

硼酸介稳区性质的研究

郑坤屹, 王 杰, 张金宇, 宁昭阳, 马 勇

临沂大学化学化工学院, 山东 临沂

收稿日期: 2025年2月28日; 录用日期: 2025年3月24日; 发布日期: 2025年4月2日

摘 要

本文主要研究了硼酸介稳区和结晶3D成核理论模型, 为考察不同杂质离子对硼酸介稳区的影响, 实验选取了2种典型杂质离子 Na^+ 、 Cl^- , 每种离子选取3个浓度(200 ppm、600 ppm和1000 ppm)。结果表明随着杂质离子含量的增加, 经修正后硼酸的成核级数也逐渐增大。 Na^+ 和 Cl^- 的对成核级数的影响大致相同。结晶3D成核理论模型的研究表明, 在纯硼酸溶液中, 随着饱和温度的提升, 其界面能 γ 逐渐降低, 而动力学因子 A 则呈现相反的变化趋势。而对于同一温度下的饱和硼酸溶液, 杂质离子的加入会使得界面能 γ 逐渐增大, 离子浓度越大, 界面能的增幅越大。

关键词

硼酸, 介稳区, 成核级数, 界面能

Study on the Properties of Boric Acid Metastable Zone

Kunyi Zheng, Jie Wang, Jinyu Zhang, Zhaoyang Ning, Yong Ma

School of Chemistry and Chemical Engineering, Linyi University, Linyi Shandong

Received: Feb. 28th, 2025; accepted: Mar. 24th, 2025; published: Apr. 2nd, 2025

Abstract

In this paper, the metastable zone of boric acid and the 3D nucleation theoretical model were investigated. To examine the effects of different impurity ions on the metastable zone of boric acid, two typical impurity ions (Na^+ and Cl^-) were selected for experimentation, each at three concentrations (200 ppm, 600 ppm, and 1000 ppm). The results demonstrate that as the impurity ion concentration increases, the corrected nucleation order of boric acid gradually rises. The influence of Na^+ and Cl^- on the nucleation order was found to be broadly similar. The study of the 3D nucleation theory model of crystallization shows that in pure boric acid solution, as the saturation temperature increases,

the interfacial energy γ gradually decreases, while the kinetic factor A shows the opposite trend of change. For saturated boric acid solutions at the same temperature, the addition of impurity ions leads to a gradual increase in interfacial energy (γ), with higher ion concentrations resulting in greater increments of interfacial energy.

Keywords

Boric Acid, Metastable Zone, Nucleation Order, Interfacial Energy

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

硼酸是一种重要的无机化工基础原料，在工业、农业、国防及科技领域有着广泛应用[1]。其中高品质硼酸被广泛应用在光学元件制造、核反应堆中子屏蔽、医药制剂生产、电子信息工业液晶面板制造等领域，其重要作用正在日益为人们所重视研究[2]-[4]。我国的硼矿资源较丰富，储量占世界的 11.7%，地质储量位居世界第 5 位，硼矿以硼镁矿为主，品位较低，提取工艺复杂，并且我国硼矿生产设备较为落后、生产效率低下，生产的产品品质较差，市场竞争力较弱[5] [6]。

国际上高端硼酸是由低品质硼酸净化而得，其中最有效的净化方法是结晶净化。结晶净化需要系统研究它所涉及的结晶动力学[7]，包括介稳区、诱导时间、成核动力学和生长动力学基础数据及体系模型化等基础内容[8]。本文主要涉及硼酸介稳区和结晶 3D 介稳区模型的研究，可为高端硼酸的产业化提供基础数据的支撑，为硼酸产品品质的提升提供理论指导和技术支持。

2. 实验部分

2.1. 实验试剂及仪器

实验试剂： H_3BO_3 ，99.5% (AR)，阿拉丁试剂公司；甘露醇，98%(AR)，麦克林试剂公司。

实验仪器：超级恒温水浴槽，C612 型，天津市仪器仪表有限公司；磁力搅拌器，MS-1A，博纳科技仪器有限公司；S212-1L 夹套结晶器，郑州予辉仪器有限公司；激光透射测量系统，633 型，南京激光仪器厂；50℃ 温度计；低温水浴槽，DYF-1/30 型，河南巩义市京华仪器有限公司。

2.2. 硼酸溶解度的测定

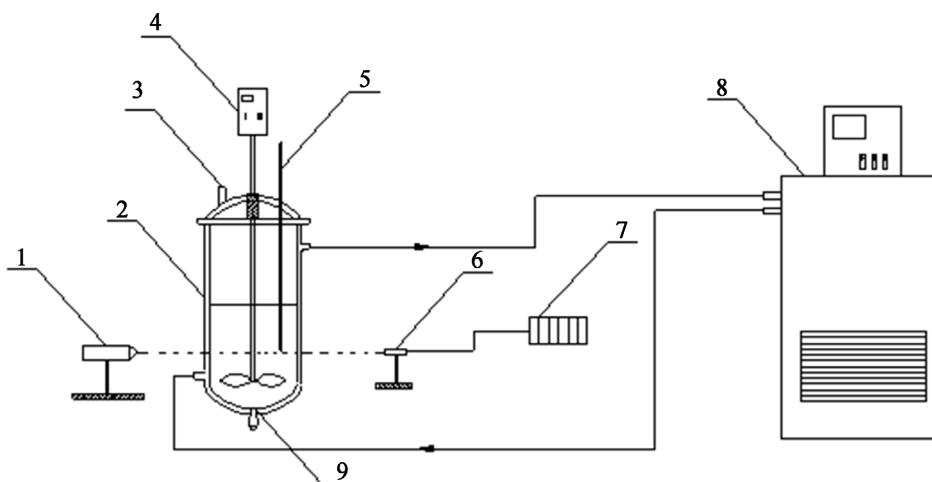
根据硼酸的已知溶解度，大致估算所需的硼酸和水的质量，确保硼酸过量。将配制好的晶浆(悬浮液含有大小不一的晶体颗粒)放在密闭带转子的玻璃瓶中，控制电磁搅拌速率为 500 r/min，在水浴槽中恒温至溶液中固液相平衡，恒温条件下连续搅拌 7 d。关闭转子开关，溶液在恒温水浴中静置 20 min 左右，用针筒取上清液分析浓度，即可得到该温度下硼酸的溶解度。

2.3. 硼酸介稳区的测定

本研究中采取激光透射法测量硼酸的介稳区宽度，实验装置见图 1，介稳区宽度(MZW)定义见公式(1)：

$$\Delta T_{\max} = t^* - t^n \quad (1)$$

这里是 t^* 平衡温度, t^n 代表成核温度即爆发结晶时对应的饱和溶液温度。



1. 激光发生器; 2. 结晶器; 3. 加料口 4. 搅拌器; 5. 温度计; 6. 激光信号接收器; 7. 信号显示器; 8. 低温冷却器; 9. 物料出口。

Figure 1. Measuring device for the width of the metastable zone

图 1. 介稳区宽度测量装置

3. 实验结果与讨论

3.1. 硼酸的介稳区

为考察不同杂质离子对硼酸介稳区的影响, 本实验选取了 2 种典型杂质离子 Na^+ 、 Cl^- , 每种离子选取 3 个浓度(200 ppm、600 ppm 和 1000 ppm), 加入硼酸饱和溶液中, 考察其对介稳区的影响。

饱和溶液以一恒定降温速率($-T$), 改变降温速率, 得到一系列介稳区宽度数值($\Delta T_{\max}$), 以浓度表示的过饱和度($\Delta C_{\max}$)和以温差表示的介稳区宽度关系为[9] [10]:

$$\Delta C_{\max} = \int_{T_1 - \Delta T_{\max}}^{T_1} \frac{dC_{eq}}{dT} dT \quad (2)$$

通常情况下介稳区宽度数值不大, 在此范围内浓度随温度的变化(dC_{eq}/dT)可以忽略, 上式可简化为:

$$\Delta C_{\max} = \left(\frac{dC_{eq}}{dT} \right)_T \Delta T_{\max} \quad (3)$$

假设在成核的时刻, 物质的成核速率等于溶液过饱和度的变化, 于是:

$$m_N = \left(\frac{dC_{eq}}{dT} \right) \cdot (-T) \quad (4)$$

结合上述各方程, 得到降温速率和介稳区宽度的关系:

$$\left(\frac{dC_{eq}}{dT} \right) \cdot (-T) = k_N \frac{dC_{eq}}{dT} \Delta T_{\max}^m \quad (5)$$

两边取对数饱和溶液以一恒定降温速率($-T$), 改变降温速率, 得到一系列介稳区宽度数值($\Delta T_{\max}$), 以浓度表示的过饱和度($\Delta C_{\max}$)和以温差表示的介稳区宽度关系为:

$$\Delta C_{\max} = \int_{T_1 - \Delta T_{\max}}^{T_1} \frac{dC_{eq}}{dT} dT \quad (6)$$

通常情况下介稳区宽度数值不大,在此范围内浓度随温度的变化(dC_{eq}/dT)可以忽略,上式可简化为:

$$\Delta C_{\max} = \left(\frac{dC_{eq}}{dT} \right)_T \Delta T_{\max} \quad (7)$$

假设在成核的时刻,物质的成核速率等于溶液过饱和度的变化,于是:

$$m_N = \left(\frac{dC_{eq}}{dT} \right) \cdot (-T) \quad (8)$$

结合上述各方程,得到降温速率和介稳区宽度的关系:

$$\left(\frac{dC_{eq}}{dT} \right) \cdot (-T) = k_N \frac{dC_{eq}}{dT} \Delta T_{\max}^m \quad (9)$$

两边取对数,整理可得独立变量 $\log(-T)$ 和 $\log(\Delta T_{\max})$ 的关系:

$$\log \Delta T_{\max} = \frac{1-m}{m} \log \left(\frac{dC_{eq}}{dT} \right) - \frac{\log K_N}{m} + \frac{1}{m} \log(-T) \quad (10)$$

由上式可知, $\log \Delta T_{\max}$ 和 $\log(-T)$ 存在线性关系:

$$Y = A + BX \quad (11)$$

这里, $X = \log(-T)$, $Y = \log \Delta T_{\max}$, $A = \frac{1-m}{m} \log \left(\frac{dC_{eq}}{dT} \right)$ 。表观成核级数 m 可由下述关系导出:

$$m = \frac{1}{B} \quad (12)$$

方程中直线的斜率为表观成核级数,图中各条直线应该是完全平行的关系。然而,由于实验过程中不可避免的测量误差及其他操作者等诸多原因的关系,实际情况中直线的斜率并不完全保持平行一致。对于这种情况,可以用下述方程修正上述实验的斜率数据:

$$B = \frac{\sum_{j=1}^p \left[\sum_i x_i y_i - \sum_i x_i / N_j \cdot \sum_i y_i \right]_j}{\sum_{j=1}^p \left[\sum_i x_i^2 - \left(\sum_i x_i \right)^2 / N_j \right]_j} \quad (13)$$

这里 $x_i = \log(-T_i)$, $y_i = \log(\Delta T_{\max})_i$, p 代表直线的条数, N_j 表示第 j 条直线上的实验次数^[11]。

不同饱和温度下硼酸溶液的介稳区宽度见图 2。可以看到随着饱和温度的提高,介稳区宽度逐渐变大;同一饱和温度下,降温速率越快,介稳区宽度越宽。

对图 2 的数据拟合成直线,所得斜率和成核级数见表 1。

为考察不同杂质离子对硼酸介稳区的影响,本实验选取了两种典型杂质离子 Na^+ 、 Cl^- , 每种离子选取 3 个浓度(200 ppm、600 ppm 和 1000 ppm), 加入硼酸饱和溶液中, 考察其对介稳区的影响。结果见图 3 和图 4, 对图中的数据拟合成直线, 所得斜率和成核级数见表 2~3。

从表中数据对照可看到, 随着杂质离子含量的增加, 经公式(13)修正后硼酸的成核级数也逐渐增大。 Na^+ 和 Cl^- 的对成核级数的影响大致相同。

杂质离子可以使介稳区宽度变大的事实已经有了普遍的共识。通常的观点认为，杂质离子吸附在结晶产物的表面，其结果导致提高了结晶产物析出的能级，使得结晶所需的能量壁垒加大。和无杂质离子的条件相比，此时结晶成核需要更大的推动力，才能使得结晶过程得以实现。杂质离子含量越高，吸附于晶胞上的离子也就越多，晶胞长大至肉眼可见的晶粒需要克服的能量壁垒越高，于是介稳区宽度相应增大。

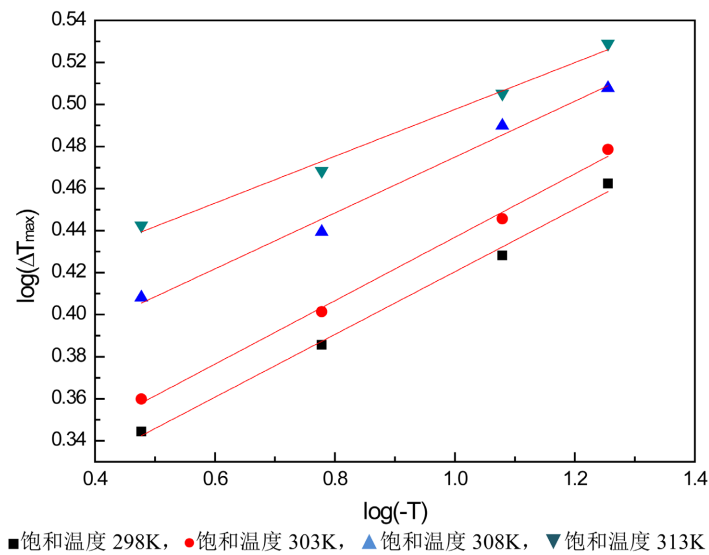


Figure 2. Relationship between the rate of temperature drop at different saturation temperatures and the metastable zone of boric acid

图 2. 不同饱和温度下降温速率与硼酸介稳区关系图

Table 1. The fitting equations and parameters of the boric acid metastable zone

硼酸饱和温度/K	拟合方程	<i>B</i>	<i>A</i>	成核级数	修正
298	$y = 0.1486x + 0.2909$	0.1486	0.2909	6.73	7.55
303	$y = 0.1533x + 0.3029$	0.1533	0.3029	6.52	
308	$y = 0.1282x + 0.3625$	0.1282	0.3625	7.80	
313	$y = 0.1088x + 0.4060$	0.1088	0.4060	9.19	

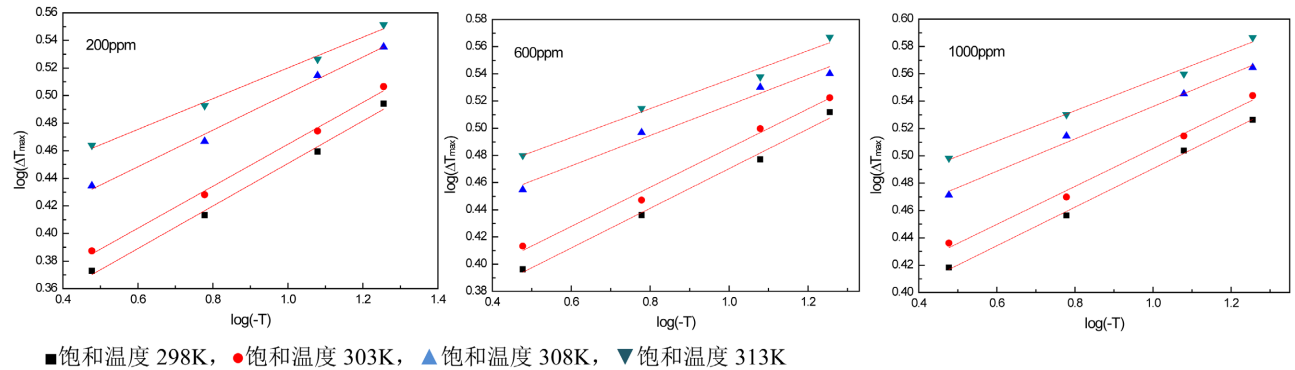


Figure 3. Effects of Cl⁻/200 ppm, 600 ppm, and 1000 ppm on the metastable zone of boric acid

图 3. Cl⁻/200 ppm、600 ppm、1000 ppm 对硼酸介稳区的影响

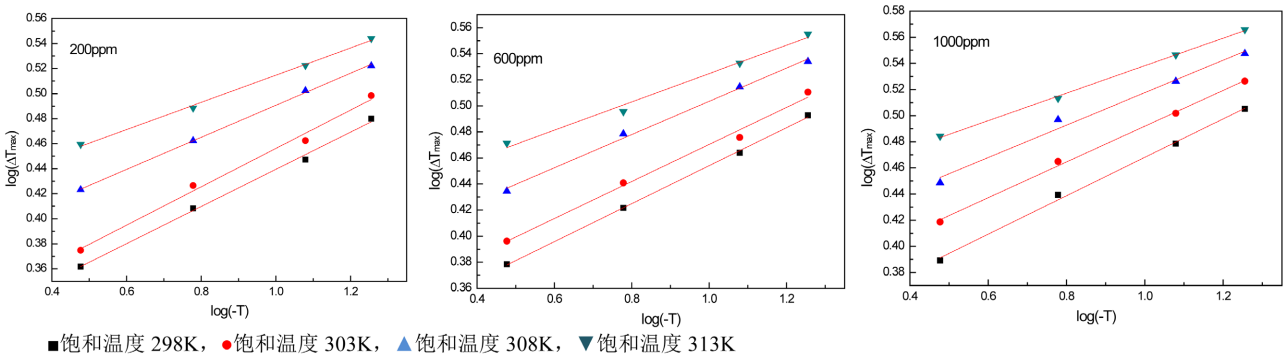


Figure 4. Effects of Na⁺/200 ppm, 600 ppm, and 1000 ppm on the metastable region of boric acid
图 4. Na⁺/200 ppm、600 ppm、1000 ppm 对硼酸介稳区的影响

Table 2. The statistical table of boric acid fitting equation and nucleation series at different concentrations of Na⁺
表 2. 不同 Na⁺浓度下硼酸拟合方程和成核级数统计表

饱和温度/Na ⁺ 浓度	成核方程	<i>B</i>	<i>A</i>	成核级数	修正
298K/200 ppm	$y = 0.1493x + 0.2712$	0.1493	0.2712	6.70	7.46
303K/200 ppm	$y = 0.1509x + 0.2859$	0.1509	0.2859	6.63	
308K/200 ppm	$y = 0.1329x + 0.3420$	0.1329	0.3420	7.52	
313K/200 ppm	$y = 0.1115x + 0.3862$	0.1115	0.3862	8.97	
298K/600 ppm	$y = 0.1458x + 0.3083$	0.1458	0.3083	6.86	7.75
303K/600 ppm	$y = 0.1421x + 0.3283$	0.1421	0.3283	7.04	
308K/600 ppm	$y = 0.1276x + 0.3760$	0.1276	0.3760	7.84	
313K/600 ppm	$y = 0.1087x + 0.4161$	0.1087	0.4161	9.20	
298K/1000 ppm	$y = 0.1493x + 0.2712$	0.1471	0.3211	6.80	7.92
303K/1000 ppm	$y = 0.1509x + 0.2859$	0.1369	0.3551	7.30	
308K/1000 ppm	$y = 0.1329x + 0.3420$	0.1242	0.3934	8.05	
313K/1000 ppm	$y = 0.1115x + 0.3862$	0.1053	0.4330	9.50	

Table 3. The statistical table of boric acid fitting equation and nucleation series at different concentrations of Cl⁻
表 3. 不同 Cl⁻浓度下硼酸拟合方程和成核级数统计表

饱和温度/Cl ⁻ 浓度	成核方程	<i>B</i>	<i>A</i>	成核级数	修正
298K/200 ppm	$y = 0.1542x + 0.2965$	0.1542	0.2965	6.49	7.39
303K/200 ppm	$y = 0.1521x + 0.3125$	0.1521	0.3125	6.57	
308K/200 ppm	$y = 0.1328x + 0.3687$	0.1328	0.3687	7.53	
313K/200 ppm	$y = 0.1115x + 0.4086$	0.1115	0.4086	8.97	
298K/600 ppm	$y = 0.1459x + 0.3245$	0.1459	0.3245	6.85	8.04
303K/600 ppm	$y = 0.1441x + 0.3413$	0.1441	0.3413	6.94	
308K/600 ppm	$y = 0.1115x + 0.4055$	0.1115	0.4055	8.97	
313K/600 ppm	$y = 0.1066x + 0.4292$	0.1066	0.4292	9.38	
298K/1000 ppm	$y = 0.1411x + 0.3496$	0.1411	0.3496	7.09	7.95

续表

303K/1000 ppm	$y = 0.1388x + 0.3666$	0.1388	0.3666	7.20
308K/1000 ppm	$y = 0.1185x + 0.4176$	0.1185	0.4176	8.44
313K/1000 ppm	$y = 0.1108x + 0.4444$	0.1108	0.4444	9.03

3.2. 硼酸的 3D 介稳区模型

与 Nývlt 方程理论相比, 三维(3D)成核理论模型(K. Sangwal)用三维立体核形成速率替代经验成核速率方程, 这使得该理论方程中的参数都具有明确的物理意义[11]。

通过三维成核理论, 成核速率 J 与过饱和度比($\ln S_{\max}$)间具有如下关系:

$$J = A \exp \left(\frac{-16\pi\gamma^3 V^2}{3k_B^3 T_{lim}^3 \ln^2 S} \right) \quad (14)$$

其中指前因子 A 是与成核相关的动力学参数, 其值大小与成核介质有关; γ 是固-液界面能; V 是分子体积; k_B 是玻尔兹曼常数, 其值约为 1.3806×10^{-23} J/K; T_{lim} 是成核温度; S 是在初级成核发生时的过饱和度比。通过溶液理论, 将过饱和度比 $S_{\max}$ 与最大过冷度间 $\Delta T_{\max}$ 的关系式代入上式, 可得下式:

$$J = f \frac{\Delta c_{\max}}{c_{lim} \Delta t} = f \frac{\Delta c_{\max}}{c_{lim} \Delta T \Delta t} = f \left(\frac{\Delta_{dis} H}{R_G T_{lim}} \right) \left(\frac{R}{T_0} \right) \quad (15)$$

联立两式可得:

$$J = A \exp \left[\frac{-16\pi\gamma^3 V^2}{3k_B^3 T_{lim}^2} \left(\frac{R_G T_{lim}}{\Delta_{dis} H} \right)^2 \left(\frac{T_0}{\Delta T_{\max}} \right)^2 \right] \quad (16)$$

综合上述式子, 可得三维成核理论方程:

$$A \exp \left[\frac{-16\pi\gamma^3 V^2}{3k_B^3 T_{lim}^2} \left(\frac{R_G T_{lim}}{\Delta_{dis} H} \right)^2 \left(\frac{T_0}{\Delta T_{\max}} \right)^2 \right] = f \left(\frac{\Delta_{dis} H}{R_G T_{lim}} \right) \left(\frac{R}{T_0} \right) \quad (17)$$

为进一步简化, 将上式两边取对数:

$$\left(\frac{T_0}{\Delta T_{\max}} \right)^2 = F + F_1 (1 - Z \ln R) \quad (18)$$

$$\text{其中: } F = \frac{1}{B} \left(\frac{\Delta_{dis} H}{R_G T_{lim}} \right)^2, \quad B = \frac{16\pi}{3} \left(\frac{\gamma V^{2/3}}{k_B T_{lim}} \right)^3, \quad Z = \frac{F_1}{F} = \ln \left(\frac{f}{A T_0} \frac{\Delta H_s}{R_G T_{lim}} \right)$$

由公式(18)可知, $(T_0/\Delta T_{\max})^2$ 和 $\ln R$ 呈线性关系, 通过斜率 F_1 和截距 F , 可分别求出固-液体、界面能 γ , 动力学因子 A 及相关参数[12]。

对硼酸介稳区数据按上述方法处理, 可得图 5 和表 4。

为考察不同杂质离子对硼酸介稳区的影响, 本实验选取了两种杂质离子 Na^+ 、 Cl^- , 每种离子选取 3 个浓度(200 ppm、600 ppm 和 1000 ppm), 加入硼酸饱和溶液中, 考察其对 3D 介稳区模型的影响。结果见图 6 和图 7, 对图中的数据拟合成直线, 所得拟合方程及参数见表 5 和表 6。

从表 4~6 的对照可以看到, 在纯硼酸溶液中, 随着饱和温度的提升, 其界面能 γ 逐渐降低, 而动力学因子 A 则呈现相反的变化趋势。而对于同一温度下的饱和硼酸溶液, 杂质离子的加入会使得界面能 γ 逐渐增大, 离子浓度越大, 界面能的增幅越大。动力学因子 A 则大致呈现相反的变化趋势, 即随着杂质

离子的添加，其值会变小。

温度升高时，液体固体分子间引力减小，作为界面两相的差异缩小，所以界面能降低。同时高饱和温度加速了离子运动，加剧了离子碰撞频率和促进成核。可以设想，随着温度升到临界温度时，界面能将变为零(界面消失)。

Table 4. The fitting equations and parameters of boric acid 3D metastable region
表 4. 硼酸 3D 介稳区拟合方程及参数

饱和温度/K	拟合方程	F_1	F	界面能 γ	A
298	$y = -2358x + 15434$	-2358	15,434	2110.59	5.207×10^{23}
303	$y = -3085x + 17902$	-3085	17,902	1919.54	1.130×10^{24}
308	$y = -4088x + 21921$	-4088	21,921	1738.59	1.812×10^{24}
313	$y = -4208x + 22732$	-4208	22,732	1712.50	1.800×10^{24}

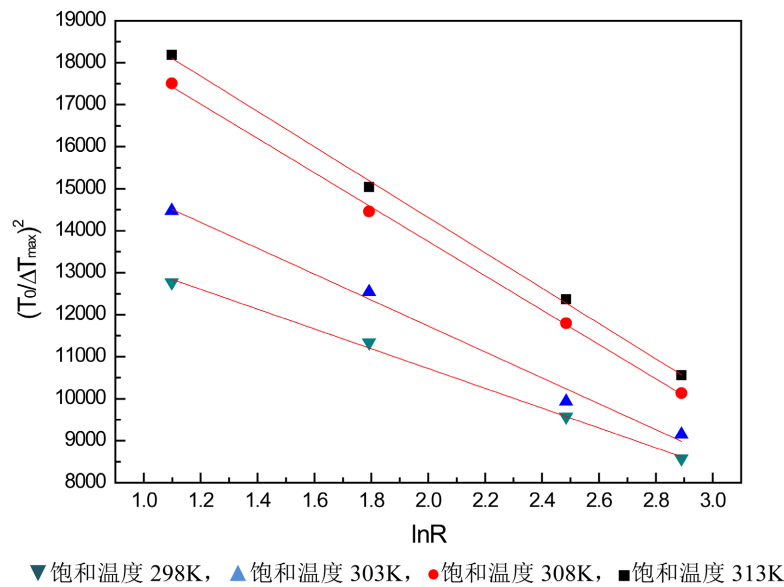


Figure 5. Relationship between $(T_0/\Delta T_{\max})^2$ and $\ln R$ at different saturation temperatures of boric acid
图 5. 不同硼酸饱和温度下 $(T_0/\Delta T_{\max})^2$ 与 $\ln R$ 关系图

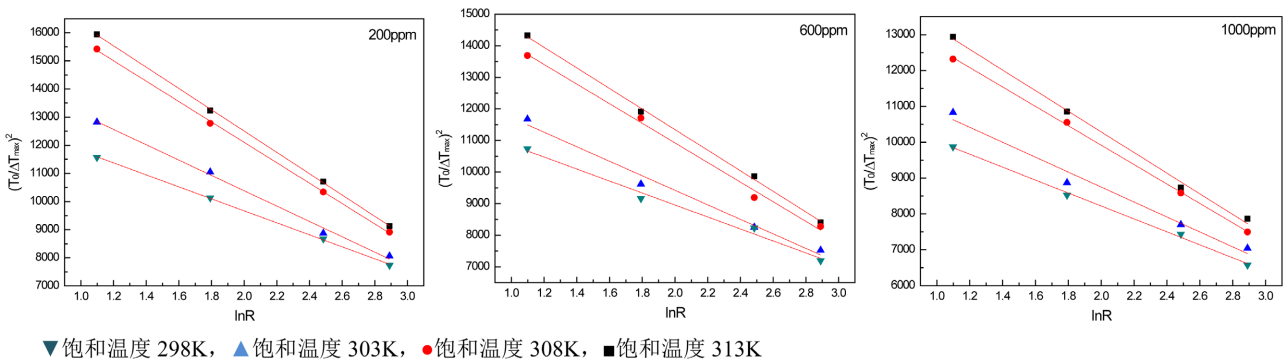


Figure 6. Effects of Cl^- /200 ppm, 600 ppm, and 1000 ppm on the 3D metastable zone model of boric acid
图 6. Cl^- /200 ppm、600 ppm、1000 ppm 对硼酸 3D 介稳区模型的影响

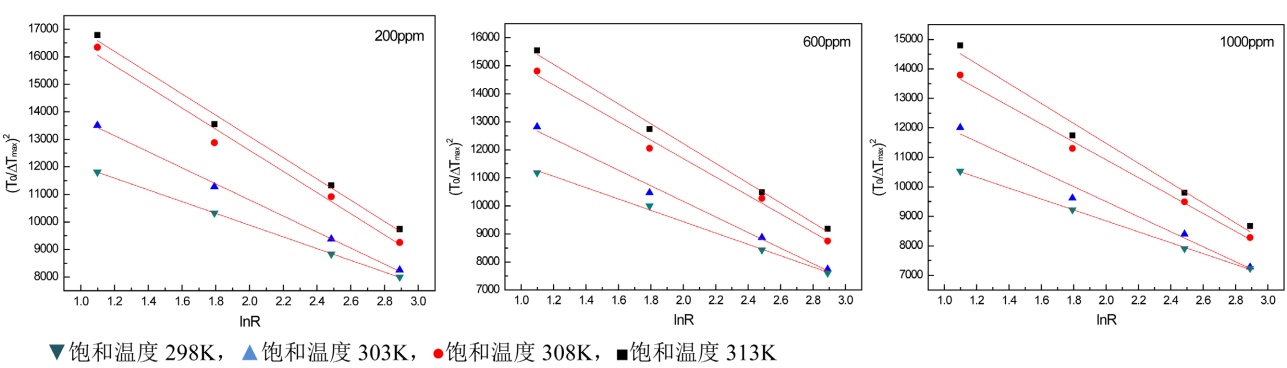


Figure 7. Effects of Na⁺/200 ppm, 600 ppm, and 1000 ppm on the 3D metastable zone model of boric acid
图 7. Na⁺/200 ppm、600 ppm、1000 ppm 对硼酸 3D 介稳区模型的影响

Table 5. The statistical table of the fitting equation of boric acid 3D metastable zone model under different Na⁺ concentrations
表 5. 不同 Na⁺浓度下硼酸 3D 介稳区模型拟合方程统计表

饱和温度/Na ⁺ 浓度	拟合方程	F_1	F	界面能 γ	A
298K/200 ppm	$y = -2133x + 14151$	-2133	14,151	2182.03	4.766×10^{23}
303K/200 ppm	$y = -2917x + 16635$	-2917	16,635	1955.51	1.249×10^{24}
308K/200 ppm	$y = -3839x + 20281$	-3839	20,281	1775.18	1.962×10^{24}
313K/200 ppm	$y = -3861x + 20829$	-3861	20,829	1762.10	1.814×10^{24}
298K/600 ppm	$y = -2025x + 13487$	-2025	13,487	2219.96	4.645×10^{23}
303K/600 ppm	$y = -2782x + 15726$	-2782	15,726	1986.45	1.313×10^{24}
308K/600 ppm	$y = -3289x + 18265$	-3289	18,265	1868.89	1.498×10^{24}
313K/600 ppm	$y = -3532x + 19288$	-3532	19,288	1814.97	1.698×10^{24}
298K/1000 ppm	$y = -1851x + 12548$	-1851	12,548	2287.18	4.126×10^{23}
303K/1000 ppm	$y = -2548x + 14595$	-2548	14,595	2045.29	1.218×10^{24}
308K/1000 ppm	$y = -3032x + 16983$	-3032	16,983	1919.80	1.431×10^{24}
313K/1000 ppm	$y = -3374x + 18224$	-3374	18,224	1842.66	1.803×10^{24}

Table 6. The statistical table of fitting equations for boric acid 3D metastable zone model at different Cl⁻ concentrations
表 6. 不同 Cl⁻浓度下硼酸 3D 介稳区模型拟合方程统计表

饱和温度/Cl ⁻ 浓度	拟合方程	F_1	F	界面能 γ	A
298K/200 ppm	$y = -2132x + 13931$	-2132	13,931	2182.30	5.268×10^{24}
303K/200 ppm	$y = -2726x + 15836$	-2726	15,836	1999.96	1.123×10^{24}
308K/200 ppm	$y = -3626x + 19356$	-3626	19,356	1808.95	1.860×10^{24}
313K/200 ppm	$y = -3788x + 20081$	-3788	20,081	1773.19	1.992×10^{24}
298K/600 ppm	$y = -1897x + 12752$	-1897	12,752	2268.72	4.366×10^{24}
303K/600 ppm	$y = -2298x + 14020$	-2298	14,020	2116.85	8.393×10^{24}
308K/600 ppm	$y = -3104x + 17132$	-3104	17,132	1904.94	1.550×10^{24}
313K/600 ppm	$y = -3257x + 17858$	-3257	17,858	1864.49	1.662×10^{24}
298K/1000 ppm	$y = -1805x + 11831$	-1805	11,831	2306.18	5.166×10^{24}

续表

303K/1000 ppm	$y = -2084x + 12918$	-2084	12,918	2186.67	7.614×10^{24}
308K/1000 ppm	$y = -2877x + 16042$	-2877	16,042	1942.79	1.515×10^{24}
313K/1000 ppm	$y = -2707x + 15330$	-2707	15,330	1993.61	1.343×10^{24}

4. 结论

不同饱和温度下硼酸溶液的介稳区宽度不同,随着饱和温度的提高,介稳区宽度逐渐变大;同一饱和温度下,降温速率越快,介稳区宽度越宽,经修正后硼酸的成核级数为 7.55。随着杂质离子含量的增加,硼酸的成核级数也逐渐增大。 Na^+ 和 Cl^- 的对成核级数的影响大致相同。

在纯硼酸溶液中,随着饱和温度的提升,其界面能 γ 逐渐降低,而动力学因子 A 则呈现相反的变化趋势。而对于同一温度下的饱和硼酸溶液,杂质离子的加入会使得界面能 γ 逐渐增大,离子浓度越大,界面能的增幅越大。动力学因子 A 则大致呈现相反的变化趋势,即随着杂质离子的添加,其值会变小。

基金项目

临沂大学大学生创新创业训练项目(X202410452551)。

参考文献

- [1] Shlepkin, A.S., Sakhipgareev, A.R. and Morozov, A.V. (2019) Experimental Modelling of Boric Acid Crystallization Process during Emergency Core Cooling of NPP with WWER. *Journal of Physics: Conference Series*, **1382**, Article 012138. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1382/1/012138>
- [2] Jia, F., Li, J. and Wang, J. (2017) Recovery of Boric Acid from the Simulated Radioactive Wastewater by Vacuum Membrane Distillation Crystallization. *Annals of Nuclear Energy*, **110**, 1148-1155. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2017.07.024>
- [3] Darehkordi, A., Hosseini, M. and Rahmani, F. (2019) Convenient Synthesis of New Boric Acid Catalyzed 1,2,4-Triazolopyridinone Derivatives and an Investigation of Their Optical Properties. *Journal of Heterocyclic Chemistry*, **56**, 1306-1311. <https://doi.org/10.1002/jhet.3501>
- [4] Rajan, V.R. (2016) Development of Analytical Method by RP-HPLC Technique for Simultaneous Determination of Boric Acid and Chlorphenesin in Medicinal Powder. *Der Pharmacia Lettre*, **8**, 215-220.
- [5] Filippov, A., Antzutkin, O.N. and Shah, F.U. (2019) Understanding the Interaction of Boric Acid and CO_2 with Ionic Liquids in Aqueous Medium by Multinuclear NMR Spectroscopy. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, **8**, 552-560. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.9b06068>
- [6] 龚殿婷. 高纯硼酸的制备及制备过程中影响因素研究[D]: [博士学位论文]. 沈阳: 东北大学, 2008.
- [7] 刘天雨. 富集 10B 硼酸制备工艺的优化[D]: [博士学位论文]. 天津: 天津大学, 2017.
- [8] Peng, J., Dong, Y., Nie, Z., Kong, F., Meng, Q. and Li, W. (2012) Solubility and Metastable Zone Width Measurement of Borax Decahydrate in Potassium Chloride Solution. *Journal of Chemical & Engineering Data*, **57**, 890-895. <https://doi.org/10.1021/jc201073e>
- [9] Chen, J., Peng, J., Wang, X., Dong, Y. and Li, W. (2019) Effects of CO_3^{2-} and OH^- on the Solubility, Metastable Zone Width and Nucleation Kinetics of Borax Decahydrate. *Royal Society Open Science*, **6**, Article 181862. <https://doi.org/10.1098/rsos.181862>
- [10] Nývlt, J. (1985) The Kinetics of Industrial Crystallization. Elsevier, 50-65.
- [11] Sangwal, K. (2009) Novel Approach to Analyze Metastable Zone Width Determined by the Polythermal Method: Physical Interpretation of Various Parameters. *Crystal Growth & Design*, **9**, 942-950. <https://doi.org/10.1021/cg800704y>
- [12] 陈婧. 富硼碳酸盐卤水中碳酸盐分析及硼酸盐介稳区性质研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国科学院大学, 2020.