



清华大学

Tsinghua University

School of Vehicle and Mobility
Electrochemistry Power Source Laboratory
30 Shuangqing Road
Haidian District, Beijing, China

变动工况对水相变特征的影响

杨昊天

清华大学

2025 年 12 月 04 日



一、引入

本课题的目的是解析变动工况下的水是否会发生沸腾，主要涉及到的过程包括传热与相变。在前期的 COMSOL 试算中发现 FEM 并不能很好地解析该过程，原因有二：1. 若给定水质量较小，则模拟开始后水会很快蒸发净，难以完整观测变动工况对水相变的影响；2. 若给定水质量较大，则水内部温差变大，发生不等温流动，产生不必要的计算资源消耗。因此最终选择直接在 Matlab 中编写一维传热仿真程序进行研究。

二、结果建模与分析讨论

环境温度 T_{ex} 与压强 p_{ex} 按照三角波进行同频率波动。相变条件下的水-气表面传热形式包括对流、相变、辐射三种，分别满足方程：

$$dQ_a = \alpha(T_{surf} - T_{ex})dA \quad (1)$$

$$dQ_b = \beta(p_{surf} - p_{ex})dA \quad (2)$$

$$dQ_c = \varepsilon\sigma T_{surf}^4 dA \quad (3)$$

其中， α 为对流散热系数 [$W m^{-2} K^{-1}$]； β 为蒸发系数 [$W m^{-2} Pa^{-1}$]； p_{ex} 和 p_{surf} 分别为湿空气中的水蒸汽分压力和水面薄饱和层的蒸汽压力； ε 为黑度。由 Bowen 比：

$$\frac{\alpha}{\beta} = \frac{p_{atm}C_{p,air}}{0.623L} \quad (4)$$

则有：

$$dQ_h = dQ_a + dQ_b = \frac{p_{atm}}{0.623L}\beta \left[\left(C_{p,air}T_{surf} + \frac{0.623L}{p_{atm}}p_{surf} \right) - \left(C_{p,air}T_{ex} + \frac{0.623L}{p_{atm}}p_{ex} \right) \right] dA \quad (5)$$

其中， $C_{p,air}$ 是干空气比热 [$kJ kg^{-1} K^{-1}$]； L 为水的汽化热 [$kJ kg^{-1}$]。 β 满足以下方程：

$$\beta = 22 + 12.5u_{air} + 2(T_{surf} - T_{ex}) \quad (6)$$

其中， u_{air} 是表面空气流速。水内部的传热满足同相热传导的傅里叶定律。为减小计算量，在计算过程中假定发生池核沸腾条件判定，当发生判定时停止运算。若在一个充分稳定的循环内未发生沸腾，则判断该工况下不会发生沸腾。结合相关基础理论，局部过热和沸腾条件的判断分别为：

$$T_{surf} > T_{sat}(p_{ex}) \quad (7)$$

$$p_{sat}(T_{surf}) > p_{ex} \quad (8)$$

针对以上方程在 Matlab 中建立程序求解并作图。应用到的基本参数如表 1 所示，代码源码如附录 a) 所示。

表 1：部分仿真参数

物理含义	符号	取值	单位
大气压强	p_{atm}	101.325	kPa
黑度	ε	0.95	1



Stefan-Boltzmann 常数	σ	5.76e-8	$W m^{-2} \cdot K^{-4}$
水密度	ρ_w	1000	$kg m^{-3}$
水比热容	$C_{p,w}$	4200	$J kg^{-1} K^{-1}$
水气化潜热	L	2.26e6	$J kg^{-1}$
干空气热容	$C_{p,air}$	1005	$J kg^{-1} K^{-1}$
水表面积	A	0.01	m^2
工况变动频率	ω	2	s-1
湿度	RH	0.6	1
水初始温度	$T_{0,w}$	298.15	K

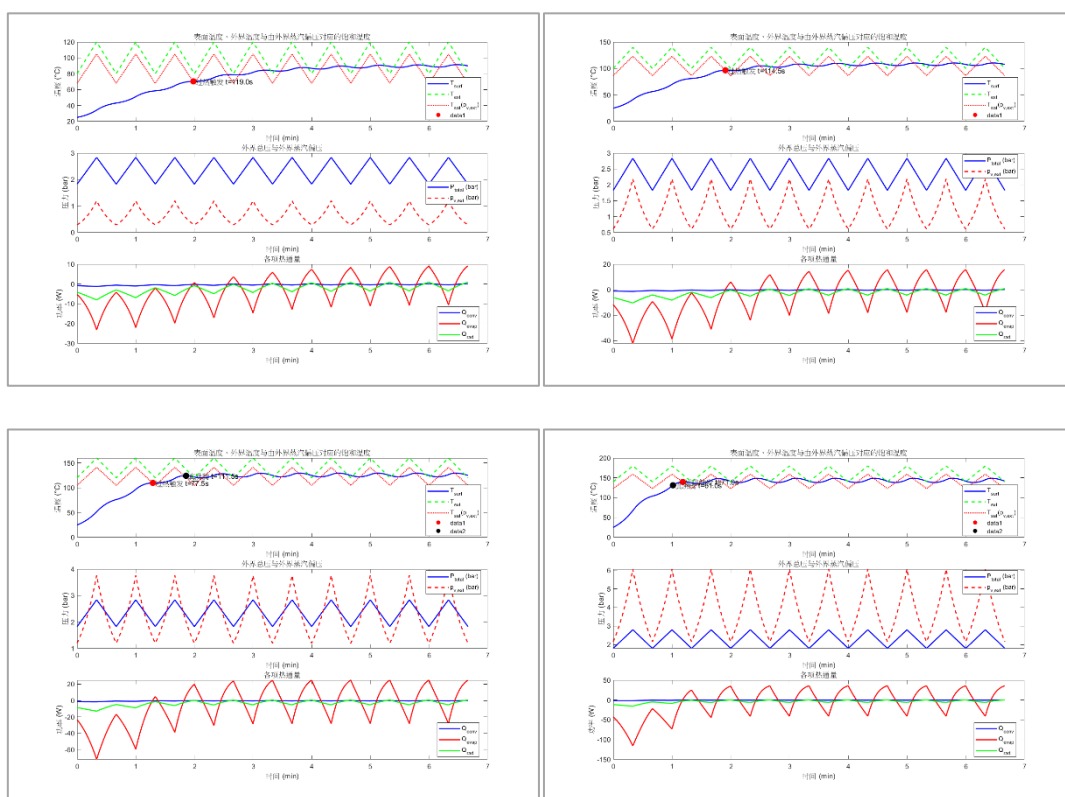


图 1: 外部压力在 1.8bar-2.8bar 之间变动, 温度分别取 80°C-120°C; 100°C-140°C; 120°C-160°C; 140°C-180°C 四种情况下的温度、压力、热通量变化。

图 1 展示了不同温度范围下的结果。其中所有工况下都会发生表面过热, 但是只有 120°C-160°C 和 140°C-180°C 两组工况的蒸汽饱和和分压超过了外部总压且温度高于沸点, 发生了实质性沸腾。同理, 我们对其他参数进行研究:

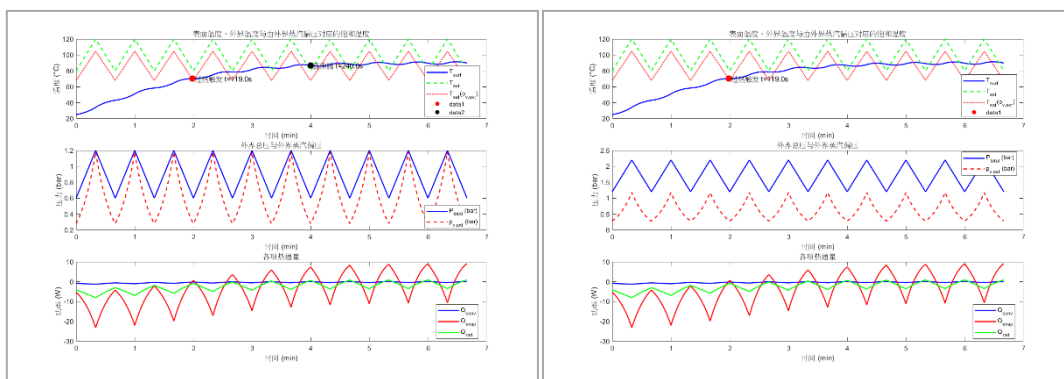


图 2：外部温度在 80°C-120°C 之间变动，压力分别取 1.2bar-2.2bar；0.6bar-1.2bar 两种情况下的温度、压力、热通量变化。

可以看到当压力范围为 0.6bar-1.2bar 时发生了实质性沸腾。而在最低压力为常压以上的组别中均未发生。

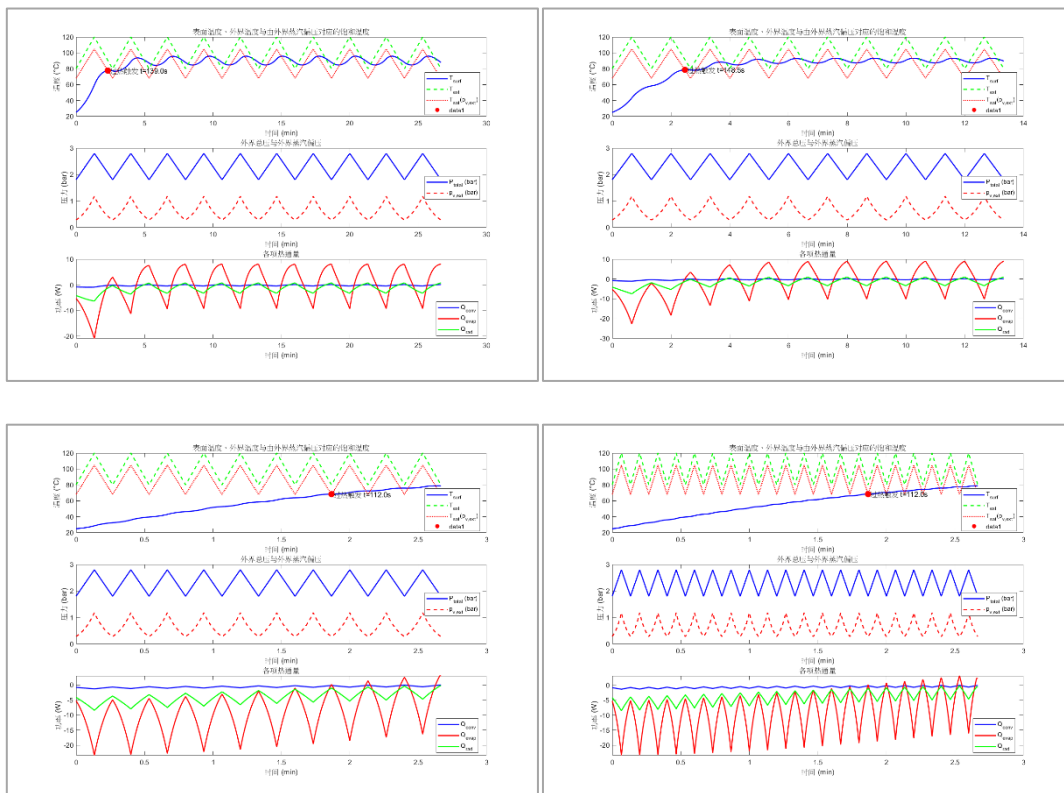


图 3：外部温度在 80°C-120°C 之间变动，外部压力在 1.8bar-2.8bar 之间变动，工况变动频率分别取 0.5s⁻¹；1s⁻¹；5s⁻¹；10s⁻¹ 四种情况下的温度、压力、热通量变化。

可以看到工况变动频率不会影响到是否发生过热或沸腾，只会影响到发生过热/沸腾的时间。频率越快，发生时间越早。类似地，调整空气湿度对于是否沸腾的影响也不大，但是可以显著影响到热点，如图 4 所示。

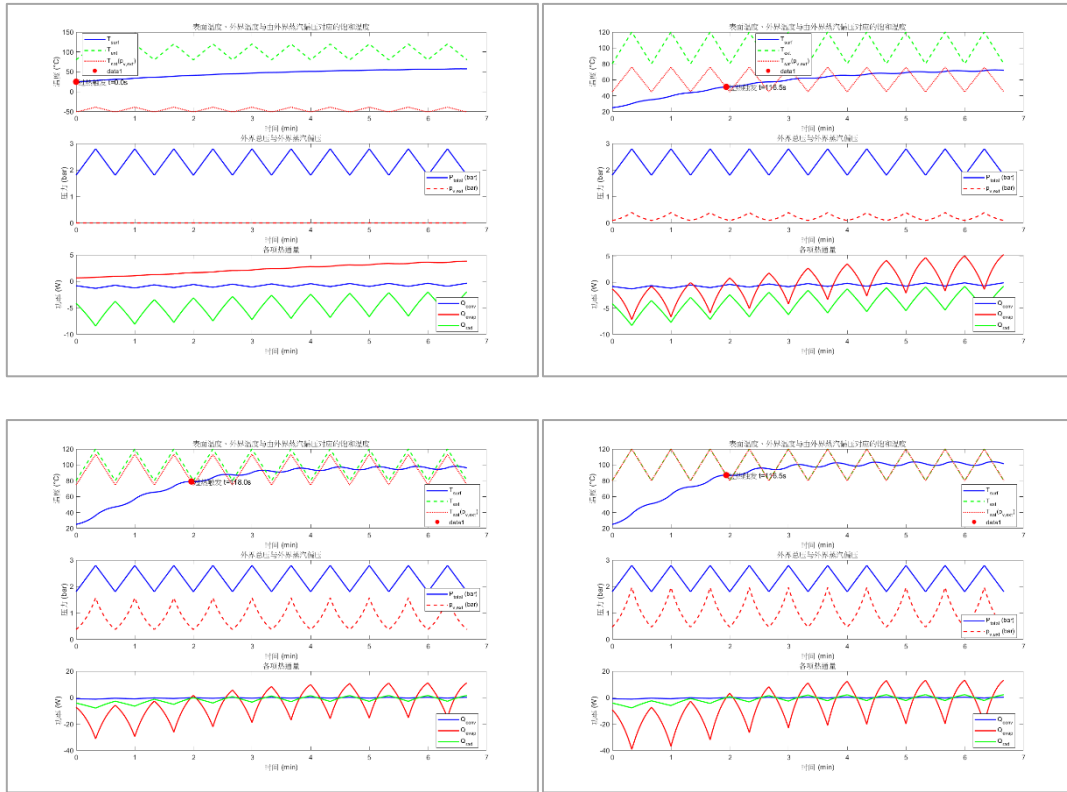


图 4: 外部温度在 80°C-120°C 之间变动, 外部压力在 1.8bar-2.8bar 之间变动, 湿度分别取 0.0001; 0.2; 0.8; 0.9999 四种情况下的温度、压力、热通量变化。

三、附录

a) Matlab 完整代码

```
% surface_evaporation_with_RH.m
% 在 80~120°C、总压 1.8~2.8 bar 条件下, 考虑相对湿度与外界温度变化速率
(2 °C/s)
% 输出: 表面温度、环境温度、各热通量、以及两类相变判定:
% (A) 局域过热判定: T_surf > T_sat(p_vapor_ext) (热力学上表面过热)
% (B) 真正沸腾判定: p_sat(T_surf) >= p_total (表面饱和和压达到外部总压)

clear; close all; clc;
% 常数
sigma = 5.670374419e-8;
epsilon = 0.95;
p_atm_ref = 101325; % 参考大气压 Pa
Tmin_C = 80; Tmax_C = 120; % 摄氏度范围
Tmin = Tmin_C + 273.15; Tmax = Tmax_C + 273.15; % K
Ptot_min_bar = 1.8; Ptot_max_bar = 2.8; % bar 总压范围
Ptot_min = Ptot_min_bar * p_atm_ref; Ptot_max = Ptot_max_bar *
p_atm_ref; % Pa
```



清华大学

Tsinghua University

School of Vehicle and Mobility
Electrochemistry Power Source Laboratory
30 Shuangqing Road
Haidian District, Beijing, China

```
RH = 0.6;
dTdt_ext = 2; % 外部温度变化速率
% 其他环境/表面参数
u_air = 0; % 风速 m/s
A = 0.01; % 表面面积 m^2
water_thickness = 1e-3; % m, 有效表面水层厚度
rho_w = 1000; cp_w = 4184; % 水性质
m = rho_w * water_thickness * A;
% 潜热与空气热容
L = 2.26e6; % J/kg
cp_air = 1005; % J/kg/K
% Bowen 常数关系
bowen_coeff = p_atm_ref * cp_air / (0.632 * L);
% beta 经验式与尺度
beta_base = @(Tsurf, Tex, u) max(1e-6, (22 + 12.5*u + 0.02*(Tsurf - Tex))); % 无量纲经验式
beta_scale = 1e-3;
alpha_from_beta = @(beta_val) bowen_coeff * beta_val; % alpha = Bowen * beta
% 初始表面温度
Tsurf0 = 298;
% 时间设置: 计算三角波周期
sweep_time_oneway = (Tmax_C - Tmin_C) / dTdt_ext; % s 单程时间
period = 2 * sweep_time_oneway;
t_end = period * 10; % 模拟时长
dt = 0.5; % 时间步长 s
time = 0:dt:t_end;
Nt = length(time);
%% ----- Antoine 系数 -----
% Antoine for water (valid approx 1~100+ C) - 以 mmHg 为单位
A_Ant = 8.07131; B_Ant = 1730.63; C_Ant = 233.426;
p_sat_from_T = @(T_K) (10.^(A_Ant - B_Ant./((T_K-273.15) + C_Ant))) * 133.322368; % Pa
Tsat_from_p = @(p_Pa) find_Tsat_from_p_fast(p_Pa, A_Ant, B_Ant, C_Ant);
%% ----- 预分配 -----
Tsurf = zeros(1,Nt); Tsurf(1) = Tsurf0;
Tex = zeros(1,Nt);
Ptot = zeros(1,Nt);
P_v_ext = zeros(1,Nt); % 外部实际蒸汽偏压 (由 RH * p_sat(Tex))
Psat_surf = zeros(1,Nt);
Tsat_fromP_vext=zeros(1,Nt); %由外部蒸汽偏压反算的饱和温度 (用于过热判定)
```



清华大学

Tsinghua University

School of Vehicle and Mobility
Electrochemistry Power Source Laboratory
30 Shuangqing Road
Haidian District, Beijing, China

```
Qconv = zeros(1,Nt); Qevap = zeros(1,Nt); Qrad = zeros(1,Nt);
boil_flag_by_pv = false(1,Nt); % Tsurf > Tsat(p_v_ext) (过热判定)
boil_flag_by_ptot = false(1,Nt); % p_sat(Tsurf) >= Ptot (真沸腾判定)
deltaT_boil_threshold = 5; % 可选: 若 Tsurf 超过对应 Tsat(pv) 超过阈值
则更可能核化 (°C)
%% ----- 外界温度与总压随时间 (三角波 Tex + 三角波 Ptot, 恒定 RH)
A_T = (Tmax - Tmin)/2;
O_T = (Tmax + Tmin)/2;
A_P = (Ptot_max - Ptot_min)/2;
O_P = (Ptot_max + Ptot_min)/2;
omega = 2*pi/period;
T0 = period;
for k = 1:Nt
    t = time(k);
    % 三角波周期相位 (0~1)
    phi = mod(t, T0) / T0;
    if phi < 0.5
        tri = 4*phi - 1;
    else
        tri = -4*phi + 3;
    end
    % ----- 外界温度 -----
    Tex(k) = A_T * tri + O_T;
    % ----- 外界总压 -----
    Ptot(k) = A_P * tri + O_P;
    % ----- 恒定相对湿度计算蒸汽偏压 -----
    P_v_ext(k) = RH * p_sat_from_T(Tex(k));
    % ----- 外界蒸汽偏压对应的饱和温度 -----
    Tsat_fromP_vext(k) = Tsat_from_p(P_v_ext(k));
end
%% ----- 时间积分 (显式欧拉) -----
for k = 1:Nt-1
    % 当前值
    T_e = Tex(k);
    p_v_ext = P_v_ext(k);
    p_tot = Ptot(k);
    Psat = p_sat_from_T(Tsurf(k)); % 表面饱和蒸汽压
    Psat_surf(k) = Psat;
    % beta / alpha
    beta_val = beta_base(Tsurf(k), T_e, u_air) * beta_scale;
    alpha_val = alpha_from_beta(beta_val); % W/(m2*K)
    % 通量 (正表示从表面失去的能量)
```



清华大学

Tsinghua University

School of Vehicle and Mobility
Electrochemistry Power Source Laboratory
30 Shuangqing Road
Haidian District, Beijing, China

```
Qconv(k) = alpha_val * (Tsurf(k) - T_e) * A;  
Qevap(k) = beta_val * (Psat - p_v_ext) * A; % 若 Psat > p_v_ext  
则为正 (潜热耗散)  
Qrad(k) = epsilon * sigma * (Tsurf(k)^4 - T_e^4) * A;  
Qout = Qconv(k) + Qevap(k) + Qrad(k);  
Qin = 0; % 可改为时间函数或底部热通量  
dTdt = (Qin - Qout) / (m * cp_w);  
Tsurf(k+1) = Tsurf(k) + dTdt * dt;  
% 判定逻辑  
% (A) 局域过热: 表面温度 vs 由外部蒸汽偏压对应的饱和温度  
Tsat_pvext = Tsat_fromP_vext(k);  
boil_flag_by_pv(k) = (Tsurf(k) > Tsat_pvext);  
% (B) 真实沸腾 (热力学条件): 表面饱和压 >= 外部总压  
boil_flag_by_ptot(k) = (Psat >= p_tot);  
end  
Psat_surf(end) = p_sat_from_T(Tsurf(end));  
Qconv(end)=Qconv(end-1); Qevap(end)=Qevap(end-1);  
Qrad(end)=Qrad(end-1);  
%% ----- 输出首次满足条件的时刻 -----  
idx_pv = find(boil_flag_by_pv,1,'first');  
idx_ptot = find(boil_flag_by_ptot,1,'first');  
if isempty(idx_pv)  
    fprintf('在模拟时段内未出现局域过热 (Tsurf > Tsat(p_v_ext))。 \n');  
else  
    fprintf('首次出现局域过热 (Tsurf > Tsat(p_v_ext)) 时间: t = %.2f s  
(%.3f h)\n', time(idx_pv), time(idx_pv)/3600);  
end  
if isempty(idx_ptot)  
    fprintf('在模拟时段内未出现 p_sat(Tsurf) >= P_total (未满足总压沸腾  
条件)。 \n');  
else  
    fprintf('首次满足热力学沸腾条件 (p_sat(Tsurf) >= P_total) 时间: t  
= %.2f s (%.3f h)\n', time(idx_ptot), time(idx_ptot)/3600);  
end  
%% ----- 绘图 -----  
figure('Position',[100 100 1000 700]);  
subplot(3,1,1);  
plot(time/60, Tsurf-273.15,'b-','LineWidth',1.5); hold on;  
plot(time/60, Tex-273.15,'g--','LineWidth',1.5);  
plot(time/60, Tsat_fromP_vext-273.15,'r:','LineWidth',1.5);  
xlabel('时间 (min)'); ylabel('温度 (°C)');  
legend('T_{surf}','T_{ext}','T_{sat}(p_{v,ext})','Location','best
```



清华大学

Tsinghua University

School of Vehicle and Mobility
Electrochemistry Power Source Laboratory
30 Shuangqing Road
Haidian District, Beijing, China

```
');  
title('表面温度、外界温度与由外界蒸汽偏压对应的饱和温度');  
subplot(3,1,2);  
plot(time/60, Ptot/p_atm_ref,'b-','LineWidth',1.5); hold on;  
plot(time/60, P_v_ext/p_atm_ref,'r--','LineWidth',1.5);  
ylabel('压力 (bar)'); xlabel('时间 (min)');  
legend('P_{total} (bar)', 'p_{v,ext} (bar)', 'Location', 'best');  
title('外界总压与外界蒸汽偏压');  
subplot(3,1,3);  
plot(time/60, Qconv,'b-','LineWidth',1.5); hold on;  
plot(time/60, Qevap,'r-','LineWidth',1.5);  
plot(time/60, Qrad,'g-','LineWidth',1.5);  
xlabel('时间 (min)'); ylabel('功率 (W)');  
legend('Q_{conv}', 'Q_{evap}', 'Q_{rad}', 'Location', 'best');  
title('各项热通量');  
if ~isempty(idx_pv)  
    subplot(3,1,1);  
    hold on;  
    scatter(time(idx_pv)/60, Tsurf(idx_pv)-273.15, 80, 'r',  
'filled');  
    text(time(idx_pv)/60, Tsurf(idx_pv)-273.15, sprintf(' 过热触发  
t=%.1fs',time(idx_pv)));  
end  
if ~isempty(idx_ptot)  
    subplot(3,1,1);  
    hold on;  
    scatter(time(idx_ptot)/60, Tsurf(idx_ptot)-273.15, 80, 'k',  
'filled');  
    text(time(idx_ptot)/60, Tsurf(idx_ptot)-273.15, sprintf(' 真沸  
腾 t=%.1fs',time(idx_ptot)));  
end  
function TsatK = find_Tsat_from_p_fast(p_Pa, A_Ant, B_Ant, C_Ant)  
    % 快速逆求: 给定 p (Pa), 返回 Tsat (K)  
    % 若 p 非物理解 (超高), 则钳位  
    if p_Pa <= 0  
        TsatK = 273.15; return;  
    end  
    p_mmHg = p_Pa / 133.322368;  
    % 使用简单的查表插值 (T 0~300C)  
    Tc = linspace(-50, 300, 10000); % C  
    pvals = 10.^(A_Ant - B_Ant./(Tc + C_Ant));  
    % 若 p_mmHg 超出范围, 做边界处理
```



清华大学

Tsinghua University

School of Vehicle and Mobility
Electrochemistry Power Source Laboratory
30 Shuangqing Road
Haidian District, Beijing, China

```
if p_mmHg < min(pvals)
    Tc_est = Tc(1);
elseif p_mmHg > max(pvals)
    Tc_est = Tc(end);
else
    Tc_est = interp1(pvals, Tc, p_mmHg, 'linear');
end
TsatK = Tc_est + 273.15;
end
```