

问“传递”

孙志仁

第二讲. 问传递

1. 雷诺实验

2. 传递机理

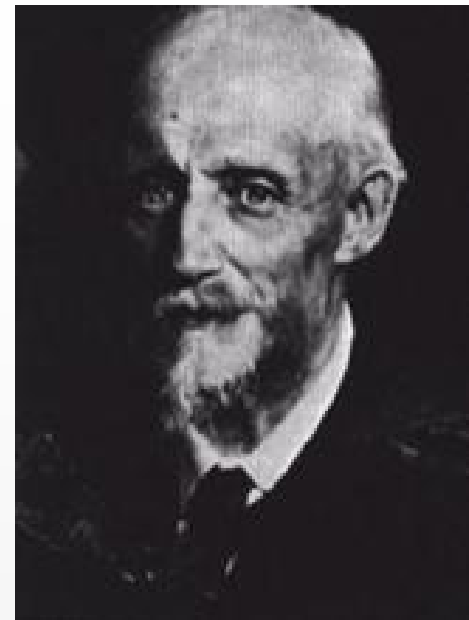
3. 分子脉动传递定律

于“运动”中观察传递现象

认识到“脉动”是传递机理

运动与脉动

1. 雷诺实验



雷诺数

$$Re = \frac{\rho U D}{\mu}$$

雷诺应力

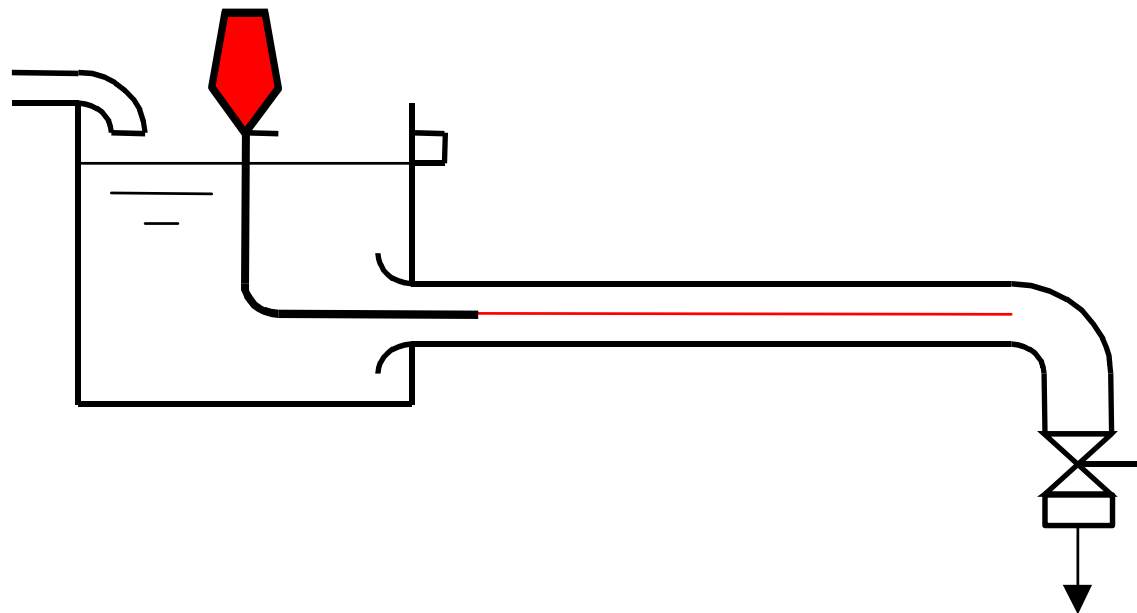
$$\overline{\rho u'_x u'_y}$$

层流与湍流现象

流动状态判据

$$Re = \frac{\rho U D}{\mu} < 2100$$

$$\rho U D < \frac{\mu}{4.76 \times 10^{-4}}$$



海森堡测不准原理

$$\Delta p \Delta x \geq \frac{h}{4\pi}$$



层流



间歇扰动



连续扰动



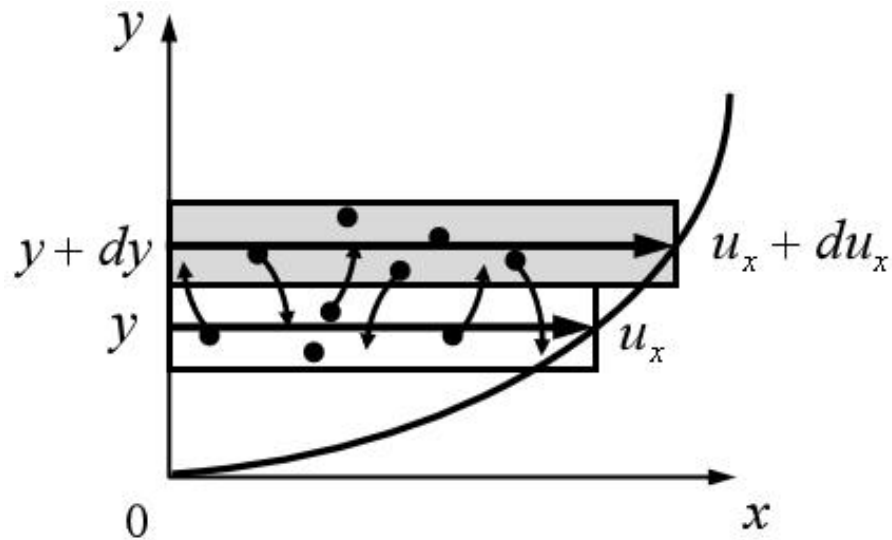
湍流

过渡流

2. 传递机理

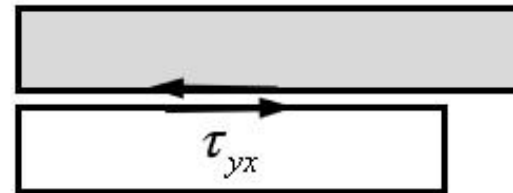
运动传递机理

加速或减速
非惯性运动



分子热运动

$$u'$$



匀速直线运动
惯性运动

动量传递

剪切应力

$$\tau_{yx} = \mu \frac{du_x}{dy}$$

雷诺应力

$$\rho \overline{u'_x u'_y}$$

经典传递机理：分子热运动、涡流脉动

一问

**“脉动”是随机的，流场壁面剪切应力是确定的，
为什么无序的“脉动”会产生有序的结果？**

**“你不可能同时知道一个粒子的
位置和速度”**

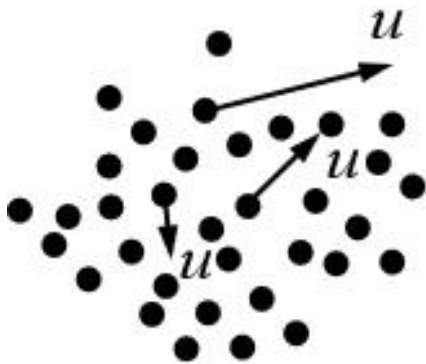
海森堡

“上帝不会掷骰子”

爱因斯坦

脉动传递机理

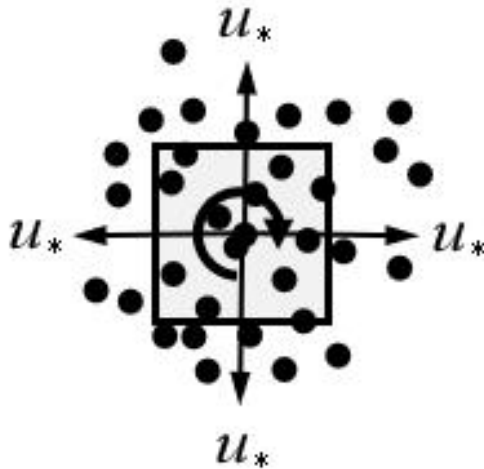
猜想



分子热运动

$$u'$$

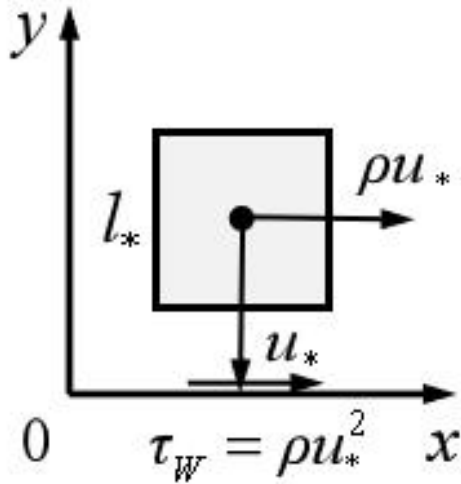
无序



微团脉动

$$u_{*x} = u_{*y} = u_*$$

有序



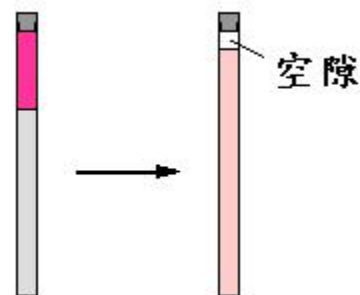
动量传递

$$\tau_W = \rho u_* \cdot u_*$$

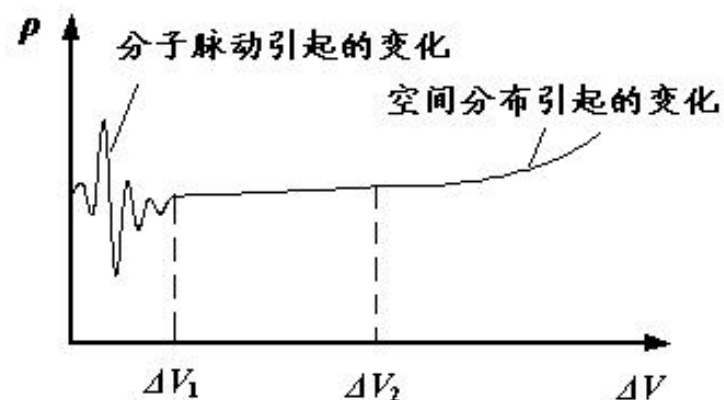
$$\tau_W = \rho u_*^2 \quad \text{“完美” 方程}$$

经典传递微团

流体内有空隙



微团尺度对密度的影响



连续介质模型

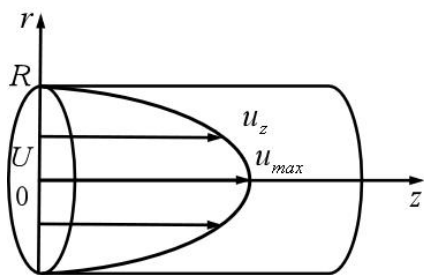
流体微团相对于分子尺度足够大，相对于设备尺度充分小，且连续一片。

理想流体与粘性流体

速度分布

平均速度

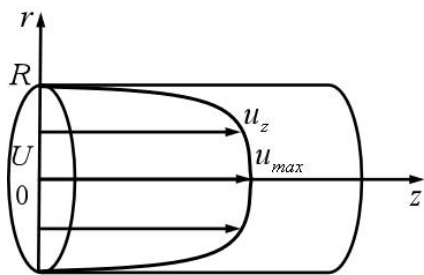
层流



$$u_z = 2U \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right)$$

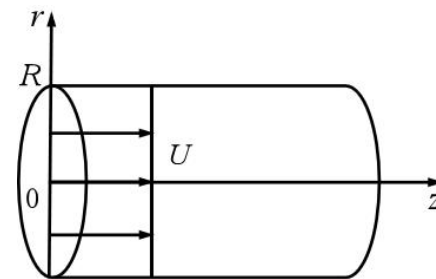
$$U = \frac{1}{A} \int_A u_x dA$$

湍流



$$u^+ = 2.5 \ln y^+ + 5.5$$

$$U = \frac{V}{A}$$



量子态

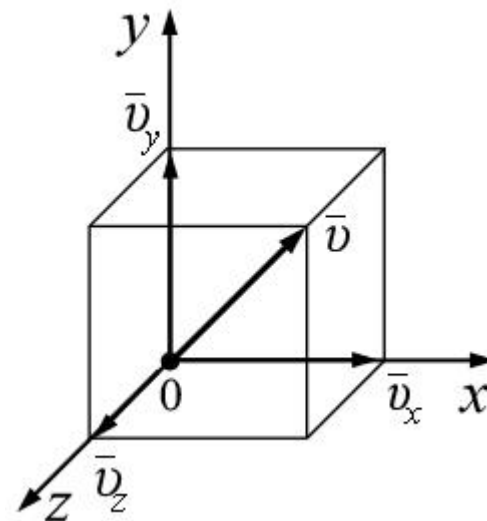
观察态

问题探讨

静止是量子态？
其观察态的样子？

气体动理论

$$D_{AB} = \nu = \alpha = \frac{1}{3} \bar{v} \bar{l}$$



三维运动模型

D_{AB} : 分子扩散系数[m^2/s]

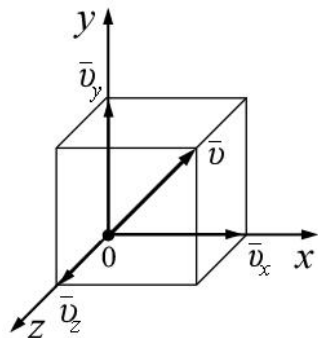
ν : 粘性扩散系数[m^2/s]

α : 热扩散系数[m^2/s]

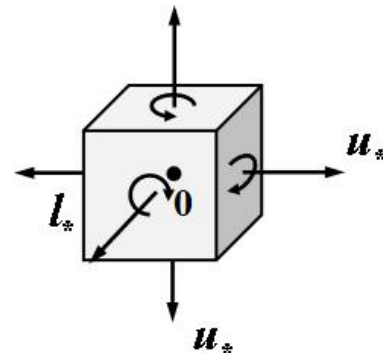
\bar{v} : 分子热运动平均速度[m/s]

\bar{l} : 分子碰撞平均自由程[m]

气体动理论是经典微观统计理论的里程碑标志，揭示了物性是分子随机运动的属性，这是微观统计理论的重大贡献。由于研究对象依然是分子运动，气体动理论的发展没能更进一步，但是，它是微团脉动理论形成的一个新起点。



分子微团



分子运动模型

$$D_{AB} = v = a = \frac{1}{3} \bar{v} \bar{l}$$

分子

分子热运动

分子脉动

$$\frac{\sqrt{3}}{3} \bar{v} = \bar{v}_x = \bar{v}_y = \bar{v}_z = u_*$$

$$\frac{\sqrt{3}}{3} \bar{l} = \bar{l}_x = \bar{l}_y = \bar{l}_z = l_*$$

分子尺度

分子微团模型

$$D_{AB} = v = a = u_* l_*$$

分子微团

微团脉动

分子

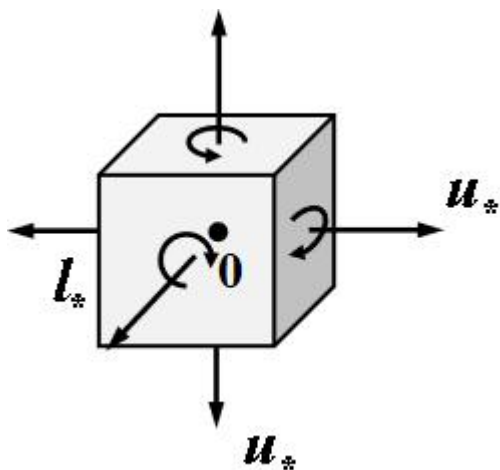
从分子热运动到微团脉动
是从分子到流场（分子微团）的蜕变

微团

质变

微团脉动

静止流体中



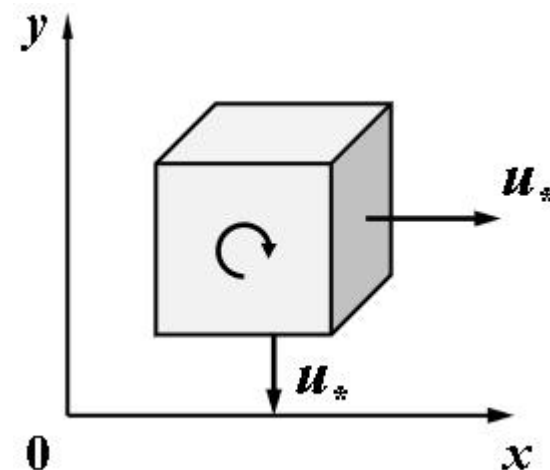
各向同性

脉动各向同性

u_*

脉动速度

运动流体中

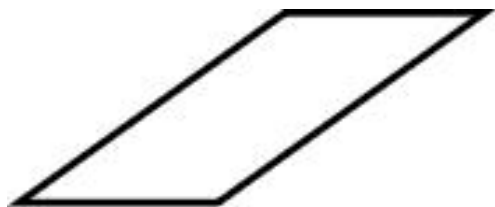


正交纠缠

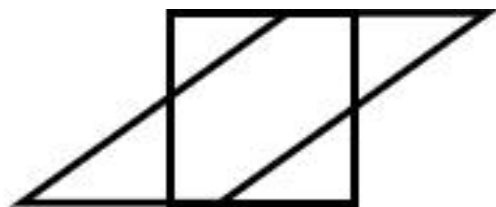
问题探讨

如何实现脉动各向同性?

剪切变形与自旋



运动



脉动



自旋

$$\tau_{yx} = \mu \frac{du_x}{dy}$$

速度梯度

牛顿粘性定律

$$\frac{du_x}{dy} = \frac{u_*}{l_*} = \frac{1}{t_*} = \nu_*$$

空间加速度

自旋频率

旋转加速度

$$\tau_{yx} = \mu \nu_*$$

$$\varepsilon = h\nu$$

普朗克能量量子假定

微团是流场 流场是微团

分子尺度
分子热力学尺度

分子微团
经典传递尺度

设备尺度
单元操作尺度

物性微团

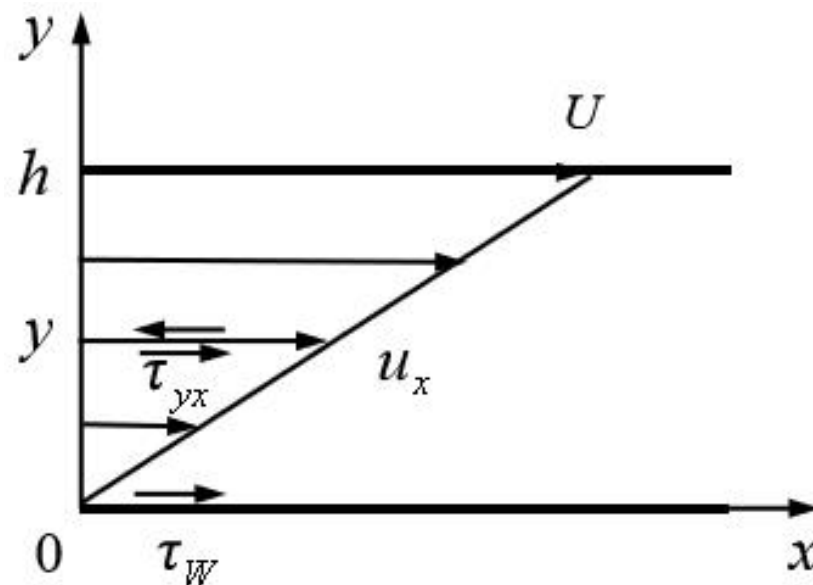
特征量分布

流场边界条件

3. 分子脉动传递定律

牛顿粘性定律

$$\tau_{yx} = \pm \mu \frac{du_x}{dy}$$



τ_{yx} : 剪切应力 [Pa]

μ : 粘度 [Pa · s]

$\frac{du_x}{dy}$: 速度梯度 [1/s]

相对运动的流体产生阻滞效应，
将阻滞原因归咎于流体的粘性，剪切应力是粘性流体相对运动的结果。

问题探讨 静止流体有粘性吗？

二问

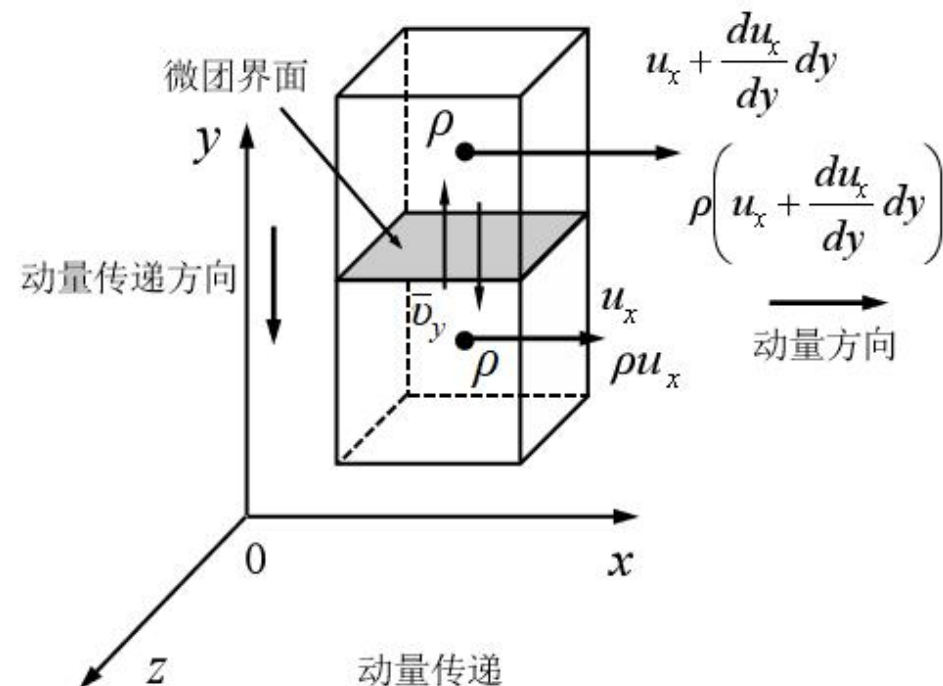
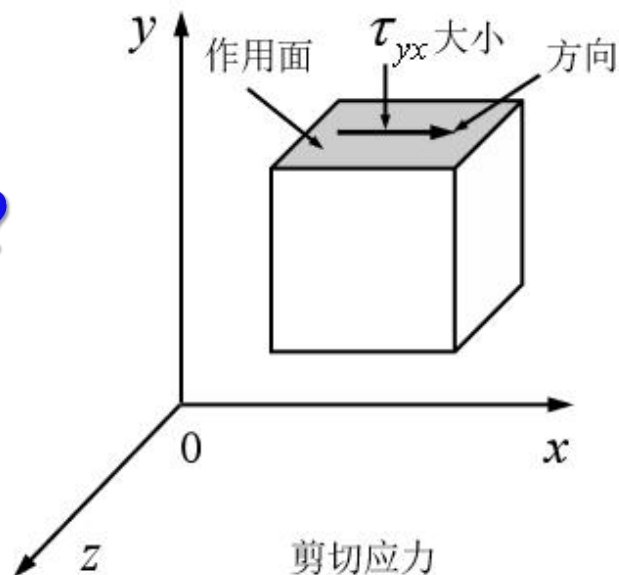
剪切应力是动量传递？

特征量纲关系：

$$\frac{\text{kg} \cdot \text{m/s}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} = \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

三要素：

大小
方向
作用面



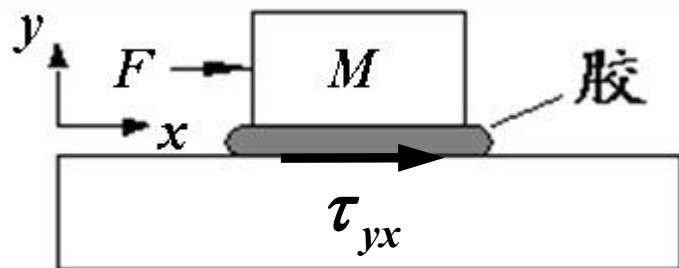
结构不同
二个不同的物理对象

有结构的
物理量

动量传递通量
动量方向
动量传递方向

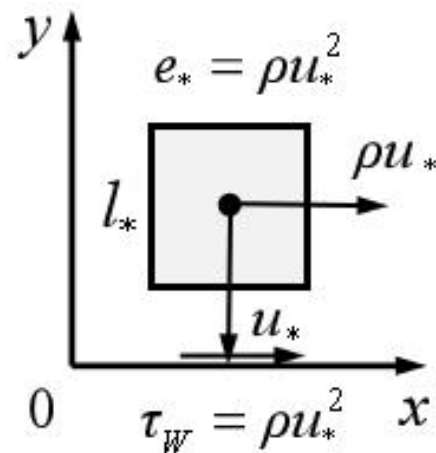
剪切应力是力

$$\tau_{yx} = \frac{F}{A}$$



动量传递产生了
剪切应力

$$\tau_W = \rho u_*^2$$



剪切应力是用壁面观察到的量子态能量（动量传递通量）

牛顿粘性定律

问题探讨

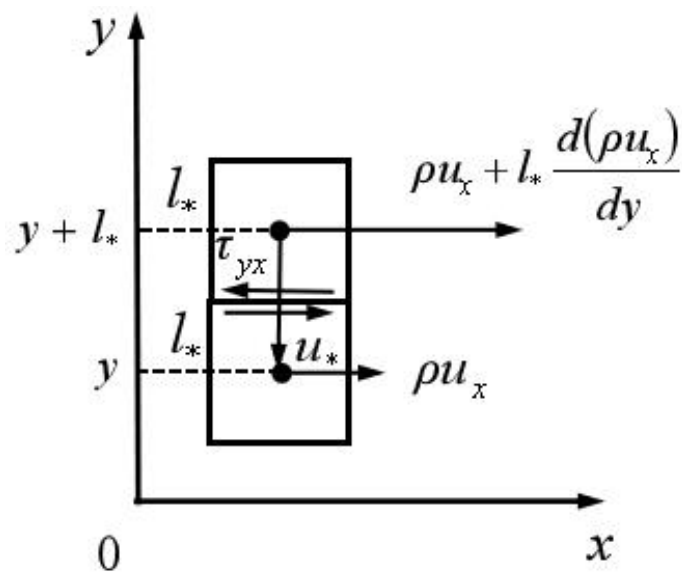
上下层的随机速度相同吗？

以壁面为参照系

$$(\rho u_x)_{y+dy} \approx \rho u_x + l_* \frac{d(\rho u_x)}{dy}$$

净动量传递：

$$\tau_{yx} = \rho u_x u_* - \left[\rho u_x + l_* \frac{d(\rho u_x)}{dy} \right] u_* = -u_* l_* \frac{d(\rho u_x)}{dy}$$



运动传递模型

牛顿粘性定律

运动粘度

粘度

$$\nu = u_* l_*$$

$$\tau_{yx} = -\nu \frac{d(\rho u_x)}{dy}$$

$$\mu = \rho u_* l_*$$

$$\tau_{yx} = -\mu \frac{du_x}{dy}$$

牛顿粘性定律

微团相对脉动参照系

$$\tau_w = \rho u_* \cdot u_* = \rho u_*^2$$

相对脉动速度: $u_* = l_* \frac{du_x}{dy}$

↓

$$\tau_{yx} = \rho u_* l_* \frac{du_x}{dy}$$

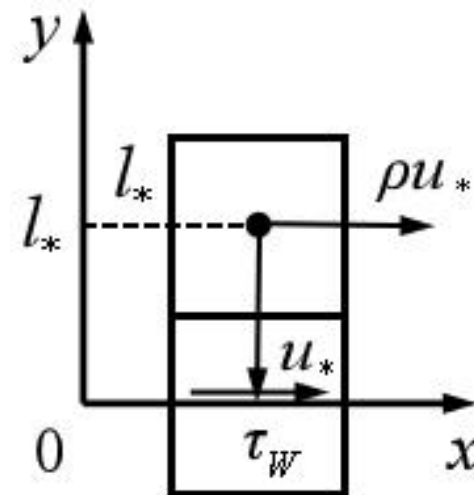
课后思考

相对粘度

$$\mu_* = \rho u_* l_*$$

相对分子微团: $\tau_{yx} = \mu_* \frac{du_x}{dy}$

相对分子尺度: $\tau_{yx} = \mu \frac{du_x}{dy}$



脉动传递模型

牛顿粘性定律

傅里叶导热定律

$$q_y = \rho C_p T_* u_*$$

相对脉动温度: $T_* = l_* \frac{dT}{dy}$



$$q_y = \rho C_p u_* l_* \frac{dT}{dy}$$

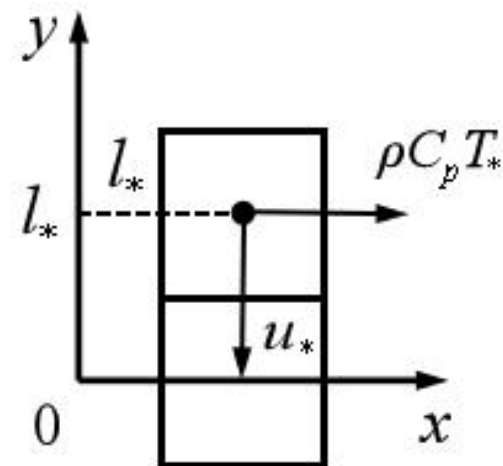
导温系数

$$a = u_* l_*$$

$$q_y = a \frac{d(\rho C_p T)}{dy}$$

热导率

$$k = \rho C_p u_* l_*$$



脉动传递模型

傅里叶导热定律

$$q_y = k \frac{dT}{dy}$$

费克分子扩散定律

$$j_{Ay} = \rho_{A*} u_*$$

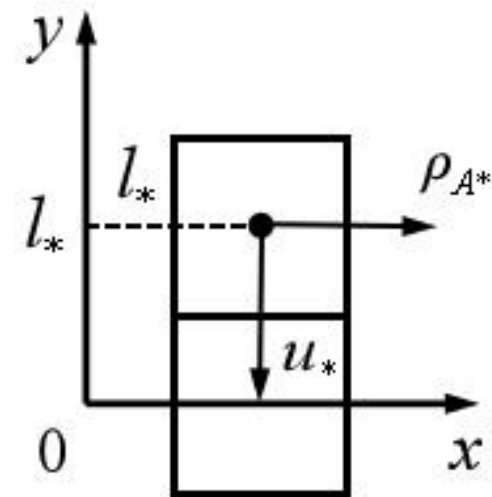
相对脉动质量: $\rho_{A*} = l_* \frac{d\rho_A}{dy}$

↓

$$j_{Ay} = u_* l_* \frac{d\rho_A}{dy}$$

分子扩散系数

$$D_{AB} = u_* l_*$$



脉动传递模型

费克分子扩散定律

$$j_{Ay} = D_{AB} \frac{d\rho_A}{dy}$$

三问

传递机理表达？

脉动

一直以来，脉动是随机运动的代名词，是无序的象征。每当对着秒针数着心跳的脉搏，感受有节奏的律动，感悟生命的脉动。

给布朗的分子、普朗特的湍流球、普朗克的能量子，还有海森堡的粒子各构建了一个叫“微团”的家，脉动变成了微团的律动，律动的质量也同时向外作各向同性的脉动。

脉动开始了...