

1 绪 论

1.1 研究背景与意义

自 19 世纪 20 年代波特兰水泥问世以来,混凝土材料就以其取材方便、成本低廉、便于维护等方面的优势,在土建工程中得到了广泛的应用^[1-3]。长期以来,人们总是认为混凝土是一种耐久性良好的材料,设计的时候偏重考虑结构的安全性和使用性,忽视了复杂多变的环境作用造成材料和结构耐久性损伤,加之施工管理不当、不重视维修保养等原因,造成许多重大土木工程的结构性能提前劣化及使用功能和承载能力下降,从而影响到结构的安全使用,不得不提前退役^[4]。近年来,结构耐久性问题已受到国内外工程界的普遍关注,有关耐久性方面的研究已成为土木工程界的重大研究领域^[5-10]。

所谓混凝土结构的耐久性,是指混凝土结构在正常设计、正常施工、正常使用和正常维护条件下,在规定的时间内,由于结构构件性能随时间的劣化,但仍能满足预定功能的能力^[11]。也就是指结构在自然环境、使用环境及材料内部因素的作用下,在设计要求的目标使用期内,不需要花费大量资金加固处理而能保证其安全性和适用性的能力^[12]。

根据《混凝土结构耐久性设计与施工指南》(以下简称《指南》)^[13]的有关条文规定,混凝土结构及其构件的耐久性,应根据不同的设计使用年限和不同的环境类别及其作用等级进行设计,并必须考虑施工质量控制与质量保证对结构耐久性的影响,必须考虑结构使用过程中的维护与检测要求。混凝土结构耐久性设计文件应列入以下内容:结构所处的环境类别及其作用等级;结构的设计使用年限;对施工单位(包括混凝土供应方)提出耐久混凝土的技术要求和施工质量的合格验收标准;对工程业主的运营管理单位提出使用过程中需要进行正常的维护、修理或更换的具体内容与要求。

结构的设计使用年限^[14]应是具有一定裕度或保证率的目标使用年限,并与结构使用的适用性极限状态相对应。设计的使用年限必须由业主与设计人员共同商定,并不低于政府主管部门规定的最低要求。根据《建筑结构可靠度设计统一标准》(GB50068)的规定,参照《指南》的有关条文,钢铁厂内大部分建(构)筑

物结构的设计使用年限不小于 50 年。

在混凝土应用于土木工程的 150 年间,国内和国外都出现过很多因混凝土结构安全性和耐久性不足而引发的事故,混凝土耐久性不足已是当今世界的重大问题^[15]。在第二届国际混凝土耐久性会议上,梅塔教授指出:“当今世界混凝土破坏原因,按递减顺序是:钢筋锈蚀、冻害、物理化学作用”。他明确将“钢筋锈蚀”排在影响混凝土耐久性因素的首位。而来自海洋环境和使用“除冰盐”中的氯盐,又是造成钢筋锈蚀的主要原因。当然,混凝土中性化^[16]、冻融^[17-21]等也促进钢筋腐蚀破坏。“立足前期措施、着眼长远效益”,这是美国经过正反两个方面的经验教训所得出的宝贵结论。美国正在强行实施基建工程管理中的“全寿命经济分析法”(LCCA),其基本思想是,在设计施工阶段,不论是事先采取防护措施还是以后“坏了再修”,都要做出经济预算和比较,承建者要对工程的“全寿命”负责到底,这样可避免“短期行为”给后人带来的麻烦与巨大经济损失。“全寿命经济分析法”中曾有以下例举:工程处在氯盐腐蚀环境中,钢筋混凝土结构物设计寿命为 40 年,前期实施措施(采用钢筋阻锈剂),附加费用为 0.85 美元/ m^2 (混凝土面板);若前期无措施,则 15~20 年开始修复,40 年内累积费用为 4.8 美元/ m^2 (5 倍于前者)。可见,推行“全寿命经济分析法”和倡导工程前期(设计、施工阶段)采取防钢筋腐蚀的措施,已经不是单纯的技术问题,其重大意义和长远经济效益是不可低估的。

混凝土中钢筋锈蚀被认为是当今影响混凝土结构耐久性的首要原因,已成为世界普遍关注的重大问题之一^[22]。近年来,国家基本建设投资与国内生产总值(GDP)的比例一直稳定在 35%以上,我国水泥工业、钢铁工业连续几年稳居世界第一。与美国、欧盟以及日本、韩国的建设历史相比,我们的发展要晚一到两个周期,也正是这个差距,让我们清楚地看到一个严重的问题,这就是混凝土结构的耐久性问题。我们可能面临在大建尚未完成时,就不得不开始大规模维修,这将对我国国民经济的发展造成严重的损失。

根据有关资料,世界一些国家的腐蚀损失,平均可占国民经济总产值的 2%~4%,其中,被认为与钢筋腐蚀有关者可占 40%。在中国,根据中国工程院柯伟院士在 2003 年公布的《中国腐蚀调查报告》^[23]指出:“我国每年为腐蚀支付的直接费用已达人民币 2000 亿元以上,如果考虑间接损失,腐蚀费用的总和估计可达 5000 亿元,约占国民经济总值的 5%”。美国 1984 年报道,仅就桥梁而言,57.5

万座钢筋混凝土桥，一半以上出现钢筋腐蚀破坏，40%承载力不足和必须修复与加固处理，当年的修复费为 54 亿美元；1998 年报道钢筋混凝土腐蚀破坏的修复费，一年要 2500 亿美元，其中桥梁修复费为 1550 亿美元（是这些桥初建费用的 4 倍）；还有报道说，到本世纪末，美国要花 4000 亿美元用于修复和重建钢筋腐蚀破坏的工程。如此巨大的经济投入，引起美国朝野人士的震惊与高度重视，并制定法律法规，限制腐蚀破坏的发生和挽回部分经济损失。加拿大早期大量使用“除冰盐”，使钢筋混凝土桥梁等破坏严重。欧洲、英国、澳大利亚、海湾国家等，都有以氯盐为主的钢筋腐蚀破坏问题（英国修复费为每年 50 亿英镑）。韩国曾发生一系列建筑物破坏、倒塌事件，其中也与“盐害”有关。我国台湾重修澎湖大桥和不断发生的“海砂屋”事件，也是氯盐腐蚀钢筋所造成的。根据我国钢筋混凝土结构设计规范组 1978 年的一项调查，在一般环境下有 40% 的工业民用建筑结构、而在较潮湿环境下有 90% 的民用建筑结构中构件的钢筋已经开始锈蚀。冶金部于 1983 年对重点钢铁企业及部分地方企业的建筑进行调查，发现危险厂房占冶金厂房的 10%。南京水利科学研究院等单位对我国华南已建 18 座海港码头及浙东沿海的一些钢筋混凝土工程的调查发现，50 年代建成的一批建筑物，绝大多数已严重损坏，主要构件如梁、柱全部呈现钢筋外露，有的锈断，一些工程已被迫停止使用。60 年代建成的建筑物，大多数损坏或局部破坏，主要表现为顺筋裂缝，需要进行大修或检修。调查指出，华南地区修建的海工建筑物，使用 7~20 年时间就须进行大修或者检修，使用寿命受到严重威胁。特别应该指出的是，我国工业环境中的建筑物，其钢筋锈蚀破坏现象十分普遍与严重，有调查报告表明，大多数工业建筑都远远达不到其设计使用寿命的年限，目前正在进入大规模修复的时期。因此，我国钢筋锈蚀破坏的形势是十分严峻的。

由此可见，钢筋混凝土腐蚀破坏所造成的经济损失是巨大的。在首钢京唐钢铁项目工程设计中，要充分认识和深入研究地下钢筋混凝土结构防腐蚀问题，运用“全寿命经济分析法”理念，提出技术可行、经济可靠的防腐蚀措施，避免引起钢铁厂项目在以后的运行过程中发生损害和经济损失。

首钢京唐钢铁项目是列入国家“十一五”发展规划的重点钢铁项目，受到国家领导人高度重视，更是受到国内外业内人士和专家的关注。温家宝总理于 2007 年 5 月 1 日在首钢京唐钢铁有限责任公司钢铁厂施工现场考察时，对京唐钢铁项目建设的高标准、严要求提出了明确的目标，他指出：“要努力把首钢京唐钢铁厂

建设成为产品一流、管理一流、环境一流、效益一流的现代化大型企业，成为具有国际先进水平的精品板材生产基地和自主创新的示范工厂，成为节能减排和发展循环经济的标志性工厂”。并强调“一是要精心规划、精心组织、精心施工、严格要求、严格管理，确保工程质量，确保施工安全，确保项目按期投产，确保完成首钢搬迁调整。二是要加强自主创新。采用先进技术和工艺，保证产品和技术达到世界一流水平，使之具有很强的国际竞争力”。

工程项目从可行性研究到建成投产，是一个系统工程，每个环节都十分重要，特别是工程设计环节更是重中之重，它是将决策者意图转化成可供实施蓝图的环节。要保证工程项目的高水平，设计环节的高质量十分关键的。要保证设计环节的高质量，将设计过程中涉及的因素研究分析透彻并创新的提出解决办法是十分必要的。

2000年国务院曾发布的《建设工程质量管理条例》^[24]（第279号令）明文规定“设计要注明工程合理使用年限”，对于基础设施工程的保修年限为“设计文件规定的该工程的合理使用年限”，这是我国首次以政府命令形式，对设计寿命和寿命的保持提出明确的要求。2002年建设部发布的《混凝土结构设计规范》中对混凝土耐久性设计提出明确的要求。混凝土结构耐久性破坏是一个长期过程，提高混凝土耐久性所采取措施增加的费用也是一个长期受益的过程，正是因为如此，往往被投资者和结构工程师所忽略，或由于结构工程师缺乏材料方面的认识，对材料的劣化作用只好简单处理，导致混凝土结构耐久性破坏先从影响适用性开始，进而导致安全性的破坏。在我们和专家交流的过程中，专家们提出在曹妃甸钢铁厂环境条件下，地下混凝土工程的设计除了满足强度、刚度要求外，主要以混凝土结构的耐久性设计为主。

为了满足京唐钢铁厂项目的高水平要求，在设计中贯彻地下混凝土结构设计以耐久性为主的理念，就要使项目投资者充分认识到腐蚀危害对建筑物造成的巨大经济损失，设计者就要认真地研究致使地下混凝土结构劣化的环境因素、机理，采取防止地下混凝土劣化的方法，提出保证地下混凝土结构耐久性可行的、经济适用的措施。然而我国目前海洋工程超长寿命服役的相关技术规范，高性能混凝土的设计、生产、施工技术在工程中的应用方面尚为空白，因此结合钢铁基地工程的具体需要，研究海水混凝土结构耐久性和高性能混凝土的应用技术极为迫切和重要。

1.2 工程应用实例

目前,在实际工程中,已有部分混凝土结构工程在设计过程中引入了耐久性设计的措施,增加了结构的使用年限,取得了良好的经济效益。

柯达中国厦门工程位于厦门市海沧地区,由于地下水水质及土壤情况,设计单位提出采用优质外加剂和优质掺和料“双掺”的技术途径,对水泥进行改性,最终采用普通硅酸盐水泥配制性能优良的混凝土,所配制的各等级混凝土均满足了强度和耐久性的要求,受到了美国专家的好评。

厦门海沧大桥工程位于福建省厦门市,大桥横跨海峡,处于海洋环境中,因此需处理好钢筋锈蚀的问题。在该工程中采用混凝土双掺技术作为海沧大桥钢筋混凝土的主要防海蚀技术措施,最终该工程各部位的混凝土抗碳化及抗氯离子侵蚀性能的试验结果表明:采用混凝土“双掺”技术可以提高混凝土的抗海蚀性能,提高锚锭大体积混凝土的抗裂性能,明显地改善混凝土的和易性和施工性能,满足结构上的力学性能要求,可以节约水泥、节约工程投资。

厦门环岛路观海桥工程位于厦门市环岛路,是我国在桥梁设计中桥面最低的桥,因此对钢筋混凝土的耐久性要求很高,设计要求混凝土抗氯离子渗透不得大于 1000 库仑,故在该工程中采用的抗腐蚀技术措施为高性能混凝土和环氧涂层钢筋双保护措施。

厦门环岛纳潮口特大桥是环岛路三期工程北面一段,在该工程中,对于混凝土而言除了耐久性要求很高外,最大的困难是该工程施工条件差,混凝土泵送距离过长,因此对混凝土的工作性能要求很高,针对该工程采用高性能的外加剂和双掺技术配制的桩基混凝土、承台混凝土、锚固填充的微膨胀混凝土、箱梁混凝土、桥面铺装 C60 混凝土等,都是经筛选优化配合比后成功应用的案例。

厦门翔鹭 PTA 工程位于厦门海沧地区,是生产化纤产品的大型工业厂房,其中腾龙树脂烟囱基础为 C30P8 大体积混凝土,一次性浇筑量约 5000m³、最厚 4.5m,采用高性能外加剂和双掺技术,其单方水泥用量仅为 206 公斤,与国内先进配合比的水泥用量相近,所浇筑混凝土的抗渗等级可达到 P12 以上,未产生温度裂缝,混凝土最终质量很好,受到日本专家的好评。

上述是工程中应用混凝土耐久性设计措施的成功实例,由此可以看出,混凝土结构的耐久性设计已是工程设计中的重要环节,其带来的经济效益也是非常可

观的。

1.3 首钢京唐钢铁项目工程概况

1.3.1 工程建设进度概况

首钢京唐工程，是国家“十一五”重点建设项目，受到党和国家领导人的亲切关注，也是冶金史上最大的建设工程，不但设计先进，施工质量也要求高，在公司领导的直接指挥和严格要求下，一期一步工程，经过近两年的施工即将竣工投产。在这期间，共完成造地 21 平方公里；完成吹填海砂 1.1039 亿立方米；完成混凝土灌注桩、PHC 桩、CFG 桩合计 15.42 万根；共浇筑混凝土 300 多万立方米；加工、安装钢结构 42 万吨；安装设备 47.52 万台套；完成地上综合管网 34.42 千米、地下管网 24.46 千米；完成电缆隧道 1.96 千米；彩板安装了 115.34 万平；道路施工了 63.63 万平；分部工程验收了 3838 项，单位工程验收了 471 项。

目前，焦化 A 焦炉工程已于 2008 年 10 月 20 日开始正式投产，目前运行良好；炼铁 1#高炉工程已于 2008 年 10 月 18 日一次点火烘炉成功，目前运行正常，其中，高炉钢结构工程正在申报国家建筑钢结构金奖工程；炼铁热风炉工程已于 2008 年 9 月 28 日成功烘炉，目前运行正常；烧结工程已于 2008 年 9 月 25 日试车，通过 100 小时空负荷试车和 5 小时带料负荷试车检验，目前烧结机运行情况良好；热轧工程已于 2008 年 12 月 10 日热负荷联合试车，成功轧出第一卷热轧板；2 个 220KV 和 3 个 110KV 变电站一次受电成功，并通过电力行业验收；15 万立焦炉煤气柜已于 2008 年 9 月 28 日引气成功，启动燃料站已于 2008 年 4 月 1 日向焦炉送气，目前均运行正常；码头工程已于 2008 年 5 月 16 日通航试运行；原料工程已投入了使用，且运行正常；除盐工程已于 2008 年 5 月 1 日一次通水成功，并投入使用；生活水工程已于 2008 年 6 月 16 日生产出合格水，并投入使用；生产消防水工程已于 2008 年 4 月 7 日正式送水，并投入使用；雨排水工程已全部完成，并投入使用；目前各系统运行正常；彩板封闭工程已近完工，目前所有完工的彩板安装项目，施工质量均达到了冶金行业的最好水平；主干道路工程已全部完成，施工质量达到了市政道路工程一流水平；综合管网工程已全部完成，施工质量达到了同行业优秀水平。

1.3.2 工程所处海域气象环境概况

首钢京唐钢铁联合有限公司钢铁厂位于渤海海域的曹妃甸岛西北侧，行政区域在河北省唐山市滦南县内。曹妃甸岛地处暖温带滨海半湿润大陆性季风气候，四季分明，春季干燥多风，夏季炎热多雨，秋季昼夜温差大，冬季干冷寡照。多年平均气温为 11.1°C ，最冷月是 1 月份，平均气温 -5.6°C ，最热月为 7 月，平均气温 25.3°C ，温度平均年较差 28.9°C ，极端最高气温 39.6°C ，极端最低气温 -21.7°C ，最大极端年较差 61.3°C 。海水中通常盐度全年变化 $30.94\sim 33.00\%$ ，以夏季最低，冬季最高，近岸盐度随入海径流量而变化，其中主要是氯盐。以 Cl^{-} 计，海水中的含量约为 17407mg/L ，海风、海雾中也含有氯盐，属强混合型海区，海洋环境特征明显。暖年平均水温 12.2°C ，8 月平均为 26.5°C ，1 月平均为 -1.05°C 。潮汐类型南堡附近为正规半日潮，其余海域为不正规半日潮，平均潮位 2.24m ，平均潮差 $1\sim 3.08\text{m}$ 。海域波浪为风浪，频率最高值出现在 7 月，频率为 41% ，主浪向为 SSW，南向风浪频率为 42% ，5 级以上的大浪较少。

1.3.3 工程面临的耐久性问题

在海洋环境下混凝土结构的腐蚀荷载主要由气候和环境介质侵蚀引起，主要表现形式有：钢筋锈蚀、冻融循环、盐类侵蚀、溶蚀、碱—集料反应等。

海洋是氯盐的主要来源，海水中通常含有 3% 的盐，其中主要是氯盐^[25-29]。以 Cl^{-} 计，海水中的含量约为 17407mg/L 。海风、海雾中也含有氯盐，海砂中更是含有不等量的氯盐，因此，钢筋锈蚀破坏就成为最主要的腐蚀荷载。

混凝土中钢筋锈蚀可由两种因素诱发：一是海水中 Cl^{-} 的侵蚀，二是大气中的 CO_2 使混凝土碳化。国内外大量工程实践调查和科学研究结果表明：海洋环境下导致混凝土结构中钢筋锈蚀破坏的主要因素是 Cl^{-} 进入混凝土中，并在钢筋表面聚集，促使钢筋产生电化学腐蚀。在曹妃甸钢铁基地周边沿海码头调查中亦证实，海洋环境中混凝土的碳化速度远远低于 Cl^{-} 渗透速度，中等质量的混凝土自然碳化速度平均为 $3\text{mm}/10\text{年}$ 。因此，影响曹妃甸钢铁基地结构混凝土耐久性的首要因素是混凝土的 Cl^{-} 渗透速度。

钢铁厂厂址陆域是由海底取砂吹填形成的，原厂址海水深 $1\text{m}\sim 3\text{m}$ ，面积约为 25km^2 ，填土厚度为 $0.7\text{m}\sim 6\text{m}$ ，平均厚度为 4m 。根据初勘报告书水质分析结果^[30]，地下水对混凝土具有中等腐蚀性，对长期浸在水下的钢筋混凝土结构中的

钢筋具有弱腐蚀性，在干湿交替下具有强腐蚀性。钢铁厂为新建临海工程，混凝土结构经常与地下水接触并处于潮湿环境中，氯离子的渗入导致钢筋混凝土锈蚀而产生破坏，是影响钢筋混凝土建筑物寿命的主要因素。特别是桩基础中的基桩，长期处于地下水升降交替范围内，其中的钢筋更易受到腐蚀破坏，并且由于其在地地下埋着不易观察，它的破坏具有突然性，并且具有不可修复性，它的破坏对建（构）筑物的安全使用具有毁灭性。

针对本工程所处的自然环境,影响混凝土耐久性的破坏因素概括起来如图 1.1 所示。

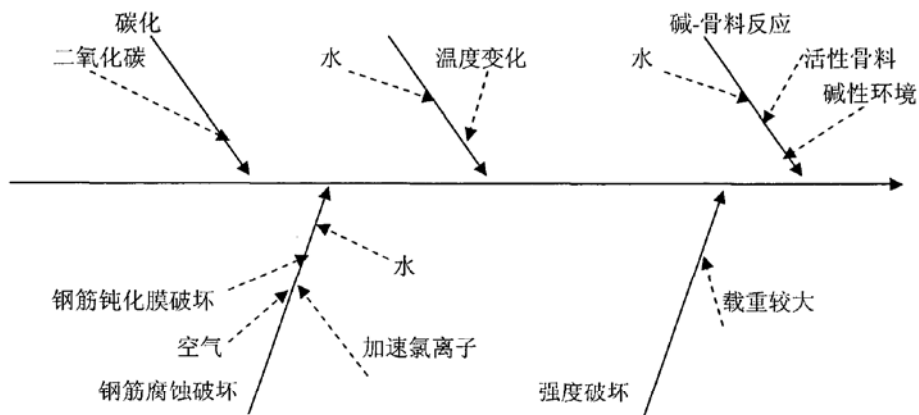


图 1.1 混凝土耐久性破坏因素

基于以上分析可以看出,在首钢京唐钢铁项目工程设计中,要充分认识到混凝土结构耐久性设计的重要性,结合工程所处实际环境,切实做好钢铁厂的耐久性设计工作。

1.4 本文研究的主要内容

混凝土耐久性设计是当今工程设计中不可忽视的环节，已成为目前混凝土科学界和工程界最为关注的问题之一。基于首钢京唐钢铁项目的重要性，本文将开展以下研究工作：

第二章从腐蚀环境及其分类出发,结合首钢京唐钢铁厂地下水水质情况,对项目所处环境进行分类。

第三章开展了高性能混凝土耐久性试验,对试验结果进行分析,研究了高性能混凝土抗碳化、冻融以及氯离子侵蚀的性能。

第四章根据混凝土结构耐久性设计原则及内容，结合首钢京唐钢铁厂的实际情况，提出了项目的混凝土结构耐久性设计方案，并对其进行了经济效益分析。

第五章为本文的主要结论及建议。

2 首钢京唐钢铁项目腐蚀环境分析

首钢京唐钢铁有限公司钢铁厂厂址陆域是由海底取砂吹填形成的,混凝土结构经常与地下水接触并处于潮湿环境中,海水中 Cl^- 离子的渗入易使钢筋混凝土中钢筋锈蚀而导致结构整体破坏。本章对钢铁厂所处环境进行综合分析,依据《混凝土结构耐久性设计与施工指南》,对钢铁厂进行环境作用等级的分类。

2.1 腐蚀环境及其分类

2.1.1 腐蚀的定义

人们对腐蚀的认识是不断加深的,对腐蚀的定义也是不断演变的,大概分为三个阶段。起初,人们认识金属腐蚀是从腐蚀产物感性地发现的,从棕黄色“铁锈” $[\text{FeO}(\text{OH})\text{或}\text{Fe}_2\text{O}_3\cdot\text{H}_2\text{O}]$ 及“铜锈” $[\text{CuSO}_4\cdot 3\text{Cu}(\text{OH})_2]$ 分别地认识了铁和铜的腐蚀。1960年艾文思在他的专著《The Corrosion And Oxidation of metals》^[1]中对腐蚀下的定义为:

“金属腐蚀是金属从元素态转变为化合态的化学及电化学变化”。

中国国家科学技术委员会在1978年10月第一次学科组会议上,就“腐蚀科学”定义和内涵进行了一场十分认真的讨论,一部分科学家坚持“腐蚀”一词还是限于金属腐蚀为宜,“腐蚀”应定义为:

“金属和它所处的环境介质之间发生化学或电化学作用而引起的破坏”。经过一番争论,认为非金属材料发展很快,已经部分地取代了金属材料的作用,世界许多先进国家已经将环境作用下非金属的损伤行为纳入腐蚀框架,而且非金属材料在各行各业有进一步扩大使用的趋势。与会科学家经过充分讨论,最后同意将腐蚀的定义扩展到非金属材料,将金属腐蚀改为材料腐蚀,定义为:

“腐蚀是材料在环境作用下引起的破坏和变质。”

近年来,有人将上述定义扩大为:

“材料的腐蚀是材料受环境介质的化学、电化学和物理作用的破坏现象。”

此定义之间的关系,如下图所示。

到 20 世纪 80 年代, 我国和世界先进国家一样, 腐蚀科学的运用已进入到从设计开始, 贯穿于生产制造、使用维护全过程, 全员参与的效益管理的腐蚀控制系统工程的新阶段。这样关于腐蚀的定义发展到第三阶段, 除考虑材料本身、所处环境外, 还要考虑使用工况的影响。“腐蚀”定义描述为:

“腐蚀控制系统工程”可定义为:

对首钢京唐钢铁项目地下混凝土结构进行耐久性方案设计,就是按照“腐蚀控制系统工程”理论进行研究的。考虑因素有:材料、环境、施工、使用、维护、经济等。

结构材料在制作与使用过程中所处的腐蚀环境类别是多种多样的，包括外界环境与使用工作条件。外界环境可分为自然环境（大气、水、生物、土壤等）和工业环境；使用工作条件随材料的使用用途而有所不同。将材料所处的腐蚀环境类别概括起来，如下图 2.1 所示。

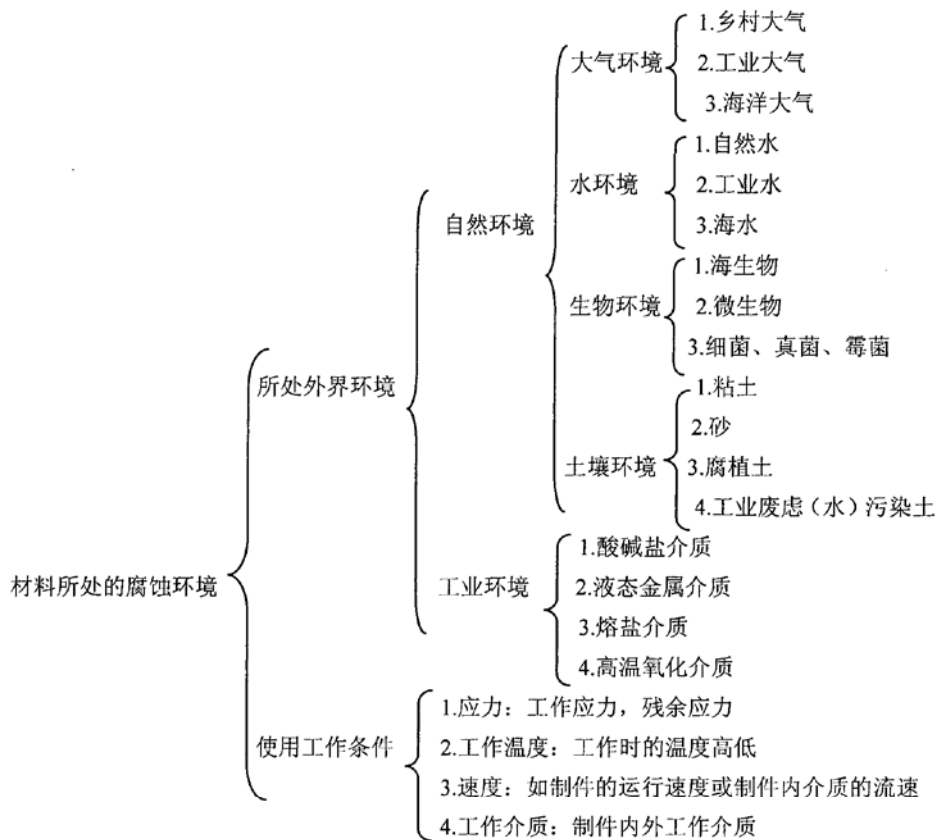


图 2.1 材料制品过程中可能遭遇的环境

将上述腐蚀环境类别按照不同的标准进行腐蚀等级的划分，可分为以下几种情况：

(1) 结构材料所处的环境按其对钢筋和混凝土材料的不同腐蚀机理可分为 5 类（表 2.1）。

表 2.1 环境分类

类别	名称	类别	名称
I	碳化引起钢筋锈蚀的一般环境	V	其他化学物质引起混凝土腐蚀的环境
II	反复冻融引起混凝土冻蚀的环境	V ₁	土中或水中的化学腐蚀环境
III	海水氯化物引起钢筋锈蚀的近海或海洋环境	V ₂	大气污染环境
IV	除冰盐等其他氯化物引起钢筋锈蚀的环境	V ₃	盐结晶环境

注：氯化物环境（III 或 IV）对混凝土材料也有一定腐蚀作用，但主要是引起钢筋的严重锈蚀。反复冻融（II）和其他化学介质（V₁、V₂、V₃）对混凝土的冻蚀和腐蚀，也会间接促进钢筋锈蚀，有的能直接引起钢筋锈蚀，但主要是对混凝土的损伤和破坏。

(2) 环境作用按其配筋混凝土结构侵蚀的严重程度分为 6 级（表 2.2）。

表 2.2 环境作用等级

作用等级	作用程度的定性描述	作用等级	作用程度的定性描述
A	可忽略	D	严重
B	轻度	E	非常严重
C	中度	F	极端严重

(3) 不同环境类别在不同的环境条件（如湿度、温度、侵蚀介质的浓度等）下对配筋结构的环境作用等级如表 2.3。

表 2.3 环境分类及环境作用等级

III 近海或海洋环境	水下区		III-D	长期侵没于海水中的桥墩
	大气区	轻度盐雾区 离平均水位 15m 以上的海上大气区，离涨潮岸线 100m 外至 300m 内的陆上室外环境	III-D	靠海的陆上室外结构桥梁上部结构构件
		重度盐雾区 离平均水位上方 15m 以内的海水大气区，离涨潮岸线 100m 内的陆上室外环境	III-E	靠海的陆上室外结构桥梁上部结构构件
	潮汐区和浪溅区，非炎热地区		III-E	桥墩
	潮汐区和浪溅区，南方炎热潮湿地区		III-F	桥墩
	土中区	非干湿交替	III-D	桩
		干湿交替	III-E	地下结构中外侧接触地下水而内侧接触空气的混凝土衬砌结构

2.2 首钢京唐钢铁项目腐蚀环境分类

2.2.1 地下水水质情况

首钢京唐钢铁联合有限公司钢铁厂临近渤海海域，厂址陆域地下水情况比较复杂，根据《曹妃甸钢铁基地一期初步设计岩土工程勘察报告书》第二册（下）水质分析报告表，地下水的化学成分如表 2.4 所示。

表 2.4 地下水化学成分表

分析项目		含量			分析项目	单位	含量
		mg/l	me	Me%	总硬度	mg/l	5952.0
阳离子	K ⁺ +Na ⁺	10727.0	429.08	78.3	碳酸盐硬度	mg/l	126.0
	Ca ²⁺	417.5	20.83	3.8	非碳酸盐硬度	mg/l	5826.0
	Mg ²⁺	1193.2	98.21	17.9	总碱度	me	2.52
	Fe ²⁺	—	—	—	重碳酸盐碱度	me	2.52
	Fe ³⁺	—	—	—	碳酸盐碱度	me	0.00
	Al ³⁺	—	—	—	氢氧化物碱度	me	0.00
	NH ₄ ⁺	—	—	—	矿化度	mg/l	32440.8
	阳离子总计	12337.7	548.12	100.0	DO	mg/l	—
阴离子	Cl ⁻	17407.4	491.04	89.6	游离 CO ₂	mg/l	28.2
	SO ₄ ²⁻	2618.9	54.56	10.0	侵蚀性 CO ₂	mg/l	2.2
	HCO ₃ ⁻	153.7	2.52	0.5	可溶 SiO ₂	mg/l	—
	CO ₃ ²⁻	0.00	0.00	0.0	硫化氢	mg/l	—
	NO ₃ ²⁻	—	—	—	COD	mg/l	—
	NO ₂ ⁻	—	—	—	氟化物	mg/l	—
	阴离子总计	20179.9	548.12	100.0	PH 值	—	7.87
合计		32517.6					

2.2.2 工程所处环境分类

勘察单位通过对京唐钢铁项目地下水水质情况（表 2.4）进行分析，根据《岩土工程勘察规范》（GB50021-2001）第 12.2.1 条、第 12.2.2 条、第 12.2.3 条、第 12.2.4 条及第 12.2.5 条判定：该地下水对混凝土结构具有中腐蚀性，对钢结构亦具有中等腐蚀性，对钢筋混凝土结构中的钢筋在长期浸水下具有弱腐蚀性，在干湿交替下具有强腐蚀性。

根据《混凝土结构耐久性设计与施工指南》（CCES01—2004）（2005 修订版）表 3.1.3-1 中环境类别“IV 除冰盐等其他氯化物环境（来自海水的除外）、V1 土中及地表、地下水中的化学腐蚀环境（来自海水等氯化物除外）”的表述，由于首钢京唐钢铁联合有限责任公司钢铁厂建于渤海海湾曹妃甸岛吹填陆域上，地下水和海水相连，地下水中 Cl⁻离子含量为 17407.4 mg/L，地下水中还有 SO₄²⁻离子和 Mg²⁺离子，对混凝土本身还有中等腐蚀性。综合考虑并参照《指南》有关条文的规定，将钢铁厂环境分类及环境作用等级定为 III—E 级。

2.3 本章小结

本章从腐蚀的定义及腐蚀环境等级分类出发,根据《混凝土结构耐久性设计与施工指南》手册,结合首钢京唐钢铁公司厂址陆域的实际环境情况,将其环境分类及环境作用等级定为Ⅲ-E级。

3 高性能混凝土耐久性能试验研究

首钢京唐钢铁公司临近海洋，厂址所处环境复杂，混凝土结构需要具备良好的耐久性能。本章通过高性能混凝土耐久性能试验研究，对混凝土抗碳化、冻融以及氯离子侵蚀的情况进行分析，为本工程的耐久性设计奠定基础。

3.1 试验内容及目的

- (1) 进行高性能混凝土碳化试验，研究阻锈剂和掺和料对碳化性能的影响。
- (2) 进行高性能混凝土动弹模量试验，研究混凝土经受冻融或其它侵蚀作用后遭受破坏的程度，并以此来评定其耐久性能。
- (3) 进行高性能混凝土抗氯离子渗透性试验，研究掺加阻锈剂和掺和料混凝土的耐海水腐蚀性能。

3.2 试验原材料与配合比

3.2.1 试验原材料

(1) 水泥

根据《指南》的 4.0.1 条的规定，配制耐久性混凝土应选用质量稳定、低水化热和含碱量偏低的水泥，尽可能避免使用早强水泥和 C₃A 含量偏高的水泥。主要目的是控制混凝土的水化速率过快、水化热大、早期强度发展过快过高，导致混凝土的微观结构不良、收缩大、抗裂性下降、抗腐蚀性差，限制水泥的含碱量，主要是为了防止混凝土发生碱—骨料反应。而水泥水化的高碱度，使钢筋表面形成钝化膜，这是混凝土之所以能保护钢筋的主要依据的基本条件，任何削弱或丧失这个条件的因素，都将促进钢筋的锈蚀，影响混凝土的耐久性。在混凝土的含碱量上，应根据环境条件和试验确定一个比较合理的含碱量。水泥宜选用品质稳定的硅酸盐水泥或硅酸盐水泥与大参量矿物拌和料一起配制或采用专用水泥。水泥的强度等级宜为 42.5。为此，在此次试验中选用了冀东 P.O42.5 水泥。

表 3.1 水泥物理性能分析

密度 g/cm ³	比表 面积 cm ² /g	凝结时间(h)		标准稠 度用水 量(%)	安定性	抗折强度(MPa)			抗压强度(MPa)		
		初凝	终凝			3d	7d	28d	3d	7d	28d
3.07	3940	3:23	4:48	28.00	合格	6.2	7.6	9.0	26.3	35.1	52.9

(2) 掺和料

根据一些工程经验和《指南》的有关条文规定, 氯盐环境(III类和IV类环境)下的钢筋混凝土应采用大掺量或较大掺量矿物掺和料的低水胶比混凝土。本工程宜复合使用粉煤灰加硅灰、粉煤灰加矿渣或两种以上的矿物掺合料。掺合料必须品质稳定、来料均匀、来源固定, 符合国家有关标准的规定。掺合料的掺量应根据设计对混凝土各龄期强度、混凝土的工作性和耐久性以及施工条件和工程特点(如环境温度、混凝土拌合物温度、构件尺寸等)而定。粉煤灰的烧失量和需水量宜按一级灰控制, 而细度宜按二级灰控制。掺合物掺量宜为胶凝材料总量的 30%~60%。

表 3.2 磨细矿渣(矿渣微粉)物理分析

物理分析	流动度比%	比表面积(勃氏法) cm^2/g	7d 活性指数%	28d 活性指数%	密度 g/cm^3
试验结果	99	4780	85	94	2.90

表 3.3 粉煤灰的物理分析

物理分析	45 μm 筛余%	需水量比%	活性指数(28d 抗压强度比)%	含水率%	烧失量%	$\text{SO}_3\%$	密度 g/cm^3
试验结果	10.5	105	26.4	0.2	1.98	0.83	2.23

(3) 骨料

为了提高混凝土的密实度和强度、降低胶凝材料用量和水胶比, 保证混凝土的耐久性, 控制混凝土粗、细骨料的品质是至关重要的。鉴于本工程的耐久性需要, 应该严格要求石子的供货质量。粗骨料应质地坚固, 粒形和级配良好、吸水率低、孔隙率小。具体的要求是: 粗骨料的压碎指标不大于 7%, 失重率小于 8%, 含泥量低于 0.7%, 吸水率不大于 1%, 针、片状颗粒不宜超过 5%, 最大公称粒径与钢筋保护层厚度和最小钢筋间距的比值不应大于 1/2; 细骨料失重率应小于 5%, 含泥量低于 1%, 对不同细度模数的砂子, 控制 4.75mm、0.6mm 和 0.15mm 筛的累计筛余量分别为 0~5%、40%~70%和 $\geq 95\%$ 。严禁使用海砂。

表 3.4 碎石主要物理指标

含泥量(%)	泥块含量(%)	压碎指标值(%)	针片状含量(%)	吸水率(%)	表观密度(kg/m^3)	堆积密度(kg/m^3)	坚固性(%)
0.2	0.0	10	3.0	0.75	2710	1380	2.0

表 3.5 砂子主要物理指标

含泥量 (%)	泥块含量 (%)	表观密度 (kg/m^3)	堆积密度 (kg/m^3)	坚固性 (%)
0.6	0.5	2610	1620	1.6

(4) 拌合水

应尽量减低拌合水用量，采用高效减水剂，拌合水用量不宜高于 150mg/m^3 。拌合水应满足国家有关标准的规定，水中 Cl^- 的含量应小于 350mg/L ，严禁使用海水。

(5) 外加剂

为了满足配制耐久性混凝土、施工和其他设计要求的需要，在配制混凝土时需要掺合化学外加剂，化学外加剂要符合以下要求：

① 各种外加剂应有厂商提供的推荐掺量与相应的减水率、主要成分（包括复配组分）的化学名称、氯离子含量、水溶性钠盐含量、含碱量以及施工中必要的注意事项（如超量或欠量使用时的有害影响、掺合方法和成功的使用证明）等。

② 但混合使用高效减水剂、引气剂、缓凝剂、膨胀剂、阻锈剂及其他防腐剂时，应事先专门测定它们之间的相容性。最好采用多功能复合外加剂。

③ 各种外加剂中的氯离子含量不得大于混凝土中胶凝材料总重的 0.02% ，高效减水剂中的硫酸钠含量不宜大于减水剂干重的 15% 。

④ 氯化钙不能作为混凝土的外加剂使用，如不能用作冬季施工的抗冻剂等。

⑤ 各种阻锈剂的长期有效性需经检验，一般不能使用亚硝酸钠类阻锈剂。

3.2.2 混凝土配合比和抗压强度

试验研究主要考察 C30 系列高性能混凝土的性能，其编号分别为普通混凝土（基准组）的 30J，掺矿渣与粉煤灰比例为 1:1，钢筋阻锈剂单一型的有冶建院 CGM501（粉剂）30C、冶建院（洪乃丰）RI-C2（粉剂）30R、西卡 901（粉剂）30X 和复合型（鞍山鹏程 NST（液体）30N；北京建科院与贵州 AMCI-C（液体）30H。钢筋阻锈剂单一型必须和泵送剂或其它外加剂复合使用，试验中从首建混凝土搅拌站采用 CON-10 泵送剂与钢筋阻锈剂单一型复合一起掺入混凝土中。钢筋阻锈剂复合型不需要掺入其它外加剂，尤其是鞍山市鹏程混凝土外加剂有限公司生产的 NST 防腐阻锈型高性能混凝土防水剂具有减水、泵送、防水、阻锈、提高耐久性等多功能，具有良好的抵抗腐蚀环境（硫酸盐、碳酸盐和氯盐等）侵蚀

的作用。C30 高性能混凝土配合比见表 3.6，实测抗压强度见表 3.7。

表 3.6 C30 高性能混凝土配合比

编号	每立方米混凝土材料用量 (kg)					矿渣	粉煤灰	塌落度	砂率 %	和易性
	水泥	砂子	石子	水	阻锈剂					
30J	350	892	1005	173	NST-7 12.25	—	—	150	47	差
30N	210	892	1005	163	NST-7 12.25	70	70	210	47	好
30H	210	892	1005	163	AMCI-C 12.25	70	70	205	47	泌水严重
30J	370	875	1005	175	CON-10 7.4	—	—	190	47	好
30C	222	875	1005	170	CON-10 7.4 CGM-501 8.0	74	74	185	47	泌水
30R	222	875	1005	175	CON-10 7.4 RI-1C2 8.0	74	74	180	47	塌落度小用水量高
30X	222	875	1005	170	CON-10 7.4 西卡 901 8.0	74	74	195	47	含气量大大气孔
30N	222	875	1005	170	NST-7 12.95	74	74	190	47	含气适中
30H	222	875	1005	170	AMCI-C 12.95	74	74	210	47	泌水严重抓底 48h 不凝

表 3.7 C30 高性能混凝土实测抗压强度

序号	3 天		7 天		28 天		双掺比例	矿渣/粉煤灰比例
	强度 (MPa)	达到 %	强度 (MPa)	达到 %	强度 (MPa)	达到 %		
30J	16.2	100	25.2	100	34.0	100	0	—
30N	12.6	77	26.8	106	36.1	106	40	1: 1
30H	—	—	14.3	57	27.1	80	40	1: 1
30J	—	—	42.2	100	51.2	100	0	—
30C	—	—	39.6	94	57.2	112	40	1: 1
30R	—	—	31.7	75	44.4	87	40	1: 1
30X	—	—	31.1	74	45.9	90	40	1: 1
30N	—	—	33.3	78	47.8	93	40	1: 1
30H	—	—	32.4	77	45.3	88	40	1: 1

注：符号代表混凝土类型（30J 基准混凝土；30N 鞍山；30H 北京建科院和贵州；30C 治建院；30R 洪乃丰；30X 西卡。）

3.3 试验方法

从高性能海工混凝土的基本要求出发,在原材料的优选试验中,以坍落度评价混凝土的工作性,以抗压强度等评价混凝土的物理力学性能,以混凝土的氯离子扩散系数(NEL法)试验结果评价混凝土的抗氯离子渗透性能,并以耐久性能为首要要求。

试验中所采用的主要测试方法有:

(1) 坍落度测试

混凝土的坍落度按《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》GB/T50080-2002测定。

(2) 抗压强度测试

混凝土的抗压强度按《普通混凝土力学性能试验方法标准》GB/T50081-2002测定。

(3) 混凝土的碳化和抗冻性的耐久性指数

试验参照《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法》(GBJ82-85)进行。

(4) 混凝土的氯离子扩散系数快速试验

试验参照《混凝土结构耐久性设计与施工指南》(CCES 01-2005)(混凝土中氯离子扩散系数快速检测的NEL法)进行。

3.4 高性能混凝土耐久性能试验及试验结果分析

3.4.1 高性能混凝土碳化试验

试件一般应在28天龄期进行碳化,采用掺合料的混凝土可根据其特性决定碳化前的养护龄期。碳化试验的试件宜采用标准养护。但应在试验前2天从标准养护室取出。然后在60℃温度下烘干48小时。经烘干处理后的试件,除留下一个或相对的两个侧面外,其余表面应用加热的石蜡予以密封。在侧面上顺长度方向用铅笔以10毫米间距画出平行线,以预定碳化深度的测量点。二氧化碳浓度保持在 $20\pm 3\%$,整个试验期间实验箱内的相对湿度应控制在 $70\pm 5\%$ 的范围内,碳化试验应在 $20\pm 5^{\circ}\text{C}$ 的温度下进行。

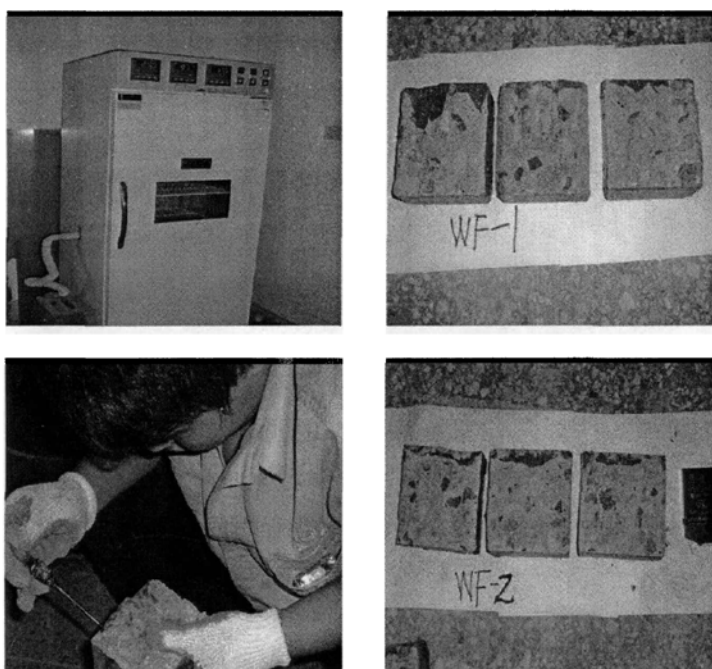


图 3.1 混凝土碳化试验

分别在碳化 7 天、28 天时取出试件，破型以测定其碳化深度。将切除所得的试件部份刮去断面上残存的粉末，随即喷上（或滴上）浓度为 1% 的酚酞酒精溶液（含 20% 的蒸馏水）。经 30 秒钟后，按原先标划的每 10 毫米一个测量点用钢板尺分别测出两侧面各点的碳化深度。如果测点处的碳化分界线上刚好嵌有粗骨料颗粒，则可取该颗粒两侧处碳化深度的平均值作为该点的深度值，碳化深度测量精确至 1 毫米。高性能混凝土碳化试验结果见表 3.8。

表 3.8 高性能混凝土的碳化性能试验结果

编号	碳化深度(mm)		编号	碳化深度(mm)	
	7 天	28 天		7 天	28 天
30J	0.34	0.87	30X	0.38	1.43
30C	0.03	0.70	30N	0.10	0.61
30R	0.10	0.81	30H	0.69	1.58

对表中数据进行分析，可得到不同种类混凝土的碳化深度变化规律，如图 3.2 所示（表中 1~6 各代码分别代表不同混凝土编号：30J、30C、30R、30X、30N、30H）。

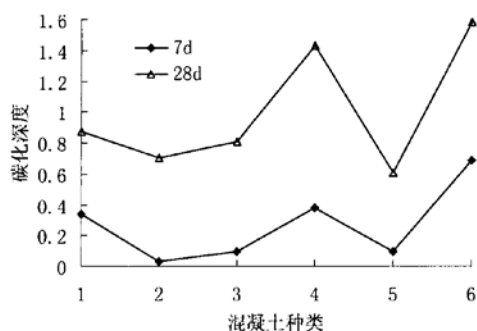


图 3.2 混凝土碳化深度规律

由试验结果可以看出，随着碳化时间的增长，不同类型的混凝土碳化深度均加大，掺阻锈剂和双掺掺和料（粉煤灰和矿渣）混凝土比不掺阻锈剂和不双掺掺和料的混凝土，28 天的碳化深度可降低 7%~30%。

3.4.2 高性能混凝土动弹模量试验

测定混凝土的动弹性模量，以检验混凝土在经受冻融或其它侵蚀作用后遭受破坏的程度，并以此来评定它们的耐久性能。共振法混凝土动弹性模量测定仪（简称共振仪），输出频率可调范围为 100~20000 赫，输出功率应能激励试件使之产生受迫振动，以便能用共振的原理定出试件的基频振动频率（基频）。混凝土动弹性模量试验步骤如下：

- （1）测定试件的重量和尺寸。试件重量的测量精度应在 $\pm 0.5\%$ 以内，尺寸的测量精度应在 $\pm 1\%$ 以内。每个试件的长度和截面尺寸均取 3 个部位测量的平均值。
- （2）将试件安放在支承体上，并定出换能器或敲击及接收点的位置，以共振法测量试件的横向基频振动频率。

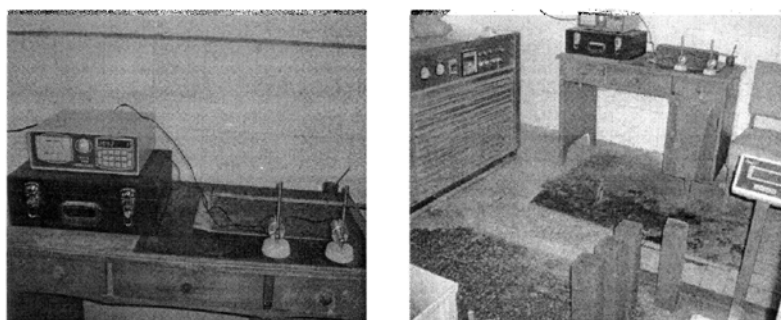


图 3.3 混凝土动弹模量试验

高性能混凝土动弹模量试验数据见下表 3.9 所示。对表中数据进行分析, 可得各混凝土的相对动弹性模量与耐久性指数如图 3.4 (图 3.5) 所示 (表中 1~5 各代码分别代表不同混凝土编号: 30J、30R、30X、30N、30H)。

表 3.9 高性能海工混凝土的抗冻性能试验结果

编号	冻融循环 300 次			备注
	质量损失 (%)	相对动弹性模量 (%)	耐久性指数 (%)	
30J	0.40	55.7	41.7	冻融循环 125 次
30R	2.00	95.7	95.7	
30X	-0.50	82.4	82.4	
30N	1.39	94.9	94.9	
30H	0.95	71.2	71.2	冻融循环 150 次

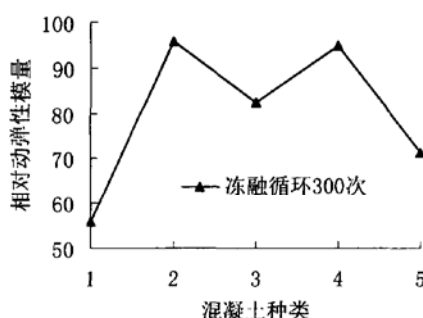


图 3.4 混凝土动弹性模量

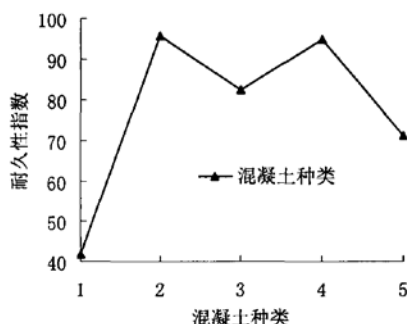


图 3.5 混凝土耐久性指数

从结果可以看出 30J 不掺阻锈剂和双掺 (矿渣粉和粉煤灰) 混凝土冻融循环 125 次就破坏。掺阻锈剂和双掺掺和料 (矿渣粉和粉煤灰) 混凝土相对动弹性模量在 71.2%~95.7%，耐久性指数 71.2%~95.7%，比不掺阻锈剂和不双掺 (矿渣粉和粉煤灰) 混凝土相对动弹性模量高出 28%~72%，耐久性指数高出 71%~129%。

3.4.3 高性能混凝土抗氯离子渗透性能试验

将混凝土试样切割成 $100 \times 100 \times 50 \text{ mm}$ 的尺寸, 上下表面平整且不存在有浮浆层的试块。将切割好的混凝土试样垂直码放于真空室内的不锈钢套桶中, 试样间要留有空隙, 如果试样分两层码放, 则上层与下层间应保持通气。盖上真空室盖子, 对称拧紧盖上的螺栓, 将真空室封闭。关闭注水阀, 顺序打开真空度自动控制器、真空室抽气阀, 真空泵开始工作, 使真空室内负压持续稳定在上限 -0.08 MPa 及下限 -0.06 MPa 之间, 保持 4~6 小时。关闭真空室抽气阀, 将注水管放入待添

加溶液（使用 4mol/L 的纯 NaCl 盐溶液）的容器中，打开注水阀，将溶液引入真空室。当溶液注入恰当位置，液位指示灯熄灭，立即关闭注水阀，然后再打开抽气阀。真空泵再次开始工作，使真空室内负压持续稳定在上限-0.08MPa 及下限-0.06MPa 之间，保持 1~2 小时。关闭抽气阀和真空度自动控制器，拔下抽气管，封闭真空室，静停 18 个小时。静停 18 小时后，打开抽气阀放气，开盖取出试样，首先擦干侧面安装在 DJU 夹具的两块紫铜电极之间、用测试线连接混凝土渗透性电测仪主机与试样夹具的正负极，接通测试主机电源进行测试。高性能混凝土抗氯离子渗透性能试验结果见表 3.10，对表中结果进行分析可得到图 3.7 所示规律（表中 1~6 各代码分别代表不同混凝土编号：30C、30R、30、30X、30N、30H）。

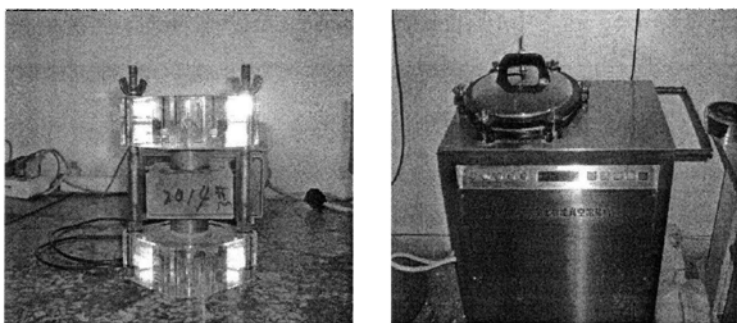


图 3.6 混凝土抗氯离子渗透性试验

表 3.10 混凝土抗氯离子渗透性能试验结果

编号	表观 Cl^- 扩散系数 $\text{Da}(10^{-12}\text{m}^2/\text{s})$	备注	编号	表观 Cl^- 扩散系数 $\text{Da}(10^{-12}\text{m}^2/\text{s})$	备注
30C	1.897	Da 值 28 天时的 测试 值	30X	2.336	Da 值 28 天时的 测试 值
30R	1.652		30N	1.510	
30（双掺 50%）	5.114（未加阻锈剂）		30H	1.720	

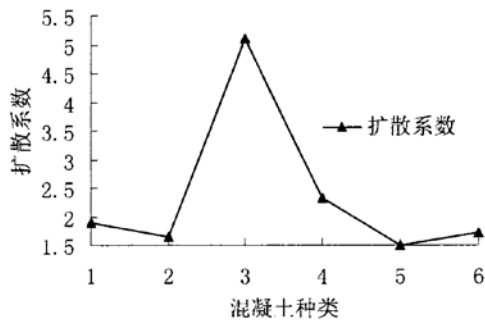


图 3.7 混凝土表观 Cl^- 扩散系数

通过试验可以看出,与普通混凝土相比较,双掺掺合料、添加钢筋阻锈剂的高性能混凝土具有优良的工作性能、相近的物理力学性能和优异的耐久性能,尤其是其耐海水腐蚀性能,混凝土的氯离子扩散系数可小于 $1\sim 5\times 10^{-12}\text{m}^2/\text{s}$ 。

3.5 本章小结

本章开展了高性能混凝土耐久性试验,对高性能混凝土的抗碳化、冻融以及氯离子侵蚀性能进行了研究,得到以下结论:

(1) 掺阻锈剂和双掺掺和料(粉煤灰和矿渣)混凝土比普通混凝土抗碳化性能好,28天的碳化深度可降低7%~30%。

(2) 掺阻锈剂和双掺掺和料(矿渣粉和粉煤灰)混凝土在经受冻融或其它侵蚀作用后,耐久性能要比普通混凝土耐久性能好,其相对动弹性模量比普通混凝土可高出28%~72%,耐久性指数提高71%~129%。

(3) 与普通混凝土相比较,双掺掺合料、添加钢筋阻锈剂的高性能混凝土的耐海水腐蚀性能好,混凝土的氯离子扩散系数可小于 $1\sim 5\times 10^{-12}\text{m}^2/\text{s}$ 。

4 首钢京唐钢铁项目混凝土结构耐久性设计

首钢京唐钢铁联合有限责任公司钢铁厂建于渤海湾曹妃甸岛吹填陆域上,由于钢铁厂厂址的地下水和海水相连,因此要求各种建筑物结构设计使用年限为 50 年,环境作用类别和环境作用等级为 III-E 级,并要采取防止腐蚀的措施^[32-34]。为保证首钢京唐钢铁厂混凝土结构具有良好的耐久性能,工程在设计过程中需依据混凝土结构耐久性设计概念^[35],采取以高性能混凝土技术为核心的综合耐久性技术方案。

4.1 耐久性设计原则及内容

4.1.1 耐久性设计原则

当结构使用环境能明显地导致结构材料性能随使用时间的延长而劣化时,结构耐久性设计应作为结构设计中必不可少的重要内容。在进行混凝土耐久性设计时,设计人员应首先明确该结构耐久性的目标是什么,即预期设计使用寿命是多少;其次是要清楚耐久性实效标准是什么。对于拟建结构的预期设计使用寿命问题,最近我国新修订的《建筑结构设计统一标准》已明确将结构设计使用年限划分为 4 类;对于耐久性失效标准的定义,目前尚没有一致的看法,对于一般的钢筋混凝土结构,多数的观点认为有两种耐久性失效标志:一种是结构由于耐久性能退化导致结构的变形不能满足正常使用的要求,多数以钢筋锈蚀发展到出现混凝土沿顺筋开裂作为正常使用耐久性失效标准;另一种是以结构性能退化导致结构承载能力降低到承载能力极限状态,称之为承载能力耐久性失效标准。前者比较容易识别,也有不少计算方法提出;而对后者的失效标准较难界定,耐久性损伤混凝土结构承载能力的计算,目前尚无公认合理的计算方法。

由于目前对需考虑的结构耐久性要求认识的不同和缺乏足够的设计依据,耐久性设计方法尚处在探讨阶段。现在各国混凝土结构设计规范多是根据结构构件所处的环境,对混凝土原材料的质量及组成(水泥品种、用量和配合比等)、结构的形式及构造(保护层厚度、排水措施等)、施工方法(养护条件等)规定一些具体要求,从宏观上控制和保证结构的耐久性。

4.1.2 耐久性设计内容

要提高混凝土结构的耐久性能,必需加强混凝土结构的防腐蚀措施。混凝土结构的防腐蚀涉及到原材料、混凝土配合比、施工工艺、生产设备检验方法、结构设计等许多方面,需制订出各种技术指标,采取综合技术措施,才能防止海港工程和新建近海工程混凝土结构的腐蚀破坏,提高其耐久性能。根据《指南》的有关规定,混凝土的防腐有基本措施和附加措施。基本措施有:混凝土原材料的选用要求;与耐久性有关的构造措施(钢筋的混凝土保护层厚度,提出防水排水构造与裂缝控制等措施);与耐久性有关的施工质量要求;结构使用阶段的维修与检测。附加措施有:在混凝土表面涂刷或覆盖防护材料;在混凝土组成中加入阻锈剂或水溶性聚合物乳液;局部选用环氧涂层钢筋;在混凝土浇筑成型中采用带透水衬里的模板;采用阴极保护等措施。我们应根据不同使用年限级别、不同环境作用等级分析研究采用不同的防腐措施,以增强混凝土结构的耐久性能。

(1) 混凝土材料的选择

① 根据使用环境条件、设计使用年限和耐久性等级的要求,选择混凝土原材料和配合比,如根据不同环境条件和设计使用年限不同,分别选用不同强度等级的混凝土、水灰比和水泥用量。环境侵蚀作用轻微时,混凝土强度等级可用 C25,水灰比可以是 0.6 左右,水泥用量可以在 260kg/m^3 左右;而当环境侵蚀作用严酷时,混凝土强度等级要达到 $\geq\text{C40}$,水灰比可以是 0.6 左右,最低水泥用量可达 380kg/m^3 左右。

② 对于冻融环境下的混凝土,可根据年平均冻融次数的不同,掺入不同数量的引气剂,少则 4.5%,多至水泥重量的 7%。

③ 对于有氯侵蚀的环境(海岸周围或使用除冰盐时)要控制混凝土中的氯离子含量,不应超过水泥用量的 0.1%。

④ 有严重化学侵蚀作用的环境,受力钢筋可考虑采用环氧涂层钢筋或耐腐蚀的合金钢材。

(2) 结构构造设计

保证混凝土耐久性必要的构造措施包括:为钢筋提供足够厚度的混凝土保护层;控制裂缝宽度;隔绝或减轻环境因素对混凝土的作用。

① 增加钢筋混凝土的保护层厚度

混凝土保护层厚度^[36-39]对钢筋的防腐蚀极为重要,这是提高钢筋混凝土使用寿

命的最为直接、简单而且经济有效的方法，它有着双重作用：首先，增加它的厚度可明显地推迟腐蚀介质（氯离子）到达钢筋表面的时间，其次可增强抵抗钢筋腐蚀造成的胀裂力，但是保护层厚度并不能不受限制地任意增加，当保护层厚度过厚时，由于混凝土材料本身的脆性和收缩会导致混凝土保护层出现裂缝反而削弱其对钢筋的保护作用。因此，为了防止海水环境中的建筑物过早地发生钢筋腐蚀损坏，除了要求混凝土保护层有良好的质量外（高密实性），尚应规定合适的混凝土保护层最小厚度值。用于构件强度和标注于施工图的钢筋（包括主筋、箍筋、分布筋）保护层名义厚度 c （钢筋外缘至混凝土表面的距离）不应小于表 4.1 中的保护层最小厚度 $c_{\min}$ 与保护层厚度施工负允差 Δ 之和，即：

$$c \geq c_{\min} + \Delta_0 \quad (\text{式 4-1})$$

式(2-1)中的施工允差 Δ 取值规定为：对现浇混凝土构件一般可取 10mm（构件较薄时可稍低），对工厂生产构件可取 0~5mm，依钢筋施工的定位工艺和质量保证的可靠程度而定，必要时应取更大的数值。

表 4.1 《指南》规定的混凝土保护层最小厚度(mm)

环境作用等级		A	B	C	D	E	F
板、墙等面形结构	设计使用年限 30 年	15	15	25	35	40	45
	设计使用年限 50 年	15	20	30	40	45	50
	设计使用年限 100 年	20	30	40	45	50	55
梁、柱等条形结构	设计使用年限 30 年	20	25	30	40	45	50
	设计使用年限 50 年	25	30	35	45	50	55
	设计使用年限 100 年	30	35	45	50	55	60

注：1.表中的保护层厚度值如小于所保护的钢筋的直径，则取 $c_{\min}$ 与钢筋直径相同。

2.直接接触土体浇注的混凝土保护层厚度应不小于 70mm。

3.大厚度的墩柱、墙体等受压构件的保护层以增大 5mm。

4.预应力钢筋的混凝土保护层厚度，一般不应小于预应力钢筋保护层最小厚度 $c_{\min}$ 与保护层厚度施工负允差 Δ 之和。

5.尽量避免使用后张法预应力混凝土构件。

② 限制裂缝宽度

a. 一般混凝土结构构件允许在荷载作用下出现裂缝，但从耐久性要求考虑，裂缝宽度应加以限制，现行《混凝土结构设计规范》（GB50010-052）给出不同环境类别下裂缝宽度限值，如裂缝控制等级为三级（允许出现裂缝构件）的最大裂缝宽度限值，年平均相对湿度小于 60% 的地区，一类环境（室内正常环境）下的

受弯构件，最大裂缝宽度可放宽到 0.4mm，对处于露天干湿交替环境下的构件，允许的裂缝宽度应控制在 0.2mm，对处于氯离子侵蚀环境下的钢筋混凝土构件，建议裂缝宽度 $\geq 0.1\text{mm}$ 。

b. 对一类环境下的预应力混凝土屋面梁、托梁、屋架、托架、屋面板和楼板，应按二级裂缝控制等级（一般要求不出现裂缝的构件）进行验算，在一类和二类环境（露天、潮湿环境）下，对需作疲劳验算的预应力混凝土吊车梁，应按一级裂缝控制等级（严格要求不出现裂缝的构件）进行验算。

表 4.2 表面裂缝计算宽度的允许值

环境作用等级	钢筋混凝土 (mm)	有粘结预应力混凝土(mm)
A	0.4	0.2
B	0.3	0.2(0.15)
C	0.20	0.1
D	0.20	按二级裂缝控制或按部分预应力 A 类构件控制
E	0.15	按一级裂缝控制或按全预应力类构件控制
F	0.10	按一级裂缝控制或按部分预应力类构件控制

注：1.括号内的数据用于钢丝或钢绞线的预应力构件，但有密封套管的的后张法构件除外。

2.二级或一级裂缝控制与 GB50010—2002 混凝土结构设计规范的设计方法相应，部分预应力 A 类构件或全预应力构件与 JTGD62—2004 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范的设计方法相应。本文对公路和桥涵没有重点研究，此条可不采用。

3.有自防水的混凝土构件强度等级不应低于 C35，其横向弯曲的表面裂缝计算宽度不超过 0.15mm。

③ 隔绝或减轻环境因素对混凝土的作用

结构的形状力求简单，尽量减少暴露的表面积和棱角，应尽可能减少伸缩缝的数量并改善其密闭性。结构的施工缝与各种连接缝的位置与结构构造应仔细设计，以利于混凝土的裂缝控制和防止水、盐等有害物质的渗入。伸缩缝部位及其附近混凝土宜采取防腐附加措施。混凝土结构及其构件的表面形状应有利于排水，对于可能受雨淋或积水的构件顶面应做成斜面。混凝土构件与上覆的露天面层之间应设置可靠的防水层，选择高性能的防水材料。

(3) 附加措施

① 环氧涂层钢筋

对于环境作用等级为 E 或 E 以上的混凝土构件，可在优质混凝土的基础上选用环氧涂层钢筋^[40-41]，也可选用耐腐蚀钢种钢筋和不锈钢钢筋（用于特别严重的腐蚀环境，或百年以上使用年限的特殊重要工程）。目前，耐腐蚀钢种钢筋和不锈

钢筋国内外使用较少。在美国、加拿大、欧洲、中东和香港,采用环氧涂层钢筋作为防止钢筋混凝土结构(包括海工混凝土结构)盐污染或化工侵蚀介质污染的一种方法,已成功地应用达二十余年,在我国一些重点工程也得到成功的运用。我国建设部 1997 年颁布了现行行业标准《环氧树脂涂层钢筋》,交通部的《海港工程混凝土结构防腐蚀技术规范》对环氧涂层钢筋从材料选择、净化处理、涂覆、运输、吊装、修补、贮存、加工、架立到浇筑混凝土的施工全过程做了详尽的规定。环氧涂层钢筋有许多优点和优势,但在使用中也曾发现存在很多问题与不足之处,主要问题体现在表面涂层完整性和施工过程中施工质量较难控制。考虑到本工程规模大、施工周期短、施工队伍多的实际情况,并考虑投资增加较多的因素,在本工程中一般不采用环氧涂层钢筋。

② 钢筋阻锈剂

a. 钢筋阻锈剂使用情况

世界上钢筋阻锈剂^[42-44]的研究与使用已有很长的历史,目前,美国、日本、加拿大、欧洲各国、澳大利亚、印度等国都在积极开发和应用钢筋阻锈剂;中东各国、韩国、东南亚各国也在使用引进的钢筋阻锈剂产品。据悉,1993 年之前,全世界有 2000 万 m^3 的混凝土使用了钢筋阻锈剂,到了 1998 年,至少有 5 亿 m^3 的混凝土使用了钢筋阻锈剂,可见其发展趋势之迅猛。我国钢筋阻锈剂也已有 14 年的成功使用经验,并与 1991 年颁布、1998 修订了《钢筋阻锈剂使用技术规程》(YB/T9231—98),国标《工业建筑防腐蚀设计规范》(GB50046—95)、《海港工程混凝土结构防腐蚀技术规范》(JTJ275—2000)等,都纳入了相关钢筋阻锈剂的内容。

b. 钢筋阻锈剂的分类

根据电化学机理不同分为:阳极阻锈剂、阴极阻锈剂和复合型阻锈剂。

根据阻锈剂成膜种类分为:钝化膜(也称氧化膜)型阻锈剂(如亚硝酸盐等)、吸附膜型阻锈剂(胺类等有机化合物)、沉淀膜型阻锈剂(如磷酸盐等)。

根据化学物质种类的不同分为:无机阻锈剂、有机阻锈剂。

c. 钢筋阻锈剂的优缺点

优点有:阻锈剂使用方便、工艺简单,可与混凝土直接拌和使用;成本低,与阴极保护、环氧涂层钢筋、耐腐蚀钢筋相比成本要低得多;不增加混凝土在后期运行过程中无损检测的难度,易于检测。

缺点有:一般不宜在酸性环境下使用;钢筋阻锈剂的有效性与混凝土的质量

关系密切, 优质混凝土能更好地发挥其阻锈功能, 相反, 质量低劣的混凝土中, 即使使用了钢筋阻锈剂也难以保证其耐久性使用; 钢筋阻锈剂的成分大都是化学物质, 有些品种不适合于在饮用水系统中使用; 单纯的无机类阻锈剂抗腐蚀阻锈, 在掺量不足的情况下效果不理想, 而且单一的阻锈剂, 不管是有机类, 还是无机类, 在使用过程中, 容易与混凝土中其它外加剂发生相容性不好的问题, 不利于保证混凝土的质量; 单纯的有机类阻锈剂从国外进口, 价格昂贵。

d. 国内外产品

目前在国内销售的国外钢筋阻锈剂产品有氨基醇类、脂肪酸类有机阻锈剂(如西卡的 Ferrogard901、903)或复合阻锈剂(如美国 Cortec 公司 MCI 迁移型阻锈剂)。施工方法有掺入法和渗入法, 产品有粉剂和水剂。在国内有许多工程已采用, 也取得了较好的效果。需要指出的是, 目前国内外的标准检验规范, 对氨基醇类的有效性没有可靠的检验方法, 根据中冶集团建筑研究总院研究试验, 在同等条件下, 该类产品的有效性需进一步验证, 另一个问题是此类产品价格昂贵。由于本工程项目多工程量大, 无法承受此类产品增加的费用, 在本工程中一般不考虑采用国外进口的钢筋阻锈剂。如有供应商可能将价格降低到合理的价位, 在论证完成, 试验检测效果良好的情况下, 也可以在本工程中采用。

目前国内生产的钢筋阻锈剂有单一型和复合型, 我们目前了解到的产品有 CGM 型钢筋阻锈剂和 NST 防腐阻锈型高性能混凝土防水剂。CGM 型钢筋阻锈剂既有单一型钢筋阻锈的优点, 又克服了其自身的缺点。其作用机理在于: 它在钢筋表面形成致密的保护层, 当有害离子 (Cl^-) 侵入混凝土结构中, 它能有效地抑制、阻止和延缓钢筋锈蚀的电化学反应过程, 从而延长钢筋混凝土的使用寿命。NST 防腐阻锈型高性能混凝土防水剂是一种有机、无机复合型混凝土外加剂, 其中的无机组分能与混凝土中的水分和氢氧化钙发生反应生成稳定的水化产物, 并填充到 C-S-H 凝胶形成骨架的空隙中, 使混凝土更加密实, 促使混凝土的过渡层变薄, 减小了由于过渡层结构的薄弱引起裂缝的可能, 从而达到很好的阻锈、防水、防腐的效果; 而其中的有机组分则在钢筋表面形成一层致密的吸附膜, 并具有良好的渗透迁移作用, 能在钢筋的周围形成一个优异的保护网膜, 加之无机组分在钢筋表层形成的坚固的钝化层, 使得该产品的阻锈作用更为优异, 有机组分中的引气成分使得混凝土中布满均匀的细小密闭气泡, 提高了混凝土的抗冻融性。同时该产品也可以有效地抑制混凝土的碳化, 并同时兼有减水、引气、保塑及防腐的功能, 该产品可同时做为混凝土泵送剂、防水剂、阻锈剂使用, 与单一性

的阻锈剂相比，具有其独特的优点。

③ 混凝土表面涂层

完好的混凝土保护层^[45]具有阻绝腐蚀性介质与混凝土接触的特点，从而延长混凝土和钢筋混凝土的使用寿命。然而大部分涂层本身会在环境的作用下老化，逐渐丧失其功效，一般寿命在 5~10 年，只能作辅助措施。

混凝土表面涂层包括薄涂层、复合型涂层、厚涂层或渗透型涂层等，是临海工程混凝土结构耐久性附加防护措施之一。混凝土属于强碱性的建筑材料，采用的涂料应具有良好的耐碱性、附着性，环氧树脂、聚氨酯、丙烯酸树脂、氧化橡胶和乙烯树脂等涂料均适用，涂层的试验方法与施工和管理，均可参照《海港工程混凝土结构防腐技术规范》(JTJ275-2000)的有关规定。但问题是有些涂层自身寿命不长，约 10~20 年，在地下部位再次涂覆又困难，故在“耐久性保持”应用中受到一定的限制。地上宜于涂覆修复的部位可以根据使用条件、设计使用年限选择相适应的涂层。能与混凝土寿命匹配的水泥基聚合物涂层，近年来得到了发展和应用。

(4) 施工要求

① 对耐久性有特别要求的混凝土，如要求抗渗、抗冻、耐磨或抗化学腐蚀等，在正式施工前，应按要求的抗腐蚀等级，对混凝土的配合比进行试配，选择最优配合比方案组织施工，在具体施工过程中，尚需抽样检查实际配合比与设计的配合比有无出入，及时纠正。

② 采用商品混凝土时，要求供应商提供原材料的品质保证书、掺和料的商品使用说明、核实减水剂、引气剂、缓凝剂等主要化学成分及掺量，防止超量，注意外加剂中的氯离子含量不得大于水泥含量的 0.02%，高效减水剂中的硫酸钠含量不得大于减水剂干重的 20%。

③ 浇注混凝土前应检查保护层垫块尺寸及钢筋位置，确保混凝土保护层厚度的准确。

④ 对大面积混凝土的浇注，应事先制定浇注方案，合理确定施工缝位置，严防出现冷缝，浇筑后应仔细抹面批平，严禁洒水抹面，耐久性好的混凝土的水灰比大多小于 0.45，应尽量减少暴露工作面，浇注后注意做好表面覆盖养护工作。

⑤ 事先制定好混凝土养护时间及拆除模板、支撑的时间，防止过早拆除支撑，造成早期混凝土强度不足而引起开裂。

(5) 对结构使用的要求

① 要明确结构构件正常工作使用的界限,结构物是由多种部件组成的,各构件暴露的环境有别,其耐久寿命也有区别,相对而言,房屋结构中的屋面、阳台、女儿墙要比室内梁、柱使用寿命短;桥梁结构中的防水层、伸缩缝、护栏要比梁、桥墩更易于损害,更换和维修的年限要短些,为此,耐久性设计应明确提出结构使用期内需要维护和更换部件的内容及预期更换的时间。

② 对于特别主要的结构物或处于严重侵蚀环境下的结构物或已有损伤的结构物,应提出使用期内需要定期检测的内容和要求,如不均匀沉降的速率和倾斜的趋势,裂缝开裂和变形程度等等。

4.2 钢铁厂混凝土耐久性设计方案

改善混凝土和钢筋混凝土结构耐久性需要采取根本措施和补充措施。根本措施是从材质本身的性能出发,提高混凝土材料本身的耐久性能,即采用高性能混凝土;再找出破坏作用的主次先后,对主因和导因对症施治,并根据具体情况采取除高性能混凝土以外的补充措施,而二者的有机结合就是综合防腐措施。大量研究实践表明,采用高性能混凝土是在恶劣的海洋环境下提高结构耐久性的基本措施,然后根据不同构件和部位,提高钢筋保护层厚度(一般不小于 50mm),某些部位还可复合采用保护涂层或阻锈剂等辅助措施,形成以高性能海工混凝土为基础的综合防护策略,有效提高混凝土结构的使用寿命。

对于具体工程而言,耐久性方案的设计必须考虑当地的实际情况,如原材料的可及性、工艺设备的可行性等,以及经济上的合理性。也就是说应该采取有针对性的、因地制宜的综合防腐方案。

根据第三章高性能混凝土耐久性能试验研究,结合耐久性设计的原则和内容,首钢京唐钢铁基地混凝土结构的耐久性设计遵循的基本方案分析如下:

(1) 混凝土材料的选择

本工程采用高性能混凝土,以优质的混凝土矿物掺和料和新型防腐阻锈剂、复合防水剂,配以与之相适应的水泥和级配良好的粗细骨料,形成低水胶比、低缺陷、高密实、高耐久的混凝土材料,这样的混凝土材料具有较高的抗氯离子渗透性、优异的耐久性和良好的性能价格比等优点。

不同的结构部位采用的混凝土材料有所不同,对于钢铁项目地下工程部分结构部位采用的混凝土强度等级为:各种灌注桩的强度等级为 C20~C35;承台、扩展基础以及设备基础为 C30~C45;箱形基础以及板、墙等面板结构为 C35~C45;

预应力管桩要采用强度等级为 C80 的高强混凝土。

(2) 构造措施

本工程厂址临近海洋，地下水中含有大量氯离子，海风、海雾以及海砂中也含有氯盐，它们会对钢筋产生腐蚀从而导致钢筋混凝土结构的破坏，因此要采取必要的构造措施，以增强混凝土结构的耐久性。

混凝土保护层厚度对钢筋的防腐蚀极为重要，这是提高钢筋混凝土使用寿命的最为直接、简单而且经济有效的方法。根据《指南》中对混凝土保护层最小厚度的限制，本工程中大量直接接触土体的地下混凝土结构的保护层厚度均采用 70mm，而对于板、墙等面形结构，水下区厚度为 40mm，水位变动区厚度为 50mm。

(3) 附加措施

为保证工程具有良好的耐久性能，在地下水位变动区的混凝土结构均涂有防腐涂层，而对于其他部位的混凝土结构，大部分都使用了复合防腐阻锈防水剂以及矿渣粉、粉煤灰等掺和料。

① 使用复合防腐阻锈防水剂情况

阻锈剂的选用首先在保证混凝土工程耐久性的前提下，要考虑混凝土的工程量以及搅拌站的料仓数量、计量和搅拌工艺。《混凝土结构耐久性设计》与《施工指南》中指出，单一型的阻锈剂往往存在一些缺陷和不足，因而以复合型为好。

在首钢京唐钢铁有限公司钢铁大厂炼铁系统、炼钢系统、连铸系统、热轧系统、冷轧系统、制氧系统、烧结系统、焦化系统、原料系统等地下工程中均使用了鞍山鹏程外加剂厂生产的复合防腐阻锈防水剂，替代进口或合资生产的阻锈剂。

② 使用矿渣粉和粉煤灰双掺技术情况

在首钢京唐钢铁有限公司钢铁大厂 1#高炉、2#高炉、2250mm 热轧工程、河北建勘 1580 桩基工程、中国十冶 1#烧结系统、炼铁工程、循环水、排水设施、污水处理站、综合管网、第一冷轧厂酸轧磨辊间工程、第一冷轧厂连退标段、2×300MW 电站工程、2250mm 热轧水处理区旋流池等工程均使用了粉煤灰和矿渣粉作为高性能海工混凝土掺合料替代部分水泥。

(4) 施工及结构使用要求

混凝土的施工要求包括对混凝土原材料的选择、混凝土施工方法、混凝土耐久性质量检验等内容，工程在施工过程中，要按照《指南》中的规定严格执行。

基于本工程所处的环境状况，混凝土结构一般处于中等腐蚀或强腐蚀环境中，因此在结构使用过程中，对于遭受腐蚀、易损坏的结构部位，要定期检查，一经

发现损害情况,要及时予以维修,以保证工程在使用过程中的安全性与耐久性。

基于以上分析,根据设计院提出的首钢京唐钢铁厂主要部位结构的强度等级要求、结构的施工工艺和环境条件,对部分混凝土结构实施的耐久性方案汇总如表 4.3 所示。

表 4.3 首钢京唐钢铁项目地下工程海工高性能混凝土结构耐久性方案

结构部位	保护层厚度 mm		混凝土强度等级	混凝土性能要求	辅助措施
	水下区	水位变动区			
钻孔灌注桩	70	70	C25-C35	可泵送/水下浇灌、早强、高抗渗、耐腐蚀、抗冻融	水位变动区部位涂防腐蚀涂层
PHC 预应力管桩	70	70	C80 (蒸养)	早强、耐腐蚀、抗冻融、弹性模量适宜、收缩徐变小	上部为不拆除的钢套筒
CFG 桩	70	70	C20-C30	早强、高抗渗、耐腐蚀、抗冻融	水位变动区部位涂防腐蚀涂层
承台	70	70	C30-C45	可泵送、早强、高抗渗、耐腐蚀、抗冻融	水位变动区部位涂防腐蚀涂层
扩展基础	70	70	C30-C45	可泵送、收缩徐变小、高抗渗、耐腐蚀、抗冻融	水位变动区部位涂防腐蚀涂层
埋置较深设备基础	70	70	C30-C45	可泵送、收缩徐变小、高抗渗、耐腐蚀、抗冻融	水位变动区部位涂防腐蚀涂层
地下室及箱体基础	70	70	C35-C45	可泵送、收缩徐变小、高抗渗、耐腐蚀、抗冻融	水位变动区部位涂防腐蚀涂层
板、墙等面形结构	40	50	C35-C45	可泵送、耐腐蚀、抗冻融	涂防腐蚀涂层

4.3 首钢京唐钢铁项目经济效益分析

通过上述分析可知,钢筋混凝土结构的耐久性方案有基本措施和附加措施。基本措施是对混凝土本身品质的要求及构造措施,成本基本上是固定的。附加措施有掺加钢筋阻锈剂与掺和料、采用环氧涂层钢筋、阴极保护和混凝土表面涂刷隔离层等。由于京唐钢铁厂规模宏大,在工程中采用环氧涂层钢筋、阴极保护和混凝土表面涂刷隔离层等技术存在一定问题外,在经济上也是不可能承受的,所以在本工程中基本上不采用环氧涂层钢筋、阴极保护附加措施,阴极保护仅用于码头墩台钢桩的保护,附加措施一般采用添加钢筋阻锈剂与掺和料。因此,在混凝土耐久性设计中影响工程成本的主要因素是钢筋阻锈剂和掺和料的使用情况。

(1) 使用钢筋阻锈剂情况

本工程使用的高性能混凝土中掺入两种类型的阻锈剂,一种是单一型阻锈剂(如:西卡的 Ferrogard901、冶建院的 CGM501 粉剂、冶建院洪乃丰 RI-C2 粉剂),另一种是复合型阻锈剂(如:鞍山鹏程 NST 液体、北京建科院与贵州 AMCI-C 液体)。

按照胶凝材料 400kg/m^3 计算阻锈剂掺量(掺量按厂家使用说明书为依据),具体费用见表 4.4。

表 4.4 高性能混凝土每 m^3 掺入阻锈剂费用

厂家	阻锈剂(元/吨)	阻锈剂掺量(%)或(kg/m^3)	阻锈剂费用(元/m^3)	带引气泵送剂(元/吨)	带引气泵送剂掺量(%)	带引气泵送剂费用(元/ m^3)	合计费用(元/ m^3)
冶建院 CGM501	6800	8	54.4	3125	2%	25.0	79.4
冶建院 RI-1C2	6800	8	54.4	3125	2%	25.0	79.4
西卡 901	8000	8	64.0	3125	2%	25.0	89.0
北京建科院和贵州 AMCI-C	6200	3.5%	86.8	—	—	—	86.8
鞍山 NST	4300	4.0%	68.8	—	—	—	68.8

从综合指标和成本看,鞍山市鹏程混凝土外加剂有限公司生产的 NST 防腐阻锈剂型高性能混凝土防水剂物美价廉,而且该产品通过建设部科技发展促进中心和建设行业科技成果评估,评估意见中阐述:“该项目采用无机—有机复合的防腐阻锈技术,辅之以高浓度型高效减水剂、引气剂等组分,研制出低碱、无氯的多功能混凝土防水剂,能有效防止因阻锈组分与其它组分适应性不好造成的混凝土性能缺陷,其技术路线正确,方案设计合理”。该产品使用方便,技术成熟,已在相关混凝土工程中实际应用,效果良好,该成果达到国际先进水平,具有较好的推广应用前景。

在首钢京唐钢铁有限公司钢铁大厂地下工程中总计使用复合防腐阻锈防水剂约 19875t, 替代进口或合资生产的阻锈剂节约费用约 2600 万元。

(2) 使用矿渣粉和粉煤灰双掺技术情况

① 首建集团曹妃甸指挥部混凝土项目部

在首钢京唐钢铁有限公司钢铁大厂 1#高炉、2250mm 热轧、循环水等工程中使用粉煤灰和矿渣粉作为高性能海工混凝土掺合料替代部分水泥。截止 2008 年 8 月 20 日使用粉煤灰和矿渣粉双掺混凝土 17.93 万 m^3 。C30P8F300 粉煤灰和矿渣粉双掺量 160kg, C35P8F300 粉煤灰和矿渣粉双掺量 170kg, 每 m^3 混凝土掺粉煤灰和矿渣粉节约 3.30 元, 总计节约 591690 元。

② 北京盛和诚信搅拌站

在首钢京唐钢铁有限公司钢铁大厂工程中的河北建勘 1580 桩基工程、马钢 2250 热轧工程、首建二公司 2#高炉、中国十冶 1#烧结系统等工程使用粉煤灰和矿渣粉作为高性能海工混凝土掺合料替代部分水泥。截止 2008 年 8 月 20 日使用粉煤灰和矿渣粉双掺混凝土 36.50 万 m^3 。C30P8F300 粉煤灰和矿渣粉双掺量 160kg, C35P8F300 粉煤灰和矿渣粉双掺量 170kg, 每 m^3 混凝土掺粉煤灰和矿渣粉节约 6.10 元, 总计节约 222.65 万元。

③ 北京昊建搅拌站

在首钢京唐钢铁有限公司钢铁大厂 2250mm 热轧加热炉、炼铁工程及排水设施、污水处理站、综合管网等工程使用粉煤灰和矿渣粉作为高性能海工混凝土掺合料替代部分水泥。截止 2008 年 8 月 20 日使用粉煤灰和矿渣粉双掺混凝土 74.20 万 m^3 。C30P8F300 粉煤灰和矿渣粉双掺量 160kg, C35P8F300 粉煤灰和矿渣粉双掺量 170kg, 每 m^3 混凝土掺粉煤灰和矿渣粉节约 4.80 元, 总计节约 356.16 万元。

④ 秦皇岛市政混凝土搅拌站

在首钢京唐钢铁有限公司钢铁大厂首钢京唐第一冷轧厂酸轧磨辊间工程、首钢京唐第一冷轧厂连退标段等工程使用粉煤灰和矿渣粉作为高性能海工混凝土掺合料替代部分水泥。截止 2008 年 8 月 20 日使用粉煤灰和矿渣粉双掺混凝土 17.50 万 m^3 。C30P8F300 粉煤灰和矿渣粉双掺量 160kg, C35P8F300 粉煤灰和矿渣粉双掺量 170kg, 每 m^3 混凝土掺粉煤灰和矿渣粉节约 2.74 元, 总计节约 47.95 万元。

⑤ 北京建工搅拌站

在首钢京唐钢铁有限公司钢铁大厂 2250 热轧工程、2×300MW 电站工程、2250mm 热轧水处理区旋流池等工程使用粉煤灰和矿渣粉作为高性能海工混凝土掺合料替代部分水泥。截止 2008 年 8 月 20 日使用粉煤灰和矿渣粉双掺混凝土 18.60 万 m^3 。C30P8F300 粉煤灰和矿渣粉双掺量 160kg, C35P8F300 粉煤灰和矿渣粉双掺量 170kg, 每 m^3 混凝土掺粉煤灰和矿渣粉节约 2.90 元, 总计节约 54.00 万元。

搅拌站在首钢京唐钢铁有限公司钢铁大厂地下工程中总计使用粉煤灰和矿渣粉双掺混凝土约 116 万 m^3 , 节约水泥费用约 460 万元。

综合以上分析, 在项目地下工程中使用阻锈剂和掺和料总计节约费用约 3060 万元。

4.4 本章小结

本章依据混凝土结构耐久性设计原则及内容, 结合首钢京唐钢铁项目的实际情况, 对不同的结构部位采取了不同的混凝土耐久性设计方案, 并对工程进行了经济效益分析, 保证了工程项目的安全性、耐久性以及经济性。

5 结论与建议

5.1 结论

首钢京唐钢铁联合有限公司钢铁厂临近渤海海域,环境状况比较复杂。本文从分析钢铁厂所处环境分类情况出发,进行了高性能混凝土耐久性能试验研究,并依据混凝土耐久性设计原则及内容,设计了本工程混凝土结构的耐久性方案,为工程的长期安全使用奠定了基础。论文取得的主要成果如下:

(1)对工程所处环境状况进行了分析,将钢铁厂环境分类及环境作用等级定为III—E级。

(2)开展了高性能混凝土耐久性能试验,对高性能混凝土的抗碳化、冻融以及氯离子侵蚀性能进行了研究,通过试验分析发现:

① 掺阻锈剂和双掺掺和料(粉煤灰和矿渣)混凝土比普通混凝土抗碳化性能好,28天的碳化深度可降低7%~30%。

② 掺阻锈剂和双掺掺和料(矿渣粉和粉煤灰)混凝土在经受冻融或其它侵蚀作用后,耐久性能要比普通混凝土耐久性能好,其相对动弹性模量比普通混凝土可高出28%~72%,耐久性指数提高71%~129%。

③ 与普通混凝土相比较,双掺掺和料、添加钢筋阻锈剂的高性能混凝土的耐海水腐蚀性能好,混凝土的氯离子扩散系数可小于 $1\sim 5\times 10^{-12}\text{m}^2/\text{s}$ 。

(3)结合首钢京唐钢铁项目混凝土结构所处的实际环境状况,依据混凝土结构耐久性设计原则及内容,对工程不同的结构部位采取了不同的混凝土耐久性设计方案,并对其进行了经济效益分析,保证了工程项目的安全性、耐久性及经济性。

5.2 建议

实际工程中混凝土结构的耐久性设计是一项极其重要的任务,根据本工程混凝土结构耐久性的研究与设计情况,现提出以下建议:

(1)对于埋置于地下的混凝土结构,由于其破坏情况不易被观察和发现,因此,对于这种结构,要加强安检、防护措施,避免不可预见性的危害发生。

(2)对工程所采取的混凝土耐久性设计方案进行跟踪分析,以观察所采取的

方案的合理性。

(3) 本文根据工程实际情况,提出了有效可行的混凝土结构耐久性设计方案,希望在以后类似的工程设计中予以借鉴。

参考文献

- [1] 潘前外. 机制砂配制 C50 高性能混凝土的应用研究[J]. 工程科技, 2006(2): 65~79.
- [2] 乔德福, 李春国, 李大军. 粉煤灰高性能混凝土的生产和应用[J]. 吉林交通科技, 2006(1): 29~32.
- [3] 王志军, 吴旭龙. 高强混凝土应用概述[J]. 黑龙江交通科技, 2009(2): 52.
- [4] 陈肇元. 土建结构工程的安全性与耐久性[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
- [5] 卢木. 混凝土耐久性研究现状和研究方向[J]. 工业建筑, 1997, 27(5): 1~4.
- [6] 王凤池, 王声平, 李中原. 混凝土耐久性研究现状分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2009, 7(1): 23-25.
- [7] 韩再国. 浅谈钢筋混凝土耐久性的影响因素及对策[J]. 科技促进发展, 2008 (9): 82.
- [8] 张伟军, 宋文博, 彭春华. 高性能混凝土的应用与混凝土耐久性的发展[J]. 建筑材料及制品, 2007 (2) : 33~35.
- [9] 张扬, 周浩爽. 海洋大气环境下混凝土耐久性的研究[J]. 科技信息, 2007(36): 620-622.
- [10] 陈尚江, 冉启东, 董淑慧. 纤维混凝土的耐久性研究[J]. 低温建筑建筑技术, 2009(3): 17~18.
- [11] 国家标准: 建筑结构设计通用符号计量单位和基本术语(GBJ83-85). 北京: 中国计划出版社, 1984.
- [12] 李田, 刘西拉. 混凝土结构的耐久性设计[J]. 土木工程学报, 1994, 27(2): 47-55.
- [13] 土木工程学会. 《混凝土结构耐久性设计与施工指南》(CCES01-2004). 北京: 中国建筑工业出版社.
- [14] 建设部. 《混凝土结构设计规范》(GB50010-2002). 2002 年.
- [15] 孙伟. 荷载与环境因素耦合作用下结构混凝土的耐久性与服役寿命[J]. 东南大学学报, 2006, V. 36 Sup(II): 7-14.
- [16] 牛建刚. 一般大气环境多因素作用混凝土中性化性能研究[D]. 西安建筑科技大学博士论文, 2008.
- [17] 李玉顺, 柳俊哲. 抗冻融混凝土耐久性设计方法[J]. 混凝土, 2001, (1): 32-34.
- [18] 慕儒. 冻融循环与外部弯曲应力、盐溶液复合作用下混凝土的耐久性与寿命预测[D]. 东南大学博士学位论文, 2000.
- [19] 李伟刚, 李文哲, 汪振双. 粉煤灰双掺混凝土冻融循环试验研究[J]. 低温建筑建筑技

- 术,2009(1):17~18.
- [20] 高丽, 郑翔. 混凝土冻融损伤研究概述[J]. 科技信息, 2007(37):576~577.
- [21] 罗昕, 卫军. 冻融条件下混凝土损伤演变与强度相关性研究[J]. 华中科技大学学报:自然科学版, 2006, 34(1):98~99.
- [22] 刘超等. 混凝土中钢筋锈蚀与结构耐久性[J]. 建筑技术开发, 2004, 31(6):47-49.
- [23] 柯伟. 中国腐蚀调查报告. 北京:化学工业出版社, 2003(10).
- [24] 国务院. 《建设工程质量管理条例》(第 279 号令), 2000 年.
- [25] Vladimir ivica. Corrosion of reinforced induced by environment containing chloride and carbon dioxide [J], Bull.Mater.Sic.2003, 26, (6):605-608.
- [26] D.J.Anstice, C.L.Page, and M.M.Page. The pore solution phase of carbonated cement pastes [J], Cement and Concrete Research, 2004, 35(2005):377-383.
- [27] J.P.Broomfield. Corrosion of steel in concrete [M], London, E&FN Spon, 1922, pp.28-30.
- [28] D.A.Hausmann, Steel Corrosion in concrete. How does in occur? [J], Materials Protection, 1967,(11):19~23.
- [29] V.K.Gouda, Corrosion and corrosion inhibition of reinforcing steel[J], British Corrosion Journal, 1970,(5):198~203.
- [30] 曹妃甸钢铁基地一期初步设计岩土工程勘察报告书, 第二册(下). 冶金工业部保定勘察设计院, 2005.
- [31] EVANS. The corrosion and oxidation of metals[M]. LONDON: Edward arnold (PUBLISHERS) LTD, 1960(2).
- [32] 李金桂. 腐蚀控制设计手册. 北京:化学工业出版社, 2006
- [33] 《海港工程混凝土结构防腐技术规范》(JTJ275-2000). 北京:人民交通出版社, 2001.
- [34] 洪乃丰. 基础设施腐蚀防护和耐久性问与答. 北京:化学工业出版社, 2003 年.
- [35] 张誉, 蒋利学, 张伟平, 屈文俊. 混凝土结构耐久性概论[M]. 上海:上海科学技术出版社, 2003.
- [36] 李惠玲, 闫俊英. 浅析混凝土结构中的混凝土保护层厚度[J]. 房材与应用, 2006, 34(4):22-24.
- [37] 徐东升. 谈混凝土保护层厚度[J]. 住宅科技, 1992(2):35~36.
- [38] 陈长兴. 钢筋及其混凝土保护层[J]. 建筑工人, 1999(2):10~11.
- [39] 王春发. 钢筋混凝土结构的混凝土保护层[J]. 建筑技术, 1982(12):54~60.

- [40] 吴金岳, 吴松贵, 徐旭峰, 徐乃欣. 环氧涂层钢筋及其应用[J].腐蚀与防护, 2004, 25 (3): 105-108.
- [41] 王树群. 环氧涂层钢筋及其在工程中的应用[J].新型材料,2006 (5):20-21.
- [42] 黄洁, 张松. 钢筋阻锈剂综述[J].工业建筑,2008,38(增刊):826-829.
- [43] Page CL, Ngala V. T, Page M M. Corrosion Inhibitors in Concrete Repair Systems [J] . Mag Concr Res, 2000, 52(1):25-37.
- [44] Alonso C, Andrade C. Effect of Nitrite as a Corrosion Inhibitor in Contaminated and Chloride-free Carbonated Mortars [J]. ACI Mater J, 1990, 87(2):130-137.
- [45] 张举连. 建议施用混凝土表面涂层防止海工钢筋混凝土的腐蚀[J].水运工程,1991(3):45-47.

致 谢

本论文是在导师牛获涛教授的悉心指导下完成的,从论文选题、研究方案、试验设计、理论分析到最终定稿,无不凝聚着导师的心血和汗水。几年来导师一直以渊博的学识、严谨的治学态度、踏实的工作作风、敏锐的科学洞察力激励我、启发我和鞭策我。导师富于建设性、启发性的指导使我步入了科学研究的殿堂,导师的言传身教,使我受益匪浅。值此论文完成之际,谨向三年来在学习和工作上给予我关心、教诲和帮助的牛老师致以崇高的敬意和由衷的感谢!

在论文试验方案确定和试验进行过程中得到了同门师生的指导和建议,在论文完成之际,谨向他们表示我深深的谢意!

衷心感谢首钢国际工程技术有限公司提供了很多便利条件,感谢相关工作人员在论文试验期间给予的莫大支持和指导!

感谢西安建筑科技大学对我的培养。

感谢国家自然科学基金对本课题的资金支持。

感谢三年来支持我完成学业的父母和家人,感谢我所在工作单位首钢国际工程技术有限公司的领导和同事在我攻读硕士学位期间的支持和关怀!

感恩知福,饮水思源。最后再次衷心感谢所有关心帮助过我的人,请让我把最真挚、最诚恳的祝福送给你们!

李洪光

2009年5月于北京

声 明

本人郑重声明我所呈交的学位论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中已经标明引用的内容外，本论文不包含其他个人或集体已经发表或撰写过的研究成果，也不包含本人或其他人在其它单位已申请学位或为其它用途使用过的成果。与我一同工作的同志对本研究所做的所有贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了致谢。

申请学位论文与资料若有不实之处，本人承担一切相关责任。

论文作者签名：李洪光

日期：

关于学位论文使用授权的说明

本人完全了解西安建筑科技大学有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留并向国家有关部门或机构送交学位论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅；学校可以公布学位论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或者其它复制手段保存学位论文。

（保密的论文在论文解密后应遵守此规定）

论文作者签名：李洪光 导师签名：日期：

本人授权中国科学技术信息研究所、中国学术期刊（光盘版）杂志社等单位将本学位论文收录到有关“学位论文数据库”之中，并通过网络向社会公众提供信息服务。同意论文提交后滞后： ☐半年； ☐一年； ☐二年发布。

论文作者签名：李洪光 导师签名：日期：

注：请将此页附在论文首页。

首钢京唐钢铁项目混凝土结构耐久性研究与设计

专业名称：建筑与土木工程

硕士生：李洪光

指导教师：牛荻涛 教授

陈大军 教授级高工

摘 要

首钢京唐钢铁联合有限公司钢铁厂厂址陆域是由海底取砂吹填形成的，填土厚度为 0.7m~6m，平均厚度为 4m。钢铁厂所处区域腐蚀环境及地下水情况比较复杂，根据水质分析结果，地下水对混凝土具有中等腐蚀性，对钢筋混凝土结构中的钢筋在长期浸水时具有弱腐蚀性，在干湿交替下具有强腐蚀性。因此，对首钢京唐钢铁项目进行混凝土耐久性设计是十分必要的。

本文通过对工程所处腐蚀环境进行分析，确定了工程的环境类别。开展了高性能混凝土耐久性试验，研究了工程所用混凝土材料的抗碳化、冻融以及氯离子侵蚀的性能。

文章系统论述了混凝土结构的耐久性设计方法，结合工程实践，从工程防腐措施出发，提出了本工程的耐久性设计方案，并对所采用的方案进行了经济效益分析，保证了工程项目具有良好的安全性、耐久性以及经济性。

关键词：首钢京唐钢铁厂；混凝土结构；耐久性设计；防腐措施

Durability design and research about underground concrete structure of Shougang Jingtang steel project

Speciality: Architecture and Civil Engineering

Name: Li Hongguang

Instructor: Prof. Niu Ditao

Chen Dajun(Senior engineer)

Abstract

The land sites of Shougang Jingtang steel joint company is formed by the sea sand, and the thickness of soil is 0.7m-6m and average thickness reaches 4m. The corrosion and groundwater situation of steel company is complicated. According to the water quality analysis results, the groundwater is moderately corrosive to concrete, and weak corrosive to the steel in the reinforced concrete structure which is under the water for a long time, but strong corrosive in dry-wet alternating conditions. So, conducting the durability design of concrete to Shougang Jingtang steel joint company is necessary.

Through the analysis of corrosive environment, the article determines the engineering environment categories, and developing the high-performance concrete durability test, studying the performance of carbonation, freeze-thaw and chloride erosion to concrete material used in engineering.

The article discusses the durability design method of concrete structure. Combining with engineering practices, and starting from engineering anticorrosion measures, the durability design plan of this project is put forward. This article analyzes the economic benefit of this project, and ensures the engineering project with good safety, durability and economy.

Keywords: steelworks of Shougang Jingtang; concrete structure; the durability design; anticorrosion measures