

钢筋混凝土结构耐久性提升技术研究进展

金伟良^{1,2}, 吴航通¹, 许晨¹, 金骏³

(1. 浙江大学结构工程研究所, 浙江 杭州 310058; 2. 浙江大学宁波理工学院, 浙江 宁波 315100;
3. 杭州市质量技术监督检测院, 浙江 杭州 310019)

摘要:钢筋混凝土结构耐久性的提升技术可以从“防”、“抗”、“治”3 个方面考虑。从“治”的角度出发, 综述了国内外对钢筋混凝土结构的传统修补方法和电化学修复方法的研究, 介绍了阴极保护法、混凝土再碱化法、电沉积修复法、电化学除氯法以及电渗阻锈剂法的基本原理和研究现状, 评述了各种修复方法效果及其影响因素。重点介绍了在结合电迁移型阻锈剂和电化学除氯技术优势的基础上提出的双向电渗修复法的概念、基本原理以及目前的研究状况和技术难点。最后, 在双向电渗的研究基础上提出将纳米材料引入双向电渗的新方法。

关键词: 钢筋锈蚀; 混凝土再碱化; 阴极保护; 电沉积; 电化学除氯; 双向电渗

中图分类号: TU375 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7647(2015)05-0068-09

Advances in research of technologies for durability enhancement of reinforced concrete structures//JIN Weiliang^{1,2}, WU Hangtong¹, XU Chen¹, JIN Jun³ (1. *Institute of Structural Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China*; 2. *Ningbo Institute of Technology, Zhejiang University, Ningbo 315100, China*; 3. *Hangzhou Institute of Test and Calibration for Quality and Technology Supervision, Hangzhou 310019, China*)

Abstract: Durability enhancement of reinforced concrete structures can be considered from three aspects: protection, resistance, and rehabilitation. From the aspect of rehabilitation, this paper reviews the research of the traditional repair and electrochemical methods for rehabilitation of reinforced concrete structures. The principles and current research status of cathodic protection, realalkalization of reinforced concrete, electrodeposition, electrochemical chloride extraction (ECE), and inhibitor electromigration anticorrosion technology are introduced, and their effects and factors are also discussed, with emphasis placed on bidirectional electromigration rehabilitation (BIEM), which combines the advantages of ECE and inhibitor electromigration anticorrosion technology, as well as its key technical problems. Moreover, based on the research on nanomaterials, the new method of using nanomaterials in BIEM is proposed.

Key words: reinforcement corrosion; realalkalization of reinforced concrete; cathodic protection; electrodeposition; electrochemical chloride extraction; bidirectional electromigration

钢筋和混凝土的组合被誉为土木工程结构发展史中一次重大技术革命,两者实现优势互补,钢筋有效改善了混凝土的韧性,提高了其抗拉、抗弯性能,而混凝土的碱性环境则保持了钢筋表层的钝化,同时又隔离了钢筋与外界,特别是侵蚀性介质的接触,防止钢筋的锈蚀。因此,这类组合材料形成的混凝土结构已成为世界上应用最为广泛的结构形式。但是,随着时间的推移,钢筋混凝土结构的耐久性问题日益突出。由于钢筋锈蚀引起混凝土结构的过早破坏,已成为全世界关注的一大灾害。美国标准局(NBS)的调查显示:美国在 1975 年因各种腐蚀而造成的损失高达 700 亿美元,1985 年则达到 1 680 亿美元,目前整个混凝土工程的价值约为 6 万亿美元,今后每年用于维修或重建的费用预计高达 3 000 亿美元^[1]。英国统计了 271 个混凝土结构劣化破坏事例,就引起破坏的原因与发生频率而言,钢筋锈蚀占全部事例的 55%,是引起钢筋混凝土结构破坏的主要因素,其中,环境中氯盐的污染引起钢筋锈蚀占全部破坏事例的 33%,属首要破坏因素。英格兰岛中部环形快车道上的 11 座混凝土高架桥,初始造价为 2 800 万英镑。为了保证高架桥在冬季正常通行而撒于路面的除冰盐,导致钢筋发生了严重锈蚀。仅在建成后的 15a 里,由于修补所支出的费用就已达初始造价的 1.6 倍,近 4 500 万英镑;估计在今后

15 a 内,维护费用将达到 1.2 亿英镑,累计接近初始造价的 6 倍^[2]。而在四面临海的日本,海岸附近的钢筋混凝土结构,由于受到含有大量盐分的海水和水汽的影响,结构中钢筋锈蚀严重。针对日本境内 103 座混凝土海港码头的调查发现,使用 20 a 以上的码头均存在大量顺筋裂缝现象^[2-3]。

我国有着广阔的海域和漫长的海岸线,而沿海地区又是大规模经济建设的集中地,有着大量的钢筋混凝土建筑结构。我国交通部四航局科研所曾于 1980 年主持了对华南地区 18 座码头的调查^[4],结果发现 80% 以上的码头在使用 5 ~ 10 a 后都发生了较为严重的钢筋锈蚀现象。2001—2004 年间,浙江大学结构工程研究所对浙江省内 37 座现役桥梁和 11 座码头开展了大量而广泛的耐久性调研工作^[5-7],结果发现钢筋锈蚀及由此引发的保护层开裂现象非常普遍,对结构的安全和正常使用造成了严重危害。如浙东某国家重点工程 10 万 t 级矿石中转码头不到 10 a 就不得不进行腐蚀修补,造成的损失令人痛心。南部沿海几十座服役 3 ~ 25 a 的码头,因钢筋锈蚀造成的耐久性问题占 80 % 以上,有的仅使用 3 ~ 7 a 即出现顺筋开裂^[8-10]。近年来,南海问题已经成为国内政治经济的一大热点问题,要在南海建设岛礁必然面对氯盐腐蚀下钢筋混凝土的锈蚀问题。由此可见,钢筋锈蚀破坏,特别是由于氯盐污染引起的钢筋锈蚀破坏,已成为严重威胁钢筋混凝土结构耐久性的最主要和最普遍的危害因素。

目前,在混凝土耐久性提升技术方面,国内外学者主要从“防”、“抗”、“治”3 个角度开展研究。涂层-阻锈法是从“防”的角度对新建结构进行防护或是对已有结构进行维护,特种钢筋是从“抗”的角度提高结构材料本身抵抗介质侵蚀的能力,电化学修复法则从“治”的角度对已腐蚀的混凝土结构进行修复治理。在防锈-涂层法中,渗入型阻锈材料由于比普通阻锈材料具有更好的阻锈效果而得到广泛的应用,但是当保护层厚度较大、密实性较高时,这类阻锈材料往往因不能达到钢筋表面而起不到应有的阻锈效果,因此其在混凝土保护层厚度较大、密实度较高的沿海混凝土基础设施结构中尚未得到有效的应用。电化学修复法在使用过程中也存在一定问题,如果电流密度或电通量控制不当,不仅会使钢筋混凝土黏结面局部变软、钢筋表面析氢,甚至还会诱发碱集料反应,从而增加混凝土结构内部缺陷。因此,尽管国内外在电化学除盐方法和阻锈材料研发等方面已开展了大量的研究工作,但如何最大化地提高受氯盐侵蚀的混凝土结构耐久性病害维修效率仍是工程界的一大难题。

因此,开展混凝土钢筋锈蚀的修复和防治研究是一项急切和必要的课题,而对于正在服役且遭受氯离子侵害作用的钢筋混凝土建筑物,如何采取技术上可行、经济上合理的修复方法是工程界迫切需要解决的问题。本文主要从混凝土结构耐久性提升技术中的“治”出发,综述国内外传统修补和电化学修复方法的研究,并对目前研究热点双向电渗技术进行了重点论述。最后,结合前沿的纳米修复技术,探讨其与双向电渗修复技术相结合的可能性。

1 国内外研究与应用现状

1.1 传统修补法

钢筋混凝土在使用过程中自然损坏或受到外力破坏,造成如麻面、露筋、孔洞、裂缝、钢筋锈蚀等缺陷,传统修复手段主要是先凿除已经劣化的混凝土保护层,对钢筋进行除锈防锈处理。对严重锈蚀的钢筋,进行旁焊补强或更换,然后对锈蚀的钢筋做除锈及阻锈处理,再使用环丙砂浆、丙乳砂浆等进行填补。传统修补法^[11]存在的主要问题在于修复效果难以满足长期耐久性要求,尤其对于已遭受氯盐侵蚀的海洋环境中的钢筋混凝土结构。其主要原因是钢筋处于新旧混凝土的交界处,修补会造成钢筋表面产生电位差,且处于钢筋内侧的混凝土中氯离子难以被彻底去除,钢筋仍有再次锈蚀的可能。美国俄勒冈州 Alsea 海湾上的多拱大桥在钢筋发生严重锈蚀后,即采用了传统修补法对破坏处进行修补,然而不久却发现其附近钢筋锈蚀加剧^[1]。

1.2 常用电化学修复方法

1.2.1 阴极保护法

阴极保护技术^[12]是以抑制钢筋表面形成腐蚀电池为目的的电化学防腐方法,主要包括牺牲阳极法和外加电流辅助阳极法。其基本原理是对钢筋持续施加一定的阴极电流,将其极化到一定程度,从而使钢筋上的阳极反应降低到非常小的程度。根据欧洲标准(2006 年) EN12696 规定:对于 Ag/AgCl/0.5 mol/L KCl 参比电极,瞬时断电位应大于 -720 mV,以避免“氢脆”的发生。

外加电流辅助阳极法以直流电源的负极与被保护的钢筋相接,正极与难溶性辅助阳极相接,从而提供保护电流。自 1973 年美国在已遭受氯盐污染的钢筋混凝土公路桥的桥面板上成功地安装了外加电流阴极保护系统后,此方法得以迅速发展。1985 年 6 月,美国俄勒冈新港区的 Yaquina 海湾桥实施外加电流阴极保护^[13];1995 年沙特阿拉伯 Jubail 海水进口混凝土结构物的水上部分完成外加电流保护^[14],1996 年澳大利亚悉尼歌剧院西宽行道下部结构实

施加外加电流阴极保护^[15]。对采用外加电流阴极保护的钢筋混凝土结构调查^[16]表明,大多数结构可长期可靠地抑制钢筋的腐蚀,大大降低维修成本。

牺牲阳极的阴极保护方法就是在混凝土内的钢筋上连接一种电极电位更负的金属或合金,通过牺牲阳极的自我溶解和消耗,使得钢筋得到阴极电流而受到保护。与外加电流辅助阳极法相比,牺牲阳极的阴极保护方法施工简便,无需提供辅助电源,维护管理更加容易,而且不易引起预应力钢筋产生“氢脆”危险。因此,20 世纪 80 年代后,国内外对混凝土牺牲阳极的阴极保护法的研究日益广泛和深入。Redaelli 等^[17]认为牺牲阳极的阴极保护法对混凝土中的钢筋有较好的保护效果。Funahashi 等^[18]指出阳极材料对阴极保护效果影响较大,较差的阳极材料会使阴极保护电流分布不均匀,而且会使阳极混凝土表面产酸,研究表明涂有钛的金属氧化物材料作为阳极具有较好的应用效果。2002 年,在天津港的工程中采用高效牺牲阳极的阴极保护法钢桩技术阳极材料 Al-Zn-In 系合金中加入 Mg-Ti 合金,使阳极的电化学性能得到大大提高^[19]。

阴极保护法应用于钢筋混凝土结构中,总体是可行的,但该方法不仅从结构建设期就需要专人管理和维护,并且需要长期维护,成本较高,因此其推广应用受到了一定的限制^[20]。此外,阴极保护技术主要应用于在建结构物,对于已经建成并已经出现钢筋锈蚀的结构物其应用效果仍有待进一步研究。

1.2.2 电化学再碱化法

电化学再碱化法^[21]是 20 世纪 70 年代末在美国和欧洲兴起的一种用于修复碳化混凝土内钢筋腐蚀的重要方法,它主要通过无损伤的电化学手段来提高被碳化混凝土保护层的碱性,使其 pH 值恢复到 11.5 以上,从而降低钢筋腐蚀活性,使钢筋表面恢复钝化,以减缓或阻止锈蚀钢筋的继续腐蚀^[22]。其基本原理是在混凝土试件表面上的外部电极和钢筋之间通直流电,以钢筋作为阴极,以外部电极作为阳极,对钢筋进行阴极极化(图 1)。在钢筋上(阴极)的主要电化学反应为: $2H_2O + O_2 + 4e^- = 4OH^-$;在外部电极上(阳极)的主要电化学反应为 $4OH^- = 2H_2O + O_2 + 4e^-$ 。在电场和浓度梯度的作用下,混凝土中阴极反应产物 OH^- 由钢筋表面向混凝土表面及内部迁移、扩散,阳离子(Ca^{2+})由阳极向阴极迁移。由于 OH^- 的持续产生和移动,使得钢筋周围已碳化混凝土的 pH 值逐渐升高^[22]。

电化学再碱化,可以用于所有碳化的混凝土构筑物,已经成为世界各国公认的事实。目前国内外对再碱化技术研究结果不尽相同:朱雅仙^[23]认为在

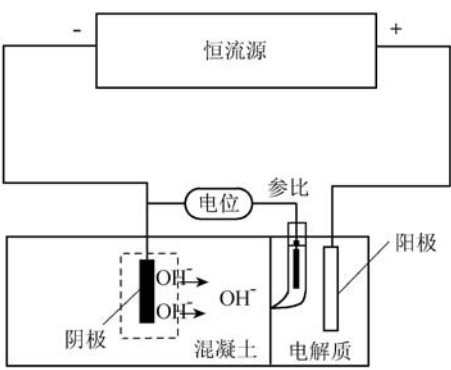


图 1 混凝土再碱化原理示意图

电位的作用下,阴极反应产物 OH^- 由钢筋向混凝土表面迁移,阳离子(Na^+ 、 K^+ 和 Ca^{2+})由阳极向阴极迁移。阴极钢筋处产生的 OH^- 除迁移一部分外,还有一部分 OH^- 滞留在钢筋周围的混凝土,使得钢筋周围碳化混凝土 pH 值升高,从而达到再碱化的目的。Velibasakis 等^[24]认为外部的碱性溶液通过电渗作用渗透到混凝土内部,达到钢筋附近,恢复钢筋周围混凝土的碱性环境,从而实现再碱化的目的,如果电渗不能进行,只通过电化学反应也能达到再碱化的目的。Andrade 等^[25-26]认为碳化混凝土的再碱化是同时通过电化学反应和电渗作用实现的。童芸芸等^[27]研究了碳化混凝土板内钢筋腐蚀程度对电化学再碱化处理效果的影响,结果表明无论钢筋初始腐蚀程度如何,外加电源式电化学再碱化处理均是有效的。

1.2.3 电沉积修复法

电沉积修复法是最近兴起的一种修复混凝土裂缝的新方法^[28]。其基本原理是利用钢筋混凝土的特性与水环境条件,把带裂缝的混凝土结构中的钢筋作为阴极,以溶在水或海水中的各类矿物化合物(或加入合适的矿物质)作为电解质,并在混凝土结构附近设置一定面积的阳极,在两者之间施加微弱的低压直流电。因为混凝土是一种多孔材料,而其孔隙液中就有一种电解质,所以在混凝土中就会发生电迁移,在混凝土结构的表面和裂缝处就有沉积物如 $CaCO_3$ 和 $Mg(OH)_2$ 等生成,填充、密实混凝土的裂缝,封闭混凝土的表面,进而达到修复的效果。

电沉积修复法主要应用于化工、微电子、陶瓷、新材料等产业之中。20 世纪 90 年代的初期,日本学者 Sasaki 等^[29]首先尝试利用电沉积修复法修复海工混凝土结构的裂缝,取得了不错的成效。由于海水本身就是良好的电沉积溶液,因此电沉积修复法用于海工和水工结构都有很好的修复效果。但当该技术应用于陆地混凝土结构裂缝的修复时,仍存在一定的局限性。日本、美国近年来对电沉积修复法修复陆上混凝土裂缝的可行性及经电沉积修复法

修复后混凝土的干缩性能进行了初步研究^[28-31]。国内学者近年来也对电沉积修复法进行了一系列研究。蒋正武等^[32]对电沉积修复法的机理进行了研究,阐述了其修复原理、修复关键技术以及修复效果的评价方法与评价指标。储洪强等^[33-34]取6种电沉积溶液及各项试验参数对混凝土裂缝进行电沉积修复,并研究了电流密度对电沉积效果的影响,取得了一定成效。研究表明 ZnSO_4 、 MgSO_4 和 MgCl_2 溶液作为电沉积溶液效果较好。

1.2.4 电化学除氯法

20世纪70年代电化学除氯法(electrochemical chloride extraction)^[35]首先由美国联邦高速公路局研究出来,后来用于美国战略公路研究规划,并被欧洲 Norcure 使用。据统计,自20世纪80年代末开发成功到1994年短短几年时间内,该方法已在北美、英国、德国、瑞典、日本及中东等约20个国家和地区中应用,应用面积达15万 m^2 ^[36]。

电化学除氯的基本原理是以混凝土中的钢筋作为阴极,在混凝土表面敷置或埋入电解液保持层,在电解液保持层中设置钢筋网或者金属片作为阳极,在金属网和混凝土中的钢筋之间通以直流电流。在外加电场作用下,混凝土中的负离子(Cl^- 、 OH^- 等)由阴极向阳极迁移,正离子(Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 等)由阳极向阴极迁移。 Cl^- 由阴极向阳极迁移并脱离混凝土进入电解质,达到了脱氯除盐的目的;同时阴极发生电化学反应,形成的 OH^- 向阳极迁移,氯离子得到排除,钢筋周围和混凝土保护层中的碱性升高,有利于钢筋恢复并维持钝态,又可在一定程度上提高钢筋混凝土抵抗 Cl^- 二次侵蚀的能力^[37]。由此可知,电化学除氯法无论是在原理上还是在处理装置上和电化学再碱化技术均无差别,两者只是应用环境不同。

目前,对电化学除氯可能对钢筋混凝土造成影响的研究比较广泛,包括钢筋-混凝土界面结合强度、碱骨料反应、“氢脆”及混凝土微裂缝的变化等多方面^[38-42]。经过电化学除氯处理,钢筋附近区域混凝土的 Cl^- 含量明显低于外表层混凝土,且均远低于除氯前混凝土^[41]。有研究表明电化学脱盐处理对钢筋-混凝土界面结合强度有一定的影响,脱盐后由于界面处混凝土孔隙液水解影响导致的结合强度损失,会随着脱盐后时间的延续得到部分恢复;同时,电化学脱盐处理可以提高混凝土的密实性,减小混凝土内有害孔隙,使环境介质中 Cl^- 的再次侵蚀阻力加大,扩散渗透更为困难,有利于混凝土耐久性的提高。在常规的脱盐参数下,除氯后混凝土强度不会发生明显的改变,混凝土密实性和抗 Cl^- 渗

透性能有所提高,但钢筋与混凝土的黏结强度随电流密度和电量有不同程度的降低。在微观领域的研究发现,电化学除氯会使混凝土孔径分布改变,孔隙率变化与所使用的电解质溶液种类有关。

值得注意的是,电化学除氯虽然对受氯盐侵蚀的钢筋混凝土结构具有较好的修复效果,但却会对其产生一些不利影响。研究发现,电化学除盐时钢筋表面会发生析氢反应,即“氢脆”,钢筋表面发生电化学反应生成的氢气,产生膨胀压力,导致钢筋-混凝土间黏结力下降,同时氢气也会降低钢筋的延性^[43]。另外,当混凝土中使用的集料中含有 SiO_2 等活性组分时,电化学除氯会使 K^+ 、 Na^+ 向钢筋阴极附近大量聚集,从而加剧局部碱骨料反应,造成骨料破坏^[44-45]。

研究发现,要达到好的除氯效果,必须考虑以下几个因素^[46-49]:①电压:除氯法的外加电压可以控制在20~40V的范围内。②电流:除盐电流是导致钢筋-混凝土界面黏结力下降的主要原因,但在采用小电流($1\sim4\text{ A/m}^2$)的情况下,黏结力的损失并不明显。因此电流一般控制在 3 A/m^2 以下,个别情况也可以达到 5 A/m^2 (钢筋面积上的电流),Polder等^[46]认为,低于 5 A/m^2 的电流密度,不会对混凝土结构产生明显的危害。③水灰比:相同电场作用条件下,水灰比越小,混凝土电化学除氯时通过的电量越少,除氯效果越差,因此,针对低水灰比的高强混凝土需要适当延长通电时间才能达到理想除氯效果。同时水灰比越大, K^+ 、 Na^+ 向钢筋阴极附近聚集越多,碱骨料反应越剧烈。④电解液的 pH 值:较高的 pH 值有利于 Cl^- 从混凝土中排出,完全吸收阳极反应产生的氯气,以备试验需要。⑤电解液中 Cl^- 含量及混凝土中 Cl^- 含量。⑥除氯后混凝土强度、密实性等性能。此外,需要注意的是,对于 Cl^- 侵蚀较为严重的情况,电化学除氯技术只能去除混凝土保护层中的 Cl^- ,钢筋后方的 Cl^- 仍无法去除;如此,在处理结束后,位于钢筋后方的 Cl^- 在浓度梯度的作用下仍会向钢筋内侧表面扩散,因此,钢筋后期仍会发生锈蚀。

1.2.5 电渗阻锈法

近十几年来,钢筋阻锈剂作为一种使用简单、经济有效的钢筋防腐措施,被大量应用于工程中,但绝大部分为掺入型阻锈剂。随着待修复工程的增加,用于修复和抑制已建混凝土结构中钢筋锈蚀的迁移型阻锈剂^[50](migrating corrosion inhibiting,简称 MCI),开始在混凝土结构中得到应用。迁移型阻锈剂最早由美国 Cortec 公司开发使用,是一种以胺、醇胺类及其盐类或脂类为主要成分的具有渗透性能的

环境友好型有机阻锈剂^[51],能够同时保护钢筋表面的阴极和阳极。由于 MCI 具有渗透移动至钢筋表面并进行保护的属性,它既可应用于新建结构也可用于既有结构,是钢筋防锈技术的一次革命。我国于 1990 年引入 MCI,经国家建材中心检测中心认证后,已在许多工程中得到应用^[52]。但有研究^[53]指出,迁移型阻锈剂的渗透深度与混凝土保护层厚度、混凝土密实程度有密切关系,当混凝土保护层较厚或密实度较大时,阻锈剂不能到达钢筋表面或钢筋附近阻锈剂浓度不足,无法起到应有的阻锈效果。

利用电场将有效阻锈剂基团输送至钢筋表面的技术最早见于文献[54]。该技术采用的有机阻锈剂较为昂贵,且需要较长的通电时间才能达到满意的效果,因此发展较慢,直到最近几年才有所进展。Kubo 等^[55-57]使用电化学方法将阻锈剂迁入了碳化后的混凝土,并达到阻止钢筋锈蚀的效果;但仅对保护层完全被碳化的钢筋混凝土结构具有较好的效果,应用范围较窄;且并未考虑结构受到氯盐侵蚀的情况。国内对于电渗阻锈过程也有少量研究。近年来洪定海等^[58]研制出 BE 阻锈剂,采用电化学方法,使其在短期内迁移至 10 cm 厚的混凝土内,并证实其对钢筋具有明显的阻锈效果。唐军务等^[59-60]提出了电渗阻锈技术,并将该技术实验性地应用于军港码头。研究^[61]表明,与单一的电化学除氯及阻锈剂自然渗透修复技术相比,电迁移阻锈技术可加速阻锈剂基团迁移到钢筋表面,能显著提高防腐修复效果,并通过试验提出了以钢筋的腐蚀电位作为电迁移阻锈效果的评判方法。

2 一种新型混凝土耐久性提升方法——双向电渗修复法

2.1 研究现状

浙江大学结构工程研究所金伟良在结合电迁移型阻锈剂和电化学除氯技术特点的基础上率先提出了双向电渗 (bi-directional electro-migration rehabilitation, BIEM) 的概念。双向电渗的基本原理 (图 2) 是在外加电场的作用下,电解质溶液中的阳

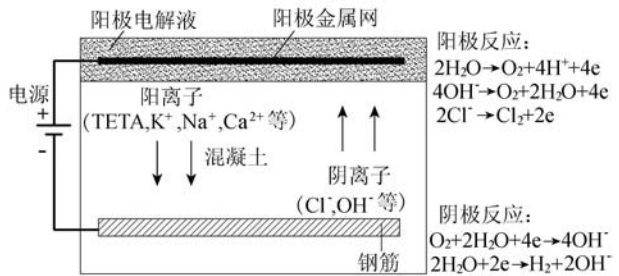


图 2 双向电渗原理示意图

离子阻锈剂向阴极钢筋处迁移,混凝土孔隙液及钢筋表面的 Cl^- 向阳极迁移进入电解质溶液中。双向电渗必须考虑电化学除氯与电迁阻锈剂的耦合作用,合理化相应的双向电渗影响参数,才能得到良好的阻锈效果。

章思颖^[62]系统地从阻锈剂的阻锈效果、电迁移能力、环境友好性等几个方面出发,筛选出了适用于双向电渗修复技术的胺类阻锈剂。郭柱^[63]则在此基础上对应用三乙烯四胺作为阻锈剂的双向电渗过程作用效果进行了详细研究,通过对混凝土试件保护层中 Cl^- 浓度、阻锈剂浓度分布的测试及对钢筋电化学参数的观测,分别研究了通电时间、电流密度、水灰比、初始 Cl^- 浓度、保护层厚度对双向电渗作用效果的影响,并且进行了相关的数值模拟。无论是从短期试验还是长期试验的效果来看,双向电渗对于钢筋的锈蚀都具有明显的抑制和修复作用。具体表现在:双向电渗处理后,保护层中的 Cl^- 浓度减小,阻锈剂浓度提高,钢筋腐蚀电流密度的真实值降低。特别是在处理后的长期效果方面,双向电渗技术在抑制钢筋后期锈蚀发展方面存在明显的优势。黄楠^[64]研究了不同电流密度、通电时间、水灰比、初始氯盐掺量、表面碳化等影响因素下双向电渗和电化学除氯在力学性能和孔隙率方面的影响。结果表明:双向电渗和电化学除氯会使保护层表面强度以及钢筋与混凝土黏结强度降低,阻锈剂对保护层表面材料和钢筋混凝土之间的黏结造成了一定程度的负面影响。同时双向电渗又能使保护层孔隙率降低,增加混凝土密实程度,在阴极和阳极的孔隙分布上表现出差异。张华^[65]对双向电渗技术工程应用推广进行了研究,开展了变动水位、不同层次的钢筋网对双向电渗效果的研究。为适用于不同水位环境和大气环境以及平面结构和曲面结构等条件,设计了 3 套双向电渗装置,并成功应用于舟山跨海大桥的耐久性提升工作中,使其耐久性评估寿命提升了 20 ~ 30 a。王卫仑等^[66]以二甲基乙醇胺为阻锈剂,研究了电化学除氯法和二甲基乙醇胺电渗透联合修复钢筋的效果及修复后钢筋的腐蚀电化学性能。结果表明:与二甲基乙醇胺阻锈剂的自然渗透和单一的电化学除氯法相比较,联合修复技术阻锈剂活性基团渗入更为有效,并且 Cl^- 去除能力近似相同;联合修复处理后砂浆中钢筋有很好的钝化保持能力,随着通电时间、水灰比的增加,氮元素渗入量和 Cl^- 去除量增加。刘宗玉^[67]根据混凝土模拟孔溶液中阻锈剂的阻锈效果,选取了 N,N-二甲基乙醇胺阻锈剂和二乙醇胺与 N,N-二甲基乙醇胺复合的阻锈剂用于混凝土电迁移试验中。利用自行设计的

电迁移试验装置研究了混凝土中钢筋的自腐蚀电位、极化电阻、交流阻抗谱的变化规律,并研究了不同水灰比下,掺合料对电迁移阻锈试验过程中阻锈效果与排盐量的影响。同时还建立了阻锈过程中极化电阻变化模型,与实测值拟合度很好。艾志勇^[68]合成了一种水溶性好、阻锈性强、易于迁移的新型电迁移性阻锈剂——氯乙酸钠-月桂酸咪唑啉季铵盐。同时围绕该阻锈剂阻锈效果、作用机理及其电场迁移过程对钢筋混凝土组成、结构与性能的影响等开展研究,阐明了该阻锈剂分子结构特征与其作用效能的关系,探索了一种广泛有效地解决钢筋锈蚀修复问题的技术与方法。

2.2 主要技术难点

由于电化学处理的基本原理是通过施加外加电场,从而达到有效离子在混凝土内部的迁移。然而,无法避免地,在通电时,位于阴极端钢筋附近会发生氧气的还原反应或析氢反应。特别是,当外加电流密度超过析氢反应的临界电流密度(约为 0.37 A/m^2)^[69]时,析氢反应开始发生,随着电流密度的增大,由析氢反应带来的负面效应也随之增加,因此需要严格控制通电过程中的电流密度。目前,为了提高除氯和阻锈剂迁入效率,施加的电流密度一般在 $1 \sim 5 \text{ A/m}^2$,远大于析氢反应临界电流密度,相应的负面效应也较大,这也限制了该技术在梁式构件和预应力构件中的应用,因此有必要开展小电流作用下($0.3 \sim 1 \text{ A/m}^2$)的电化学技术处理效果研究。与之配套的,在双向电渗处理技术方面,开发高电迁移性能的阻锈剂也非常有意义。

2.3 研究展望:将纳米材料引入双向电渗

纳米颗粒材料又称为超微颗粒材料,由纳米粒子(nano particle)组成。如图3所示,纳米粒子也叫超微颗粒,一般是指尺寸在 $1 \sim 100 \text{ nm}$ 间的粒子,处在原子簇和宏观物体交界的过渡区域,既非典型的微观系统亦非典型的宏观系统,是一种典型的介观系统,它具有表面效应、小尺寸效应和宏观量子隧道效应。当人们将宏观物体细分成超微颗粒(纳米级)后,它将显示出许多奇异的特性,其光学、热学、电学、磁学、力学以及化学方面的性质和大块固体时相比将会有显著的不同^[70]。

双向电渗中引入纳米材料是一种全新的技术,该研究在国内基本处于空白状态,国外研究也刚处于起步阶段。将纳米材料引入双向电渗主要有两种思路。

a. 将阻锈剂制备成纳米材料使用。国外已有学者对电动纳米粒子修复技术减轻钢筋混凝土锈蚀的效果及其对混凝土耐久性的长期效果进行了研

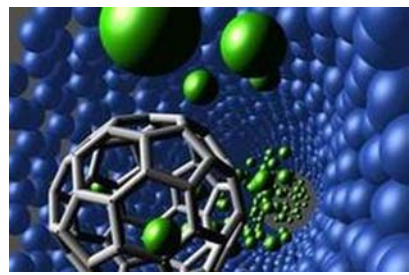


图3 纳米粒子示意图

究^[71-72]。该方法主要使用电场加速火山灰纳米粒子通过混凝土的毛细管孔,直接到达钢筋表面,使纳米颗粒将毛细孔封闭,防止 Cl^- 渗透。一组试样在浇筑完成后直接暴露于氯盐环境下2a;另一组试样采用电动纳米粒子技术后再暴露于氯盐环境下。试验表明:未经处理的混凝土出现严重的开裂。对经过电动纳米粒子技术处理过的试样,使用扫描电子显微镜、X射线衍射和傅里叶变换红外光谱进行了微观结构和化学分析。结果表明,其微观结构的变化可有效减轻新浇筑的混凝土和成熟混凝土中钢筋的腐蚀。

b. 将纳米材料和阻锈剂一起使用。使用纳米水溶胶等材料将阻锈剂包裹,通过双向电渗迁入混凝土中。这种思路主要来源于对氧化铝粉体在硅溶胶中的分散机理和稳定性的研究^[73-75]。具体实施仍然需要大量试验研究。

3 结 语

基于前文对传统电化学处理方法(阴极保护、电化学再减化和电化学除氯)的介绍和双向电渗的介绍,电迁移型阻锈剂的性质对双向电渗技术效果的实现至关重要。电迁移型阻锈剂须具有较好的阻锈能力,易溶于水且带正电,能在电场作用下向混凝土中迁移,性质稳定,不会对混凝土性能产生不利影响,能长时间存留在混凝土内,经济环保。在之前的研究中发现,有机阻锈剂大多具有较强的挥发性,在混凝土中的电迁能力较为一般,在一定电流电量条件下,在混凝土中的存留量不足,没有达到理想阻锈效果,而且会产生一些不利影响。将阻锈剂与纳米材料结合,可以使阻锈剂更加适合双向电渗试验,使其达到更佳的阻锈效果,并且经济环保,具有实际的研究价值。

参考文献:

- [1] 金伟良,赵羽习. 混凝土结构耐久性[M]. 2版. 北京:科学出版社,2014.
- [2] 洪定海. 混凝土中钢筋的腐蚀与保护[M]. 北京:中国铁道出版社,1998.

- [3] MEHTA P K. Concrete durability-fifty years progress [C]//Proceeding 2nd International Conference on Concrete Durability. [S. l.]: American Concrete Institution,1991: 1-31.
- [4] 洪定海,潘德强. 华南沿海部分码头调查情况介绍[J]. 水运工程, 1982 (2): 1-5. (HONG Dinghai, PAN Deqiang. Introduction of South China coastal part[J]. Port & Waterway Engineering,1982(2):1-5. (in Chinese))
- [5] 张苑竹. 混凝土结构耐久性检测、评定及优化设计方法 [D]. 杭州:浙江大学,2003.
- [6] 吕清芳. 混凝土结构耐久性环境区划标准的基础研究 [D]. 杭州:浙江大学,2007.
- [7] 金伟良,吕清芳,潘仁泉. 东南沿海公路桥梁耐久性现状[J]. 江苏大学学报: 自然科学版,2007,28(3): 254-257. (JIN Weiliang, LÜ Qingfang, PAN Renquan. Current durability situation of concrete highway bridge structures in southeast coastal areas [J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2007, 28 (3): 254-257. (in Chinese))
- [8] 胡红梅,宋明辉,姚志雄,等. 提高海工混凝土抗氯离子渗透性的关键技术[J]. 建筑科学与工程学报,2009,26 (1): 7-11. (HU Hongmei, SONG Minghui, YAO Zhixiong, et al. Key technology for improving resistance against chloride ion penetration of marine concrete [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2009, 26 (1): 7-11. (in Chinese))
- [9] 赵国藩,陈凤山,高潮. CFRP 加固海工混凝土结构的抗 Cl⁻ 侵蚀试验研究 [J]. 建筑科学与工程学报,2008,25 (3): 1-5. (ZHAO Guofan, CHEN Fengshan, GAO Chao. Test research on chloride ions at tack of coastal concrete structure reinforced by CFRP [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2008, 25 (3): 1-5. (in Chinese))
- [10] 贺拴海,吕颖钊. 考虑材料耐久性的在役混凝土结构可靠度研究 [J]. 建筑科学与工程学报,2005,22 (1): 71-75. (HE Shuanhai, LÜ Yingzhao. Reliability research of existing reinforced concrete structures [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22 (1): 71-75. (in Chinese))
- [11] 徐建芝,丁铸,邢峰. 钢筋混凝土电化学脱盐修复技术研究现状 [J]. 混凝土,2008 (9): 22-24. (XU Jianzhi, DING Zhu, XING Feng. Research status of electrochemical chloride extraction (ECE) on steel reinforced concrete [J]. Concrete, 2008 (9): 22-24. (in Chinese))
- [12] 张羽,张俊喜,王昆,等. 电化学修复技术在钢筋混凝土结构中的研究及应用 [J]. 材料保护,2009,42 (8): 51-55. (ZHANG Yu, ZHANG Junxi, WANG Kun, et al. The application and progress of electrochemical rehalilitation technique for reinforced concrete structures [J]. Material Protection, 2009, 42 (8): 51-55. (in Chinese))
- [13] CRAMER S D, BULLARD S J, COVINO B S, et al. Carbon paint anode for reinforced concrete bridge in coastal environments [R]. Albany, O R: Albany Research Center (ARC), 2002.
- [14] MOHAMMED A, HASSAN A A. Cathodic protection for above-water sections of a steel-reinforced concrete seawater intake structures [J]. Material Performance, 1998, 37 (6): 11-16.
- [15] TETTAMANTI M, ROSSINI A. Cathodic prevention and protection of concrete elements at the Sydney Opera House [J]. Material Performance, 1997, 36 (9): 21-25.
- [16] LAMBERT P. Cathodic protection of reinforced concrete [J]. Anti-Corrosion Methods and Materials, 1995, 30 (1): 8-9.
- [17] REDAELLI E, LOLLINNI F, BERTOLINI L. Cathodic protection with localised galvanic anodes in slender carbonated concrete elements [J]. Materials and Structures, 2014, 47 (11): 1839-1855.
- [18] FUNAHASHI M, SIROLA T, MCINTAGGART D. Cost effective cathodic protection system for concrete structures [J]. Materials Performance, 2014, 53 (11): 32-37.
- [19] 方琴. 高效牺牲阳极阴极保护技术在天津港改扩建工程中的应用 [J]. 水道港口, 2002, 23 (3): 152-153. (FANG Qin. Application of efficient sacrificial anode and cathodic protection technique in extension of Tianjin Port [J]. Journal of Waterway and Harbour, 2002, 23 (3): 152-153. (in Chinese))
- [20] 黄晓刚,何健,储洪强. 电化学防腐技术在混凝土结构中的应用研究概况 [J]. 建筑技术开发, 2008, 35 (8): 51-55. (HUNAG Xiaogang, HE Jian, CHU Hongqiang. Application research of electrochemistry anti-corrosion technique in concrete structure [J]. Building Technique Development, 2008, 35 (8): 51-55. (in Chinese))
- [21] 樊云昌,曹兴国,陈怀荣. 混凝土中钢筋腐蚀的防护与修复 [M]. 北京:中国铁道出版社,2001:172-175.
- [22] VANDANHONDE A J, POLDER R B. Electrochemical realaklizationand chloride removal of concrete [J]. Construction Repair, 1992, 8: 22-26.
- [23] 朱雅仙. 碳化混凝土再碱化技术的研究 [J]. 水运工程, 2001 (6): 12-14. (ZHU Yaxian. A study on rebasification technique for carbonized concrete [J]. Port & Waterway Engineering, 2001 (6): 12-14. (in Chinese))
- [24] VELIBASAKIS E E, HENRIKSEN S K, WHIRMORE D W. Chloride extraction and realkalization of reinforced concrete stop steel corrosion [J]. Performance of Constructed Facilities, 1998, 12 (2): 77-84.
- [25] ANDRADE C, CASTELLOTE M, SARRIA J. Evolution of pore solution chemistry, electro-osmosis and rebarcorrosion rate induced by realkalization [J]. Material Structure, 1999, 32: 427-436.
- [26] 屈文俊,陈璐,刘于飞. 碳化混凝土再碱化的维修技术 [J]. 建筑结构, 2001, 31 (9): 58-60. (QU Wenjun, CHEN Lu, LIU Yufei. Realkalization maintenance

- technology for carbonized concrete [J]. Building Structure, 2001, 31 (9) : 58-60. (in Chinese))
- [27] 童芸芸, VERONIQUE B, ELISABETH M, 等. 钢筋腐蚀程度对电化学再碱化处理效果的影响[J]. 浙江大学学报:工学版, 2011, 45 (11) : 1991-1996. (TONG Yunyun, VERONIQUE B, ELISABETH M, et al. Impact of steel rebars corrosion degree on the effectiveness of realkalization treatment [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2011, 45 (11) : 1991-1996.
- [28] OTSKUI N, RYU J S. Use of electro-deposition for repair of concrete with shrinkage cracks [J]. Materials in Civil Engineering, 2001, 13 (2) : 136-142.
- [29] SASAKI H, YOKADA M. Repair method of marine reinforced concrete by electro-deposition technique [C] // Proceedings of the Annual Conference of Japanese Concrete Institute. Kyoto: Japan Society of Civil Engineering, 1992 : 849-854.
- [30] RYU J S, OTSUKI N. Crack closure of reinforced concrete by electro-deposition technique [J]. Cement and Concrete Research, 2002, 32 (1) : 159-164.
- [31] RYU J S. An experimental study on the repair of concrete crack by electrochemical technique [J]. Materials and Structures, 2001, 34 (4) : 433-437.
- [32] 蒋正武, 邢峰, 孙振平, 等. 电沉积法修复钢筋混凝土裂缝的基础研究 [J]. 水利水电科技进展, 2007, 27 (3) : 5-8. (JIANG Zhengwu, XING Feng, SUN Zhenping, et al. Preliminary study on crack repair of reinforced concrete by using electro-deposition method [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2007, 27 (3) : 5-8. (in Chinese))
- [33] 储洪强, 蒋林华. 利用电沉积方法修复混凝土裂缝试验研究 [J]. 河海大学学报:自然科学版, 2005, 33 (3) : 310-313. (CHU Hongqiang, JIANG Linhua. Experimental study on electro-deposition method for repair of concrete cracks [J]. Journal of Hohai University: Natural Science Edition, 2005, 33 (3) : 310-313. (in Chinese))
- [34] 储洪强, 蒋林华, 徐怡. 电沉积法修复混凝土裂缝中电流密度的影响 [J]. 建筑材料学报, 2009, 12 (6) : 729-733. (CHU Hongqiang, JIANG Linhua, XU Yi. Influence of current density in electro-deposition method for repair of concrete cracks [J]. Journal of Building Materials, 2009, 12 (6) : 729-733. (in Chinese))
- [35] POLDER R, VANDER H J. Electrochemical realkalisation and chloride remove of concrete, state of the art, laboratory and field experience [C] // Proceedings of RILEM conference, rehabilitation of concrete structures. Melbourne: RILEM, 1992 : 135-147.
- [36] SAWADA S, PAGE C L, PAGE M M. Electrochemical injection of organic corrosion inhibitors into concrete [J]. Corrosion Science, 2005, 47 : 2063-2078.
- [37] 金伟良. 腐蚀混凝土结构学 [M]. 北京: 科学出版社, 2011 : 7-10.
- [38] 孙文博, 高小建, 杨英姿, 等. 电化学除氯处理后的混凝土微观结构研究 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2009, 30 (10) : 1108-1112. (SUN Wenbo, GAO Xiaojian, YANG Yingzi, et al. Microstructure of concrete after electrochemical chloride extraction treatment [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2009, 30 (10) : 1108-1112. (in Chinese))
- [39] 郭育霞, 贡金鑫, 尤志国. 电化学除氯后混凝土性能试验研究 [J]. 大连理工大学学报, 2008, 48 (6) : 863-868. (GUO Yuxia, GONG Jinxin, YOU Zhiguo. Experimental study of characteristics of concrete experienced electrochemical extraction of chlorides [J]. Journal of Dalian University of technology, 2008, 48 (6) : 863-868. (in Chinese))
- [40] 朱雅仙, 朱锡昶, 罗德宽, 等. 电化学脱盐对钢筋混凝土性能的影响 [J]. 水运工程, 2002 (5) : 8-12. (ZHU Yaxian, ZHU Xichang, LUO Dekuan, et al. Influences of electrochemical desalination on the behavior of reinforced concrete [J]. Port & Waterway Engineering, 2002 (5) : 8-12. (in Chinese))
- [41] SIEGWART M, LYNESSB J F, MCFARLAND B J. Change of pore size in concrete due to electrochemical chloride extraction and possible implications for the migration of ions [J]. Cement and Concrete Research, 2003, 33 : 1211-1221.
- [42] CASTELLOTE M, ANDRADE C, ALONSO M C. Changes in concrete pore size distribution due to electrochemical chloride migration trials [J]. ACI Material Journal, 1999, 96 : 315-319.
- [43] 韦江雄, 王新祥, 郑靓, 等. 电除盐中析氢反应对钢筋混凝土黏结力的影响 [J]. 武汉理工大学学报, 2009, 31 (12) : 30-34. (WEI Jiangxiong, WANG Xinxiang, ZHEN Jing et al. Research on the hydrogen evolution reaction and its effect on the bond strength between reinforcement and concrete during electrochemical chloride extraction [J]. Journal of Wuhan University of technology, 2009, 31 (12) : 30-34. (in Chinese))
- [44] ORELLAN J C, ESCADEILLAS G, ARLIGUIE G. Electrochemical chloride extraction: efficiency and side effects [J]. Cement and Concrete Research, 2004, 34 : 227-234.
- [45] 吕忆农, 朱雅仙, 卢都友. 电化学脱盐对混凝土碱集料反应的影响 [J]. 南京工业大学学报, 2002, 24 (6) : 35-39. (LÜ Yinong, ZHU Yaxian, LU Duyou. Influence of electrochemical desalination on AAR of concrete [J]. Journal of Nanjing University of Technology: Natural Science Edition, 2002, 24 (6) : 35-39. (in Chinese))
- [46] POLDER R B, HONDE H J. Electrochemical realkalisation and chloride removal of concrete state of the art, laboratory

- and field experience [J]. Construction Repair, 1996, 6 (5): 19-24.
- [47] 孙文博,高小建,杨英姿,等. 不同配合比混凝土的电化学除氯效果研究[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2009, 21 (3): 308-311. (SUN Wenbo, GAO Xiaojian, YANG Yingzi, et al. Efficiency of electrochemical chloride extraction from concretes with different mixing proportions [J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2009, 21(3): 308-311. (in Chinese))
- [48] 孙文博,巴恒静,高小建. 电化学除氯对钢筋混凝土钢筋自然电位的影响[J]. 低温建筑技术, 2009 (5): 1-2. (SUN Wenbo, BA Hengjing, GAO Xiaoxian. The effects of electrochemical chloride extration on the spontaneous potential of reinforcement in reinforced concrete [J]. Low Temperature Architecture Technology, 2009 (5): 1-2. (in Chinese))
- [49] 姜怀宝,杨树立,高小建. 水灰比对混凝土电化学除氯效果的影响[J]. 山西建筑, 2008, 34 (28): 180-181. (JIANG Huabao, YANG Shuli, GAO Xiaojian. Influence of W/C on efficiency of electrochemical chloride extraction from concrete [J]. Shanxi Architecture, 2008, 34 (28): 180-181. (in Chinese))
- [50] 周华林,胡达和. 迁移复合型钢筋阻锈 (MCI) 新技术[J]. 工业建筑, 2001, 31 (2): 65-67. (ZHOU Hualin, HU Dahe. New technology of migration composite rebar corrosion inhibiting (MCI) [J]. Industrial Construction, 2001, 31(2): 65-67. (in Chinese))
- [51] 黄洁,张松. 钢筋阻锈剂综述[J]. 工业建筑, 2008 (增刊 1): 826-829. (HUANG Jie, ZHANG Song. Review of corrosion inhibitors of rebar [J]. Industrial Construction, 2008 (Sup1): 826-829. (in Chinese))
- [52] 周华林,胡达和. 钢筋锈蚀状态检测与 MCI 阻锈技术的应用[J]. 工业建筑, 2001, 31 (4): 76-78. (ZHOU Hualin, HU Dahe. Detection of reinforcement corrosion state and application of MCI corrosion inhibitor technology [J]. Industrial Construction, 2001, 31 (4): 76-78. (in Chinese))
- [53] EYDELNART A, MIKSIC B, GELNER L. Migrating corrosion inhibitors for reinforced concrete [J]. Con Chenm Journal, 1993, 2; 38-52.
- [54] HETTIARACHCHI S, GAYNOR A T, ASARO M F. Electrochemical chloride removal and protection of concrete bridge components (injection of synergistic inhibitors), strategic highway research program, SHRP-S-310 [R]. Washington, D. C.: National Research Council, 1987.
- [55] KUBO J, SAWADA S, PAGE C L, PAGE M M. Electrochemical injection of organic corrosion inhibitors into carbonated cementitious materials; part 1 effects on pore solution chemistry [J]. Corrosion Science, 2007, 49: 1186-1204.
- [56] KUBO, J SAWADA S, PAGE C L, et al. Electrochemical injection of organic corrosion inhibitors into carbonated cementitious materials; part 2 mathematical modelling [J]. Corrosion Science 2007, 49: 1205-1227.
- [57] SAWADA S, PAGE C L, PAGE M M. Electrochemical injection of organic corrosion inhibitors into concrete [J]. Corrosion Science 2005, 47: 2063-2078.
- [58] 洪定海,王定选,黄俊友. 电迁移型阻锈剂 [J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2006, 36 (增刊 2): 154-199. (HONG Dinghai, WANG Dingxuan, HUANG Junyou. Electro-migrating corrosion inhibitors [J]. Journal of Southeast University of technology: Natural Science Edition, 2006, 36 (Sup2): 154-199. (in Chinese))
- [59] 唐军务,李森林,蔡伟成,等. 钢筋混凝土结构电渗阻锈技术研究 [J]. 海洋工程, 2008, 26 (3): 83-88. (TANG Junwu, LI Senglin, CAI Weicheng, et al. Investigation of inhibitor electro-migration anticorrosion technology on reinforced concrete [J]. The Ocean Engineering, 2008, 26 (3): 83-88. (in Chinese))
- [60] 唐军务,黄长虹. 高桩码头钢筋混凝土结构延寿技术现场试验研究 [J]. 中国港湾建设, 2009 (4): 26-28. (TANG Junwu, HUANG Changhong. Field experimental study on prolonging life technology for the reinforced concrete structure of the high-piled wharf [J]. China Harbour Engineering, 2009 (4): 26-28. (in Chinese))
- [61] 唐军务,朱雅仙,黄长虹,等. 军港码头采用不同延寿修复技术比较研究 [J]. 海洋工程, 2009, 27 (4): 116-120. (TANG Junwu, ZHU Yaxian, HUANG Changhong, et al. Comparative study on life extension repair technology in naval wharfs [J]. The Ocean Engineering, 2009, 27 (4): 116-120. (in Chinese))
- [62] 章思颖. 应用于双向电渗技术的电迁移型阻锈剂的筛选 [D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- [63] 郭柱. 三乙烯四胺阻锈剂双向电渗效果研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- [64] 黄楠. 双向电渗对氯盐侵蚀混凝土结构的修复效果及综合影响 [D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- [65] 张华. 混凝土双向电渗耐久性提升应用中的若干问题研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
- [66] 王卫仑,徐金霞,高国福,等. 电化学除氯法和二-甲基乙醇胺电渗透的联合修复技术 [J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2014, 42 (6): 535-540. (WANG Weilun, XU Jinxia, GAO Guofu, et al. Remediation technology created by combining electrochemical removal of chloride with electro-osmosis of N, N'-dimethylaminoethanol [J]. Journal of Hohai University: Natural Science Edition, 2014, 42 (6): 535-540. (in Chinese))
- [67] 刘宗玉. 钢筋混凝土电迁移阻锈及除盐试验研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [68] 艾志勇. 新型电迁移性阻锈剂的设计、合成及其对钢筋混凝土组成、结构与性能的影响 [D]. 广州: 华南理工大学, 2013.

(下转第 135 页)

健康评估;四要着力抓好地下水超采区治理,建立地下水总量控制指标体系,实行地下水水量水位双控制,以华北等严重超采区为重点,全面加强综合治理,逐步实现地下水采补平衡。

4.4 着力破解 3 个突出障碍,建立 3 项保障机制

“十三五”期间要下大力气破解计量监控能力、基层管理能力、依法管水能力较弱这 3 个突出障碍,实现跨越发展。一要继续推动国家水资源监控能力建设项目。加强农业灌溉用水等重点取水户计量监控,不断提高水资源监控计量覆盖率;强化饮用水水源地和排污口监测能力,以及突发水污染事件应急监测能力建设,切实保障人民群众供水安全;以水资源管理信息系统为龙头,加强数据整合和共享,大幅提高水资源管理信息化水平。二要强力推动基层水资源管理能力的提升,开展基层水资源管理规范化建设,明确机构职能、权利义务和人员编制,做好经费、技术和装备保障;开展基层水资源管理培训,提升基层管理人员专业技术水平。三要加快推动水资源领域立法工作,“十三五”期间要积极争取出台《节约用水条例》《地下水管理条例》等重要法律法规,确保水资源管理有法可依;推动建立水资源督察制度,严格责任追究。

参考文献:

[1] 中华人民共和国水利部. 2013 年全国水利发展统计公报[EB/OL]. [2014-11-17]. <http://www.jszg.com.cn/Index/Display.asp?NewsID=19815>.
[2] 中华人民共和国水利部. 2013 年中国水资源公报[EB/

OL]. [2015-04-13]. http://cn.chinagate.cn/reports/2015-04/13/content_35308335_2.htm.
[3] 《中共中央 国务院关于加快水利改革发展的决定》辅导读本编写组.《中共中央 国务院关于加快水利改革发展的决定》辅导读本[M]. 北京:水利水电出版社,2011.
[4] 中华人民共和国水利部. 水利部关于加快推进水生态文明建设的意见(水资源[2013]1号)[EB/OL]. [2013-01-07]. http://www.czs.gov.cn/slj/zwgk/tzgg/content_285240.html.
[5] 《国务院关于实行最严格水资源管理制度的意见》辅导读本编写组.《国务院关于实行最严格水资源管理制度的意见》辅导读本[M]. 北京:水利水电出版社,2012.
[6] 陈明忠. 强化顶层设计 细化落实措施 全面落实最严格水资源管理制度[J]. 中国水利,2012(24):5-7. (CHEN Mingzhong. Strengthen top-level design and refine implementation measures, fully implementing the strictest water resources management system [J]. China Water Resources, 2012(24):5-7. (in Chinese))
[7] 国务院办公厅. 国务院办公厅关于印发实行最严格水资源管理制度考核办法的通知国办发[2013]2号[EB/OL]. [2013-01-02]. http://www.gov.cn/zwgk/2013-01/06/content_2305762.htm.
[8] 陈雷. 保护好生命之源、生产之要、生态之基:落实最严格水资源管理制度[J]. 求是,2012(14):38-40. (CHEN Mingzhong. Protect the source of life, the key of production, and the basis of ecosystem: implement the strictest water resources management system [J]. Qiushi, 2012(14):38-40. (in Chinese))
(收稿日期:2015-06-15 编辑:彭桃英)

(上接第 76 页)

[69] 郑靛,韦江雄,余其俊,等. 电化学除盐过程中钢筋表面发生的电极反应[J]. 硅酸盐学报,2009,37(7):1191-1195. (ZHENG Jing, WEI Jiangxiong, YU Qijun, et al. Electrode reaction during electrochemical chloride extration of reinforced concrete [J]. Journal of Chinese Ceramic Society,2009,37(7):1191-1195. (in Chinese))
[70] GLEITER H. Nanostructured materials: basic concepts and microstructure[J]. Acta Materialia,2000,48:1-29.
[71] CARDENAS H, KUPWADE-PATIL K, EKLUND S. Corrosion mitigation in mature reinforced concrete using nanoscale pozzolan deposition[J]. Journal of Materials in Civil Engineering,2011,23(6):752-760.
[72] GORDON K, KUPWADE-PATIL K, LEE L et al. Long-term durability of reinforced concrete rehabilitated via electrokinetic nanoparticle treatment[M]. London: Taylor & Francis Group,2009:373-379.

[73] 张丹,王世敏,董兵海,等. 硅溶胶稳定性影响因素的研究进展[J]. 胶体与聚合物,2011,29(2):88-90. (ZHANG Dan, WANG Shimin, DONG Binhai, et al. Research progress of stability influencing factor of colloidal silica[J]. Chinese Journal of Colloid and Polymer,2011,29(2):88-90. (in Chinese))
[74] 孔德玉,杨辉,王家邦,等. 氧化铝粉体在硅溶胶中的分散机理研究[J]. 稀有金属材料与工程,2004,33(3):83-87. (KONG Deyu, YANG Hui, WANG Jiabang, et al. Stabilization mechanism of alumina powder dispersed in silica sol [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2004,33(3):83-87. (in Chinese))
[75] XU Jinxia, JIANG Linhua, WANG Weilun, et al. Effectiveness of inhibitors in upgrading chloride threshold value for steel corrosion [J]. Water Science and Engineering, 2013, 6(3):354-363.
(收稿日期:2015-07-05 编辑:徐娟)