

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2019.01.008

聚羧酸减水剂对水泥浆结合氯离子性能的影响

陈平,徐金霞,冯伟,蒋林华,梅友静

(河海大学力学与材料学院,江苏南京 210098)

摘要:从氯离子等温吸附、吸附动力学及吸附热力学 3 个方面,研究聚羧酸减水剂对水泥浆结合氯离子性能的影响,同时应用 XRD 微观测试技术研究其作用机理。结果表明:掺入聚羧酸减水剂使水泥浆体结合氯离子能力减弱,且水灰比越小,这种影响作用则越大;掺入聚羧酸减水剂的水泥浆体对氯离子的固化过程,短期内符合准一级动力学方程,表现为物理吸附,长期内符合准二级动力学方程,表现为化学结合,其中随着聚羧酸减水剂掺量的增大,吸附速率逐渐减小;聚羧酸减水剂使水泥浆结合氯离子过程中的自由能变、焓变和熵变都减小,且这个过程是自发、放热的;掺入聚羧酸减水剂主要影响水泥浆体对氯离子的物理吸附,对化学结合没有明显影响。

关键词:水泥浆;氯离子;等温吸附;聚羧酸减水剂;动力学;热力学

中图分类号:TU528.042.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2019)01-0048-07

Influence of polycarboxylate superplasticizer on the chloride binding in cement paste

CHENG Ping, XU Jinxia, FENG Wei, JIANG Linhua, MEI Youjing

(College of Mechanics and Materials, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Through the isothermal adsorption of chloride ion, the adsorption kinetics and the adsorption thermodynamics, the influence of polycarboxylate superplasticizer on the chloride binding in cement paste has been investigated. Besides, the influencing mechanism was examined by the X-ray powder diffractometer (XRD). It has been found that the polycarboxylate superplasticizer reduces the chloride binding, and the smaller the water-cement ratio is, the greater the effect is. Chloride binding onto cement paste with polycarboxylate superplasticizer in a short time conforms to pseudo-first-order kinetic equation, indicating the physical adsorption of chloride ions. In a long time, it conforms to pseudo-second-order kinetic equation, indicating the chemical adsorption of chloride ions. With the increase of content of polycarboxylate superplasticizer, the adsorption rate decreases. The free energy, enthalpy and entropy of chloride binding are decreased with the increase of polycarboxylate superplasticizer, and this process is spontaneous and exothermic. The influence of polycarboxylate superplasticizer on the chloride binding is mainly attributed to the physical adsorption, not chemical combination of chloride ions.

Key words: cement paste; chloride ion; isothermal adsorption; polycarboxylate superplasticizer; kinetics; thermodynamics

氯离子侵入引起的钢筋腐蚀是混凝土结构耐久性劣化的一个重要原因^[1]。侵入混凝土中的氯离子主要以 2 种形式存在:固化氯离子和游离氯离子,其中固化氯离子按作用机理可分为化学结合和物理吸附。化学结合为氯离子与 C₃A 的水化产物化学反应生成 Friedel 盐(3CaO·Al₂O₃·CaCl₂·10H₂O);物理吸附为氯离子被 C-S-H 凝胶等水泥水化产物通过 Van der Waals 力吸附。一般认为,钢筋腐蚀是由混凝土孔溶液中的

基金项目:国家自然科学基金(51478164)

作者简介:陈平(1994—),女,硕士研究生,主要从事混凝土结构耐久性研究。E-mail:863189638@qq.com

通信作者:徐金霞,教授。E-mail:xujinxia@hhu.edu.cn

引用本文:陈平,徐金霞,冯伟,等.聚羧酸减水剂对水泥浆结合氯离子性能的影响[J].河海大学学报(自然科学版),2019,47(1):48-54.
CHENG Ping, XU Jinxia, FENG Wei, et al. Influence of polycarboxylate superplasticizer on the chloride binding in cement paste[J].
Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2019, 47(1): 48-54.

游离氯离子^[2]导致的,当混凝土中氯离子总量一定时,固化氯离子越多,游离氯离子越少,钢筋腐蚀的危险越小^[3-4]。所以研究混凝土固化氯离子的性能对于改善钢筋混凝土结构的耐久性具有重要意义^[5]。

鉴于混凝土氯离子固化的重要性,国内外学者对其进行了广泛的研究。研究表明,水泥混凝土固化氯离子是一个复杂的物理化学过程,受到众多因素的影响,影响因素包括:水泥品种、水泥用量及龄期、水灰比、温度、矿物外加剂、氯盐阳离子类型等^[6-10]。即便如此,直至目前,国内外还未见关于聚羧酸减水剂对水泥混凝土氯离子固化影响的研究报道。

研究发现,有机表面活性剂由于能够吸附在水泥颗粒和水化物的表面,引起带电性、接触角等表面物理化学性能变化,从而对水泥混凝土固化氯离子(尤其是通过静电作用对氯离子的物理吸附)有重要影响^[11]。聚羧酸减水剂是一种应用极为广泛的高效减水剂,其本质是阴离子表面活性剂^[12-13],因此它是能够影响水泥混凝土固化氯离子的潜在因素,亟待研究。

基于此,本文主要从氯离子平衡吸附、吸附动力学、吸附热力学 3 个方面研究聚羧酸减水剂对水泥浆结合氯离子性能的影响;与此同时,通过 XRD 微观测试分析聚羧酸减水剂对水泥浆固化氯离子影响的作用机理。

1 试验原料、制作和方法

1.1 试验原料

水泥为海螺 P·O42.5 普通硅酸盐水泥,它的化学组分 CaO、SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃、MgO、K₂O、Na₂O 和 SO₃ 的组成(质量分数)分别为 57.27%、24.99%、9.32%、3.11%、0.86%、1.03%、1.08% 和 0.98%,氯离子含量(质量分数)和烧失量(质量分数)分别为 0.051% 和 2.16%。减水剂采用市售聚羧酸高效减水剂(polycarboxylate superplasticizer),其型号为 HPWR-Q007-HPEG,淡黄色液体,有效含量(体积分数)为 20%~25%,pH 为 7.0~8.0,最佳掺量(体积分数)为 1.2%,氯离子和碱含量极少,可忽略不计。NaCl、AgNO₃ 均为分析纯,水采用蒸馏水。

1.2 试样制作

制作掺入聚羧酸减水剂的水泥净浆试块,试块尺寸为 40 mm×40 mm×160 mm。试块成型 1 d 后拆模,放入标准养护箱中养护 27 d 后取出。干燥后破碎试块,取粒径在 0.25~2.00 mm 之间的颗粒,并混合均匀。将所得颗粒放入真空干燥箱中,在 40℃ 下干燥 3 d,然后放入内置硅胶和碱石灰的干燥器中持续干燥 7 d,即得到分析样品。

在氯离子等温吸附实验中,水灰比 W/C(水的质量与水泥质量的比值)分别为 0.30 和 0.25,聚羧酸减水剂掺量 P 分别为 0 和 0.5%(P 为聚羧酸减水剂的有效含量与水泥质量的比值)。在吸附动力学和吸附热力学实验中,W/C=0.30,P 分别为 0、0.5% 和 1.0%。

1.3 试验方法

1.3.1 氯离子等温吸附

称取 20 g 样品放入干燥的密封瓶中,加入 60 mL 用饱和 Ca(OH)₂ 配制的 NaCl 溶液(其初始氯离子浓度(c₀(Cl⁻))分别为 0.004 mol/L、0.012 mol/L、0.08 mol/L、0.2 mol/L、0.6 mol/L 和 1.0 mol/L)浸泡。将瓶盖拧紧,并用凡士林密封瓶口,充分震荡均匀后放入温度为(20±0.5)℃ 的恒温室内静置。Tang 等^[14]指出,颗粒样品在 10 d 左右即可达到吸附平衡,为方便对比分析,本文测试时采用的浸泡时间统一为 14 d。

14 d 后将浸泡溶液过滤,静置后取上层清液 10 mL 采用自动电位滴定仪滴定,得出混凝土中孔隙平衡溶液的自由氯离子浓度 c(Cl⁻),对于 NaCl 溶液浓度在 0.004~0.012 mol/L 和 0.08~1.0 mol/L 的样品,采用的滴定剂 AgNO₃ 溶液的浓度分别为 0.01 mol/L 和 0.1 mol/L,平衡时结合氯离子量 C_b 由式(1)求得:

$$C_b = 35.453V \frac{c_0(\text{Cl}^-) - c(\text{Cl}^-)}{w} \tag{1}$$

式中:C_b——平衡时结合氯离子总量,mg/g;c(Cl⁻)——溶液中自由氯离子浓度,mol/L;c₀(Cl⁻)——初始加入的 NaCl 溶液浓度,mol/L;V——添加的饱和 Ca(OH)₂ 配制的 NaCl 溶液体积,本文为 60 mL;w——加入的样品质量,本文为 20 g。

1.3.2 吸附动力学

称取 20 g 样品放入干燥的密封瓶中,加入 60 mL 用饱和 Ca(OH)₂ 配制的 NaCl 溶液(取适宜浓度

0.2 mol/L) 浸泡。将瓶盖拧紧,并用凡士林密封瓶口,充分震荡均匀后放入到温度为(20±0.5)℃的恒温室内静置。为保证结果的准确性,采取平行实验。在相隔时间为1 h、3 h、5 h、7 h、9 h、11 h、13 h、1 d、2 d、3 d、4 d、5 d、7 d、9 d、11 d、13 d 和 14 d 之后将浸泡溶液过滤,静置后取上层清液 10 mL 采用自动电位滴定仪测定自由氯离子浓度 $c(\text{Cl}^-)$,采用浓度为 0.1 mol/L 的 AgNO_3 溶液滴定试验样品。 t 时刻吸附氯离子量 q_t 由(1)式求得。

1.3.3 吸附热力学

称取 20 g 样品放入干燥的密封瓶中,加入 60 mL 用饱和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 配制的 NaCl 溶液(使其浓度分别为 0.004 mol/L、0.012 mol/L、0.08 mol/L、0.2 mol/L、0.6 mol/L 和 1.0 mol/L) 浸泡。为保证结果的准确性,采取平行实验。将瓶盖拧紧,并用凡士林密封瓶口,充分震荡均匀后分别放入设置不同温度的水浴锅中。14 d 后取出密封瓶,将浸泡溶液过滤,静置后取上层清液 10 mL 采用自动电位滴定仪测定自由氯离子浓度 $c(\text{Cl}^-)$,平衡时结合氯离子量 C_b 由(1)式求得。

1.3.4 XRD 微观测试

氯离子等温吸附试验结束后,取吸附后样品(未掺减水剂的空白样品和减水剂掺量为 0.5% 的样品,浸泡液 NaCl 溶液的浓度分别为 0.08 mol/L 和 1.00 mol/L) 和吸附前样品(未掺减水剂的空白样品和减水剂掺量为 0.5% 的样品)进行对比分析。将试验样品颗粒磨细后,在 60℃ 环境下真空干燥 3 d,然后进行 XRD 分析。所用 X 射线衍射仪型号为 D/Max-RB,扫描速度为 5°/min。

2 结果与讨论

2.1 氯离子等温吸附

图 1 为不同减水剂掺量、不同水灰比时水泥浆体对氯离子的等温吸附曲线,从图 1 中可以看出, C_b 和 $c(\text{Cl}^-)$ 之间是非线性相关的,且符合下列 2 个非线性相关方程——Freundlich 和 Langmuir 等温吸附曲线方程^[15-16]:

$$C_b = K_F c(\text{Cl}^-)^{1/n} \tag{2}$$

$$C_b = \frac{q_{\max} K_L c(\text{Cl}^-)}{1 + K_L c(\text{Cl}^-)} \tag{3}$$

式中: K_F ——Freundlich 吸附平衡常数, mL/mol ; K_L ——Langmuir 吸附平衡常数, L/mol ; $1/n$ ——经验常数, $q_{\max}$ ——理论单分子饱和吸附量, mg/g 。

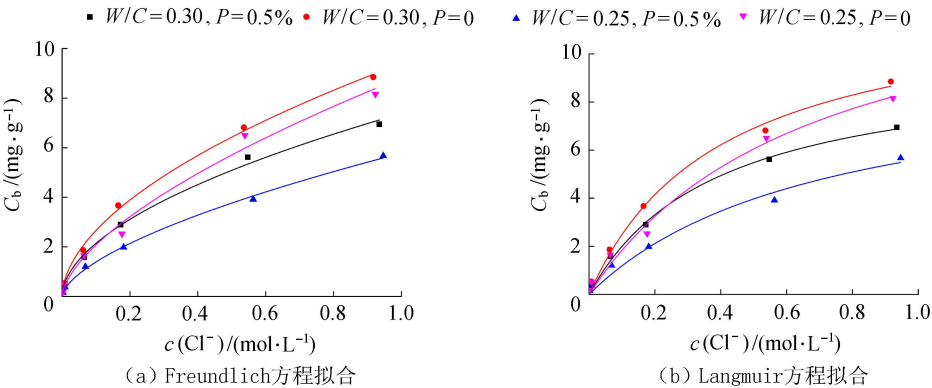


图 1 氯离子等温吸附曲线方程拟合(20℃)

Fig. 1 Equation fitting for the isothermal chloride adsorption (20℃)

从图 1 中可以发现,同一水灰比的试样,掺入减水剂会使其吸附氯离子量减少且影响较大,比较表 1 中不同样品的饱和吸附量 $q_{\max}$ 也可以看出掺入减水剂会使水泥浆结合氯离子能力大幅度减弱。减水剂作为一种阴离子表面活性剂,它的存在会使水泥颗粒表面带负电荷,使其电动电位的负值增大,与氯离子之间的静电斥力增强,吸附氯离子减少;同时减水剂会与氯离子形成竞争吸附,进一步使吸附氯离子能力减弱^[11]。水泥浆对氯离子的吸附过程中,水灰比越大,水泥石的孔隙率越大,吸附能力越强。当水灰比 $W/C=0.3$, $c_0(\text{Cl}^-)=1 \text{ mol/L}$ 时,与减水剂掺量 $P=0.5\%$ 的样品比较, $P=0$ 的空白样品吸附量增大了 27.42%;当 $W/C=0.25$, $c_0(\text{Cl}^-)=1 \text{ mol/L}$ 时,与 $P=0.5\%$ 的样品比较,未掺加减水剂的空白对比样品吸附量增大了 43.63%。因此可见减水剂对水灰比小的样品吸附氯离子能力影响较大。

从表 1 中的拟合结果可以看出, Freundlich 等温吸附方程和 Langmuir 等温吸附方程的拟合决定系数 r^2 均大于 0.98, 均能进行较好的拟合。实验数据既符合 Freundlich 方程又符合 Langmuir 方程, 说明水泥浆体吸附氯离子的过程中包含单分子层吸附和多分子层吸附, 即既有物理吸附又有化学吸附^[17]。

2.2 吸附动力学

图 2 为不同 P 的样品对氯离子的吸附动力学曲线。由图 2 可知, 24 h 之内, 氯离子吸附量 q_t 随时间变化较快; 24 h 之后, 吸附逐渐变缓, 在 10 d 左右达到了吸附平衡。对于 3 种聚羧酸减水剂掺量的样品, 24 h 前吸附量均增加了 10 倍左右, 而 24 h 后至吸附平衡时吸附量只增加了 50% 左右, 因此吸附主要在 24 h 之内完成。3 条曲线都符合这样的规律, 说明聚羧酸减水剂的加入不会改变吸附状态和平衡时间, 但是它对吸附量影响较大, 吸附反应时间 t 为 14 d 时, P 为 0、0.5% 和 1.0% 的样品吸附量分别为 3.60 mg/g、2.90 mg/g 和 2.27 mg/g, 说明掺入聚羧酸减水剂会使样品吸附氯离子的能力明显减弱, 这与氯离子等温吸附试验得出的结论一致。

对于固液吸附, 常采用准一级动力学方程^[18]和准二级动力学方程^[19]来表征和分析吸附动力学过程。

准一级动力学方程

$$\lg(q_e - q_t) = \lg q_e - \frac{k_1 t}{2.303}$$

(4)

准二级动力学方程

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e}$$

(5)

式中: t ——吸附反应时间, h; q_t —— t 时刻吸附氯离子量, mg/g; q_e ——吸附平衡时的氯离子吸附量, mg/g; k_1 ——准一级动力学吸附速率常数, 1/h; k_2 ——准二级动力学吸附速率常数, g/(mg · h); h ——初始吸附速率, $h = k_2 q_e^2$, mg/(g · h)。

经研究发现, 样品对氯离子的吸附在 24 h 内较符合一级动力学, 24 h 之后较符合二级动力学, 拟合曲线如图 3 所示, 相应的拟合参数如表 2 所示。

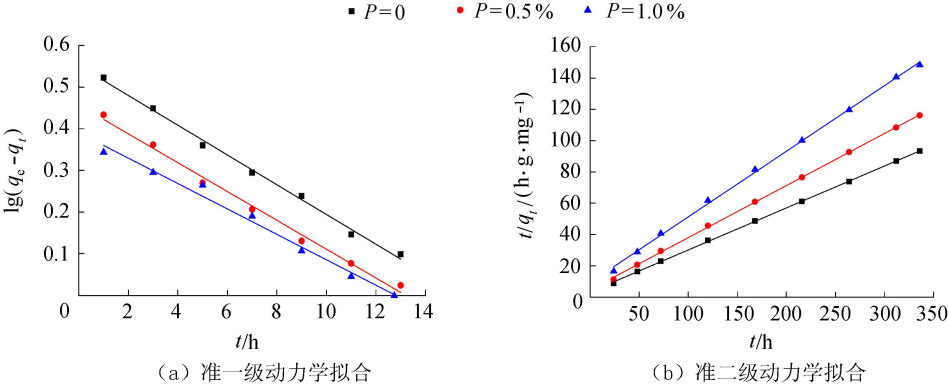


图 3 24 h 内的准一级动力学方程拟合与 24 h 之后的准二级动力学方程拟合
Fig.3 Pseudo-first-order kinetic plot in 24 h and pseudo-second-order kinetic plot after 24 h

表 1 不同 P 时 Freundlich 方程和 Langmuir 方程的拟合参数
Table 1 Binding coefficients of Freundlich equation and Langmuir equation for paste specimens with different P

W/C	P/%	Freundlich 方程			Langmuir 方程		
		$K_F/$ (mL · mol ⁻¹)	1/ n	r^2	$q_{max}/$ (mg · g ⁻¹)	$K_L/$ (L · mol ⁻¹)	r^2
0.25	0	8.817	0.627	0.988	14.310	1.464	0.988
0.30	0	9.399	0.548	0.998	12.429	2.503	0.994
0.25	0.5	5.783	0.618	0.998	9.609	1.408	0.981
0.30	0.5	7.383	0.537	0.996	9.729	2.581	0.995

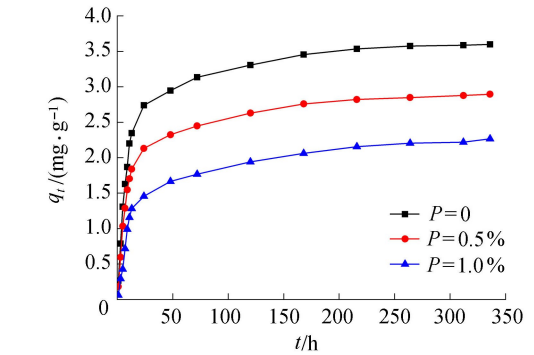


图 2 吸附量随时间变化曲线 (W/C=0.3, T=20°C)
Fig.2 Time dependence of the adsorption amount (W/C=0.3, T=20°C)

表2 不同P时样品对氯离子的准一级和准二级动力学吸附参数

Table 2 Pseudo-first-order and pseudo-second-order kinetic parameters for the adsorption of chloride ions with different P

P/%	$q_{e,exp}/$ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	准一级动力学				准二级动力学				
		$q_{e,cal}/(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	$\Delta q/\%$	k_1/h^{-1}	r^2	$q_{e,cal}/(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	$\Delta q/\%$	$k_2/(\text{g} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1})$	$h/(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1})$	r^2
0	3.599	3.562	1.03	0.082	0.995	3.727	3.56	0.022	0.304	0.999
0.5	2.895	2.865	1.04	0.080	0.991	3.104	7.22	0.021	0.203	0.999
1.0	2.265	2.458	8.52	0.070	0.985	2.385	5.30	0.019	0.107	0.998

注: $q_{e,exp}$ 为实验平衡吸附量, $q_{e,cal}$ 为计算平衡吸附量, Δq 为理论值与实验值差值的变化率。

根据图3的斜率和截距可求得计算平衡吸附量 $q_{e,cal}$,并由式(6)计算出 q ,发现通过准一级动力学方程和准二级动力学方程拟合计算出的平衡吸附量和实验值相差不大,均小于10%,说明两者的拟合结果良好。结合图3和表2发现,24 h之内准一级动力学方程拟合度较好,其 $r^2>0.98$;24 h之后准二级动力学方程拟合度更好,其 $r^2>0.99$ 。这说明掺入聚羧酸减水剂的样品的吸附过程,在短时间内主要受物理作用控制,在长时间内主要受化学作用控制。结合图2可以看出,整个吸附过程物理吸附占主导。 P 越大,吸附速率常数(k_1,k_2)越小,达到平衡时间越长,吸附速率越缓慢,此外初始吸附速率 h 随减水剂掺量的增大呈减少趋势。

$$\Delta q = \frac{|q_{e,cal} - q_{e,exp}|}{q_{e,exp}} \times 100\%$$

(6)

2.3 吸附热力学

在不同温度下进行了减水剂掺量不同时样品对氯离子的等温吸附实验,图4为不同温度下的吸附等温线。

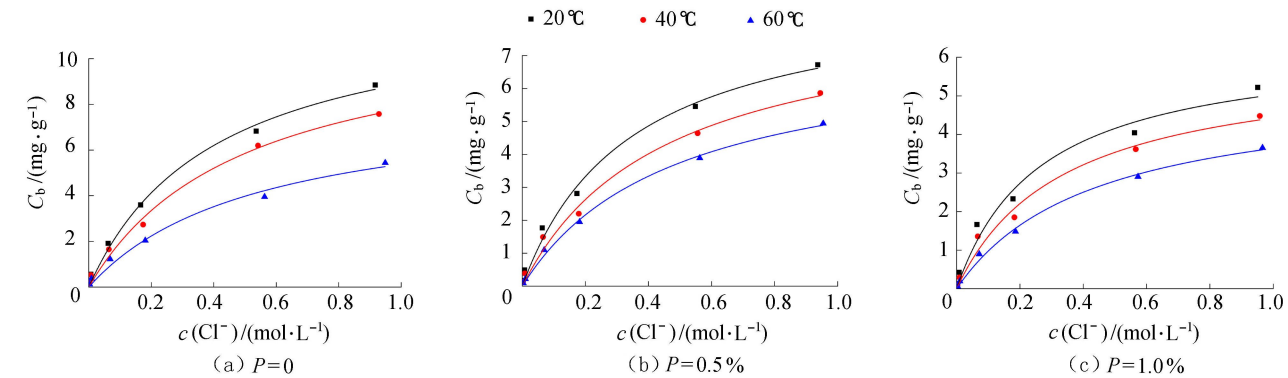


图4 不同温度下不同减水剂掺量的样品对氯离子的等温吸附线

Fig. 4 Isothermal absorption curves of chloride ions in paste specimens with the different content of polycarboxylate superplasticizer at different temperatures (W/C=0.3)

从图4可以看出,无论 P 值大小,氯离子的吸附量均随温度的升高而减少,说明升温对水泥浆体固化氯离子有负面影响。一方面,温度升高,物质分子运动加速,产生物理吸附解吸现象;另一方面,Friedel盐随温度升高其溶解度增加。采用Langmuir等温吸附方程对吸附数据进行分析,并利用式(7)^[20-22]计算吸附过程的Gibbs自由能变 ΔG ,焓变 ΔH 以及熵变 ΔS 。

$$\Delta G = -R(T + 273.15) \ln K_L$$

(7)

$$\ln K_L = \frac{-\Delta H}{R(T + 273.15)} + \frac{\Delta S}{R}$$

(8)

式中: T ——温度, $^{\circ}\text{C}$; K_L ——Langmuir吸附平衡常数; R ——气体摩尔常数, $R=8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ 。

图5为 $\ln K_L$ 对 $1/T_F$ 的关系曲线,其中 $T_F=T+273.15\text{K}$ 。由图5可见, $\ln K_L$ 对 $1/T_F$ 线性拟合较好。根据直线的斜率和截距分别求得 ΔH 、 ΔS ,结果见表3。

由表3可知:在不同减水剂掺量和不同初始温度下,样品对

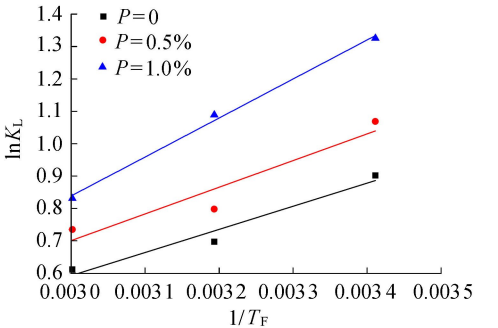


图5 $\ln K_L$ 对 $1/T_F$ 的关系曲线

Fig. 5 Relationship curve between $\ln K_L$ and $1/T_F$

- [2] 孙成,李洪锡,张淑泉,等. 钢筋混凝土腐蚀研究综述[J]. 材料导报, 2000, 14(5): 27-28. (SUN Cheng, LI Hongxi, ZHANG Shuquan, et al. Review of research on reinforced concrete corrosion [J]. Materials Review, 2000, 14(5): 27-28. (in Chinese))
- [3] XU Jinxia, JIANG Linhua, WANG Jingxiang. Influence of detection methods on chloride threshold value for the corrosion of steel reinforcement[J]. Construction and Building Materials, 2009, 23(5): 1902-1908.
- [4] 蒋林华,白舒雅,徐金霞,等. 钢筋锈蚀氯离子临界浓度研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2015, 35(5): 77-82. (JIANG Linhua, BAI Shuya, XU Jinxia, et al. Research progress of critical chloride concentration in steel corrosion[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35(5): 77-82. (in Chinese))
- [5] LUO R, CAI Y B, WANG C Y, et al. Study of chloride binding and diffusion in GGBS concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2003, 33(1): 1-7.
- [6] 李梅,温勇,张广泰,等. 矿物掺合料对混凝土抗氯离子渗透性的影响综述[J]. 材料导报, 2013, 27(11): 107-110. (LI Mei, WEN Yong, ZHANG Guangtai, et al. Review of the influence of mineral admixtures on chloride ion permeability of concrete[J]. Materials Review, 2013, 27(11): 107-110. (in Chinese))
- [7] 勾密峰,管学茂. 水泥基材料固化氯离子的研究现状与展望[J]. 材料导报, 2010, 24(11): 124-127. (GOU Mifeng, GUAN Xuemao. Research status and prospect of chloride ion curing by cement based materials[J]. Materials Review, 2010, 24(11): 124-127. (in Chinese))
- [8] ISHIDA T, MIYAHARA S, MARUYA T. Chloride binding capacity of mortars made with various portland cements and mineral admixtures[J]. Journal of Advanced Concrete Technology, 2008, 6(2): 287-301.
- [9] SONG Zijian, JIANG Linhua, ZHANG Ziming, et al. Distance-associated chloride binding capacity of cement paste subjected to natural diffusion[J]. Construction and Building Materials, 2016, 112: 925-932.
- [10] DE W K, COLOMBO A, COPPOLA L, et al. Impact of the associated cation on chloride binding of Portland cement paste[J]. Cement and Concrete Research, 2015, 68: 196-202.
- [11] XU Jinxia, FENG Wei, JIANG Linhua, et al. Influence of surfactants on chloride binding in cement paste[J]. Construction and Building Materials, 2016, 125: 369-374.
- [12] LI Shun, YU Qijun, WEI Jiangxiang. Effect of molecular structure of polycarboxylate water reducers on hydration of cement[J]. Journal of the Chinese Silicate Society, 2012, 40(4): 613-619.
- [13] TOLEDANO P M, LORENZO P M, GONZALEZO F B, et al. Effect of polycarboxylate superplasticizers on large amounts of fly ash cements[J]. Construction and Building Materials, 2013, 48: 628-635.
- [14] TANG L, NILSSON L O. Chloride binding capacity and binding isotherms of OPC pastes and mortars[J]. Cement and Concrete Research, 1993, 23(2): 247-253.
- [15] 周良春,孟祥光,李建梅,等. β -环糊精修饰的壳聚糖对氯酚吸附的动力学和热力学[J]. 物理化学学报, 2010, 28(7): 1615-1622. (ZHOU Liangchun, MENG Xiangguang, LI Jianmei, et al. Kinetics and thermodynamics of adsorption of chlorophenols onto β -cyclodextrin modified chitosan[J]. Acta Physico-Chimica Sinica, 2010, 28(7): 1615-1622. (in Chinese))
- [16] WU Jian, ZHANG Liang, LONG Chao, et al. Adsorption characteristics of pentane, hexane, and heptane: comparison of hydrophobic hypercrosslinked polymeric adsorbent with activated carbon[J]. Journal of Chemical and Engineering Data, 2017, 57(57): 3426-3433.
- [17] MARTIN-PEREZ B, ZIBARA H, HOOTON D, et al. A study of the effect of chloride binding on service life predictions[J]. Cement and Concrete Research, 2000, 30(8): 1215-1223.
- [18] BOPARAI H K, JOSEPH M, O'CARROLL D M. Kinetics and thermodynamics of cadmium ion removal by adsorption onto nano zerovalent iron particles[J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, 186(1): 458-465.
- [19] YU Y G, ZHANG Y X. Coupling of chemical kinetics and thermodynamics for simulations of leaching of cement paste in ammonium nitrate solution[J]. Cement and Concrete Research, 2017, 95: 95-107.
- [20] 范荣玉,郑细鸣. 铅(II)离子印迹复合膜对重金属离子的吸附热力学与吸附动力学[J]. 化工学报, 2013, 64(5): 1651-1659. (FAN Rongyu, ZHENG Ximing. Adsorption thermodynamics and adsorption kinetics of heavy metal ions by lead (II) ion imprinted composite membrane[J]. CIESC Journal, 2013, 64(5): 1651-1659. (in Chinese))
- [21] WU Z J, JOO H, LEE K. Kinetics and thermodynamics of the organic dye adsorption on the mesoporous hybrid xerogel[J]. Chemical Engineering Journal, 2005, 112(1/2/3): 227-236.
- [22] 王宝贝,蒲洋,林丽芹,等. 离子交换树脂对D-甘油酸的吸附热力学和动力学[J]. 化工学报, 2016, 67(11): 4671-4677. (WANG Baobei, PU Yang, LIN Liqing, et al. Thermodynamics and kinetics of D-glyceric acid adsorption on ion exchange resin [J]. CIESC Journal, 2016, 67(11): 4671-4677. (in Chinese))