电 子 科 技 大 学

专业学位研究生学位论文开题报告表

攻读学位级别： □博士 √□硕士

培养方式：□全日制 √□非全日制

专业学位类别及领域： 机械工程

学 院： 机械与电气工程学院

学 号： 202052040730

姓 名： 施杰越

论文题目： 新型电隔离预应力锚固体系

性能研究

校内指导教师： 李坚 教授

校外指导教师： 邹易清

填表日期： 2021 年 12 月 18 日

电子科技大学研究生院

1. 学位论文研究内容

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 课题类型 | | □应用基础研究 □应用研究 |
| 课题来源 | | □纵向 □横向 □自拟 |
| 学  位  论  文  研  究  内  容 | 学位论文的研究目标、研究内容及拟解决的关键性问题（可续页）  **1. 研究目标**  预应力混凝土结构极易受到来自周围环境的氯化物、杂散电流、金属溶解电解质、材料的氢脆、微动疲劳、电接触等方面的影响发生腐蚀，如何提升结构内部的防护效果并对健康状况进行监测是目前预应力领域研究的重点。电隔离筋(EIT)预应力防护技术不仅能对结构内部起到良好的密封防护效果还能对预应力管道内部的健康状况进行长期监测，但是国内对该技术的研究和应用极少，为了提升预应力混凝土结构的耐久性水平并对结构内部质量进行把控，同时为国内电隔离防护技术的后续研究提供参考，本课题依托柳州OVM公司平台开展新型电隔离预应力锚固体系的相关研究，主要的研究目标为：结合国外现有电隔离锚固体系，设计开发出一套新的适用于实际工程应用的电隔离预应力锚固体系，体系能够通过预应力标准下相关力学性能试验和电隔离性能验证试验。  **2. 研究内容**  本论文研究内容主要为以下几个部分：  **[1].预应力混凝土结构腐蚀机理和电隔离防护原理分析**  国内外已经有很多关于预应力筋腐蚀原因分析的研究，在对预应力筋进行防护之前需要分析其腐蚀原因和过程。本论文通过查阅国内外相关文献，得到预应力构件遭受周围环境的氯化物、杂散电流的侵蚀机理；提取影响预应力构件腐蚀进展的关键特征参量，为电隔离防护体系的建立提供依据。  电隔离技术作为解决预应力筋腐蚀防护的有效方案，已经被瑞士和意大利等欧洲国家写入相关技术标准中，同时关于电隔离体系应用的工程案例也被记录，但是国内对于电隔离防护技术的研究很少，本论文通过查阅国外电隔离预应力体系相关技术标准和工程案例，对电隔离防护原理进行分析，提炼电隔离体系对预应力筋防护的关键要素；通过对市场上现有的密封防腐产品进行调研，在常规锚具体系的基础上，结合国外现有电隔离体系，确定新型电隔离预应力锚固体系的设计方案并建立电隔离预应力体系等效电路模型，为电隔离监测提供理论依据。  **[2].电隔离体系关键组件结构设计和分析**  常规锚固体系下预应力筋得不到很好的腐蚀防护，预应力筋受到管道内部和外部侵蚀元素的影响导致腐蚀最终预应力失效，并且在施工前后很难对预应力管道内部的情况进行检查，很难及时对结构的健康状况做出评估。随着fib标准PL3防护级别的提出，国外一些工程应用更是将PL3防护级别作为预应力锚固体系的工程验收标准，只有满足对预应力筋有良好防护效果以及具备长期健康状况监测系统的预应力锚固体系才能通过工程验收。显然，常规锚固体系已经不能满足PL3级别的标准，因此需要设计新的预应力锚固体系。EIT防护技术的出现提供了解决的方案，相较于常规锚固体系，EIT体系在其基础上增加了新的密封防腐组件和绝缘组件，同时利用锚罩对锚头部分进行密封绝缘防护，形成一套密封性能和绝缘性能良好并且拥有预应力筋健康状况长期监测系统的电隔离预应力锚固体系。  本论文对电隔离锚固体系的设计主要包括：通过SolidWorks三维建模软件对电隔离体系锚具和关键连接组件进行结构设计，并通过ANSYS有限元分析软件对锚具进行力学仿真分析和计算，模拟预应力筋工作状态下锚具的受力情况，初步验证结构的力学性能。  **[3]. 关键构件的预应力试验和分析**  虽然常规锚固体系下的锚具已经满足预应力标准下的相关力学性能要求，但是新型电隔离锚固体系下的锚具在结构上和常规体系存在差异，需要对关键构件进行预应力试验研究，达到相应的预应力试验标准才能进行工程应用，其中主要试验包括：锚垫板的荷载传递试验和锚罩的油压试验，通过试验结果和有限元仿真结果对比，优化结构并对有限元边界条件的设置提供经验和依据。  **[4]. 电隔离性能试验和分析**  最后研究新型电隔离预应力锚固体系的电隔离性能，主要通过电反馈的方式测量结构内部的阻抗值验证工作状态下预应力筋是否受到周围环境的影响。验证电隔离体系能否对预应力筋的健康状况进行监测，并结合试验数据与理论研究，建立各影响因素和预应管道内部健康状况之间的数学关系。  **3. 拟解决的关键性问题**  **[1].电隔离组件的力学性能和绝缘性能的问题**  在工作状态下，电隔离体系中的组件受到压力的同时又要保持良好的绝缘性能和密封性能，如何选择合适的耐压绝缘材料并进行结构设计，让电隔离体系达到力学性能和绝缘性能的要求是需要解决的关键问题。  **[2].电隔离组件之间连接后的密封问题**  良好的密封性能决定了电隔离体系的防护是否有效，在新型电隔离体系中，锚具和组件之间连接和装配方式都会影响到最终的密封防护效果，在满足结构强度和电隔离性能的前提下，如何为结构选择合适的耐压材料并进行结构设计和性能验证是设计电隔离锚固体系中拟解决的关键问题。  **[3].环境因素对电隔离监测影响**  由于电隔离测量的阻抗值对环境温度和湿度都十分敏感，因此测量值可能受到不同环境条件的影响，如何修正测量值与预应力筋健康状况之间的数学表征关系，提高电隔离监测的精度也是本论文拟解决的关键问题。 | |

1. 学位论文研究依据

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 学位论文的选题依据和研究意义，国内外研究现状和发展态势；选题在理论研究或实际应用方面的意义和价值；主要参考文献，以及已有的工作积累和研究成果。（2000字）  **1. 选题依据和研究意义**  预应力混凝土结构作为桥梁、铁路、核安全壳、LNG储罐等大型基础设施的主要受力部件，由于其采用较高强度等级的混凝土以及预应力筋拥有多道保护层体系，因此曾被认为具有优良的耐久性能，然而现实情况并非如此乐观，构成预应力混凝土结构中的锚具和预应力筋均为金属件，极易受到来自周围环境的氯化物、杂散电流、金属溶解电解质、材料的氢脆、微动疲劳、电接触等方面的影响[1]，良好的保护层体系对预应力筋的腐蚀只能起到延缓作用而并不能起到阻止作用，腐蚀介质穿过保护层体系（包括腐蚀透金属波纹管）只是一个时间问题[2]。而这种延缓作用并不能完成许多预应力工程承载的“百年大计”之使命；更为甚者，后张预应力混凝土结构还存在着灌浆质量无法保证（包括先进的真空辅助灌浆工艺）这一关键问题，这使得即使在塑料波纹管体系中也有可能会发生预应力筋的腐蚀问题[3]。  随着人类活动空间不断拓展，需要在恶劣环境中服役的工程结构日益增多。各国已建、在建和将建的跨海大桥、海底隧道、海港码头以及沿海地区、除冰盐地区兴建的高速铁路、高速公路、桥梁、工业建筑等重大工程都广泛采用预应力混凝土结构，这些工程具有大（大跨、大型）、高（高层、高耸）、特（特种）这几个特点，而且投资大，使用要求高，社会影响广泛，因而结构需要具有更高的耐腐蚀性能和防护水平，如杭州跨海湾大桥和胶州跨海大桥的设计使用寿命均为100年，而港珠澳大桥的设计使用寿命更是高达120年，这使得预应力混凝土结构的耐久性面临巨大挑战[3-5]。  预应力混凝土结构腐蚀检测手段大部分能在实验室环境下进行，但是实地应用效果却不好，而且腐蚀检测虽然能对及时发现结构内部的情况，但是这些方法都不适用于长期的监测，很难做到对结构的耐久性的长期监测和质量把控。需要注意的是，腐蚀防护和检测同样重要，但是目前的腐蚀防护方案都是防护和检测相互独立的，考虑了防腐就不考虑检测腐蚀，很难在拥有良好防护效果的同时兼顾对健康状况长期监测的功能。  为了防止杂散电流以及侵蚀介质对预应力筋的腐蚀，并对内部结构的腐蚀和灌浆情况进行监测，一种“电隔离力筋（Electrically Isolation Tendons，EIT）”应运而生，其防腐基本思路是：采用塑料波纹管成孔以保证力筋长度范围内的绝缘与密封，然后在力筋两端锚头部位进行专门的绝缘与密封处理，并使整个预应力筋与锚头体系的绝缘与密封保持连续，该锚固体系兼顾预应力管道内部灌浆情况和预应力筋健康状况在线监测系统，2004年苏黎世COST534会议对这种技术的背景、原理、技术方案以及工程应用进行了报道[6-8]。  综上所述，预应力混凝土结构由于腐蚀引起的耐久性问题不仅是存在的，而且是严峻的；常规的锚固体系和防护检测手段不能满足实际应用要求，因此，开展电隔离预应力锚固技术的研究，提升结构抗腐蚀性能并对其健康状况进行长期监测，对确保重大土木工程结构全寿命使用安全，推动混凝土结构理论与技术应用，实现经济社会绿色、可持续发展具有重要意义。  **2. 国内外研究现状和发展态势**  **2.1、预应力混凝土结构腐蚀防护国内外研究现状**  **2.1.1、防腐涂层**  提高预应力筋和锚具自身的抗腐蚀性能是预应力混凝土结构的防腐技术方案之一。如图所示，主要采用镀锌涂层预应力筋和环氧涂层预应力筋以提升自身的抗腐蚀性能。预应力锚具加工的工艺也是包括了镀锌和发蓝等防腐除锈措施。Nuernberger[9]对其工程应用情况进行了介绍。随着不锈钢的技术性和经济性不断提升，不锈钢筋逐渐被人们接受，成为提高钢筋自身抗腐蚀性能的先进技术选项之一，Wu[10]等对此进行了较为详细的介绍。   |  |  | | --- | --- | | 镀锌钢绞线 | 环氧钢绞线 | | (a)镀锌钢绞线 | (b)环氧钢绞线 |   图2-1 钢绞线防腐涂层   |  | | --- | | 镀锌和发蓝的锚板 | | 图2-2 镀锌和发蓝的锚板 |   **2.1.2、无粘结保护**  无黏结钢绞线是专门为后张结构和施工开发生产的产品。在普通钢绞线上涂上防腐油脂，外包高密度聚乙烯，施工中免去了预制管和灌浆，在混凝土浇注前预先无张力布筋，养护后再作预应力张拉，由于塑料管中有充足的油脂，张拉时绞线与塑料管产生相对位移，完成张拉操作[11]。在后张混凝土结构服役过程中，塑料护套和防腐油脂将钢绞线与混凝土及周围介质隔开，起到良好的保护作用，只要注意锚固端的防腐处理，无黏结保护是一种具有良好防腐性能的技术。  无粘结筋  图2-3 无粘结筋  **2.1.3、灌浆保护**  在后张有粘结预应力混凝土结构中，孔道灌浆体也是对预应力筋最直接的保护方案。Kumar[12]等的研究表明，环氧灌浆体和聚氨酯泡沫灌浆体对预应力筋的保护作用比较明显，然而目前实际工程中用于孔道灌浆的材料仍然以素水泥浆为主，而这种的材料本身的防护性能实在是难以令人满意。同时，实际工程中灌浆不密实的质量问题还经常发生，这会导致部分预应力筋裸露在孔道内而得不到碱性保护，因而较早在残留水分和氧气的作用下发生腐蚀。   |  |  | | --- | --- | | 预留灌浆孔道 | 孔道灌浆 | | 预留灌浆孔道 | 预应力孔道灌浆 | | 图2-4 预应力灌浆管道 | |   **2.1.4、阴极保护**  阴极保护法是电化学防腐的一种手段，混凝土结构阴极保护的原理是通过外加电流将金属表面的电极转变为更低的值，在发生电化学腐蚀时被保护金属作为原电池的阴极不发生氧化反应，起到不被腐蚀或者腐蚀减缓的效果，Polder R[13]在文中提到荷兰目前已有250个结构(其中包括105栋建筑、97座桥梁)安装了阴极保护系统。van den Hondel A J [14]对荷兰一座应用了电流阴极保护(GCP)系统的后张预应力混凝土桥梁进行了5年的跟踪报道，在此期间对混凝土的健康状况和系统测量的电位数据进行记录和分析，该实际应用表明电流阴极保护系统对预应力混凝土结构有较好的防腐效果，但是同时也指出混凝土的电阻率会对GCP系统的有效性有很大的影响。  **2.2、预应力混凝土结构腐蚀检测国内外研究现状**  目前预应力混凝土结构腐蚀检测手段主要有声发射检测法、超声波检测法、磁性检测法和射线照相法。  **2.2.1、声发射检测**  近年来，声发射技术已经广泛应用于土木工程结构健康检测中，声发射技术的检测原理是当混凝土结构出现裂缝或者断裂的时候，结构回弹的波形特征会不同于健康状态下的波形，可以以此来对混凝土的健康状况进行监测。国外关于声发射技术在预应力混凝土结构腐蚀检测的研究有很多。Ramadan S [15]使用声发射技术对含有腐蚀侵蚀物（氯化物、硫酸盐和硫氰酸溶液）的预应力筋进行了观察，记录了腐蚀发生过程中预应力筋产生裂纹、裂纹扩散和断裂对应的声学变化，显示了该技术在预应力混凝土结构健康监测中良好的应用前景。Appalla A [16]通过试验证明了声发射技术可以成功地应用于检测、监测和量化混凝土结构的腐蚀情况，在没有电化学技术的情况下，声发射是一种很有前途的非侵入式检测和量化预应力筋腐蚀的方法。但是声发射技术对于预应力混凝土结构的腐蚀检测都是假设在检测的样本是均匀腐蚀的前提下进行的，而现实情况下结构的内部腐蚀损伤情况可能会很复杂，该方法可能会存在一定的误导性[17]，而且外界噪声也会对检测信号造成很大的干扰，只有在噪声消除到足够的程度，声发射的腐蚀检测才有效[18]。Ma G [19]也是指出了声发射技术检测到的数据往往是无序和不可用的，怎样提高声发射的检测精度、数据的可读性以及实地检测环境中怎样消除外界噪声对检测结果的干扰都是后续值得研究的方向。  **2.2.2、超声波检测**  超声波检测法是利用超声波在不同介质中传播的性质来确定被被检测结构的腐蚀情况。可以准确确定腐蚀的尺寸和位置，但是该方法对于非均匀腐蚀的结构不适用。Iyer, S. R.[20]介绍了一种基于超声波C扫描成像的预应力后张混凝土孔隙和腐蚀无损检测的方法，并通过试验初步评估出了该方法的适用性。Sodeikat, Christian[21]使用超声回波技术对预应力混凝土结构内部进行检测可以发现管道内部存在灌浆质量缺陷的区域，避免预应力结构早期腐蚀的情况。  **2.2.3、磁性检测**  磁性检测技术已被证明能有效检测预应力钢绞线中的隐形腐蚀，虽然该技术还没准备好现场应用[22]，但是钢绞线中产生的主磁通信号(MMF)的大小能够用于估算钢绞线中健康钢绞线的横截面积，利用磁性能可用于检测预应力混凝土中钢绞线中隐藏的腐蚀量，Fernandes B [23]提出了一种模拟预应力钢绞线在磁场作用下的主磁通信号(MMF)的新型计算机模型，通过实验对该模型进行验证，结果表明设计的计算模型可用于根据现场试验结果评估腐蚀。而由于钢绞线被腐蚀后其电磁特性会发生变化，Huang, Yong[24]从理论上解释了钢绞线腐蚀后钢丝电感发生变化引起的共振频率的变化，建立了电磁共振和钢绞线腐蚀速率关系的理论模型，通过试验证明了液相色谱电磁共振法能够准确检测裸露钢绞线的整体腐蚀程度，并建立了钢绞线腐蚀检测的拟合公式。  **2.2.4、射线照相检测**  国外一些研究人员，在使用射线照相法观察化学腐蚀的混凝土的腐蚀情况时也证明了利用射线检测腐蚀和裂缝的可行性，目前的红外热像仪也是为检测混凝土中钢筋的腐蚀引起的分层提供了潜在的工具。这种技术的优势是不用于混凝土直接接触，通过热成像图形分析结构内部的缺陷，然而，红外热成像的精确度受到现场检测环境温度的影响，温度变化往往会造成测量不准[25]。  总的来说，前文提到的预应力混凝土结构腐蚀检测手段大部分能在实验室环境下进行，但是实地应用效果却不好，而且腐蚀检测虽然能对及时发现结构内部的情况，但是这些方法都不适用于长期的监测，很难做到对结构的耐久性的长期监测和质量把控。需要注意的是，腐蚀防护和检测同样重要，但是前文所述的方法都是防护和检测相互独立的，考虑了防腐就不考虑检测腐蚀。为了防止杂散电流以及侵蚀介质对预应力筋的腐蚀，并对内部结构的腐蚀和灌浆情况进行监测，一种“电隔离力筋（Electrically Isolation Tendons，EIT）”应运而生，其防腐基本思路是：采用塑料波纹管成孔以保证力筋长度范围内的绝缘与密封，然后在力筋两端锚头部位进行专门的绝缘与密封处理，并使整个预应力筋与锚头体系的绝缘与密封保持连续，该锚固体系兼顾预应力管道内部灌浆情况和预应力筋健康状况在线监测系统，2004年苏黎世COST534会议对这种技术的背景、原理、技术方案以及工程应用进行了报道[6-8]。下文对该技术的国内外研究现状进行介绍。  **2.3、国内电隔离防护技术研究现状**  从电隔离防腐结构上讲，国内电隔离型锚具结构主要有两种形式，一种为复合型锚垫板+塑料波纹管。朱万旭、周红梅[26-28]等人采用传统的金属波纹管孔道锚固体系与OVM.M15ZH型电绝缘型锚固体系的动态电阻值进行长期监测对比试验。试验结果表明；传统的金属波纹管孔道锚固体系的动态电阻值基本保持不变，OVM.M15ZH型电绝缘型锚固体系的动态电阻值则随着时间的推移呈上升趋势。  图4-1 电隔离锚具结构图  1.塑料波纹管2.塑料喇叭管3.预应力筋4.铸铁锚垫板5.绝缘垫  6.塑料锚罩7.浆体8.无收缩混凝土9.导线10.锚板  另一种采用非金属材料将整个预应力筋锚固区与混凝土隔离开，两种结构的都是建立一个密闭、完全独立的结构。如1图所示，通过塑料波纹管1、塑料喇叭管2、绝缘垫5、塑料锚罩7将整个预应力孔用非金属部件隔离开，对孔道类的预应力筋7形成隔离层，防止被侵蚀[29]。  **2.4、国外电隔离防护技术研究现状**  早在1981年，MorrisSchupack等人发现通过封装的方式将预应力锚具结构与混凝土结构相隔离，形成独立的体系有利于隔离开外界对预应力钢材的腐蚀，并提出电隔离（Electrically Isolated）概念[30]。  2000年国际结构混凝土协会（fib），在技术报告《fibbulletin7》中针对塑料波纹管在后张预应力混凝土中的应用，提出一系列的测试方法和准则，并通过摩擦系数、水密性、孔道灌浆试验、电阻测试等实验进行性能验证，试验结果表明：采用塑料波纹管能够提高预应力筋腐蚀防护能力，降低预应力筋摩擦系数，为预应力筋腐蚀防护提出新的要求[31]。  2005年国际结构混凝土协会根据预应力体系的耐腐蚀能力划分为三种体系：PL1——传统的金属孔道、PL2——塑料波纹管孔道、PL3——塑料波纹管与电绝缘锚具相结合（EIT）。《fibBulletin33》中指出对于在PL1体系中预应力筋易受到的6大因素的腐蚀：（1）来自周围环境的氯化物（氯离子）；（2）杂散电流（直流电）；（3）金属溶解电解质；（4）材料的氢脆；（5）微动疲劳；（6）电接触[32]。    图4-2 fib预应力耐腐蚀性能体系  从绝缘垫耐压性能上讲，对于绝缘垫材料采用环氧或酚醛树脂、玻璃纤维等材料层压而成，具有良好的力学性能、电绝缘性能、耐电弧性、阻燃、耐高温等性能。产品主要应用于国家电气、电工、军工、交通、航天等领域，通常作为电气绝缘材料使用[33]。  从电隔离后张预应力防腐原理上讲，目前，研究电隔离后张预应力混凝土防腐，所采用的结构方式是在预应力混凝土中建立一个密闭、完全独立的结构，通过LCR表测试（如3左所示）相对独立、密闭的预应力筋与混凝土结构中结构筋间的电阻值，判断预应力筋是否有受到腐蚀的危险，同时进行长期监测。图3右图中Ch、Rh、Rd分别表示孔道为纯电容，没有腐蚀破坏的高电阻、腐蚀破坏后有低电阻[34]。  {Vedova, 2006 #205}  图4-3 LCR表的测试方法与测试原理  从监测预应力混凝结构的电隔离性能上讲，2014年国际结构混凝土协会（fib），在技术报告《fibbulletin75》中判断预应力筋是否有受到腐蚀的危险进行说明：在监测期间电阻值非常高，这意味着预应力筋受到保护，处于完全封装的状态；一旦发现电阻值低的时候，这意味着混凝土中的预应力筋已处于缺乏保护的状态；如果所测得的电阻值等于或接近零值。  2002年发布欧洲规范《ETAG 013 Post-tensioning Kits for Prestressing of Structures》中对混凝土中电隔离筋有明确的测试方法与要求。要求测试相预应力筋与混凝土结构中结构筋间的电阻值不小于1kilo-Ohm[35]。  《Swiss Guideline（2001）》规定了动态电阻临界检测值R=500kΩm，损失因子D<0.1，1米长的部分波纹管电容值C的测量值在2.34±0.04nF/m，不考虑孔洞的存在。《Swiss Guideline（2007）》重新作出调整，定义了电隔离后张预应力结构中三个限制值：监测、疲劳和夹杂电流的电阻值，电阻R＞20Ω，则说明预应力筋与混凝土中钢筋不接触，不存在微动疲劳；R=50kΩm，建议作为临界值进行长期监测；当结构中存在杂散电流，则监测的电阻值R不应该小于150kΩm。  M.DellaVedova[21]等人通过在锚具内建立一个封装的结构，建立一个初期保护系统，构建电绝缘预应力锚固体系，防止含有氯离子的水的侵蚀。在瑞士和意大利高速铁路中将电绝缘预应力锚固体系做出了有益的尝试应用，通过监测，取得了较好的成果。  B.Elsener针对《fibBulletin33》中PL3（电绝缘锚固体系）体系进行研究表明：电隔后张预应力体系对混凝土的质量控制是一种有效的方法[36]。  美国联邦公路管理局近年来意识到电隔离体系能够对后张预应力筋的腐蚀防护有重要的意义，对欧洲电隔离防护技术的应用进行实地走访和调查，整合成该报告[37]。  文献[38]介绍了美国首次将电隔离防护技术应用于宾夕法尼亚州的colpaly大桥，并对大桥的电隔离体系实施和性能进行了研究。  **3. 实际应用意义和价值**  随着人类活动空间不断拓展，需要在恶劣环境中服役的工程结构日益增多。各国已建、在建和将建的跨海大桥、海底隧道、海港码头以及沿海地区、除冰盐地区兴建的高速铁路、高速公路、桥梁、工业建筑等重大工程都广泛采用预应力混凝土结构，这些工程结构面临恶劣侵蚀环境的同时也需要具有更高的耐腐蚀性能和防护水平，因此开展新型电隔离预应力锚固体系性能的研究，提升结构的耐久性水平并对其健康状况进行长期监测，对确保重大土木工程结构全寿命使用安全，推动混凝土结构理论与技术应用，实现经济社会绿色、可持续发展具有重要意义。  **4. 参考文献**  **5. 已有研究成果**  **[1].完成预应力混凝土结构腐蚀机理的分析**  针对预应力混凝土结构腐蚀的问题，查阅国内外相关文献，调研其腐蚀机理，首先提取出影响预应力混凝土结构腐蚀的因素包括：氯盐环境下的侵蚀氯离子、腐蚀物质硫酸盐以及杂散电流的侵蚀，分析腐蚀的原因为侵蚀物质破坏了预应力内部金属结构的钝化保护膜，具体的腐蚀过程为阳极金属发生氧化反应被腐蚀，阴极金属发生还原反应不被腐蚀或者腐蚀减缓。  **[2].完成新型电隔离体系结构的三维设计**  结合国外现有电隔离防护体系以及OVM公司现有预应力常规锚固体系，完成了新型电隔离预应力锚固体系的设计方案，如图所示：    为后续开展结构的有限元分析，模拟其工作状态下的受力情况提供基础。 |

1. 学位论文研究计划及预期目标

|  |
| --- |
| 1.拟采取的主要理论、研究方法、技术路线和实施方案（可续页）  **1. 主要理论和研究方法**  本研究相关的主要理论包括锚固-接触力学的基本理论、金属电化学腐蚀机理、非线性有限元的数值计算方法、工程试验和实际工程设计理论。主要研究方法为基于国外电隔离体系和OVM公司常规锚具体系设计出新型电隔离预应力锚固体系，首先设计出体系各组件的三维模型，对结构进行有限元分析和预应力试验验证其力学性能，最后对体系进行电隔离性能试验验证其隔离性能并对预应力筋进行长期的健康监测，记录测量数据，结合试验数据和理论建立腐蚀影响因素与预应力筋健康状况的数学关系模型。  **2. 技术路线和实施方案**  首先结合国外现有电隔离体系和公司常规锚固体系进行新型电隔离体系的结构设计；对结构进行有限元分析，模拟结构在工作状态下的受力情况，根据有限元仿真分析验证设计的合理性，调整部分构件的设计尺寸和细节结构布置等；根据设计要求进行生产制造，对制品进行预应力试验，其中包括锚垫板的荷载传递试验和锚罩的油压试验，通过试验验证结构的耐压能力和承力传力性能；最后对结构进行电隔离性能试验，对其进行长期监测，通过监测数据判断结构防护的有效性和电隔离的性能。  **技术路线.drawio**  %3CmxGraphModel%3E%3Croot%3E%3CmxCell%20id%3D%220%22%2F%3E%3CmxCell%20id%3D%221%22%20parent%3D%220%22%2F%3E%3CmxCell%20id%3D%222%22%20value%3D%22%E7%BB%93%E6%9E%84%E8%AE%BE%E8%AE%A1%22%20style%3D%22rounded%3D1%3BwhiteSpace%3Dwrap%3Bhtml%3D1%3B%22%20vertex%3D%221%22%20parent%3D%221%22%3E%3CmxGeometry%20x%3D%2290%22%20y%3D%22310%22%20width%3D%22120%22%20height%3D%2260%22%20as%3D%22geometry%22%2F%3E%3C%2FmxCell%3E%3CmxCell%20id%3D%223%22%20value%3D%22%E6%9C%89%E9%99%90%E5%85%83%E5%88%86%E6%9E%90%22%20style%3D%22rounded%3D1%3BwhiteSpace%3Dwrap%3Bhtml%3D1%3B%22%20vertex%3D%221%22%20parent%3D%221%22%3E%3CmxGeometry%20x%3D%22280%22%20y%3D%22310%22%20width%3D%22120%22%20height%3D%2260%22%20as%3D%22geometry%22%2F%3E%3C%2FmxCell%3E%3CmxCell%20id%3D%224%22%20value%3D%22%E8%AF%95%E9%AA%8C%E9%AA%8C%E8%AF%81%22%20style%3D%22rounded%3D1%3BwhiteSpace%3Dwrap%3Bhtml%3D1%3B%22%20vertex%3D%221%22%20parent%3D%221%22%3E%3CmxGeometry%20x%3D%22470%22%20y%3D%22310%22%20width%3D%22120%22%20height%3D%2260%22%20as%3D%22geometry%22%2F%3E%3C%2FmxCell%3E%3CmxCell%20id%3D%225%22%20value%3D%22%22%20style%3D%22endArrow%3Dclassic%3Bhtml%3D1%3Brounded%3D0%3BentryX%3D0%3BentryY%3D0.5%3BentryDx%3D0%3BentryDy%3D0%3BexitX%3D1%3BexitY%3D0.5%3BexitDx%3D0%3BexitDy%3D0%3B%22%20edge%3D%221%22%20source%3D%222%22%20target%3D%223%22%20parent%3D%221%22%3E%3CmxGeometry%20width%3D%2250%22%20height%3D%2250%22%20relative%3D%221%22%20as%3D%22geometry%22%3E%3CmxPoint%20x%3D%22218%22%20y%3D%22368%22%20as%3D%22sourcePoint%22%2F%3E%3CmxPoint%20x%3D%22268%22%20y%3D%22318%22%20as%3D%22targetPoint%22%2F%3E%3C%2FmxGeometry%3E%3C%2FmxCell%3E%3CmxCell%20id%3D%226%22%20value%3D%22%22%20style%3D%22endArrow%3Dclassic%3Bhtml%3D1%3Brounded%3D0%3B%22%20edge%3D%221%22%20source%3D%223%22%20parent%3D%221%22%3E%3CmxGeometry%20width%3D%2250%22%20height%3D%2250%22%20relative%3D%221%22%20as%3D%22geometry%22%3E%3CmxPoint%20x%3D%22400%22%20y%3D%22390%22%20as%3D%22sourcePoint%22%2F%3E%3CmxPoint%20x%3D%22470.71067811865487%22%20y%3D%22340%22%20as%3D%22targetPoint%22%2F%3E%3C%2FmxGeometry%3E%3C%2FmxCell%3E%3C%2Froot%3E%3C%2FmxGraphModel%3E |
| 2.研究计划可行性，研究条件落实情况，可能存在的问题及解决办法（可续页）  **1. 可行性分析**  本论文的可行性主要分为以下几点:  [1] 从2012年至今OVM公司已经研究了电隔离防护技术近10年，前期研发的电隔离体系产品已经得到了工程应用，目前的研发的新型后张电隔离预应力锚固体系已经是第3代；  [2] 目前所在研发部门有专门的电隔离项目相关的研发团队，团队具备电隔离性能验证的试验平台，团队成员均在预应力行业深耕多年，具有预应力领域丰富的研发经验；  [3] 作为柳州市重大专项以及公司级重点研发项目，将会持续投入更多的研发成本和人员在电隔离预应力锚固体系的设计和研发上；  [4] 作为产学研相结合的课题研究得到相关领导和技术人员的大力支持。  综上所述，关于新型电隔离预应力锚固体系性能的研究可以顺利进行。  **2. 研究条件落实**  本课题依托柳州OVM公司平台，公司多年来一直从事后张预应力锚固体系研究和制造，桥梁检测、监测、维护技术的研发，其技术先进性已得到行业内的普遍认可。欧维姆公司拥有一流的技术研发团队和科研条件，为保证电隔离预应力锚固体系开发的成功建立了专门的技术攻关小组。  **3. 可能存在的问题及解决办法**  问题一：  解决方法：  问题二：电隔离性能试验监测周期漫长  第一阶段的电隔离性能试验需要28天的周期，后期需要对结构内部的健康状况进行长期监测才能满足工程应用需求，漫长的监测周期以及监测过程中的影响因素造成了监测结果的不确定性。  解决方法： |

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **3.研究计划及预期成果** | | |
| 研  究  计  划 | 起止年月 | 完成内容 |
| 2021.12-2022.1 | 查阅国外电隔离防护技术相关文献和标准， |
| 2022.2-2022.4 | 结合国外现有电隔离体系和OVM常规锚具体系，设计出新型电隔离预应力锚固体的三维模型并进行锚垫板的有限元分析 |
| 2022.5-2022.8 | 电隔离性能验证试验的零件生产制造，进行电隔离性能验证试验 |
| 2022.9-2022.11 | 记录试验数据并对试验数据进行整理和分析，建立预应力筋健康状况与腐蚀影响因素的数学关系 |
| 2022.12-2023.3 | 撰写毕业论文 |
|  |  |
| 预  期  创  新  点  及  成  果  形  式 | 1. 预期创新点  [1]. 本课题研发的新型电隔离预应力锚固体系将填补国内在该研究领域的空白  [2]. 通过电隔离试验长期监测的数据，结合理论研究总结预应力筋健康状况与测量值之间的动态关系，为国内后续开展电隔离防护技术的研究提供参考  2. 成果形式  [1]. 中文核心期刊 1~2篇  [2]. 专利1篇  [3]. 硕士学位论文1篇  [4]. 可应用于工程应用的电隔离预应力锚固体系，提升预应力混凝土结构的耐久性水平和质量把控能力 | |

1. 开题报告审查意见

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 1. 导师对学位论文选题和论文计划可行性意见，是否同意开题：  校内导师（组）签字： 年 月 日  校外导师签字： 年 月 日 | | | |
| **2.开题报告考评组意见** | | | |
| 开题日期 |  | 开题地点 |  |
| 考评专家 |  | | |
| 考评成绩 | 合格 票 基本合格 票 不合格 票 | | |
| 结 论 | □通过 □原则通过 □不通过  **通过：**表决票均为合格  **原则通过：**表决票中有1票为基本合格或不合格，其余为合格和基本合格  **不通过：**表决票中有2票及以上为不合格 | | |
| 考评组对学位论文的选题、研究计划及方案实施的可行性的意见和建议： | | | |
| 考评组签名：  年 月 日 | | | |
| **3.学院意见：** | | | |
| 负责人签名： 年 月 日 | | | |

[1] Taerwe L, Matthys S. Fib model code for concrete structures 2010 [Z]. Ernst & Sohn, Wiley. 2013

[2] Salas R M, Schokker A J, West J S, et al. Corrosion risk of bonded, post-tensioned concrete elements [J]. PCI journal, 2008, 53(1): 89.

[3] 李富民, 邓天慈, 王江浩, et al. 预应力混凝土结构耐久性研究综述 [J]. 建筑科学与工程学报, 2015, v.32;No.113(02): 1-20.

[4] 卫军, 张萌, 董荣珍, et al. 重载铁路桥梁服役性能评估 [J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2012, v.40;No.354(12): 103-6.

[5] 牛荻涛, 孙丛涛. 混凝土碳化与氯离子侵蚀共同作用研究 [J]. 硅酸盐学报, 2013, v.41;No.293(08): 1094-9.

[6] Elsener B. Electrical isolation as enhanced protection for posttensioning tendons in concrete structures (PL 3) [J]. NDT assessment and new systems in prestressed concrete structures, 2004.

[7] Della Vedova M, Evangelista L. Protection against corrosion and monitoring of posttensioning tendons in prestressed concrete railway bridges in Italy [J]. NDT assessment and new systems in prestressed concrete structures, 2004.

[8] Elsener B. Experience with electrically isolated tendons in Switzerland [J]. NDT assessment and new systems in prestressed concrete structures, 2004.

[9] Nuernberger U. Reasons and prevention of corrosion-induced failures of prestressing steel in concrete [J]. International Journal of Structural Engineering, 2009, 1(1): 29-39.

[10] Wu Y, Nuernberger U. Innovation of materials-stainless steel in concrete structures; proceedings of the Proceeding of the International Conference on Durability of Concrete Structures, F, 2008 [C].

[11] 陈华青, 王林烽, 高洪乾. 预应力钢绞线的防腐措施 [J]. 金属制品, 2010, 36(05): 32-6.

[12] Kumar K, Karthikeyan M, Palaniswamy N. Evaluation of performance of grout materials in protection of prestressing steel [J]. International Journal of Electrochemistry, 2008, 3(3): 315-24.

[13] Polder R, Peden W. Cathodic protection of steel in concrete - experience and overview of 30 years application; proceedings of the 5th International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting (ICCRRR), Cape Town, SOUTH AFRICA, F 2018

Nov 19-21, 2018 [C]. 2018.

[14] van den Hondel A J, Gulikers J, Giorgini R, et al. A 5 year track record on a galvanic CP system applied on a light weight concrete bridge with prestressed steel - Developments in time of the effectiveness as determined by depolarisation values and current densities; proceedings of the 5th International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting (ICCRRR), Cape Town, SOUTH AFRICA, F 2018

Nov 19-21, 2018 [C]. 2018.

[15] Ramadan S, Gaillet L, Tessier C, et al. Assessment of the stress corrosion cracking in a chloride medium of cables used in prestressed concrete structures by the acoustic emission technique [J]. Measurement Science and Technology, 2008, 19(11).

[16] Appalla A, ElBatanouny M K, Velez W, et al. Assessing Corrosion Damage in Posttensioned Concrete Structures Using Acoustic Emission [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2016, 28(2).

[17] Velez W, Matta F, Ziehl P. Acoustic Emission Intensity Analysis of Corrosion in Prestressed Concrete Piles; proceedings of the 10th International Conference on Barkhausen and Micro-Magnetics (ICBM), Baltimore, MD, F 2014

Jul 21-26, 2013 [C]. 2014.

[18] ElBatanouny M K, Mangual J, Ziehl P H, et al. Early Corrosion Detection in Prestressed Concrete Girders Using Acoustic Emission [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2014, 26(3): 504-11.

[19] Ma G, Du Q. Structural health evaluation of the prestressed concrete using advanced acoustic emission (AE) parameters [J]. Construction and Building Materials, 2020, 250.

[20] Iyer S R, Sinha S K, Schokker A J. Ultrasonic C-scan imaging of post-tensioned concrete bridge structures for detection of corrosion and voids [J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2005, 20(2): 79-94.

[21] Sodeikat C, Mayer K, Obermeier P. Corrosion on prestressing wires due to segregation of the injection mortar - Detection of injection defects with Ultrasonic-Echo Technique; proceedings of the 5th International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting (ICCRRR), Cape Town, SOUTH AFRICA, F 2018

Nov 19-21, 2018 [C]. 2018.

[22] Gaydecki P, Fernandes B, Quek S, et al. Inductive and magnetic field inspection systems for rebar visualization and corrosion estimation in reinforced and pre-stressed concrete [J]. Nondestructive Testing and Evaluation, 2007, 22(4): 255-98.

[23] Fernandes B, Nims D, Devabhaktuni V. Computer Aided Modeling of Magnetic Behavior of Embedded Prestressing Strand for Corrosion Estimation [J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2013, 32(2): 124-33.

[24] Huang Y, Zhang H, Zhang B, et al. A Corrosion Detection Method for Steel Strands Based on LC Electromagnetic Resonance [J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2020, 2020.

[25] Washer G, Fenwick R, Bolleni N, et al. Effects of Environmental Variables on Infrared Imaging of Subsurface Features of Concrete Bridges [J]. Transportation Research Record, 2009, (2108): 107-14.

[26] 朱星, 朱万旭, 周红梅. 新型高性能混凝土复合锚垫板的性能研究 [J]. 混凝土与水泥制品, 2011, (8): 35-7.

[27] 刘平伟. 30 米 T 梁后张预应力耐久性监测系统试验研究 [D]; 广西工学院, 2011.

[28] 朱星. 电绝缘后张法预应力筋的健康监测研究 [D]; 广西工学院, 2012.

[29] Della Vedova M, Elsener B. Enhanced durability, quality control and monitoring of electrically isolated tendons; proceedings of the Proc 2nd International fib congress, F, 2006 [C].

[30] Schupack M, Suarez M G. Electrically isolated reinforcing tendon assembly and method [Z]. Google Patents. 1982

[31] du Beton F I. Corrugated Plastic Ducts for internal bonded post-tensioning [J]. Bulletin, (7).

[32] du béton F. Durability of Post-tensioning Tendons: Recommendation [M]. International Federation for Structural Concrete (fib), 2006.

[33] 曹雯, 宋倩文, 申巍, et al. 环氧/纸复合材料直流耐压寿命模型的估计方法 [J]. 电工技术学报, 2019, 34(18): 3750-8.

[34] Della Vedova M, Elsener B, Evangelista L. Corrosion protection and monitoring of electrically isolated post-tensioning tendons; proceedings of the Schriftenreihe der Technischen Universität Wien, Proc Third European Conference on Structural Control, F, 2004 [C].

[35] Hartz-Ing. U. Anwendung von ETAG 013: Spannverfahren für das Vorspannen von Tragwerken (Post-tensioning kits for prestressing of structures). Ein Erfahrungsbericht [J]. Dibt Mitteilungen, 2005, 36(6): 182–7.

[36] Elsener B. Monitoring of electrically isolated post-tensioning tendons [J]. Tailor made, 2008.

[37] Brown M. Electrically Isolated Tendons in European Transportation Structures [R]: United States. Federal Highway Administration. Office of Research …, 2020.

[38] Naito C. Construction and Field Evaluation of Electrically Isolated Tendons in a Prestressed Concrete Spliced Girder Bridge [J]. Journal of Bridge Engineering, 2020, 25(7).