

## 第十四单元 热 学

### 考点基础巩固卷

#### 1. D 必刷知识 ▶ 热力学第一定律+压强的微观解释

【深度解析】由题意知,汽缸内的封闭气体是理想气体且温度不变,所以气体分子的平均动能不变,气体内能不变,A、B 错误;气体体积增大,对外做功,根据热力学第一定律可知,气体从外界吸热;封闭气体温度不变,体积增大,单位体积的分子数减小,压强减小,C 错误,D 正确。

#### 2. B 必刷知识 ▶ 气体压强的微观意义+热力学第一定律

【深度解析】饭盒爆炸前,盒内气体温度升高,分子的平均动能增大,但不是盒内每一个气体分子速率都增大了,A 错误;饭盒爆炸前,盒内气体温度升高,气体压强增大导致饭盒爆炸,B 正确;在饭盒爆炸的瞬间,气体体积增大,气体对外界做正功,根据热力学第一定律可知,其内能应减小,盒内气体温度急剧下降,C、D 错误。

#### 3. C 必刷知识 ▶ 热力学第一定律+压强的微观解释

【深度解析】活塞上方液体逐渐流出,对活塞受力分析可得,汽缸内气体压强减小,汽缸内气体温度不变,则单位时间内气体分子对活塞撞击的次数减少,A 错误;气体分子对活塞的碰撞是活塞向上运动的原因,B 错误;外界的温度保持不变,导热材料制成的汽缸内气体温度不变,气体分子的速率分布情况不变,C 正确;汽缸内气体温度不变,则汽缸内气体内能不变,汽缸内气体压强减小,体积变大,气体对外界做功,根据热力学第一定律,气体对外界做的功等于气体从外界吸收的热量,D 错误。

#### 4. D 必刷知识 ▶ 理想气体状态方程+热力学第一定律

【深度解析】气体膨胀,体积增大,所以袋内空气分子的平均距离一定增大,A 错误;温度不变,所以袋内空气分子的平均动能一定不变,B 错误;温度不变,气体体积增大,根据  $\frac{PV}{T} = C$  可知,压强减小,C 错误;对于理想气体,温度不变,内能不变,气体膨胀对外做功,所以袋内空气一定从外界吸收热量,D 正确。

#### 5. C 必刷模型 ▶ $p$ - $V$ 图像

【深度解析】由于  $T_a = T_b$ ,而  $b \rightarrow c$  过程为等容变化,根据查理定律,则  $\frac{p_b}{T_b} = \frac{p_c}{T_c}$ ,可知  $T_b > T_c$ ,故  $T_a > T_c$ ,A 错误;根据  $W = F_s = p\Delta V$ ,可知  $p$ - $V$  图线与  $V$  轴所围图形的面积表示做功  $W$ ,由于  $a \rightarrow b$  过程中气体对外界做功, $c \rightarrow d$  过程外界对气体做功,根据面积关系可知,整个过程中  $W < 0$ ,而整个过程中  $\Delta U = 0$ ,根据热力学第一定律  $\Delta U = W + Q$ ,可知  $Q > 0$ ,即气体吸热,B 错误;由于  $T_a = T_b$ 、 $T_c = T_d$ ,而理想气体的内能仅取决于温度,可知  $b \rightarrow c$ 、 $d \rightarrow a$  两过程中内能变化量数值相等,即  $|\Delta U|$  相等,而两过程均为等容变化,则  $W = 0$ ,根据热力学第一定律  $\Delta U =$

$W+Q$ , 有  $|\Delta U| = |Q|$ , 故两过程中  $|Q|$  相等, 即气体放出、吸收的热量相等, **C 正确**;  $p_d > p_c$ , 又有  $T_d = T_c$ , 根据压强的微观解释, 可知  $d$  状态下单位时间与器壁单位面积碰撞的气体分子数比  $c$  状态多, **D 错误**。

#### 6. D 必刷考点 ▶ 力的平衡+盖-吕萨克定律+热力学第一定律

【深度解析】在状态  $A$ , 由平衡条件有  $mg + p_0 S = p_A S$ , 解得  $m = 2 \text{ kg}$ , **A 错误**; 由题图乙知气体做等压变化, 有  $\frac{V_A}{T_A} = \frac{V_B}{T_B}$ , 解得  $V_B = 8.0 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ , **B 错误**; 从状态  $A$  变化到状态  $B$  的过程, 气体对外界做功  $W = p_A \Delta V = 206 \text{ J}$ , **C 错误**; 根据热力学第一定律可得  $\Delta U = Q - W = 294 \text{ J}$ , **D 正确**。

#### 7. C 必刷模型 ▶ 理想气体状态方程+变质量问题

【深度解析】由题意可知航天服内气体初、末状态温度分别为  $T_1 = 300 \text{ K}$ 、 $T_2 = 270 \text{ K}$ , 根据理想气体状态方程有  $\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}$ , 解得  $p_2 = 0.72 \times 10^5 \text{ Pa}$ , **A、B 错误**; 设航天服需要放出的气体在压强为  $p_3$  状态下的体积为  $\Delta V$ , 根据玻意耳定律有  $p_2 V_2 = p_3 (V_3 + \Delta V)$ , 解得  $\Delta V = 1.5 \text{ L}$ , 则放出的气体与原来气体的质量比为  $\frac{\Delta V}{V_3 + \Delta V} = \frac{1}{3}$ , **C 正确, D 错误**。

#### 8. C 必刷知识 ▶ 理想气体状态方程+热力学第一定律

【深度解析】对充入气球内的氦气, 从氦气罐内到气球内的过程, 体积增大, 对外做功, 不计温度变化, 则内能不变, 根据热力学第一定律  $\Delta U = W + Q$ ,  $\Delta U = 0$ ,  $W$  为负值, 则  $Q$  为正值, 气体吸热, **A 错误**; 全部充气完毕, 罐内气体压强也变为  $p_0$ , 设末状态气体总体积为  $V$ , 根据玻意耳定律有  $p_1 V_1 = p_0 V$ , 将  $p_1 = 2.0 \times 10^7 \text{ Pa}$ ,  $V_1 = 50 \text{ L}$ ,  $p_0 = 1.0 \times 10^5 \text{ Pa}$ , 代入解得  $V = 10^4 \text{ L}$ , 设总共充气  $n$  个符合要求的气体, 则  $V = V_1 + nV_0$ ,  $V_0 = 10 \text{ L}$ , 代入可得  $n = 995$ , **B 错误**; 当气球发生爆裂时, 气球体积膨胀到  $15 \text{ L}$ , 设此时气球离地面高度为  $h$ , 则爆裂时气球内气体的压强和温度分别是  $p_2 = p_0 - 11h$ ,  $T_2 = T_0 - \frac{6h}{1000}$ , 代入理想气体状态方程  $\frac{p_0 V_0}{T_0} = \frac{p_2 V_2}{T_2}$ , 解得  $h \approx 3448 \text{ m}$ , **C 正确**; 气球的体积膨胀到  $15 \text{ L}$  才会爆裂, 要降低气球发生爆裂的高度, 在地面充气时可使充气的气球体积适当增大, **D 错误**。

#### 9. (1) $1.2 \times 10^{-5}$ (2) $5 \times 10^{-10}$ (3) ABD

#### 必刷知识 ▶ 用油膜法估测分子直径

【深度解析】(1) 每一滴油酸酒精溶液中含有纯油酸的体积为  $V = \frac{1}{50} \times \frac{6}{10^4} \text{ mL} = 1.2 \times 10^{-5} \text{ mL}$ 。

(2) 油膜的面积可从玻璃板上得到, 所围方格中, 面积超过一半的按一格算, 小于一半的舍去, 根据题图可得共有  $57$  个方格, 故油膜面积为  $S = 57 \times 20 \times 20 \text{ mm}^2 = 22800 \text{ mm}^2$ , 油酸分子

$$\text{的直径 } d = \frac{V}{S} = \frac{1.2 \times 10^{-5} \times 10^{-6}}{22\,800 \times 10^{-6}} \text{ m} \approx 5 \times 10^{-10} \text{ m}。$$

(3) 水面上痱子粉撒得较多,油膜没有充分展开,则测量的面积  $S$  偏小,导致测算结果偏大, **A 正确**; 计算油膜面积时舍去了所有不足一格的方格,  $S$  将偏小,导致测算结果偏大, **B 正确**; 求每滴溶液的体积时,  $1 \text{ mL}$  的溶液的滴数多记了  $10$  滴,由  $V_0 = \frac{V}{n}$  可知,求得的每滴溶液中纯油酸的体积将偏小,导致测算结果偏小, **C 错误**; 计算时把油酸酒精溶液当成了纯油酸,体积偏大,则测算结果偏大, **D 正确**。

#### 10. (1) 向上 $B$ 管内的水银面再一次回到标记的位置 $K$

(2) 300 75.6

##### 必刷知识 ▶ 查理定律的应用

【深度解析】(1) 气体温度升高,压强变大,  $B$  管内的水银面下降,为使封闭气体的体积不变,应将  $C$  管向上移动,直至  $B$  管内的水银面再一次回到标记的位置  $K$ 。

(2) 设  $C$  管与  $B$  管的压强差为  $p_h$ , 则  $p_h = h \text{ cmHg}$ , 由查理定律可知  $\frac{p_0 + p_h}{273 + t} = \frac{p_0}{T_0}$ , 即  $h = \frac{p_0}{T_0} t + \left( \frac{273 p_0}{T_0} - p_0 \right)$ , 由题图乙可知  $\frac{p_0}{T_0} = \frac{6.8}{27.0} \text{ cmHg}/^\circ\text{C}$ ,  $\frac{273 p_0}{T_0} - p_0 = -6.8 \text{ cmHg}$ , 解得  $T_0 = 300 \text{ K}$ ,  $p_0 \approx 75.6 \text{ cmHg}$ 。

#### 11. (1) 15 cm (2) 400 K

##### 必刷考点 ▶ 玻意耳定律和盖-吕萨克定律的应用

【深度解析】(1) 设玻璃管的横截面积为  $S$ , 水平放置时, 对封闭气体有  $p_1 = p_0$ ,  $V_1 = L_1 S$ , 竖直放置时, 对封闭气体有  $p_2 = p_0 + \rho g L_2$ ,  $V_2 = L_3 S$ , 其中  $\rho$  为水银的密度, 根据玻意耳定律, 有  $p_1 V_1 = p_2 V_2$ , 解得  $L_3 = 15 \text{ cm}$ 。

(2) 加热过程空气柱发生等压变化, 末状态有  $p_3 = p_2$ ,  $V_3 = V_1$ , 根据盖-吕萨克定律, 有  $\frac{V_2}{T_0} = \frac{V_3}{T}$ , 解得  $T = 400 \text{ K}$ 。

#### 12. (1) $1.5 p_0$ (2) $\frac{2}{n+1} h$

##### 必刷考点 ▶ 玻意耳定律

【深度解析】(1) 设第一次打气后气压为  $p_1$ , 打气过程前后应遵循玻意耳定律,

$$p_0 (V + 0.5V) = p_1 V,$$

解得  $p_1 = 1.5 p_0$ 。

(2) 设第  $n$  次打气前(即  $n-1$  次打气后)气压为  $p_{n-1}$ ,  $n-1$  次打气可等效为一次气体压缩过程, 满足玻意耳定律,

$$p_0 \left[ V + (n-1) \frac{V}{2} \right] = p_{n-1} V,$$

$$\text{解得 } p_{n-1} = \frac{1+n}{2} p_0,$$

第  $n$  次打气时,气筒内气体压缩至压强达到  $p_{n-1}$  时才能打入火箭内部,设此时活塞到筒底长度为  $h'$ ,气筒内部横截面积为  $S$ ,

根据玻意耳定律有  $p_0 h S = p_{n-1} h' S$ ,

$$\text{解得 } h' = \frac{2}{n+1} h。$$

### 13. (1) $1.25 \times 10^5 \text{ Pa}$ (2) 13.75 cm

#### 必刷模型 ▶ 汽缸模型中的受力平衡

【深度解析】(1) 对汽缸和椅面受力分析,如图甲所示,

由平衡条件有  $p_1 S = p_0 S + mg$ ,

解得  $p_1 = 1.25 \times 10^5 \text{ Pa}$ 。

(2) 人坐上去,对汽缸、椅面和人受力分析如图乙 甲所示,

由力的平衡条件有  $p_2 S = p_0 S + (m+M)g$ ,

解得  $p_2 = 4.0 \times 10^5 \text{ Pa}$ ,

汽缸内气体发生等温变化,

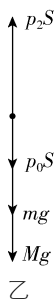
初状态  $p_1 = 1.25 \times 10^5 \text{ Pa}$ ,  $V_1 = LS$ ,

末状态  $p_2 = 4.0 \times 10^5 \text{ Pa}$ ,  $V_2 = L'S$ ,

由玻意耳定律有  $p_1 LS = p_2 L'S$ ,

解得  $L' = 6.25 \text{ cm}$ ,

稳定后椅面下降的高度  $h = L - L' = 13.75 \text{ cm}$ 。



## 单元综合提升卷

### 1. A 必刷模型 ▶ 等温变化

【深度解析】气泡在开始上升的过程中温度不变,因压强越来越小,由玻意耳定律知气泡的体积逐渐变大,气泡所受的浮力逐渐变大,则加速度越来越大,气泡上升的速度越来越快,

A 正确,B、C、D 错误。

### 2. B 必刷知识 ▶ 布朗运动+分子内能+表面张力+P-V 图像

选项	分析	正误
A	布朗运动图像反映每隔一段时间固体微粒的位置,而不是运动轨迹	×
B	理想气体不计分子势能,所以温度升高时,分子平均动能增大,则内能一定增大	√
C	一定质量的理想气体,不同温度下对应的等温线是不同的,且越靠近原点的等温线所表示的温度越低,即 $T_1 < T_2$	×

D	水黾停在水面上的原因是水黾受到了水的表面张力的作用	×
---	---------------------------	---

### 3. B 必刷模型 ▶ 喷壶模型+气体的等温变化

【深度解析】由于题图乙曲线为等温线,则气体在状态  $A$ 、 $B$  时的分子平均动能相等,又由于气体为理想气体,则气体的分子势能可忽略不计,所以气体在状态  $A$  的内能一定等于在状态  $B$  的内能, **A 错误**;由理想气体状态方程  $pV=CT$ ,对封闭气体  $C$  是常量,温度  $T$  保持不变,则  $pV$  为定值,则图中  $Rt\triangle OAC$  和  $Rt\triangle OBD$  的面积相等, **B 正确**;从状态  $A$  变化到状态  $B$ ,气体的体积增大,对外界做功,由热力学第一定律可知  $\Delta U=Q+W=0$ ,气体吸收的热量等于气体对外界所做的功, **C 错误**;从状态  $A$  变化到状态  $B$  气体的压强减小,则气体分子对器壁的平均作用力减小, **D 错误**。

### 4. B 必刷考点 ▶ 热力学第一定律

【深度解析】压缩玻璃筒内的气体,气体的压强变大,机械能转化为筒内气体的内能,即外界对气体做正功,气体的内能增加,温度升高,当达到硝化棉的燃点后,硝化棉会燃烧, **B 正确**, **A、C、D 错误**。

### 5. A 必刷知识 ▶ 盖-吕萨克定律

【深度解析】设缸内气体压强  $p$ ,外界大气压为  $p_0$ ,大活塞面积为  $S$ ,小活塞面积为  $S'$ ,活塞  $a$ 、 $b$  质量分别为  $m_a$ 、 $m_b$ ,对活塞  $a$ 、 $b$  整体受力分析,由平衡条件知  $(p_0-p)(S-S')=(m_a+m_b)g$ 。系统再次达到平衡状态时,因两活塞的质量不变,故缸内气体压强也不变。给汽缸缓慢加热,气体温度升高,由盖-吕萨克定律知气体体积要增大,由汽缸结构可知活塞应向下移动了一点, **A 正确**。

### 6. D 必刷模型 ▶ $p$ - $V$ 图像+ $V$ - $T$ 图像

【深度解析】1 到 2 的过程是等压变化,体积增大,根据  $\frac{pV}{T}=C$  可得温度  $T$  增大, $V$ - $T$  图像中为一条过原点的倾斜直线;2 到 3 的过程是等容变化,压强减小,温度减小, $V$ - $T$  图像是一条平行于  $T$  轴的直线;3 到 1 的过程是等温变化,体积减小,是一条平行于  $V$  轴的直线, **D 正确**。

### 7. C 必刷知识 ▶ 玻意耳定律

【深度解析】在药液从  $B$  瓶中流下时,封闭气体体积增大,温度不变,根据玻意耳定律知气体压强减小, $A$  瓶中空气将  $A$  瓶中药液压入  $B$  瓶,补充  $B$  瓶流失的药液,即  $B$  瓶药液液面保持不变,直到  $A$  瓶中药液全部流入  $B$  瓶,即  $A$  瓶药液先用完, **A、B 错误**;  $A$  瓶瓶口处压强和大气压强相等,但  $A$  瓶中液面下降,由液体产生的压强减小,因此  $A$  瓶中气体产生的压强逐渐增大, **C 正确**, **D 错误**。

### 8. C 必刷知识 ▶ 玻意耳定律

【深度解析】由题可知,大气压=玻璃管中水银柱产生的压强+封闭气体的压强,大气压不变的情况下,吸走槽中的部分

水银,管口未离开水银面,玻璃管内封闭气体的体积变大,压强变小,同时管内外水银面的高度差  $h$  也会适当增加,即  $h_2 > h_1$ ; 向上的拉力  $F$  与管的重力和管内气体向上的压力相平衡,管内气体向上的压力变小,管的重力不变,拉力  $F$  的大小会变大,即  $F_2 > F_1$ , **C 正确, A、B、D 错误。**

#### 9. D 必刷知识 ▶ 盖-吕萨克定律+热力学第一定律

**【深度解析】**吸管内的油柱受内外气压的作用处于平衡状态,所以温度升高时,即读数变大过程,罐中气体发生等压变化,压强不变,由盖-吕萨克定律可知气体的体积增大,吸管内的油柱向右移动,则吸管上的温度刻度值左小右大, **A、B 错误**; 读数变大过程,体积增大,罐中气体对外做功,罐内气体温度升高,内能增大, **C 错误**; 读数变小过程,罐内气体温度降低,内能减小,由热力学第一定律  $\Delta U = W + Q$  可知,罐中气体放出的热量大于外界对其做的功, **D 正确。**

#### 10. C 必刷模型 ▶ $p-T$ 图像

**【深度解析】**由理想气体状态方程可知  $a \rightarrow b$  为等容过程,所以气体在  $a$ 、 $b$  两状态的体积相等, **A 错误**; 气体在状态  $a$  时的温度低于它在状态  $b$  时的温度,所以气体在状态  $a$  时的内能小于它在状态  $b$  时的内能, **B 错误**;  $b \rightarrow c$  为等温过程,气体内能不变,压强减小,根据玻意耳定律可知气体体积增大,对外做功,根据热力学第一定律可知气体在  $b \rightarrow c$  过程一定吸收热量, **C 正确**;  $c \rightarrow a$  为等压过程,气体温度降低,内能减小,根据盖-吕萨克定律可知气体体积减小,外界对气体做功,根据热力学第一定律可知气体在  $c \rightarrow a$  过程向外界放出的热量大于外界对气体做的功, **D 错误。**

#### 11. (1) dacb (2) $\frac{V_a}{NS}$ (3) AD

##### 必刷知识 ▶ “用油膜法估测分子的大小”实验

**【深度解析】**(1) “用油膜法估测分子的大小”实验的步骤为:配制油酸酒精溶液→测定一滴油酸酒精溶液的体积→准备浅水盘→形成油膜→描绘油膜边缘→测量油膜面积→计算分子直径。因此操作先后顺序排列应是 dacb。

(2) 1 滴油酸酒精溶液中纯油酸的体积  $V' = \frac{V}{N} \cdot a$ , 1 滴油酸酒精溶液形成的油膜面积为  $S$ , 则分子直径大小为  $d = \frac{V'}{S} = \frac{Va}{NS}$ 。

(3) 由(2)可知,若油酸未完全散开,  $S$  偏小,则测得的分子直径将偏大, **A 正确**; 如果油酸酒精溶液的浓度低于实际值,则测得的分子直径将偏小, **B 错误**; 计算油膜面积时,将所有不足一格的方格计为一格时,  $S$  将偏大,则测得的分子直径将偏小, **C 错误**; 错误地将油酸酒精溶液的体积直接作为油酸体积进行计算,油酸体积将偏大,则测得的分子直径将偏大, **D 正确。**

## 12. (1) 实验时环境温度降低了或注射器内的空气向外泄漏

(2) C (3)  $V_1$

**必刷知识** ▶ 等温变化

**【深度解析】**(1) 当  $V$  减小时, 图线逐渐偏离双曲线, 且  $pV$  值逐渐减小, 由  $pV = CT$  分析易知造成这一现象的可能原因是实验时环境温度降低了或注射器内的空气向外泄漏。

(2) 由于连接注射器与压强传感器之间软管内的气体不可忽略, 当压强增加后, 软管内的气体体积也减小, 但软管的体积未变, 则注射器中有气体进入软管, 相当于注射器漏气, 当  $V$  减小时,  $\frac{1}{V}$  增大,  $p$  随  $\frac{1}{V}$  变化时不是线性关系, 当  $V$  越小时, 压强越大, 进入软管内的气体越多, 压强增加程度越小, 斜率越小, 故作出的  $p - \frac{1}{V}$  图像可能为 C。

(3) 设连接注射器与压强传感器之间软管内气体的体积为  $V_0$ , 根据玻意耳定律有  $p(V + V_0) = C$ , 则有  $\frac{1}{p} = \frac{V + V_0}{C}$ , 由题图丙可知, 当  $\frac{1}{p}$  为 0 时,  $V = -V_1$ , 代入上式可得  $V_0 = V_1$ 。

## 13. (1) 20 cm (2) 24 cm

**必刷知识** ▶ 玻意耳定律

**【深度解析】**(1) 对封闭气体, 开口向下时有

$$p_1 = p_0 - \rho gh_1 = 60 \text{ cmHg},$$

$$\text{开口向上时有 } p_2 = p_0 + \rho gh_1 = 90 \text{ cmHg},$$

$$\text{根据玻意耳定律有 } p_1 h_2 S = p_2 h_3 S,$$

$$\text{解得 } h_3 = 20 \text{ cm}。$$

(2) 若将此试管静置于“天宫”空间站中, 完全失重, 封闭气体压强  $p_0 = 75 \text{ cmHg}$

$$\text{根据玻意耳定律有 } p_1 h_2 S = p_0 h_4 S,$$

$$\text{解得 } h_4 = 24 \text{ cm}。$$

## 14. (1) 2 atm (2) 9 次

**必刷考点** ▶ 气体实验定律、充气问题

**【深度解析】**(1) 对球内的气体由玻意耳定律可得

$$p_1 V_1 = p' V',$$

$$\text{其中 } p_1 = 1.2 \text{ atm}, V_1 = 2 \text{ L}, V' = 1.2 \text{ L},$$

$$\text{解得蹦蹦球内气体的压强 } p' = 2 \text{ atm}。$$

$$(2) \text{ 将球从室外拿到室内, 由查理定理得 } \frac{p_2}{T_2} = \frac{p_1}{T_1},$$

$$\text{其中 } p_1 = 1.2 \text{ atm}, T_1 = (-3 + 273) \text{ K} = 270 \text{ K},$$

$$T_2 = (27 + 273) \text{ K} = 300 \text{ K},$$

设至少充气  $n$  次可使球内气体压强达到 3 atm, 以蹦蹦球内部气体和所充气体的整体为研究对象,

$$\text{有 } p_2 V_1 + p_0 (n \Delta V) = p_3 V_1,$$

$$\text{其中 } p_0 = 1 \text{ atm}, \Delta V = 0.4 \text{ L}, p_3 = 3 \text{ atm}, V_1 = 2 \text{ L},$$

解得  $n = \frac{25}{3}$ , 所以至少需要充气 9 次。

15. (1) 0.1 kg (2)  $\frac{101}{51}$  N

**必刷知识 ▶ 查理定律**

【深度解析】(1) 温度从  $t_1$  升到  $t_2$  为等容变化, 研究热杯盖内封闭的气体,

初状态有  $T_1 = (t_1 + 273) \text{ K} = 300 \text{ K}$ ,  $p_1 = p_0 = 1 \times 10^5 \text{ Pa}$ ,

末状态有  $T_2 = (t_2 + 273) \text{ K} = 306 \text{ K}$ ,

由受力平衡得  $p_2 = p_0 + \frac{mg}{S}$ ,

根据查理定律得  $\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$ ,

解得  $m = 0.1 \text{ kg}$ 。

(2) 温度从  $t_2$  降到  $t_3$  为等容变化, 研究杯内剩余气体,

初状态有  $T_3 = (t_2 + 273) \text{ K} = 306 \text{ K}$ ,  $p_3 = p_0 = 1 \times 10^5 \text{ Pa}$ ,

末状态有  $T_4 = (t_1 + 273) \text{ K} = 300 \text{ K}$ ,

由受力平衡得  $p_4 = p_0 - \frac{F_{\min}}{S} + \frac{mg}{S}$ ,

根据查理定律得  $\frac{p_3}{T_3} = \frac{p_4}{T_4}$ ,

解得  $F_{\min} = \frac{101}{51} \text{ N}$ 。