高分子合成纤维增强水泥稳定碎石力学特性研究进展

邓长清[1,2,3],赵洪元[1,2,3],邹 红[1,2,3],朱 沁[1,2,3],张 宇[4],蒋应军[4]*

(1.竹纤维建造材料湖南省工程研究中心,湖南 邵阳 422000;2.湘西南绿色建造与智能监测湖南省普通高等学校重点实验室,湖南 邵阳 422000;3.邵阳学院土木与建筑工程学院,湖南 邵阳 422000;4.长安大学公路学院,陕西 西安 710064)

摘 要:为推动高分子合成纤维水泥稳定碎石(CSM)基层应用与发展,系统分析CSM与纤维CSM力学强度增强机理,确定不同纤维CSM用纤维适宜长度与掺量。结果表明:在纤维适宜长度方面,聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)纤维长度为50~70 mm,聚丙烯(PP)纤维长度为18~20 mm,聚乙烯醇(PVA)纤维长度为12~24 mm;在纤维最佳掺量方面,PET纤维掺量为0.06%~0.08%,PP纤维掺量为0.05%~0.15%,PVA纤维掺量为0.03%~0.09%。在适宜长度与掺量下,PET纤维增强CSM的力学强度可提升7.0%~37.5%,PP纤维增强CSM的力学强度可提升2.4%~161.1%,PVA纤维增强CSM的力学强度可提升3.4%~52.0%。PVA纤维可提升CSM抗压回弹模量(RM),而PET纤维与PP纤维将降低RM。高分子纤维在提升CSM力学强度方面具有潜力,值得进一步研究。

关键词:道路工程;水泥稳定碎石;高分子合成纤维;增强机理;力学特性

中图分类号:TQ342 **文献标志码**:A **文章编号**:1005-3360(2026)08-0190-06

DOI:10.15925/j.cnki.issn1005-3360.2026.08.033

Research Progress on Mechanical Properties of Polymer Synthetic Fiber Reinforced Cement Stabilized Macadam

DENG Changqing[1,2,3], ZHAO Hongyuan[1,2,3], ZOU Hong[1,2,3], ZHU Qin[1,2,3], ZHANG Yu[4], JIANG Yingjun[4]*

(1. Hunan Engineering Research Center for Bamboo Fiber Construction Materials, Shaoyang 422000, China; 2. Key Laboratory of Green Construction and Intelligent Monitoring in Southwestern Hunan for Regular Institutions of Higher Education of Hunan Province, Shaoyang 422000, China; 3. College of Civil and Architectural Engineering, Shaoyang University, Shaoyang 422000, China; 4. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: To promote the application and development of polymer synthetic fiber-reinforced cement stabilized macadam (CSM) in pavement bases, the mechanical strength enhancement mechanisms of CSM and fiber-reinforced CSM are systematically analyzed, and the appropriate fiber lengths and dosages for different fibers in CSM are determined. The results indicate that, in terms of suitable fiber length, polyethylene terephthalate (PET) fiber length ranges from 50 mm to 70 mm, polypropylene (PP) fiber length ranges from 18 mm to 20 mm, and polyvinyl alcohol (PVA) fiber length ranges from 12 mm to 24 mm. Regarding the optimal fiber dosage, PET fiber content is 0.06%~0.08%, PP fiber content is 0.05%~0.15%, and PVA fiber content is 0.03%~0.09%. Under the appropriate length and dosage, the mechanical strength of CSM reinforced with PET fibers was enhanced by 7.0%~37.5%, that with PP fibers by 2.4%~161.1%, and that with PVA fibers by 3.4%~52.0%. PVA fiber can increase the compressive resilient modulus (RM) of CSM, while PET and PP fibers reduce RM. Polymer fibers show potential in improving the mechanical strength of CSM and merit further investigation.

Keywords: Road engineering; CSM; Polymer synthetic fiber; Reinforcement mechanism; Mechanical properties

收稿日期 Submitted date 2025-08-23;修回日期 Revised date 2025-09-03;录用日期 Accepted date 2025-09-16

基金项目:湖南省自然科学基金项目(2026JJ80366);陕西省创新能力支撑计划项目(2022TD-06);交通运输行业重点科技项目(2021-MS1-011);湖南省教育厅优秀青年项目(22B0752);湖南省大学生创新训练计划项目(S202410547013)

*联系人,jyj@chd.edu.cn

引用本文:邓长清,赵洪元,邹红,等.高分子合成纤维增强水泥稳定碎石力学特性研究进展[J].塑料科技,2026,54(8):190-195.

Citation: DENG C Q, ZHAO H Y, ZOU H, et al. Research progress on mechanical properties of polymer synthetic fiber reinforced cement stabilized macadam[J]. Plastics Science and Technology, 2026, 54(8): 190-195.

截至2024年末，中国公路建设成就斐然，全国公路总里程已增至549.04万km，其中高速公路里程达19.07万km。随着《国家公路网规划(2022—2035年)》的推进，未来新增国家公路网规划总规模将达约46.10万km，公路建设将持续高速发展。在我国高等级公路建设中，半刚性基层沥青路面因其平整性、低噪声、扬尘控制及施工养护便利性等优势[1-3]，结合半刚性基层材料的高强度、高承载力和经济性[4-5]，在我国高等级公路应用占比超过90%。然而，传统半刚性基层，尤其是水泥稳定碎石(CSM)基层，存在刚度过大、韧性不足、易因干缩和温缩开裂导致路面耐久性下降等问题[6-8]，制约了公路工程的长期性能。

近年来，纤维增强技术成为改善CSM基层抗裂性能的关键方向，其中高分子合成纤维，如聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)纤维、聚丙烯(PP)纤维、聚丙烯腈(PAN)纤维等，凭借其优异的力学性能、化学稳定性及与水泥基材料的良好相容性，在道路工程中展现出显著优势[9-11]。高分子合成纤维可通过“加筋效应”有效分散应力，抑制裂缝扩展，同时提升基层的柔韧性和抗疲劳性能[12-13]。尽管已有研究验证了纤维掺入对CSM性能的改善作用，但针对高分子合成纤维规格的优化(如长度、掺量)及其与CSM力学性能的量化关系仍缺乏系统性梳理，限制其规模化应用。

因此，本文聚焦高分子合成纤维增强CSM基层，包括PET纤维、PP纤维、聚乙烯醇(PVA)纤维、PAN纤维，梳理CSM力学强度形成机理，揭示纤维对CSM的增强机制，系统总结不同类型高分子合成纤维的适宜长度、最佳掺量及其对CSM抗压、抗折、抗裂等力学性能的提升效果。本研究旨在为高分子合成纤维在公路基层中的优化设计、工程应用及后续研究提供依据，推动绿色耐久型公路建设材料的发展。

1 CSM强度形成机理

CSM的强度形成是多因素综合作用的结果，主要影响因素包括骨料颗粒间的黏结与嵌挤作用以及水泥水化产物的性质[14-15]。由摩尔-库伦理论可知，材料的黏聚力和内摩擦角对CSM强度起决定性作用，而内摩擦角的大小主要取决于集料的级配。因此，为确保CSM的强度，首要任务是选择合适的集料级配。骨架密实型级配相较于骨架悬浮型级配具有更优的力学性能，因此推荐优先采用骨架密实型级配[16-18]。

此外，内部黏聚力的大小主要取决于水泥的水化产物。硅酸盐水泥熟料主要包括硅酸三钙(C_3S)、硅酸二钙(C_2S)、铝酸三钙(C_3A)以及铁铝酸四钙(C_4AF)等几种矿物成分。其中，C_3S水化产物不仅对CSM早期强度的迅速增长有显著贡献，而且在后期强度的持续提升中也发挥不可或缺的作用。C_3A的含量则决定CSM早期强度的形成速度。C_2S虽然对CSM的早期强度贡献不大，但它是后期强度形成的关键因素。C_4AF对CSM的抗弯拉强度(FS)具有重要影响。CSM的力学强度随着水泥掺量的增加而逐渐增强，在掺量约为6%时趋于最优，但过高的水泥掺量会显著增加其干缩与温缩开裂的风险。综合考虑强度与耐久性，建议CSM的水泥质量分数控制在4%~6%之间[19-20]。

CSM强度的形成过程可划分为前期的机械压实阶段和后期的水泥水化作用阶段。机械压实是物理过程，通过机械施加的压力将混合料中的空气排出，使松散的颗粒重新排列，减小颗粒间的间隙，从而提高CSM的早期强度。压实度每提高1%，CSM的无侧限抗压强度(UCS)可提高约10.0%[21-22]，这说明虽然增加水泥含量可以弥补压实度的不足，但通过良好的压实来实现高强度通常更为经济。CSM的后期强度主要取决于水泥的全面水化过程，该过程产生具有强大胶结能力的水化产物，如$Ca(OH)_2$、水化硅酸钙(C-S-H)等，是构成其强度基础的关键要素。这些水化产物紧密地包裹集料颗粒，缩减水泥浆体内集料颗粒的间距，促使众多颗粒相互联结，构建起稳定的骨架体系，进而大幅度提升CSM的后期强度。

2 纤维CSM增强机理

纤维CSM的强度形成不仅保留普通CSM的基本特性，还因纤维的添加而展现出独特之处。其强度的构建是一个复杂的过程，受多种因素的综合影响，包括纤维与基体的物理属性、纤维的长度与掺量、水泥的种类与掺量等。尤为关键的是纤维的性质与掺量以及CSM基体本身的强度，这两者直接决定纤维与基体间的联结强度。

将纤维掺入CSM会交织成一个三维的网络结构。在CSM的养护期间，水泥的水化作用会在纤维周围生成C-S-H凝胶、水石榴石等化合物，从而将纤维牢牢地固定在基体内[23]。当纤维CSM受到外力作用或内部应力(干燥收缩、温度变化等)时，纤维凭借其应力传递特性可分散应力集中，保持基层内部应力场的均匀分布，从而增强基层的韧性。此外，覆盖在水泥稳定基层表面的纤维还能减小其暴露在外的水分蒸发面积，使水分蒸发变得困难，从而减少基层表面因干燥收缩而产生的裂缝[24]。

当CSM基体的强度一定时，纤维的长度与掺量对其力学性能具有显著影响。纤维过短虽有利于分散，但难以形成紧密相连的三维网络结构，从而削弱整体的应力分散能力[25]。纤维过长则可能在搅拌过程中发生缠绕，降低其延伸性，减少裂缝扩展路径上的纤维数量[26]。同样，纤维掺量过少会降低其在CSM中的分布密度，减少三维网络结构的形成，难以构建足够的连接桥梁，从而无法有效改善基层的脆性断裂特征。相反，纤维掺量过多则可能使其在搅拌过程中分散不均，以束状形式存在于基体内。纤维束内部缺乏凝胶材料，无法实现有效黏合，从而在基层内部形成黏结缺陷区域，降低纤维增强水泥稳定基层的整体性和力学性能[27]。

3 纤维增强CSM的力学性能研究

3.1 PET纤维

综合文献[28-37]的研究成果，PET纤维对CSM力学

强度的改善存在最优掺量。表1为PET纤维对CSM力学强度的影响。鲁攀等[35]研究发现，当PET纤维掺量为0.7‰时，CSM的UCS和间接拉伸强度(ITS)均达到峰值，较未掺纤维的对照组分别提升约18.0%和30.0%。该掺量被认为是增强效果与经济性之间的最佳平衡点。对于PET纤维最佳长度，研究在50~70 mm之间达成共识，但需要综合考虑拌和性与增强效果。鲁攀等[35]研究发现，PET纤维长度超过90 mm后，强度增长趋于平缓，但过长的纤维会增加拌和难度，因此推荐PET纤维长度为70 mm，以优化施工性能与力学性能。徐秀维[37]也得出相同结论。然而，许鹏等[38]则认为19 mm为最佳PET纤维长度，这种差异可能与纤维形态或实验条件有关。此外，所有研究均发现PET纤维的掺入会降低CSM的抗压回弹模量(RM)，且降低幅度随纤维掺量增加而趋于平缓[28-34,38-39]。除了掺量和长度，纤维形态和养护龄期也是重要影响因素。徐秀维[37]研究发现，丝状和网状PET纤维对FS的增强效果优于条状纤维。房英锋[40]研究发现，PET纤维对早期强度影响较小，28 d强度随纤维掺量的增加呈先升后降趋势。丘晓坚[41]则发现，CSM的7 d强度通常随纤维掺量的增加呈先升后降趋势，而28 d及90 d的长期强度则可能持续增强或稳定提升。这表明PET纤维的增强效果是一个与时间相关的动态过程。从表1可以看出，与未添加纤维的对照组相比，PET纤维的最佳长度范围为50~70 mm，最佳掺量为0.06%~0.08%。28 d UCS增长幅度为7.0%~18.0%，ITS增长幅度为7.6%~30.0%，FS增长幅度为15.5%~37.5%，RM则随纤维掺量增加呈逐渐降低趋势。

表1 PET纤维对CSM力学强度的影响

Tab.1 Effect of PET fiber on mechanical strength of CSM

序号	最佳纤维长度/mm	最佳纤维掺量/%	天数/d	UCS	ITS	FS	RM	文献来源
1	50	0.07	90	+7.0%	+7.6%		降低	LIU[28]
2	50	0.07	28	+9.0%	+9.5%		降低	付春梅等[29-31]
3	50	0.07	28	+7.0%	+8.0%		降低	尚志刚等[32]
4	50	0.07	7	+10.0%			降低	韦小碧等[33-34]
5	70	0.07	28	+18.0%	+30.0%			鲁攀等[35]
6		0.07	7	+10.9%				陈浩冉[36]
7	70	0.07	28			+15.5%		徐秀维[37]
			90			+37.5%		
8	19	0.07	7	几乎无影响	+27.5%		降低	许鹏等[38]
9	50						降低	赵文姣等[39]
10	50~60	0.06~0.08	28	+16.0%	+17.5%			房英锋[40]
11	18	0.08	28	+13.1%	+17.1%			丘晓坚[41]

3.2 PP纤维

根据多项研究探讨PP纤维对CSM力学性能的增强作用，并对其最佳掺量和长度进行界定。纤维掺量是影响强度的关键因素，其有效范围普遍集中在0.05%~0.30%[42-56]。表2为PP纤维对CSM力学强度的影响。在长度方面，18~20 mm被多数研究证明为最优PP纤维选择[42-45,47-51,53-54]。YIN等[42]、段志勇等[43]指出，PP纤维在0.15%掺量与18 mm长度的组合下效果最佳；张裕卿等[48]、张虹[49]、康爱红等[50]、徐建成[51]的研究也验证了PP纤维在0.10%掺量与19~20 mm长度下能够显著提升强度。在上述参数下，PP纤维的加入能够使CSM的UCS、ITS和FS均显著提升。宋金华等[46]发现，在0.10%掺量下，7 d UCS和ITS分别提高11.8%和24.3%；张裕卿等[48]报道，180 d ITS可提升19.8%；MA等[53]指出，PP纤维0.05%掺量和19 mm长度下，FS最优增幅达11.8%。阳兰等[54]发现，PP纤维在0.30%高纤维掺量下，CSM的UCS与ITS仍能够得到提升。然而，多数研究认为PP纤维会导致CSM的RM下降[30,44-45,55]。

部分研究观察到PP纤维对CSM力学性能影响的特殊时变规律和基于特定材料配比的不同表现。李艳春等[55]发现独特的“先抑制后增强”效应，即当PP纤维采用25 mm纤维、0.07%掺量时，CSM的7 d UCS与ITS分别下降5.7%和4.2%，但至60 d时，两者分别实现5.4%和8.6%的增长，同时各龄期RM均下降。此外，在废胶粉改性CSM等特定体系中，董飞[56]发现，6 mm短纤维与0.08%掺量的PP纤维可使7 d UCS达到最优，这说明纤维参数需根据材料体系进行针对性优化。

从表2可以看出，与未添加纤维的对照组比，PP纤维的最佳长度范围为18~20 mm，最佳掺量为0.05%~0.15%；7 d UCS增长幅度为3.1%~102.4%，7 d ITS增长幅度为2.4%~68.8%，28 d FS增长幅度为10.7%~12.0%，RM则随纤维掺量的增加呈逐渐降低趋势。

3.3 PVA纤维

PVA纤维的掺入能够显著提升CSM的力学性能，其中纤维长度和掺量是关键参数[57-69]。表3为PVA纤维对CSM力学强度的影响。ZHAO[57]、贺亚飞[58]及乌日乐[59]等通过实验确定PVA纤维长度24 mm、掺量0.06%为最佳组合，能够最大化改善UCS与ITS。熊延华等[60]验证了上述结论，发现该参数下强度可提升约24%~26%。部分学者研究界定的PVA纤维有效范围集中在长度12~30 mm、掺

量0.03%~0.06%之间[61-62]。李燕军[63]提出,PVA纤维掺量0.07%配合20 mm长度也可达到峰值性能。

在最佳参数下,PVA纤维对CSM各项强度指标均有显著提升。PVA纤维的加入使UCS、ITS和FS均呈现增长趋势,存在最佳掺量阈值(约0.06%~0.09%),超过后增长趋缓甚至下降[59,64-66]。李彩霞[67]具体指出,PVA纤维在0.08%掺量下90 d UCS、FS和RM分别提升14.4%、18.5%和8.9%。值得注意的是,纤维对不同强度指标的最佳长度存在细微差异。WANG等[68]发现,保持FS最佳的PVA纤维长度为24 mm,保持ITS最佳的PVA纤维长度为18 mm;陈龙[64]则报道,18 mm的PVA纤维长度在多项指标上表现最优。

表2 PP纤维对CSM力学强度的影响

Tab.2 Effect of PP fiber on mechanical strength of CSM

序号	最佳纤维长度/mm	最佳纤维掺量/%	天数/d	UCS	ITS	FS	RM	文献来源
1	18	0.15	7	+102.4%				YIN等[42]
			28		+161.1%			
2	18	0.15	7	+90.8%				段志勇等[43]
			28		+144.0%			
3	10-20	0.10	28	+11.8%	+10.1%	+10.7%	-18.8%	ZHANG等[44-45]
4	10~15	0.10	7	+11.8%	+24.3%			宋金华等[46]
5	18	0.10	28	+8.0%	+20.0%	+12.0%		田港胜等[47]
6	20	0.10	180		+19.8%			张裕卿等[48]
7	19	0.10	7	+31.3%	+68.8%			张虹[49]
8	19	0.10	7		+10.2%	+11.2%		康爱红等[50]、徐建成[51]
9	12	0.10	7	+5.1%~15.9%	+14.3%~25.0%			王婧等[52]
10	19	0.05	180			+11.8%		MA等[53]
11		0.05	7	+3.1%	+2.4%		降低	付春梅等[30]
12	25	0.07	7	-5.7%	-4.2%			李艳春等[55]
			28	+3.5%	+6.3%		降低	
			60	+5.4%	+8.6%			
13	19	0.30	28	+6.0%	+21.0%			阳兰等[54]
14	6	0.08						董飞[56]

表3 PVA纤维对CSM力学强度的影响

Tab.3 Effect of PVA fiber on mechanical strength of CSM

序号	最佳纤维长度/mm	最佳纤维掺量/%	天数/d	UCS	ITS	FS	RM	文献来源
1	24	0.060		+20.6%	+12.5%		+4.0%	ZHAO等[57]
2	24	0.060	28				+14.2%	贺亚飞[58]
			90	+15.2%	+8.3%	+8.6%		
3	24	0.060	28	+34.1%	+52.0%		+13.3%	乌日乐[59]
4	24	0.060	7	+26.0%	+24.0%			熊延华等[60]
5	12~24	0.030~0.045	7	+7.2~32.8%	-9.5%~23.8%			ZHAO等[61]
6	12~30	0.030~0.060	7	+14.0%	+29.0%		+8.0%	WANG等[62]
7	20	0.070	7	+29.3%				李燕军[63]
			90		+46.5%	+30.9%		
8	18	0.060	28	+3.4%	+3.5%	+15.6%		陈龙[64]
			90				+3.6%	
9	12	0.070	90	+36.5%	+3.6%		增加	LI等[65]
10	50	0.090	90	+21.3%	+13.8%			罗坤[66]
11	15	0.080	90	+14.4%		+18.5%	+8.9%	李彩霞[67]
12	18~24	0.045						WANG等[68]
13	12~30	0.045		提高	提高	提高	降低	王世鹏[69]

尽管研究普遍认可PVA纤维对强度的增强作用,但在RM的影响上却存在分歧。多数研究观察到RM提升[57-58,62,64-65,67],但王世鹏[69]却报道RM降低,而乌日乐[59]则发现RM随掺量增加呈先升后降趋势。这种差异可能与材料组成、养护条件或试验方法有关。此外,纤维增强效果具有长期持续性[65-67],但对最佳参数的认知仍存在细微

差别，建议根据工程具体需求在12~24 mm长度和0.03~0.09%掺量范围内进行针对性优化。

从表3可以看出，与未添加纤维的对照组相比，PVA纤维最佳长度为12~24 mm，最佳掺量为0.03%~0.09%。7 d UCS增长幅度7.2%~32.8%；7 d ITS增长幅度12.5%~29.0%；90 d FS增长幅度8.6%~30.9%，RM总体呈增长趋势，但个别研究提示其可能降低。

3.4 PAN纤维

PAN纤维在CSM中的应用目前较少。江臣等[12]、周跃明等[13]研究发现，PAN纤维在CSM中的最优掺量为0.07%，与未掺PAN纤维的CSM相比，掺入PAN纤维后，CSM基层7 d UCS可提升14.3%。嵇磊等[70]进一步研究发现，当PAN纤维掺量为0.07%、长度为12 mm时，CSM力学性能最优，与空白对照组相比，掺纤维CSM的28 d UCS可提升10%，28 d FS可提升30%。而刘斌[71]则认为，PAN纤维在CSM中的最佳掺量为0.06%，与普通CSM相比，掺PAN纤维的CSM材料7 d UCS可提升12.8%。

4 结论

本研究确定了高分子合成纤维在CSM基层中的适宜长度与掺量。PET纤维长度为50~70 mm，掺量为0.06%~0.08%；PP纤维长度为18~20 mm，掺量为0.05%~0.15%；PVA纤维长度为12~24 mm，掺量为0.03%~0.09%。在各自适宜参数下，3种纤维均可有效提升CSM的力学强度，其中PET纤维可使UCS、ITS与FS提升7.0%~37.5%，PP纤维可使UCS、ITS与FS提升2.4%~161.1%，PVA纤维可使UCS、ITS与FS提升3.4%~52.0%。在RM方面，PVA纤维可提高CSM的RM，而PET与PP纤维则表现为降低作用。此外，适量PAN纤维亦能在一定程度上改善CSM力学性能，但其增强效果与最优参数仍需进一步验证。本文系统分析高分子合成纤维对CSM基层力学强度与增韧机理的影响，明确各类纤维的适宜长度与掺量，但未涉及纤维对基层抗裂性能的影响及经济性对比，后续需要结合抗裂性能进一步优化纤维参数，同时进行综合经济性评估。当前研究较少关注纤维长径比及分散性的影响，亦缺乏天然纤维在CSM基层中的应用探索，未来可围绕上述方向开展系统研究，以拓展纤维种类优选依据。高分子合成纤维在CSM基层中应用前景广阔，契合固废资源化趋势，后续应着力优化纤维掺量与分散性，结合工程需求开发专用纤维，推动绿色道路材料发展，实现经济效益与环境效益的协同提升。

参考文献

[1] POULIKAKOS L D, SCHLATTER F, HUBER L, et al. Multi-scale mechanical and acoustic characterization of low noise pavements[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2024, 31(51): 61073-61095.

[2] WANG C H, HUANG S, CHEN Q, et al. Materials, preparation, performances and mechanism of polyurethane modified asphalt and its mixture: A systematic review[J]. Journal of Road Engineering, 2023, 3(1): 16-34.

[3] FENG D C, CAO J W, GAO L B, et al. Recent developments in asphalt-aggregate separation technology for reclaimed asphalt pavement[J]. Journal of Road Engineering, 2022, 2(4): 332-347.

[4] 崔纲, 李程, 王魏巍, 等. 基于离散元的水泥稳定碎石级配设计理论及强度与收缩特性影响规律研究[J]. 中国公路学报, 2025, 38(6): 196-208.

[5] DENG C Q, JIANG Y J, YI Y, et al. Compaction method development and materials performance evaluation of large size cement-treated macadam materials[J]. Construction and Building Materials, 2023, 397: 132428.

[6] 张阳, 王傲鹏, 张靖霖, 等. 水泥稳定碎石材料干燥收缩研究综述[J]. 吉林大学学报(工学版), 2023, 53(2): 297-311.

[7] 邵伟, 韩瑞凯, 李召峰, 等. 赤泥基胶凝材料稳定碎石抗裂性能及评价方法[J]. 工程科学学报, 2024, 46(11): 2055-2062.

[8] CHEN X K, DENG C H, ZHAI X M, et al. Study on anti-segregation performance of cement stabilized macadam and its impact on mechanical and shrinkage properties[J]. Frontiers in Materials, 2024, 11: 1411558.

[9] JALOTA S, SUTHAR M. Prediction of Marshall stability of asphalt concrete reinforced with polypropylene fibre using different soft computing techniques[J]. Soft Computing, 2024, 28(2): 1425-1444.

[10] 袁玉卿, 李世豪, 周伏波. 芳纶-聚丙烯腈混杂纤维混凝土耐久性能研究[J]. 公路, 2025, 70(8): 53-60.

[11] 赵胜前, 游庆龙, 李京洲, 等. 改性聚酯纤维对机场水泥混凝土的增韧阻裂效果分析[J]. 材料导报, 2024, 38(13): 302-309.

[12] 江臣, 郭赵元, 金光来, 等. 基于纤维增强的水稳基层抗裂性能提升技术研究[J]. 现代交通与冶金材料, 2022, 2(1): 19-24.

[13] 周跃明, 鲁飞, 褚少华, 等. 高速公路水稳基层抗裂性能提升需求及方法研究[J]. 四川水泥, 2024(7): 246-249.

[14] ZHAO G F, WANG K S, ZHANG L, et al. Mesomechanical behavior of cement-stabilized macadam in uniaxial compression tests[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2024, 150(9): 04024065.

[15] PAN Y Y, CHEN A Q, LIN M, et al. Microscale characterization of an anti-cracking stone base course filled with cement stabilized macadam [J]. Construction and Building Materials, 2024, 425: 136037.

[16] TIAN T, JIANG Y J, ZHANG Y, et al. Strong interlocking skeleton gradation design and performance evaluation of cement-stabilised crushed gravel via vertical vibration test method[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2023, 24(2): 2021404.

[17] 李鹏, 夏雨, 邬艳, 等. 骨架密实型水泥稳定级配碎石设计简化理论与方法[J]. 公路交通科技, 2024, 41(增刊1): 86-92.

[18] 谭波, 唐琛皓, 陈平, 等. 骨架密实型稳定碎石制备及性能研究[J]. 武汉理工大学学报, 2023, 45(2): 20-26.

[19] 王国清, 郭烽, 王志斌, 等. 不同因素对水泥稳定碎石力学性能与疲劳特性的影响[J]. 公路交通科技, 2023, 40(增刊1): 173-183.

[20] 刘超超, 陈梦洁, 张洪刚, 等. 复杂服役条件下长寿命水泥稳定碎石疲劳特性[J]. 交通运输工程学报, 2024, 24(5): 144-153.

[21] DENG C Q, JIANG Y J, TIAN T, et al. Resilient modulus and influencing factors of vertical vibration compacted cement-stabilized macadam[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2021, 22(11): 1435-1445.

[22] 田小革, 胡宏立, 李光耀, 等. 双层水泥稳定碎石基层层间压实度差异对基层整体性能的影响[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2023, 20(3): 69-78.

[23] 付军, 张澳, 赵洲峰, 等. 混掺固废磷石膏纤维增强水泥基复合材料

强度特性与机制[J]. 复合材料学报, 2024, 41(9): 5070-5082.
[24] LIU Z J, WANG D Q, WEI X B, et al. Impact of fiber diameter on-road performance of cement-stabilized macadam[J]. The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering, 2017, 12(1): 12-20.
[25] 秦施琦, 任泽春, 王辰希, 等. 基于3D打印的木材细胞壁仿生设计[J]. 复合材料学报, 2023, 40(2): 1085-1095.
[26] JEON J H, YOON C K, QUAN Y J, et al. Effect of fiber entanglement in chopped glass fiber reinforced composite manufactured via long fiber spray-up molding[J]. Heliyon, 2023, 9(12): e22170.
[27] 薛振华, 关博文, 樊兴华. 掺玄武岩纤维水泥稳定再生碎石基层性能研究[J]. 中外公路, 2021, 41(5): 269-273.
[28] LIU Z J. Experimental research on the engineering characteristics of polyester fiber-reinforced cement-stabilized macadam[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2015, 27(10): 04015004.
[29] 付春梅, 齐善忠, 任永明. 聚酯纤维水泥稳定碎石力学性能研究[J]. 中外公路, 2015, 35(6): 291-296.
[30] 付春梅, 齐善忠. 聚酯纤维和聚丙烯纤维水泥稳定碎石力学性能研究[J]. 公路, 2015, 60(1): 37-42.
[31] 付春梅, 齐善忠, 贾春燕. 聚酯纤维水泥稳定碎石抗干缩性能研究[J]. 公路, 2014, 59(11): 188-193.
[32] 尚志刚, 魏宏. 聚酯纤维对水泥稳定碎石的强度影响规律研究[J]. 中外公路, 2012, 32(2): 253-256.
[33] 韦小碧. 聚酯纤维径变对水泥稳定碎石收缩及力学性能影响研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2018.
[34] 韦小碧, 顾佩, 柳志军, 等. 聚酯纤维水泥稳定碎石力学性能试验研究[J]. 山东交通学院学报, 2017, 25(4): 37-42.
[35] 鲁攀, 凡孝均. 聚酯纤维对水泥冷再生稳定碎石强度影响的试验研究[J]. 中外公路, 2013, 33(4): 321-324.
[36] 陈浩冉. 聚酯-玻璃混杂纤维水泥稳定碎石无侧限抗压强度试验研究[J]. 路基工程, 2020(4): 73-76.
[37] 徐秀维. 聚酯纤维对水泥稳定碎石抗弯拉性能影响的试验研究[J]. 中外公路, 2012, 32(6): 297-300.
[38] 许鹏, 卢明智, 王楹. 纤维增强水泥稳定碎石路用性能研究[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2017, 13(9): 106-108.
[39] 赵文姣, 薛金顺, 于远征. 聚酯纤维对水泥稳定碎石回弹模量影响[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2014, 10(5): 89-91.
[40] 房英锋. 聚酯纤维和振动搅拌工艺对水泥稳定碎石的路用性能影响规律研究[J]. 中外公路, 2019, 39(6): 244-248.
[41] 丘晓坚. 聚酯纤维对水泥稳定碎石基层的性能影响研究[J]. 山东交通科技, 2019(4): 68-70.
[42] YIN J M, JIANG Y, MENG W, et al. Influence on pavement performance of porous cement stabilized macadam by adding polypropylene fiber[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2018, 189(4): 042011.
[43] 段志勇, 周义生, 刘东杰, 等. 聚丙烯纤维对多孔水泥稳定碎石路用性能的影响[J]. 中国公路, 2023(3): 103-105.
[44] ZHANG P, LI Q F, WEI H. Investigation of flexural properties of cement-stabilized macadam reinforced with polypropylene fiber[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2010, 22(12): 1282-1287.
[45] ZHANG P, LI Q F. Effect of polypropylene fibre on mechanical and shrinkage properties of cement-stabilised macadam[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2009, 10(6): 435-445.
[46] 宋金华, 徐传良. 纤维增强水泥稳定不同骨料性能试验研究[J]. 公路, 2022, 67(2): 237-241.
[47] 田港胜, 罗袁義. 聚丙烯纤维增强水泥稳定碎石路用性能试验研究[J]. 交通科技, 2024(2): 137-141.
[48] 张裕卿, 顾章义, 李辉, 等. 基于开裂应变能平衡原理的纤维水泥稳定破碎卵石增韧研究[J]. 中国公路学报, 2023, 36(12): 197-208.
[49] 张虹. 聚丙烯纤维在水稳碎石基层中的应用[J]. 交通科学与工程, 2019, 35(1): 20-24.
[50] 康爱红, 肖鹏, 徐建成. 掺聚丙烯纤维的水泥稳定碎石材料抗裂性能研究 [J]. 施工技术, 2012, 41(24): 102-106.
[51] 徐建成. 掺聚丙烯纤维的水泥稳定碎石在市政道路中的应用研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2012.
[52] 王婧, 陈莉, 刘梦溪. 聚丙烯纤维对水泥稳定再生混凝土的增强效应研究[J]. 高科技纤维与应用, 2025, 50(4): 13-19.
[53] MA Y H, GU J Y, LI Y, et al. The bending fatigue performance of cement-stabilized aggregate reinforced with polypropylene filament fiber[J]. Construction and Building Materials, 2015, 83: 230-236.
[54] 阳兰, 严红, 汤东. 聚丙烯纤维增强再生水泥稳定碎石基层材料性能研究[J]. 路基工程, 2021(3): 110-114.
[55] 李艳春, 李侠, 吕瑞. 膨胀剂、聚丙烯纤维对水泥稳定碎石力学性能的影响[J]. 公路, 2011, 56(12): 143-146.
[56] 董飞. 掺废橡胶粉纤维水泥稳定碎石抗裂性能研究[D]. 南京: 东南大学, 2018.
[57] ZHAO Y, YANG X, ZHANG Q Y, et al. Crack resistance and mechanical properties of polyvinyl alcohol fiber-reinforced cement-stabilized macadam base[J]. Advances in Civil Engineering, 2020, DOI: 10.1155/2020/6564076.
[58] 贺亚飞. 掺聚乙烯醇(PVA)纤维水泥稳定碎石的力学及抗裂性能研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2016.
[59] 乌日乐. 聚乙烯醇纤维水泥稳定碎石路用性能研究[D]. 西安: 长安大学, 2020.
[60] 熊延华, 屈会朋, 阳应荣, 等. 聚乙烯醇纤维水泥稳定碎石的疲劳性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2022, 41(10): 3493-3500.
[61] ZHAO C H, LIANG N X, ZHU X L, et al. Fiber-reinforced cement-stabilized macadam with various polyvinyl alcohol fiber contents and lengths[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2020, 32(11): 04020312.
[62] WANG C H, LIU J K, CHEN S C, et al. Polyvinyl alcohol fiber cement-stabilized macadam: A review and performance evaluation[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), 2024, 11 (3): 406-423.
[63] 李燕军. 添加PVA纤维的水泥稳定碎石混合料抗裂与耐久性能研究[J]. 公路工程, 2020, 45(5): 180-188.
[64] 陈龙. 聚乙烯醇纤维增强水泥稳定花岗岩碎石基层性能研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2023.
[65] LI Q H, LIU L L, LI Y S, et al. Effect of fiber on mechanical properties of cement stabilized macadam mixture[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 2044(1): 012045.
[66] 罗坤. 掺聚乙烯醇纤维水泥稳定碎石抗裂性能研究[J]. 湖南交通科技, 2021, 47(3): 63-65.
[67] 李彩霞. 聚乙烯醇纤维增强水泥稳定碎石材料性能研究[J]. 交通科学与工程, 2018, 34(1): 19-22.
[68] WANG S P, LIANG N X. The study of the basic mechanical properties of polyvinyl alcohol fiber cement stabilized macadam[J]. International Journal of Engineering Research and Applications, 2015, 5(6): 4-5.
[69] 王世鹏. 聚乙烯醇纤维水泥稳定碎石材料路用性能研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2016.
[70] 嵇磊, 张孝胜, 刘朝晖, 等. 基于性能提升的新型水泥稳定碎石混合料开发[J]. 科技和产业, 2024, 24(23): 210-217.
[71] 刘斌. 纤维增强型水泥稳定碎石混合料级配设计及性能验证[J]. 交通世界, 2022(1): 34-35.