

# 韧性管道中流体做功的物理定律

韧性管道中流体做功的物理定律涉及流体力学、弹性力学及热力学的交叉应用，其核心是**流固耦合效应**——流体流动与管道变形的相互作用

## 一、基础物理定律与理论框架

### 1. 连续性方程与动量方程

- 连续性方程：

描述质量守恒，即单位时间内流入的质量等于流出的质量。在弹性管道中，考虑到管道截面积随压力变化，需要联立结构变形方程：

$$\frac{\partial(\rho A)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho A v)}{\partial x} = 0$$

其中， $A(x, t)$  为管道截面积， $v$  为流速， $\rho$  为流体密度。

- 动量方程：

考虑流体与管道壁面的相互作用力（如粘性力、弹性力），引入结构动力学方程：

$$\rho A \left( \frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} \right) = - \frac{\partial(pA)}{\partial x} - \tau_w \pi D + \rho A g \sin \theta$$

其中， $p$  为流体压力， $\tau_w$  为壁面剪切应力， $D$  为管道直径， $\theta$  为管道倾角。

### 2. 能量守恒与伯努利方程的修正

- 传统伯努利方程：

适用于刚性管道，忽略管道变形：

$$\frac{p}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} + z = C$$

其中， $z$  为高度。

- 弹性管道的修正：

考虑管道弹性变形引起的能量耗散（如应力-应变能），需引入结构势能项：

$$\frac{p}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} + z + \frac{E\epsilon^2}{2\rho g} = C$$

其中， $E$  为管道材料弹性模量， $\epsilon$  为管道应变。

### 3. 流固耦合理论

- 耦合机制：

流体压力变化会导致管道变形，从而变形改变流动截面积和流速，形成双向耦合。例如，水击现象中，压力波传播速度  $c$  与管道弹性模量  $E$  和流体体积模量  $K$  相关：

$$c = \sqrt{\frac{K}{\rho \left(1 + \frac{KD}{Ee}\right)}}$$

其中， $e$  为管道壁厚。

- 数值求解方法：

常用任意拉格朗日-欧拉（ALE）方法处理移动边界问题，或浸入边界法简化流固界面处理。

## 二、修正模型与实验验证

### 1. Joukowsky方程的扩展

- 传统Joukowsky方程：

描述刚性管道中压力波速：

$$\Delta p = \rho c \Delta v$$

其中， $\Delta v$  为流速变化。

- 弹性管道修正：

考虑管道弹性变形后，压力波速降低，压力变化减小：

$$\Delta p = \frac{\rho c \Delta v}{1 + \frac{KD}{Ee}}$$

### 2. 达西-魏斯巴赫公式的改进

- 传统公式：

计算沿程水头损失：

$$h_f = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g}$$

其中， $f$  为摩擦系数。

- **弹性管道修正：**

管道变形可能改变流动截面积，导致流速和雷诺数变化，需引入动态摩擦系数  $f_{\text{dynamic}}$ ，考虑振动或变形引起的流动扰动。

### 3. 实验验证案例

- **弹性管束强化传热实验：**

山东大学实验表明，弹性管束的振动可使管外传热系数提高3倍以上，验证了流固耦合对能量传递的增强作用。

- **超临界CO<sub>2</sub>管道断裂实验：**

研究发现，超临界CO<sub>2</sub>管道裂尖后压力分布与天然气管道不同，导致传统止裂模型失效，需结合流固耦合修正模型。

## 总结

韧性管道中流体做功的物理定律以**流固耦合**为核心，涉及连续性方程、动量方程、能量守恒及材料本构关系的综合应用。实践中需结合实验数据和数值模拟，针对具体场景（如压力波动、温度变化、振动）选择修正模型，以实现安全、高效的流体输送。