# 科技成果登记公示表

|  |  |
| --- | --- |
| **成果名称：** | 高可靠性海洋能源开发用光纤复合海底电缆关键技术及产业化 |
| **完成单位：** | 南海海缆有限公司、中天科技海缆股份有限公司 |
| **主要人员:** | 刘利刚、胡明、缪兵、周远清、陈步圣、张洪亮、王佳佳、许瑞涛、缪月山、陆权福 |
| **介绍:** | 1．课题来源与背景：本项目为自选项目，所属电气工程下的输配电工程，主要应用领域为海上风电、海底油气平台、岛屿互联等能源互联互通领域。海缆是海洋能源和信息传输的“大动脉”，其长期运行于复杂的水下环境，具有技术要求高、施工和维护难度大等特点，被誉为光电传输领域“金字塔塔尖”的产业。我国海洋资源研究及开发起步较晚，基础较弱，国内包括海缆在内的核心海洋装备市场曾长期被国外厂商主导。南海海缆有限公司及中天科技海缆股份有限公司自成立以来，一直致力于海缆的研发、设计和生产，通过不断的技术创新和项目经验积累，形成了具有自主知识产权的海缆核心技术，创造了多项领先的技术和产品，自主研制了额定电压33kV、35kV、66kV、220kV、275kV、330kV、500kV三芯交流光纤复合海底电缆，均通过了国家认可的第三方试验室的型式试验，取得了型式试验报告，实现了产业化应用。2．技术原理及性能指标：技术原理1）超高压交联聚乙烯绝缘挤出工艺技术：利用交联聚乙烯替代油浸纸或绝缘油作为超高压海缆绝缘材料，并通过控制交联聚乙烯挤出工艺及洁净度，提升产品性能。2）大长度绝缘、挤铅及护套连续生产技术：通过对生产过程及工艺控制（包括生产设备转速、温度、压力等关键参数以及材料洁净度）的研究，并选用先进、大承重量的生产设备，延长生产线连续稳定开机时间，提高海缆一次性最大生产长度及性能稳定性。3）轻型光电复合海缆生产技术：在满足产品电气性能及机械性能要求的前提下，根据材料性能和缆芯实际应用情况优化绝缘厚度、金属护套厚度等指标，降低产品重量和生产成本。4）海缆软接头技术：通过对导体焊接、绝缘层修复等关键工艺的研究（包括设备压力、温度、交联时间以及表面光滑度控制等），完成两段海缆导体接续及绝缘层恢复，确保接续完成后接头处的性能与本体保持一致，满足长距离海缆敷设和使用要求。性能指标：1）66kV光纤复合海底电缆

|  |  |
| --- | --- |
| 电压等级（U0/U） | 38/66kV |
| 铜导体焊接强度 MPa | ≥170 |
| 铝导体、铜铝导体焊接强度 MPa | ≥70 |
| 绝缘直径 | 不超过本体的10% |
| 绝缘偏心度 | ≤8% |
| 介质损耗tgδ测量 | U0下≤10×10-4 |
| 含软接头热循环电压试验（2U0） | 绝缘不击穿 |
| 含软接头海缆局部放电试验（1.73U0） | 无超过背景的放电 |
| 含软接头海缆雷电冲击电压试验 | 325kV正负极性各10次不击穿 |
| 含软接头海缆雷电冲击试验后的工频耐压试验 | 2.5U0，15min绝缘不击穿 |
| 铜导体透水试验（100bar，10天） | ≤10m |
| 铝导体透水试验（100bar，10天） | ≤8m |
| 光单元透水试验（100bar，10天） | ≤20m |
| 金属屏蔽下透水试验（3bar，10天） | ≤4.0m |
| 铜、铝异质接头径向渗水试验（100bar，48h） | 阻水层无渗水、无可辨别形变 |
| B1光纤（G.652D）衰减系数： 1310nm | ≤0.35 dB/km |
|  1550nm | ≤0.21 dB/km |

2）275kV光纤复合海底电缆

|  |  |
| --- | --- |
| 电压等级（U0/U） | 160/275kV |
| 绝缘偏心度 | ≤5% |
| tgδ（95℃~100℃，U0） | ≤10×10-4 |
| 热循环电压试验（2U0） | 95℃～100℃，20次循环，不击穿 |
| 局部放电试验（1.5U0） | 无超过背景的放电 |
| 操作冲击电压试验（850kV） | 正负极性各10次不击穿 |
| 雷电冲击电压试验（1050kV） | 正负极性各10次不击穿 |
| 雷电冲击电压试验后的工频耐压试验 | 2U0，15min绝缘不击穿 |
| 导体透水试验（50bar，10天） | ≤10m |
| 铅套下透水试验（3bar，10天） | ≤5m |
| 光单元透水试验（50bar，10天） | ≤10m |
| 软接头径向渗水试验（55bar，48h） | 阻水层无渗水、无可辨别形变 |
| B1光纤（G.652D）衰减系数： 1310nm | ≤0.35 dB/km |
|  1550nm | ≤0.21 dB/km |

3）500kV光纤复合海底电缆

|  |  |
| --- | --- |
| 电压等级（U0/U） | 290/500kV |
| 导体材质及截面 | 铜 3×1000mm2 |
| 绝缘偏心度 | ≤5% |
| tgδ（95℃~100℃，U0） | ≤8×10-4 |
| 局部放电试验（1.5U0） | 无超过背景的放电 |
| 热循环电压试验（2U0） | 95℃～100℃，20次循环，不击穿 |
| 操作冲击电压试验（1175kV） | 正负极性各10次不击穿或闪络 |
| 雷电冲击电压试验（1550kV） | 正负极性各10次不击穿或闪络 |
| 雷电冲击电压试验后的工频耐压试验 | 2U0，15min绝缘不击穿或闪络 |
| 导体透水试验（20bar，10天） | ≤6m |
| 铅套下透水试验（3bar，10天） | ≤5m |
| 光单元透水试验（20bar，10天） | ≤6m |
| 软接头径向渗水试验（20bar，48h） | 阻水层无渗水、无可辨别形变 |
| B1光纤（G.652D）衰减系数： 1310nm | ≤0.35 dB/km |
|  1550nm | ≤0.21 dB/km |

3．技术的创造性与先进性：本项目围绕“光纤复合海底电缆关键技术及产业化”，从产品设计、生产设备改进、软接头制作、产品检测、海缆水下修复等方面，形成发明专利13件，实用新型专利18件，参编国家标准1项、团体标准8项，发表论文11篇。核心技术创新点如下：1）超高压、高场强绝缘挤出工艺及洁净度控制技术，利用交联聚乙烯替代油浸纸或绝缘油作为超高压海缆绝缘材料，并优化工艺参数，确保绝缘最薄厚度和偏心度得到控制，将绝缘偏心度降低到5%以内，是国内少数几家掌握500kV交联聚乙烯绝缘交流海缆生产技术企业之一。2）大长度绝缘、挤铅及护套连续生产技术，通过对生产过程及工艺控制（包括生产设备转速、温度、压力等关键参数以及材料洁净度）的研究，延长生产线连续稳定开机时间，提高海缆一次性最大生产长度及性能稳定性。3）三芯大直径、超高压海缆成缆和铠装光纤复合一体化技术，验证成缆、钢丝铠装设备牵引力等相关问题；优化填充条设计，研究大填充条固定及光纤单元保护等技术，保证缆芯圆整度。4）突破大截面铝导体超高压海缆研发，设计大截面阻水铝导体生产工艺，使其绞合更佳，导体结构更紧密，防止因牵引及弯曲后造成的结构松散，结构更稳定，提升导体表面光洁度和导体阻水性能，延长电缆使用寿命，减少经济损失。5）开发绝缘副产物快速分离系统，交联副产物与气体的快速分离，有效去除氮气中的交联副产物，保证超高压交联电缆生产过程中产生的气体副产物不会造成环境污染，且提升大长度海缆除气效率，解决大长度海缆副产物分离时间长的难题。6）大截面和大水深阻水技术，采用合适的阻水胶及填充技术，确保导体具有良好的纵向阻水性能；对绕包不同厚度半导电阻水缓冲层的绝缘线芯进行热膨胀试验，确定合理半导电阻水缓冲层厚度、铅套挤制模具尺寸，确保铅套兼顾纵向阻水性能及长期密封保护性能。7）非铅套干式设计海底电缆研制，开发耐高温、高粘结性能热熔胶材料，研究大直径、大截面干式设计海底电缆大长度连续铝塑复合带纵包工艺，应用视觉识别及激光焊接技术保障大长度海缆稳定可靠连续生产，成功研制满足要求的干式设计海底电缆。8）非磁性钢丝铠装技术，进行镀锌低碳钢丝与非磁性不锈钢丝载流量和经济性对比研究，研究非磁性不锈钢丝冷态加工前后相对磁导率变化以及不锈钢丝人工海水中长期加速耐腐蚀性能，研制可以满足海缆机械和电气运行要求铠装结构；攻克高强度双层高强度扁钢丝铠装生产成型工艺难题。9）海缆软接头技术，通过对导体焊接、绝缘层修复等关键工艺的研究（包括设备压力、温度、交联时间以及表面光滑度控制），开展不等截面工厂接头电场仿真分析，掌握不等截面工厂接头制造工艺，对不同反应力锥尺寸的软接头进行试验，选择氩弧焊保护导体分层焊接工艺，调整软接头绝缘材料挤出、交联温度及交联时间等工艺参数，确保软接头导体焊接质量与强度，软接头与电缆本体绝缘界面结合紧密，电气性能优良；同时确定不同规格尺寸现场柔性接头物质制作模型，掌握三芯超高压海缆成品恢复在线长度调节技术、三芯成缆恢复技术、铠装钢丝快速恢复技术；10）海缆水下修复技术，开发了一种密封性能更加可靠的铜丝屏蔽电缆密封防水技术，实现不同金属屏蔽结构海缆刚性维修接头连接技术，分析现场刚性维修接头的机械性能、修理接头阻水性能、修理接头电热学性能；同时解决铝导体附件连接发热难题，掌握超高压、大截面铝芯海缆修理接头技术，实现海底光电复合缆现场柔性接头和刚性接头双重突破，提供工程应用解决方案，满足业主不同形式抢修方案的双向选择。4．技术的成熟程度、适用范围和安全性：国内海缆在投用前一般需要花费一年以上的时间完成型式试验（按一般工业生产基础上供应一种型式海底电缆系统，或海缆，或附件之前所进行的试验，以证明海缆或附件具有满足预期使用条件的良好性能）。本成果自主研制的额定电压33kV、35kV、66kV、220kV、275kV、330kV、500kV光纤复合海底电缆均已通过国家认可的第三方试验室的型式试验，均已取得了型式试验报告，各项性能指标对应符合GB/T 32346.2-2015；GB/T 41629.2-2022；JB/T 11167.2-2011；TICW 10.2-2019；TICW 23.2-2022；CIGRE TB 490:2012；CIGRE TB 623:2015；IEC 63026:2019等标准要求，适用范围广泛，能够满足不同电压等级和输电方式的需求，确保海洋能源开发用66kV及以下阵列光纤复合海底电缆、220kV及以上送出光纤复合海底电缆可靠、安全，为我国海上风电发展做出贡献。5．应用情况及存在的问题：本成果已成功交付中广核汕尾甲子一、甲子二90万千瓦海上风电项目、中广核汕尾后湖50万千瓦海上风电项目、中广核惠州港口100万千瓦海上风电项目、三峡能源阳江青洲六100万千瓦海上风电项目、中节能阳江南鹏岛30万千瓦海上风电项目、广东粤电外罗二期20万千瓦海上风电项目等众多重大工程项目。本成果已在广东海域、江苏海域、山东海域实现330kV及以下电压等级光纤复合海底电缆产业化，从2022年9月投运后，至今可靠运行。本项目研究的海缆技术门槛高，更新换代快，在海洋能源开发等领域扮演着至关重要的角色，但其发展和应用仍然存在一些局限性，特别是在材料耐久性、深海环境适应性等方面仍需进一步突破，主要包括以下两点：1）我国超高压电缆绝缘及半导电屏蔽材料的研制仍处于起步阶段，后续还需要和国内高校科研院所开展材料改性基础研究，为生产高性能超高压交直流海缆提供坚实技术基础。2）国内的海缆敷设单位，仅有近海敷设经验，为应对更复杂的深远海域挑战，后续还需同海缆敷设单位紧密合作，共同研发自主的深远海海缆敷设装备及技术。6．历年获奖情况：1）南海海缆有限公司、中天科技海缆股份有限公司完成的“海洋能源传输用超高压大截面光纤复合海底电缆系统研制及产业化”项目获广东省质量协会授予的2024年质量技术奖项目奖一等奖。2）南海海缆有限公司完成的“漂浮式海上风电用动态海缆技术研究及产业化”项目获中国机械工业联合会、中国机械工程学会授予的2024年机械工业科学技术奖科技进步二等奖。3）南海海缆有限公司完成的“海上能源开发用大长度超高压光电复合海底电缆研制与产业化”项目获中国电工技术学会授予的2023年度中国电工技术学会科学技术奖科技进步二等奖。4）南海海缆有限公司完成的“超深水重载设备动力传输及通信脐带缆研制”项目获中国电力企业联合会授予的2023年度电力科技创新奖二等奖。5）南海海缆有限公司完成的“海洋能源资源开发用动态海缆技术研究及产业化”项目获中国机械工业联合会、中国机械工程学会授予的2023年机械工业科学技术奖科技进步二等奖。6）南海海缆有限公司完成的“大长度三芯220kV及以下轻型低碳海底电缆技术研究及产业化”项目获中国机械工业联合会、中国机械工程学会授予的2022年机械工业科学技术奖科技进步三等奖。 |