

受力状态下混凝土试件氯离子侵蚀试验

李国平¹ 胡方健¹ 吴用贤^{1,2}

(1 同济大学桥梁工程系 上海 200092 2 同济大学建筑设计院桥梁分院 上海 200092)

摘要: 氯离子侵入而导致的钢筋锈蚀现象是混凝土结构的常见病害之一, 因此混凝土抵抗氯离子侵入的能力对其耐久性有重要影响。进行氯离子侵蚀试验是研究氯离子侵入规律的有效手段, 但目前的研究成果大部分是针对无应力状态下的普通混凝土, 对处于受力状态下的混凝土研究很少。为了研究受力状态下混凝土的抗氯离子侵入性能, 对混凝土进行了盐溶液浸泡和盐雾试验, 得出未开裂的试件在不同水灰比、受力状态、应力水平和作用环境下的试验结果, 并对其进行比较分析。试验结果表明: 减小水灰比能提高混凝土的抗氯离子侵蚀能力; 在拉应力状态下的氯离子含量比无应力状态下的要多; 在压应力状态下的氯离子含量取决于压应力水平; 盐溶液浸泡环境对混凝土结构的作用比盐雾严重得多。

关键词: 混凝土 氯离子侵蚀 应力状态 浸泡 盐雾

1 概述

有大量混凝土结构处于氯盐环境之中, 例如在海洋环境、冬季除冰盐作用下的混凝土桥梁、海港码头混凝土结构、近海地区的混凝土建筑、盐碱地区的混凝土基础等。氯离子侵入混凝土结构内部, 破坏钢筋钝化膜, 引起钢筋锈蚀、结构承载力下降和耐久性降低, 这是混凝土结构失效的一个主要原因。各国每年因维修、加固受损混凝土结构而花费了大量资金, 造成巨大的经济损失, 很多都是由于混凝土耐久性不足造成的。混凝土的抗氯离子渗透性是其耐久性的关键指标之一, 氯离子扩散试验研究是解决此问题的基础。针对日益严重的氯盐腐蚀现象, 国内外学者进行了研究, 并取得了一系列成果, 这主要集中在氯离子侵蚀模拟试验(林毓梅和冯琳, 1995; Konin等人, 1998; Gowripalan等人, 2000; 涂永明, 2002; 何世钦, 2004; 黄素辉, 2007; Ghanem等人, 2008)、实测试验(Costa and Appleton, 2002; Smith等人, 2001; Castro等人, 2001; Poupard等人, 2006)、影响因素(Mangat等人, 1994; Al-Khaja, 1997; Bader, 2003; Page等人, 1986; Jau和Tsay, 1998; Haque等人, 1992; Thomas和Bamforth, 1999; LENG等人, 2000; Mackechnie和Alexander, 1997; Hong和Hooton, 2000; Sandberg等人, 1998; Haque和Al-Khaiat 1999; Hillier等人, 2000; Kaushik和Islam,

1995), 计算模型(Puatatsananon and Saouma, 2005; Zhang and Lounis, 2009; Val and Trapper, 2008; Kong等人, 2002; Ann等人, 2009)和扩散机理研究(Boddy, 1999; Basheer等人, 2001; Chee和Eun, 1995; Neville, 1995)等方面。本文将以试验为基础, 研究氯离子在高强度混凝土中的侵蚀规律。

目前的氯离子侵蚀试验大部分都是针对无应力状态和一般强度等级的钢筋混凝土, 关于在受力状态下和较高强度混凝土的研究还很少。在实际结构中, 混凝土通常处于受力状态, 氯离子在各种受力状态和不同应力水平下的侵蚀规律是有差别的。随着社会的发展, 高强混凝土得到了广泛应用, 特别是桥梁工程。由于其组分与一般强度等级混凝土有所不同, 氯离子在其内部的侵蚀规律也有一定的差异。

林毓梅和冯琳(1995)、Konin等人(1998)、Gowripalan等人(2000)、涂永明(2002)、何世钦(2004)和黄素辉(2007)分别进行了混凝土试件在受力状态下的氯离子侵蚀试验。总体来看, 涂永明(2002)和黄素辉(2007)的试验较为全面, 对试件进行了无应力和拉、压应力状态下的试验。从涂永明(2002)和黄素辉(2007)的试验数据来看, 拉应力状态下的氯离子扩散速度最快, 无应力状态次之, 压应力状态最小, 并得出: 在拉应力状态下, 氯离

子侵蚀速度随着拉应力的增大而增大；在压应力状态下，氯离子侵蚀速度随着压应力的增大而减小。由于混凝土强度越高，所用骨料越细，因此混凝土的密实度会随着强度等级的提高而增大，其抗氯离子侵蚀能力也会提高，Konin等人（1998）、涂永明（2002）、何世钦（2004）和黄素辉（2007）的试验结果证实了这点（Konin等人所采用的混凝土强度等级为C45、C80和C100，涂永明和黄素辉所采用的为C40和C50，何世钦采用的为C25和C35）。水灰比是反映混凝土密实度的一个重要指标，因此可用水灰比的大小来衡量混凝土抵抗氯离子入侵的能力，主要表现在水灰比与氯离子扩散系数的关系。Konin等人（1998）、涂永明（2002）、何世钦（2004）和黄素辉（2007）的试验结果表明：水灰比越小，扩散系数越小（Konin等人所采用的水灰比为0.50、0.39和0.27，涂永明所采用的为0.4和0.5，何世钦所采用的为0.5和0.42，黄素辉所采用的为0.3、0.4和0.5）。

但这些试验尚存不足：Konin等人（1998）、Gowripalan等人（2000）、涂永明（2002）、何世钦（2004）和黄素辉（2007）所做试验仅考虑单一环境作用，没有对不同环境下的氯离子侵蚀规律进行比较（Konin等人的试验环境为盐雾干湿交替，Gowripalan等人的为盐溶液浸泡，涂永明的为盐雾，何世钦的为冻融-盐溶液浸泡，黄素辉的为盐溶液单面浸泡）。在Gowripalan等人（2000）、涂永明（2002）、何世钦（2004）和黄素辉（2007）所做试验中没有

考虑由于混凝土收缩徐变和钢筋松弛而导致的混凝土应力的降低（他们都使用粗钢筋对试件进行加载，用混凝土的弯曲受拉状态代替轴向受拉）。涂永明（2002）和黄素辉（2007）考虑了受压状态，但混凝土的压应力水平较低，与混凝土桥梁在使用阶段出现的最大压应力还有差距。在涂永明的试验中，最大压应力为 $0.45f_{ck}$ ，黄素辉（2007）的最大为 $0.22f_{ck}$ 。按照《公路钢筋混凝土预应力混凝土桥涵设计规范》（以下简称“公桥规”）中的规定进行取值。

为了解决上述问题，更准确的获得不同水灰比的高强混凝土在各种受力状态和应力水平下的抗氯离子侵蚀特性，本文针对桥梁常用C50混凝土设计了氯离子侵蚀试验，为海洋环境及冬季道路除冰盐环境下预应力混凝土结构的耐久性设计和已建预应力混凝土结构的耐久性评估打下基础。

2 混凝土构件氯离子侵蚀试验

氯离子环境分成两类：盐溶液浸泡环境以及盐雾环境。盐溶液浸泡侵蚀环境模拟潮差区、水下区中的基桩、桥墩和冬季除冰盐公路桥梁面板所处的环境；盐雾侵蚀环境模拟如大气区、浪溅区中的海工混凝土桥梁所处的环境。盐雾试验主要用来与盐溶液浸泡试验进行对比。在对这两类试验环境的比较中，试件的水灰比都为0.40。

2.1 试件及试验参数

2.1.1 试件

参照现有氯离子扩散试验和碳化试验，试件尺寸设计为 $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ ，具体普通钢筋构造见图1。

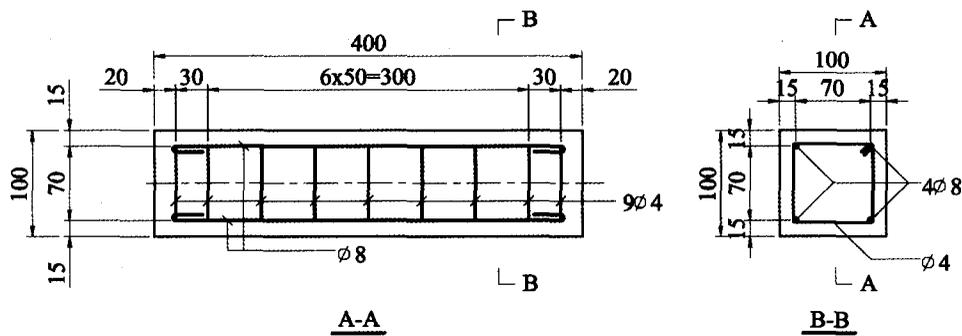


图1 试件配筋（单位：cm）

参考桥梁结构常用水灰比,盐溶液浸泡试验考虑了三种情形:0.35、0.40和0.45。

试件采用42.5MPa普通硅酸盐水泥,砂子采用的是普通河砂,石子为石灰岩碎石,一级配5~25mm,混凝土强度设计等级为C50。试件配合比及混凝土28d实测抗压强度见表1。

2.1.2 受力状态及应力大小

根据“公桥规”中的规定,桥梁结构常用C50混凝土轴心抗压强度标准值取为 $f_{ck}=32.4\text{MPa}$,轴心抗拉强度标准值 $f_{tk}=2.65\text{MPa}$ 。“公桥规”中规定预应力混凝土桥梁在使用阶段截面拉、压应力

常用设计值,按照混凝土桥梁构件实际工作状态设计了两种拉应力水平:0.30 f_{tk} 、0.50 f_{tk} ,对应的拉应力设计值分别为0.795MPa、1.325MPa;考虑到混凝土受压区的最大压应力不能大于0.50 f_{ck} ,设计了两种压应力水平:0.30 f_{ck} 、0.50 f_{ck} ,对应的压应力值分别为9.72MPa、16.2MPa,详见表2。

2.1.3 浸泡环境

考虑到海水的盐度一般为3.5%,并参照何世钦(2004)的试验,取用浓度为3.5%的NaCl溶液对所有试件进行浸泡,试件的详细方案见表3。试件设计浸泡天数为:40d、60d及90d。

表1 试件材料指标

编号	水灰比	水泥	砂	石	水	减水剂	强度等级
1	0.35	485	600	1149	170	0.80%	C57.9
2	0.40	485	600	1149	194	0.80%	C64.6
3	0.45	485	600	1149	218	0.80%	C51.0
4	0.40	485	600	1149	194	0.80%	C50.0

注:根据“公桥规”中的规定,混凝土强度等级测试采用的是尺寸为100×100×100mm的立方体试件,在标准养护28d后测得其平均抗压强度,再乘以试件的尺寸修正系数 $k=0.95$,从而得到试件的强度等级;编号1至3混凝土试件用于浸泡试验,编号4混凝土试件用于盐雾试验。

表2 浸泡侵蚀条件下试件的试验工况

受力状态	工况	试件尺寸(mm)	试件的应力水平(MPa)
无应力状态	1	100×100×400	0
拉应力状态	1	100×100×400	0.30 f_{tk}
	2		0.50 f_{tk}
压应力状态	1	100×100×400	0.30 f_{ck}
	2		0.50 f_{ck}

表3 浸泡条件下试件的详细方案

试件编号	数量	试件编号	数量
SSI-WC35-N-D40	1	SSI-WC40-N-D60	1
SSI-WC35-TK30-D40	1	SSI-WC40-TK30-D60	2
SSI-WC35-CK30-D40	1	SSI-WC40-TK50-D60	2
SSI-WC45-N-D40	1	SSI-WC40-CK30-D60	1
SSI-WC45-TK30-D40	1	SSI-WC40-CK50-D60	1
SSI-WC45-CK30-D40	1	SSI-WC35-N-D90	1
SSI-WC40-N-D40	1	SSI-WC35-TK30-D90	1
SSI-WC40-TK30-D40	2	SSI-WC35-CK30-D90	1
SSI-WC40-TK50-D40	2	SSI-WC45-N-D90	1
SSI-WC40-CK30-D40	1	SSI-WC45-TK30-D90	1
SSI-WC40-CK50-D40	1	SSI-WC45-CK30-D90	1
SSI-WC35-N-D60	1	SSI-WC40-N-D90	1
SSI-WC35-TK30-D60	1	SSI-WC40-TK30-D90	2
SSI-WC35-CK30-D60	1	SSI-WC40-TK50-D90	2
SSI-WC45-N-D60	1	SSI-WC40-CK30-D90	1
SSI-WC45-TK30-D60	1	SSI-WC40-CK50-D60	1
SSI-WC45-CK30-D60	1	合计	39

注:SSI表示盐溶液浸泡试验;WC35表示水灰比为0.35,WC40表示水灰比为0.40,WC45表示水灰比为0.45;N表示无应力状态,TK30表示拉应力状态为0.30 f_{tk} ,TK50表示拉应力状态为0.50 f_{tk} ;CK30表示压应力状态为0.30 f_{ck} ,CK50表示压应力状态为0.50 f_{ck} ;后面的数字40、60、90表示相应的浸泡天数。

2.1.4 盐雾环境

考虑到盐雾箱的空间有限，对照前述较详细的浸泡试验，盐雾试验中混凝土试件的水灰比只取用一种：0.40；拉、压应力状态的应力水平各自考虑一种： $0.30f_{tk}$ 和 $0.30f_{ck}$ 。详见表4。

考虑到盐雾箱中最大盐雾浓度为5%，并参照现有试验[4]，取用浓度为5%的NaCl溶液进行盐雾试验，试件的详细方案见表5。试件设计盐雾作用时间为30d。

2.2 试件加载方法

2.2.1 拉应力状态的实现

试验时以构件的弯曲受拉代替轴向受拉，理由如下：（1）试验设备空间有限，混凝土试件实现轴向受拉难度较大；（2）实际结构中轴向受拉的情况很少，大部分都是弯曲受拉，以弯曲受拉代替轴向受拉更有实际意义。弯曲受拉构件如图2所示。试件的受拉工况见表6。

表4 盐雾侵蚀条件下试件的试验工况

受力状态	工况	试件尺寸 (mm)	试件的应力水平 (MPa)
无应力状态	1	100 × 100 × 400	0
拉应力状态	1	100 × 100 × 400	$0.30f_{tk}$
压应力状态	1	100 × 100 × 400	$0.30f_{ck}$

表5 盐雾侵蚀条件下试件的详细方案

试件编号	数量
SS-WC40-N-D30	1
SS-WC40-TK30-D30	2
SS-WC40-CK30-D30	1
合计	4

注：SS表示盐雾试验；N表示无应力状态，TK30表示拉应力状态为 $0.30f_{tk}$ ；CK30表示压应力状态为 $0.30f_{ck}$ ；后面的数字30表示相应的盐雾天数。

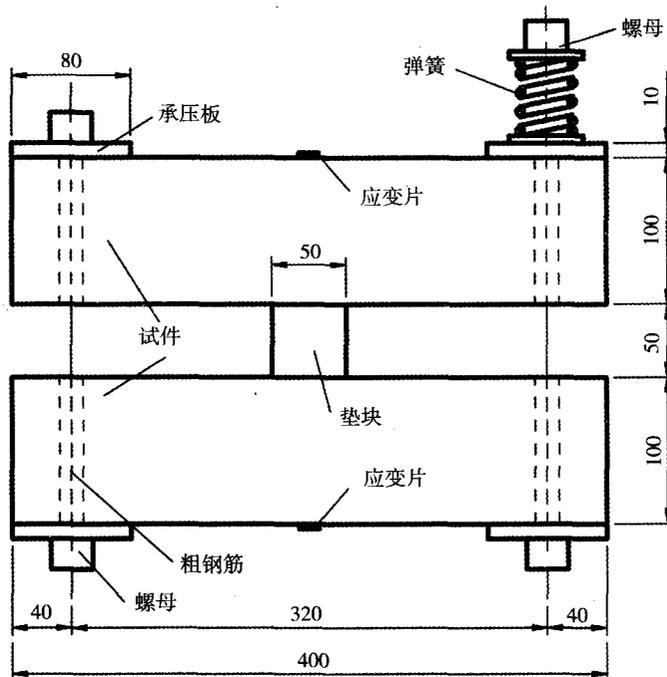


图2 试件弯曲受拉加载 (单位: cm)

表6 预应力混凝土试件的受拉工况

试件编号	计算施加拉应力 (MPa)	剩余拉应力 (MPa)	施加平均拉应力 (MPa)
SSI-WC35-TK30-D40	0.857	0.822	0.839
SSI-WC35-TK30-D60	0.857	0.818	0.838
SSI-WC35-TK30-D90	0.893	0.760	0.826
SSI-WC45-TK30-D40	0.833	0.799	0.816
SSI-WC45-TK30-D60	0.798	0.762	0.780
SSI-WC45-TK30-D90	0.903	0.768	0.835
SSI-WC40-TK30-D40	0.895	0.736	0.816
SI-WC40-TK30-D60	0.877	0.747	0.812
SSI-WC40-TK30-D90	0.877	0.758	0.817
SSI-WC40-TK50-D40	1.498	1.479	1.488
SSI-WC40-TK50-D60	1.516	1.479	1.498
SSI-WC40-TK50-D90	1.498	1.453	1.475
SS-WC40-TK30-D30	0.852	0.802	0.827

把两个试件编为一组，其中水灰比为0.35与0.45且浸泡天数相同的试件配成一对，水灰比为0.40的试件配成一对。加载前先用螺杆将一组试件的一端固定，在另一端的锚杆垫板下放一个刚度较大的弹簧（为了减少收缩徐变产生的应力变化）。然后在试件中部受拉侧的表面贴电阻应变片，用来控制混凝土的拉应变。再用扳手转动螺帽，使试件受弯，产生弯曲拉应力，并以混凝土产生的拉应变为标准控制加载。

在试件加载完成后，记下弹簧的压缩长度 L_1 ，以及此时通过应变片读出的混凝土拉应力 σ_1 ；氯离子扩散试验结束后，将试件取出，重新测量弹簧的压缩长度 L_2 ，然后通过公式（1）计算混凝土的剩余拉应力（由于混凝土的收缩徐变，混凝土的应力会有所减小）。

$$\sigma_2 = \frac{\sigma_1}{L_2} L_1 \quad (1)$$

然后再通过公式（2）计算出在试验期间内混凝土的平均拉应力，以此平均拉应力 $\bar{\sigma}$ 为混凝土试件所受拉应力。在浸泡及盐雾环境下，在混凝土试件施加拉应力的方法相同。

$$\bar{\sigma} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} \quad (2)$$

2.2.2 压应力状态的实现

通过施加预应力可以使试件处于压应力状态。对于压应力为0.30、0.50 f_{ck} 的试件，预应力钢筋采用 $1 \times 7 \phi^{15.2}$ 型钢绞线，抗拉强度标准值 $f_{pk} = 1860 \text{MPa}$ ，采用后张法，在试件内先预留孔道。为减少预应力损失，采用螺纹锚。加载钢绞线及配套垫块和螺纹锚具均专门加工而成，受压试件如图3。试件施加的压应力值见表7。

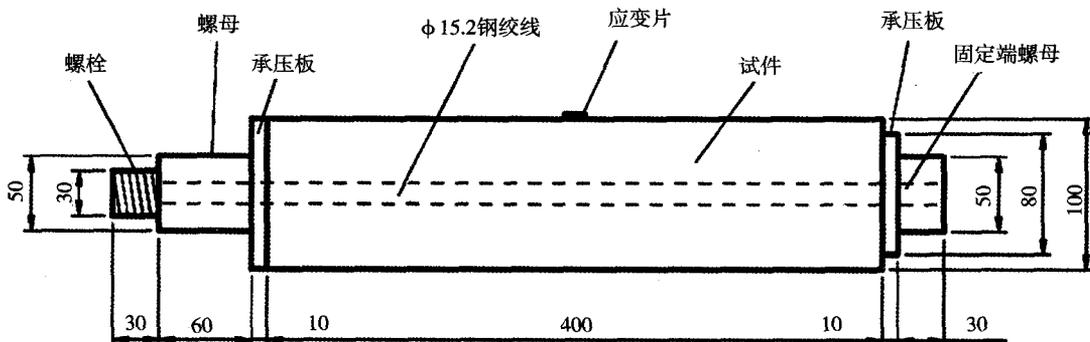


图3 试件受压加载（单位：cm）

表7 预应力混凝土试件的受压工况

试件编号	初始施加压力 (MPa)	最终压力 (MPa)
SSI-WC35-CK30-D40	9.96	9.54
SSI-WC35-CK30-D60	9.78	9.34
SSI-WC35-CK30-D90	9.96	9.45
SSI-WC45-CK30-D40	9.82	9.39
SSI-WC45-CK30-D60	9.75	9.27
SSI-WC45-CK30-D90	9.65	9.11
SSI-WC40-CK30-D40	9.79	9.42
SSI-WC40-CK30-D60	9.68	9.27
SSI-WC40-CK30-D90	9.75	9.28
SSI-WC40-CK50-D40	16.51	15.63
SSI-WC40-CK50-D60	16.22	15.31
SSI-WC40-CK50-D90	16.47	15.45
SS-WC40-CK30-D30	9.83	9.46

为了保证加载的准确性,采用通过粘贴在混凝土表面的应变片控制预应力筋的应力和通过千斤顶张拉时的油表读数控制施加的压力相结合的方法,并以连接应变片的应变箱的读数为标准。为使试件的应力值尽量接近设计值和避免预应力筋回缩产生的过大的预应力损失,对预应力筋采取多次张拉,直至应变箱的读数与设计值接近相同并保持不变,即第一次张拉到设计值时,记下混凝土的初始应变读数,然后再次张拉并拧紧锚具。锚固之后,观察混凝土的应变是否与初始应变读数一致,如果一致,则满足要求;否则,调整直至满足要求为止。在浸泡及盐雾环境下,在混凝土试件施加压力的方法相同。

2.3 试验过程

该实验在中国同济大学材料工程系教育部重点实验室进行。试验的关键之一是实现试件预期的受力状态。在进行盐溶液浸泡试验时,实验室温度为 $25 \pm 2^\circ\text{C}$ 。在进行盐雾试验时,饱和空气桶中的温度为 $47 \pm 3^\circ\text{C}$ 。

2.3.1 浸泡环境作用下的试验

(1) 试件分批浇筑,每次预留3个 $100 \times 100 \times 100\text{mm}$ 的立方体试件来确定混凝土的28d抗压强度。 $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ 的试件在木模中浇筑,24h后拆模,然后放到标准养护试验室中养护28d;

(2) 养护结束后,对试件加载,并使其达到预期的应力状态;

(3) 对加载后的试件表面打磨处理,然后将其两个正方形和三个长方形表面上的浮浆磨去并用环氧树脂涂刷,留出其中一个长方形表面作为渗透面。对于一组拉应力试件,将弯曲受拉面作为渗透面;

(4) 24h后,将试件放入浓度为3.5%的NaCl溶液中,进行浸泡试验,如图4所示。须定期对溶液浓度进行测定,保证溶液的浓度为3.5%左右,并确保试件全部被浸没;

(5) 在试件浸泡达到预定天数后,取出对应的试件,静置24h,量测一组拉应力试件的弹簧长度,计算试件剩余的拉应力;



图4 试件浸泡照片

(6) 拆卸受力装置, 并对试件进行氯离子含量取样测定。

2.3.2 盐雾环境作用

(1) 一次浇筑好4个试件, 每次预留3个 $100 \times 100 \times 100\text{mm}$ 的立方体试件来确定混凝土的28d抗压强度。 $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ 的试件在木模中浇筑, 24h后拆模, 然后放到标准养护试验室中养护28d;

(2) 养护结束后, 对试件加载, 并使其达到预期的应力状态;

(3) 对加载后的试件表面进行打磨处理, 再将其两个正方形表面和三个长方形表面上的浮浆磨去并用环氧树脂涂刷, 留出其中一个长方形表面作为渗透面。对于一组拉应力试件, 将弯曲受拉面作为渗透面;

(4) 在24h后, 将试件放入盐雾箱中进行连续喷雾试验, 如图5。定期向盐雾箱的预热槽中加入浓度为5.0%的NaCl溶液;

(5) 30d后, 取出试件, 静置24h, 量测一组拉应力试件的弹簧长度, 计算试件剩余的拉应力;

(6) 拆卸受力装置, 并对试件进行氯离子含量取样测定。



图5 盐雾试验箱内的试件

2.4 试验取样

取出混凝土试件, 将其与盐溶液接触的表面打磨掉0.5mm左右, 以去除表面吸附的氯盐对样品氯离子含量的影响。在与盐溶液接触的表面相

垂直的方向进行取样, 每5mm为一层, 取样总深度为30mm, 共六层。取得的混凝土样品, 在破碎机上进行破碎处理, 剔除其中的石子和砂砾大颗粒, 获得其中的砂浆样品。将砂浆样品进行研磨处理, 并使其通过0.63mm筛。然后把样品再在磨样机上进行磨细处理, 使其细度在 $80\mu\text{m}$ 以下。磨细的样品在 $105 \pm 5^\circ\text{C}$ 的烘箱中干燥烘干2h, 取出放在干燥器中冷却到室温。称取干燥后的样品5g左右。精确到0.1mg, 放入样品瓶中, 加入50ml左右的去离子水, 塞紧瓶塞, 放在磁力搅拌器上搅拌1h。然后把样品瓶放入 $50 \pm 5^\circ\text{C}$ 的烘箱中加热 $24 \pm 1\text{h}$, 以确保自由氯离子全部溶解于水中。加热到规定时间后取出, 放在空气中冷却至室温, 待用。取样样品采用Euro-II-A型测定仪进行测定。每个样品的测定步骤如下:

(1) 配制浓度为0.0001%、0.001%、0.01%、0.1%和0.1mol/L的标准液(NaCl)。分别从各标准液中称量100ml溶液, 再加入2ml的离子浓度校正液(ISA, 5mol/L, NaNO_3)。如果样品浓度在0.1mol/L以上, 则需制备与之相近浓度的标准液。

(2) 把各种标准液分别放在磁力搅拌器上匀速搅拌1h。每次测定前应将其电极用去离子水和干净毛巾擦干, 再把电极端部放入溶液中, 使用测定仪测量各标准液的电压值(mv)。

(3) 绘制电压读数mv(纵轴)与溶液浓度(横轴)之间的曲线图, 这将作为样品溶液的标定曲线。

(4) 分别测量各样品的电压值mv, 然后在标定曲线上求得对应的溶液浓度。每次测定前, 将30ml样品溶液和2ml的ISA加入干净、干燥的150ml的烧杯内。将其电极用去离子水和干净毛巾擦干后, 再把电极端部放入样品溶液。待测定仪的读数稳定后, 再记录相应电压值mv。

(下期待续)