

公路路面结构的材料选择与设计优化

徐小兵

中咨规划设计研究有限公司 北京 100043

摘要：公路路面结构的材料选择与设计优化是提升道路性能、延长使用寿命的关键课题。本文围绕沥青混凝土、水泥混凝土等传统材料，以及再生材料、新型功能材料的性能特点与应用场景展开分析，探讨不同材料在强度、耐久性、施工适应性等方面的优势与局限。同时，从结构力学优化、生命周期成本（LCC）分析、可持续性设计及智能化技术应用四个维度，阐述路面结构设计的优化路径，旨在通过材料创新与结构优化的协同作用，实现公路路面的经济性、可靠性与环保性的平衡，为现代公路工程建设提供理论参考与实践指导。

关键词：公路；路面结构；材料选择；设计优化

引言：公路作为交通基础设施的核心组成部分，其路面结构的性能直接影响行车安全、运输效率与使用寿命。随着交通量的持续增长、荷载条件的复杂化及环保要求的提升，传统路面材料与设计方法面临着性能不足、成本高企、资源消耗大等挑战。合理选择路面材料并优化结构设计，成为应对上述问题的关键手段。基于公路路面结构的功能需求，系统梳理沥青混凝土、水泥混凝土等材料的技术特性，结合再生材料循环利用与新型功能材料的发展趋势，从力学性能、全生命周期成本、可持续性 & 智能化设计等层面，探讨路面结构的优化策略，以期为公路工程的高质量建设提供新思路。

1 公路路面结构概述

公路路面作为直接承受车辆荷载、环境因素作用的结构层，其性能优劣直接关系到道路的使用功能与服务寿命。公路路面结构通常由面层、基层、底基层和垫层组成，各层分工明确且相互协同。面层是路面最上层，直接与车辆轮胎及外界环境接触，需具备良好的平整度、抗滑性、耐磨性及抗疲劳性能，以保障行车安全与舒适性；基层位于面层之下，主要承受并扩散由面层传递的车辆荷载，要求具备较高的强度、刚度与稳定性；底基层作为基层的辅助结构，进一步分散荷载并增强整体结构承载能力；垫层则设置于路基与基层之间，起到排水、隔水、防冻及改善路基水温状况的作用。随着交通量的增长与重载车辆的增多，路面结构面临着更为复杂的受力条件与环境挑战。传统路面结构设计多基于经验与简化力学模型，难以精准应对现代交通需求。因此，通过材料创新、结构优化与智能化设计，提升路面结构的承载能力、耐久性与环境适应性，已成为公路工程领域的重要研究方向，对推动交通基础设施高质量发展具有关键意义^[1]。

2 公路路面结构的材料选择

2.1 沥青混凝土

沥青混凝土作为公路路面面层的主流材料，由沥青、集料与矿粉按特定配比融合而成。其中，沥青作为胶结介质，赋予混合料黏结性与柔韧性，使其能适应地基的微小变形；集料构成骨架，增强路面的抗剪与抗压能力；矿粉则填充空隙，提升密实度。这种材料施工便捷，可在常温或加热状态下完成摊铺压实，短时间内即可开放交通，极大缩短工期。例如，在城市主干道建设中，沥青混凝土路面凭借高平整度与低噪音特性，显著提升行车舒适性；其独特的表面纹理还能有效增强抗滑性能，降低雨天事故率。然而，沥青混凝土存在温度敏感性问题。高温环境下，沥青软化易引发车辙，据统计，夏季重载路段车辙深度年均增加约5-8mm；低温时材料变脆，易产生收缩裂缝。为攻克这些难题，行业通过添加橡胶粉、SBS等聚合物改性剂，显著改善其高低温性能。

2.2 水泥混凝土

水泥混凝土以硅酸盐水泥为胶凝核心，与砂石集料、水混合硬化后形成高强度刚性路面。其抗压强度可达30-50MPa，部分高性能混凝土甚至超过80MPa，凭借优异的耐磨性与水稳定性，广泛应用于机场跑道、港口道路等重载交通场景。例如，美国加州101号公路采用钢筋混凝土路面，每日承载超10万辆重型卡车，服役30年仍保持良好性能。水泥混凝土路面采用板块式结构，通过接缝释放温度应力，但接缝处易成为病害隐患。水渗入后，在车辆荷载作用下产生唧泥，导致板块脱空、错台，影响行车安全。此外，水泥生产过程碳排放巨大，每生产1吨水泥熟料约排放1吨二氧化碳。为实现绿色发展，行业积极研发低收缩水泥、纤维增强混凝土等新技术。

2.3 再生材料

再生材料是公路建设践行循环经济的重要成果,将废旧沥青路面、废弃混凝土经破碎、筛分、改性后重新投入使用。废旧沥青混合料通过热再生或冷再生技术,可作为新沥青混凝土的集料或结合料;废弃混凝土制成的再生骨料,在基层中的替代率可达100%,面层中也能替代30%-50%的天然砂石。荷兰阿姆斯特丹环形公路全段采用100%再生沥青混合料,节省天然砂石50万吨,减少碳排放1.2万吨,环保效益显著。但再生材料性能受原废料品质、加工工艺影响大,需严格把控质量。我国《公路沥青路面再生技术规范》明确了生产与应用标准,推动行业规范化发展。目前,微波加热再生、纳米改性再生剂等技术不断突破,使再生沥青延度提升20%-30%。广州某快速路改造中,再生材料的应用使工程成本降低18%,施工周期缩短20%,实现了经济与环保的双赢。

2.4 新型功能材料

新型功能材料针对传统路面的性能瓶颈与特殊需求研发,推动公路建设向智能化、绿色化升级。自愈合沥青材料嵌入微胶囊或微生物,当路面开裂时,胶囊破裂释放修复剂或微生物分解有机物产生碳酸钙,自动填充裂缝,修复效率达80%以上。透水混凝土孔隙率15%-25%,透水速率超2mm/s,在海绵城市建设中有效缓解内涝,武汉东湖绿道采用该材料后,年雨水渗透量超50万立方米。智能材料则赋予路面感知能力,光纤传感混凝土可实时监测裂缝与应力分布;导电沥青结合电热丝实现冬季自动融雪。不过,这些材料生产成本高昂,如自愈合沥青单价较普通沥青高出3-5倍,且技术成熟度与工程经验不足。目前,雄安新区已开展智能路面试点,集成温感、应力监测等功能,为未来智慧公路建设探索可行路径。

2.5 植物基复合材料

植物基复合材料是以天然植物纤维、生物质树脂为原料,经物理或化学改性与传统路面材料复合而成的新型材料。椰壳纤维、亚麻纤维等植物纤维高强度、高韧性,与沥青混合料结合后,可显著增强材料抗疲劳性能,延缓裂缝扩展;生物质树脂则可替代部分水泥用于基层,在保证强度的同时大幅降低能耗。这类材料具有可再生、低碳环保、生物降解等特性,能有效减少石化资源依赖,以大豆油为基础的生物质沥青,相比传统沥青可减少约30%的温室气体排放。在巴西某乡村公路试点中,甘蔗渣纤维增强的沥青路面服役5年仍保持良好平整度,维护成本降低15%。但植物纤维吸水性影响耐久性,生物质树脂成本较高,限制了其大规模应用。随着生物技术进步,未来通过工艺优化有望提升性能、降低

成本,推动其在公路路面广泛应用^[2]。

3 公路路面结构设计优化

3.1 沥青混凝土

沥青混凝土作为公路路面面层的主流材料,由沥青、集料与矿粉按特定配比融合而成。其中,沥青作为胶结介质,赋予混合料黏结性与柔韧性,使其能适应地基的微小变形;集料构成骨架,增强路面的抗剪与抗压能力;矿粉则填充空隙,提升密实度。这种材料施工便捷,可在常温或加热状态下完成摊铺压实,短时间内即可开放交通,极大缩短工期。例如,在城市主干道建设中,沥青混凝土路面凭借高平整度与低噪音特性,显著提升行车舒适性;其独特的表面纹理还能有效增强抗滑性能,降低雨天事故率。然而,沥青混凝土存在温度敏感性問題。高温环境下,沥青软化易引发车辙,据统计,夏季重载路段车辙深度年均增加约5-8mm;低温时材料变脆,易产生收缩裂缝。为攻克这些难题,行业通过添加橡胶粉、SBS等聚合物改性剂,显著改善其高低温性能。

3.2 水泥混凝土

水泥混凝土以硅酸盐水泥为胶凝核心,与砂石集料、水混合硬化后形成高强度刚性路面。其抗压强度可达30-50MPa,部分高性能混凝土甚至超过80MPa,凭借优异的耐磨性与水稳定性,广泛应用于机场跑道、港口道路等重载交通场景。例如,美国加州101号公路采用钢筋混凝土路面,每日承载超10万辆重型卡车,服役30年仍保持良好性能。水泥混凝土路面采用板块式结构,通过接缝释放温度应力,但接缝处易成为病害隐患。水渗入后,在车辆荷载作用下产生唧泥,导致板块脱空、错台,影响行车安全。此外,水泥生产过程碳排放巨大,每生产1吨水泥熟料约排放1吨二氧化碳。为实现绿色发展,行业积极研发低收缩水泥、纤维增强混凝土等新技术。

3.3 再生材料

再生材料是公路建设践行循环经济的重要成果,将废旧沥青路面、废弃混凝土经破碎、筛分、改性后重新投入使用。废旧沥青混合料通过热再生或冷再生技术,可作为新沥青混凝土的集料或结合料;废弃混凝土制成的再生骨料,在基层中的替代率可达100%,面层中也能替代30%-50%的天然砂石。荷兰阿姆斯特丹环形公路全段采用100%再生沥青混合料,节省天然砂石50万吨,减少碳排放1.2万吨,环保效益显著。但再生材料性能受原废料品质、加工工艺影响大,需严格把控质量。我国《公路沥青路面再生技术规范》明确了生产与应用标准,推动行业规范化发展。目前,微波加热再生、纳米改性再生剂等技术不断突破,使再生沥青延度提升20%-30%。

3.4 新型功能材料

新型功能材料针对传统路面的性能瓶颈与特殊需求研发,推动公路建设向智能化、绿色化升级。自愈合沥青材料嵌入微胶囊或微生物,当路面开裂时,胶囊破裂释放修复剂或微生物分解有机物产生碳酸钙,自动填充裂缝,修复效率达80%以上。透水混凝土孔隙率15%-25%,透水速率超2mm/s,在海绵城市建设中有效缓解内涝,武汉东湖绿道采用该材料后,年雨水渗透量超50万立方米。智能材料则赋予路面感知能力,光纤传感混凝土可实时监测裂缝与应力分布;导电沥青结合电热丝实现冬季自动融雪。不过,这些材料生产成本高昂,如自愈合沥青单价较普通沥青高出3-5倍,且技术成熟度与工程经验不足。

3.5 抗滑性能优化

公路路面的抗滑性能直接关系到行车安全,尤其在雨天、冰雪等恶劣天气条件下,抗滑性能不足易引发交通事故。抗滑性能优化通过改进路面材料与表面构造设计,提升轮胎与路面间的摩擦力。在材料选择上,采用高磨光值集料(如玄武岩、辉绿岩)替代普通石灰岩集料,可显著增强路面抗滑耐久性;在沥青混合料中添加耐磨纤维或陶瓷颗粒,能有效提高表面粗糙度。例如,在山区多弯路段铺设掺加陶瓷颗粒的沥青混凝土,摩擦系数提升0.2-0.3,大幅降低车辆制动距离。此外,表面构造设计也至关重要。通过刻槽、拉毛、喷砂等工艺,人为制造宏观纹理与微观纹理,增加轮胎与路面的接触面积。如在机场跑道应用横向刻槽技术,可使雨天制动效率提高30%;而透水沥青路面的多孔结构,在排水的同时也能保持表面干燥,间接提升抗滑性能。近年来,纳米涂层技术的应用为抗滑优化提供新思路,在路面表面喷涂纳米防滑材料,可形成纳米级粗糙结构,进一步增强防滑效果,且耐久性显著优于传统工艺。

3.6 施工工艺优化

施工工艺优化旨在通过创新技术与管理模式,提升路面施工效率、质量及经济性。在传统工艺中,沥青混合料摊铺与压实受温度、时间等因素限制,易出现离析、压实度不足等问题。新工艺如温拌沥青技术,通过添加温拌剂降低混合料施工温度,减少能源消耗与有害气体排放,同时延长压实窗口期,提高施工质量稳定性。例如,某市政道路采用温拌沥青施工后,压实度合格率从85%提升至98%,施工效率提高20%。此外,预制装配化施工成为新趋势。将路面结构层在工厂预制为标准构件,现场快速拼装,可减少环境因素影响,缩短工期。如荷兰某高速公路采用预制混凝土板块施工,将传统施工周期从3个月压缩至20天,且施工质量更易控制。在施工管理方面,数字化技术的应用也推动工艺优化。通过BIM技术进行施工模拟,可提前发现设计与施工冲突;利用智能压实设备实时监测压实度,确保施工过程精细化。这些工艺优化措施不仅提升施工效率,还降低了人工与材料成本,为公路建设注入新活力^[3]。

结束语

公路路面结构的材料选择与设计优化是保障道路长期稳定运行的核心环节。从传统沥青混凝土、水泥混凝土,到再生材料、植物基复合材料等创新成果,材料的多元化发展为路面性能提升提供了基础;而结构力学优化、生命周期成本控制、智能化设计等策略,则从技术层面实现了性能与效益的平衡。

参考文献

- [1]江卫民.公路路面粉煤灰材料应用技术[J].运输经理世界,2023,(28):136-138.
- [2]汪晨徽,谢嘉斌.高速公路路面拼接中聚酯玻纤布材料的应用[J].交通科技与管理,2023,4(03):111-113.
- [3]张璠,申铁军.新型筑路材料在公路路面工程的试验检测分析[J].四川建材,2022,48(09):109-110+113.