

大型组块海上组装缓冲橡胶应用分析

李 明 刘静辰 刘登辉

中海石油（中国）有限公司天津分公司 天津 300000

摘 要：海上大型组块组装作业受复杂海域环境与钢结构刚性特性影响，拼装过程易出现结构挤压、磕碰损伤等问题。本文结合海上组块结构属性与拼装作业特点，系统分析海洋工况对组装施工的干扰机制，探究缓冲橡胶的力学性能、耐环境特性及吸能变形机理，梳理各类橡胶材料的现场布设形式与适配场景，结合施工工况提出材料选型、布设方案、老化防护及常态化管护的优化方式，可为海上组块组装柔性缓冲施工提供技术参考。

关键词：大型组块；海上组装；缓冲橡胶；材料特性；布设优化

引言

海洋工程大型组块多采用陆地预制、海上拼装的施工模式，钢结构自重偏大、刚性较强，对接拼装容错率较低。海域风浪、盐雾、水流等动态因素，会持续干扰组块对位精度，让刚性构件对接过程产生小幅碰撞与挤压，极易损伤构件端口与表层结构。传统刚性对接施工模式难以适配复杂海上工况，柔性缓冲技术成为优化组块施工的关键。通过探究缓冲橡胶的材料性能、作用机理与应用形式，完善海上组块组装缓冲防护施工体系，提升海上拼装施工的规范性与结构稳定性。

1 大型海上组块组装作业基础条件分析

1.1 海上大型组块整体结构属性

海上大型组块为海洋工程核心承重结构体，整体体量庞大，自重荷载数值较高，主体依托钢结构框架承担各类施工及运营荷载。内部集成设备支撑结构、承重桁架、连接基座等多样构件，整体刚度分布并不均匀。组块整体跨度大，外部轮廓形态不规则，表面分布各类凹凸构造与精准对接端口^[1]。不同位置钢结构构件厚度、用材存在差异，各区域承载性能存在差异。整体结构刚性充足，局部连接点位抗冲击性能偏弱，外力扰动作用下易出现应力集中现象。构件对接施工精度标准严格，对接位置容错空间较小，对组装施工平稳程度与操作规范程度有着较高要求。

1.2 海上组块拼装作业运行特点

海上组块拼装包含海上吊装、空间对位、结构贴合、节点固定等连续施工环节，各步骤有序衔接推进。吊装阶段构件悬空移动，作业速度平缓，对位阶段需要反复微调空间位置与倾斜角度。拼装施工对空间匹配精度要求较高，细微偏移都会改变构件对接贴合状态。现

场作业依赖大型海上吊装与辅助设备，构件自重与外形会限制施工操作范围。构件相互贴合对接时会产生刚性挤压，接触位置存在小幅碰撞与压力作用。施工过程需要人工配合设备完成微调校正，作业节奏舒缓，工序衔接紧凑，整体呈现重载、高精度的施工属性。

1.3 海上作业环境干扰因素构成

开放海域施工工况时刻处于动态变化状态，水文、气象条件持续波动。海浪往复起伏带动施工平台小幅摇摆，改变悬空组块的相对对接姿态。海面持续气流会对吊装构件形成侧向推力，干扰对位精准度。海域空气含盐组分高，长期潮湿环境会侵蚀钢结构表层，改变构件表面状态。光照强度、环境温度的实时波动，会影响现场设备运行与人工操作状态。多种环境因素相互叠加，增加构件对位偏差概率，提升结构磕碰、表层磨损的发生频次。

1.4 海上组块作业缓冲防护必要性

大型组块钢结构硬度大、刚性强，构件直接接触会产生高强度挤压作用。刚性接触状态下，对接端口易出现磨损、刮痕、微量形变等结构损伤。海域环境引发的平台晃动、构件偏移无法彻底规避，拼装阶段始终存在小幅碰撞与挤压工况。刚性对接模式无法分散瞬时接触压力，应力会集中于局部连接点位，损伤构件连接构造。缓冲材质可弱化刚性接触作用，逐步消解对接产生的挤压荷载。缓冲结构布置于对接接触面，能够抵消拼装过程的小幅扰动，保护构件端口与表层结构，维持钢结构原始形态。

2 海上组块适配型缓冲橡胶材料与结构属性

2.1 缓冲橡胶常规结构分类

适配海上施工场景的缓冲橡胶依据整体构造形式分为多种类型。实心块状橡胶内部结构密实，无中空腔

体,构造简单且成型便捷,能够承受均匀挤压荷载,适用于常规平面对接位置。中空环状橡胶预留内部空腔,受压后可产生较大形变幅度,拥有充足的形变余量,适用于各类异形对接接触面。层叠式缓冲橡胶由多层橡胶基体复合加工而成,层状构造提升整体韧性,让荷载传递更加平缓,可承受反复挤压作用^[2]。异形定制橡胶根据组块对接端口的实际轮廓加工成型,匹配各类不规则接触界面形态,适配海上各类组块施工场景。

2.2 缓冲橡胶材料物理力学属性

缓冲橡胶拥有良好的弹性形变特征,外力作用下可以自主产生形变抵消外部荷载,外力消失后可快速回弹复原。材料硬度设置合理,接触钢结构表面不会产生硬性划痕,可承接组装过程中产生的瞬时冲击。材料拉伸、抗撕裂性能表现稳定,反复挤压形变的状态下不会出现开裂、破损现象。自身韧性可以承接瞬时集中荷载,逐步分解接触位置产生的挤压应力。压缩形变参数贴合海上重载对接工况,形变过程均匀平缓,力学状态始终保持稳定。

2.3 海洋环境下橡胶材料耐受属性

海洋施工区域常年伴随盐雾侵蚀、高湿浸泡、气温波动等外界影响。专用缓冲橡胶表层抗腐蚀能力突出,可耐受3.5%盐度的盐雾介质侵蚀,介质难以渗入内部破坏基体结构。材料致密性较强,水汽不易渗透,高湿环境中不会出现膨胀、软化现象。耐温性能适配海域气候特点,可稳定适配-20℃~50℃海域温度区间,高温环境维持固有形态,低温环境不会发生脆裂、硬化问题。内部分子结构排布稳定,长期处于复杂海域环境中,材质基础性能不会出现明显变化。

2.4 缓冲橡胶形变与吸能作用机理

海上组块组块作业产生的接触荷载作用于橡胶表层,材料内部高分子结构受迫挤压收缩。外部荷载推动橡胶整体形变,扩大结构接触范围,分散局部集中应力。形变过程持续消耗对接碰撞产生的动能,降低钢结构接触面瞬时受力强度。冲击荷载持续作用阶段,橡胶通过渐进式形变消解挤压作用,削减刚性接触带来的结构损伤。外部荷载脱离后,材料弹性特质驱动结构回弹,恢复初始形态,可重复参与后续组块对接作业。

3 缓冲橡胶在海上组块组装中的应用形式

3.1 组块对接拼装界面缓冲布置

海上组块对接拼装的核心接触位置集中在端口拼接界面,也是组装过程碰撞与挤压作用的主要发生区域。缓冲橡胶可直接铺设于两组块对接端口的接触端面,

覆盖钢结构硬性接触区域。平整块状橡胶厚度常规选用30~40mm,适用于规则矩形、平面型对接界面,整体铺设均匀规整,能够均匀承接拼装过程产生的挤压荷载。异形橡胶构件可适配弧度、折角等特殊端口结构,填补不规则界面的接触空隙。橡胶构件固定于对接端面后,可隔绝钢结构之间的直接接触,阻断拼装对位阶段的硬性磕碰。端口缓冲布置模式适配各类主次结构对接施工,覆盖海上组块绝大部分拼装工况,为精准对位提供稳定的接触条件^[3]。

3.2 组块支撑接触面缓冲布置方式

海上组块完成吊装就位前,需要依托底部支撑结构承担整体自重,维持拼装阶段的结构稳定。钢结构支座与组块底板直接接触,重压作用下会出现局部应力集中,引发板面压痕、表层锈蚀脱落以及结构微形变等问题。缓冲橡胶垫层铺设在各类支撑接触界面,构建柔性承压防护层。大吨位核心支撑点位选用高密度加厚橡胶板材,抵御长时间静态压力,控制压缩变形量。次要辅助支撑位置选用常规厚度橡胶材料,弱化刚性接触产生的摩擦挤压。橡胶材质受压状态下形变均匀,能够重新分配支撑界面的受力点位,改善局部受力过载的情况。柔性布置方式可以优化支撑体系的受力状态,规避重载静置阶段对组块底板结构的硬性损伤,维持钢结构表面原始结构状态。

3.3 浮动拼装姿态微调缓冲适配

海上施工环境存在持续的海面波动,吊装悬空的组块会产生不定向的小幅晃动,拼装对位始终处于动态浮动的施工状态。施工人员配合吊装设备调整组块空间角度与水平位置,整个调整过程存在持续性的位置偏移与角度偏差。缓冲橡胶拥有充足的弹性形变余量,能够容纳姿态微调过程产生的微量错位。橡胶表层具备稳定的摩擦系数,可提升接触界面的阻滞效果,减少位移调整过程出现的滑移问题。姿态校正过程产生的轻微顶抵与挤压作用,会通过橡胶渐进式形变完成消解,阻断钢结构硬性顶卡引发的端口变形。橡胶布置不会限制组块的正常调整空间,只对动态拼装产生的冲击荷载进行弱化,适配海域环境下非常规静态拼装的施工工况。

3.4 组块限位结构辅助缓冲布置

海上组块组块施工会配套设置限位卡槽、定位挡板、竖向止挡等约束结构,用于限制拼装阶段的水平偏移与竖向跳动。海域扰动带来的结构晃动,会让限位接触位置反复产生挤压、磕碰与摩擦。缓冲橡胶构件布置在各类限位结构的内侧接触区域,形成封闭式柔性防护界面。橡胶材料填充限位结构与组块主体之间的预留缝隙,缩减结构晃动产生的活动空间。柔性材质可以消解

往复运动产生的接触荷载,降低限位结构与组块钢结构的磨损程度。不同尺寸的限位卡槽与止挡结构,可搭配对应规格的橡胶垫块、橡胶条完成适配安装。这类布设模式能够稳定组块拼装过程的空间位置,减少动态晃动引发的结构损伤,优化海上组块组装的约束施工条件。

4 海上组块组装缓冲橡胶应用优化体系

4.1 缓冲橡胶布设方案优化思路

海上组块组装的缓冲橡胶布设,需要依托拼装点位的受力特征与结构形态开展精细化调整。常规统一化布设模式难以适配不同对接位置的荷载强度与接触形式,容易造成部分区域材料冗余、部分区域防护不足的问题。布设优化工作围绕组块对接点位、支撑点位、限位点位等不同功能区域展开,区分动态拼装与静态承压的施工差异。动态对接区域侧重预留充足形变空间,应对海上拼装过程的微量偏移与角度偏差。静态支撑区域侧重提升整体承压面积,分散集中荷载,降低局部形变幅度。布设过程结合钢结构端口轮廓、接触面积、受力方向调整橡胶构件的尺寸、厚度与布置密度^[4]。摒弃固定布设模板,根据单一组块拼装工况调整布置形式,让缓冲结构适配现场实际施工状态。

4.2 组装工况下橡胶选型适配方式

不同海上组装工况对缓冲橡胶的材质硬度、厚度、结构形式存在差异化要求。重载支撑点位需要选用 65~75HA 高硬度、40~50mm 厚体型橡胶材料,材质内部结构密实,可长期承受静态重压作用,不易出现永久形变。轻载动态对接位置可选用 55~65HA 中等硬度的柔性橡胶,依靠自身形变能力消解拼装冲击,规避钢结构硬性卡顿。异形端口拼装场景适配定制化异形橡胶构件,依靠特殊结构形态匹配不规则接触界面,填补拼装间隙。频繁微调的浮动拼装工况优先选用摩擦系数适中、回弹率 $\geq 85\%$ 的优异橡胶材质,减少界面滑移现象。依据施工荷载大小、接触形式、作业频次划分选型标准,建立分层分类的材料选用逻辑,规避选型不当引发的防护失效问题。

4.3 海洋环境橡胶老化防护手段

海洋海域存在盐雾侵蚀、高湿浸泡、温度波动等多重腐蚀条件,会加速橡胶材料老化衰变。针对海域环境特性,可在橡胶表层设置专用防护涂层,阻隔盐雾、水汽与橡胶基体的直接接触,削弱介质渗透带来的材质损伤。施工摆放阶段可采用隔离铺垫方式,减少橡胶构件

与海水、潮湿基面的直接接触,控制吸水膨胀与表层腐蚀的发生。作业间隙及时清理橡胶表层附着的盐渍、污物,避免杂质长期堆积腐蚀表层结构。根据海域温度变化调整橡胶使用场景,高温强光环境减少橡胶构件的露天裸露时长,延缓材质硬化、开裂等老化现象,维持橡胶材料稳定的力学性能。

4.4 缓冲橡胶常态化管护更新模式

缓冲橡胶长期参与海上组块作业,反复形变、环境侵蚀都会造成材料性能衰减。日常管护工作聚焦橡胶构件外观状态与形变性能,检查表层开裂、磨损、硬化等损伤情况,记录构件形变回弹的变化程度。组块作业前对布设橡胶构件进行状态排查,确认结构完整、性能稳定后方可投入施工。作业结束后集中收纳可重复利用的橡胶构件,放置于干燥通风的专用存放区域,降低环境侵蚀影响。结合构件使用频次与损伤程度制定更换标准,磨损超标、回弹失效、结构破损的橡胶构件及时替换。建立动态的轮换使用机制,把控缓冲材料的工作状态,保障每一次组块组装作业的缓冲防护效果。

结束语

海上组块组装施工的动态干扰与刚性接触隐患,是影响钢结构拼装质量的主要因素。缓冲橡胶凭借优良的弹性形变与吸能特性,可以适配对接、支撑、限位等多种施工场景,有效弱化钢结构硬性接触带来的结构损伤。通过科学的布设优化、材料选型和环境防护手段,能够持续保障缓冲橡胶的防护性能。规范常态化管护与更新机制,可稳定海上组块组装施工条件,持续完善海洋工程钢结构拼装的柔性防护体系。

参考文献

- [1] 孙华峰,方鑫,赵海,等.大型组块海上组装缓冲橡胶应用分析[J].石油和化工设备,2025,28(11):83-90,100.
- [2] 马美琴,杨寅泽,柯俊.桩腿耦合装置内纵向橡胶缓冲件的疲劳性能的有限元分析[J].橡胶工业,2024,71(12):945-951.
- [3] 岳新智,韩志伟,缪维跑,等.分形结构橡胶、泡沫铝海上风力机防护装置性能研究[J].太阳能学报,2023,44(5):320-327.
- [4] 岳新智,韩志伟,李春,等.海上风力机橡胶及泡沫铝材料防护装置性能研究[J].热能动力工程,2022,37(5):115-123.