

沉管水下脐带缆穿舱及搭接技术

张雅春, 周相荣

(中交第一航务工程局有限公司, 天津 300461)

摘要: 针对深中通道沉管安装过程中水上一体船与水下沉管电力和通讯联系的需要, 提出了一种深水沉管水下脐带缆穿舱及搭接技术。通过对其水下密封性能、承重性能等关键指标的模拟和测试, 结果表明该系统可满足 300 m 水深抗压密封要求和 14 kN 的抗拉力。此技术为深中通道沉管安装提供了有效的技术支撑, 其可靠性在深中通道沉管安装中得到了验证, 同时可为未来更大水深沉管安装时的“船舶-沉管”通讯联系提供技术参考。

关键词: 深水沉管; 线缆穿舱; 线缆搭接; 水密可靠性; 深中通道

中图分类号: U655.4

文献标志码: B

文章编号: 2095-7874(2024)08-0074-04

doi: 10.7640/zggwjs202408013

Underwater umbilical cable penetrating and connecting technology for immersed tube

ZHANG Ya-chun, ZHOU Xiang-rong

(CCCC First Harbor Engineering Co., Ltd., Tianjin 300461, China)

Abstract: To meet the need of electric power and communication connection between waterborne integrated vessel and underwater immersed tube during the installation process of immersed tube tunnel of the Shenzhen-Zhongshan Link, an underwater umbilical cable penetrating and connecting technology was proposed. Through the simulation and testing of key indexes such as underwater sealing performance and load-bearing performance, the results indicate that the system can meet the pressure sealing requirements for water depth of 300 meters and has a tensile resistance of 14 kN. This technology provides effective technical support for the installation of immersed tubes in the Shenzhen-Zhongshan Link, and its reliability has been verified in the installation of the Shenzhen-Zhongshan Link immersed tube tunnel. Meanwhile, it can provide technical reference for the communication connection "between vessel and immersed tube" during installation of immersed tube tunnel in larger water depth in the future.

Key words: deep water immersed tube; cable penetration; cable connection; water-tightness reliability; Shenzhen-Zhongshan Link

0 引言

沉管沉放安装时, 必须确保海面上一体船控制中心和水下沉管间建立稳定可靠的通讯和电力联系^[1], 以保障海底沉管的精准沉放和对接^[2-3]。安装过程中, 海面一体船控制中心通过电力缆和通讯缆控制海底沉管内的执行设备, 如视频监控装置、千斤顶顶推系统、压载水系统等。为保证电力和通讯在沉管中的正常供应, 需要在沉管壁上

安装一个水密的穿舱件, 电力缆和组合缆通过穿舱件进入沉管内部。沉管从制造到最终安装过程中, 由于多次转场及长距离浮运安装, 加之受到海压、海流、海风等外部条件的影响及穿舱件本身的承重限制, 穿舱件的结构和水密性易发生变化, 产生漏水风险。因此, 优化穿舱件和电缆之间的黏结性能及承重能力, 使之能够适应不同海况条件及长距离浮运安装的要求, 以确保沉管内

电力和通讯的稳定供应, 成为迫切需要研究和解决的问题。本文提出的采用环氧树脂黏合剂对聚氨酯与金属护套进行黏结, 并采用环氧树脂黏合剂和承重编织金属环组合进行穿舱件承重设计, 经测试验证, 能够极大地提升穿舱件的水密安全性及承重能力。

1 工程概况

深中通道全长 24 km, 其中, 沉管隧道长 5.03 km, 由 32 节沉管对接而成, 是世界级钢壳混凝土隧道。沉管标准管节长 165 m, 宽 46 m, 高 10.6 m, 32 个管节平均每个用钢量约 1×10^4 t, 最大水深为 45 m。

根据深中通道设计要求, 沉管安装时水下脐带缆穿舱部位至少能耐受 45 m 海水压力。水下脐带缆在沉管安装的过程中受舾装、波浪、海流、流态多变等因素影响^[4], 要求穿舱系统水密关键部位至少耐受 10 kN 的抗拉力要求。

2 穿舱及搭接系统设计

2.1 系统设计

压载水系统是沉管隧道安装的最重要一环, 由压载水控制系统和沉管内压载水管系统组成^[5]。其中, 压载水控制系统主要由海面浮运船控制中心和沉管内监控设备 2 部分组成^[6]。沉管内监控设备主要包括传感器和视频监控两大系统, 其中视频监控系统主要包括照明装置、摄像机等, 用于监控压载水箱的水尺刻度、端封门、阀门指示器等。传感器系统主要包括进出口压力传感器、对接腔压力传感器、密封传感器、水箱传感器等, 主要用于监测海底沉管对接时压载水系统的各项指标数据。

深中通道浮运一体船与沉管之间通过水下脐带缆穿舱和沉管顶部搭接链接建立电力供应和通讯联系, 其安装示意图见图 1。水下脐带缆与浮运一体船在管顶采用搭接链接, 以便于施工完成后浮运一体船和沉管之间的链接分离。脐带缆与沉管间采用穿舱链接, 穿舱位置选择在非 GINA 端行车廊道端封门处, 通过安装法兰与水下穿舱件连接。水下穿舱件与电缆通过环氧树脂黏合剂、聚氨酯冷填充剂、夹紧块等进行水密和承重处理, 以保证深水密封和承重要求。法兰密封面采用 O 形圈密封, 搭接端固定在沉管顶部。脐带缆链路采用“一用一备”的设计思路, 图 1 中 2 号动力缆和 2 号组合缆为备用线路。

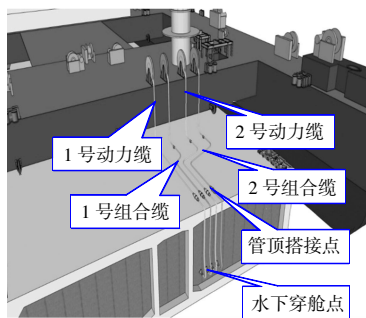


图 1 “船舶-沉管”水下脐带缆连接示意图

Fig. 1 Schematic diagram of underwater umbilical cable link "between vessel and immersed tube"

每组水下脐带缆分为纵向水密电缆和非纵向水密电缆 2 部分。其中, 非纵向水密电缆安装在浮运一体船甲板电缆卷筒与沉管搭接点之间, 搭接点端安装干式插接头及水密壳。纵向水密电缆安装在沉管搭接点和端封门穿舱点之间, 端封门端安装水密穿舱组件, 搭接点端安装干式插接头及水密壳。纵向水密电缆和非纵向水密电缆通过搭接壳在管顶搭接点搭接。

本系统采用的水下脐带缆外护套材料为聚氨酯, 穿舱密封采用冷填料处理, 采用环氧树脂黏合剂对聚氨酯与金属护套进行黏结, 以增强系统的黏结性能。穿舱组件承重设计采用环氧树脂黏合剂和承重编织金属环的组合设计, 以提高水下脐带缆穿舱组件和搭接组件的承重能力。

2.2 设计特色

水下脐带缆穿舱和搭接系统的设计具有以下特色: 1) 节省浅坞舾装成本和时间, 舾装时间可缩短至 4 h 内完成; 2) 搭接时间短, 沉管进入深坞后, 脐带缆搭接时间可控制在 6 h 内完成, 且不需要水下安装; 3) 防腐蚀性, 脐带缆链路中关键部件不易腐蚀, 适应恶劣海况条件; 4) 沉管安放完毕, 水下切缆工序简单, 用时可缩短至 5~10 min; 5) 安全性方面, 采用环氧树脂黏合剂对脐带缆与金属护套进行黏结, 抗剪强度得到有效提高; 穿舱组件承重设计采用环氧树脂黏合剂和承重编织金属环组合设计, 承重能力显著提高。

3 系统技术性能测试及应用

3.1 技术性能测试

为确保系统能够满足深中通道沉管安装要求, 对系统的深水抗压密封性能、承重性能进行了测试。环氧树脂黏合剂对聚氨酯与金属护套的黏结性能测试采用剪切应力法; 搭接点的受力受电缆

内部承重部件与壳体连接方式影响,采用拉力机测试台进行聚氨酯与金属黏合强度试验。

3.1.1 抗水压密封性能测试

1) 试验材料

型号 316L 金属板 2 块,规格均为 115 mm×25 mm×3 mm; SCHOTTVERGUS 环氧树脂黏合剂 A 和 B; PUR-Vergussmasse 聚氨酯冷填充剂; 聚甲醛树脂薄膜,规格 0.254 mm(10 mil)厚片材。

2) 试验方法

①取 2 块 316L 金属板分别编号 a、b,用丙酮或酒精清洗 2 块金属板表面的油污,放置于烘箱内,烘箱温度设置为 45 ℃。0.5 h 后取出,将金属板 a 表面均匀涂抹环氧树脂黏合剂,厚度 0.127 mm(5 mil),放置于烘箱内,45 ℃下保温 15 min,使黏合剂充分干燥,取出金属板 a。金属板 b 作为对比参照,不做处理。操作过程均用夹钳操作,避免油污污染金属表面。

②混合聚氨酯冷填充剂,用刷子将聚氨酯混合液均匀涂抹于金属板 a 和金属板 b 表面,涂抹厚度 0.127 mm(5 mil)。将 2 块金属板置于干燥密封袋内干燥 24 h,让聚氨酯充分固化。

③将金属板 a、b 分别搭接于测试平台上,金属板 b 插入聚甲醛树脂薄膜以补偿环氧树脂黏合剂的涂覆厚度。

④以 0.1 mm/min 的压力速度下压金属板自由端,测试金属搭接部分的抗剪强度,测试 10 次,计算平均值。

⑤用电子显微镜观察金属板受压后的微变形量,通过光学显微镜观察聚氨酯和金属板之间的离切角。

3) 测试结果

涂抹环氧树脂黏合剂的金属板 a 和未涂抹环氧树脂黏合剂的金属板 b 搭接处抗剪强度与处理时间的关系如图 2 所示。

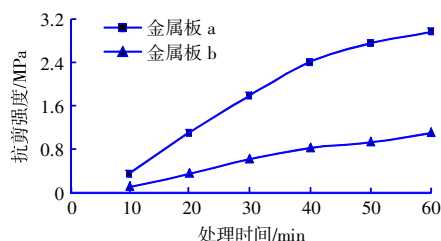


图 2 金属板 a 和金属板 b 抗剪强度随时间变化图

Fig. 2 Diagram of shear strength of metal plates a and b over time

涂抹环氧树脂黏合剂的金属板 a,在测试平台处理 60 min,抗剪强度为 2.96 MPa,未处理的金属板 b 的抗剪强度为 1.10 MPa。由此可知,环氧树脂黏合剂可提高聚氨酯和金属表面的黏合强度,涂抹环氧树脂黏合剂可承受更高的外部水压。

4) 穿舱组件实物测试

根据上述理论,制作涂抹环氧树脂黏合剂的穿舱组件样品,在压力釜中对穿舱组件样品进行抗压密封试验,试验结果表明穿舱组件实物样品能满足 300 m 水深抗压密封要求。

3.1.2 搭接壳承重性能测试

1) 试验材料

1.5 m 样品电缆 2 根; SCHOTTVERGUS 环氧树脂黏合剂 A 和 B; 承重编织金属环; 承重金属壳; 样品搭接壳,规格为 $\phi 215$ mm×1 159 mm(直径×长度); 其他辅助电缆夹具。

2) 试验方法

①组装搭接壳穿舱组件 a。用丙酮清洗承重编织金属环和承重金属壳表面油污,取其中一根样品缆,把电缆承重部件置于金属壳内,混合环氧树脂黏合剂 A 和 B 两组分,倒入金属壳内部,保持静止状态 24 h,让其完全固化。

②组装搭接壳穿舱组件 b。取另一根电缆,将电缆承重部件编织在承重编织金属环上,编织过程保证各承重部件受拉状态一致,受力均匀。操作过程均需佩戴尼龙手套,保持组件干净。

③测试穿舱组件 a、b。分别把搭接壳组件放置于拉力测试平台上,固定好两端的受力点。拉力机对测试组件分别施加 100 N/min 的拉力速度。

④观察拉力数值变化。观察测试组件 a、b 受力曲线变化,当达到临界受力极限时,受力-位移曲线会向下弯曲,并持续下降。

⑤优化方案。为进一步提高水下脐带缆穿舱组件和搭接组件的承重性能,优化穿舱组件承重方案,采用环氧树脂黏合剂和承重编织金属环的组合设计,用上述方法进行测试。

3) 测试结果

穿舱组件 a、穿舱组件 b 及优化后的穿舱组件受拉力影响的受力-位移变化曲线如图 3 所示。由图 3 可知,搭接壳穿舱组件 a 最大临界受力点约为 4.5 kN,说明环氧树脂黏合剂在固定承重方面抗拉强度较低;承重编织金属环的搭接壳穿舱组件 b 最大临界受力点约为 12 kN,承重性能大

幅提高,说明承重编织金属环可极大提高穿舱组件抗拉性能。方案优化后,组件最大临界受力点约为 14 kN,承重性能得到了进一步提升。

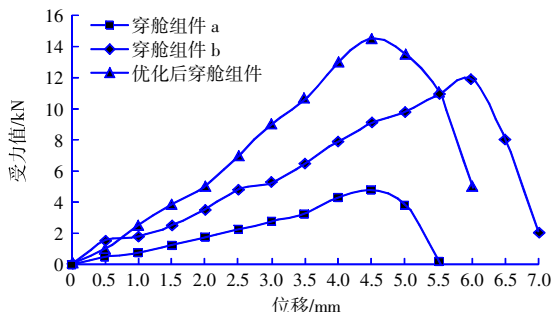


图3 穿舱组件 a 和穿舱组件 b 及优化后组件位移量随受力值变化情况

Fig. 3 The change of displacement of module a, module b and optimized module with the force value

3.2 系统应用

本研究中深水沉管水下脐带缆穿舱与搭接技术在深中通道沉管隧道安装中进行了应用,在沉管的舾装、调试、沉放、精密对接等过程发挥了重要的作用,可靠性得到了验证。目前深中通道已完成所有沉管的安装,各项数据符合施工要求。

沉管水下脐带缆穿舱与搭接系统主要流程:

1) 浅坞区安装水下脐带缆穿舱组件。定位安装穿舱法兰至端封门安装底座,安装时穿舱法兰与安装底座同轴配合。预紧水密 O 形圈,穿舱组件通过螺钉与安装底座锁紧。当整体线缆绝缘达 2 000 M Ω 以上,将管外自由端固定在沉管搭接处。

2) 深坞区脐带缆管顶搭接。浮运一体船与沉管在深坞区用缆绳绞合完毕后,在沉管顶部进行浮运一体船与沉管脐带缆搭接。搭接时,一体船绞车端搭接壳与端封门穿舱组件管顶搭接壳同轴配合,通过锁紧螺栓将搭接头预紧,预紧力为 45 N·m。管顶搭接须注意一体船绞车上电缆的扭绕情况,防止过度扭绕破坏电缆与配套设施的水密连接。浮运前固定管顶搭接组件,确保水下脐带缆链路各组件在外海具有足够的抗击风浪能力。

3) 水下脐带缆的切断与穿舱组件的封堵。沉管对接安装施工完成后,浮运一体船需要撤离施工现场,须切断连接一体船与沉管之间的脐带缆。切断时,首先将系统断电,断电后对穿舱组件进行管内封堵,通过预紧螺钉锁紧密封堵头,潜水员在管节端封门外侧将电缆切断,一体船绞车将剩余电缆绞回。

4) 水下脐带缆性能检测。一体船回坞后将水密搭接段电缆在沉管顶端搭接处分离,对回收电缆进行绝缘性能检测,检测合格后,按标准工艺要求,再次进行水下穿舱组件和水下电缆的密封处理,以备下次重复利用。

4 结语

本文结合深中通道项目,针对沉管安装水下脐带缆穿舱和搭接系统中 2 个关键技术点进行了理论评价和实际验证。主要结论如下:本研究中深水沉管水下脐带缆穿舱和搭接系统能够满足 300 m 水深抗压密封要求;采用环氧树脂黏合剂和承重编织金属环组合的承重搭接形式,可实现 14 kN 的抗拉力。深水沉管水下脐带缆穿舱与搭接技术在深中通道沉管隧道安装中进行了应用,其可靠性得到了验证,并且该系统可满足更大水深、更复杂海况的施工要求。

参考文献:

- [1] 孙健,魏红波,马宗豪.长距离沉管隧道施工通讯工艺及控制方法[J].中国港湾建设,2018,38(3):46-49.
SUN Jian, WEI Hong-bo, MA Zong-hao. Communication technology and control method for long-distance immersed tube tunnel construction[J]. China Harbour Engineering, 2018, 38(3): 46-49.
- [2] 付院平,李家林,刘兆权.超大型沉管安装精调系统方案研究与应用[J].中国港湾建设,2019,39(4):22-26.
FU Yuan-ping, LI Jia-lin, LIU Zhao-quan. Research and application of precision system for installation of super large immersed tube[J]. China Harbour Engineering, 2019, 39(4): 22-26.
- [3] 陈越.港珠澳大桥岛隧工程建造技术综述[J].施工技术,2013,42(9):1-5.
CHEN Yue. Review on construction technology of tunnel and artificial islands for Hongkong-Zhuhai-Macao Bridge[J]. Construction Technology, 2013, 42(9): 1-5.
- [4] 尹海卿.港珠澳大桥岛隧工程设计施工关键技术[J].隧道建设,2014,34(1):60-66.
YIN Hai-qing. Key technologies applied in design and construction of artificial islands and immersed tunnel of Hongkong-Zhuhai-Macao Bridge (HZMB) project[J]. Tunnel Construction, 2014, 34(1): 60-66.
- [5] 李家林,林凡刚,刘永军,等.超大型沉管压载水系统的研发与应用[J].中国港湾建设,2020,40(1):64-68,73.
LI Jia-lin, LIN Fan-gang, LIU Yong-jun, et al. Development and application of superlarge immersed tube ballast water system[J]. China Harbour Engineering, 2020, 40(1): 64-68, 73.
- [6] 林巍.港珠澳大桥沉管隧道管节压舱水系统[J].中国港湾建设,2014,34(2):11-16,44.
LIN Wei. Ballast tank system of immersed tunnel element for Hongkong-Zhuhai-Macao Bridge[J]. China Harbour Engineering, 2014, 34(2): 11-16, 44.