

# 公路桥梁施工中预应力混凝土技术的应用与优化

房洪岩

通辽市恒达交通工程质量检测中心 内蒙古 通辽 028000

**摘要：**公路桥梁施工中，预应力混凝土技术通过先张法、后张法及体外预应力体系，有效提升了结构承载力与耐久性。其优化策略包括：应用环氧涂层钢绞线及低松弛材料增强抗腐蚀性；采用BIM技术精准定位预应力管道，结合智能张拉设备与真空压浆系统，保障施工精度与压浆密实度；建立全流程质量追溯系统，强化环境适应性设计，确保复杂工况下结构性能稳定，实现高效、耐久、安全的桥梁建设目标。

**关键词：**公路桥梁施工；预应力混凝土技术；应用；优化

引言：公路桥梁作为交通基础设施的核心组成部分，其结构安全性与耐久性直接关系到交通网络的稳定运行。预应力混凝土技术凭借高效利用材料性能、减少结构裂缝、提升承载能力等优势，已成为大跨度桥梁及复杂结构中的关键技术。然而，施工中的预应力损失控制、孔道压浆密实度保障及环境适应性等问题仍制约着工程质量。本文系统分析预应力混凝土技术的基础理论，结合施工工艺优化、智能设备应用及全流程质量管控策略，为提升公路桥梁建设质量提供技术参考。

## 1 预应力混凝土技术基础理论

### 1.1 预应力混凝土基本原理

(1) 预应力损失的分类与计算方法：摩擦损失源于预应力筋与孔道壁间摩擦，曲线孔道需考虑弯曲段和直线段摩擦，按规范公式结合孔道偏差系数、摩擦系数计算；锚固损失因锚具变形、预应力筋回缩产生，先张法通过台座变形量计算，后张法依据锚具类型和筋材直径确定回缩值，同时需考虑养护温差、混凝土收缩徐变等其他损失，各项损失叠加得总损失值。(2) 预应力体系分类：先张法先张拉筋材再浇筑混凝土，依赖粘结力传递预应力，适用于批量生产的中小型构件；后张法先浇筑混凝土留孔，张拉筋材后锚固，通过锚具传递力，适合大型复杂结构；体外预应力筋布置在结构外部，便于检测更换，常用于旧桥加固和大跨度结构。

### 1.2 材料性能要求

(1) 预应力筋的力学性能与选型标准：钢绞线需具备高抗拉强度、低松弛性，屈服强度不低于标准值的90%，延伸率满足规范要求；高强钢筋要有良好的锚固性能和焊接性能，选型需结合结构受力、跨度及环境，腐蚀环境优先选防腐涂层筋材。(2) 混凝土配合比设计的影响：需提高抗裂性，通过降低水胶比、掺加减水剂减少孔隙；增强耐久性需控制氯离子、碱含量，掺加矿物

掺合料改善微观结构，配合比设计需满足强度、弹性模量等指标。

### 1.3 结构设计与计算方法

(1) 预应力混凝土桥梁的受力分析模型：常用梁单元模型模拟主梁受力，考虑预应力等效荷载、二期恒载等，复杂结构采用实体单元或壳单元，分析施工阶段和使用阶段的内力、变形，确保结构安全。(2) 规范标准对设计参数的要求：《公路桥涵设计通用规范》规定设计基准期、荷载组合，明确混凝土强度等级、预应力筋张拉控制应力等参数限值，设计需满足承载能力极限状态和正常使用极限状态要求。

## 2 公路桥梁施工中预应力混凝土技术的应用

### 2.1 施工工艺流程

(1) 先张法施工：台座设计需根据构件尺寸、张拉力确定，采用钢筋混凝土或钢结构台座，确保抗倾覆、抗滑移稳定性，台座表面平整度误差控制在2mm内；张拉前需校准千斤顶与压力表，采用分级张拉工艺，先张拉至10%控制应力初调，再分级升至105%控制应力持荷5min，最后降至100%控制应力锚固；放张需待混凝土强度达设计值80%以上，采用对称、分级放张法，从构件中间向两端或同步均匀放张，避免构件开裂。(2) 后张法施工：孔道成孔常用金属波纹管或塑料波纹管，安装时需固定牢固，曲线孔道每隔0.5-1m设定位筋，保证孔道位置偏差不超5mm；锚具安装前需检查外观与硬度，锚垫板与孔道中心线垂直，偏差不超1°；张拉采用两端同步张拉，按“0→10%σ<sub>con</sub>→20%σ<sub>con</sub>→100%σ<sub>con</sub>”分级进行，每级持荷2-3min，确保受力均匀。(3) 体外预应力施工：转向块设计需满足承载力与抗滑移要求，采用钢筋混凝土或钢构件，转向面弧度与预应力筋曲率匹配，避免筋材磨损；张拉端设置钢锚箱或锚具，锚具与转向块间距需满足张拉操作空间，张拉前需清理体外筋

表面杂质，采用单根或整体张拉工艺，张拉后及时封堵锚具，防止腐蚀<sup>[1]</sup>。

## 2.2 关键施工环节控制

(1) 预应力筋张拉力与伸长量双控技术：张拉力以压力表读数为准，同时监测伸长量，实际伸长量与理论伸长量差值需控制在±6%内；理论伸长量按规范公式计算，考虑孔道摩擦、筋材弹性模量等因素；若差值超范围，需检查孔道通畅性、筋材规格，调整张拉工艺后重新张拉。(2) 孔道压浆密实度保障措施：采用真空辅助压浆技术，压浆前先抽真空，使孔道内真空度稳定在-0.06至-0.1MPa，再压注水泥浆；水泥浆水胶比控制在0.26-0.28，掺加高效减水剂与膨胀剂，流动度维持在10-17s；压浆顺序从最低点向最高点进行，每个孔道一次连续压浆，压浆压力控制在0.5-0.7MPa，持压3-5min，确保孔道内无空隙<sup>[2]</sup>。(3) 大跨径桥梁预应力损失补偿方法：施工中监测预应力损失，通过二次张拉补偿，即首次张拉至设计应力，待损失稳定后补张拉至设计值；对长期损失，采用高弹性模量预应力筋、优化混凝土配合比减少收缩徐变，同时在结构运营阶段定期监测预应力值，必要时进行二次压浆或加固。

## 3 公路桥梁施工中预应力混凝土技术施工的问题与挑战

### 3.1 常见质量问题

(1) 预应力筋断裂或滑移原因分析：筋材质量不达标，如存在裂纹、强度不足，张拉时易断裂；张拉工艺不当，如超应力张拉、分级过快，导致筋材受力超出极限；锚具安装偏差，如锚垫板倾斜、夹片磨损，使筋材锚固失效引发滑移；孔道堵塞导致筋材受力不均，局部应力集中引发断裂。(2) 孔道压浆不密实导致的钢筋锈蚀风险：压浆压力不足、持压时间不够，孔道内残留空隙，雨水、湿气渗入；水泥浆配合比不当，如泌水率高、收缩大，形成裂缝，为腐蚀介质提供通道；压浆顺序错误，导致空气滞留形成气泡，加速预应力筋锈蚀，降低结构耐久性，严重时引发结构安全隐患。(3) 结构早期裂缝产生机理与控制难点：混凝土水化热过高，内外温差大，产生温度应力导致裂缝；张拉时机不当，混凝土强度未达标，张拉时结构刚度不足引发裂缝；模板变形、支撑沉降，使结构受力不均产生裂缝；控制难点在于需同步调控混凝土配合比、养护温度、张拉工艺，且施工中环境因素多变，难以精准把控裂缝产生。

### 3.2 施工管理挑战

(1) 张拉设备精度与人员操作水平的影响：千斤顶、压力表未定期校准，精度下降导致张拉力偏差；操

作人员技能不足，如未按规范分级张拉、读数误差大，影响施工质量；设备维护不到位，如油管漏油、阀门故障，导致张拉过程中断，增加质量风险。(2) 施工环境对预应力损失的敏感性：高温环境下混凝土收缩加快，预应力损失增大；低温环境下水泥浆凝结缓慢，压浆密实度降低；高湿度环境易导致筋材锈蚀，影响力学性能；环境因素难以实时控制，需动态调整施工参数，增加管理难度。(3) 多工序协同作业的工期控制问题：预应力施工需与钢筋绑扎、模板安装、混凝土浇筑等工序衔接，工序间等待时间过长易延误工期；各施工班组协调不当，如张拉班组与压浆班组配合不及时，导致工序脱节；突发质量问题需返工处理，进一步压缩工期，难以平衡施工质量与进度。

## 4 公路桥梁施工中预应力混凝土技术的优化策略

### 4.1 材料与设备优化

(1) 新型预应力筋材料的应用：环氧涂层钢绞线在普通钢绞线表面形成致密环氧树脂涂层，涂层厚度控制在0.18-0.30mm，具备优异的抗腐蚀性能，能有效抵御雨水、氯离子等腐蚀介质侵蚀，适用于海洋、盐碱等恶劣环境桥梁。相比传统钢绞线，其使用寿命可延长30%以上，且力学性能稳定，抗拉强度、延伸率等指标满足规范要求。施工中需注意涂层保护，避免张拉、安装过程中划伤，可搭配专用防腐锚具，进一步提升整体防腐效果，降低后期维护成本。(2) 智能张拉设备与自动化压浆系统的研发：智能张拉设备集成高精度传感器、数控系统，能实时采集张拉力、伸长量数据，自动实现分级张拉、持荷、锚固，张拉力控制精度达±1%，伸长量监测误差小于2mm，避免人工操作误差。设备支持远程监控，管理人员可实时查看施工数据，确保张拉过程合规。自动化压浆系统通过数控模块精准控制压浆压力(0.5-0.8MPa)、流量与时间，搭配真空辅助装置，使孔道真空度稳定在-0.08至-0.1MPa，水泥浆密实度达98%以上，同时自动记录压浆参数，生成施工报告，提升压浆质量稳定性<sup>[3]</sup>。

### 4.2 施工工艺改进

(1) 基于BIM技术的预应力管道精准定位方法：在施工前建立桥梁BIM模型，将预应力管道参数(坐标、坡度、曲率)导入模型，进行碰撞检测，提前规避与钢筋、预埋件的冲突。施工中采用BIM+GPS定位技术，通过移动终端实时调取管道定位数据，指导工人安装，定位误差控制在3mm内。对于曲线管道，利用BIM模型生成分段定位坐标，每隔0.3m设置定位筋，确保管道线形符合设计要求。同时，BIM模型可存储管道安装全过程数

据,便于后期追溯与维护。(2)预应力张拉与压浆的实时监测与反馈控制:张拉阶段,在预应力筋上安装应变传感器,实时监测应力变化,结合智能张拉设备数据,形成双监测体系,若应力偏差超 $\pm 3\%$ ,系统自动报警并暂停张拉,技术人员调整参数后再继续。压浆阶段,在孔道内布置压力传感器与密实度检测仪,实时监测压浆压力分布与浆体密实度,当检测到空隙时,系统自动增大压浆压力或延长持压时间,确保孔道无空隙。监测数据实时上传至云端平台,生成趋势分析图,为后续施工优化提供依据<sup>[4]</sup>。

#### 4.3 质量管控体系完善

(1)建立全流程质量追溯系统:在预应力筋、锚具、水泥等材料上粘贴RFID标签,记录材料规格、生产批次、检测报告等信息,材料进场时通过物联网设备自动核验,杜绝不合格材料使用。施工过程中,智能设备采集的张拉、压浆、定位等数据实时上传至大数据平台,形成“材料-施工-检测”全流程数据链。管理人员通过平台可查询任意环节数据,当出现质量问题时,能快速追溯至具体工序与责任人,同时利用大数据分析施工薄弱环节,提前制定改进措施。(2)引入第三方检测机构强化验收标准:第三方检测机构在施工关键节点(如张拉完成后、压浆后)进行独立检测,采用超声波、射线探伤等技术检测孔道压浆密实度,采用应力测试仪检测预应力筋实际应力,检测比例不低于30%,且覆盖所有类型构件。验收标准在规范基础上进一步提高,如压浆密实度需达99%以上,预应力损失偏差控制在 $\pm 5\%$ 内,检测不合格项目需整改并重新检测,直至达标,确保工程质量符合高标准要求。

#### 4.4 环境适应性优化

(1)寒冷地区预应力混凝土防冻胀措施:原材料选用抗冻性强的水泥(如P.O42.5R水泥)、骨料(冻融损失率小于5%),在混凝土中掺加引气剂,使含气量控制在4%-6%,提升抗冻性能。施工中采用冬季施工方案,对砂石料进行预热(温度不低于5°C),热水拌合(水温

不高于80°C),确保混凝土入模温度不低于10°C。养护阶段采用覆盖保温被+电热毯加热,维持混凝土核心温度不低于20°C,避免温度骤降导致冻胀裂缝,同时延缓预应力张拉时间,待混凝土强度达设计值90%以上再张拉<sup>[5]</sup>。(2)海洋环境下耐久性提升技术:除采用环氧涂层钢绞线外,在混凝土表面涂刷聚脲防腐涂层,涂层厚度不小于1.5mm,具备耐盐雾、耐海水侵蚀性能,且弹性好,能适应结构变形。在混凝土配合比中掺加复合型阻锈剂(掺量为胶凝材料质量的1%-2%),通过抑制钢筋电化学腐蚀反应,延缓锈蚀进程。同时,优化混凝土保护层厚度,比规范要求增加5-10mm,采用低水胶比(≤0.35)、高矿物掺合料(掺量30%-40%)混凝土,提升密实度,减少氯离子渗透,确保海洋环境下桥梁使用寿命达100年以上。

#### 结束语

预应力混凝土技术作为公路桥梁建设的核心支撑,其科学应用与持续优化对保障桥梁结构安全、延长使用寿命至关重要。本文通过剖析技术原理、施工要点及常见挑战,提出了材料升级、智能装备引入、BIM精准定位及全流程质量追溯等创新策略。未来,需进一步融合数字化技术与环境适应性设计,强化施工全过程管控,推动预应力混凝土技术向智能化、绿色化方向发展,为构建安全、耐久、经济的交通基础设施提供坚实保障。

#### 参考文献

- [1]白姗姗.预应力技术在公路桥梁施工中的应用分析[J].中华建设,2020,(12):134-135.
- [2]林宇辉.预应力技术在公路桥梁施工中的优化应用策略[J].绿色环保建材,2021,(04):118-121.
- [3]崔杰彬.公路桥梁施工中的预应力技术研究[J].城市住宅,2021,26(04):141-142.
- [4]陈栋栋.公路桥梁工程施工中预应力技术应用[J].建筑技术开发,2021,48,(09):99-100.
- [5]魏凯.阐述高速公路桥梁施工中预应力施工技术的应用[J].四川水泥,2021,4(05):246-247.