

# CN2000B抗盐碱腐蚀性能试验研究

苟仕川<sup>1\*</sup> 吴挺鹏<sup>1</sup> 刘向东<sup>1</sup> 张东亮<sup>2</sup> 张明国<sup>2</sup>

1. 成都和拓土木工程有限公司 四川 成都 610000

2. 中国铁路青藏集团有限公司 青海 西宁 810000

**摘要:** 概述了氯盐对钢筋混凝土结构物的破坏机理, 以及对钢筋混凝土结构物的冻融循环破坏的原理进行分析。在实验室通过盐、酸类浸泡试验和冻融循环试验, 对新材料CN2000B的抗盐碱腐蚀和冻融循环的性能进行测试、和综合性评估。证明CN2000B+C具有耐酸、碱、盐、和防冻融破坏性能, 且适用于高寒、高海拔地区的桥梁混凝土结构物的抗盐碱腐蚀和冻融循环的高性能材料。

**关键词:** 氯离子; 盐类腐蚀; 冻融循环; CN2000B; 耐腐蚀性

**DOI:** <https://doi.org/10.37155/2717-5316-0209-1>

## 前言

以德令哈联络线桥梁混凝土结构的腐蚀性病害情况, 通过试验对桥梁结构表面进行抗盐碱防护试验, 并对CN2000B的抗盐碱腐蚀性能进行研究。

## 1 德令哈联络线桥梁结构物病害概况

德令哈联络线: 该线路桥梁混凝土结构梁体、桥墩等表面有不同程度的盐碱腐蚀迹象。

### 1.1 无机物+有机物混合材料

(1) 型号: RD-CN柔性料和固化料。

(2) 型号: INSE砂浆。

(3) 型号: CN2000A和B+C<sup>[10]</sup>。

### 1.2 无机类水泥灰基料

(1) 型号: BD-A, 由四川嘉华特种水泥股份公司提供。

## 2 氯盐对钢筋混凝土结构的破坏<sup>[1]</sup>

### 2.1 氯离子侵蚀钢筋锈蚀机理<sup>[1-2]</sup>

已有结果: 混凝土空隙中含较高的Ca(OH)<sub>2</sub>饱和溶液, PH值≈12.5左右。高碱度环境下, 钢筋被氧化, 生成钝化膜, 该膜致密性好、结构稳定, 使钢筋处于钝化膜状态而不被氧化。但混凝土结构与Cl<sup>-</sup>溶液相接触, Cl<sup>-</sup>的扩散或由毛细孔吸附而被传输到混凝土内的钢筋表面, 当表面混凝土的空隙溶液中游离Cl<sup>-</sup>浓度超限时, PH值大于11.5时, Cl<sup>-</sup>也能破坏其钝化膜, 使钢筋锈蚀。Cl<sup>-</sup>对钢筋表面钝化膜的破坏为局部, 使其露出铁基体, 与尚完好的钝化膜区之间构成腐蚀电池, 电池作用使钢筋表面产生蚀坑。Cl<sup>-</sup>促成腐蚀电池, 加速电池作用, 混凝土中Cl<sup>-</sup>的存在强化离子通道、降低电阻、加速化学腐蚀。但Cl<sup>-</sup>在腐蚀过程中并未消耗, 只起到“搬运”作用, 凡进入混凝土中的Cl<sup>-</sup>会往复破坏, 就是Cl<sup>-</sup>危害的特点之一<sup>[2]</sup>。

氯离子对钢筋的腐蚀主要表现: ①破坏钢筋表面防护性钝化膜; ②生成腐蚀电池, 构成局部坑蚀或均匀腐蚀; ③降低阳极之间电阻, 加速腐蚀; ③形成离子通道, 起导电效应, 提高锈蚀速率。其锈蚀过程见图1<sup>[3]</sup>。

(1) 阳极, 铁失去电子成铁离子, FeCl<sub>2</sub>·4H<sub>2</sub>O的生成, 钢筋表面钝化膜破坏。反应过程:



**\*通讯作者:** 苟仕川, 1987.8.10, 汉族, 男, 四川省眉山市, 成都和拓土木工程有限公司, 本科, 中级工程师, 北京建筑大学, 研究方向: 建筑工程管理——地下空间结构。

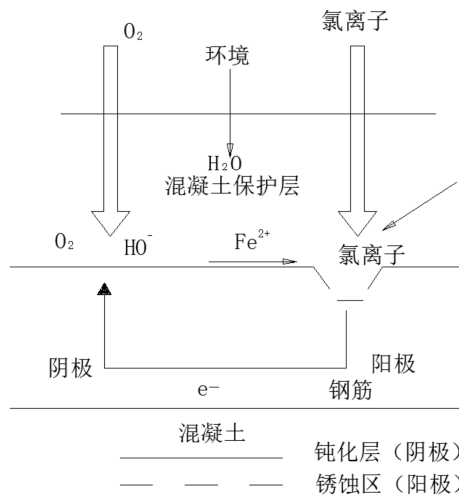


图1

(2) 阴极，电子、水、氧转化成氢氧根离子，起保护钢筋作用。反应为：



(3) 阴极反应产生的氢氧根离子通过带电区域向阳极传递带有负电荷的离子。而阳极形成的 $FeCl_2 \cdot 4H_2O$ 向含氧量较高的混凝土孔溶液中迁移，分解为氢氧化亚铁，在湿度和通风条件下，反应生成铁锈。



### 2.2 氯离子在混凝土中的扩散模型<sup>[2]</sup>

基于所处环境不同，外部Cl通过渗透、扩散及化学迁移等方式侵入混凝土。通常，氯离子的侵入是多种方式的组合结果。

对于现有未开裂且水灰比不太低的结构，大量检测结果表明Cl浓度可认为是线性扩散过程，用Fick定律可以很方便地将氯离子的扩散浓度、扩散系数及扩散时间联系起来，可直观地体现结构的耐久性。目前，Fick第二定律已经成为预测氯离子在混凝土中扩散过程的经典理论。Fick第二定律可表示：

$$\frac{\partial C_{cl}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (D_{cl} \frac{\partial C_{cl}}{\partial x}) \quad (6)$$

式中， $C_{cl}$ 为氯离子浓度（%），一般以氯离子占水泥或混凝土重量百分比表示， $t$ 为时间（年）， $x$ 为位置（cm）， $D_{cl}$ 为扩散系数（ $mm^2/年$ ）。

假定混凝土结构表面氯离子浓度恒定，混凝土结构相对暴露表面为半无限介质，相应的初始条件和边界条件可以写为：

初始条件：

$$C_{cl}(x,0) = 0 \quad (7)$$

边界条件：

$$C_{cl}(0,t) = C_s \quad (8)$$

$$C_{cl}(\infty, t) = C_0 \quad (9)$$

根据初始条件和边界条件，可以得到式6的解为：

$$C_{x,t} = C_0 + (C_s - C_0) [1 - \text{erf}(\frac{x}{\sqrt{4D_{cl} \cdot t}})] \quad (10)$$

式中， $C_{x,t}$ 时刻 $x$ 深度处的氯离子浓度；

$C_0$ —氯离子初始浓度;  
 $C_s$ —混凝土表面的氯离子浓度;  
 $D_{cl}$ —为扩散系数;  
 $\text{erf}(z)$  为误差函数;

$$\text{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z \exp(-z^2) dz \quad (11)$$

### 2.3 钢筋锈蚀对结构性能的影响

氯盐渗透到混凝土中,提高了氢氧化钙的溶解度,加剧对混凝土的溶解侵蚀和冻融破坏。氯盐最主要的破坏还是对钢筋的腐蚀,当混凝土中 $\text{Cl}^-$ 进入钢筋表面并超临界值时,原来处于钝化状态的钢筋就开始腐蚀。混凝土中钢筋一旦锈蚀,即钢筋表面产生锈蚀产物,向周围混凝土孔隙中扩散。变成氧化铁,体积膨胀,因产物不同,可膨胀2~7倍。使混凝土保护层开裂、结构承载力下降或丧失。因此,氯盐是构成钢筋混凝土结构耐久性破坏因素之一。钢筋锈蚀破坏对结构性能影响如图2<sup>[4]</sup>。

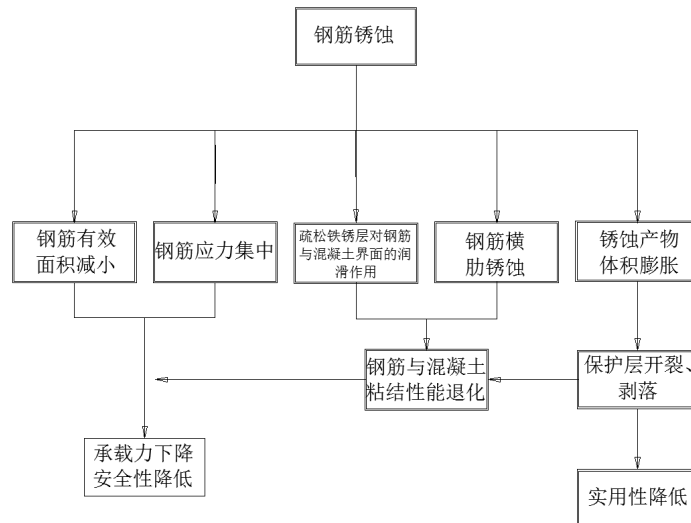


图2

### 2.4 混凝土中氯离子含量的临界值

钢筋混凝土空隙液的游离 $\text{Cl}^-$ 的最高浓度,被称为混凝土氯化物的临界浓度<sup>[5]</sup>。当 $\text{Cl}^-$ 含量在钢筋周围达到一定浓度时,钢筋钝化膜开始破坏,丧失对钢筋的保护,引起钢筋锈蚀。因此,混凝土中 $\text{Cl}^-$ 无论是“内渗”还是“外渗”,为保证耐久性,应根据砼的种类、环境条件等对拌合物中氯化物的量加以限制。

关于钢筋锈蚀的 $\text{Cl}^-$ 临界值仍有争议,因 $\text{Cl}^-$ 临界值受到多种因素和试验条件影响,理论上它是随机变量,氯离子的临界值应在大量统计的基础上,在一定的概率下取得。

针对混凝土拌合物中 $\text{Cl}^-$ 含量的最高限值,国外的有关规定要求也不尽一致。其中,日本《混凝土标准规范》(1986)规定<sup>[2]</sup>:

(1) 对钢筋混凝土和后张预应力混凝土,混凝土中的 $\text{Cl}^-$ 总量定为 $0.6\text{Kg}/\text{m}^3$ 以下。

(2) 对耐久性要求高的钢筋混凝土和后张预应力混凝土,在可能发生盐害和电腐蚀的场合以及采用先张预应力混凝土的场合,混凝土中 $\text{Cl}^-$ 的总量为 $0.3\text{Kg}/\text{m}^3$ 以下。

(3) 针对预拌混凝土(JLSA5308-1986),混凝土的氯化物含量,在卸货地点、 $\text{Cl}^-$ 必须在 $0.3\text{Kg}/\text{m}^3$ 以下。但在得到业主认可时,可在 $0.6\text{Kg}/\text{m}^3$ 以下。

钢筋钝化机理研究,部分学者认为混凝土中钢筋钝化膜的破坏并非单一取决于 $\text{Cl}^-$ 浓度,因钢筋的活性还受PH值( $\text{OH}^-$ 浓度)影响,当 $\text{OH}^-$ 浓度高,钝化膜稳定性好,破坏钝化膜所需 $\text{Cl}^-$ 浓度大;相反,当 $\text{OH}^-$ 浓度低,破坏钝化膜所需 $\text{Cl}^-$ 浓度小。因此,用 $\text{Cl}^-/\text{OH}^-$ 来表示钢筋活性更合理。豪斯曼:对 $\text{Cl}^-$ 内掺混凝土 $\text{Cl}^-/\text{OH}^-$ 的临界值为0.6,这个数值

被许多学者所接受。兰伯特等发现对Cl<sup>-</sup>外渗型混凝土，Cl<sup>-</sup>/OH<sup>-</sup>的临界值为3，对Cl<sup>-</sup>内掺型混凝土该临界值在0.3~0.6之间，与豪斯曼的试验结果接近。对同一种混凝土，氯盐总掺量或环境氯盐浓度越大，则混凝土中Cl<sup>-</sup>/OH<sup>-</sup>也越大，其他学者根据内掺型和外渗型混凝土的Cl<sup>-</sup>/OH<sup>-</sup>临界值分别为0.6和3，得到氯盐总掺量与环境氯盐浓度临界值见表1<sup>[6]</sup>。

表1 不同混凝土的氯盐总掺量和环境氯盐浓度临界值

混凝土种类	内掺型混凝土的氯盐总掺量 临界值(%)	外渗型混凝土的氯盐浓度 临界值(×10 )
中等强度混凝土	1.15	5 000
高强混凝土	0.85	10 500
掺粉煤灰高强混凝土	0.8	-
粉煤灰和高效减水剂 双掺型高强混凝土	0.45	10 000

### 3 溶液对混凝土的腐蚀

桥梁混凝土结构物损坏分为物理和化学损坏。盐碱破坏、冻融膨胀、沙尘暴侵蚀及不规范施工等均可引起桥梁混凝土结构表面的损坏。

#### 3.1 混凝土冻融破坏分析

高寒地区桥梁混凝土结构干湿-冻融循环不可避免。结构物易发生剥落损坏，盐碱溶液也会加剧冻融剥落。

#### 3.2 冻融机理<sup>[7]</sup>

冻融机理研究的3种代表性理论：水压力理论、渗透压理论和蒸汽压理论。水压力理论：混凝土毛细管中的水结冰时体积膨胀约为9%，空隙间的水分转移渗流，使混凝土内部应力变化导致开裂；渗透压理论：混凝土内空隙或凝胶孔内水含有可溶性物质。温度降低时，毛细管或气孔壁上形成冰晶体，因水结冰使得孔隙中溶液浓度变化，产生渗透压，使凝胶孔内的水向毛细管或气孔产生内应力，导致裂纹；蒸汽压理论：因毛细管内水的冰点与孔径有关，孔径越小，水的冰点越低。当温度降低，水不会立即结冰，而在凝胶孔、气孔等孔壁上形成冰晶体。冷水具有比冰高的饱和蒸汽压，导致热力学不平衡，使形成冰晶体、吸附水的解吸附作用，降低蒸汽压力，引起水在浆体内产生内应力，导致产生裂缝。

### 4 CN2000B 抗腐蚀性能

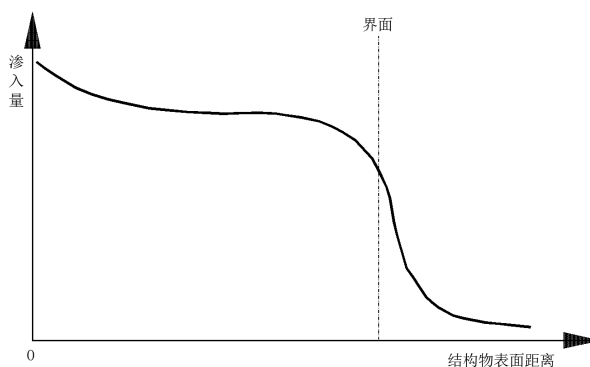


图3 渗入量和深度的关系

CN2000B及CN2000C&D，涂覆在混凝土表面阻断水入侵至混凝土内部，防止因水引起的腐蚀破坏。

#### 4.1 CN2000B抗盐类腐蚀试验<sup>[8]</sup>

##### 4.1.1 试样制备

抗折、抗压试样：CN2000B料:水 = 1:0.4的灰水比，制备40mm×40mm×160mm的B料净浆试件，标准条件下养护7天。

抗渗试样：水泥:砂:水 = 1:4:0.62的比例，制备Φ70mm×Φ80mm×30mm。20℃水中养护7天。在饱和面干状态下，按2kg/m<sup>2</sup>的用量和0.4的水灰比配制的CN2000B浆料涂覆在试件表面，两次涂覆总厚约2mm。标准条件下养护7天。

4.1.2 盐类侵蚀试验

抗折、抗压和抗渗试件，分别在20℃的5%氯化钠溶液和5%硫酸钠溶液、5%硫酸镁溶液中浸泡60天及在5%氯化钠溶液中浸泡180天。另一组试件在50℃的10%氯化钠溶液中浸泡60天，进行强化侵蚀试验。抗折试件每种工况浸泡三件，抗渗试件每种工况浸泡三件。侵蚀结束后，测量抗折、抗压和抗渗强度，计算抗腐蚀系数。

4.1.3 表面形貌的变化

观察各组试样的表面形貌变化，结果列于表2。

表2 侵蚀后表面形貌

侵蚀介质	浸泡天数	表面形貌
水, 20℃	60、180	无剥落, 无开裂, 无粉化
5%NaCl 溶液, 20℃	60、180	无剥落, 无开裂, 无粉化
10%NaCl 溶液, 50℃	60	无剥落, 无开裂, 无粉化
5%Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 溶液, 20℃	60	无剥落, 无开裂, 无粉化
5%MgSO <sub>4</sub> 溶液, 20℃	60	无剥落, 无开裂, 无粉化

CN2000B净浆抗折、抗压试件经以上侵蚀试验后，试件表面无剥落、开裂等损伤，证明CN2000B有抗腐蚀性能。

4.1.4 抗盐类腐蚀系数测试

抗腐蚀系数在同等条件下，受腐蚀试件与对比试件的强度之比，即抗腐蚀系数K = 溶液中强度/清水中强度。抗腐蚀系数表材料的性能，K值越大，性能越好。测量上述各组试样的抗折强度、抗压强度和抗渗压力。测试结果及抗腐蚀系数的计算值列于表3。

表3 侵蚀后性能测试和抗腐蚀系数

侵蚀条件	侵蚀天数 /d	抗折腐蚀系数 K <sub>#</sub>		抗压腐蚀系数 K <sub>≡</sub>		抗渗腐蚀系数 K <sub>#</sub>	
		抗折强度 /MPa	K <sub>#</sub>	抗压强度 /MPa	K <sub>≡</sub>	抗渗压力 /MPa	K <sub>#</sub>
水, 20℃	60	4.50	—	18.2	—	1.4	—
5%NaCl, 20℃	60	4.65	1.03	20.3	1.12	1.4	1.0
10%NaCl, 50℃	60	4.59	1.02	20.6	1.13	1.4	1.0
5%Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , 20℃	60	4.88	1.08	20.8	1.14	1.5	1.07
5%MgSO <sub>4</sub> , 20℃	60	4.46	0.99	18.3	1.01	1.3	0.93
水, 20℃	180	4.26	—	20.6	—	1.5	—
5%NaCl, 20℃	180	4.20	0.99	20.5	0.99	1.5	1.0

由表4.1和表4.2可见，在侵蚀条件下，试件未见侵蚀迹象。其抗折、抗压和抗渗方面抗腐蚀系数均大于判断标准值0.8，除硫酸镁介质的抗渗腐蚀系数为0.93外，其余系数均大于0.99。表明CN2000B有耐腐蚀性能。

4.2 CN2000B抗酸类腐蚀试验<sup>[9]</sup>

4.2.1 酸性溶液的制备

- (1) pH值为1的盐酸溶液：移取4.2mL 盐酸，用去离子水稀释至500mL。
- (2) pH值为2的盐酸溶液：移取0.42mL 盐酸，用去离子水稀释至500mL。

4.2.2 试样制备

(1) 刚性料试样制备

按CN2000B料:水 = 1:0.4比例配制浆，在测量凝结时间的试模中制备CN2000B料的净浆试件，标准条件下养护7天。

(2) 柔性料试样制备

按CN2000C:CN2000D = 1:1比例调制浆，按照GB/T16777-2008制柔性试片。标准条件下养护7天。

4.2.3 试验过程

将6块刚性料试件分两组，每组三件，编号A1~A3和A4~A6，分别于两1L烧杯中，将pH值为1或2的盐酸溶液分别倒入烧杯中，液面到达试件一半高度。将烧杯密封，防蒸发。

将已制备的柔性料试片裁取六片50mm×50mm尺寸的试样，每组三件，编号B1~B3和B4~B6，分别置于盛有100mL、pH值为1和2的盐酸溶液的1L烧杯中，试样全浸于溶液中。将烧杯密封防蒸发。

因CN2000为耐腐蚀性材料，与溶液接触产生（氢氧化钙）与酸反应，溶液酸度↓。即需检查溶液酸度和更新试验溶液，试验周期为60天。

4.2.4 试验结果

试样在特定酸度的溶液中放置60天后取出，观察其表面形貌的变化，结果如表4.3。

表4 酸侵蚀后试样表面形貌

试样	试件编号	溶液 pH 值	表面形貌
刚性试块 (CN2000B)	A1~A3	1	表面被溶蚀约0.5 mm, 无开裂、起皮、剥落、粉化。
	A4~A6	2	表面溶蚀可忽略, 无开裂、起皮、剥落、粉化。
柔性试样 (CN2000C&D)	B1~B3	1	表面有少量被溶蚀的小麻点, 但无起皮、鼓泡。
	B4~B6	2	表面有极少量的微小麻点, 但无起皮、鼓泡。

CN2000材料。刚性料在pH = 1的盐酸溶液中，有被溶蚀现象，但无开裂、起皮等。在pH = 2的溶液中，有轻微溶蚀现象。即刚性料最好不与pH≤1的酸性溶液接触，不宜与pH = 2~2.5的酸性介质接触，对PH≥3的酸性介质长期接触较安全。

柔性料与pH≥1的酸性溶液接触时，会产生轻微侵蚀，因乳胶阻断了酸性侵蚀，即耐酸性比刚性料强。

4.2.5 试验段实践性能汇总

根据以上试验，材料配比确定为：水泥:砂子:减水剂:纤维素:缓凝剂:水 = 1:3:0.01:0.004:0.002:0.5。性能汇总如下。

表5 砂浆性能汇总表

序号	名称	单位	标准要求 《JG/T 230-2007 预拌砂浆》 王混特种防水砂浆	试验结果	
1	稠度	mm	50,70,90 ±10 (湿拌砂浆)	87	
2	凝结时间	h	≤12	139min	
3	抗压强度	MPa	≥24.0 (28d)	42.5 (7d)	
4	抗渗压力	7d	MPa	≥1.0	1.9
		28d	MPa	≥1.5	—
5	拉伸粘接强度	7d	MPa	≥1.0	1.4
		28d	MPa	≥1.2	—
6	收缩率, 28d	%	≤0.15	0.03	
7	吸水率	%	—	5	
8	分层度	mm	—	10	

4.2.6 试验小结

- (1) 刚性料（CN2000B）在pH = 2~2.5的酸性介质中，可短期使用。在pH≥3的酸性介质中，安全可靠。
- (2) 柔性料（CN2000C&D）的耐酸性比刚性料要好，对pH≥2的酸性溶液中安全。

(3) 根据耐碱性试验和耐酸试验综合结果, 刚性料在 $\text{pH} = 3\sim 12$ 、柔性料在 $\text{pH} = 2\sim 12$ 的条件下使用安全。

## 5 结论

(1) 结果表明, CN2000B和CN2000C&D分别在 $\text{pH} = 3\sim 12$ 和 $\text{pH} = 2\sim 12$ 条件下满足要求; 在盐类侵蚀条件下, 其抗折、抗压、抗渗腐蚀系数均大于0.9。有抗酸、碱盐腐蚀能力。

(2) 120天冻融试验表明, 样品电通量稳定, 随着冻融次数的 $\uparrow$ , 电通量有 $\downarrow$ 趋势。外观检查未见异常。试验结果得出CN2000B可抵御冻融破坏。

试验证明CN2000B+C适用于高寒、高海拔桥梁混凝土结构的抗腐蚀和冻融地区。

## 参考文献:

- [1] 高永航, 解耀魁. 氯盐对混凝土结构耐久性的危害分析及对策. 陕西, 西安, 西安建筑科技大学土木工程学院, (710055)15.
- [2] 赵卓, 蒋晓东. 受腐蚀混凝土结构耐久性检测诊断. 黄河水利出版社, 2006.24-25.
- [3] 刘文军, 王军强. 氯离子对钢筋混凝土结构的侵蚀分析. 混凝土, 2007.
- [4] 吴瑾. 钢筋混凝土结构锈蚀损伤检测与评估. 科学出版社, 2005.
- [5] 张誉, 蒋利学等. 混凝土结构耐久性概论. 上海科学技术出版社, 2003.
- [6] 金伟良, 赵羽习. 混凝土结构耐久性. 科学出版社, 2002.
- [7] 洪乃丰. 混凝土中钢筋腐蚀与防护技术(3)—氯盐与钢筋锈蚀破坏, 工业建筑, 1999年第29卷第10期.
- [8] 中核防水材料有限公司. CN2000系列耐乙二醇腐蚀性能试验研究, 2007.07.
- [9] 中核防水材料有限公司. CN2000B高效防水材料的抗腐蚀试验研究. 2007.07
- [10] 中核防水材料有限公司. CN2000系列防水材料的耐酸性试验报告. 2007.07
- [11] National Research Council of Canada. Effect of CN2000B Coating on Chloride Ion Penetration in Concrete — Laboratory Evaluation. Inside document, May 26, 2008