

弹丸生成的物理模型和生成时间估算

胡立群

7226200h

(中国科学院等离子体物理研究所,合肥 230031)

(收稿日期 1996-04-17)

053

THE PHYSICAL MODEL AND TIME ESTIMATION FOR PELLET GROWING

Hu Liqun

(Institute of Plasma Physics, Academia Sinica, Hefei 230031)

Abstract: Pellet injection is an important way for plasma fuelling, plasma density and impurity control in fusion engineering and experimental research. This article describes the physical model of pellet growing in the condensation cavity of cryostat, and makes attempts to estimate the growing time of pellet, which has played a very important role in the pellet manufacturing and experimental adjustment of pellet injector.

Keywords: Pellet, Cryostat.

摘要: 弹丸注入是聚变工程和实验中研究等离子体加料、控制等离子体密度和杂质的重要手段。介绍了弹丸在低温恒温器冷凝腔中生成的物理模型,并由此估算了弹丸的生成时间,对弹丸实际制造、注入器实验调试起了重要的指导作用。

关键词: 弹丸、低温恒温器。

物理模型, 生成时间, 超低温等离子体

将低温固体弹丸直接高速注入等离子体是聚变工程和实验中等离子体加料研究、等离子体密度和杂质控制的重要手段。作为此技术核心的固体弹丸发生器涉及到丸料气成霜、活塞挤压、枪机切割成形等工艺、流程,涉及到真空、低温等有关技术,估算弹丸生成时间对弹丸发生器实际弹丸制造、实验调试、发射有重要的指导作用。

1 固体弹丸发生器⁽¹⁾

如图1所示,固体弹丸发生器是一个绝热的低温恒温器。当低温恒温器所在容器真空度达到 10^{-3} Pa 后,通入低温冷却介质冷却低温恒温器,回流的冷气通过管式换热器冷却防辐射屏,待恒温器温度降到所需值 T_1 时,通入丸料气。丸料气先经过管式换热器预降温,到和防辐射屏相同温度后,再进入恒温块冷凝腔冷凝成霜。利用活塞上下往复运动将霜压缩成冰柱,之后电加热器加热恒温块使其温度升到 T_2 ($T_2 > T_1$),制冰活塞将冰条挤进枪机不锈钢转筒上的小孔里,然后停止电加热器,加大低温液体流量,待恒温块温度降到 T_3 ($T_3 < T_1$) 时,不锈钢转筒反转 90° ,从冰条上切割下弹丸送入发射枪管中。最后使恒温块温度降到 T_4 ($T_4 < T_3$),开启快速电磁阀,高压弹射气体在枪管中将弹丸加速到预定速度。

2 恒温块冷凝腔生成霜的物理模型⁽²⁾

弹丸生长过程是恒温块冷凝腔圆柱形冷凝面对丸料气的连续低温吸附过程。当气体分子

与固体表面碰撞或相互作用时,或弹性反射,或非弹性反射,或损失足够能量而停留在表面上,至少停留一个短时间。气体分子一旦将其部分能量给予表面,即于某一能级陷入势阱,则分子可能经过一个弛豫过程与固体达到热平衡态,尤其是对于强冷表面(表面温度 T_k)情况,分子会滞留在势阱底部附近一段时间 τ ,直到它从冷表面或其它入射分子处获得足够能量逃脱为止。显然,气体分子温度 T_g 愈小,这种可能概

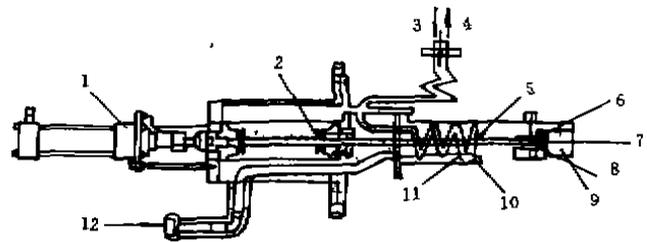


图1 弹丸注入器低温恒温器示意图

1—活塞驱动气缸; 2—波纹管; 3—丸料气入口; 4—低温冷却介质出口; 5—制冰活塞; 6—恒温块; 7—固体冰柱; 8—热交换器; 9—枪机; 10—管式热交换器; 11—防辐射屏; 12—低温冷却介质入口

率愈小。当 T_g 降到比气体在该压力下饱和温度 T_s 还低几 K 时,低温面 A_k 上冷凝的分子就会以固化霜形式在表面出现。只要霜表面保持所要求的温度或低于此温度,气体分子就不断被冷凝吸附。入射粒子和低温面上冷凝的同种粒子结合力(范德瓦斯键)比气体粒子间结合力大,原则上和已冷凝量无关,所以冷凝平衡压力比相应饱和蒸气压低得多,这样气体就在欠饱和状态下凝聚。

冷凝面 A_k 上功率平衡为

$$m_k C_k \frac{dT_k}{dt} = Q_{rad} + Q_{solid} + Q_{cond} + Q_{orb} + Q_{gas} - Q_k \quad (1)$$

式中, Q_{rad} 、 Q_{solid} 、 Q_{cond} 、 Q_{orb} 、 Q_{gas} 、 Q_k 分别为热辐射、固体热传导、冷凝、低温吸附、气体热传导的能量及冷源供给的制冷量。

冷凝形成的(微)晶粒尺寸 δ , 取决于产生的条件和气体类型,影响冷凝物密度 ρ 和热导率 λ_0 随 T_k 下降(相对于气体三相点),冷凝物的晶粒变得更细且多孔, ρ 和 λ 变小,状态稳定性也变差,因为积蓄的界面能变大;而 T_k 升高,霜结构晶粒变粗, λ 值和 ρ 值均变大,在中等层厚时,有效吸收变大。

冷凝系数 $\alpha_c = \alpha_c(T_g, T_k, P_g/P_s)$, 当 $P_g \rightarrow P_s$ 时, α_c 趋于极限值 $\alpha_c(P_s)$, 此极限值随 T_g 、 T_k 降低及随着过饱和值 P_g/P_s 增加而增大, T_k 越高, α_c 增加越快,在足够低的温度及强过饱和情况下,所有气体 α_c 几乎为 1。在 $P_g/P_s > 100$ 时, α_c 值与 P_g/P_s 和 T_k 无关;当 $T_g = 300$ K, P_g/P_s 较大时,大多数气体 α_c 趋于最大值,对 H_2 及 D_2 , $\alpha_c = 0.85$, 在冷凝层不太厚和高 P_g/P_s 情况下, α_c 与 d 无关。随冷凝层厚度 d 增加,冷凝层表面和低温面之间温差 $\Delta T = T - T_k$ 增大(ΔT 取决于冷凝物热导率 λ 和导入的功率,如辐射热 Q_{rad} 及冷凝热 Q_{cond}), 因此,随冷凝层厚度 d 增加, P_g/P_s 下降,当气体压力 P_g 降到等于对应表面温度 $T_k + \Delta T$ 的平衡压 P_s 时,有效冷凝系数 $\alpha_{eff} = 0$, d 增长也达到极限值 d_{max} , 对应存在 ΔT_{max}

$$\Delta T = T - T_k = \frac{d}{\lambda A_k} (Q_{rad} + Q_{cond} + Q_{sc}) \quad (2)$$

在 $P_g > 1$ Pa 时,辐射功率 Q_{rad} 、蒸发功率 $Q_{sc} \ll Q_{cond}$, 即

$$\Delta T = \frac{d}{\lambda A_k} Q_{cond} \quad (3)$$

冷凝功率 Q_{cond} 和单位时间内入射到 A_k 面的分子数成正比

$$I_g = (\bar{V}_g/4)n_g A_k = \frac{\bar{V}_g P_g A_k}{4kT_g} = \frac{\bar{V}_g P_g A_k N_A}{4RT_g} \quad (4)$$

相当于 $I_g/N_A = \frac{\bar{V}_g P_g A_k}{4RT_g}$ mol/m²·s, 故有

$$Q_{\text{cond}} = I_g/N_A \cdot [\alpha_c \Delta H(T_g \rightarrow T_k) + (1 - \alpha_c) \Delta H(T_g \rightarrow T_r) - \alpha_c (P_c/P_g) \Delta H_s] \quad (5)$$

上式中第一项是被冷凝部分, 第二项是被反射部分, 第三项是冷凝后又蒸发的部分, 热焓单位为 J/mol, ΔH_s 为升华焓, N_A 为阿伏伽德罗常数, M 为气体摩尔质量。当 $P_g \gg P_c$, $\alpha_c \rightarrow 1$ 时有

$$Q_{\text{cond}} = I_g/[N_A \cdot \alpha_c \Delta H(T_g \rightarrow T_k)] = \frac{P_g A_k}{RT_g} \left(\frac{RT_g}{2\pi M}\right)^{1/2} \alpha_c \Delta H(T_g \rightarrow T_k) \quad (6)$$

3 弹丸生成时间估算^[3]

实际上, 气体分子在某一冷凝表面上不可能全部被冷凝, 总有部分能量特别大的分子会从冷凝面上反射回空间中, 而且已经冷凝并与 A_k 处于热平衡的分子也会再蒸发, 如忽略器壁放气对进气压力 P_g 的影响, 则实际冷凝粒子数密度为

$$I_c = \alpha_c I_g = \alpha_c n_g \cdot \bar{V}_g/4 = \alpha_c P_g (2\pi m_0 k T_g)^{-1/2} \quad (7)$$

式中, I_g 为 A_k 单位面积上入射粒子数密度(温度、压力分别为 T_g, P_g), m_0 和 k 分别为单个分子质量和玻尔兹曼常数。 α_c 为冷凝系数, 对 H_2 : 3.8 K 以下, $\alpha_c = 0.5$ 和气压无关; 4.4 K, $\alpha_c \approx 2.5 \times 10^{-6} (P_g - P_c)/P_c$, $P_c(T_k)$ 为冷凝物饱和蒸气压。

A_k 上反射的粒子数密度 I_r

$$I_r = (1 - \alpha_c) I_g \quad (8)$$

$1 - \alpha_c$ 为有效反射系数, I_r 中包括了如下粒子: (1) 在若干晶格振动时间($\sim 10^{-12}$ s)内被直接反射的粒子; (2) 开始被束缚住, 平均滞留时间 τ 后解吸附的粒子, τ 比 10^{-12} s 大几个量级。

$$\tau = \tau_0 \exp(E_d/kT_k) \quad (9)$$

式中, τ_0, E_d 分别为低温表面冷凝的分子特征振动时间($\sim 10^{-13}$ s)及分子逃离表面所需的能量。

与 A_k 处于热平衡状态后再蒸发的粒子流密度 I_v 为 (α_v 为冷凝物蒸发系数)

$$I_v = \alpha_v n_v \bar{V}/4 = \alpha_v P_c (2\pi m_0 k T_k)^{-1/2} \quad (10)$$

冷凝层上发射的粒子数密度 I_k 为

$$I_k = I_v + I_r = I_v + (1 - \alpha_c) I_g = I_g - (I_c - I_v) \quad (11)$$

即有效冷凝速率 N 为“冷凝的粒子和蒸发的粒子之差”

$$N = A_k I_{\text{eff}} = A_k (I_c - I_v) = A_k (\alpha_c P_g T_g^{-1/2} - \alpha_c P_c T_k^{-1/2}) (2\pi m_0 k)^{-1/2} \quad (12)$$

饱和时 $N = 0$, 即 $I_c = I_v$, 极限压力 P_c 为

$$P_c = \frac{\alpha_v}{\alpha_c} P_g (T_g/T_k)^{1/2} \quad (13)$$

对大多数气体, 可认为 $\alpha_v = \alpha_c$ 。冷凝层厚增长速度为

$$\frac{d}{t} = \frac{m}{A_k \rho} \quad (14)$$

由式(13)得有效冷凝粒子数为

$$N = A_k \alpha_c (P_g - P_c) (2\pi m_0 k T_k)^{-1/2} \quad (15)$$

相当于质量

$$m = N m_0$$

则形成厚为 d 的冷凝层所需的时间为

$$t = \frac{\rho A_k d}{m} = \frac{\rho d (2\pi R T_g / M)^{1/2}}{\alpha_c (P_g - P_c)} \quad (16)$$

形成体积为 V 的冰柱需时间 t'

$$t' = V \rho_{\text{solid}} / (N m_0) = \frac{V \rho_{\text{solid}} (2\pi R T_g / M)^{1/2}}{\alpha_c A_k (P_g - P_c)} \quad (17)$$

由此可知,冷凝腔处丸料气压力 P_g 应大于恒温块温度 T_k 所对应的饱和蒸气压 P_c ,而且 T_k 尽可能低,只要丸料气进气管没被冻堵住。由于得到的冰柱是挤压形成,希望能控制进气压力 P_g 及 T_g ,使 $(P_g - P_c)$ 适中,保证每次形成的霜不是太多,多挤压几次,提高冰密度,保证弹丸强度。

对调试所用的甲烷气,如 $T_g = 88 \text{ K}$, $\rho = 511 \text{ kg/m}^3$, P_g 取 $10\,000 \text{ Pa}$, α_c 取 0.5 , $P_c = 9\,800 \text{ Pa}$,则由式(17)可得冷凝腔形成 $\varnothing 4.2 \text{ mm} \times 70 \text{ mm}$ 冰柱所需的时间约为 1 s ,而实验表明,制成 7 cm 高的冰柱约需 2 min 。如进气压力增加,成冰时间可降低。这和按余弦定律计算得到的结果相差 2 个量级。这是因为不仅 α_c 难以确定,丸料气流导的影响不可忽略,而且低温恒温器有能力把碰撞到冷凝壁上来的分子能量全部带走,即整个成霜制冷过程不严格遵守余弦定律,因为对我们所用的丸料气,其固态的导热能力是极差的,这就是说固体的导热能力在制丸时间计算中将起决定作用。

参 考 文 献

- 1 胡立群. 挤压式旋转切割丸注入器,真空与低温,1995.1(2):63
- 2 高本辉. 真空物理. 北京:科学出版社,1993
- 3 黑费尔 RA. 低温真空技术. 北京:电子工业出版社,1985

作者简介: 胡立群,博士。1984年毕业于西安交通大学电子工程系。1987年、1993年在中国科学院等离子体研究所先后获得硕士、博士学位。参加过 15 cm 双潘宁离子源、弹丸注入器、中空阴极、HT-7 托卡马克分子束注入装置及软 X 射线起伏阵列测试系统的研制工作。

纺织用胶辊的低温加工

古巴科技人员提出了一种胶辊加工的新方法,即把它放在冰箱中冷冻 $4 \sim 6 \text{ h}$ 。冰箱中填满干冰(如果使用低温液化气,还可以缩短冷冻时间)。当它冷到像金属一样坚硬时,就可以在车床上用特殊工具把胶辊迅速磨光。磨削时必须采用较高的速度,以免胶辊解冻。这个方法既加快了加工进度,又节省了能源。还能防止橡胶细末污染车间。这项技术可用于印刷、纺织和造纸行业中所使用的胶辊的加工。

(张肇富摘编自《科学与生活》(俄)1996(1))