

海洋工程结构设计中的材料选择与应用

张祖庆

天津天蓝海洋工程有限公司 天津 300450

摘要：海洋工程结构设计面临复杂多变的海洋环境，材料选择至关重要。本文综述了海洋工程材料的基本要求，包括高承载能力、强耐腐蚀性、良好的工艺性能和经济效益。传统金属材料、无机非金属材料及高分子材料广泛应用，而高性能混凝土、纤维增强复合材料、形状记忆合金及新型防腐涂料等新型材料亦崭露头角，显著提升了结构的安全性和稳定性。合理选材与应用，对保障海洋工程质量和降低成本具有重大意义。

关键词：海洋工程结构设计；材料选择；应用

引言：在海洋工程结构设计中，材料的选择与应用是决定结构安全性、稳定性和经济性的关键因素。海洋环境的复杂性对材料性能提出了严峻挑战，要求材料必须具备高强度、耐腐蚀、易于加工及成本效益高等特点。本文旨在探讨海洋工程结构设计中材料的选择原则、传统材料的应用以及新型材料的发展，以为海洋工程材料的选择与应用提供理论依据和实践指导，推动海洋工程领域的持续发展。

1 海洋工程结构设计中材料的基本要求

1.1 承载能力

在海洋工程结构设计中，材料的承载能力至关重要。海洋环境复杂多变，结构需要承受巨大的水压、风浪冲击、海冰撞击以及长期疲劳载荷。因此，材料必须具备足够的结构强度，以应对这些极端条件。高强度钢材是海洋工程结构中的常用材料，如DH40钢板。这种材料经过特殊的热处理工艺，具有优异的抗拉强度和屈服强度，能够承受巨大的外力作用而不发生塑性变形或断裂。在海上石油钻井平台、大型船舶、海上风电塔架等关键结构中，DH40钢板等高强度材料的应用广泛，确保了结构的安全性和稳定性。

1.2 耐腐蚀性

海洋环境富含盐分和氯离子，对材料的腐蚀作用显著。因此，材料的耐腐蚀性也是海洋工程结构设计中的关键要求。海水中的氯离子对普通钢材的腐蚀尤为严重，会导致钢材表面出现锈蚀、穿孔等现象，严重影响结构的耐久性。为了解决这个问题，科研人员开发了高性能混凝土（HPC）和新型防腐涂料等新型材料。高性能混凝土（HPC）具有高强度、高耐久性和良好的抗渗性能，能够有效抵抗海水的侵蚀和氯离子的渗透。在海洋工程中，HPC被广泛应用于桥梁、隧道、防波堤等结构的建造中，显著提高了结构的耐久性^[1]。此外，新型防

腐涂料也是提高材料耐腐蚀性的重要手段。这些涂料通常具有优异的防腐性能和耐候性能，能够在恶劣的海洋环境下长期保护结构不受腐蚀的侵害。

1.3 工艺性能

海洋工程结构的设计不仅要求材料具备优异的物理和化学性能，还要求材料具有良好的工艺性能。这包括材料的可加工性、焊接性以及与其他材料的兼容性等。可加工性是指材料在加工过程中易于切割、弯曲、成型等。良好的可加工性可以提高生产效率，降低制造成本。焊接性是材料在焊接过程中能否形成牢固的焊缝，以及焊缝的性能是否满足要求。在海洋工程中，许多结构都是通过焊接连接而成的，因此材料的焊接性至关重要。不同材料的加工特性和工艺要求各不相同。例如，高强度钢材在焊接时容易出现裂纹和变形等问题，因此需要采取特殊的焊接工艺和热处理措施来确保焊缝的质量。

1.4 经济效益

在海洋工程结构设计中，经济效益也是一个不可忽视的要求。材料成本是海洋工程总成本的重要组成部分，因此选择性价比高的材料对于降低工程成本具有重要意义。在保证材料性能的前提下，降低材料成本可以通过多种途径实现。例如，采用新型材料替代传统材料，优化材料设计以减少材料用量，以及提高材料的利用率等。此外，还需要考虑材料的生命周期成本。虽然某些材料在初始购买时成本较低，但可能在使用过程中需要频繁的维护和更换，导致总成本上升。因此，在选择材料时，需要综合考虑其初始成本、维护成本和更换成本等因素。

2 海洋工程结构设计中传统材料及其应用

2.1 金属材料

(1) 低碳钢和低合金钢在大型结构中的应用。低碳钢因其良好的焊接性、韧性和加工性，在海洋工程结构

设计中被广泛采用。特别是在大型结构如海洋平台、船舶船体等方面,低碳钢以其较低的成本和适中的性能成为首选材料。然而,单纯的低碳钢在强腐蚀性的海洋环境中易受到侵蚀,因此,低合金钢的出现进一步提升了材料在海洋工程中的适用性。低合金钢通过添加少量的合金元素(如铬、镍、钼等),显著提高了钢的强度、硬度和耐腐蚀性。这种材料不仅广泛应用于船舶制造中,还成为海洋石油开采平台、海底管道和海洋桥梁等大型结构的首选材料。例如,低合金钢在海洋平台的建设中能够抵御海水的侵蚀、海洋风暴的袭击以及高温高压的作业环境,确保平台的安全运行^[2]。(2)钛合金、镍基合金在高腐蚀环境下的应用。钛合金以其高强度、低密度、优异的耐蚀性和生物相容性,在海洋工程高腐蚀环境下展现出独特优势。钛合金的钝化性能使其在海水中能迅速生成一层稳定的氧化膜,有效抵御海水的腐蚀。因此,钛合金常被用于制造深海探测器、潜水器的外壳和部件,以及海底电缆等。镍基合金同样具有良好的耐蚀性和高温性能,特别适用于海洋环境中的高温、高压和强腐蚀性条件。镍基合金不仅能在盐酸、硫酸等强酸环境中保持稳定,还能在熔融碱、海水等恶劣环境中表现优异。在海洋工程中,镍基合金常被用于制造海洋化工设备、海水淡化装置和海底热液喷发口附近的探测设备等。

2.2 无机非金属材料

(1)水泥、玻璃等材料的特性和用途。水泥作为传统无机非金属材料,在海洋工程中发挥着重要作用。特别是在海洋桩基施工、海底隧道建设等方面,水泥凭借其良好的抗压强度、抗侵蚀性能和迅速凝固的特性,成为不可或缺的材料。通过水泥灌浆等技术,可以稳固地将桩基连接至水下地基,确保工程结构的稳定性和安全性。玻璃在海洋工程中的应用主要集中在潜水器的观察窗、耐压壳等方面。随着技术的进步,全玻璃耐压壳的研制成为可能,这种材料不仅透明度高、重量轻,还能承受深海的高水压。此外,玻璃还被用于制造海底光学设备、海底通信设备等。(2)绝缘材料和隔热材料在海洋工程中的应用。在海洋工程中,绝缘材料和隔热材料的应用至关重要。这些材料能够保护电线电缆、管道和设备免受海洋环境的侵蚀和温度波动的影响。例如,聚氨酯泡沫、硅橡胶等绝缘材料被广泛用于海底电缆的绝缘保护;而聚氨酯、聚丙烯等隔热材料则被广泛用于海底管道的保温隔热。这些材料的应用不仅提高了工程结构的耐久性,还确保了设备的安全运行。

2.3 高分子材料

(1)工程塑料在海洋工程中的快速发展。工程塑料以其轻质、高强、耐腐蚀和易加工等特点,在海洋工程中得到了快速发展。常见的工程塑料包括聚四氟乙烯(PTFE)、聚酰亚胺(PI)、聚苯硫醚(PPS)等。这些材料不仅被用于制造海洋平台的支撑结构、船舶的上层建筑和部件等,还被广泛应用于海洋化工设备、海水淡化装置等领域。工程塑料的应用不仅减轻了结构重量,提高了航行性能和使用寿命,还降低了材料成本和维护费用。(2)高分子材料在船舶制造中的实际应用案例。在船舶制造中,高分子材料的应用案例比比皆是。例如,纤维增强聚合物(FRP)已成为制造游艇、小型渔船和海洋工作船的主要材料之一。这种材料不仅具有轻质、高强和耐腐蚀的特性,还能根据需要进行定制设计,满足船舶的特殊需求。此外,高性能的树脂基材料也被广泛应用于船舶推进器、螺旋桨等部件的制造中。这些材料的应用不仅提高了船舶的航行速度和稳定性,还延长了部件的使用寿命。

3 海洋工程结构设计中新型材料选择及其应用

3.1 高性能混凝土(HPC)

(1)高性能混凝土的特性和优势。高性能混凝土(HPC)以其卓越的性能成为工程师们的优选材料。它具有高强度、高耐久性、高工作性和高体积稳定性等特点。与普通混凝土相比,HPC具有更高的强度和耐久性,能够有效抵抗裂缝和渗透,从而提高结构的承载能力和使用寿命。此外,HPC还具有良好的施工性能,能够满足复杂施工条件下的要求。(2)在海洋平台和桥梁结构中的应用实例。在海洋平台的设计中,HPC的应用显著提升了结构的稳定性和安全性。例如,在大型跨海大桥的桥墩和承台中,使用HPC可以减少截面尺寸和配筋量,从而降低工程成本。同时,HPC的耐久性使得桥梁在恶劣的海洋环境中能够长期保持结构完整性,减少维护成本^[3]。此外,在海洋平台的建造中,HPC被用于制造关键的结构部件,如桩基础、导管架和上部结构。这些部件需要承受巨大的风浪和海流荷载,而HPC的高强度和耐久性使得平台能够在极端环境下保持稳定和安全。

3.2 纤维增强复合材料(FRP)

(1)碳纤维增强复合材料(CFRP)和玻璃纤维增强复合材料(GFRP)的特性。纤维增强复合材料(FRP)以其高强度、轻质量、耐腐蚀和良好的疲劳性能而著称。碳纤维增强复合材料(CFRP)和玻璃纤维增强复合材料(GFRP)是两种常用的FRP材料。CFRP具有极高的强度和模量,以及优异的耐腐蚀性和疲劳性能。这使得CFRP在需要承受高应力和腐蚀环境的海洋结构中表现出

色。GFRP则具有较好的韧性和抗冲击性能,适用于需要承受动态荷载和碰撞的场合。(2)FRP材料在海洋结构中的轻量化应用。FRP材料在海洋工程中的轻量化应用主要体现在船舶制造和海洋平台结构中。在船舶制造中,使用GFRP和CFRP可以显著减轻船体重量,提高航行速度和燃油效率。同时,FRP材料的耐腐蚀性能使得船舶在恶劣的海洋环境中能够长期保持结构完整性。在海洋平台的设计中,FRP材料被用于制造平台的非承重结构和辅助设备^[4]。例如,使用GFRP制造平台的围栏、梯子和管道支架等,不仅减轻了平台重量,还提高了其抗腐蚀性和耐久性。CFRP则因其高强度和轻质特性,被用于加强平台的承重结构,如加固导管架和增强梁板连接等,以提高整体结构的承载能力和抗震性能。

3.3 形状记忆合金(SMA)

(1)SMA的特殊性能和潜在应用价值。形状记忆合金(SMA)是一种具有独特形状记忆效应和超弹性性能的新型材料。它在受热或受外力作用时能够发生可逆的形状变化,同时表现出优异的力学性能和耐腐蚀性能。SMA的特殊性能使其在海洋工程结构中具有广泛的应用潜力,尤其是在需要自适应调节和抗震减振的场合。

(2)在海洋管道连接和减震系统中的应用。在海洋管道连接中,SMA可以用于制造自适应管道接头。当管道受到温度变化或外力作用时,SMA接头能够自动调整形状,保持管道的紧密连接和稳定传输。这不仅可以减少管道泄漏的风险,还可以提高管道的适应性和耐久性。在海洋结构的减震系统中,SMA可以应用于制造智能减震装置。当结构受到地震或风浪等外力作用时,SMA减震装置能够利用形状记忆效应和超弹性性能吸收和耗散振动能量,从而减少结构的振动和损伤。这种智能减震装置在提升海洋工程结构的安全性和稳定性方面具有显著优势。

3.4 新型防腐涂料

(1)水性防腐涂料和纳米防腐涂料的特性。随着环保意识的提高和技术的进步,水性防腐涂料和纳米防腐涂料在海洋工程结构中的应用日益广泛。水性防腐涂料以水为溶剂,具有无毒、无害、环保等优点。同时,通过添加高性能的防腐添加剂和缓蚀剂,水性防腐涂料能

够在金属表面形成一层致密的保护膜,有效阻止腐蚀介质的侵入和破坏。纳米防腐涂料则利用纳米技术将防腐物质纳米化,使其能够更深入地渗透到金属表面的微孔和裂纹中,提高涂层的附着力和致密性,从而增强防腐效果。(2)在海洋工程结构中的防腐应用。新型防腐涂料在海洋工程结构中的应用主要体现在以下几个方面:一是用于船舶和海洋平台的防腐涂装。通过涂覆一层或多层水性防腐涂料或纳米防腐涂料,可以显著提高金属表面的防腐性能,延长船舶和海洋平台的使用寿命。二是用于海洋管道的防腐保护。在海洋管道的外壁和内壁涂覆水性防腐涂料或纳米防腐涂料,可以形成一层坚韧的防腐层,有效抵御海水、盐雾和微生物等腐蚀因素的侵蚀,确保管道的安全运行。三是用于海洋工程结构中的钢结构防腐。钢结构是海洋工程结构中的重要组成部分,其防腐性能直接关系到整个结构的稳定性和安全性。使用新型防腐涂料对钢结构进行涂装处理,可以显著降低钢结构的腐蚀速率,延长其使用寿命,降低维护成本。

结束语

综上所述,海洋工程结构设计中的材料选择与应用是一项系统工程,需综合考虑材料的物理性能、化学稳定性、工艺特性和经济成本。传统材料在满足基本需求的同时,新型材料的不断涌现为海洋工程带来了革命性的变革。未来,随着材料科学的不断进步和海洋工程技术的持续发展,将推动更多高性能、环保型材料在海洋工程中的广泛应用,为实现海洋强国的战略目标提供有力支撑。

参考文献

- [1]赵宝华,王维.海洋环境对海洋工程结构设计的影响[J].海洋工程,2020,(05):34-41.
- [2]顾志成.新型建筑材料在建筑工程结构设计中的应用分析[J].陶瓷,2022,(07):67-68.
- [3]郭婧.建筑工程结构设计中新型建筑材料的应用分析[J].砖瓦,2020,(06):52-53.
- [4]张鑫,周光禹,高蕉.新型建筑材料在建筑工程结构设计中的应用[J].智能建筑与工程机械,2022,(03):29-30.