

过程设备设计（下）



第五章 储存设备

第六章 换热设备

第七章 塔设备

第八章 反应设备

第七章 塔设备

第一节 概 述

第二节 填料塔

第三节 板式塔

第四节 塔设备的附件

第五节 塔的强度设计

第六节 → 塔设备的振动

7.6 塔设备的振动

教学重点：

风的诱导振动。

教学难点：

风的诱导振动。

7.6 塔设备的振动

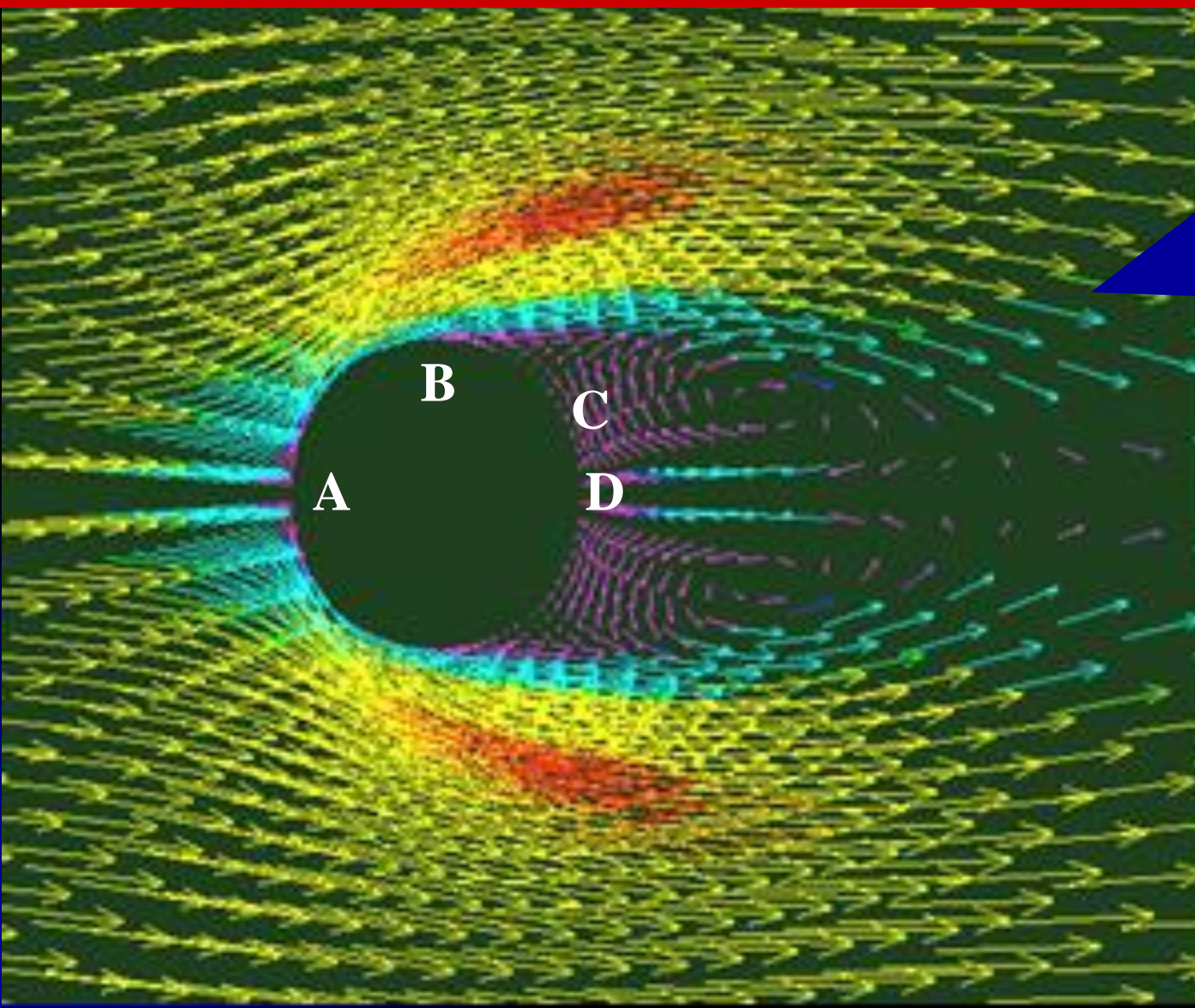
安装于室外的塔设备，在风力的作用下，产生两个方向的振动。

- (1) 顺风向的振动，即振动方向沿着风的方向；
- (2) 横向振动，即振动方向沿着风的垂直方向，
又称横向振动或风的诱导振动。

它对塔设备的破坏性大，所以本章主要讨论风的诱导振动。

7.6.1 风的诱导振动

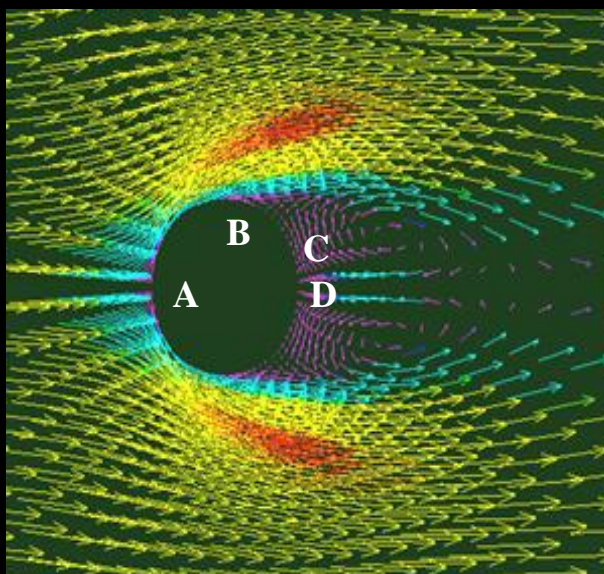
一、诱导振动的流体力学原理



风以一定的速度绕流圆柱形塔设备，塔设备周围的风速是变化的

图7-85
塔周围的风速

7.6 塔设备的振动



塔设备周围的风压变化，正好与风速相反。

风速：

■ 迎风侧A点风速为0，

■ 由A到B点，风速 

■ B点到D点，风速 

风压：

■ A点处风压最高，

■ 由A向B点，风压 

■ B点向D点，风压 

由于塔的表面存在边界层，层内各点的速度从壁面为零沿径向逐渐增大，直到与边界层外的主流体的速度相同。

塔的前半周(从A点到B点)——

尽管由于边界层内的粘性摩擦力使层内流速不断下降，但由于边界层外的主流体其流速是逐步增加的，所以边界层内的流体能从主流体获得能量而使速度不下降。

塔后半周(从B到D点)——

由于主流体本身不断减速，使边界层内流体不能从主流体获得补充能量，因粘性摩擦力使其速度逐步减小，结果导致边界层不断增厚，在C点处出现边界层流体增厚并堆积，见图7-86(a)。

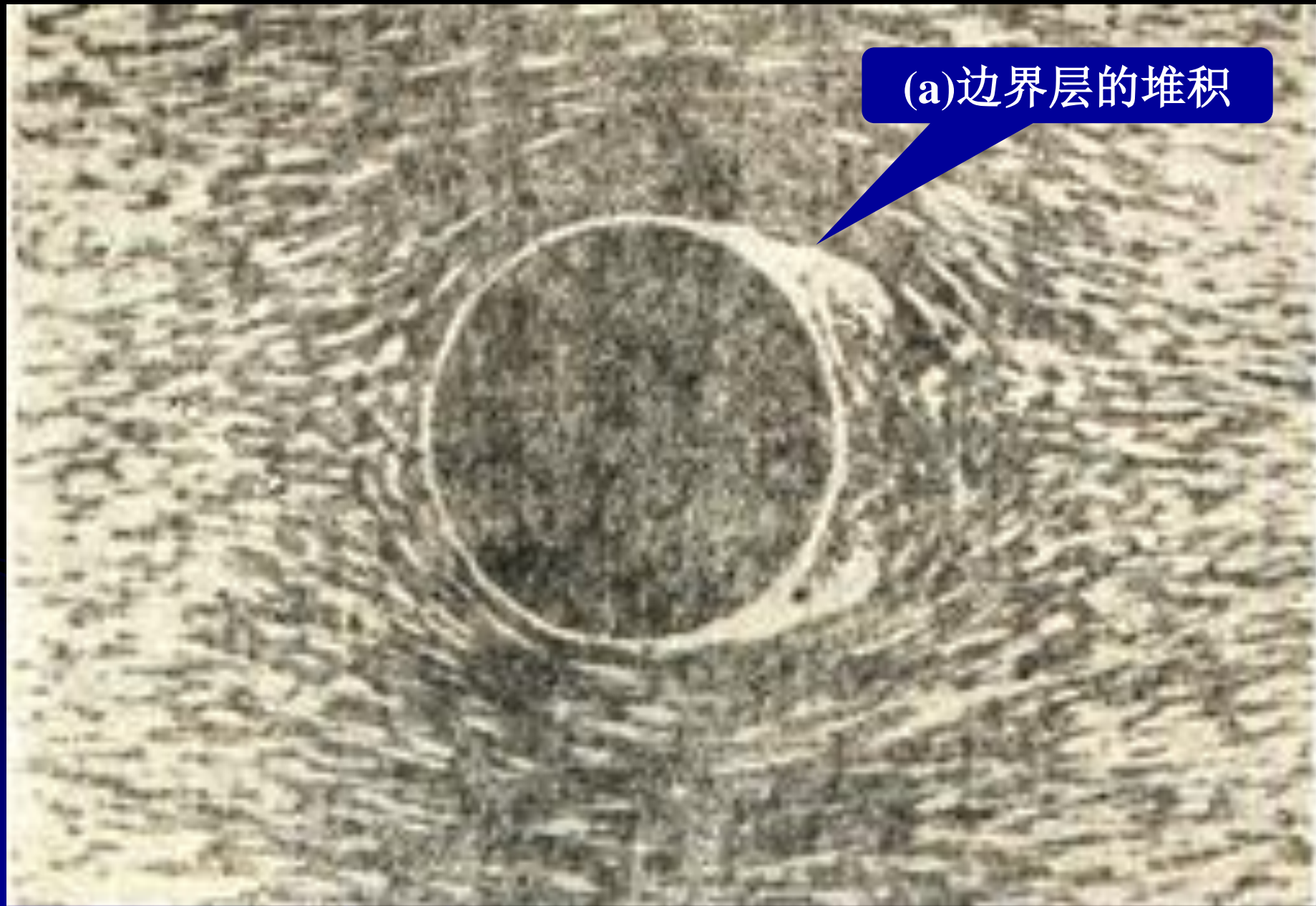
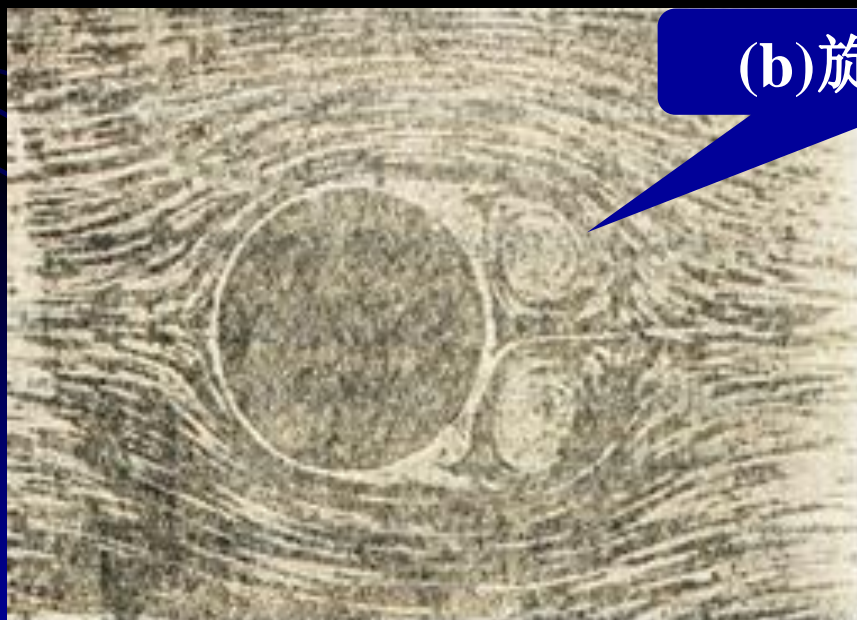


图7-86 边界层的堆积及旋涡的形成

卡曼旋涡(Karman Vertex)——

外层主流体绕过堆积的边界层，使堆积边界层背后形成一流体的空白区。

在逆向压强梯度作用下，流体倒流至空白区，并推开堆积层的流体，在塔体背后产生旋涡，见图7-86(b)。



(b)旋涡的形成

图7-86 边界层的堆积
及旋涡的形成

旋涡特性与雷诺数的关系—

- $Re < 5$ ——塔体后部流线是封闭形的，且塔体上、下游的流线是对称的，边界层未发现分离现象；
- $5 \leq Re < 40$ ——塔体背后出现一对稳定的旋涡；
- $40 \leq Re < 150$ ——塔体背后一侧先形成一个旋涡，在它从塔体表面脱落而向下游移动时，塔体背后另一侧的对称位置处形成一个旋转方向相反的旋涡。在这个旋涡脱落时，在原先的一侧又形成一个新的旋涡，这些旋涡在尾流中有规律地交错排列成两行，见图7-87。

此现象工程上称为卡曼涡街(Karman Street)

$300 \leq Re < 3 \times 10^5$ ——旋涡以一确定的频率周期性地脱落，该范围称为**亚临界区**。

$3 \times 10^5 \leq Re < 3.5 \times 10^6$ ——尾流变窄，无规律且都变成紊流，无涡街出现。称为**过渡期**。

$Re > 3.5 \times 10^6$ ——卡曼涡街又重新出现，称**超临界区**。

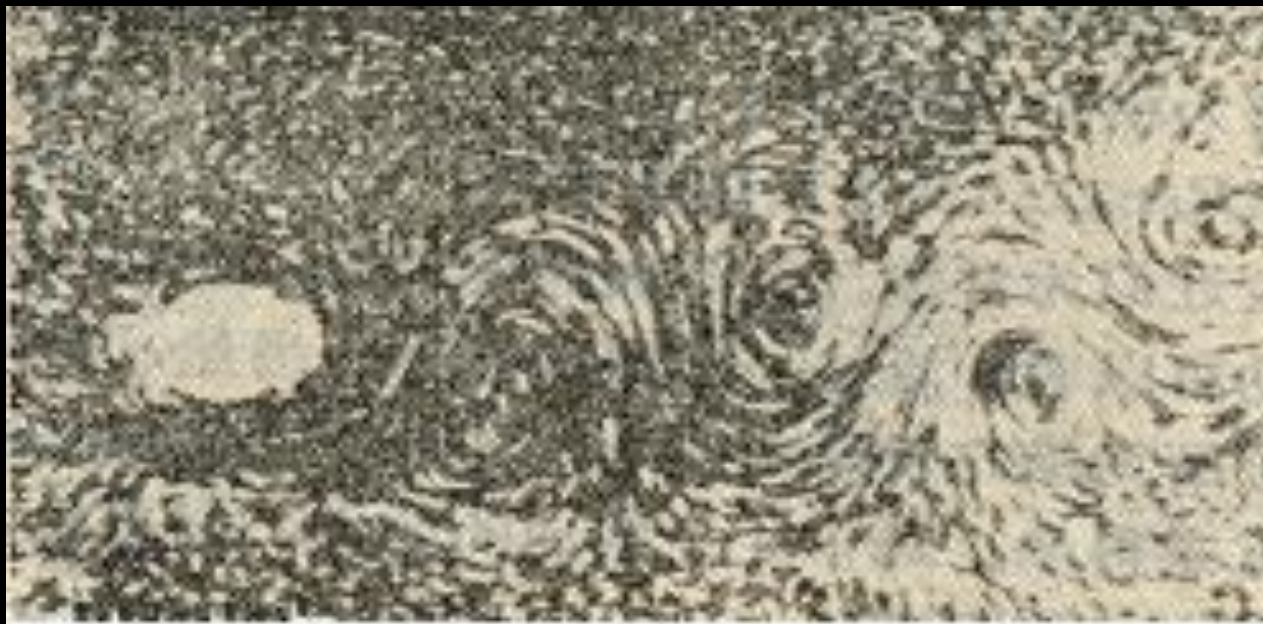
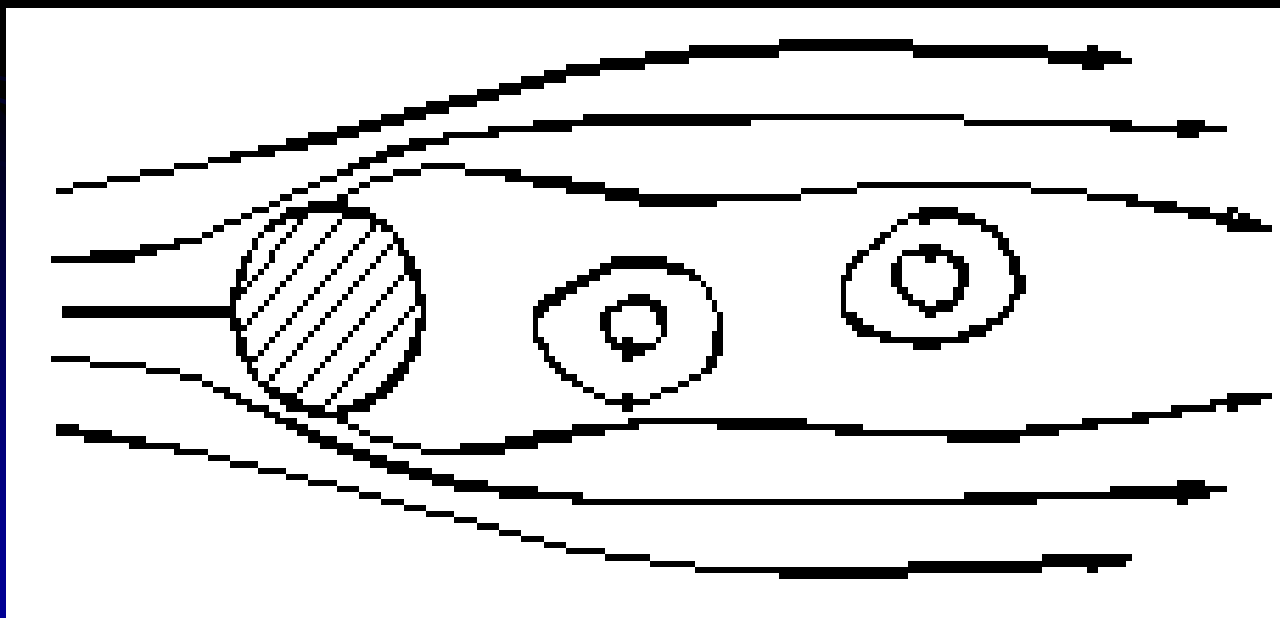


图7-87 卡曼涡街



横向振动

出现卡曼涡街时，两侧旋涡交替产生和脱落，塔两侧流体阻力不同，呈周期性变化。

阻力大的一侧——即旋涡形成并长大的一侧绕流较差，流速下降，静压强较高；

阻力小的一侧——即旋涡脱落的一侧，绕流改善，速度较快，静压力较低。

横向振动

阻力大（静压强高，旋涡形成并长大）一侧产生一垂直于风向的推力。

当一侧旋涡脱落后，另一侧又产生旋涡，产生一垂直于风向、与上述方向相反的推力，使塔设备在沿风向的垂直方向产生振动，称之为横向振动。

振动频率——等于旋涡形成或脱落的频率。

二、升力

升力——由旋涡交替产生及脱落而在沿风向的**垂直**方向产生的**推力**称为升力。

拽力——风在**沿风向**产生的**风力**称为拽力。

通常升力要比拽力大得多
(在产生横向振动时)

7.6 塔设备的振动

升力的大小可由下式确定

$$F_L = \frac{C_L \rho v^2 A}{2}$$

(7-47)

式中

F_L

—升力, N ;

ρ

—空气密度, kg/m^3 ;

v

—风速, m/s ;

A

—沿风向的投影面积, 等于塔径乘以塔高, m^2 ;

C_L

—升力系数, 无因次, 与雷诺数 Re 有关,

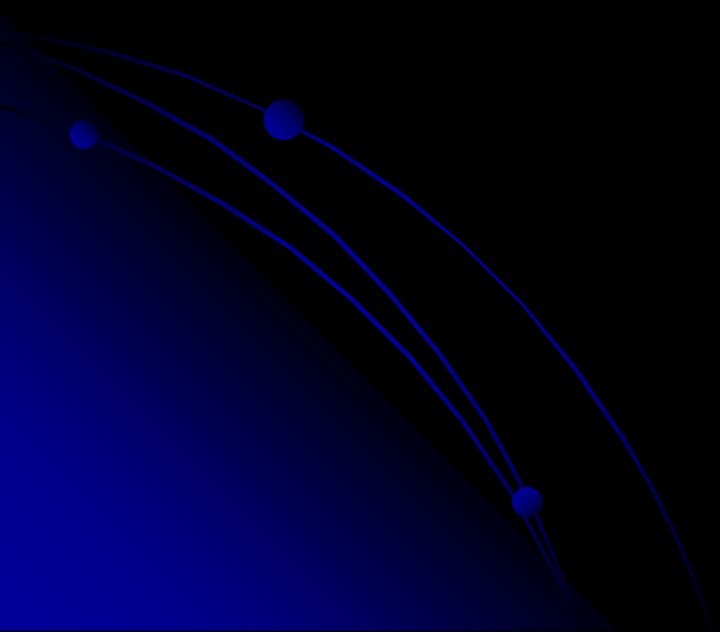
当 $5 \times 10^4 < Re < 2 \times 10^5$ 范围内, $C_L = 0.5$;

当 $Re > 4 \times 10^5$, $C_L = 0.2$;

当 $2 \times 10^5 < Re < 4 \times 10^5$ 范围内按线性插值。

三、塔设备风诱导振动的激振频率

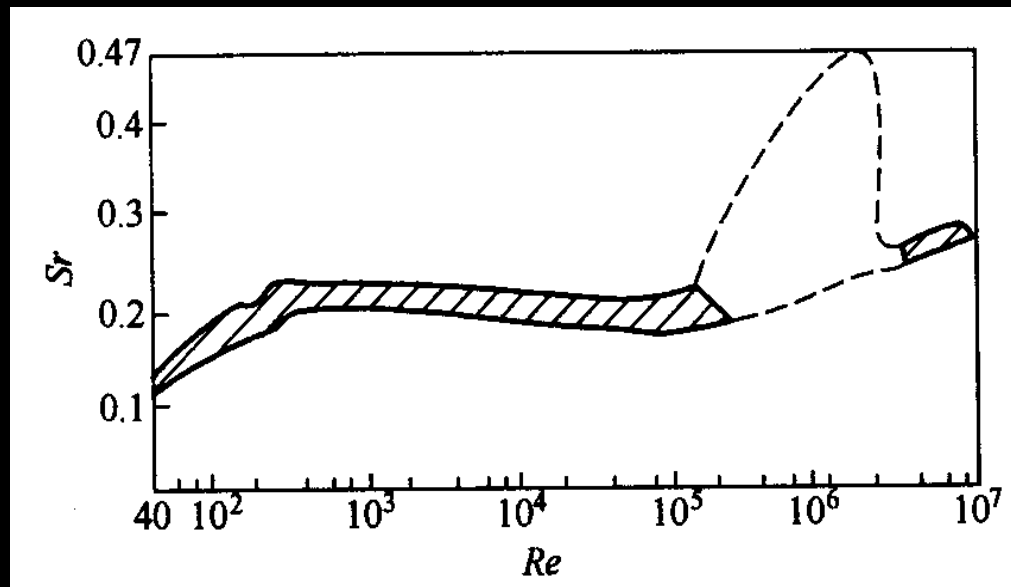
在塔的一侧，卡曼旋涡是以一定的频率产生并从圆柱形塔体表面脱落的，该频率即为塔一侧横向力 F_L 作用的频率或塔体的激振频率。



7.6 塔设备的振动

单个圆柱体，旋涡脱落频率：

$$f_v = S_r \cdot \frac{v}{D}$$



式中 S_r —斯特劳哈尔数，其值与雷诺数 Re 大小有关，可由图7-88确定；

D —塔体的外直径，如塔体有保温层，则为保温层外表面处的直径， m 。

$Re=300 \sim 2 \times 10^5$ 范围内(亚临界范围)， $S_r \approx 0.21$ 。

$Re=3.5 \times 10^5$ 时， S_r 增大，但难以保持一确定数值，

$Re > 3.5 \times 10^6$ 时， $S_r \approx 0.27$ 。

四、临界风速

定义——作用在塔体上的交变升力的频率与旋涡脱落的频率相同，所以当旋涡脱落的频率与塔的任一振型的固有频率一致时，塔就会产生共振。

塔产生共振时的风速称为**临界风速**

若采用 $s_r=0.2$ ，则由(7-44)式可求得临界风速。

$$v_{cn} = 5 f_{cn} D = \frac{5D}{T_{cn}} \quad (7-49)$$

式中 v_{cn} 一塔在第 n 振型下共振时的临界风速， m/s ；

n 一振型数；

f_n 一塔第 n 振型时的固有频率， $1/s$ ；

T_{cn} 一塔第 n 振型时的固有周期， s ；

D 一塔的外直径， m 。

7.6.2 塔设备的防振

共振的危害

- ◆ 轻者使塔产生严重弯曲、倾斜，塔板效率下降，影响塔设备的正常操作。
- ◆ 重者使塔设备导致严重破坏，造成事故。
- ◆ 因此，在塔的设计阶段就应避免共振的发生。

7.6.2 塔设备的防振

规定：

为了防止塔的共振，塔在操作时激振力的频率（即升力作用的频率或旋涡脱落的频率） f_v 不得在塔体第一振型固有频率的**0.85~1.3**倍范围内，即 f_v 不得在如下范围内

$$0.85 f_{c1} < f_v < 1.3 f_{c1}$$

式中 f_v 一激振力的频率，HZ；

f_{c1} 一塔第一振型的固有频率，HZ。

塔设备的防振措施

一、增大塔的固有频率

降低塔高，增大内径，可降低塔的高径比，增大塔的固有频率或提高临界风速；

但这必须在工艺条件许可的情况下进行，增加塔的壁厚也可有效地提高固有频率，但这样会增加塔的成本。

二、采用扰流装置

合理地布置塔体上的管道、平台、扶梯和其它的连接件可以消除或破坏卡曼旋涡的形成。

沿塔体周围焊接一些螺旋型板可以消除旋涡的形成或改变旋涡脱落的方式，从而达到消除过大振动的目的。此方法在某些装置上已获得成功。

螺旋板焊接在塔顶部 $1/3$ 塔高的范围内，它的螺距可取塔径的5倍，板高可取塔径的 $1/10$ 。

三、增大塔的阻尼

增加塔的阻尼对控制塔的振动起着很大的作用。当阻尼增加时塔的振幅会明显下降。

当阻尼增加到一定数值后，振动会完全消失。

塔盘上的液体或塔内的填料都是有效的阻尼物。

研究表明，塔盘上的液体可以将振幅减小10%左右。

思考题

简述塔设备振动的原因及预防措施。