

道路与桥梁工程中的材料选用与应用

王荷辉

山西晋通公路工程监理有限公司 山西 晋城 048000

摘要：道路与桥梁工程材料选用需综合考量力学性能、耐久性及环境适应性。传统材料中，高强混凝土、预应力钢材及改性沥青广泛应用于承重结构与重载路面；新型材料如纤维增强复合材料、自修复混凝土及智能监测材料，则凭借轻质高强、耐腐蚀及实时感知特性，成为跨海大桥、重载交通等场景的理想选择。材料选择应适配工程需求，兼顾经济性与全寿命周期成本，推动工程可持续发展。

关键词：道路；桥梁工程；材料选用；应用

引言：道路与桥梁工程是国民经济的重要支撑，其材料选用直接影响工程质量和长期效益。随着交通量增长、气候条件复杂化及可持续发展要求提升，材料性能需求日益严苛。传统材料（如混凝土、沥青、钢材）在力学性能与经济性上优势显著，而新型材料（如复合材料、智能材料、再生材料）则以轻质高强、耐久环保等特性拓展应用边界。科学选材需兼顾功能需求、环境适应性与全周期成本，推动工程安全与绿色发展协同共进。

1 道路与桥梁工程材料分类及特性分析

1.1 传统工程材料

（1）水泥混凝土按性能分普通、高强、自修复三类：普通混凝土成本低、易施工，适用于一般路段；高强混凝土抗压强度高（ $\geq 60\text{MPa}$ ），常用于大跨度桥梁承重结构；自修复混凝土可通过微生物或胶囊技术修复裂缝，提升耐久性。（2）沥青及沥青混合料依施工温度分为热拌、温拌、冷拌：热拌混合料强度高、稳定性好，是主流选择，但能耗高；温拌混合料施工温度降低 $30\text{--}50^\circ\text{C}$ ，节能环保；冷拌混合料无需加热，适用于应急抢修和低温地区。（3）钢材主要有结构用钢和预应力钢绞线：结构用钢抗拉强度高，用于桥梁钢箱梁；预应力钢绞线可施加预应力，减少结构裂缝，增强抗变形能力。

1.2 新型工程材料

（1）纤维增强复合材料（FRP）轻质高强（强度为钢的3-5倍，重量仅1/5），耐腐蚀性强，适用于腐蚀环境下的构件，如跨海大桥护栏。（2）再生材料包括再生骨料混凝土和橡胶沥青：再生骨料混凝土利用建筑垃圾，减少资源浪费，但强度略低；橡胶沥青由废旧轮胎制成，提升路面抗裂性和弹性，实现资源循环。（3）智能材料具备感知或调节功能：自感知混凝土掺入导电材料，可实时监测裂缝和应力变化；相变材料能吸收或释放热量，调节路面温度，减少高温车辙和低温开裂^[1]。

1.3 材料性能对比与选择依据

（1）力学性能：传统水泥混凝土抗压强、抗拉弱；FRP抗拉强度远超钢材，但抗压性能较差；再生材料力学性能略低于传统材料，适用于非承重结构。选择时，承重构件优先高强混凝土和钢材，非承重部位可选用再生材料。（2）耐久性：FRP和智能自感知混凝土抗渗、抗腐蚀性能最优；普通混凝土易受侵蚀，需做防腐处理；橡胶沥青耐候性强，适用于气候多变地区。多雨、沿海地区优先选高耐久性材料，干燥地区可降低要求。（3）环境适应性：相变材料温度适应性最强，能应对极端温差；温拌沥青在低温环境施工更便捷；传统材料在温湿度稳定区域性价比高。高温地区避免使用易软化的普通沥青，高湿环境需加强材料抗渗设计。

2 道路工程中的材料选用与应用

2.1 路面结构材料选择

（1）基层材料作为路面承重核心，主流选择为级配碎石和水泥稳定碎石：级配碎石由不同粒径石料按比例混合，具有良好透水性和抗变形能力，施工便捷且成本较低，适用于交通量中等、地下水位较低的道路基层；水泥稳定碎石以碎石为骨料，掺入水泥和水拌匀压实，7天无侧限抗压强度可达 $3\text{--}5\text{MPa}$ ，承载能力强、稳定性高，常用于高速公路、城市主干道等重载交通道路基层，但需注意养护期保湿，避免收缩开裂。（2）面层材料直接承受车辆荷载与环境作用，主要有沥青混凝土和水泥混凝土：沥青混凝土表面平整、行车舒适，噪音低且施工速度快，可实现夜间施工不影响交通，适用于城市道路、高速公路等对通行体验要求高的路段，但高温易软化、低温易开裂；水泥混凝土面层强度高、耐久性强，抗磨损、抗老化性能优异，使用寿命可达20-30年，适用于货运通道、乡村道路等对耐久性要求高且交通量相对稳定的路段，不过施工周期长，需设置伸缩缝防止

温度变形^[2]。

2.2 特殊环境下的材料应用

(1) 寒冷地区抗冻融材料：寒冷地区冬季反复冻融易导致路面剥落、裂缝，低温柔性沥青成为首选，其通过添加改性剂（如SBS、橡胶粉）降低沥青脆点，-15℃时仍能保持良好弹性，有效抵抗冻融循环造成的结构破坏，同时搭配抗冻基层（如水泥稳定碎石掺引气剂），提升整体抗冻性能。(2) 湿热地区抗车辙材料：湿热地区高温持续时间长，路面易产生车辙，高模量沥青通过掺入硬质沥青或纤维改性剂，将60℃动态剪切模量提升至3000MPa以上，增强高温稳定性，减少车辆碾压产生的永久变形，同时优化级配设计，选用棱角性好的骨料，提高混合料内摩擦力。(3) 重载交通道路材料强化技术：重载交通（如货运专线）对路面承载要求极高，需采用材料强化技术，如基层采用水泥粉煤灰稳定碎石（掺量10%-15%粉煤灰）提升强度与韧性，面层使用高粘度沥青（粘度 $\geq 3000\text{Pa}\cdot\text{s}$ ）搭配玄武岩骨料，增强抗剪切能力，同时在基层与面层间设置土工格栅，减少层间推移，延长道路使用寿命。

2.3 道路养护与修复材料

(1) 裂缝修补材料：针对不同宽度裂缝选择对应材料，宽度 $\leq 5\text{mm}$ 的细微裂缝采用环氧树脂灌浆料，其粘结强度高（ $\geq 5\text{MPa}$ ）、固化速度快（24小时固化），可深入裂缝内部封堵水分；宽度 $> 5\text{mm}$ 的宽裂缝或坑槽，使用沥青再生剂搭配热沥青混合料，再生剂能激活旧沥青活性，恢复其粘结性能，实现裂缝填充与结构修复，缩短养护工期。(2) 表面功能层材料：为提升路面使用功能，表面功能层材料广泛应用，抗滑涂料（如水性环氧树脂防滑涂料）通过添加石英砂形成粗糙表面，摩擦系数提升至0.6以上，适用于隧道出入口、急弯路段；降噪沥青采用多孔结构设计（空隙率18%-22%），通过声波在孔隙内反射、吸收降低噪音3-5分贝，常用于城市居民区、学校周边道路，兼顾功能性与环境友好性。

3 桥梁工程中的材料选用与应用

3.1 桥梁主体结构材料

(1) 主梁材料作为桥梁核心受力构件，主流为预应力混凝土和钢箱梁：预应力混凝土主梁通过施加预应力抵消荷载产生的拉应力，有效减少裂缝，抗压强度可达60-80MPa，耐久性强、成本较低，适用于中小跨度桥梁（跨径20-50m），如公路简支梁桥；钢箱梁由钢板焊接而成，抗拉强度高（ $\geq 345\text{MPa}$ ）、自重轻，能实现大跨度跨越（跨径50-200m），且施工便捷，常用于城市高架桥、跨海大桥，但需定期防腐维护，避免钢材锈蚀^[3]。

(2) 桥墩材料需承受竖向荷载与水平推力，以高强混凝土和钢管混凝土为主：高强混凝土（强度等级 $\geq \text{C60}$ ）密实性好、抗渗抗冻能力强，适用于陆上桥墩，能抵御环境侵蚀；钢管混凝土将混凝土填入钢管内，利用钢管约束混凝土，提升抗压强度与延性，抗震性能优异，常用于高墩（高度 $\geq 30\text{m}$ ）或地震多发地区桥梁，如山区高速公路桥墩。

3.2 桥梁连接与附属材料

(1) 伸缩缝材料用于缓解桥梁温度变形，主要有模数式和梳齿板式：模数式伸缩缝通过橡胶密封条实现密封，伸缩量可达100-1000mm，适应大跨度桥梁的温度变形，且行车平顺性好，适用于高速公路、跨海大桥；梳齿板式伸缩缝由钢制梳齿板拼接而成，结构简单、承载能力强，但伸缩量较小（ $\leq 80\text{mm}$ ），易出现跳车现象，常用于中小跨度公路桥或旧桥改造。(2) 支座材料承担桥梁荷载传递与位移调节功能，常见为橡胶支座和聚四氟乙烯板：橡胶支座以天然橡胶或氯丁橡胶为原料，具有良好弹性，能缓冲振动、适应小幅度位移，适用于中小跨度桥梁；聚四氟乙烯板支座在橡胶支座表面粘贴聚四氟乙烯板，摩擦系数低（ ≤ 0.03 ），可实现桥梁水平位移（位移量 $\leq 500\text{mm}$ ），适用于大跨度桥梁或温差较大地区桥梁，如斜拉桥、悬索桥。

3.3 大跨度桥梁特殊材料

(1) 斜拉桥索材需承受巨大拉力，主要为镀锌钢丝和碳纤维拉索：镀锌钢丝通过热镀锌处理（锌层厚度 $\geq 85\mu\text{m}$ ），抗腐蚀能力强、抗拉强度高（ $\geq 1670\text{MPa}$ ），技术成熟、成本较低，是目前斜拉桥索材的主流选择；碳纤维拉索由碳纤维复合材料制成，自重仅为钢丝的1/4，抗拉强度是钢丝的2-3倍，且无腐蚀风险，适用于超大跨度斜拉桥（跨径 $\geq 800\text{m}$ ），但成本较高，目前多用于特殊场景桥梁。(2) 悬索桥主缆材料是桥梁承重核心，以高强钢丝和防护涂层为主：高强钢丝采用优质碳素钢制成，抗拉强度 $\geq 1770\text{MPa}$ ，通过密集排列形成主缆，承载能力极强；为防止钢丝锈蚀，主缆需涂刷防护涂层，常用环氧沥青涂层（厚度 $\geq 1.5\text{mm}$ ）或聚氨酯涂层，能有效隔绝水分、氧气，延长主缆使用寿命，如港珠澳大桥悬索桥主缆便采用环氧沥青涂层防护技术^[4]。

4 道路与桥梁工程中材料选用的影响因素与优化策略

4.1 环境因素

(1) 气候条件：温度方面，高温地区需避免选用易软化的普通沥青，优先选择高模量沥青或水泥混凝土，防止路面车辙；低温寒冷地区需采用低温柔性沥青、抗冻混凝土（掺引气剂），抵御-15℃以下冻融循环导致

的材料开裂剥落。降水较多地区,需选用高抗渗性材料(如防水混凝土、改性沥青),减少雨水渗入基层引发结构损坏;干旱地区可适当降低材料抗渗要求,侧重考虑抗老化性能。(2)地质条件:软土地基区域,桥梁墩台需选用轻质高强材料(如钢管混凝土、FRP构件),减轻地基荷载,避免沉降变形;若地基土壤含硫酸盐、氯盐等腐蚀性成分,需选用耐腐蚀材料,如耐候钢、环氧树脂涂层钢筋,或对传统钢材、混凝土做防腐处理(如涂刷防腐涂料、掺入阻锈剂),防止材料被侵蚀破坏。

4.2 工程需求

(1)交通荷载等级:轻型交通道路(如城市支路、乡村道路),路面可选用普通沥青混凝土、C30-C40水泥混凝土,基层采用级配碎石,平衡性能与成本;重型交通道路(如高速公路、货运专线),需强化材料强度,面层用高粘度沥青混凝土(粘度 $\geq 3000\text{Pa}\cdot\text{s}$),基层采用水泥稳定碎石(7天无侧限抗压强度 $\geq 4\text{MPa}$);特重型交通(如港口、矿山道路),需采用特种材料,如钢纤维混凝土、耐磨沥青,提升抗磨损、抗剪切能力。

(2)使用寿命要求:短期使用(5-10年,如临时施工便道),可选用经济型材料(如冷拌沥青、再生骨料混凝土),降低初始成本;长期使用(20-30年,如永久性公路、跨海大桥),需选用高耐久性材料,如FRP构件、C60以上高强混凝土、镀锌钢丝拉索,减少后期维护成本,延长工程寿命。

4.3 经济性与可持续性

(1)成本效益分析:需对比初始投资与全生命周期成本,如普通沥青初始成本低,但5-8年需大修;改性沥青初始成本高30%-50%,但使用寿命延长至12-15年,全周期成本更低。桥梁建设中,钢箱梁初始造价高于预应力混凝土,但施工速度快、后期维护便捷,对于工期紧张或大跨度工程,全周期效益更优。(2)绿色材料应用:推广再生材料,如再生骨料混凝土(替代30%-50%天然骨料)、橡胶沥青(掺入15%-20%废旧轮胎粉),减少建筑垃圾与资源消耗;采用低碳水泥(如掺粉煤灰、矿渣的复合水泥),降低水泥生产过程中的碳排放

(较普通水泥减少20%-30%),符合生态建设要求。

4.4 优化策略

(1)基于BIM的材料选型模拟:利用BIM技术构建三维模型,输入环境参数(温度、土壤腐蚀性)、工程需求(荷载、寿命),模拟不同材料的受力状态、耐久性衰减过程,如模拟FRP与钢材在跨海大桥中的腐蚀速率差异,直观对比材料性能表现,辅助选型决策。同时,BIM可整合成本数据,实现材料性能与成本的可视化分析,提高选型效率。(2)多目标决策模型:采用层次分析法(AHP)构建评价体系,将环境适应性、力学性能、成本、可持续性设为一级指标,下设二级子指标(如抗冻性、抗拉强度、全周期成本),通过专家打分确定权重;结合熵权法(客观赋权)修正主观权重,计算不同材料的综合得分,如对比高模量沥青与普通沥青的得分,选择最优材料。该模型可避免单一因素决策偏差,提升选型合理性。

结束语

道路与桥梁工程材料选用的科学性与合理性,是保障工程质量、延长使用寿命及实现可持续发展的关键。传统材料与新型材料的协同创新,既满足了复杂环境下的性能需求,也顺应了低碳环保的时代趋势。未来,随着智能材料、再生资源化技术的突破,材料选型将更趋精准化与绿色化。工程实践中需持续优化选材策略,平衡功能、经济与生态效益,为构建安全、耐久、环保的交通基础设施提供坚实支撑。

参考文献

- [1]张钰.混凝土施工技术在道路桥梁工程施工中的应用探究[J].四川建材,2024,(11):116-118.
- [2]何金秋.道路桥梁工程材料质量检测的重要性及优化策略[J].汽车周刊,2024,(03):21-23.
- [3]彭益彬.市政工程道路与桥梁施工质量管理探析[J].城市建设理论研究(电子版),2024,(17):181-183.
- [4]吴波.道路与桥梁连接段的施工关键技术探究[J].大陆桥视野,2024,(09):130-132.