

传热学 绪论

授课老师: 苗雨

课前回顾及导引

- 热能传递的三种基本方式? 热传导、热对流、热辐射
- 2 物体各部分之间不发生相对位移时,依靠<u>微观粒子</u>的热运动传递热能的方式是 热传导
- 一维稳态傅里叶定律的表达式? $\Phi = -\lambda A \frac{dt}{dx}$
- 4 傅里叶定律中的负号表示什么? 热量传递方向与温度升高方向相反
- **上** 无相变的对流传热分为哪两种? 自然对流, 强制对流
- 7 牛顿冷却公式的表达式? $\Phi = hA\Delta t$
- 表面传热系数取决于什么?物性,换热表面的形状、大小与布置,流速



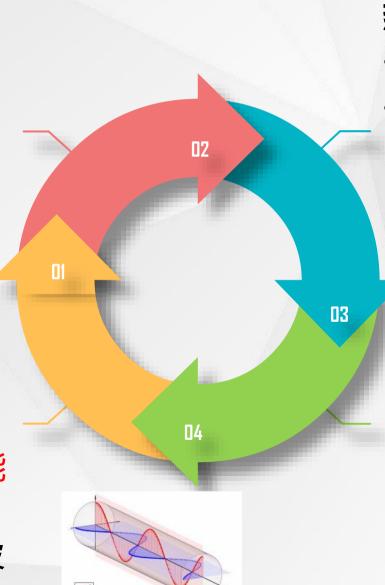
辐射传热

- 向空间发出辐射电磁波,同时 又吸收其他物体发出的辐射电 磁波,以辐射方式进行的物体 间的热量传递过程
- 一切温度高于绝对零度的物体 都能产生热辐射,温度愈高, 辐射出的总能量就愈大

热辐射定义

物体因热的原因而发出辐射能的现象

以电磁波 的形式



热辐射的基本特点

- 热辐射可以在真空中传递
- 不仅产生能量的转移,而且还伴随着能量形式的转换

黑体 (black body)

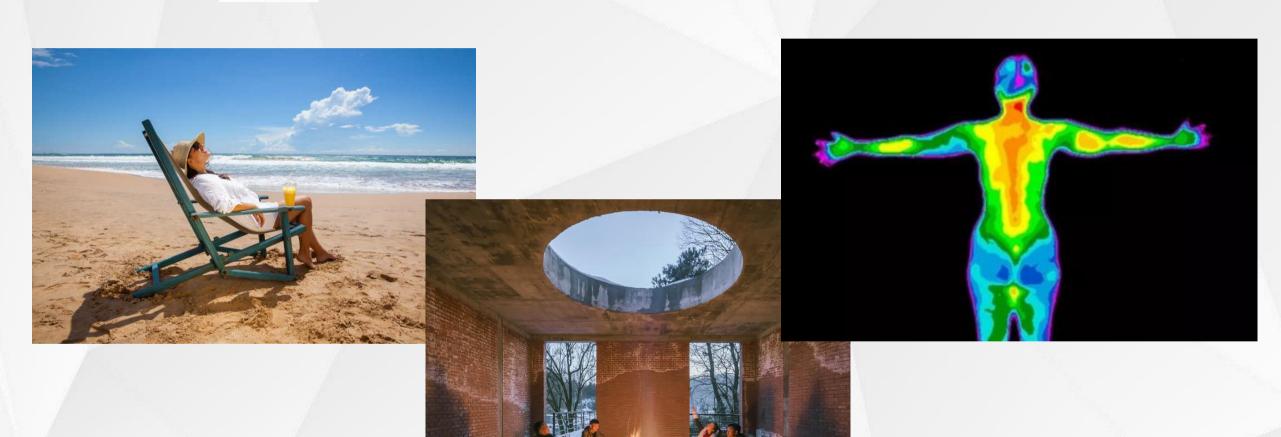
能吸收投入其表面上的<mark>所有</mark>热辐射 能量的物体

黑体的吸收本领和辐射本领在同 温度的物体中是最大的





大家能想到哪些生活中热辐射的例子?









Otto Lummer Heinrich Rubens

推导出了黑体辐射力与绝对 温度的四次方成正比的结果, 提出了著名的斯特潘-玻尔 兹曼定律

1879-

1884



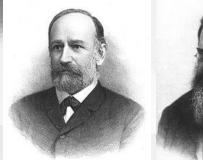
John Strutt James H. Jeans

1900

提出了普朗克辐射 定律,圆满解释了 实验现象,揭开了 量子力学的序幕。

测得了黑体辐射光谱 能量分布的实验数据。 但是,使用实验数据

找对应点的方法很不 方便。 1859



Josef Stefan Ludwig Boltzmann

1900

提出了瑞利-金斯定律,来 计算黑体辐射强度与能量 间的关系,但所得的结果 与实验数据无法吻合



Max Planck

辐射传热基本定律

斯忒藩一玻尔兹曼定律 $\Phi = A\sigma T^4$ (黑体)

 $\Phi = 热流量$ (heat transfer rate), 单位: W

A = 辐射表面积,单位: m²

T = 物体的热力学温度,单位: K

 $\sigma =$ 斯忒藩-玻尔兹曼常量,又叫黑体辐射常数, $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} W/(m^2 \cdot K^4)$

实际物体 $\Phi = \varepsilon A \sigma T^4$

 ε = 物体的发射率,又称黑度 (emissivity) ,其值总小于1,与物体的种类及表面状态有关

计算辐射传热量必须 考虑收、支的总账



例题5: 北京时间2022年6月5日10时44分, 搭载神舟十四号载人飞船的运载火箭在酒泉卫星发射中心点火发射, 约577秒后, 载人飞船与火箭成功分离, 进入预定轨道, 发射取得圆满成功。载人飞船可视为半径为0.5m, 长度为2m的柱体, 其表面发射率为0.8。航天器内电子元件的散热量总计为175W。假设航天器只与2.7K的宇宙空间发生辐射换热, 试估算其表面的平均温度。



练习题: 2022年北京冬奥会男子1000米短道速滑项目中,中国运动员任子威、李文龙分获冠亚军,为国争光。比赛用室内冰场的规格是40m×12m,环境温度是22℃,四周墙体的辐射温度是25℃。由于空气流动和运动员的冰上动作,冰面和空气的流动传热系数为10W/m².℃。冰的发射率大约为0.95。为了保持冰的温度为0℃,需要多少冷量?





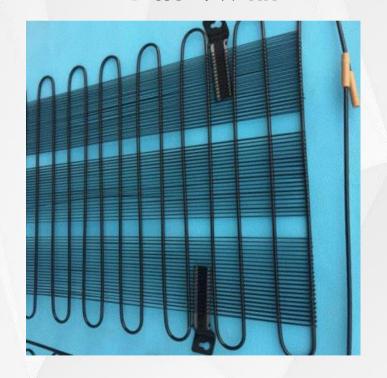
实际问题中,导热、对流传热和热辐射这三种热量传递方式不是单独出现的





实际问题中,导热、对流传热和热辐射这三种热量传递方式不是单独出现的

冰箱冷凝器



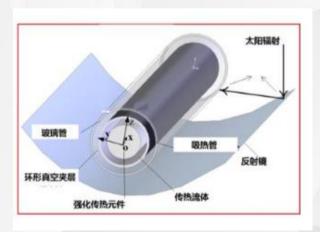


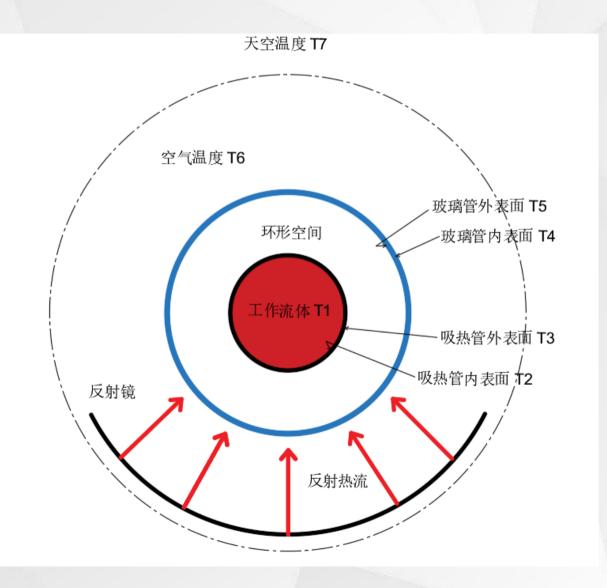


实际问题中,导热、对流传热和热辐射这三种热量传递方式不是单独出现的

槽式太阳能集热器







T3→T2: 吸收能量, **热传导**

T2→T1:流体吸热,**热对流**

T3→T4: 主要散热, **热辐射**

T3→T4: 次要散热, **热传导**

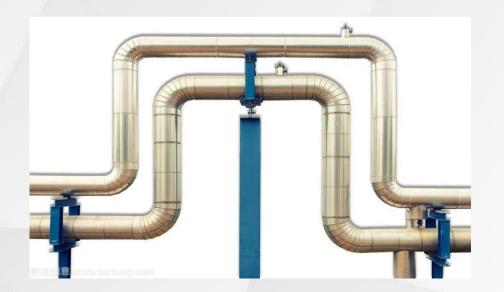
T4→T5: 过玻璃管, **热传导**

T5→T6: 环境冷却, **热对流**

T5→T7:热散失,**热辐射**

例题7: 蒸气管道一般适用于各种冷、热水高低温管道的保温工程。一根水平放置的蒸气管道,其保温层外径d=583mm,外表面实测平均温度 t_w =48℃。空气温度 t_f =23℃,此时空气与管道外表面间的自然对流传热的表面传热系数h=3.42W/m²·K,保温层外表面的发射率 ϵ =0.9。试:

- (1) 求此管道的散热必须考虑哪些热量传递方式?
- (2) 计算每米长度管道的总散热量。





传热学基本知识

- 温度场
- 等温面和热流线
- 导热基本定律
- 导热系数
- 导热系数与比热容、热扩散率的关系
- 导热微分方程
- 定解条件



温度场



定义

又称温度分布(temperature distribution),各个时刻物体中各点温度所组成的集合



分类

分类	条件	表达式
稳态条件下的温度场	各点的温度不随 时间而变	t = f(x, y, z)
工作条件变动时的温 度场	温度分布随时间 而变	$t = f(x, y, z, \tau)$



特殊情况下,物体的温度仅在一个坐标方向有变化,这种情况下的温度场称为一维稳态温度场

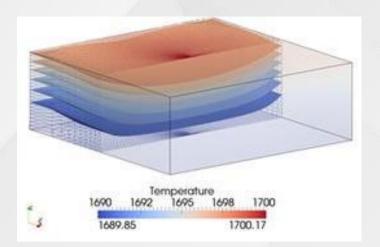


等温面和热流线



等温面: 温度场中同一瞬间相同温度各点连成的面

等温线(isotherm): 二维



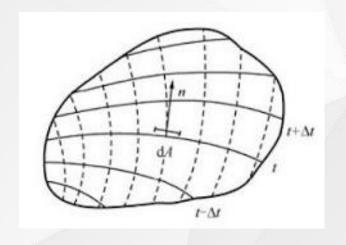


特点

- 任一条等温线或形成封闭曲线,或终止在物体表面,不会相交
- 当每两条相邻等温线间的温度差相等时,其疏密程度可反映出导热热流密度的相对大小
- (D)

热流线: 与等温线处处垂直,通过平面上任一点的热流线 与该点的热流密度矢量相切

• 相邻两条热流线之间所传递的热流量处处相等



导热基本定律

$$\frac{\Phi}{A} \sim \frac{\partial t}{\partial x}$$

$$\Phi = -\lambda A \frac{\partial t}{\partial x}$$

 $\frac{\Phi}{A} \sim \frac{\partial t}{\partial x}$ 引入比例常数 $\Phi = -\lambda A \frac{\partial t}{\partial x}$ 适用范围更广的傅里叶导热定律的数学表达式

在导热过程中,单位时间内通过给定截面的导热量,正比于垂直该截面 方向上的温度变化率和截面面积,而热量传递的方向则与温度升高的方 向相反

傅里叶导热定律对热流密度矢量写出的一般形式数学表达式

$$\mathbf{q} = -\lambda \operatorname{grad} t = -\lambda \frac{\partial t}{\partial n} \mathbf{n}$$

空间热流密度矢量 温度梯度 xyz三个坐标方向上的单位矢量



$$q = -\lambda \frac{\partial t}{\partial n} n \Rightarrow \lambda = \frac{|q|}{\left|\frac{\partial t}{\partial n} n\right|}$$

数值上等于在单位温度梯度作用下 物体内热流密度矢量的模



导热系数的数值取决于物质的种类和温度等

金属 > 液体 ≥ 非金属固体 ≥ 气体



导热系数小的材料称为保温材料、隔热材料或绝热材料 (我国国家标准中保温材料导热系数的界定值为0.08W/(m·K)



工程导热材料按导热系数分类



均匀,各向同性 (大部分材料)



均匀,各向异性 (木材、石墨、 变压器的铁芯)



不均匀,各向同性(空心砖)



不均匀,各向异性 (航天飞行器燃烧 室中的层板结构)

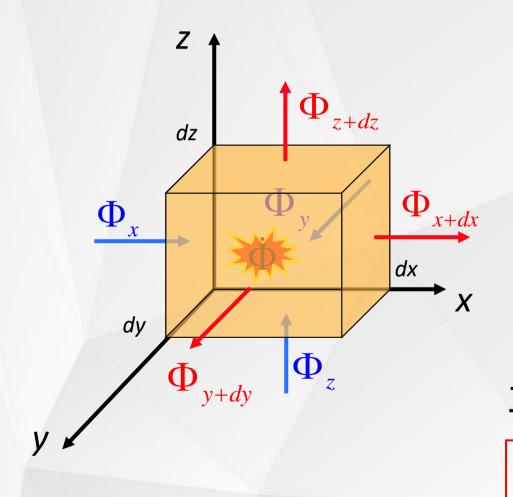


实例拓展: 断桥铝门窗



中空夹层:利用空气的导热系数小,减小通过玻璃造成的热损失

直角坐标系(Cartesian coordinates)



Φ = 内热源,单位时间内单位体积中产生或消耗的热能,单位: W/m³

 Φ_x , Φ_y , Φ_z =通过x=x, y=y, z=z三个微元表面的热流量,单位: W

$$\Phi_{x+dx}$$
, Φ_{y+dy} , Φ_{z+dz} =通过 $x=x+dx$, $y=y+dy$, $z=z+dz$ 三个微元表面的热流量,单位: W

直角坐标系中三维非稳态导热微分方程的一般形式

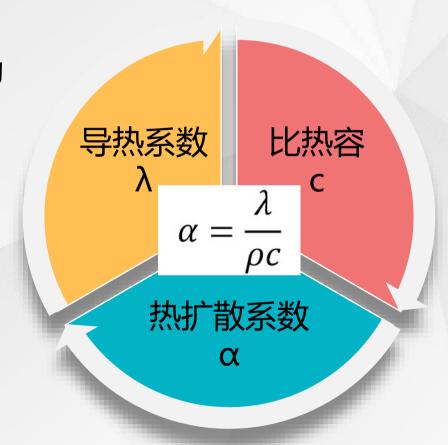
$$\rho c \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial z} \right) + \dot{\Phi}$$



导热系数与比热容、热扩散率的关系

表征物体导热能力的物理量

物体的导热系数λ越大, 在相同的 温度梯度下可以传导更多的热量



表征物体吸热或散热的能力的 物理量

ρc 越小,温度升高1℃所吸收的热量越小,可以剩下更多热量继续向物体内部传递,能使物体各点的温度更快地随界面温度的升高而升高

表征物体增温快慢的物理量

α越大,表示物体内部温度扯平的能力越大,温度变化传播得越快



导热微分方程

简化形式 — 导热系数入为常数

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \alpha \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) + \frac{\dot{\Phi}}{\rho c}$$

简化形式 = 导热常为 大内热源

 $\left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2}\right)$

 $\frac{\partial t}{\partial \tau} = \alpha \left(\right.$

筒化形式Ⅱ常物性、稳态

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} + \frac{\dot{\Phi}}{\lambda} = 0$$

泊松(Poisson)方程

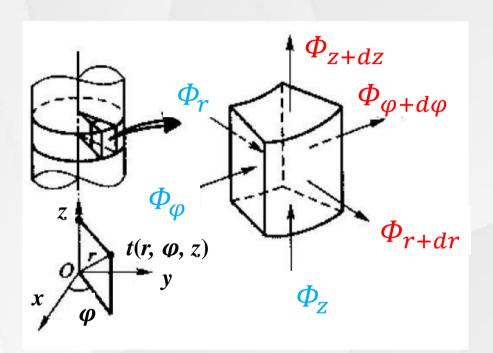
筒化形式≥常物大人。

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} = 0$$

拉普拉斯(Laplace)方程



圆柱坐标系(Cylindrical coordinates)



$$x = r \cdot cos\varphi$$

$$y = r \cdot \sin \varphi$$

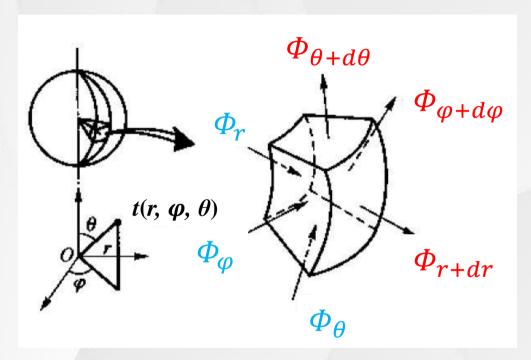
$$z = z$$

圆柱坐标系下的导热微分方程

$$\rho c \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda r \frac{\partial t}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial \varphi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial z} \right) + \dot{\Phi}$$



球坐标系(Spherical coordinates)



$$x = r \cdot sin\theta cos\varphi$$

$$y = r \cdot \sin\theta \sin\varphi$$

$$z = r \cdot cos\theta$$

球坐标系下的导热微分方程

$$\rho c \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda r^2 \frac{\partial t}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 sin^2 \theta} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial \varphi} \right) + \frac{1}{r^2 sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\lambda sin \theta \frac{\partial t}{\partial \theta} \right) + \dot{\Phi}$$

定解条件

导热微分方程式的求解需要以表征特定问题的附加条件

• 初始条件 (initial condition) : 初始时刻温度分布

· 边界条件 (boundary condition) 导热物体边界上温度或 换热情况



Neumann条件 规定边界上的热流密度保持定值

$$q_w = -\lambda \left(\frac{\partial t}{\partial x}\right)_w = \sharp \mathfrak{B}$$

Robin条件 规定了边界上物体与周围流体间的表面 传热系数h及周围流体的温度 t_f

$$-\lambda \left(\frac{\partial t}{\partial x}\right)_{w} = h(t_{w} - t_{f}) \text{ (物体被冷却情况)}$$
$$-\lambda \left(\frac{\partial t}{\partial x}\right)^{w} = h(t_{f} - t_{w}) \text{ (物体被加热情况)}$$



作业:《传热学》P21 1-10,1-12

P22 1-18

Bonus Homework: 推导圆柱坐标系和球坐标系下的导热微分方程

