

热力学模型研究 $\text{KNO}_3\text{-K}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}$ 和 $\text{KNO}_3\text{-KCl-H}_2\text{O}$ 体系溶解度

尹 霞* 吴玉双 汪 琼
(湖南大学化学化工学院, 长沙 410082)

摘要: 用 Pitzer-Simonson-Clegg 热力学模型(PSC 模型), 分别拟合 $\text{KCl-H}_2\text{O}$ 、 $\text{K}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}$ 、 $\text{KNO}_3\text{-H}_2\text{O}$ 体系以及 $\text{KNO}_3\text{-K}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}$ 和 $\text{KNO}_3\text{-KCl-H}_2\text{O}$ 体系水活度和溶解度实验数据, 得到二元参数和三元离子相互作用参数, 并以此计算 3 个二元盐水体系溶解度相图, 及 2 个三元盐水体系在不同温度下的溶解度, 结果表明计算值与实验值一致。

关键词: 热力学模型; 溶解度; $\text{KNO}_3\text{-K}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}$ 体系; $\text{KNO}_3\text{-KCl-H}_2\text{O}$ 体系; 水活度

中图分类号: O642.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4861(2011)01-0073-06

Solubility Prediction of System $\text{KNO}_3\text{-K}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}$ and $\text{KNO}_3\text{-KCl-H}_2\text{O}$ Using Thermodynamic Model

YIN Xia* WU Yu-Shuang WANG Qiong
(College of Chemistry and Chemical Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: The solubilities of the $\text{KNO}_3\text{-K}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}$ and $\text{KNO}_3\text{-KCl-H}_2\text{O}$ systems was predicted over a wide range of temperature by using Pitzer-Simonson-Clegg (PSC) model. The experimental water activity and experimental solubility in the binary $\text{KCl-H}_2\text{O}$, $\text{K}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}$, $\text{KNO}_3\text{-H}_2\text{O}$ and ternary $\text{KNO}_3\text{-K}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}$ and $\text{KNO}_3\text{-KCl-H}_2\text{O}$ system were used to obtain the model parameters. Then the solubilities in the two ternary systems were predicted and compared with the experimental data. It showed that the model values are credible.

Key words: thermodynamic model; solubility; $\text{KNO}_3\text{-K}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}$ system; $\text{KNO}_3\text{-KCl-H}_2\text{O}$ system; water activity

0 引 言

对混合电解质水溶液热力学性质的研究方法有很多, 如溶液水活度的测定^[1-2], 溶解度测定, 饱和蒸汽压的测定^[3-4]等, 但实验方法一般都较为耗时且繁琐, 尤其是非室温下电解质溶液的实验数据比较缺乏。若能利用预测能力较强的热力学模型拟合相关体系有限的实验数据, 从而得到模型参数, 即可预测计算盐水体系溶解度多温相图。若模型的预测能力强, 且用于拟合参数的实验数据准确, 则用此法易于获得较为可靠的热力学数据, 这些数据对生产实践具有重要的理论指导意义。

1 模型方法

我们已就国内外广泛应用的几种热力学模型对二元盐水体系性质的预测进行比较研究^[5], 结果表明 Pitzer-Simonson-Clegg 热力学模型(PSC 模型)和 BET 模型^[6-7]对电解质溶液均具有很强的预测能力, BET 模型主要适用于描述并预测高浓电解质盐水体系的热力学性质, 不适用于溶解性较低盐水体系。而 KNO_3 、 KCl 和 K_2SO_4 的溶解度相对于 CaCl_2 、 LiNO_3 和 LiCl 等高浓电解质而言并不算大。因此本文选用 PSC 模型用于 $\text{KNO}_3\text{-K}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}$ 和 $\text{KNO}_3\text{-KCl-H}_2\text{O}$ 体系溶解度的预测, 以此验证该模型的预测能力。目前

收稿日期: 2010-06-21。收修改稿日期: 2010-08-17。

湖南大学“中央高校基本科研业务费”资助项目。

*通讯联系人。E-mail: yinxia0405@yahoo.com.cn

未有人用热力学模型对这两个体系进行相图预测的研究。

为准确描述电解质溶液的热力学性质, Pitzer 和 Simonson^[8-9]在 1986 年提出了一个用于计算对称电解质溶液由稀到浓的热力学性质的方程, Clegg 和 Pitzer^[10-11]于 1992 年在此基础上, 对方程进行了修正, 提高了模型的精度, 并以此式计算多个三元体系在 298.15 K 时的溶解度, 发现计算值与实验值一致。

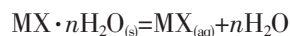
目前 PSC 方程关于不对称的三元体系 MXMYH_2O 活度系数的基本形式如下:

$$\ln f_i = f(I, B_{\text{MX}}, B^1_{\text{MX}}, W_{1,\text{MX}}, U_{1,\text{MX}}, V_{1,\text{MX}}, W_{ijk}, Q_{1,ijk}, U_{ijk}) \quad (1)$$

其中 I 是以质量物质的量浓度为基础的离子强度, $B_{\text{MX}}, B^1_{\text{MX}}, W_{1,\text{MX}}, U_{1,\text{MX}}, V_{1,\text{MX}}$ 为二元模型参数, $W_{ijk}, Q_{1,ijk}, U_{ijk}$ 为三元相互作用参数。对于 $\text{KNO}_3\text{-K}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}$ 和 $\text{KNO}_3\text{-KCl-H}_2\text{O}$ 体系, 我们利用文献报道的热力学数据(水活度, 渗透系数或溶解度等), 结合 PSC 方程, 采用最小二乘法计算得到不同温度下的各参数。参数与温度 $T(\text{K})$ 的关系式可表达为:

$$A = a + bT (A = B_{\text{MX}}, W_{1,\text{MX}}, U_{1,\text{MX}}, V_{1,\text{MX}}, W_{ijk}, Q_{1,ijk}, U_{ijk}) \quad (2)$$

对任一给定的盐 $\text{MX} \cdot n\text{H}_2\text{O}_{(\text{s})}$, 其溶解平衡可表示为:



达到平衡时, 溶度积常数 $K_{\text{MX}(\text{aq})} \cdot n_{\text{H}_2\text{O}}$ 可表达为:

$$\ln K_{\text{MX} \cdot n\text{H}_2\text{O}} = \ln(a_{\text{MX}_{(\text{aq})}} a_{\text{H}_2\text{O}}^n)$$

$a_{\text{MX}}, a_{\text{H}_2\text{O}}$ 分别为盐 MX 和水的活度。我们利用二元参数和二元溶解度数据可计算出不同温度下的 $K_{\text{MX} \cdot n\text{H}_2\text{O}}$, 并将其与温度的关系式拟合为:

$$\ln K_{\text{MX} \cdot n\text{H}_2\text{O}} = A + B/T + CT + D \ln T \quad (3)$$

结合模型的二元和三元参数以及不同温度下的 $K_{\text{MX} \cdot n\text{H}_2\text{O}}$, 即可计算三元体系的多温溶解度相图。

2 溶解度的计算

2.1 二元溶解度的计算

$\text{KCl-H}_2\text{O}$ 体系的二元参数通过拟合 Holmes^[12]等给出的在 298.15 和 423.15 K 时的渗透系数得到, 参数与温度之间的关系式见表 1。用此参数分别计算不同温度下的水活度, 并与实验值对比(见表 2), 发现计算值与实验值平均偏差小于 0.001。利用 $\text{KCl-H}_2\text{O}$ 体系溶解度^[13], 计算不同温度下的 $\ln K, \ln K$ 与温度 $T(\text{K})$ 的关系式见表 5。

表 1 PSC 模型的二元参数

Table 1 Binary parameters of PSC model

Electrolyte	$B_{\text{MX}} = a + b \cdot T$		$W_{\text{MX}} = c + d \cdot T$		$U_{\text{MX}} = e + f \cdot T$		$V_{\text{MX}} = g + h \cdot T$		Reference
	a	b	c	d	e	f	g	h	
KCl	-106.678 19	0.379 91	-4.577 38	0.004 68	-5.762 09	0.011 79	0	0	[12]
K_2SO_4	-211.006 12	0.707 72	116.497 67	-0.389 96	215.278 7	-0.716 11	-115.398 32	0.378 26	[17-18]
KNO_3	-199.101	0.640 54	1.3114 9	-0.002 95	-7.773 58	0.018 45	0	0	[14-15]

表 2 $\text{KCl-H}_2\text{O}$ 体系水活度实验值^[12]与计算值的对比

Table 2 Comparison of experimental and calculated water activity in $\text{KCl-H}_2\text{O}$ system

$m / (\text{mol} \cdot \text{kg}^{-1})$	$T = 273.15 \text{ K}$			$T = 298.15 \text{ K}$			$T = 348.15 \text{ K}$		
	$a_{\text{w}}(\text{exp.})$	$a_{\text{w}}(\text{calcd})$	Δ	$a_{\text{w}}(\text{exp.})$	$a_{\text{w}}(\text{calcd})$	Δ	$a_{\text{w}}(\text{exp.})$	$a_{\text{w}}(\text{calcd})$	Δ
0.10	0.996 7	0.996 7	0.000 0	0.996 7	0.996 7	0.000 0	0.996 7	0.996 7	0.000 0
0.20	0.993 5	0.993 5	0.000 0	0.993 4	0.993 4	0.000 0	0.993 5	0.993 4	0.000 1
0.30	0.990 3	0.990 3	0.000 0	0.990 2	0.990 2	0.000 0	0.990 3	0.990 1	0.000 2
0.40	0.987 2	0.987 2	0.000 0	0.987 1	0.987 1	0.000 0	0.987 1	0.986 9	0.000 2
0.50	0.984 1	0.984 1	0.000 0	0.983 9	0.983 9	0.000 0	0.983 9	0.983 6	0.000 3
0.60	0.981 0	0.981 0	0.000 0	0.980 8	0.980 7	0.000 1	0.980 7	0.980 4	0.000 3
0.70	0.977 9	0.977 9	0.000 0	0.977 6	0.977 6	0.000 0	0.977 6	0.977 1	0.000 4
0.80	0.974 8	0.974 8	0.000 0	0.974 5	0.974 4	0.000 1	0.974 4	0.973 9	0.000 5
0.90	0.971 8	0.971 8	0.000 0	0.971 3	0.971 3	0.000 0	0.971 2	0.970 6	0.000 6
1.00	0.968 7	0.968 7	0.000 0	0.968 1	0.968 1	0.000 0	0.968 0	0.967 3	0.000 6
1.25	0.961 1	0.961 0	0.000 1	0.960 2	0.960 2	0.000 0	0.959 9	0.959 2	0.000 7

续表 2

1.50	0.953 4	0.953 2	0.000 2	0.952 3	0.952 3	0.000 0	0.951 8	0.950 9	0.000 9
1.75	0.945 8	0.945 4	0.000 4	0.944 3	0.944 3	0.000 0	0.943 6	0.942 7	0.000 9
2.00	0.938 2	0.937 6	0.000 6	0.936 3	0.936 3	0.000 0	0.935 4	0.934 4	0.001 0
2.50	0.922 7	0.921 7	0.001 0	0.920 0	0.920 1	-0.000 1	0.918 7	0.917 8	0.000 9
3.00	0.907 0	0.905 5	0.001 5	0.903 7	0.903 6	0.000 1	0.901 9	0.901 0	0.000 9
3.50	0.891 0	0.889 1	0.001 9	0.887 0	0.887 0	0.000 0	0.884 7	0.884 0	0.000 7
4.00	0.874 8	0.872 4	0.002 4	0.870 2	0.870 1	0.000 1	0.867 5	0.866 9	0.000 6
4.50	0.858 4	0.855 5	0.002 9	0.853 1	0.853 1	0.000 0	0.850 3	0.849 7	0.000 6
5.00	0.841 5	0.838 4	0.003 1	0.835 9	0.835 8	0.000 1	0.833 0	0.832 4	0.000 6
5.50	0.824 1	0.821 0	0.003 1	0.818 4	0.818 5	-0.000 1	0.815 7	0.815 1	0.000 6
6.00	0.806 6	0.803 6	0.003 0	0.801 1	0.801 0	0.000 1	0.798 5	0.797 7	0.000 8
Average			0.000 9			0.000 1			0.000 6

Note: $\Delta = a_{\text{w}}(\text{exp.}) - a_{\text{w}}(\text{calcd.})$; Average = $\sum_i |\Delta| / n$.

对于 $\text{KNO}_3\text{-H}_2\text{O}$ 体系, 本文利用 Hamer 等^[14]用等压法测定的 298.15 K 时水活度和 Barry^[15]所给的 425.5 K 的水活度拟合二元参数(见表 1), 再用此参数分别计算不同温度下的水活度, 并与实验值对比

(见表 3), 计算值与实验值平均偏差小于 0.003。结合 $\text{KNO}_3\text{-H}_2\text{O}$ 体系的溶解度^[13,16], 得到不同温度下的 $\ln K$, $\ln K$ 与温度 T 的关系式见表 5。

对于 $\text{K}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}$ 体系的二元参数, 本文通过拟

表 3 $\text{KNO}_3\text{-H}_2\text{O}$ 体系水活度实验值与计算值的对比Table 3 Comparison of experimental and calculated water activity in $\text{KNO}_3\text{-H}_2\text{O}$ system

$m /$ (mol · kg ⁻¹)	$T=298.15 \text{ K}$			$m /$ (mol · kg ⁻¹)	$T=425.5 \text{ K}$		
	$a_{\text{w}}(\text{exp.})^{[14]}$	$a_{\text{w}}(\text{calcd.})$	Δ		$a_{\text{w}}(\text{exp.})^{[15]}$	$a_{\text{w}}(\text{calcd.})$	Δ
0.495 3	0.985 5	0.985 5	0.000 0	1.454 6	0.960	0.958 1	0.001 9
0.575 6	0.983 4	0.983 4	0.000 0	3.273 5	0.917	0.914 7	0.002 3
0.833 4	0.977 1	0.977 0	0.000 1	5.029 1	0.874	0.878 9	-0.004 9
1.079 5	0.971 3	0.971 4	-0.000 1	6.817 8	0.845	0.846 3	-0.001 3
1.378 2	0.965 0	0.965 1	-0.000 1	11.798 9	0.773	0.769 1	0.003 9
1.710 5	0.958 6	0.958 5	0.000 1	16.646	0.713	0.707 4	0.005 6
2.263 4	0.948 7	0.948 8	-0.000 1	17.603 7	0.692	0.696 4	-0.004 4
2.334 9	0.947 6	0.947 6	0.000 0	20.338 9	0.665	0.666 9	-0.001 9
2.939 6	0.938 2	0.938 2	0.000 0	26.044 2	0.614	0.613 1	0.000 9
3.082 5	0.936 1	0.936 1	0.000 0	35.153 0	0.539	0.543 7	-0.004 7
3.780 4	0.926 6	0.926 6	0.000 0	49.278 0	0.464	0.463 0	0.001 0
				49.428 0	0.463	0.462 3	0.000 7
Average			0.000 1	Average			0.002 8

表 4 $\text{K}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}$ 体系水活度实验值与计算值的对比Table 4 Comparison of experimental and calculated osmotic coefficient in $\text{K}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}$ system

$m /$ (mol · kg ⁻¹)	$T=298.15 \text{ K}$			$m /$ (mol · kg ⁻¹)	$T=323.15 \text{ K}$		
	$a_{\text{w}}(\text{exp.})^{[17]}$	$a_{\text{w}}(\text{calcd.})$	Δ		$a_{\text{w}}(\text{exp.})^{[18]}$	$a_{\text{w}}(\text{calcd.})$	Δ
0.1	0.995 8	0.995 8	0.000 0	0.200 04	0.992 0	0.991 9	0.000 1
0.2	0.992 0	0.992 0	0.000 0	0.219 39	0.991 2	0.991 2	0.000 0
0.3	0.988 4	0.988 3	0.000 1	0.330 40	0.987 3	0.987 2	0.000 1
0.4	0.984 9	0.984 8	0.000 1	0.360 450	0.986 1	0.986 2	-0.000 1

续表 4

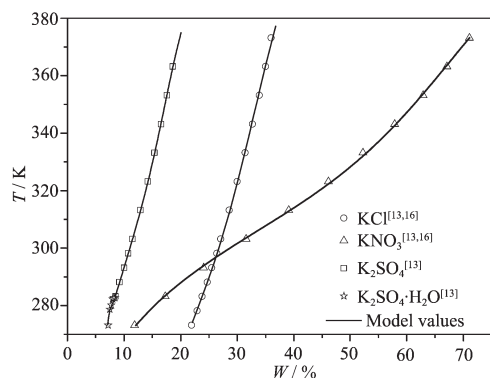
0.5	0.981 5	0.981 3	0.000 2	0.385 970	0.985 3	0.985 3	0.000 0
0.6	0.978 2	0.977 9	0.000 3	0.398 780	0.984 8	0.984 8	0.000 0
0.7	0.975 0	0.974 6	0.000 4	0.431 330	0.983 6	0.983 7	-0.000 1
				0.470 590	0.982 4	0.982 3	0.000 1
				0.596 150	0.977 9	0.978 1	-0.000 1
				0.651 790	0.976 2	0.976 1	0.000 1
				0.716010	0.974 1	0.974 0	0.000 1
				0.938 650	0.966 7	0.966 6	0.000 1
				0.957 470	0.965 9	0.966 0	-0.000 1
Average			0.000 2	Average			0.000 1

表 5 $\text{KNO}_3\text{-K}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}$ 和 $\text{KNO}_3\text{-KCl-H}_2\text{O}$ 体系中固相的 $\ln K$ 与温度 T 的关系Table 5 Parameters $\ln K$ of solid phases in the ternary $\text{KNO}_3\text{-K}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}$ and $\text{KNO}_3\text{-KCl-H}_2\text{O}$ system

Solid phase	$\ln K = A + B/T + CT + D \ln T$				Solubility source
	A	B	C	D	
KCl	9.839 81	-3 407.772 4	-0.014 57	0	[13]
K_2SO_4	-165.651 55	-2 586.963 28	-0.110 61	33.556 28	[13]
$\text{K}_2\text{SO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	-82 871.132 78	2 125 340.344 6	-24.970 05	14 597.775 27	[13]
KNO_3	-6.741 22	-3 411.48	0	1.734 98	[13,16]

合文献^[17-18]所给定的 298.15 和 323.15 K 渗透系数得到,参数与温度之间的关系见表 1。用此参数计算得到不同温度下该体系的水活度,并与实验值对比(见表 4),计算值与实验值平均偏差小于 0.000 3。结合 $\text{K}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}$ 体系溶解度^[13],计算不同温度下的 $\ln K$, $\ln K$ 与温度 T 的关系式见表 5。

我们利用表 1 和表 5 所给定的参数分别计算 $\text{KCl-H}_2\text{O}$ 、 $\text{K}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}$ 和 $\text{KNO}_3\text{-H}_2\text{O}$ 体系的溶解度相图,结果见图 1,发现计算值与实验值一致。

图 1 $\text{KCl-H}_2\text{O}$ 、 $\text{KNO}_3\text{-H}_2\text{O}$ 和 $\text{K}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}$ 体系溶解度相图Fig.1 Solubility of $\text{KCl-H}_2\text{O}$, $\text{KNO}_3\text{-H}_2\text{O}$ and $\text{K}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}$ system

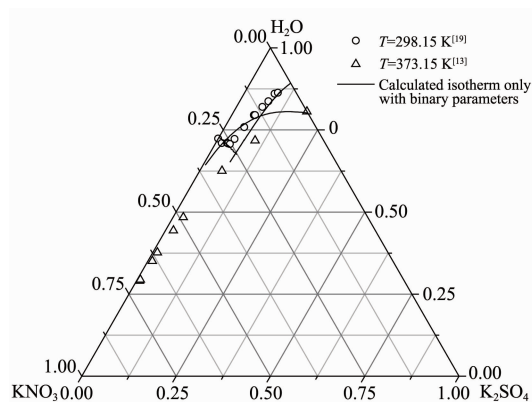
2.2 三元溶解度的计算

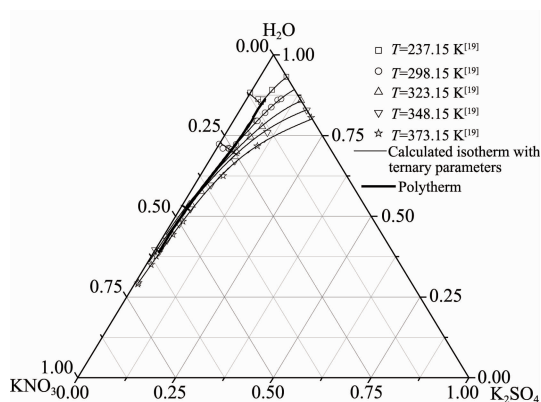
首先我们仅用二元参数计算 $\text{KNO}_3\text{-K}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}$

体系在 298.15 K 和 373.15 K 的溶解度(见图 2),结果发现计算值与实验值有一定偏差。为得到准确的溶解度数据,我们利用文献报道的该体系在 298.15 和 348.15 K 的溶解度^[13,19],拟合 $\text{KNO}_3\text{-K}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}$ 体系三元相互作用参数,结果为,

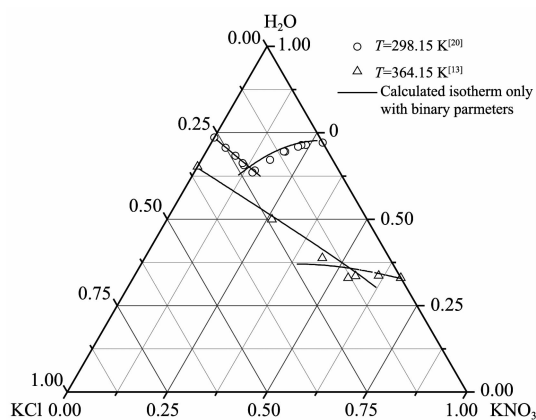
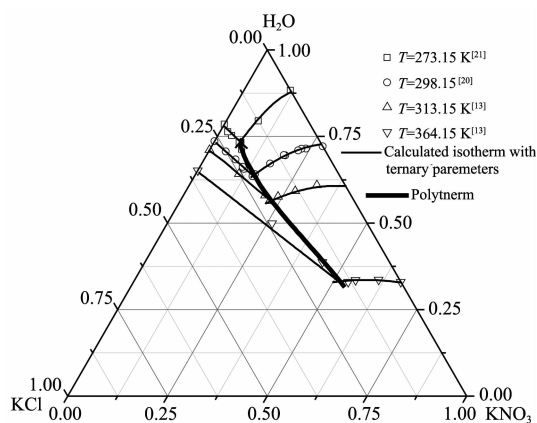
$W_{ijk} = 321.679\ 71 - 1.043\ 4T$, $Q_{1,ijk} = -136.821\ 72 + 0.448\ 8T$, $U_{ijk} = -90.925\ 13 + 0.250\ 2T$,并用此三元参数计算该体系的溶解度相图和共晶线(见图 3),由图 3 可见,计算值与实验值一致。

本文仅用二元参数计算 $\text{KNO}_3\text{-KCl-H}_2\text{O}$ 体系在

图 2 $\text{KNO}_3\text{-K}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}$ 体系在 298.15 和 373.15 K 的溶解度Fig.2 Solubility of the ternary system $\text{KNO}_3\text{-K}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}$ at 298.15 K and 373.15 K

图 3 $\text{KNO}_3\text{-K}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}$ 体系的溶解度Fig.3 Solubility of the ternary system $\text{KNO}_3\text{-K}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}$

298.15 和 364.15 K 的溶解度,(见图 4),由图 4 可见计算值与实验值仅有稍许偏差,为准确计算其他温度的溶解度,我们结合 298.15 和 364.15 K 的溶解度^[13,20-21],拟合 $\text{KNO}_3\text{-KCl-H}_2\text{O}$ 体系三元相互作用参

图 4 $\text{KNO}_3\text{-KCl-H}_2\text{O}$ 体系在 298.15 和 364.15 K 的溶解度Fig.4 Solubility of the ternary system $\text{KNO}_3\text{-KCl-H}_2\text{O}$ at 298.15 K and 364.15 K图 5 $\text{KNO}_3\text{-KCl-H}_2\text{O}$ 体系的溶解度Fig.5 Solubility of the ternary system $\text{KNO}_3\text{-KCl-H}_2\text{O}$

数,结果如下:

$W_{ijk}=8.17584-0.02682T$, $Q_{ijk}=0.24183-0.00333T$,
 $U_{ijk}=-2.9995+0.01T$, 并用此三元参数预测该体系的多温相图和共晶线(见图 5),由图 5 可见,计算值与实验值基本一致。

3 结 论

本文利用 PSC 模型计算 $\text{KNO}_3\text{-K}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}$ 和 $\text{KNO}_3\text{-KCl-H}_2\text{O}$ 体系的多温溶解度。首先分别拟合 $\text{KCl-H}_2\text{O}$ 、 $\text{KNO}_3\text{-H}_2\text{O}$ 和 $\text{K}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}$ 体系 2 个温度下的实验数据,得到这 3 个二元体系的模型参数,结合二元溶解度实验值,计算出不同温度下的溶度积常数 K ,然后仅用二元参数计算不同温度下 $\text{KNO}_3\text{-K}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}$ 和 $\text{KNO}_3\text{-KCl-H}_2\text{O}$ 三元体系溶解度,发现计算值和实验值有一定的偏差,说明在三元体系中三离子之间的相互作用不能忽略。我们仅用这 2 个三元体系两个温度下的溶解度拟合得到三元相互作用参数,用此参数重新计算三元体系的多温溶解度,结果表明计算值和实验值较为吻合。由此说明利用有限的实验数据,结合预测能力较强的 PSC 热力学模型,可以得到较为完整的三元体系相图。

参考文献:

- [1] LI Fei-Fei(李飞飞), YAO Yan(姚燕). *Chem. Res. Appl. (Huaxue Yanjiu Yu Yingyong)*, **2004**,**16**(1):33-36
- [2] LONG Guang-Ming(龙光明), YAO Yan(姚燕), WANG Feng-Qin(王凤琴), et al. *Acta Phys.-Chim. Sin. (Wuli Huaxue Xuebao)*, **1999**,**15**(10):956-960
- [3] Patil K R, Chaudharl S K, Kattl S S. *J. Chem. Eng. Data*, **1992**,**37**:136-138
- [4] Greensan L. *J. Res. Natl. Bur. Stand. A: Phys. Chem.*, **1977**, **81**:89
- [5] YIN Xia(尹霞), LI Qin-Xiang(李琴香), WAN Yan-Peng(万艳鹏), et al. *Acta Chim. Sin. (Huaxue Xuebao)*, **2008**,**66** (15):1815-1826
- [6] Stokes R H, Robinson R. *J. Am. Chem. Soc.*, **1948**,**70**:1870-1878
- [7] Ally M R, Braunstein J. *J. Chem. Thermodyn.*, **1998**,**30**:49-58
- [8] Pitzer K S, Simonson J M. *J. Phys. Chem.*, **1986**,**90** (13): 3005-3009
- [9] Simonson J M, Pitzer K S. *J. Phys. Chem.*, **1986**,**90**(13):3009-3013
- [10] Clegg S L, Pitzer K S. *J. Phys. Chem.*, **1992**,**96** (8):3513-3520

- [11]Clegg S L, Pitzer K S. *J. Phys. Chem.*, **1992**,**96**(23):9470-9479
- [12]Holmes H F, Mesme R. E. *J. Phys. Chem.*, **1983**,**87**(7):1242-1255
- [13]Linke W F, Seidell A. *Solubilities: Inorganic and Metal-organic Compounds*. 4th. Ed. Washington DC: American Chemical Society, **1965**.
- [14]Hamer W J, Wu Y C. *J. Phys. Chem. Ref. Data*, **1972**,**1**:1047-1100
- [15]Barry J C, Richter J, Stich E. *Ber Bunsen-Ges Phys. Chem.*, **1988**,**92**:1118-1122
- [16]YIN Xia(尹霞), WU Yu-Shuang(吴玉双), LI Qin-Xiang(李琴香), et al. *Chinese J. Inorg. Chem. (Wuji Huaxue Xuebao)*, **2010**,**26**(1):45-48
- [17]Robinson R A, Stokes R H. *Electrolyte Solutions*. 2nd Ed., 5th Revised Impression, [S.l.]: Butterworths, **1970**.
- [18]Palmer D A, Archer D G, Rard J A. *J. Chem. Eng. Data*, **2002**,**47**(6):1425-1431
- [19]Janeche E Z. *Elektrochem.*, **1929**,**35**:332-334
- [20]Armstrong H E, Eyre J Y. *Proc. R. Soc. London, Ser. A*, **1900-1911**,**84**:123-135
- [21]Janeche E Z. *Angew. Chem.*, **1928**,**41**:916-924