

预应力结构技术的应用及发展

陆 文

民航机场规划设计研究总院有限公司 北京 100101

摘 要：预应力结构技术是现代土木工程中的一项技术，它通过在混凝土或钢构件中引入预先计算的应力，以改善结构的力学性能和经济效益。本文综述了预应力技术的发展背景、基本原理和应用，并探讨了其未来的发展方向。预应力技术的引入显著提高了桥梁、高层建筑、地下结构和特殊条件下工程结构的性能。

关键词：预应力结构技术；应用；发展

随着现代建筑业的快速发展，对结构设计的要求越来越高，特别是在承载能力、耐久性以及材料利用效率方面。预应力结构技术应运而生，为工程师提供了一种有效的解决方案。这种技术不仅能够提前引入应力以抵抗未来荷载，还能够优化结构设计，减少材料用量，降低维护成本。从20世纪初的尝试到现在，预应力技术已经广泛应用于多种类型的结构中，成为现代土木工程不可或缺的一部分。

一、预应力技术的基本原理与方法

1. 预应力的概念与原理

预应力技术是一种通过预先引入应力来改善结构性能的方法。在无荷载作用下，提前对构件施加拉力，使材料（通常是钢材或混凝土）产生一定的预压应力。这一过程通常被称为“预张拉”或“预紧张”。当构件在实际使用中承受外部荷载时，这些预压应力可以抵消部分由荷载引起的拉应力，从而减少或消除裂缝的产生，提高结构的承载能力和刚性，延长其使用寿命。预应力的作用还能使构件在承受反复荷载作用时保持较好的疲劳性能，并且可以减小构件截面尺寸，节省材料，降低结构自重。

2. 预应力的分类

预应力技术按施加预应力的方式可分为两大类：预张法和后张法。预张法是在浇筑混凝土之前先对钢筋进行张拉，然后浇筑混凝土，待混凝土达到一定强度后释放钢筋的张力，使混凝土获得预压应力。这种方法多用于预制构件的生产，如预应力空心楼板、梁、柱等。后张法则是在混凝土硬化后的构件上钻孔，插入预应力筋（通常是高强度钢筋或钢绞线），然后通过张拉设备对筋进行拉伸，并在张拉端用锚具将筋固定，从而在混凝土内产生预压应力。后张法适用于现场浇筑或工厂预制的

大型构件和结构，如桥梁、大跨度屋架等。除了传统的预张法和后张法之外，还有体外预应力和体内预应力之分。体内预应力是指预应力筋布置在构件内部，而体外预应力则是指预应力筋布置在构件外部，但两者均能够达到施加预应力的目的。体外预应力便于检查和维护预应力筋，但需采取措施保护预应力筋免受环境影响。体内预应力则将预应力筋隐藏于构件内部，有利于结构耐久性，但一旦需要维修则比较困难^[1]。

二、预应力结构技术工艺

1. 预应力筋制作

预应力筋的制作是预应力施工过程中的关键步骤之一，它直接影响到预应力效果的优劣和结构的安全性。预应力筋通常由高强钢丝、钢绞线或钢筋组成，这些材料需要符合相应的质量标准和强度要求。在制作过程中，预应力筋需要进行拉伸、切割和弯曲等工序，以达到设计的尺寸和形状。此外，预应力筋的表面应进行适当的处理，如除锈、涂油等，以减少与混凝土或其他材料的摩擦，确保张拉时的顺畅性和耐久性。为了实现精确的预应力效果，预应力筋的制作过程还需要严格的质量控制和检测，包括尺寸精度、力学性能和表面质量等方面。

2. 预应力筋孔道成形

在混凝土结构中预留或形成孔道，以便预应力筋能够顺利穿过，是预应力技术的另一个重要环节。孔道的形成可以采用多种方法，如波纹管、钢管或塑料管等。孔道的形状、尺寸和位置需要根据设计要求精确控制，以确保预应力筋的正确位置和张拉效果。在孔道成形过程中，还需要采取措施防止孔道变形或堵塞，以免影响后续的张拉作业。孔道的质量直接关系到预应力筋的安装和张拉效果，因此对孔道的质量控制也至关重要^[2]。

3. 预应力筋张拉

预应力筋的张拉是实现预应力效果的核心环节。张拉过程需要使用专门的张拉设备，如千斤顶和张拉机等，对预应力筋进行拉伸至设计的预应力水平。在张拉过程中，需要严格控制张拉力的大小和分布，避免过度张拉或不均匀张拉导致的结构损伤。同时，还需要监测预应力筋的伸长量和锚固端的位移，以确保张拉效果符合设计要求。张拉过程中的力的控制和监测是非常重要的，因为它直接决定了预应力筋在结构中的作用效果。

4. 锚固

锚固是预应力结构技术中至关重要的环节，它涉及到将预应力筋牢牢固定在混凝土结构中，以保持预应力状态。锚固系统通常由锚具、垫板、锚固板等组件构成，这些部件需要具有极高的承载能力和良好的耐久性。在锚固过程中，首先需要将预应力筋按照设计要求张拉到预定力度，然后利用锚具将其锁定。锚具的选择和安装对预应力效果和结构的安全至关重要。锚具需要具有足够的强度和稳定性，以承受预应力筋的强大张力。在锚固过程中，需要注意锚具的安装位置和方向，确保预应力筋的张力能够有效传递到结构中。此外，锚具的防腐处理也不容忽视，以保证长期的结构安全^[3]。

5. 孔道灌浆

在预应力筋张拉到位并安装好锚具后，进行孔道灌浆。灌浆材料通常采用水泥浆或者添加了特殊外加剂的高性能灌浆料，这些灌浆料应具有良好的流动性、稳定性、强度和体积收缩小等特性。在进行灌浆之前，需要对孔道进行彻底清洁，检查是否有破损之处，保证孔道的完整性，同时湿润孔道内壁以促进更好的粘结。灌浆过程中，使用专用的灌浆设备从孔道的一端注入水泥浆，直到从另一端看到水泥浆流出为止。为了确保灌浆密实，有时还需要在压力下进行灌浆。在大型或长距离的孔道中，可能需要在孔道中设置排气孔或使用波形管来帮助空气和多余的水分排出。灌浆完成后，需要对灌浆部位进行养护，以确保水泥浆的正确硬化。孔道灌浆的质量对预应力结构的性能有着直接的影响。如果灌浆不充分或者存在空隙，可能会导致预应力筋的腐蚀，影响结构的耐久性和可靠性。因此，在施工过程中要严格遵守质量控制标准，确保灌浆材料的质量和灌浆过程的严密性。

三、预应力技术在特定结构中的应用分析

1. 桥梁工程

预应力技术在桥梁工程中应用广泛，其目的是通过

提前引入应力来改善结构的使用性能和承载能力。在现代桥梁建设中，无论是简支梁桥、连续梁桥还是斜拉桥与悬索桥，预应力技术都发挥着至关重要的作用。对于简支梁桥，预应力技术可以显著降低梁的挠度，减小裂缝宽度，从而提高桥梁的整体刚度和耐久性。例如，在高速公路跨线桥的设计中，采用后张法预应力混凝土简支梁能有效减少梁体下挠，延长桥梁使用寿命。连续梁桥利用预应力技术可以实现长跨度设计而无需中间支撑，这样不仅美观而且减少了基础工程量。一个典型的案例是预应力混凝土连续梁在城市轨道交通高架桥中的应用，它能够有效承受列车运行时产生的动态荷载。斜拉桥和悬索桥则借助预应力技术优化主塔和主梁的受力状态。如著名的苏通长江大桥就采用了预应力技术，确保了主塔的稳定性和桥梁整体的安全可靠^[4]。

2. 高层建筑与大跨度结构

在高层建筑和大跨度结构中，预应力技术主要用于提高结构的抗裂性和抗变形能力，以适应更大的荷载和跨度需求。高层建筑中的预应力框架结构能够提供较大的柱网间距和开间尺寸，同时保证了建筑的整体稳定性。比如，在超高层建筑中应用预应力技术可以显著降低楼层层间位移，增强建筑物对风载和地震力的抵抗能力。在大跨度结构设计中，预应力技术可用于无柱帽的连续梁或桁架结构，以实现室内空间的灵活布局和视觉美感。此外，通过施加预应力，可以减轻结构自重、降低材料消耗，进而降低整体建造成本。

3. 地下结构与隧道工程

预应力技术在地下结构和隧道工程中主要用来提高结构的承载力和抗裂性能，特别是在不良地质条件下或设计要求较高的场合。地下结构如地下室、地铁站、隧道等，由于受到地下水、地质条件和周边环境的影响，对结构的强度和稳定性要求非常高。在地下结构中，预应力锚杆（索）技术被广泛应用于加固边坡、挡土墙以及地下连续墙等。例如，在城市地铁站建设中，为了抵抗土壤压力和地下水压力，经常使用预应力锚固技术来增强地下连续墙的稳定性和抗变形能力。通过施加预应力，可以有效控制墙体的变形和裂缝发展。在隧道工程中，尤其是在软弱围岩或高地应力区域，采用预应力支护系统能够及时提供围岩支撑力，减少围岩松弛和收敛，保证施工安全。

4. 特殊条件下的预应力结构应用

在极端环境或特殊功能要求的工程项目中，预应力技术同样发挥着重要作用。例如，在抗震设计中，通过

施加预应力,可以显著提高结构的延性和耗能能力,使其在地震作用下具有更好的破坏模式和抗震性能。在海洋平台、港口及码头工程中,由于长期受到波浪、潮流和盐蚀等自然环境因素的影响,预应力技术用于提高混凝土结构的耐久性和可靠性。例如,跨海大桥通常采用预应力混凝土桥面板,以适应潮汐变化和海水腐蚀。在核能和化工容器结构中,预应力混凝土以其优异的密封性和整体性,成为防止辐射泄漏和化学泄露的重要屏障。在这些领域,预应力技术不仅提高了结构的安全系数,还确保了环境保护和工人安全。此外,在道路与机场跑道工程中,预应力混凝土板被广泛用于跑道和路面的建设,它们能够承受重载和高频的飞机起降或车辆行驶的压力,同时减少维护成本和延长使用寿命^[5]。

四、预应力技术面临的未来展望

1. 高性能材料的研发需求

面向未来,预应力技术的核心在于不断提高材料的强度和性能,减少结构物的尺寸,从而设计出更加轻便、经济和美观的工程结构。高性能材料如高强钢丝、碳纤维、玻璃纤维等的研发将使得预应力技术在承载力、耐久性、抗腐蚀性等方面得到显著提升。例如,碳纳米管增强混凝土(CNT-reinforced concrete)等新型复合材料的研究正在进行中,它们具有更高的弹性模量和抗拉强度,预计将成为未来预应力混凝土的主要材料。同时,随着3D打印技术的发展,对特定形状和性能要求的定制化预应力构件的制造将成为可能。这些新材料的开发不仅可以提高结构的性能,还可以降低建设和维护成本。

2. 可持续发展与预应力技术的结合

可持续发展是当今世界的重要议题,而建筑行业是实现可持续发展的关键环节。未来预应力技术必须结合绿色建筑的理念,采用节能、环保的材料和工艺,减少施工过程中的能耗和碳排放。例如,使用再生材料或可回收材料进行预应力构件的制作,以及优化张拉工艺来减少能量消耗。此外,结合太阳能、风能等可再生能源技术,开发主动预应力系统,以实现结构性能的动态调整和能源的自给自足。通过这种方式,预应力技术不仅能够实现结构功能的最优化,还能够促进整个生命周期的环境可持续性^[6]。

3. 智能化与信息化技术的融合前景

智能化与信息化是现代工程技术发展的另一大趋势。

未来预应力技术将与传感器、物联网、大数据分析等技术深度融合,实现结构健康监测和性能评估的智能化。通过植入智能传感器,实时监控预应力筋束的张力、结构变形、裂缝发展等关键参数,利用云计算和机器学习技术对数据进行分析处理,预测和预警潜在的安全问题。此外,基于数字孪生(Digital Twin)的概念,创建虚拟的预应力结构模型,模拟实际结构的受力状态和环境作用,为维护管理提供决策支持。智能化与信息化将推动预应力技术向更高级别的自动化、精准化发展,极大地提高结构的安全性和经济性。

结语

经过几十年的发展,预应力结构技术已经成为提高结构性能的重要手段之一。无论是在桥梁工程、高层建筑、地下空间还是特殊环境条件下,预应力技术都展现出了其独特的优势。然而,随着工程需求的不断提升和技术环境的持续变化,预应力技术仍然面临着新的挑战 and 机遇。未来,预应力技术的发展将更加注重材料科学的进步、施工技术的自动化与智能化、以及环境友好型设计理念的融入。同时,对于预应力结构的长期性能监测和维护策略也是未来研究的重点。通过不断的技术创新和应用实践,预应力结构技术有望为土木工程带来更多的突破,为人类建造更安全、更经济、更可持续的工程结构。

参考文献

- [1] 龙帅.体外预应力加固技术在桥梁中的应用与发展[J].四川建材,2016,42(08):119-120.
- [2] 宣越,任恬,王波.预应力技术在结构工程中的应用及发展趋势[J].科技创新导报,2016,13(03):25-27.
- [3] 张萌,方亮.体外预应力技术的研究现状及发展综述[J].知识经济,2010,(14):131.
- [4] 老新明.浅谈体外预应力技术及其在桥梁工程中的应用与发展[J].科技资讯,2008,(16):45.
- [5] 洪小刚.体外预应力技术及其在桥梁中的应用与发展[J].山西建筑,2008,(13):151-152.
- [6] 盛超.体外预应力技术在工程加固中的应用与发展[J].山西建筑,2006,(23):150-151.