冷却或加热时各点达到同样温度的速度越快。

在一般情况下，热流的运动可以在各个方向上（沿座标全部三个軸綫上）产生，在这种情况下，导热微分方程式的形式为：

$$\frac{\partial t}{\partial z} = a \left[\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right]。 \quad (2) \textcircled{1}$$

解决与导热有关的問題是将微分方程式（1）和（2）进行积分，同时为了求得积分常数，必須知道所謂边界条件。边界条件分時間的和空間的两种。時間的边界条件是給出最初的温度分布情况，即給出 $Z=0$ 时的温度分布情况。空間的边界条件是限制該介質的表面。上述边界条件可分三种：

第Ⅰ种边界条件是給出在該表面上温度分布的情况及湿度随時間而發生的变化。这个条件最簡單，但是实际上很少遇到；

第Ⅱ种边界条件是給出通过該表面的热流值及其随時間而發生的变化。因此，在这种情况下，已知数是在温度曲綫与表面的交点上切于該曲綫的切綫傾斜角，而不是該表面上的温度值；

第Ⅲ种边界条件是給出圍繞該表面的介質（一般是空气或液体）温度和表面与周圍介質热交換的規律。这个边界条件最复杂，同时，实际上应用得最广。在通过房屋圍护結構傳热的問題中，一般都是給出第Ⅲ种边界条件。

导热微分方程式的分析解法是一个复杂的数学問題，因此，只有对于某些局部情况，同时有一系列的簡化前提时，才应用准确的解法。其中，对建筑設計有意义的是解决下列問題：

1. 在下列条件下，平墙壁或圓柱体的冷却和加热：即随時間的不同，周圍介質的温度仍为常数；墙壁的表面及圓柱体的长度为无限；材料为匀質的和开始时物体內各点的温度完全相同；

2. 当周圍空气的温度是諧和波动时，根据時間的不同平墙壁內所發生的温度变化；

3. 当平墙壁表面上的温度瞬时变化时，在无限厚的平墙壁

① 这个方程式以及方程式（1）都称謂傅立叶方程式（Фурье），因为这些方程式都是法国数学家傅立叶（1768—1830年）提出的。