

建筑热物理学

(采暖、通风与空气调节的
热物理学基础)

[苏] B.H.巴格斯科夫斯基 著

单寄平 译 黄福其 校

中国建筑工业出版社

及空气调节”教研室的教师、研究生和工作人员的帮助，而作为本书评审者的技术科学博士 A. A. 山泽尔 (Сандер) 教授曾向作者提出过不少建设性的意见和评语，特在此一并致谢。

本书是苏联1982年出版的高等学校“供热通风”专业和“煤气”专业用的教科书。本书的特点是：内容比较系统，说理比较清楚，取材比较新颖，有一定的理论深度和实用数据，既继承了苏联建筑热工学派的一些观点，又反映了最近十多年来苏联在建筑热物理方面的科技成果，是一本比较优秀的专业技术基础理论读物。全书共分九章：室内的换热；围护结构的导热和湿状况；通过围护结构的稳定传热；通过围护结构的不稳定传热；建筑物的空气状况及在通过围护结构传热过程中对空气渗透的考虑；房间冬季热状况；房间的热稳定性；房间的夏季热状况；房间热状况及全年运行条件下的微气候调节系统。

本书除可供高等学校供热通风和煤气专业师生作教学参考书外，对从事上述专业及建筑热工的科技工作者都有参考价值。

В.Н.Богословский

Строительная теплофизика (2-е изд.)

Издательство «Высшая школа», 1982

• • •
建筑热物理学

(采暖、通风与空气调节的热物理学基础)

单寄平 译 黄福其 校

•
中国建筑工业出版社出版(北京西郊百万庄)

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

中国建筑工业出版社印刷厂印刷(北京阜外南礼士路)

•
开本：850×1168毫米 1/32 印张：14 1/4 字数：395 千字

1988年8月第一版 1988年8月第一次印刷

印数：1—10,030册 定价：6.05元

ISBN7—112—00113—7/TU·70

统一书号：15040·5425

序 言

本教科书系按照“建筑热物理学”学科的教学大纲编写成的。因为本书是为供热、供煤气与通风专业大学生而写的，故书中仅限于讨论建筑物中发生的现象和过程。

在研究这一学科时，纯物理问题是与技术问题相互联系的。计算物理过程的可能发展，需要采用一定的技术解法，因而这一知识领域通常称作建筑热工学。在本教程中特别注重对物理现象的研究，因此这一教程称为建筑热物理学。

为了研究形成房间内微气候时所进行的热质交换过程，需要了解以下诸方面：对室内气候特性的要求及其各种影响因素，围护结构与其内外介质之间相互作用的规律，在受热和冷却表面上的热质交换过程及室内空调系统气流中的热质交换过程；热、湿和空气通过结构和材料传递时在其内所产生的现象；室外气象特性及其变化规律；建筑物全年工况和能耗。

鉴于问题的上述提法，在建筑热物理学中，热质交换理论、传热学、相似理论、湿空气热力学、不可逆过程热力学及气象学等方面的知识，都得到了应用。

当此各种围护结构和采暖与空调系统在苏联建筑工程中被广泛采用的时代，这一学科对苏联工程师来说就具有特别重要的意义。

本教科书的第二版较之1970年发行的第一版有很大的不同。在第二版中，实际上全部材料都经过了更新，并引入了一些新的章节。

本教程系为大学生，即未来的热工—土木工程师而编写的，他们今后在设计机构和生产部门中需要解决与建筑动力有关的一

切问题。在叙述书中的材料时，考虑到了专业教学计划中已有的学科：即热力学和传热学、流体力学和气体动力学、采暖通风和空气调节以及供热学。这种情况允许缩减教程和避免讲解为学好本科目所需的相邻学科中的共同问题的有关知识。

本教科书的任务在于教好未来的工程师对建筑物及其各个房间和结构的热、湿和空气状况正确地建立预测方法，以便在对其进行设计时，得以——从卫生学、技术和经济的观点出发——作出最有利的决定。

和教学大纲的作法一样，本教科书中材料的叙述不分为主要的和补充的。

最后应指出，作者自1962年以来在以B.B.古比雪夫命名的莫斯科建筑工程学院授课时所使用过的教材已反映入本教程之中。本教程在颇大的程度上包括着热物理学领域中的许多科研成果，这些科研成果系由莫斯科建筑工程学院采暖通风教研室的一大批教师、科研人员、研究生和大学生们完成的。在该教室内曾研究了室内的换热、室内环境条件的舒适度、室外计算条件的选择、房间的热稳定性和夏季状况、建筑物的空气状况、围护结构的湿度状况、空调系统的全年工况及其控制等问题。这些研究成果按其积累和总结的结果吸收为教材使用。它们是讲述本教科书各有关章节的基础。

本教科书采用了两种度量单位制，即国际单位制和公制。之所以作出这样的决定，乃是因为直到现时为止，所有正规文献和手册仍以公制作为度量单位出版。

本教科书中的物理量及其因次先以国际单位制给出，而在括弧中以公制给出。对带有因次数值系数的公式，则在同一公式编号内，先以国际单位制形式给出，在用两条垂直线隔开之后，再以公制形式写出。

本教科书一般问题的参考文献及各章一些个别问题的参考文献均在书末列出。

作者在准备原稿时曾得到莫斯科建筑工程学院“采暖、通风

目 录

序言

基本量的符号及其因次

绪论	1
第一章 室内的换热	5
1-1 建筑物的热状况	5
1-2 室内的换热	6
1-3 表面热辐射特性	8
1-4 室内表面之间的辐射换热	14
1-5 室内的对流换热和空气流动	28
1-6 自由对流	33
1-7 室内表面上的自然对流特点	40
1-8 考虑到室内空气总体流动性的自然对流	46
1-9 受迫对流和混合对流	48
1-10 贴附在围护结构水平表面上的平面射流的对流换热 和流动状况	50
1-11 贴附在垂直围护结构表面上的平面射流的对流换热	54
1-12 室内表面上的总换热	63
1-13 室内空气的热平衡	66
1-14 室内总换热的整体方程组	68
1-15 室内总换热的两个方程组体系	70
1-16 室内总换热的一个方程组体系	71
1-17 利用电模拟类比法计算辐射—对流换热	75
1-18 人体与周围介质的换热	79
1-19 计算的室内热条件	89
第二章 围护结构的导热和湿状况	103
2-1 导热的有限差分方程	104
2-2 通过多层围护结构不稳定传热问题完整的数学物理提法	107

2-3	建筑材料的热物理性能	111
2-4	室内空气的含湿量	115
2-5	潮湿材料的热力学基础	118
2-6	水蒸汽在吸收性介质中的扩散	134
2-7	湿传导	136
2-8	根据湿度势计算通过围护结构的传湿	137
2-9	在计算通过围护结构传热时对湿度状况的考虑	146
第三章	通过围护结构的稳定传热	155
3-1	一维温度场	155
3-2	二维温度场	157
3-3	通过肋传热的解析解	158
3-4	迭加方法	168
3-5	带有洞口的围护结构的传热	169
3-6	利用网格法和图解法建立二维温度场·形状因子	173
3-7	热电模拟方法	178
3-8	通过具有导热嵌入体的围护结构的传热	182
3-9	外墙角处的传热及通过围护结构接缝处的传热	187
3-10	复杂围护结构的导出传热阻	191
3-11	密闭空气层的传热	196
3-12	通风空气层	202
3-13	通过具有通风空气层的围护结构的传湿	209
3-14	通过由半透明材料构成的围护结构的传热	212
第四章	通过围护结构的不稳定传热	219
4-1	物体受热和冷却问题的解析解	220
4-2	壁体的单侧受热或冷却	232
4-3	在围护结构中温度波衰减问题的解析解	236
4-4	围护结构热稳定性的工程计算法	246
4-5	温度场的迭加和谐波的合成	260
4-6	当材料中的水分发生物相状态变化时的不稳定传热	266
4-7	有限差分法	269
4-8	水力模拟法	276
4-9	通过带有通风空气层的围护结构的不稳定传热	281
4-10	计算通过围护结构不稳定传热的响应系数法	289

第五章	建筑物的空气状况及在通过围护结构传热过程中对空气渗透的考虑	296
5-1	结构的空气渗透性	298
5-2	建筑物的空气状况	299
5-3	通过具有空气渗透性的围护结构的传热	304
5-4	在围护结构具有空气渗透性条件下室内所附加的热耗	314
5-5	选择采暖通风系统基本方案时对建筑物空气状况的考虑	316
5-6	运用电算机计算建筑物的空气状况	317
第六章	房间的冬季热状况	320
6-1	计算条件的保证率	320
6-2	室外气候特性	324
6-3	外围护结构的保温特性	330
6-4	围护结构所需的最小允许传热阻	332
6-5	围护结构最佳传热阻	335
6-6	房间最大热损失的确定	338
6-7	房间的供暖	343
6-8	空气冷气流的受限	344
6-9	窗玻璃的允许温度	347
6-10	散热器的传热	351
6-11	当停止供暖时房间的冷却	358
6-12	建筑物的热特性	360
第七章	房间的热稳定性	363
7-1	空气的温度波动及围护结构的吸热	364
7-2	房间的总换热及吸热过程	365
7-3	房间蓄热和吸热指标的确定	367
7-4	仅有辐射热或仅有对流热时的谐波进入热量与换热	376
7-5	仅有辐射热或仅有对流热时的间歇进入热量	379
7-6	当谐波及间歇进入热量时房间表面的对流及辐射综合换热	383
7-7	空气温度和表面温度的总体变化	389
7-8	热稳定性理论在微气候调节工况计算中的应用	393
第八章	房间的夏季热状况	397

8-1	夏季室内计算条件及其保证率	398
8-2	室外气候特性	400
8-3	对一年中炎热季节围护结构隔热性能的检验	408
8-4	通过外围护结构进入室内热量的计算	409
8-5	房间的昼夜平均热状况	420
8-6	房间的自然热状况	423
8-7	可控制的微气候调节系统的工况	430
第九章 房间热状况及全年运行条件		
	下的微气候调节系统	437
9-1	气象参数的全年变化	437
9-2	房间热状态在全年内的变化	442
9-3	采暖期的时间持续及采暖通风的热耗	443
9-4	计算空气状态变化过程的近似分析方法	447
9-5	空气调节过程的基本特性	448
9-6	空气调节系统的冷、热耗量和电能耗量	450
参考文献		453

绪 论

建筑科学系由涉及各种知识领域的许多部分所组成。直到不久之前，这些组成部分大半还是物理学、力学、地质学及其他学科的一部分，现今则已变成自身独立的一些学科了。其中之一便是建筑热物理学，这门学科系研究应用于建筑工程方面的传热、传湿及空气渗透现象。

许多与建筑热物理学有关的问题，对建筑师来说都是至关重要的，这类问题包括诸如在季节性土壤冻结地区及“永冻土”地带，土壤的冻结和隆起及其对工程构筑物的影响；水利工程建筑，特别是在水位变化和地下水渗透地区的这类建筑的热湿状况；以及当工厂预制建筑构件时，有关材料的抗冻性、制品的干燥、混凝土凝固和预制时的热质交换过程等。

在一切建筑物中，房屋建筑是易受最复杂的物理作用的。本书所研讨的房屋建筑室内和围护结构中的热质交换过程系与室外气象条件的作用及微小气候调节系统的运行有关。

苏联各地的气候千差万别。在位于地球冷极可居住区域雅库梯的沃伊緬空地区的温度低至 -71°C ，该地的全年平均温度为 -17°C 。（位于南极洲苏联领地的东方站地区的地球绝对冷极处的温度低至 -87.6°C ，该地全年平均温度值约为 -50°C ）。而在乌兹别克斯坦（捷尔麦兹城）的温度高达 $+48^{\circ}\text{C}$ ，该地的全年平均温度为 $+18^{\circ}\text{C}$ 。在北冰洋沿岸的许多地点，采暖期持续了整整一年，而同时在中亚细亚和高加索的个别地区则持续不到三个月，比如在巴统和加格拉市只有75天。然而在炎热地区却必须防止太阳辐射造成建筑物的过热，且需在一年中的持续炎热时期内保证向房间提供人工冷却。

苏联大部分国土上的气候要比其他国家的更为寒冷。关于这

一情况如表0-1所示，表中对世界上一些城市根据多年观测资料而得的有代表性的室外温度作了对比。

表 0-1

地 点	地理纬度	月平均温度, °C	
		最 热 月	最 冷 月
莫斯科	55°52'	17.9	-10.2
塔什干	41°40'	27.4	-1.1
巴 黎	48°51'	18	2
雅 典	37°59'	27	9
东 京	35°42'	25	3
旧金山	37°45'	25	10
魁北克	46°49'	19	-12

建筑热物理学作为一门科学学科在苏联开始的时间并不算长（从20年代开始）。为了这一学科的发展，B.Д.马钦斯基、Г.А.谢里维尔斯托夫、O.E.弗拉索夫、K.Φ.福庚、C.И.穆罗莫夫、P.E.布里林格、B.Φ.华西里耶夫、B.M.伊夫斯基、Φ.B.乌斯柯夫、H.C.叶尔莫拉耶夫、A.M.什克洛维尔、Л.А.西蒙诺夫、C.H.肖林、M.И.基兴等许多建筑工程师和建筑热工专家们进行过大量的工作。在50年代，由于A.B.雷柯夫和他的数学物理学派的研究成果使得建筑热物理学发生了质的变化。现今，建筑工程中复杂的热物理课题正在借用相似原理、模拟方法和计算机等，采取现代的数学和物理的方法予以解决。

建筑热物理学所研讨的问题正在被列入建筑构造专家和微小气候调节系统专家们的工作领域。用图0-1可以象征性地说明这些工作领域。考虑到室外气候通过围护结构对室内的影响，建筑热工专家正在研究运用调节系统（采暖、供冷及通风）以建立室内微小气候的问题。联系到结构的耐久性及其使用功能，建筑师和建筑结构专家们对在室内环境条件和室外气候作用下围护结构的状况甚为关切。

由采用高效材料的大型构件组成的房屋建筑及其工程设备的

全装配式施工，是现代化建筑技术的主要发展方向。

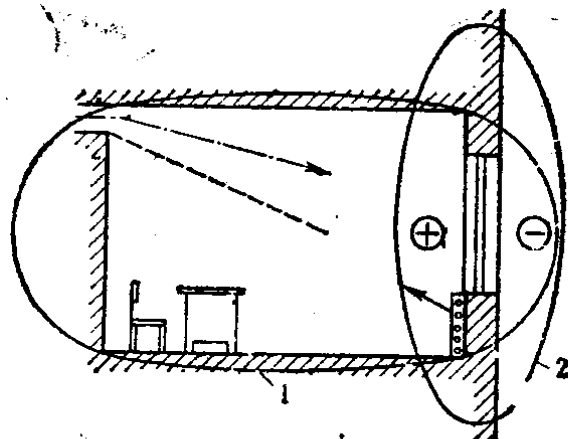


图 0-1 房间(1)和围护结构(2)的热物理学环境

为转向新型的多层和高层建筑，正在创造和完善着装配房屋建筑构件，采用具有各种物理特性的新的隔热材料、饰面材料和结构材料。

当前，在全装配式施工取得重大成就的同时，也存在着某些缺点，这与对问题研究得不够有关，而在许多场合下是与轻视建筑热物理学问题有关。

世界上的巨大能耗正在稳步增大。每天就得燃烧地球过去1000年的能量积蓄。根据国际组织的估计，到20世纪末，能耗将比1975年增加1.5倍，总数将达180~210亿吨标准燃料。这就将要消耗掉将近80%的贮量有限的有机燃料（其中煤占30%，石油占32%，燃气占18%），其余的7%为水力能源，13%为原子能。

苏联是唯一依靠自身能源而生活的工业发达国家。在苏联所建成的燃料和能量综合体耗费了所有工业和建设事业投资的三分之一，并且消耗了所有物质资源和劳力资源的相当可观的部分。还必须看到燃料价格经常在上涨，其运输距离也在不断增加。按照苏联国家建委1979年1月11日的决议，在对设计方案进行经济评价时，全国各地的闭合燃料价格平均提高了一倍。苏联共产党中央委员会和苏联部长会议在最近的一些决议中经常强调指出有效地和节约地利用能量这一问题的极端重要性。

建筑工业消耗着大量的能量，而主要是建筑物和构筑物一类的基建工程项目需要大量的燃料和能源。消耗在建筑物供热方面的燃料为所有开采得到燃料的40%。在这种情况下，消耗在居住和公共建筑方面的能量为26%（其中在城市内的占18%，在农业地区的占8%），消耗在工业建筑方面的能量为14%。遗憾的是，建筑事业的单位热耗量尚未能得到缩减。当今建筑物的热耗量要比50~60年代所建造的建筑物的大些。在建筑工程领域内，主要的能量问题，归根结底乃是设计有效利用能量的建筑物和构筑物及实现以节能为目的的现有建筑物资源的现代化。

本教科书中所研讨的问题则是应给予未来的建筑工程师以建筑热物理学方面的知识，以便使他们能在建筑工程领域内为国家解决有效和节约使用燃料和能源这一重要问题。

第一章 室内的换热

1-1 建筑物的热状况

所谓建筑物的热状况，是指决定该建筑室内热环境的所有各种因素和过程的总称。

建筑物的房间（图1-1）系借助围护结构而使其与外在环境隔开，因此得以在其中创造出某种微小气候。外围护结构保护房间免受大气的直接作用，而专门的调节系统则保持某种指定的室内环境参数。所有用以保证建筑物室内指定微小气候条件的工程技术方法与设备（包括围护结构、遮阳设施、其他构造布局手法以及采暖、供冷、通风和空调系统）的组合称为微小气候调节系统^①。

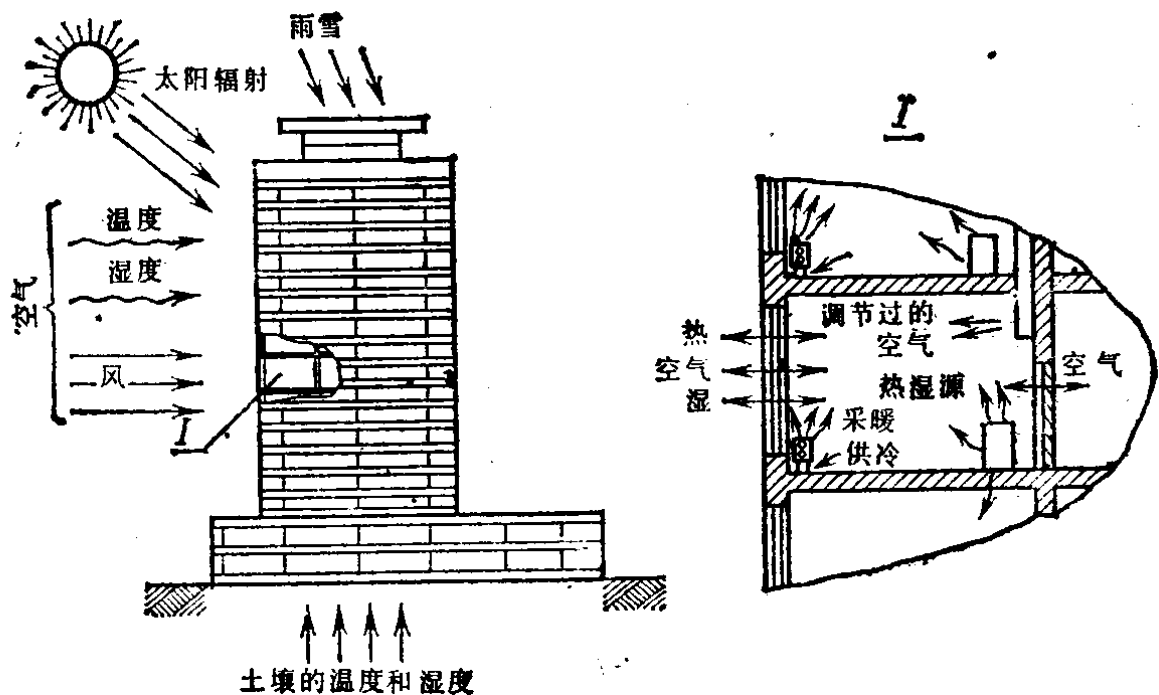


图 1-1 影响建筑室内热、湿和空气状况的各种因素

① 原文简称为CKM。——译者注

在室内外温差、太阳辐射和风的作用下，通过围护结构，在冬季使房间耗热，而在夏季则使房间受热。重力、风的作用及通风换气造成在互相连通的房间之间产生空气串流的压差，以及引起空气通过材料孔隙和围护结构不密实处产生渗透的压差。大气降雨量、室内的散湿量、室内外空气的含湿量差则引起通过围护结构的湿交换。在这一湿交换的影响下，外墙和屋面材料可能被加湿，其隔热性能及耐久性可能要恶化。

必须将形成房间热环境的那些过程视为彼此之间具有不可分割的密切关系，因为它们相互间的影响可能是极为重要的。例如，空气渗透和围护结构的受潮将会使冬季房间的热耗增加好几倍。同时，为在室内创造良好的空气环境，必须组织好室内环境与室外环境之间的空气交换和湿交换。

1-2 室内的换热

当建筑物投入使用时，具有决定意义的是房间的热状况，它决定着人们的热舒适感、生产过程正常的流程、建筑的结构及其设备的状态和耐久性。室内的热环境系由许多因素的共同作用而决定，这些因素是：具有送风射流的室内空气的温度、流动性及湿度，空气参数在房间平面上和沿着房间高度方向的分布，以及周围表面发出的辐射，这一辐射取决于周围表面的温度、几何尺寸和辐射特性。在对流和辐射换热及传质过程的作用下，室内空气和室内表面温度是相互联系着的且又互相发生影响。

为了研究微小气候的形成、其动力学及作用于其上的方法，必须了解室内的换热规律。

室内换热的示意图如图1-2所示。由图上可以看出，有许多因素参与了室内的换热。这些因素乃是室内主要容积（不包括射流所占去的部分）的空气、朝向室内的表面、送风射流的风量、外部介质（室外空气及采暖或供冷系统散热器中的热媒或冷媒）。在上述诸因素之间通常进行着下列各种换热。在空气与围护结构表面及空气与采暖或供冷系统散热器表面之间产生着对流换热

(K)，而在一些表面之间则存在着辐射换热(\mathcal{J})。由于不等温空气射流与房间主要容积中的空气不断发生紊流混合的结果，便产生了“射流”换热(C_T)。各外围护结构的内表面基本上系以导热(T)方式通过结构层的厚度并借助换热方式将热量传递给室外空气，而散热器表面也同样以导热和换热方式与采暖或供冷系统的热媒或冷媒进行着热量传递。

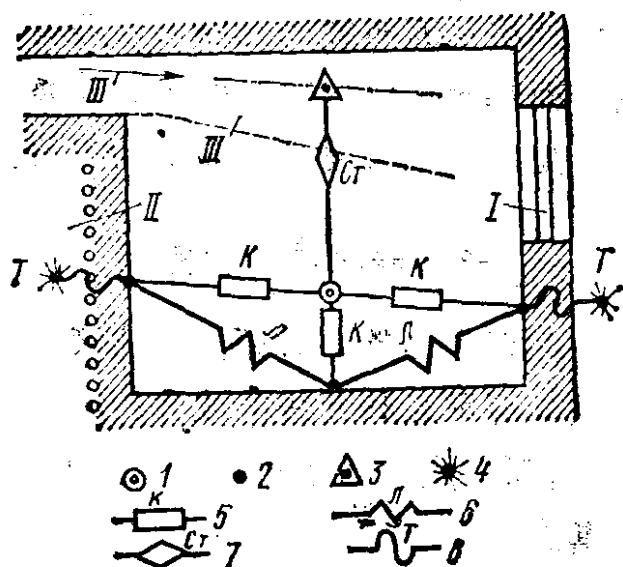


图 1-2 室内换热的示意图

1—室内主要容积的空气；2—朝向室内的表面；3—送风射流；4—室外介质；5—对流换热；6—辐射换热；7—射流换热；8—导热换热；
I—外围护结构；II—采暖(供冷)系统预制辐射板(散热器)；
III—非等温送风射流

各表面上的换热乃是形成房间热状况复杂过程的重要分量。无论是在稳定条件或不稳定条件下，室内任何表面 i 的热平衡(见图1-2)均可借助由能量守恒定律建立的方程加以描述，即

$$\mathcal{J}_i + K_i + T_i = 0 \quad (1-1)$$

室内各表面上换热的辐射分量 \mathcal{J}_i 、对流分量 K_i 及导热分量 T_i 可能会随时间而变化，并具有不同的数值和符号，但对在稳定换热条件和非稳定换热条件下的所有表面而言，方程式(1-1)则仍然适用。当在表面上出现附加放热及吸热现象(水分蒸

发或水汽冷凝、集中热源的辐射等)时则是个例外。对这种情况,在热平衡式(1-1)中必须加入考虑存在附加热源或热汇^①的部分。

室内各表面的温度是不相同的。在冬季和夏季,与具有和室内空气温度相近温度的内墙相比,外围护结构和采暖或供冷系统的设备通常会要更热或更冷些。而在各表面之间不断地进行着辐射换热,这一换热遵从着一般物理学规律,在工程计算中利用这些规律是复杂的。室内的辐射换热通常系在有限的温度值范围、表面的一定的辐射性质及其布置的几何关系等情况下进行。

我们考虑到表面辐射和室内辐射换热的特点,以便使问题简化,并为工程计算提出了足够准确和简易的方法。

1-3 表面热辐射特性

房间的所有表面都是热的辐射源。由热表面发出的热射线,按其特性来说,系与可见光和无线电波等相同的电磁波。电磁振荡因波长 λ 不同而有所差别。通常可用米(m)、微米(μm)或埃(\AA)以对其进行测量,而 $1\text{m} = 10^6\mu\text{m} = 10^{10}\text{\AA}$ 。图1-3给出根据波长区分的电磁波类别。如图所示,热辐射基本上位于红外波段。

绝对黑体表面辐射的光谱强度 I_λ , $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{m})$ ($\text{kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$)同波长和室内的常温温度幅度的关系,如图1-4所示。图上的 I_λ 值是符合普朗克定律的。室内表面的温度是足够低的。在这种情况下,热辐射便处于比较狭窄的波段,并可视作单色辐射,也就是说,它是由同一长度的光波所组成的辐射。考虑到图1-4中的曲线近似于抛物线,便可采用相应于最大辐射强度的波长 λ_{max} 作为平均值,其值可由维恩定律确定如下:

$$\lambda_{\text{max}} = a/T \quad (1-2)$$

① 热汇(сток тепла),系指可容纳热量的散热或吸热之类的装置。——译者注