

节流过程的原理及其关键应用

陈嗣杰

课程：热力学与统计物理

2025.9.29

目录

- ① 引言与基本原理
- ② 核心应用领域
- ③ 其他重要应用
- ④ 总结与展望

什么是节流过程？

- **宏观定义：**流体在绝热条件下，流经一个阀门、多孔塞或其他阻碍物，导致其压强显著降低的过程。

什么是节流过程？

- **宏观定义：**流体在绝热条件下，流经一个阀门、多孔塞或其他阻碍物，导致其压强显著降低的过程。
- **热力学分析：**
 - 考虑一个稳定流动系统，根据热力学第一定律的推广形式：
$$h_1 + \frac{v_1^2}{2} + gz_1 + q = h_2 + \frac{v_2^2}{2} + gz_2 + w_s$$
 - 在节流过程中：
 - 绝热： $q = 0$
 - 不做轴功： $w_s = 0$
 - 宏观动能与势能变化通常可忽略： $\Delta E_k \approx 0, \Delta E_p \approx 0$

什么是节流过程？

- **宏观定义：**流体在**绝热**条件下，流经一个阀门、多孔塞或其他阻碍物，导致其**压强显著降低**的过程。
- **热力学分析：**
 - 考虑一个稳定流动系统，根据热力学第一定律的推广形式：
$$h_1 + \frac{v_1^2}{2} + gz_1 + q = h_2 + \frac{v_2^2}{2} + gz_2 + w_s$$
 - 在节流过程中：
 - 绝热： $q = 0$
 - 不做轴功： $w_s = 0$
 - 宏观动能与势能变化通常可忽略： $\Delta E_k \approx 0, \Delta E_p \approx 0$
- **核心结论：** **焓守恒** ($h_1 \approx h_2$)。节流过程是一个**等焓**过程。

焦耳-汤姆孙效应 (Joule-Thomson Effect)

- **现象：**节流过程中，实际气体的**温度**会发生变化。
- **焦耳-汤姆孙系数 (μ_{JT}):**
 - 定义式: $\mu_{JT} = \left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_H$
 - $\mu_{JT} > 0$: **节流致冷**。应用最广泛。
 - $\mu_{JT} < 0$: 节流致热。
 - $\mu_{JT} = 0$: 温度不变，对应“转化点”。
- **注意：**对于**理想气体**，由于分子间没有相互作用力，焓只是温度的函数，因此节流过程温度不变， $\mu_{JT} = 0$ 。

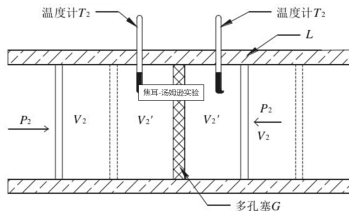


图: 节流过程示意图

J-T 效应的微观解释

- **根源：**实际气体分子间的相互作用力和分子自身体积。
- **过程分析：**气体节流膨胀时，分子平均间距增大。

J-T 效应的微观解释

- **根源：**实际气体分子间的**相互作用力**和**分子自身体积**。
- **过程分析：**气体节流膨胀时，分子平均间距增大。
 - **克服引力做功：**当分子间距在**引力**起主导作用的范围内，膨胀时分子需要克服引力做功。这部分功消耗了气体内能，导致分子平均动能下降，宏观上表现为**温度降低** ($\mu_{JT} > 0$)。

J-T 效应的微观解释

- **根源：**实际气体分子间的**相互作用力**和**分子自身体积**。
- **过程分析：**气体节流膨胀时，分子平均间距增大。
 - **克服引力做功：**当分子间距在**引力**起主导作用的范围内，膨胀时分子需要克服引力做功。这部分功消耗了气体内能，导致分子平均动能下降，宏观上表现为**温度降低** ($\mu_{JT} > 0$)。
 - **斥力作用减弱：**当气体被高度压缩，分子间距很小，**斥力**起主导作用。膨胀使得斥力迅速减弱，分子的斥力势能转化为动能，宏观上表现为**温度升高** ($\mu_{JT} < 0$)。

J-T 效应的微观解释

- **根源：**实际气体分子间的**相互作用力**和**分子自身体积**。
- **过程分析：**气体节流膨胀时，分子平均间距增大。
 - **克服引力做功：**当分子间距在**引力**起主导作用的范围内，膨胀时分子需要克服引力做功。这部分功消耗了气体内能，导致分子平均动能下降，宏观上表现为**温度降低** ($\mu_{JT} > 0$)。
 - **斥力作用减弱：**当气体被高度压缩，分子间距很小，**斥力**起主导作用。膨胀使得斥力迅速减弱，分子的斥力势能转化为动能，宏观上表现为**温度升高** ($\mu_{JT} < 0$)。
- **结论：**J-T 效应的致冷或致热，取决于气体所处状态下，分子间**引力与斥力的相对强弱**。

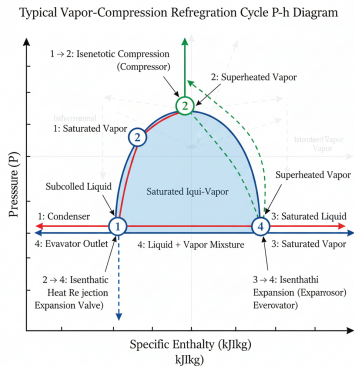
转化温度与致冷条件

- **转化曲线 (Inversion Curve):** 在 P-T 图上, 所有 $\mu_{JT} = 0$ 的点连接成的曲线。
 - 曲线内部区域: $\mu_{JT} > 0$, 节流致冷。
 - 曲线外部区域: $\mu_{JT} < 0$, 节流致热。
- **最高转化温度:** 转化曲线与 T 轴的交点。只有当气体的初始温度**低于其最高转化温度**时, 才有可能通过节流实现降温。
- **重要实例:**
 - **氮气、氧气、氩气:** 最高转化温度远高于室温, 在室温下可以直接通过节流进行液化。
 - **氢气** ($T_{max} \approx 205 \text{ K}$) 和 **氦气** ($T_{max} \approx 43 \text{ K}$): 最高转化温度很低, 在室温下节流会**升温**。因此, 它们在节流前必须被**预冷**到其最高转化温度以下。

应用一：制冷与空调技术

- **核心地位：**节流是**蒸气压缩制冷循环**不可或缺的一环，起着**降压降温**的关键作用。
- **四大过程：**
 - ① **压缩 (Compression)：**压缩机做功，将低温低压制冷剂蒸气压缩成高温高压蒸气。
 - ② **冷凝 (Condensation)：**高温高压蒸气在室外冷凝器中向环境放热，变为高压液体。
 - ③ **节流 (Throttling)：**高压液体流经**膨胀阀**或**毛细管**，压强和温度骤降，变为低温低压的液汽混合物。
 - ④ **蒸发 (Evaporation)：**低温低压制冷剂在室内蒸发器中吸收热量而汽化，实现制冷。
- **应用实例：**家用冰箱、空调、汽车空调、冷库、热泵等。

详解：P-h 图中的制冷循环



- **1 → 2: 沿等熵线上升，压缩过程。**
- **2 → 3: 沿等压线向左，冷凝过程。**
- **3 → 4: 垂直向下，节流过程** ($h_3 = h_4$)。
- **4 → 1: 沿等压线向右，蒸发过程**，单位制冷量为 $h_1 - h_4$ 。

图：蒸气压缩制冷循环 P-h

分析： P-h 图直观地展示了节流过程作为连接高压侧和低压侧的桥梁，并为蒸发过程创造了必要的低温低压条件。

应用二：气体的液化

- **基本原理**：利用深度节流致冷，并结合**回热**技术，使气体温度逐步降低到其沸点以下，从而液化。
- **林德液化循环 (Linde-Hampson Cycle)**:
 - **关键技术**：结合了 **节流致冷** 与 **回流换热**。
 - **流程**：气体被压缩预冷 → 通过节流阀膨胀降温 → **降温后的冷气体通过换热器去冷却后续进入的高压气体** → 反复循环，逐级降温 → 最终液化。
- **应用实例**:
 - **空气分离**：制备液氮 (LN_2)、液氧 (LO_x)、液氩等工业气体。
 - **能源工业**：液化天然气 (LNG) 的生产，便于储存和长途运输。

气体液化的改进：克劳德循环

林德循环的局限

完全依赖节流效应，效率相对较低，特别是对于预冷需求高的气体。

克劳德循环 (Claude Cycle)

- **核心改进**：将高压气流分为两部分。一部分进入**膨胀机**对外做功，产生显著的温降（近似等熵膨胀）；另一部分进行传统的节流。
- **优势**：
 - **效率更高**：膨胀机做功产生的降温效果比单纯节流更显著。
 - **预冷集成**：膨胀机出来的冷气流可用于对主气路进行高效预冷。
- **结论**：现代大型气体液化装置多采用克劳德循环或其改进形式。

低温技术 (Cryogenics)

- **J-T 制冷机**: 以节流过程为核心的微型制冷机, 结构简单、无运动部件、振动小, 可达到极低温度 (液氦温区, 4K)。
- **应用**:
 - **超导技术**: 冷却超导磁体 (MRI、粒子加速器、磁悬浮)。
 - **空间探测**: 冷却红外探测器和天文传感器, 减少热噪声。
 - **量子计算**: 为超导量子比特提供极低温环境。

工业过程与能源领域

- **动力系统**: 使用节流阀调节蒸汽流量和压力, 控制汽轮机功率。
- **天然气处理**: 利用节流降温分离天然气中的重烃组分 (NGLs)。
- **安全泄压**: 安全阀的快速开启可视为一个节流过程, 用于保护压力容器。

总结

- **物理核心：**节流过程是等焓过程，其应用的核心是基于实际气体分子间相互作用力的焦耳-汤姆孙效应。
- **技术桥梁：**它是连接热力系统中高压区和低压区的关键环节，是实现温降和相变的重要手段。
- **应用广度：**从维持日常生活的冰箱空调，到支撑前沿科技的气体液化和超导应用，节流过程是现代工业和科技中不可或缺的一环。
- **核心思想：**

一个看似简单的物理过程，
却深刻体现了从微观相互作用到宏观工程应用的转化。

● 新材料与工质:

- 探索更环保、高效的新型制冷剂以应对全球变暖。
- 研究具有更优异 J-T 效应的多孔材料，用于微型制冷。

● 集成与优化:

- 将节流过程与其他制冷技术（如磁制冷、声制冷）相结合，开发混合式制冷循环。
- 利用先进的计算流体力学 (CFD) 优化节流元件（如膨胀阀）的结构，提高系统能效。

● 新兴应用:

- 在氢能源的液化、储存和运输中扮演关键角色。
- 在二氧化碳捕获与封存 (CCS) 技术中用于液化 CO_2 。

汇报结束