

浅析隔热原理研究及应用

康细洋



我国的建筑节能工作已从寒冷、炎热地区推进到冬冷夏热地区,品种众多的保温隔热材料不断问世并用于节能建筑,因此有关文献众多。但在建筑工程上,有关建筑材料隔热特性研究的大量文献中,仅罗列出一系列特性参数,例如材料的物理力学性能(空心率、导热系数、强度参数等)以及它们与时间、温度等因素的关系,而且只是从实验或经验的方面阐述材料的隔热等特性。本文将从热力学原理出发,分析隔热材料的特性,以供从事建筑、材料等行业的工作人员参考,同时,对提高全民节能意识也具有积极作用。

一、传热原理回顾与深化

热量传递问题与自然界和生产、生活中的许多现象和过程都有紧密相关,有时还起着关键作用。在建筑工程中,削弱或强化热量传递过程能够有效地节约能源。热量传递有三种基本方式:热传导、对流和热辐射,下面就简单介绍这三种方式。

热传导 热传导,又称导热,即物体各部分之间不发生相对位移,由分子、原子及自由电子等微观粒子的热运动产生的热量传递。例如用火焰加热铁棒,未与火焰直接接触的部分通过导热温度升高。

气体、液体、导电固体和非导电固体的导热微观机理不同。气体导热是气体分子(温度高于0K)永

不停息地无规则热运动时相互碰撞的结果。气体的温度越高,其分子运动的动能就越大,理想气体分子的平均动能与温度的关系为

$$(1/2)mv^2 = (2/3)kT, \quad (1)$$

其中 k 为玻尔兹曼常数。不同能量水平的分子相互碰撞,高能量分子失去一部分能量,低能量分子将得到一部分能量,从而实现热量的传递。导电固体中存在大量的自由电子,它们类似气体分子在晶格之间运动,故自由电子的运动在导电固体导热中起主导作用。非导电固体的导热由晶格结构的振动(弹性波),即原子、分子在其平衡位置附近振动实现。而对于液体的导热机理,观点还不一致。一种观点认为定性上类似气体,另一种观点认为液体的导热机理类似非导电固体,主要靠弹性波的作用。

大量实践经验表明,单位时间通过给定截面积所传递的热量,与垂直于该截面方向上的温度梯度成正比,这就是导热基本定律,又称为傅立叶定律,其数学表达式为

$$q = -\lambda \partial t / \partial x, \quad (2)$$

负号表示热量传递方向与温度升高方向相反, λ 称为导热系数。在建筑工程中,导热系数是很重要的选择参数,根据傅立叶定律可知,导热系数越大,热量传递的障碍越小,热量传递越迅速,反之亦然。

利用傅立叶定律求解导热热量是在温度分布已

做侧滚、纵倾或转弯时,迫使安装在船上的转动部件发生进动,产生陀螺力矩。其引起的附加压力可能导致转动轴弯曲或轴承遭到破坏。因此,在工程设计中必须考虑陀螺效应。

对轮船或飞机之类具有大量转动部件的物体,转动部件的位置调节得不好,就会受到重力矩作用,重力矩与陀螺力矩相平衡,陀螺力矩作用在轴承上,又会通过轴承传到轮船或飞机上,影响轮船或飞机的稳定性。由于轮船本身具有较大的稳定性,而且其重量要比转动部件大得多,因而陀螺力矩对轮船稳定性的影响可忽略不计。但对飞行器来说,由于其转动部件(螺旋桨、压气机等)的重量占全部重量

的较大比例,陀螺力矩将对其稳定性产生很大影响,使其不能沿既定路径飞行,甚至损坏飞行器。

对高速旋转物体的运动,我们只从角动量理论出发作了简单分析,忽略了地球自转、载体速度、冲击和摩擦等影响因素。对陀螺装置在现代技术中的应用,也只举了几个典型实例。事实上,工程技术中的陀螺装置更为复杂,精度要求也很高,理论更为复杂,这里不再阐述。

(王志刚,河北唐山师范学院物理系 063000; 张立换,北京师范大学物理系 100875; 徐建军,上海市复旦大学物理系 200433)

知的情况之下,但是实际过程中温度未知,需要建立微分方程求解,即建立导热微分方程解出温度分布函数。可由能量守恒定律和傅立叶定律推导出导热微分方程。根据实际工况进行简化建模,求解出温度分布,然后代入傅立叶定律。

对流 对流是指由于流体的宏观运动,从而使物体各部分之间发生相对位移,冷热流体相互掺混所引起的热量传递过程。但由于流体分子也同时进行着无规则热运动,故对流必然伴随着导热过程。流体流动的原因很多。在传热学中,若流体流动是水泵、风机或其他压差作用造成的,则称为强制对流,如冷油器、冷凝器、蒸发器的流体流动。而流体各部分温度不同致使冷热各部分密度不同而引起的热量传递,则称为自然对流,暖气片表面附近受热空气上升就是一个例子。在对流换热过程中,传递热量的多少由牛顿冷却公式

$$\phi = hA \Delta t_m, \quad (4)$$

计算,其中 h 为表面传热系数,其值取决于多重复杂因素, A 为接触面积, Δt_m 指接触面上的平均温差,可由对数平均温差计算公式

$$\Delta t_m = (\Delta t_{\max} - \Delta t_{\min}) / \ln(\Delta t_{\max} / \Delta t_{\min}), \quad (5)$$

计算。 $\Delta t_{\max} / \Delta t_{\min} \leq 2$ 时,可用算术平均温差公式

$$\Delta t_m = (\Delta t_{\max} + \Delta t_{\min}) / 2, \quad (6)$$

计算,两者的差别小于 4%。

热辐射 只要温度高于 0K,物体就能不断向外发射电磁波。这种由于热的原因而辐射电磁波的现象叫热辐射。物体向外发出热辐射的同时,也吸收周围物体的热辐射,当发射和吸收的辐射能相等时,称为平衡热辐射,这时就具有一个确定的温度。

与热传导、对流相比,热辐射可在真空中传递。研究热辐射时引入了黑体概念,试验表明,(绝对)黑体能吸收外界投入其表面的全部热辐射能,它的吸收本领和辐射本领是同温度物体中最大的。黑体在单位时间内发出的热辐射热量由斯忒藩-玻耳兹曼定律(四次方定律)

$$\phi = A \sigma T^4, \quad (7)$$

揭示,其中 σ 称为斯特藩常量。而一切实际物体的辐射能力都小于同温下的黑体,可引入经验修正,即

$$\phi = \varepsilon A \sigma T^4, \quad (8)$$

式中 ε 称为该物体的发射率(习惯上称黑体),其值总小于 1,它与物体的种类及表面状态有关。

传热过程理论 墙体的换热过程具有普遍特

点:当室内温度高于室外温度时,室内空气(约 25℃)通过对流换热将热量传递给墙体固体结构,热量再经墙体的导热后,由外墙壁面对流(热辐射可忽略)传至室外流体。当室外温度高于室内温度时,则热量反方向传递,而且应考虑墙体外表面的热辐射。可简述为以下三个过程:从热流体到高温壁面的热量传递,从高温壁面到低温壁面的导热,从低温壁面到冷流体的热量传递。如图 1 所示,令 1 为高温侧,2 为低温侧,平壁表面积为 A ,厚度为 δ ,壁面的导热系数为 λ ,并且将该过程视为稳态过程。则通过每一个环节的热流量 q 应该相等,结合傅立叶定律和牛顿冷却公式得

$$q = A (t_{f1} - t_{f2}) / (1/h_1 + \delta/\lambda + 1/h_2). \quad (9)$$

与电学中的欧姆定律($I = U/R$)相比,引入热阻进行分析,传热过程及热阻概念的引入使工程计算得以简化。但是在建筑工程中,由于季节以及一天之中温度是变化的,故墙体的传热过程为非稳态过程,要复杂得多,将在后文中进行分析。

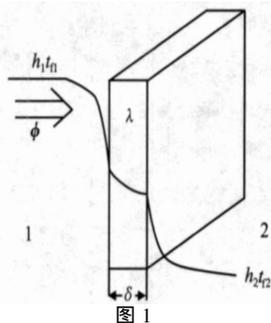


图 1

二、建筑隔热材料及其隔热特性原理

能源问题将是本世纪的焦点问题,打个比方,假如还会出现一次世界大战,那么一定是能源缺乏所致,可见,节能是生产、科研、国防等重要战略。而建筑隔热材料在节约电能、水能方面起到了重要作用。

建筑保温材料的分类和应用 建筑物围护的隔热保温工程,用于一般工业和民用建筑,主要是屋盖和外墙;用于冷库、恒温恒湿车间、高低温实验室等建筑物,则是墙体、楼盖和地面等。在建筑和工业中采用良好的保温技术与材料,往往能起到事半功倍的效果。统计表明,建筑中每使用 1 吨矿物棉绝热制品,1 年可节约 1 吨石油。

目前,我国使用的保温材料主要包括以下几种。

(1) 泡沫型保温材料:主要包括聚合物发泡型保温材料和泡沫石棉保温材料两大类。聚合物发泡型保温材料具有吸收率小、保温效果稳定、导热系数

小,易于施工、施工中没有粉尘飞扬等优点,正处于推广应用时期。

(2) 硅酸盐保温材料:复合硅酸盐保温材料具有可塑性强、导热系数低、耐高温、浆料干燥收缩率小等特点,主要种类有硅酸镁、硅酸铝、稀土复合保温材料等。而近年出现的海泡石保温隔热材料作为复合硅酸盐保温材料中的佼佼者,由于其良好的保温隔热性能和应用效果,已经引起建筑界的高度重视,并显示出强大的市场竞争力和广阔的市场前景。

(3) 硅酸钙绝热制品保温材料:曾在 80 年代公认为块状硬质保温材料中最好的一种。其特点是密度小、耐热度高,导热系数低,抗折、抗压强度较高,收缩率小。但进入 90 年代以来,其推广使用出现低潮,主要原因是许多厂家为了解决无石棉问题而采用纸浆纤维,而纸浆纤维不耐高温,影响了保温材料的耐高温性,增加了破碎率,且不经济。

(4) 纤维质保温材料:在 80 年代初的市场上占有较大份额,具有优异的防火和保温性能,主要适用于建筑墙体和屋面的保温。但由于投资大,生产厂家不多,限制了它的推广使用。

隔热机理研究 从上面的分类可见,物质可以固、液、气三种状态存在,不同的状态有不同的传热机理,我们已在前文中指出。这里我们以常用绝热材料——微孔硅酸钙材料为例进行具体分析。微孔硅酸钙材料的制备简易,由二氧化硅粉状材料、石灰、纤维增强材料和大量水经搅拌、凝胶化、成型、蒸压、养护、干燥等工序制作而成。我们以一栋以微孔硅酸钙材料为墙体的房屋为例进行研究(如图 2)。

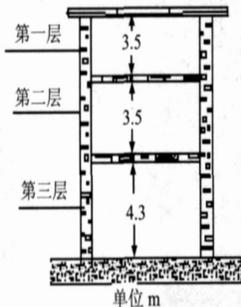


图 2

由于日照原因,室外温度是时间的函数,传热作用致使墙体的温度同样是时间的函数。整个传热过程处于非稳态过程,其导热微分方程为

$$\rho c \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial z} \right) + \dot{q}_0 \quad (10)$$

式中, λ 为墙体导热系数, c 为热容, ρ 为密度, \dot{q}_0 为单位体积热源。为简化分析,忽略楼层之间的热量传递,热量只从四周墙壁散失或吸收,墙体(体积为 v) 无内热源,并视墙体为无限大平板(如图 3),外侧复合换热系数 $h_1 = h_c + h_r$,内侧对流换热系数为 h_2 ,则问题可简化为一维非稳态过程,化为 $\partial t / \partial \tau = a \partial^2 t / \partial x^2 (0 < x < \delta, \tau > 0)$ 。考虑定解条件,设室内保持人体最适温度 t_0 ,室外温度 $t_\infty = t(\tau)$,则

$$\begin{aligned} h_1 [t(0, \tau) - t_\infty] &= -\lambda \frac{\partial t(x, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=0}; \\ h_2 [t_0 - t(\delta, \tau)] &= -\lambda \frac{\partial t(x, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=\delta}. \end{aligned} \quad (11)$$

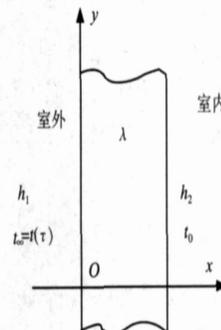


图 3

随着时间推移,所含热量不断变化,单位时间内的含热量变化为 $\rho v c \partial [\int_0^\delta t(x, \tau) dx] / \partial \tau$, 则

$$\begin{aligned} h_1 [t(0, \tau) - t_\infty] &= h_2 [t_0 - t(\delta, \tau)] + \\ \rho v c \partial [\int_0^\delta t(x, \tau) dx] / \partial \tau. \end{aligned} \quad (12)$$

上述方程及定解条件可解出温度关于时间的函数,方程解的过程很复杂,甚至出现解不出,我们只需弄清存在这些方程以及方程是怎样得来即可,这有利于对整个传热过程的理解。

由上述方程可知,隔热特性由单位时间内传递热量的多少决定,而传递的热量又取决于复合换热系数 $h_1 = h_c + h_r$ (h_c 为表面换热系数, h_r 为辐射换热系数)、对流换热系数 h_2 、材料的导热系数 λ 热容 c 、密度 ρ 等因素。

在室温附近,热辐射作用不大,材料的传热主要靠材料中固相的导热作用和空隙中空气的导热和对流作用。又因为材料中的空气被困在几十至上百纳米的空隙中,对流作用很小,可以同空气的导热合并计算。多孔材料的热阻,可采用空隙与固相的加和式计算,导热系数同热阻互为倒数关系,即

$$1/\lambda = (1 - \epsilon) / \lambda_s + \epsilon / \lambda_a \quad (13)$$

其中 λ 为材料的表观导热系数, λ_s 为固相的导热系

数, λ_a 为空气的导热系数, ε 为材料的空隙率。又由于材料的空隙率同其密度有如下关系:

$$\varepsilon = (\rho_s - \rho) / \rho_s = 1 - \rho / \rho_s \quad (14)$$

其中 ρ 为材料的表观密度, ρ_s 为材料中固相的理论密度。因此材料的表观导热系数同密度的关系为

$$\lambda = \lambda_s \lambda_a / [\lambda_s - (\lambda_s - \lambda_a) \rho / \rho_s] \quad (15)$$

辐射换热系数 h_r 可按辐射换热量 ϕ_r 折算为对流换热量的方法求解, 即

$$\phi_r = A h_r \Delta t. \quad (16)$$

另外, 一般房屋处在大空间(温度为 t_1) 之中, 则

$$h_r = \frac{\varepsilon_1 \sigma (t_0^4 - t_1^4)}{(t_0 - t_1)} = \varepsilon_1 \sigma (t_0^2 + t_1^2)(t_0 + t_1). \quad (17)$$

三、材料隔热特性改进措施

建筑节能能否顺利推广, 节能技术是关键。权威人士介绍, 建筑节能包含建筑构造节能和使用过程节能两个方面。建筑构造节能主要是提高建筑物围护结构的保温隔热性能, 常采用微孔低导热系数材料如微孔硅酸钙, 由目的和手段的统一性原理, 可采用多种途径增强隔热效果。总结如下:

(1) 开发新型低导热材料。

(2) 因空气导热系数远低于固相材料, 采用双墙体夹空气结构, 此方法在北方使用广泛。

(3) 采用断桥式铝塑复合窗门, 其原理是: 利用

塑料型材(隔热性高于铝型材)将室内外两层铝合金既隔开又紧密地连接成一个整体, 构成一种新的隔热型铝型材, 用这种型材做门窗, 其隔热性与塑(钢)窗在同一个等级。而其气密性要好于铝、塑窗, 能保证风沙大的地区室内窗台和地板无灰尘、高速公路两侧的居民不受噪音干扰。

(4) 在外墙加活性保温涂料。今年, 这种技术运用相当广泛, 在建筑、汽车制造、航天等领域取得了良好效果。它能使建筑外墙像人体的皮肤一样, 自动弥合裂缝, 而且时间越长越坚固, 不裂不脱, 节能保温效果好, 大大提高了室内居住环境的舒适性, 如活性硅聚合物材料。

(5) 外加隔热膜。隔热膜可分吸收型和反射型两种。吸收型隔热膜基于日光吸收控制原理, 在膜的粘贴层内加入吸收热量的化学物质, 形成二次辐射, 在室内形成“热量陷阱”。而反射型隔热膜具有光谱选择性, 隔热能力强、透明性好, 可最大程度地透射可见光, 充分反射红外线热量, 主要用于玻璃隔热。建筑物内外墙面的温度和室内空气温度受材料反射系数 α 大小的影响, 不容忽视。因此, 对于建筑墙体在夏季的隔热, 主要应该考虑墙面材料对太阳辐射的反射能力, 而不是一味追求传热系数的减小。

(重庆大学热能与动力工程院 400044)

(上接 58 页) 年代他提出激光聚变创新思想等。由于成果很多, 所以在 1992 年 5 月 31 日钓鱼台国宾馆举行的“中国当代物理学家联谊会”上, 李政道问王淦昌:“王老师, 在您所从事的多项科研工作中, 您认为哪项是您最为满意的?”他说:“我自己对我 1964 年提出的激光引发氘核出中子的想法比较满意。因为这在当时是一个全新的概念, 而且这种想法引出了后来成为惯性约束核聚变的重要科研题目, 一旦实现, 这将使人类彻底解决能源问题。”王淦昌的这段回答体现了他一生对原始创新思想的孜孜追求, 在建设创新型国家的今天, 他的回答更具现实意义。尤其可贵的是, 回答中包含着他科学服务于全人类的理解, 体现了他着眼于人类进步的博大胸怀。

(安徽省合肥市中国科学技术大学科学技术史和科技考古系 230026)

emission of radiation 取字头组合而成的专门名词, 在我国最早被翻译成“莱塞”“镭射”“光激光器”“光受激辐射放大器”等。1964 年, 钱学森院士提议取名为“激光”, 其后“激光”成为“LASER”的正式译语。

科苑快讯

有助于观测遥远行星的
恒星遮光罩

远方的行星看起来极为黯淡, 再加上它所围绕的恒星比它亮 10^{10} 倍, 所以对其进行光学观测总是困难重重。上述问题也困扰着空间轨道上的望远镜, 尽管它们的观测已不再受地球大气层造成的“闪烁”影响。最近, 美国博尔德市(Boulder)科罗拉多大学的韦伯斯特·卡什(Webster Cash)提出一个巧妙的解决方案。他设计了一种形状特殊的恒星遮光罩, 缚在和望远镜一起运动的航天器上。遮光罩可有效地阻挡恒星光线进入望远镜, 从而把星光衍射的影响降到最低, 提高行星观测的清晰度。

(高凌云编译)

现代物理知识

* 早期“LASER”的意译, LASER 原是 light amplification by stimulated