

沉管隧道密舱结构式水下电缆穿舱施工应用

王富敬

(中交一航局第二工程有限公司)

摘 要: 为了解决沉管隧道安装时传统施工方法存在水下电缆穿舱效率低、成本高、风险大等问题, 创新性地提出了预制电缆穿舱导管、导管精准定位、水下电缆快速穿舱等关键技术。该工艺在大连湾海底隧道工程中成功应用, 施工效率大幅提高, 工程成本显著降低, 且未出现任何安全事故。研究结果表明, 这一新型工艺不仅具有创新性, 而且表现出色, 对于类似工程应用具有非常重要的推广价值。

关键词: 沉管隧道; 密舱结构; 水下电缆; 穿舱施工

0 引言

沉管隧道技术作为现代跨海交通的关键技术，其施工方法持续受到学术界和工程界的关注，并不断经历研究与优化过程。传统电缆安装方法复杂且易受海水侵蚀，这不仅缩短了设备的使用寿命，也降低了其可靠性^[1]。此外，依赖进口设备增加了项目的成本和供应链风险，进而影响工程进度和成本控制。因此，对现有工艺进行改进，对于提升施工效率、降低成本以及增强可靠性具有至关重要的意义。本文提出了一种创新的密舱结构式水下电缆穿舱施工工艺，该工艺通过优化安装方式减少海水浸泡，延长设备使用寿命，提高可靠性^[2]。

1 工程概况

1.1 项目概述

大连湾海底隧道作为我国北方首座跨海沉管隧道,隧道全长约 5.1 km,沉管段长达 3 035 m,由 18 节巨型沉管构成。沉管隧道管节通过沉管沉

放专用安装船组进行精准控制和对接,因此安装船组是沉管沉放的控制核心。安装船需要实时监测沉管内部压载水压载量、管节姿态、封门应力应变等数据,通过监测数据及管节沉放对接标准化流程实时调整沉管内部各种执行机构,确保沉管全程都处于可控状态,因此需要建立一条沉管与安装船数据交互以及动力传输专用链路,该链路必须安全可靠、高效稳定。结合工程实际以及传统施工方法,首创了一种沉管隧道密舱结构式水下电缆穿舱施工方法。

水下线缆在沉管安装过程中至关重要,作为沉管内外动力与信号传输的媒介,需确保沉管内部压载水系统与安装船电力供应、光纤通讯的有效连接。水下线缆分为组合电缆以及动力电缆,该电缆起始段与安装船连接,尾端通过沉管管节尾端端封门进入沉管内部,沉管管节尾端端封门结构图见图 1。水下线缆的穿舱作业是通过沉管端封门侧的水下插座与安装船侧水下插头的插拔

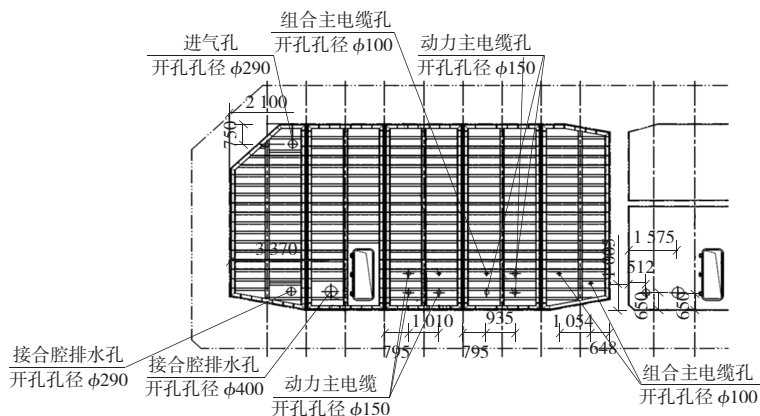


图 1 大连湾海底隧道水下电缆船舱整体布置图(mm)

方式来完成。在插头内腔的插拔过程中,始终保持密封状态,有效隔绝了与外部水体的接触,从而保障了水下插拔操作的可行性。

1.2 传统水下电缆穿舱工艺的局限性

在大连湾海底隧道工程中,水下电缆穿舱是至关重要的施工阶段。电缆作为电力与信号传输的关键介质,其安装方法对施工效率、成本以及系统的可靠性具有显著影响。然而,传统施工技术存在诸多缺陷^[3]。

在传统技术中,水下插座被安装于沉管的外侧,并通过水密环来实现其防水功能。在沉管的一次舾装干坞灌水作业之前,水下插座需从端封门外侧由外向内进行安装,而配套的法兰则安装在端封门外侧。由于水下插座长时间暴露于海水中,沉管安装完成后,插座无法立即进行拆卸,导致其周转频率较低。长期处于海水环境中的插座容易遭受腐蚀和生物附着,从而引发锈蚀、氧化以及水密性失效等问题,在港珠澳大桥工程中,插座出现了氧化、锈蚀以及烧蚀现象,这对电气性能和水密性造成了负面影响。以港珠澳大桥沉管隧道施工为例,传统水下电缆穿舱断面图如图2所示。

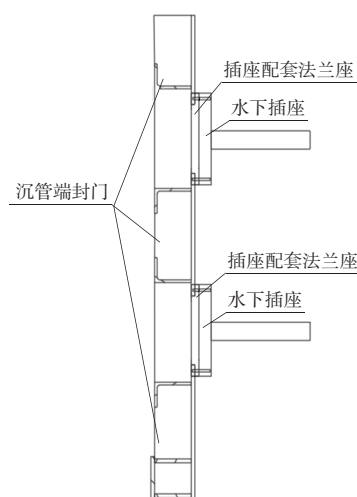


图2 港珠澳大桥沉管隧道水下电缆穿舱断面图

沉管安装完成后插座无法立即拆卸,降低了设备的使用效率。长期的海水浸泡缩短了插座的使用寿命,增加了维护和更换成本。水密性虽然依赖于密封设计,但其性能易下降,一旦失效,海水可能渗入插座内部,从而可能引发安全事故^[4]。此外,安装位置和方式限制了施工操作空间,增加了施工的难度和风险。同时,传统沉管

专用水下电缆穿舱工艺引进国外技术,核心配套件依托于国外进口,设备的日常运维也严重依赖国外专业技术服务团队,带来高额成本投入以及供应链的不确定性。

在大连湾海底隧道工程中,特定问题尤为显著。工程采用“3+3”干坞法预制沉管,配置了10套端封门。在沉管安装过程中,水下线缆需穿过端封门,并确保其水密性。若依照传统施工技术,单次舾装需在端封门上安装水下插座,每节沉管需配备10个水下插座,这些插座随端封门流转,导致整个工程共需10套水下插座,总计100个。由于水下插座均为国外进口,价格昂贵,并且受国际环境的影响,其供应存在极大的不确定性。因此,在保证施工顺利进行的同时,优化水下线缆插座安装工艺,减少水下插座的使用数量,成为迫切需求。通过创新设计的密舱结构,可以有效解决上述问题。优化水下电缆穿舱工艺,研发新型施工方法,是沉管隧道施工技术发展的必然趋势。

2 密舱结构式水下电缆穿舱施工工艺

2.1 工艺原理

针对传统水下电缆安装面临的挑战,本文提出了一种创新的密舱结构式水下电缆穿舱施工工艺。该工艺的核心在于通过精心设计的密舱结构,依托密舱结构的水密特性,将插座安置于沉管尾端端封门内侧,见图3。沉管二次舾装时只需在沉管内部进行水下插座的安装。沉管内部水下插座安装完成并施压完成后,潜水员从沉管外部将安装船一侧的配套水下电缆配套水下插头与之前安装在沉管内部的水下插座进行连接,安装船与

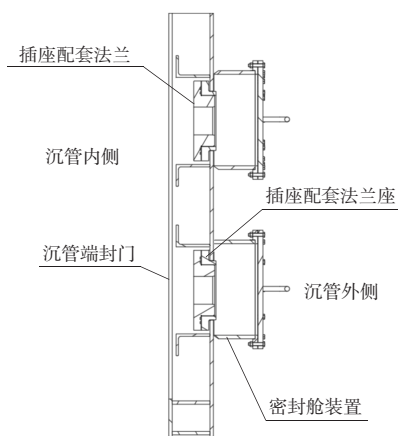


图3 大连湾海底隧道电缆穿舱密封结构断面图

沉管通过水下线缆联系到一起,实现电力及信号传输^[5]。沉管安装作业完成后,潜水员将沉管外侧的水下插头拔除并用专用水密舱盖对原有安装位置进行密封,此时即可从沉管内部干环境下拆除安装在沉管端封门水下电缆配套插座,有效避免了水下插座长期浸泡海水的弊端,也实现了水下插座的循环使用。

2.2 工艺创新点

本研究提出的密舱结构式水下电缆穿舱施工工艺,在技术革新方面主要呈现以下特点。首先,该工艺对传统插座安装位置进行了重新定位,由沉管外侧转移至内侧^[6]。此调整使插座安装过程推迟至二次舾装阶段,从而仅需在内侧向外部进行安装,显著缩短了插座暴露于海水中的时间,有效降低了锈蚀的可能性,进而延长了插座的使用

寿命。其次,该工艺通过密舱结构的双重止水设计,显著提升了水密性能^[7]。相较于传统单层止水结构,密舱结构的双层止水设计在隔绝海水方面表现更为优异,为施工过程中的电气安全提供了更为坚实的保障。此外,密舱结构的安装与拆卸均在沉管内部完成,有效减少了潜水员在复杂水下环境中的作业时长,从而降低了施工过程中的风险。该工艺还实现了水下插座的循环使用。在传统工艺中,插座安装后无法拆卸,导致设备利用率低下。而密舱结构式工艺允许在沉管安装完成后立即拆卸插座,以便于下一个管节的安装,显著提高了设备的周转效率,降低了施工成本^[8]。

2.3 工艺流程

密舱结构式水下电缆穿舱施工工艺流程图如图4所示,主要包括以下关键步骤。

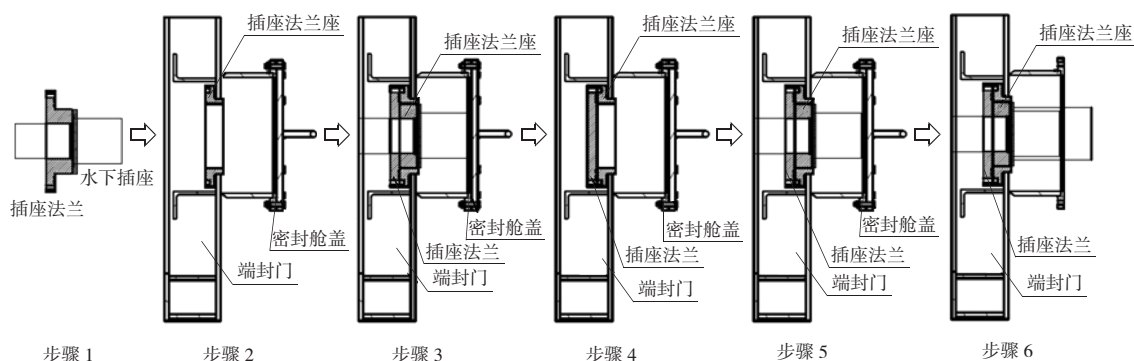


图4 密舱结构式水下电缆穿舱施工工艺流程图

步骤1: 将水下线缆配套插座、插座配套法兰及原配小法兰装配成整体。

步骤2: 将水下线缆插座法兰座及密封舱盖焊接在端封门开孔处,焊接时确保法兰座、开孔及密封舱盖在同心轴上。法兰座仅在端封门外侧进行焊接,保留法兰座与端封门内侧的空隙,防止端封门受压变形影响法兰密封面效果。

步骤3: 在干坞内将插座整体固定在法兰座上,拧紧螺栓达到对应的扭矩值。然后进行水压试验,验证密封性能;试验合格后,将插座移除并妥善存放,待二次舾装时使用。同时,用盲板法兰密封法兰座,再次进行水压试验,确保其密封性。

步骤4: 上一步水压试验合格后,移除插座并存放待二次舾装时使用。用盲板法兰密封法兰座,再次进行水压试验确保密封。

步骤5: 在沉管二次舾装阶段,拆除沉管内

侧的盲板法兰,从沉管内部进行水下插座安装。

步骤6: 水下插座对应螺栓达到规定扭矩后潜水员下水拆除沉管外部端封门指定位置的密封舱盖,将安装船上的水下插头与插座连接,完成电缆与光缆的连接。在沉管安装完成后,潜水员将移除安装船侧的水下插头,并封闭密封舱盖。随后可在沉管内部进行水下插座的拆卸,以便于后续管节的安装,从而实现插座的循环利用。

3 工艺应用

在大连湾海底隧道工程中,密舱结构式水下电缆穿舱施工工艺作为一项关键创新技术,其成功实施依赖于系统而严格的施工工艺流程控制。在一次舾装阶段,首先将法兰座与密封舱盖精准焊接于端封门预留位置,焊接过程中严格控制法兰座、密封舱盖与端封门开孔之间的同心度,为后续插座安装的精度及水密性能提供基础保障。焊缝经外观检查与无损探伤合格后,方可进入后

续工序。在干坞作业中,水下插座被整体安装并固定于法兰座上,螺栓按设计扭矩拧紧,随后进行水压试验以检验密封性能。该工序对确保结构水密性具有关键作用,须严格按照规范执行;确认无渗漏后,插座予以妥善保管备用。同时,采用盲板法兰对法兰座进行临时密封,并再次实施水压试验,以进一步增强可靠性。

二次舾装作为整个工艺的核心环节,需在沉管内侧拆除盲板法兰,按规定安装并固定水下插座,确保其具备足够的结构牢固性与密封性能;随后由潜水员下水拆除密封舱盖,完成安装船水下插头与插座的连接与安装,实现电缆与光缆的贯通。待沉管就位后,潜水员拔除安装船侧插头,重新封闭密封舱盖;施工人员在沉管内部拆卸插座,经维护后备用于后续管节,从而实现插座资源的循环利用。

该工艺环节紧密衔接、相互支撑,形成一个完整的质量控制链条,保障了大连湾海底隧道工程水下电缆穿舱施工高质量完成,充分体现了创新施工技术在重大工程中的实践价值与应用潜力。

4 应用效果

在大连湾海底隧道工程中,采用了密舱结构式水下电缆穿舱施工技术,成功完成了 18 节沉管的安装。该技术仅需一套水下插座,有效降低了进口水下插座的高昂采购成本。同时,该工艺提升了水密性能,降低了潜水员作业的风险,优化了施工流程,缩短了工期,并延长了设备的使用寿命,确保了海底隧道节点工期的实现。密舱结构式水下电缆穿舱施工技术在大连湾海底隧道项目中的应用,共计可节约 1 000 万元的水下插座采购成本,不仅节省了昂贵的设备投资,还充分展现了技术在降低成本方面的核心作用。

5 结语

大连湾海底隧道密舱结构式水下电缆穿舱施工技术成功实施,标志着我国在沉管隧道施工技术领域实现了新的技术突破。该技术不仅解决了传统技术中存在的诸多问题,例如设备锈蚀、成本高昂、施工效率低下等,还通过优化设计和施工流程,显著提升了施工效率、降低了成本,并增强了设备的可靠性和环境友好性,具有显著的经济效益和社会效益。通过减少设备采购数量、缩短施工周期、降低施工风险等方式,为项目的顺利推进提供了有力支持。同时,该技术的成功应用也为其他类似工程提供了宝贵的经验借鉴,具有广泛的应用前景。随着我国海洋基础设施建设的不断发展,密舱结构式水下电缆穿舱施工技术有望在更多跨海隧道工程中推广应用。未来将继续优化该技术,进一步提高施工效率和设备可靠性,为我国海洋工程建设贡献更多创新技术。

参考文献:

- [1] 付志强,李志鹏,孙龙泉,等. 碎冰对出水航行体载荷特性影响试验研究[J]. 力学学报,2024,56(11):3188-3201.
- [2] 张雅春,周相荣. 沉管水下脐带缆穿舱及搭接技术[J]. 中国港湾建设,2024,44(8):74-77.
- [3] 周相荣. 深水管节沉放施工水下可更换穿舱密封系统设计与应用[J]. 中国港湾建设,2024,44(3):66-70.
- [4] 谢晓忠,陈沙古,高原,等. 全海深潜水器载人球壳缩比模型疲劳试验技术研究[J]. 工程与试验,2024,64(1):34-37.
- [5] 熊纪国. 大型油轮花键连接货油泵安装工艺[J]. 广东造船,2023,42(6):97-100.
- [6] 刘鹏飞,靳志杰. 一种拖曳系统用铠装电缆的研制[J]. 现代传输,2023(6):39-41.
- [7] 侯莉,石磊,付剑波,等. 海底数据中心模块测试技术研究[J]. 石油和化工设备,2023,26(11):5-8.
- [8] 李明烁,孟令帅,谷海涛,等. 基于 USV 的 AUV 布放回收系统设计与实现[J]. 工程设计学报,2023,30(5):650-656.