

混凝土的腐蚀机理与新型防护方法

杜洪彦¹ 邱富荣¹ 林昌健²

(1. 中国科学院福建物质结构研究所二部 厦门 361012)

(2. 厦门大学化学化工学院, 固体表面物理化学国家重点实验室 厦门 361005)

摘要 综述了混凝土腐蚀的机理和影响因素, 讨论了混凝土设计、施工、和维护中应该注意的问题。从节约能源、资源的和保护环境的角度, 介绍了新型的防护方法, 包括新型混凝土、新型外加剂、新型杀菌剂、新型电化学驱氯和再碱化技术、新型涂料等。

关键词 混凝土 腐蚀 防护

中图分类号 TG172.6 **文献标识码** A **文章编号** 1002-6495(2001)03-0156-06

CORROSION MECHANISM OF CONCRETE AND NEW PROTECTION METHODS

DU Hongyan¹, QIU Furong¹, Lin Changjian²

(1. Fujian Institute of Research on the Structure of Matter, The Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361012)

(2. State Key Lab Phys. Chem. Solid Surfaces, Xiamen University, Xiamen 361005)

ABSTRACT The mechanism and the influence factors of concrete corrosion have been described in this review, including physical destruction, chemical attack and biological action. The matters that should be noticed during design, operation and maintenance have also been discussed. To economize on resources and energy and to protect the environment, several new methods to enhance the durability of concrete structure are suggested, in terms of new concrete, new admixtures, new bactericide, new technology of electrochemical removal of chloride and new coatings.

KEY WORDS concrete, corrosion, protection

混凝土是以波特兰水泥的水化物(主要是水化硅酸钙($3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$)和水化铝酸钙($3\text{CaO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$))为胶结材料,配以适当比例的粗细骨料和水,拌制成混合物,经振捣、养护而成的人造建筑材料,常简称为砼。与其它建材(如钢材、合金、塑料、木材)相比,混凝土具有成本低廉、来源容易、经久耐用、维修能耗最低等优点,因此被广泛应用于港口、大坝、码头、平台、公路、桥梁等现代化工程建设中^[1]。但是,由于设计、施工和选材不当,以及碳化作用、环境污染、化冰盐的使用、外力冲撞、微生物腐蚀等物理、化学作用,大量混凝土构筑物不能达到预期寿命而破坏,并因此带来财产损失和能源、资源的浪费。据报道,美国 1998 年就花费 2500 亿美元来

修复被腐蚀破坏的钢筋混凝土结构^[2];在英国,需要重修或大修的钢筋混凝土结构占 36%;在我国,这类情况也很严重,1981 年调查的华南 18 座仅使用 7~25 年的海港钢筋混凝土码头中,因水灰比较大(0.65)或施工质量差,遭到腐蚀破坏的占 89%^[3],北京三元立交桥建成不到两年就出现人字形裂纹,不得不进行大修^[4]。这一切都说明,深入研究钢筋混凝土的腐蚀机理和新的防护方法是十分现实而迫切的。钢筋混凝土的腐蚀与防护包括两部分,即混凝土中钢筋的腐蚀与防护和混凝土的腐蚀与防护,关于前者已多有论述^[5~7],本文拟主要论述混凝土的腐蚀机理与新型防护方法。

1 混凝土的腐蚀机理

混凝土构筑物在服役过程中,受到周围环境的物理、化学、生物作用,混凝土内的某些成分发生反应、溶解、膨胀,从而造成混凝土构筑物的破坏。

国家自然科学基金资助项目(59871043)

收到初稿:1999-12-305;收到修改稿:2000-05-29

作者简介:杜洪彦,男,1973 年生,硕士

1.1 物理作用

物理作用主要是指在没有化学反应发生时,混凝土内的某些成分在环境因素的影响下,进行溶解或膨胀,引起混凝土强度降低,导致结构破坏。

外力作用 超负荷承载和物体撞击对混凝土构筑物的损害最大。作者在泉州某码头调查时发现,由于长期处于超重工作状态,钢筋混凝土立柱出现长度几十厘米、宽度不等的斜状裂缝和裂纹;由于受到撞击,混凝土保护层损坏,钢筋裸露,锈迹斑斑。

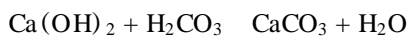
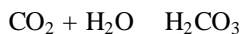
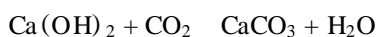
浸析作用 即环境介质将混凝土中易溶成分(如 $\text{Ca}(\text{OH})_2$) 溶解出来,引起混凝土强度减小,pH 值降低,孔隙率增大,使腐蚀介质更易进入混凝土内部,如此循环,导致混凝土结构的很快破坏。

结晶作用 混凝土内的某些盐类(包括外来的和自身的)在湿度较大时溶于水中,在湿度较低时结晶析出,并在结晶时按其特有的结晶学特征生长,对混凝土孔壁造成极大的结晶压力,从而引起混凝土的膨胀开裂。寒冷地区的冻溶循环破坏也属此类反应,冻溶循环越频繁,对混凝土的破坏就越大。

1.2 化学腐蚀

环境中的各种腐蚀介质如 CO_2 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 Mg^{2+} 等进入混凝土内,与之发生化学反应,造成化学腐蚀。

碳化作用 CO_2 与水泥石中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、水化硅酸钙($3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) 起反应,导致混凝土中碱度降低和混凝土本身的粉化,反应式如下:



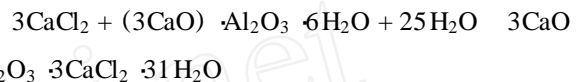
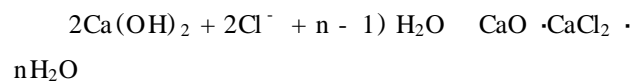
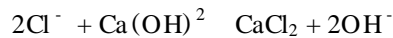
混凝土碳化受多种因素影响,混凝土的材料、配比、环境条件如温度、湿度、 CO_2 浓度等对其都有影响。有试验研究表明,混凝土的碳化深度与碳化龄期呈幂函数的关系^[8]:

$$D = xt^b$$

式中: D —碳化深度, x —碳化速度系数(包括混凝土水灰比,水泥品种,施工质量等综合影响系数), t —碳化龄期(年), b —时间指数常数(一般为 0.4~0.6)。

氯盐的腐蚀 氯盐腐蚀是沿海混凝土建筑物和公路腐蚀破坏最重要的原因之一。氯盐既有可能来自于外部的海水、海风、海雾、化冰盐,也有可能来自于建筑过程这使用的海砂、早强剂、防冻剂等,它可以和混凝土中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、 $3\text{CaO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 等

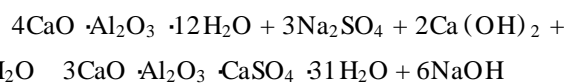
起反应,生成易溶的 CaCl_2 和带有大量结晶水、比反应物体积大几倍的固相化合物,造成混凝土的膨胀破坏^[4],反应式如下:



因此,如果水泥中水合铝酸钙含量高于 8%,由其制成的混凝土将很容易遭受 Cl^- 的腐蚀^[9]。有必要指出的是,能够引起混凝土腐蚀破坏的是自由的氯离子,而不是已经结晶固化的氯化物,如难溶的氯铝酸盐 $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 和 $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$,其中的 Cl^- 就不再具有破坏性。所以提高混凝土耐久性一方面选择材料,不用海砂,慎用早强剂。如英国现行的关于钢筋混凝土的规范限制抗硫酸盐水泥的 Cl^- 对水泥的重量比为 0.2%,早强的波特兰水泥的 Cl^- 对水泥的重量比为 0.4%,并且不允许加入 CaCl_2 。美国联邦公路管理局(FHWA)规定 Cl^- 对水泥的重量比为 0.2%^[10];另一方面是降低孔隙率,增强密实性,如使用密实剂、涂覆防水涂料等,阻挡外来的 Cl^- 通过渗透进入混凝土内部。

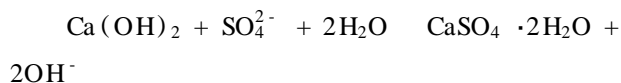
硫酸盐的腐蚀 硫酸盐也是破坏混凝土耐久性的一个重要因素,近年来在青海、甘肃等地的铁路、矿山、水电工程中的混凝土构筑物都出现了不同程度的遭受硫酸盐腐蚀破坏的问题。与氯盐的腐蚀相类似,硫酸盐进入混凝土内部后与水泥石的某些成分反应,生成物吸水而体积膨胀,当膨胀应力达到一定程度时就会造成混凝土结构的破坏。这种腐蚀作用在不同条件下又有两种表现形式: E 盐破坏和 G 盐破坏。

E 盐破坏—Ettringite expansion,即钙矾石膨胀破坏,或称高硫铝酸钙膨胀破坏,反应式如下:



生成物的体积比反应物大 1.5 倍或更多,呈针状结晶,引起很大的内应力。其破坏特征是在表面出现几条较粗大的裂缝。我国西北某电站的浆砌块石排水洞即是遭此类破坏^[11]。

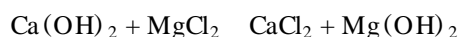
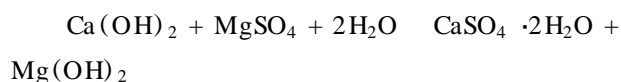
G 盐破坏—Gypsume expansion 即石膏膨胀破坏,当溶液中 SO_4^{2-} 大于 1000 ml/L 时, SO_4^{2-} 可与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 反应生成石膏晶体,反应式如下:



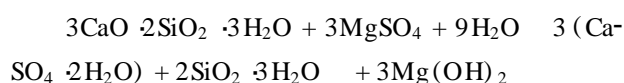
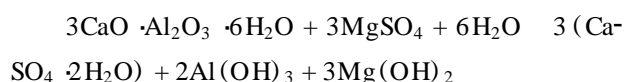
生成的 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 体积增大 1.24 倍,导致混凝土及水泥硬化浆体因内应力而破坏.其破坏特征是构筑物表面没有粗大裂纹但遍体溃散.即使 SO_4^{2-} 的浓度不高,但若混凝土处于干湿交替状态,石膏结晶膨胀破坏也易发生,因为水分蒸发导致石膏结晶的形成.我国八盘峡水电站和刘家峡水电站等处的混凝土工程皆是遭此破坏^[11].

一些火山灰(含低钙粉煤灰)和矿渣可以提高混凝土的密实性并可与水泥水化时产生的碱结合,因而能改善混凝土的抗硫酸盐性能^[12].

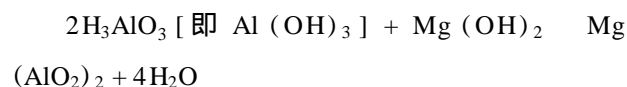
镁盐的腐蚀 镁盐(MgSO_4 和 MgCl_2)在海水中含量较大,渗入混凝土中将和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 发生下列反应:



生成的固相物积聚在孔隙内,在一定程度上能够阻挡侵蚀介质的侵入,但是大量的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 与镁盐反应后,碱度降低,水泥石中的水化硅酸钙和水化铝酸钙便易与呈酸性的镁盐起反应,反应式如下(以 MgSO_4 为例):

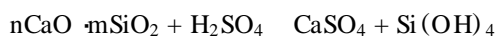
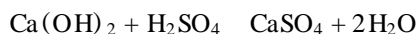


所生成的 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 还能与铝胶、硅胶缓慢反应:

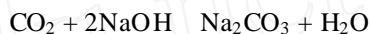


结果使水泥石粘结力减弱,导致混凝土强度降低^[13].

酸的腐蚀 在硫酸、盐酸等的生产车间和受酸雨危害的地区,混凝土构筑物受到强烈的腐蚀作用.酸可以与混凝土中的某些成分发生反应生成非凝胶性物质或易溶于水的物质,使混凝土产生由外及内的逐层破坏.另外酸还可以促使水化硅酸钙和水化铝酸钙的水解,从而破坏了孔隙结构的胶凝体,使混凝土的力学性能劣化,反应式如下(以 H_2SO_4 为例)^[14]:



碱的腐蚀 在制造苛性钠和纯碱的化工厂里,混凝土构筑物受到严重腐蚀.当混凝土有蒸发表面时,碱对混凝土的腐蚀主要表现在与空气中的 CO_2 在混凝土表面或孔隙中产生强烈的碳化作用^[15],反应式如下:



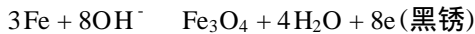
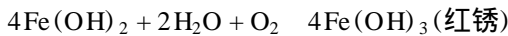
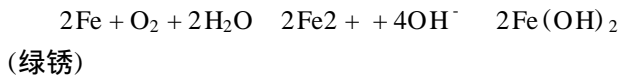
水分蒸发后碳酸盐结晶:



当混凝土没有蒸发表面时,主要表现为碱骨料反应.所谓碱骨料反应是指混凝土原材料中的水泥、外加剂、混合材和水中的碱(Na_2O 或 K_2O)与骨料中的活性成分(氧化硅、碳酸盐等)发生反应,生成物重新排列和吸水膨胀所产生的应力诱发产生裂缝,最后导致混凝土结构的破坏.碱骨料反应问题首先在美国的加利福尼亚被发现,其后在加拿大、英国、南非、中东等地相继发生,日本的沿海港湾钢筋混凝土建筑和桥梁建成不到 10 年,由于碱骨料反应就出现混凝土裂纹、剥落、钢筋锈蚀的现象.近几年我国华北地区也发现了很多此种事例,许多大型机场混凝土跑道和铁路桥梁开裂.碱骨料反应一旦发生将很难补救,因此被称为混凝土的“癌症”.根据反应机理,碱骨料反应又可分为三种类型:(1)碱硅酸反应,碱与骨料中的活性 SiO_2 反应,生成碱硅凝胶,碱硅凝胶吸水膨胀后产生内应力,导致混凝土开裂,碱硅酸反应发生最为普遍,危害也最为严重;(2)碱碳酸盐反应,碱与骨料中的碳酸钙镁反应,将白云石转化为水镁石和黏土,水镁石结晶重排和黏土吸水膨胀产生应力导致破坏,这一反应在加拿大金斯敦发生较多;(3)碱硅酸盐反应,从机理上说仍属于碱硅酸反应,但膨胀进程缓慢.碱骨料反应发生需要两个条件:首先混凝土原材料中含碱量高,现在大多数国家规定骨料中的碱不超过 0.6% 或混凝土含碱量不超过 3.0 kg/m^3 ;第二是有水分和空气的供应,越是潮湿的环境碱骨料反应越容易发生.硅灰、粉煤灰和高炉矿渣均可缓解、抑制碱骨料反应的发生.冰岛一直在生产水泥时掺 5~0.7% 的硅灰,美、英、德则推荐掺加 50% 以上的粉煤灰,以预防碱骨料反应^[12,15].

钢筋锈蚀胀裂 对于钢筋混凝土来说,钢筋锈

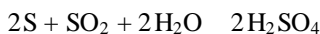
蚀也是导致混凝土破坏的一个重要原因. 一般情况下, 钢筋在混凝土的高碱性环境中 ($\text{pH} > 12.5$) 表面生成一层稳定的钝化膜, 不会锈蚀; 但若混凝土受到碳化或其它腐蚀作用, pH 降低, 或有较多 Cl^- 扩散到钢筋表面破坏钝化膜, 钢筋就会锈蚀:



生成物的体积大于母体金属体积, 在膨胀应力作用下, 混凝土层往往顺筋开裂. 掺入火山灰和矿渣可改善混凝土的抗渗性, 有利于阻止 CO_2 、 Cl^- 等腐蚀性介质的入侵, 保护钢筋不受锈蚀^[4,16].

1.3 生物腐蚀

生物对混凝土的腐蚀问题尚未引起国内重视, 但国际上 70 年代初已经提出抗生物、防霉、杀虫剂. 据估计, 现独联体国家由于混凝土遭受生物腐蚀所造成的经济损失, 到 90 年代初已达 5.5 亿美元/年, 而且还有继续增大趋势. 生物对混凝土的腐蚀有两种形式: 一是生物力学作用, 草、树根等钻入混凝土的缺陷, 破坏其密实度; 二是类似于混凝土的化学腐蚀, 如硫化细菌利用下列反应



将 S 转变成 H_2SO_4 , 从而引起混凝土的硫酸和硫酸盐腐蚀. 加入矿物粉细填料改善混凝土的孔结构, 加入对人畜无害、具有长效性能的杀生物剂, 均可有效地增强混凝土的抗生物侵蚀性能^[17,18].

2 混凝土的新型防护方法

提高混凝土构筑物的抗蚀性和耐久性, 一方面要选用优质材料, 引入新型外加剂, 确定水灰、灰砂等材料的适当配比, 加强施工监督, 提高施工水平, 以改善混凝土本身的结构; 另一方面是将混凝土构筑物与周围腐蚀介质隔离开来, 以保护其不受侵蚀.

2.1 改善混凝土本身的结构

慎重选材 针对不同环境选用不同水泥. 如在酸性环境中选用耐酸水泥, 在海水中选用耐硫酸盐水泥和普通硅酸盐水泥等^[13]; 增加水泥用量, 控制水泥中 C_3A 的含量, 低于 8% 为好, 有的甚至规定低于 5%; 降低水灰比(水与水泥的重量比), 控制灰砂比(水泥与砂的重量比). 水灰比较小时, 混凝土内部结构密实, 强度高, 抗渗性好, 一般宜控制在 0.5 以下. 灰砂比过大时, 混凝土收缩大, 抗渗性低; 过小

时, 拌合物较干而粘结性差, 混凝土也不密实, 最好控制在 $1.2 \sim 1.25$ ^[17].

引入外加剂 掺入引气剂、膨胀剂、减水剂、防水剂、粉煤灰和矿渣等新型外加剂, 可以显著改善混凝土的抗渗和耐久性. 引气剂是一种具有憎水作用的表面活性剂, 能显著降低混凝土拌合水的表面张力, 如聚合水化硅氧烷, 可使混凝土的抗冻性大于 1000 次, 并在低负温 (-60°C) 条件下达到 300 次以上^[19]. 我国研制的 U 型膨胀剂, 可使混凝土抗渗能力提高 1~2 倍, 可达 S30, 抗冻性等级达 M150. 掺 FS 防水剂的混凝土抗渗等级高达 S40, 同时具有抗裂、抗冻融、提高强度的功效. 粉煤灰的火山灰活性反应改善了混凝土水泥石的结构提高了混凝土的抗渗、耐蚀、抗碳化、抗溶析能力, 有效地抑制了碱骨料反应^[20]. 为了适应严重腐蚀性环境的要求, 必须将大量的粉煤灰和矿渣一起使用^[21].

合理施工 进行合理的搅拌、振捣和充分的湿养护. 有资料显示, 搅拌和振捣的适宜时间分别为 2 min 和 15~20 s, 一般养护时间为 28 天.

2.2 使用新型混凝土

高性能混凝土 高性能混凝土 (HPC) 是基于结构高强度、高耐久性、高工作性(和易性)这一思路而设计的全新混凝土, 与传统混凝土相比, 它具有许多特点和优点: 不用振捣就可自动填充模板, 可节省设备, 减少噪音污染; 具有良好的自密实性, 可降低劳动强度和能源消耗; 不会由于水化热的产生、水化硬化或干燥收缩等原因引发初始裂缝; 具有高抗渗性, 可以阻止 Cl^- 、 O_2 和 H_2O 的渗入, 从而预防了潜在的危险, 延长了混凝土的使用寿命^[22].

钢纤维混凝土 自本世纪中叶钢纤维阻裂机理被阐明后, 钢纤维混凝土引起广泛重视并获得迅速发展. 钢纤维的加入显著提高了混凝土的抗拉、抗弯强度和断裂韧性, 使得属松脆材料的混凝土具有良好的塑性. 如钢纤维直径 0.175 mm、长度 6 mm、钢纤维/混凝土的含量(体积率)为 6% 时, 可使混凝土的抗压强度提高 37.5%. 因此, 钢纤维混凝土成为一种很有前途的新型混凝土^[23].

长寿命混凝土 在水灰比 0.5 的普通混凝土中, 掺入乙二醇醚衍生物混合物后, 其干燥收缩率约为普通混凝土的 50~60%; 使碳化发展速度降为普通混凝土的三分之一, Cl^- 渗透速率降为四分之一, 可有效地控制 HCl 、 HNO_3 等对混凝土的腐蚀渗透, 从而可预期耐久性达 500 年以上, 故名“长寿命混凝土”.

土^[23]。

2.3 保护钢筋不受锈蚀

混凝土中钢筋锈蚀是导致混凝土保护层破裂乃至整个钢筋混凝土结构破坏的最主要原因之一。如北京西直门立交桥仅使用 20 年,就因为钢筋严重锈蚀而不得不重修^[24]。为预防钢筋锈蚀,在设计之初应考虑使用新型钢筋、新型阻锈剂和采取阴极保护措施。对在用的已遭碳化的钢筋混凝土结构,应采用电化学驱氯和再碱化技术。这是 90 年代兴起的一项新型技术,设法给钢筋外加 $1 \sim 3 \text{ A/m}^2$ 的阴极极化电流 1~4 个月,以恢复混凝土中钢筋表面的钝化状态,从而延长其使用寿命^[23]。

2.4 引入新型抗生物杀菌剂

对混凝土构成侵蚀作用的微生物包括细菌、真菌和病毒等。提高混凝土抗生物侵蚀性的主要方法是在砂浆或混凝土拌合物中掺入杀生物剂。杀生物剂可以抑制微生物的新陈代谢、呼吸和破坏其细胞结构。前苏联学者研究证明,烷基氨基苯溴化物(A-B)具有非常有效的杀菌效果。它耐酸、耐碱、易溶、微毒,能提高拌合物的流动度而不降低混凝土的强度,掺量仅为 0.25~0.05%,而且还可以作为金属阻锈剂保护内部钢筋。有机锡制剂(AB-40)也具有十分有效的杀菌性能,它呈中性、不燃烧、溶于水、杀菌谱广,对细菌、真菌、附生物、昆虫等均有效,可保护各种材料免遭生物侵蚀。AB-40 掺入后,还可提高混凝土的耐水性^[18]。

2.5 使用新型防护涂料

由以上分析可知,大多数的物理、化学破坏都是由于外来介质渗入混凝土基体而发生的,因此在混凝土结构表面涂覆涂料,是一种经济、易行的方案。新型防护涂料必须具有耐候、耐腐蚀、抗渗、无毒等特征。

鳞片涂料 鳞片涂料是以耐腐蚀性树脂为主要成膜物质,薄片状物质如玻璃鳞片、云母氧化铁(MIO)为填料,配以各种添加剂组成的涂料。尤其是玻璃鳞片,已被广泛用于各种重防腐环境中。鳞片在树脂中层层排列,构成腐蚀介质通向混凝土的重重障碍,大大地延长了其渗透时间,从而起到保护作用。文献报道^[25],将环氧树脂玻璃鳞片涂料、环氧玻璃钢、环氧树脂浇注体的渗透性进行比较,发现环氧树脂玻璃鳞片涂料的渗透性小于其它两者,证明加入玻璃鳞片后,涂层的抗渗透性显著提高。玻璃鳞片涂层能够耐各种浓度的酸、碱、石油溶剂、各种盐和水的侵

蚀,良好的耐盐雾性能。玻璃鳞片的存在,还大大降低了涂层的收缩应力和膨胀系数,改善了涂层的抗龟裂、抗温差骤变能力,提高了涂层硬度和耐磨性。

IPN 涂料 IPN(互穿聚合物网络)是两种或两种以上交联网状聚合物相互贯穿、缠结而成的聚合物共混物。其特点是一种材料无规地贯穿到另一种材料中,起着“强迫相容”和“协同效应”的作用,不同聚合物之间没有键的连接,从而使材料既不失去原有聚合物固有的性能,又可获得其他共聚物无法得到的独特性能,是一种正在发展的综合性能优异的改性材料,引起了人们的极大重视。国外从 1960 年起提出 IPN 概念,到目前已应用于涂料、橡胶等领域,在我国则刚刚起步^[26]。

超厚膜涂料 超厚膜涂料是指喷涂一道漆的干膜厚度大于 1 mm 的涂料,使用时常选择喷一道漆干膜厚度为 2~3 mm,甚至更厚,以达到长期使用、无须维修的效果。这类涂料是 100% 固体含量的无溶剂漆。漆基大多采用环氧树脂,有的也用聚氨酯树脂,漆膜具有极强的耐磨性,极强的附着力、耐海水、酸、碱的浸渍,耐冲击等优良的防护性能^[27]。

水性涂料 水性涂料是以水为分散介质的涂料,具有节省有机溶剂、不污染环境、无火灾危险等许多优点。随着人们环保意识的日益增强,对水性涂料的开发必将越来越重视。据报道,美国 Dow Plastics 公司研制成功新型环氧树脂 XU-19000.1,并用其制造水性涂料。这种水性涂料的性能可与溶剂型环氧树脂相媲美,尤其适用于水泥、钢材、建筑砖瓦。Pelmor Laboratories 公司推出 Pelatex 氟弹性体水性涂料。该涂料可在恶劣的环境中使用,成本低,能耐多种化学介质的腐蚀,包括油品类(汽油)、碱、烃类溶剂等,有效使用温度范围为 $-40 \sim 240$,可以替代有机硅涂料、聚氨酯涂料和环氧树脂涂料等^[28]。

粉末涂料 这是一类不含溶剂,以粉末熔融或交联成膜的新型涂料,具有无溶剂污染、固化迅速、性能优异、粉末回收和利用率高等特点^[29]。粉末涂料一般用于金属表面,用作混凝土的防护涂料,尚在探索。但我国石家庄军械工程学院研制成功一种耐候及耐化学腐蚀、防水、无味、无毒、高效防水涂料,经鉴定,10 项性能指标达到或超过进口的美国同类产品。这种涂料由无机材料组成,呈粉状,使用时加水搅拌即可,可广泛用于各种建筑物的防水工程^[30]。

3 结论

综上所述,要切实解决混凝土结构或钢筋混凝土结构的腐蚀问题,除了应继续重视混凝土中钢筋的腐蚀机理及防护措施外,也要加强对混凝土的腐蚀及其防护方法的进一步研究,不断开发高新技术,对建筑设计、结构设计、材料设计、施工技术、养护和使用等方面予以综合考虑,达到标本兼治,相得益彰,从而确保混凝土构筑物的安全可靠、长期耐用。尤其是在三峡工程等大型建设项目中,应当逐步推广上述行之有效的新方法,在“百年大计”中,力求达到事半功倍的效果。

参考文献:

- [1] 汪复生. 混凝土. 1997(5): 37
- [2] 洪乃丰. 腐蚀科学与防腐蚀工程新进展. 中国腐蚀与防护学会主编, 1999. 526
- [3] 洪定海. 水工钢筋混凝土耐久性专题讨论会论文选辑. 江苏省水利厅主编, 1985. 23
- [4] 郑伟希. 中国科学院福建物质结构研究所硕士论文. 1998.
- [5] 刘晓敏, 史志明, 林海潮等. 材料保护. 1996, 29(6): 16
- [6] 魏宝明, 储伟, 汪鹰等. 腐蚀与防护. 1999, 20(2): 56
- [7] Tonini, J. M. Gaidis. Corrosion of Reinforcing Steel in Concrete, ASTM STP 713, Philadelphia, PA: ASTM. 1978. 78
- [8] 许冠绍. 水工钢筋混凝土耐久性专题讨论会论文选辑. 江苏

省水利厅主编, 1985

- [9] P K Mehta, D E Tonini, S W Dean, et al. Eds. Chloride Corrosion of Steel in Concrete, ASTM STP629, Philadelphia, PA: ASTM. 1976. 12
- [10] B S 怀亚特, D J 欧文编. 郑忠立译. 论钢筋混凝土的阴极保护. 海洋混凝土构筑物的防腐蚀译文集. 16
- [11] 亢景富. 混凝土. 1995, 5: 9
- [12] 黄素行. 混凝土. 1992, 3: 20
- [13] 邓敏. 唐明述. 混凝土. 1999, 2: 8
- [14] 郭新海. 混凝土. 1992, 4: 35
- [15] B M 莫斯克文, M 伊万诺夫, C H 阿列克谢耶夫等著, 倪继森, 何进源, 孙昌宝等译. 混凝土和钢筋混凝土的腐蚀及其防护方法. 北京: 化学工业出版社, 1988.
- [16] 傅沛兴. 混凝土. 1997, 5: 13
- [17] 王宗昌. 混凝土. 1993, 2: 26
- [18] 屈志中. 混凝土. 1997, 5: 34
- [19] 屈志中. 混凝土. 1992, 6: 40
- [20] 孙凤阁. 混凝土. 1992, 1: 41
- [21] 张学元等. 腐蚀与防护, 1999, 20(1): 9
- [22] 陈恩义. 混凝土. 1993, 2: 11
- [23] 邱富荣, 杜洪彦, 林昌健. 材料保护, 2000, 33(1): 23
- [24] 洪乃丰. 腐蚀科学与防腐蚀工程技术新进展. 中国腐蚀与防护学会主编. 北京: 化学工业出版社, 1999, 516
- [25] 文建国, 许求鑫. 涂料工业, 1999, 29(6): 12
- [26] 蒋红梅等. 涂料工业, 1999, 29(3): 12
- [27] 宋官武, 沈建荣. 涂料工业, 1999, 29(3): 24
- [28] 王沛熹. 涂料工业, 1996, 26(3): 43
- [29] 腐蚀防护报. 北京: 中国腐蚀与防护学会主办, 1999. 3
- [30] 姚鹤良. 涂料工业, 1990, 20(4): 35

(上接第 151 页)

- [15] Appleby A J, Nicholson S B. J. Electrochem. Soc., 1980, 112: 71
- [16] Tryk D A, Yeager E B. In Molten Carbonate Fuel Cell Technology, Serman J R, Shores D A, Maru H C, Uchida I ed., PV 90 - 16, The Electrochemical Society Proceedings Series, Pennington, NJ, 1990: 395
- [17] Mugikura Y. Master Thesis, Tohoku University, Tohoku, Japan, 1986: 87
- [18] Takahashi M. Extended Abstracts of 21st Symposium on Molten Salt Chemistry, Yamanashi, Japan, 1989: 51
- [19] Smith S W, Vogel W M, Kapelner S. J. Electrochem. Soc., 1982, 129: 1668
- [20] Nishina T, Uchida I, Selman J R. J. Electrochem. Soc., 1994, 141: 1191
- [21] Peelen W H A, Hemmes K, Wit J H W. Electrochimica Acta, 1997, 43: 763
- [22] Zeng Chaoliu, Wang Wen, Wu Weitao. Oxid. Met., 2000, 53 (Nos. 3/4): in press
- [23] Donado R A, Marianowski L G, Maru H C. J. Electrochem. Soc., 1984, 131: 2535
- [24] Vossen J P T, Makkus R C, Wit J H W. J. Electrochem. Soc., 1994, 141: 3040
- [25] Vossen J P T, Makkus R C, Wit J H W. J. Electrochem. Soc.,

1996, 143: 66

- [26] Vossen J P T, Makkus R C, Wit J H W. Mater. Corro., 1997, 48: 157
- [27] Vossen J P T, Makkus R C, Wit J H W. Mater. Corro., 1997, 48: 228
- [28] Vossen J P T, Makkus R C, Wit J H W. J. Electrochem. Soc., 1996, 143: 58
- [29] Vossen J P T, Makkus R C, Wit J H W. J. Electrochem. Soc., 1994, 141: 3327
- [30] Weewer R, Hemmes K, Wit J H W. J. Electrochem. Soc., 1995, 142: 389
- [31] Yuh C, Johnsen R, Farooque M, et al. J. Power Sources, 1995, 56: 1
- [32] Shores D A, Pischke M. In Proceedings of the Third International Symposium on Carbonate Fuel Cell Technology, Shores D, maru H, Uchida I, et al. ed., The Electrochemical Society Proceedings Series, Pennington, NJ, 1993, PV93 - 3: 214
- [33] Vossen J P T, Amen P C H, Wit J H W. J. Electrochem. Soc., 1996, 143: 2272
- [34] Hwang E R, Kang S G. J. Power Sources, 1998, 76: 48
- [35] Appleby A J, Foulkes F R. Fuel Cell Handbook, Van Nostrand Reinhold, New York, 1989
- [36] Keijzer M, Hemmes K, Van Der Put P J J M, et al. Corrosion Science, 1997, 39: 483