



DOI:10.13364/j.issn.1672-6510.20150124

三元体系 Li^+ 、 Mg^{2+} //borate– H_2O 288.15 K 固液相平衡研究

景妍¹, 王士强^{2,3}, 胡海清², 赵美玲¹, 韩徐年², 郭亚飞^{2,3}, 邓天龙^{2,3}

(1. 天津科技大学海洋与环境学院, 天津 300457; 2. 天津科技大学化工与材料学院, 天津 300457;
3. 天津市海洋资源与化学重点实验室, 天津 300457)

摘要: 采用等温溶解法研究三元体系 Li^+ 、 Mg^{2+} //borate– H_2O 在 288.15 K 时稳定相平衡, 并测定其溶解度及物化性质(密度、折光率和 pH), 根据实验数据绘制稳定相图及物化性质–组成图. 结果表明: 该三元体系为水合物 I 型, 无复盐及固溶体形成; 相图中有 1 个共饱点 $E(\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 3\text{H}_2\text{O} + \text{Mg}_2\text{B}_6\text{O}_{11} \cdot 15\text{H}_2\text{O})$, 对应的液相组成(质量分数)为: $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 2.88%、 MgB_4O_7 0.02%, 2 条单变量曲线 AE 和 BE , 2 个单盐结晶区, 对应的平衡固相为 $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 和 $\text{Mg}_2\text{B}_6\text{O}_{11} \cdot 15\text{H}_2\text{O}$; 随着 $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 的含量增大, MgB_4O_7 的含量减小, 表明 $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 对 MgB_4O_7 存在一定的盐析效应. 研究发现: 章氏硼镁石在该体系 288.15 K 时不能够稳定存在, 极易与水反应转化为更为稳定的多水硼镁石. 稳定平衡液相的密度、折光率、pH 均随着液相中 $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 浓度的变化呈有规律的变化. 其中, 密度和折光率随着 $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 浓度的增大而增大, 到共饱点处达到最大值, 采用经验公式拟合密度和折光率, 拟合值与实验值吻合得较好.

关键词: 稳定相平衡; 溶解度; 锂硼酸盐; 镁硼酸盐

中图分类号: TQ131.1

文献标志码: A

文章编号: 1672-6510(2016)04-0040-05

Solid-liquid Phase Equilibria in the Ternary System Li^+ , Mg^{2+} //borate– H_2O at 288.15 K

JING Yan¹, WANG Shiqiang^{2,3}, HU Haiqing², ZHAO Meiling¹, HAN Xunian²,
GUO Yafei^{2,3}, DENG Tianlong^{2,3}

(1. College of Marine and Environmental Sciences, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300457, China;
2. College of Chemical Engineering and Materials Science, Tianjin University of Science & Technology,
Tianjin 300457, China; 3. Tianjin Key Laboratory of Marine Resources and Chemistry, Tianjin 300457, China)

Abstract: The phase equilibrium of the ternary system Li^+ 、 Mg^{2+} //borate– H_2O has been researched at 288.15 K using an iso-thermal dissolution method. The solubility and physico-chemical properties such as density, refractive index and pH value were analyzed. Based on the experimental data, the phase diagram at 288.15 K and diagrams of physico-chemical properties versus compositions were plotted respectively. The results showed that the ternary system at 288.15 K belongs to hydrate I type and no double salt or solid solution was generated. There was one eutectic point (liquid phase composition is $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 2.88%, MgB_4O_7 0.02%); two univariate curves and two crystallization fields ($\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ and $\text{Mg}_2\text{B}_6\text{O}_{11} \cdot 15\text{H}_2\text{O}$). The concentration of MgB_4O_7 decreased with the increase of the concentration of $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$, which shows that $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ has an salting-out effect on MgB_4O_7 . It was found that $\text{MgB}_4\text{O}_7 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ is unstable at 288.15 K; it easily reacts with water and then converts into $\text{Mg}_2\text{B}_6\text{O}_{11} \cdot 15\text{H}_2\text{O}$. Physico-chemical properties changed regularly with the increase of $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ content. Density and refractive index increased with the increase of the concentration of $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$, and reached the highest at the eutectic point, then decreased. The values calculated with empirical equations highly matched the experimental values.

收稿日期: 2015-09-16; 修回日期: 2015-10-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(21276194, U1507109); 天津市应用基础与前沿技术研究计划项目(12JCQNJC03400)

作者简介: 景妍(1991—), 女, 山西大同人, 硕士研究生; 通信作者: 王士强, 副研究员, wangshiqiang@tust.edu.cn.

Key words: stable phase equilibrium; solubility; lithium borate; magnesium borate

我国青藏高原的盐湖卤水以富含锂硼而闻名于世,在卤水蒸发后期,钠盐、钾盐几乎全部析出,硼、锂在卤水中得到高度富集,卤水组成变为 Li^+ 、 Mg^{2+} // Cl^- 、 SO_4^{2-} 、borate- H_2O 体系,而硼酸盐存的形式复杂,硼酸根是由正硼酸根($\text{B}(\text{OH})_4^-$)和正硼酸($\text{B}(\text{OH})_3$)按一定比例聚合而成的硼氧络阴离子.由于在不同的 pH、盐类、总硼浓度下,硼氧络阴离子的聚合比例不同,所以对于不同的水盐体系,硼酸盐的存在形式也不一样.因此研究这一复杂卤水体系的相平衡相图,对于富锂硼卤水蒸发结晶规律、盐类矿物形成条件,以及制定卤水综合利用方案具有十分重要的意义^[1-5].

三元体系 Li^+ 、 Mg^{2+} //borate- H_2O 为该复杂盐湖卤水体系的子体系,针对硼酸盐在溶液中存在形式复杂的特点,凌云^[6]在研究镁硼酸盐体系 298.15 K 相平衡时指出硼酸镁在溶液中容易转化,如章氏硼镁石易转化为多水硼镁石;李明礼等^[7]报道了三元体系 Li^+ 、 Mg^{2+} // $\text{B}_4\text{O}_7^{2-}$ - H_2O 323 K 时的稳定相图,发现镁硼酸盐的存在形式是章氏硼镁石.硼酸根的存在形式复杂,高世扬等^[2]指出“ $\text{B}_4\text{O}_7^{2-}$ ”是溶液中各种可能存在的硼酸根离子的综合统计形式.青藏高原盐湖区夏季平均温度是在 288.15 K 左右,而该体系在 288.15 K 时稳定相平衡与相图迄今尚未见报道.本实验对 Li^+ 、 Mg^{2+} //borate- H_2O 三元体系 288.15 K 时稳定相图进行研究,不仅可以进一步探讨硼酸盐在溶液中的存在形式,而且可以为从提钾后老卤中分离提纯锂镁硼酸盐提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 原料与仪器

$\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$, 分析纯,国药集团化学试剂有限公司; $\text{MgB}_4\text{O}_7 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$,由硼酸和氧化镁实验室合成^[8],并经化学组成分析和 X 射线粉晶衍射鉴定;实验用水均为去离子水,电导率 $< 1.0 \times 10^{-4}$ S/m.

HXC-500-6A 型恒温水浴磁力搅拌槽,控温范围 0 ~ 85 °C,精度 ± 0.01 °C,北京惠城佳仪科技有限公司;DMA4500 型高精度密度计,精度 ± 0.01 mg/cm³,奥地利安东帕公司;WYA-2S 型数字阿贝折光率仪,精度 $\pm 0.000 1$,上海精密科学仪器有限公司;pH7310 型精密 pH 计,精度为 ± 0.001 ,德国 WTW 公司;

MSAL XD-3 型 X 射线粉晶衍射仪,北京谱析通用仪器有限责任公司.

1.2 实验方法

采用等温溶解平衡法研究 288.15 K 时三元体系 Li^+ 、 Mg^{2+} //borate- H_2O 稳定相平衡.参考该体系已报道的溶解度数据,于 150 mL 玻璃平衡管中配制一系列复体点,并置于恒温水浴磁力搅拌槽中,控制水浴温度为 (288.15 ± 0.01) K,搅拌速率为 130 r/min.定期取液相测定物化性质并进行化学分析,溶液中化学组成不变即为达到平衡,该硼酸盐体系平衡时间约 15 d.达到平衡后,分别取固相和液相进行分析和鉴定.采用 X 射线粉晶衍射法对平衡固相进行分析鉴定;测定液相的主要物化性质(密度、折光率、pH).

1.3 分析方法

B_2O_3 采用甘露醇碱量法进行分析,相对误差 $\leq \pm 0.3\%$; Mg^{2+} 采用 EDTA 络合滴定法进行分析,当溶液中有 Li^+ 存在时,会对 Mg^{2+} 的测定产生干扰,需采用混合醇作为掩蔽剂消除 Li^+ 的测定干扰^[9],测定相对误差 $\leq \pm 0.3\%$; Li^+ 采用 ICP-OES 法进行分析,相对误差 $\leq \pm 0.5\%$,并辅以差量法加以验证.

2 结果与讨论

2.1 稳定相平衡溶解度及相图

三元体系 Li^+ 、 Mg^{2+} //borate- H_2O 288.15 K 时的溶解度及物化性质测定结果见表 1.由表 1 数据绘制的稳定相图如图 1 所示.由图 1 可知:该三元体系 288.15 K 时为简单共饱和型,无复盐及固溶体形成.相图中有 1 个共饱和点(E ,平衡液相组成为: MgB_4O_7 0.02%, $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 2.88%),对应的平衡固相为 $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 3\text{H}_2\text{O} + \text{Mg}_2\text{B}_6\text{O}_{11} \cdot 15\text{H}_2\text{O}$ (XRD 图如图 2 所示)、2 条单变量溶解度曲线(AE 和 BE ,分别为 $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 和 MgB_4O_7 的溶解度曲线)、2 个固相结晶区(平衡固相为 $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 和 $\text{Mg}_2\text{B}_6\text{O}_{11} \cdot 15\text{H}_2\text{O}$,XRD 图如图 3 和图 4 所示), $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 溶解度大于 MgB_4O_7 ,且对 MgB_4O_7 有一定的盐析效应,均使得 $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 的固相结晶区远小于 $\text{Mg}_2\text{B}_6\text{O}_{11} \cdot 15\text{H}_2\text{O}$ 的固相结晶区.

章氏硼镁石($\text{MgB}_4\text{O}_7 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$)为一种不相称溶解的固相,经过连续强烈搅拌后,章氏硼镁石在水溶液中极易与水反应发生转化^[10],形成更为稳定的多水

硼镁石 ($\text{Mg}_2\text{B}_6\text{O}_{11}\cdot 15\text{H}_2\text{O}$)。镁硼酸盐转化前后的 X 射线粉晶衍射图见图 3 和图 4, 实验研究表明 288.15 K 时章氏硼镁石 ($\text{MgB}_4\text{O}_7\cdot 9\text{H}_2\text{O}$) 在水中溶解,

不断取液相分析溶液中 Mg^{2+} 和 B_2O_3 的浓度, 经 8 d 搅拌后, 溶液中 $n(\text{MgO}) : n(\text{B}_2\text{O}_3) = 1 : 3.01$, 表明完全转化为多水硼镁石 ($\text{Mg}_2\text{B}_6\text{O}_{11}\cdot 15\text{H}_2\text{O}$)。

表 1 三元体系 Li^+ 、 Mg^{2+} //borate- H_2O 288.15 K 溶解度及平衡液相物化性质测定值

Tab. 1 Solubility and physico-chemical property values of the ternary system Li^+ , Mg^{2+} //borate- H_2O at 288.15 K

序号	质量分数/%			$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	折光率	pH	平衡固相
	$\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$	MgB_4O_7	H_2O				
1(A 点)	0.00	0.21	99.79	1.003 13	1.334 7	9.382	$\text{Mg}_2\text{B}_6\text{O}_{11}\cdot 15\text{H}_2\text{O}$
2	0.19	0.14	99.67	1.004 68	1.335 0	9.431	$\text{Mg}_2\text{B}_6\text{O}_{11}\cdot 15\text{H}_2\text{O}$
3	0.70	0.06	99.24	1.007 80	1.335 9	9.582	$\text{Mg}_2\text{B}_6\text{O}_{11}\cdot 15\text{H}_2\text{O}$
4	1.37	0.04	98.59	1.014 07	1.337 0	9.636	$\text{Mg}_2\text{B}_6\text{O}_{11}\cdot 15\text{H}_2\text{O}$
5	2.00	0.03	97.97	1.020 44	1.338 5	9.674	$\text{Mg}_2\text{B}_6\text{O}_{11}\cdot 15\text{H}_2\text{O}$
6	2.23	0.03	97.74	1.022 99	1.339 1	9.691	$\text{Mg}_2\text{B}_6\text{O}_{11}\cdot 15\text{H}_2\text{O}$
7(E 点)	2.88	0.02	97.10	1.033 33	1.343 6	9.702	$\text{Mg}_2\text{B}_6\text{O}_{11}\cdot 15\text{H}_2\text{O} + \text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7\cdot 3\text{H}_2\text{O}$
8	2.88	0.01	97.11	1.033 00	1.343 4	9.744	$\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7\cdot 3\text{H}_2\text{O}$
9(B 点)	2.89	0.00	97.11	1.030 20	1.342 7	9.753	$\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7\cdot 3\text{H}_2\text{O}$

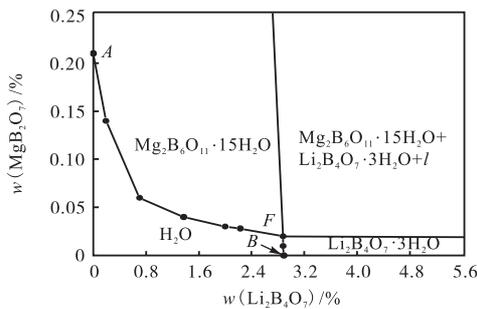


图 1 三元体系 Li^+ 、 Mg^{2+} //borate- H_2O 288.15 K 稳定相图
Fig. 1 Stable phase diagram of the ternary system Li^+ , Mg^{2+} //borate- H_2O at 288.15 K

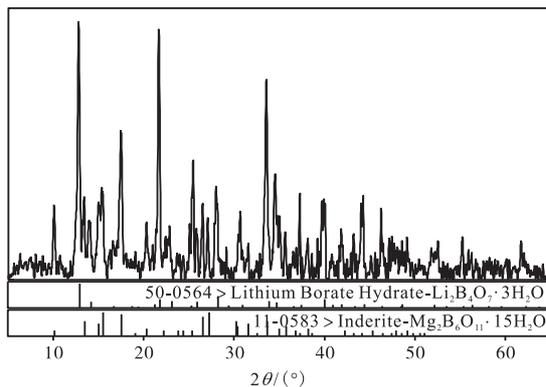


图 2 $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7\cdot 3\text{H}_2\text{O} + \text{Mg}_2\text{B}_6\text{O}_{11}\cdot 15\text{H}_2\text{O}$ XRD 图谱
Fig. 2 XRD pattern of $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7\cdot 3\text{H}_2\text{O} + \text{Mg}_2\text{B}_6\text{O}_{11}\cdot 15\text{H}_2\text{O}$

将实验结果与三元体系 Li^+ 、 Mg^{2+} // $\text{B}_4\text{O}_7^{2-}$ - H_2O 323 K 时稳定相图^[7]进行对比, 如图 5 所示. 由图 5 可知: 二者结晶区数目相同, 锂硼酸盐的结晶形式相同, 均为 $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7\cdot 3\text{H}_2\text{O}$, 仅镁硼酸盐的结晶形式发生

变化, 章氏硼镁石经过连续强烈搅拌后与水反应, 形成多水硼镁石; 随着温度升高, 锂硼酸盐和镁硼酸盐溶解度均呈现增大的趋势.

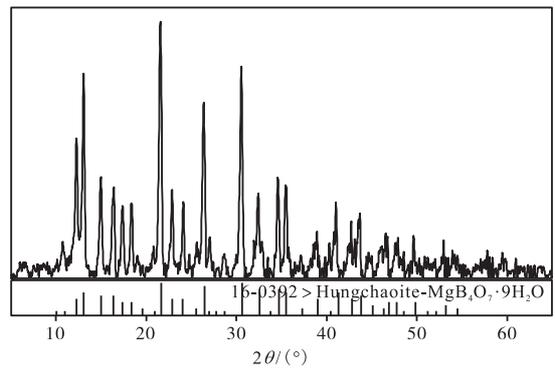


图 3 章氏硼镁石 ($\text{MgB}_4\text{O}_7\cdot 9\text{H}_2\text{O}$) XRD 图谱
Fig. 3 XRD pattern of hungchaoite ($\text{MgB}_4\text{O}_7\cdot 9\text{H}_2\text{O}$)

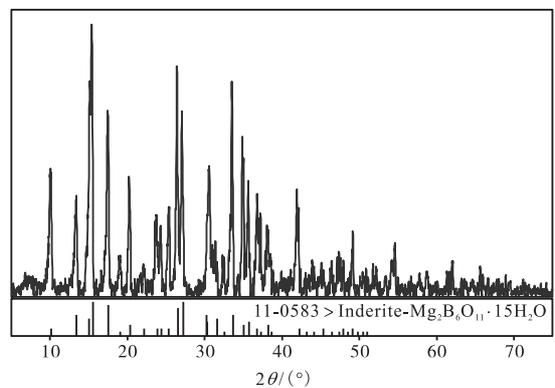


图 4 多水硼镁石 ($\text{Mg}_2\text{B}_6\text{O}_{11}\cdot 15\text{H}_2\text{O}$) XRD 图谱
Fig. 4 XRD pattern of inderite ($\text{Mg}_2\text{B}_6\text{O}_{11}\cdot 15\text{H}_2\text{O}$)

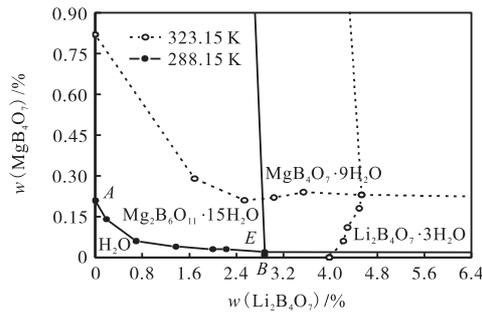
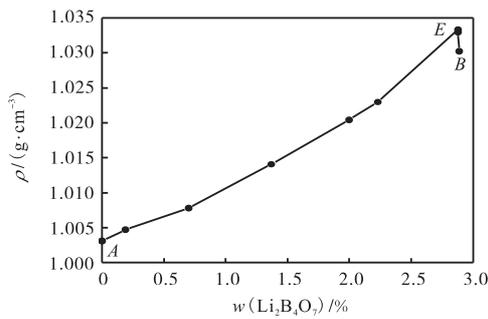


图5 三元体系 Li^+ 、 Mg^{2+} //borate- H_2O 在 288.15 K 与 323 K 对比相图

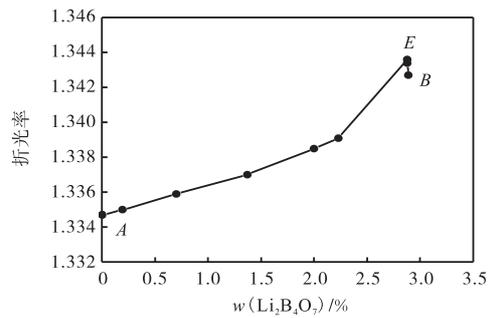
Fig. 5 Phase diagram of the ternary system Li^+ 、 Mg^{2+} //borate- H_2O at 288.15 K and 323 K

2.2 物化性质-组成关系研究

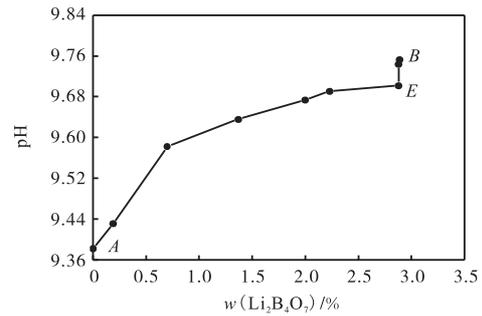
该三元体系的物化性质-组成图如图 6 所示. 由图 6 可知: 密度、折光率、pH 都随着 $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 浓度的变化呈规律性变化.



(a) 密度



(b) 折光率



(c) pH

图6 三元体系 Li^+ 、 Mg^{2+} //borate- H_2O 288.15 K 物化性质-组成图

Fig. 6 Physico-chemical properties versus the composition diagram of the ternary system Li^+ 、 Mg^{2+} //borate- H_2O 288.15 K

其中, 密度和折光率随着 $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 浓度的增大呈增大趋势, 在共饱点处达到最大值, 分别为 $1.033\ 33\ \text{g}/\text{cm}^3$ 和 $1.343\ 6$; 平衡溶液呈碱性, pH 为 $9.382 \sim 9.753$.

2.3 平衡液相密度与折光率理论计算

根据经验公式对该三元体系在 288.15 K 时的平衡溶液的密度和折光率进行了理论计算^[10-11]. 由测得的密度、折光率计算方程的特征参数, 并用相应参数可计算出密度、折光率的理论值.

$$\ln \frac{\rho_t}{\rho_0} = \sum A_i w_i \tag{1}$$

$$\ln \frac{n_{Dt}}{n_{D0}} = \sum B_i w_i \tag{2}$$

式中: ρ_0 为纯水密度, 288.15 K 时 $\rho_0 = 0.994\ 84\ \text{g}/\text{cm}^3$; n_{D0} 为纯水折光率, 288.15 K 时 $n_{D0} = 1.331\ 9$; ρ_t 为各点液相密度; n_{Dt} 为各点液相折光率; w_i 为第 i 种盐的质量分数; A_i 为该三元体系溶液密度系数; B_i 为该三元体系溶液折光率系数.

计算得到的该三元体系 $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 和 MgB_4O_7 的密度系数 A_i 分别为 $0.010\ 708$ 、 $0.023\ 45$, 折光率系数 B_i 分别为 $0.002\ 060$ 、 $0.000\ 592\ 8$, 由此计算得到的理论值见表 2. 由表 2 可知: 密度最大相对偏差为 0.23% , 折光率最大相对偏差为 0.17% .

表2 三元体系 Li^+ 、 Mg^{2+} //borate- H_2O 288.15 K 液相密度与折光率计算值和实验值的比较

Tab. 2 Calculated and experimental values of the density and refractive index of the ternary system Li^+ 、 Mg^{2+} //borate- H_2O 288.15 K

序号	$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$		相对误差/%	折光率		相对误差/%
	实验值	计算值		实验值	计算值	
1(A点)	1.003 13	1.004 03	-0.09	1.334 7	1.333 6	0.09
2	1.004 68	1.004 42	0.03	1.335 0	1.334 0	0.07
3	1.007 80	1.008 09	-0.03	1.335 9	1.335 4	0.04
4	1.014 07	1.014 83	-0.07	1.337 0	1.337 2	-0.01

续表

序号	$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$		相对误差/%	折光率		相对误差/%
	实验值	计算值		实验值	计算值	
5	1.020 44	1.021 50	-0.10	1.338 5	1.338 9	-0.03
6	1.022 99	1.023 95	-0.09	1.339 1	1.339 5	-0.03
7(E点)	1.033 33	1.030 93	0.23	1.343 6	1.341 3	0.17
8	1.033 00	1.030 68	0.22	1.343 4	1.341 4	0.15
9(B点)	1.030 20	1.030 50	-0.03	1.342 7	1.341 5	0.09

3 结 论

(1)三元体系 Li^+ 、 Mg^{2+} //borate- H_2O 在 288.15 K 为水合物 I 型,无复盐及固溶体形成.相图中有 1 个共饱点(平衡液相组成为: $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 2.88%, MgB_4O_7 0.02%),2 条单变量溶解度曲线、2 个结晶区(平衡固相为 $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7\cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{Mg}_2\text{B}_6\text{O}_{11}\cdot 15\text{H}_2\text{O}$).与该体系 323 K 相图对比,结晶区数目相同,仅锂硼酸盐结晶形式相同,而镁硼酸盐结晶形式由 $\text{MgB}_4\text{O}_7\cdot 9\text{H}_2\text{O}$ 转变为 $\text{Mg}_2\text{B}_6\text{O}_{11}\cdot 15\text{H}_2\text{O}$.随着温度升高,2 种硼酸盐的溶解度均增大.

(2)章氏硼镁石($\text{MgB}_4\text{O}_7\cdot 9\text{H}_2\text{O}$)为一种不相称溶解的固相,水溶液中极易与水反应发生转化,经过连续强烈搅拌后,形成更为稳定的多水硼镁石($\text{Mg}_2\text{B}_6\text{O}_{11}\cdot 15\text{H}_2\text{O}$).

(3)平衡溶液的密度、折光率、pH 都随着 $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 浓度的改变呈规律性变化.其中,密度和折光率随 $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 浓度的增大而增大,共饱点处达到最大值 1.038 61 g/cm^3 和 1.348 9;溶液呈弱碱性 pH 9.382 ~ 9.753.运用经验公式计算平衡液相的理论密度和折光率,与实验测得的数据进行对比,吻合较好,密度最大相对偏差为 0.23%,折光率最大相对偏差为 0.17%.

参考文献:

- [1] 郑喜玉,张明刚,徐昶,等.中国盐湖志[M].北京:科学出版社,2002.
- [2] 高世扬,宋彭生,夏树屏,等.盐湖化学:新类型硼锂盐湖[M].北京:科学出版社,2007.
- [3] Wang S Q, Guo Y F, Li D C, et al. Solid-liquid phase equilibria in the ternary systems ($\text{LiCl}+\text{MgCl}_2+\text{H}_2\text{O}$) and ($\text{Li}_2\text{SO}_4+\text{MgSO}_4+\text{H}_2\text{O}$) at 288.15 K[J]. Journal of Chemical & Engineering Data, 2015, 60(3): 821-827.
- [4] Wang S Q, Guo Y F, Liu W J, et al. Phase equilibria in the aqueous ternary system ($\text{LiBO}_2+\text{CaB}_2\text{O}_4+\text{H}_2\text{O}$) at 288.15 and 298.15 K[J]. Journal of Solution Chemistry, 2015, 44(7): 1545-1554.
- [5] Guo Y F, Liu Y H, Wang Q, et al. Phase equilibria and phase diagrams for the aqueous ternary system ($\text{Na}_2\text{SO}_4+\text{Li}_2\text{SO}_4+\text{H}_2\text{O}$) at (288 and 308) K[J]. Journal of Chemical & Engineering Data, 2013, 58(10): 2763-2767.
- [6] 凌云.某些镁硼酸盐的溶解转化及盐湖卤水次级体系 25 °C 相关关系的研究[D].西宁:中科院青海盐湖所, 1987.
- [7] 李明礼,多吉,于旭东,等.三元体系 Li^+ 、 Mg^{2+} //borate- H_2O 323K 相平衡研究[J].盐业与化工, 2014, 43(10): 16-19.
- [8] 景燕.合成章氏硼镁石的新方法[J].海湖盐与化工, 2000, 29(2): 24-25.
- [9] 王士强,高洁,余学,等.大量 Li^+ 存在对 Mg^{2+} 分析测定的影响研究[J].盐湖研究, 2007, 15(1): 44-48.
- [10] 宋彭生,杜宪惠,孙柏.三元体系 MgB_4O_7 - MgSO_4 - H_2O 25 °C 的研究[J].科学通报, 1987(19): 1492-1495.
- [11] 林联君,房春晖,房艳,等.一个预测溶液密度的新模型[J].盐湖研究, 2006, 14(2): 56-61.

责任编辑:周建军