

再生玻璃粉掺量对透水砂浆性能的影响研究

齐雪俊

(中铁十八局集团第五工程有限公司, 天津 300450)

摘要: 为探究再生玻璃粉作为矿物掺合料在透水砂浆中的应用潜力, 评估其对材料综合性能的影响规律, 通过设计0%、10%、20%、30%四个梯度掺量的实验组, 重点研究了玻璃粉掺量对透水砂浆新拌性能、硬化性能和耐久性能的多维度影响。试验采用标准测试方法, 定量分析了再生玻璃粉对砂浆流变特性、强度发展规律、孔隙结构特征以及表面抗磨损能力的调控作用。结果表明, 再生玻璃粉的掺入使新拌砂浆流动度提升6.5%, 在20%掺量时28天抗压强度仍保持为对照组的84.9%; 材料透水性能随掺量增加呈规律性变化, 20%掺量时透水系数为1.58 mm/s; 随着掺量增加, 透水系数呈下降趋势, 但20%掺量后变化趋于平缓, 建议工程应用中控制掺量不超过20%以保证透水效果; 再生玻璃粉显著提升了材料的耐磨性能, 30%掺量可使磨坑长度减少38%。本研究为废弃玻璃的资源化利用和环保型透水砂浆的研发提供了理论依据和技术参考。

关键词: 再生玻璃粉; 透水砂浆; 力学性能; 透水性能; 耐磨性

中图分类号: TU528

文献标识码: A

Study on the Effect of Recycled Glass Powder Content on the Performance of Permeable Mortar

QI Xuejun

(China Railway 18th Bureau Group No. 5 Engineering Co., Ltd., Tianjin 300450, China)

Abstract: This study aims to explore the potential of recycled glass powder as a mineral admixture in permeable mortar and evaluate its impact on the comprehensive performance of the material. By designing experimental groups with four substitution gradients (0%, 10%, 20% and 30%), the research focuses on the multi-dimensional effects of glass powder content on the fresh properties, hardened properties, and durability of permeable mortar. Standard testing methods were employed to quantitatively analyze the regulatory effects of recycled glass powder on the rheological characteristics, strength development, pore structure, and surface wear resistance of the mortar. The results indicate that the incorporation of recycled glass powder increases the fluidity of fresh mortar by 6.5%, while maintaining over 84.9% of the 28-day compressive strength of the control group at a 20% substitution rate. The permeability of the material exhibits a regular trend with increasing substitution rates, reaching a permeability coefficient of 1.58 mm/s at 20% substitution. As the substitution rate increases, the permeability coefficient shows a declining trend, but the change stabilizes beyond 20% substitution. It is recommended to limit the substitution rate to no more than 20% in engineering applications to ensure optimal permeability. Additionally, recycled glass powder significantly enhances the wear resistance of the material, with a 30% substitution rate reducing the wear scar length by 38%. This study provides a theoretical foundation and technical reference for the resource utilization of waste glass and the development of environmentally friendly permeable mortar.

Key words: recycled glass powder; pervious mortar; mechanical properties; permeability; wear resistance

收稿日期: 2025-06-04

作者简介: 齐雪俊, 助理工程师, 本科, 研究方向为混凝土力学性能及透水性能研究

随着城市化进程的加速,传统不透水路面积材料导致的雨水径流增加、热岛效应加剧等问题日益突出,透水砂浆作为一种生态友好型建筑材料,因其优异的渗水性能和环境协调性,逐渐成为海绵城市建设的重要选择^[1]。然而,透水砂浆的力学性能与耐久性常受其多孔结构制约,如何在保障透水功能的同时提升材料的综合性能,已成为该领域当前的研究关键之一^[2]。另一方面,废弃玻璃的堆积填埋不仅占用土地资源,其难以降解的特性还对生态环境构成长期威胁,如何实现此类固废的高效资源化利用,是土木工程材料领域亟待解决的课题^[3]。

近年来,矿物掺合料的应用为改善透水砂浆性能提供了新的技术路径^[4]。再生玻璃粉作为一种新型矿物掺合料,因其特殊的物理化学特性而备受关注^[5]。从微观结构来看,玻璃粉主要由非晶态 SiO_2 组成,其表面光滑的球形颗粒能够有效改善新拌浆体的流变性能^[6];从化学活性角度分析,玻璃粉在碱性环境下可发生缓慢的火山灰反应,生成具有胶凝性的 C-S-H 凝胶^[7],这对提升材料的后期强度具有重要意义。然而,现有研究存在明显的局限性:一方面,多数研究仅关注玻璃粉对普通砂浆工作性能和力学性能的影响,而忽视了其在多孔体系中的特殊表现^[8]。透水砂浆独特的连通孔隙结构可能导致玻璃粉的填充效应和活性效应呈现不同于密实体系的特征。另一方面,关于玻璃粉最佳掺量的研究结论差异较大,有学者建议将掺量控制在 15% 以内以保证强度,亦有研究表明 30% 掺量仍可满足工程要求,这一分歧也印证了材料性能受配合比设计和养护条件的显著影响^[9]。此外,透水砂浆在实际应用中需承受反复冻融、干湿循环及磨损等复杂环境作用,目前针对玻璃粉改性透水砂浆长期耐久性的研究仍属空白,特别是玻璃粉-水泥-骨料三相界面的微观结构演变规律尚不清晰^[10]。因此,系统研究再生玻璃粉对透水砂浆宏观性能和微观结

构的综合影响,建立掺量-性能的定量关系模型,对推动该材料的工程应用具有重要价值。

基于此,本研究以废弃玻璃粉为研究对象,通过设计梯度掺量系统考察其对透水砂浆新拌性能、力学特性和耐久性的影响,重点分析玻璃粉掺量对流动度、抗压强度、透水系数及耐磨性能的作用规律,旨在为废弃玻璃的高值化利用提供理论依据,同时为开发兼具环保效益与工程适用性的透水砂浆材料提供技术支撑。

1 实验

1.1 原材料

本实验采用的主要原材料: P·O 42.5 级普通硅酸盐水泥,其主要化学成分如表 1 所示,各项性能指标均符合《通用硅酸盐水泥》(GB 175—2023)标准要求,由郑州万树建材有限公司提供;细骨料选用细度模数为 2.6 的天然河砂,如图 1(a)所示,表观密度为 $2\,650\text{ kg/m}^3$,含泥量为 0.8%,由郑州万树建材有限公司提供。再生玻璃粉由废弃玻璃瓶经破碎、球磨及筛分工艺制备而成,如图 1(b)所示,其粒径分布范围为 $5\sim 50\text{ }\mu\text{m}$,活性指数(28 d) $\geq 75\%$,其主要化学成分如表 1 所示。此外,实验还使用了聚羧酸系高效减水剂和符合 JGJ 63—2006 标准的市政自来水。



(a) 细骨料 (b) 再生玻璃粉

图 1 实验用细骨料及再生玻璃粉

表 1 胶凝材料的主要化学成分

凝胶材料 类型	质量分数/%									
	SiO_2	CaO	Na_2O	MgO	Al_2O_3	Fe_2O_3	K_2O	SO_3	TiO_2	其他
再生玻璃粉	67.48	14.03	10.47	5.22	1.18	0.42	0.31	0.29	0.11	0.49
水泥	22.53	58.97	0.26	2.88	6.32	4.01	0.99	2.82	0.51	0.71

1.2 试验方案

本研究设计了玻璃粉质量分数掺量为 0%、10%、20%、30% 的四组透水砂浆配合比,各组

均保持水胶比 0.45、砂率 40% 不变。0% ~ 30% 的梯度掺量设置,可系统评估玻璃粉对透水砂浆性能的影响规律。其中 10% 为矿物掺合料常规掺

量，20% 用于考察中等掺量的改性效果，30% 用于评估高掺量的应用可行性。以确保各组试件工作性能具有可比性。试验中统一控制水胶比与胶砂比参数，本实验具体配合比如表 2 所示，其中 BL-00 为未掺加玻璃粉的对照组。

表 2 透水砂浆配合比设计

组号	配合比/ (kg/m ³)				
	水泥	玻璃粉	水	砂	减水剂
BL-00	370	0	123	1 600	6
BL-10	333	37	123	1 600	6
BL-20	296	74	123	1 600	6
BL-30	259	111	123	1 600	6

1.3 测试方法

本研究采用标准方法制备透水砂浆试样，具体制备工艺如下：首先将水泥、玻璃粉和骨料在强制式搅拌机中干拌 60 s，确保已混合均匀；随后缓慢加入含有减水剂的水溶液，继续搅拌 120 s 以获得均匀的拌合物；最后将拌合物分两层装入模具，每层以标准方法振实 30 s。试样成型后立即用塑料薄膜覆盖表面，防止水分蒸发。养护过程严格遵循标准规范：试样在 (20 ± 1)℃、相对湿度 ≥ 95% 的标准养护室中养护 24 h 后脱模；脱模后继续在相同温湿度条件下养护至规定龄期。养护期间定期检查试样的表面状态和养护环境参数，确保养护条件稳定。

工作性能测试依据《水泥胶砂流动度测定方法》(GB/T 2419—2005) 标准，采用跳桌法测定砂浆流动度，振动次数为 25 次。力学性能测试使用 WAW-1000 型万能试验机，其中抗压强度和抗折强度的加载速率分别控制在 (2.4 ± 0.2) kN/s 和 (50 ± 10) N/s；透水系数按照《透水砂浆》(JC/T 2727—2022) 进行测试，测试水头差为 100 mm；耐磨性依据《无机地面材料耐磨性能试验方法》(GB/T 12988—2009) 进行测试；孔隙率通过真空饱水法 (ASTM C642-13) 计算。

2 结果分析

2.1 工作性能

砂浆的工作性能是指新拌砂浆在施工过程中表现出的工艺特性，直接影响其搅拌、运输、浇筑和成型等操作难易程度，可以用流动度来反映。本研究中透水砂浆的流动度如图 2 所示。由图可知，未掺加玻璃粉的对照组试样初始流动度

为 200 mm，当玻璃粉掺量达到 10% 时，流动度增至 206 mm，增幅为 3%。继续提高玻璃粉掺量至 20%，试样的流动度进一步上升至 210 mm，相较于对照组提升了 5%。在 30% 掺量条件下，试样的流动度达到 213 mm，增幅提升至 6.5%。随着玻璃粉掺量的增加，透水砂浆的流动性能呈现轻度上升趋势。这种现象主要归因于玻璃粉独特的物理特性，其球形颗粒能够有效降低骨料间的摩擦系数，同时细小的粒径有助于完善颗粒级配体系。通过填充水泥颗粒间隙，玻璃粉显著减少了混合料内部阻力，从而增强了浆体的流动特性。尽管流动度随掺量增加有所提高，但变化幅度有限，这表明再生玻璃粉对新拌砂浆工作性能的改善作用在实际工程中可能并不显著。拟合结果显示，流动度与玻璃粉掺量之间存在显著的线性关系，决定系数 R^2 达到 0.976，这表明在试验设定的掺量范围内，玻璃粉对工作性能的改善效果与其掺量密切相关。

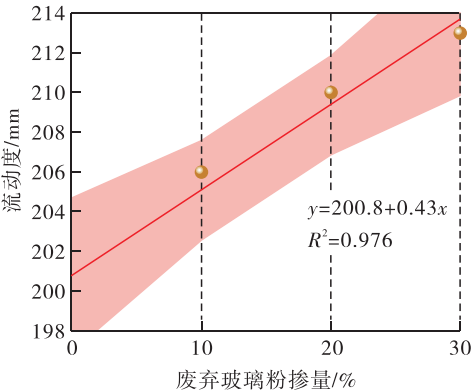


图 2 废旧玻璃粉对透水砂浆流动度的影响

2.2 抗压强度及抗折强度

由图 3 可知，未添加玻璃粉的对照组试样在 3 天、7 天和 28 天的抗压强度依次为 20.64 MPa、26.43 MPa 和 36.28 MPa，符合水泥基材料典型的强度增长规律。当玻璃粉掺量为 10% 时，各龄期抗压强度变化幅度有限，说明在较低掺量条件下，玻璃粉的微集料填充作用能够在一定程度上抵消其活性不足带来的不利影响。随着掺量提高到 20%，试件早期强度出现轻微降低，但 28 天时强度仍维持在 30.81 MPa，这反映出玻璃粉的火山灰活性在长期养护过程中逐渐发挥作用。当掺量达到 30% 时，试样强度下降趋势更为明显，3 天、7 天和 28 天抗压强度分别降低至 12.01 MPa、16.92 MPa 和 23.61 MPa。分析原因主要有：①玻璃粉的火山灰活性迟滞效应导致早期水化程度不

足^[11]，在掺量为20%、30%时尤为明显，通过3天、7天龄期的抗压强度发展滞后也得到印证；②微观界面分析显示，玻璃粉-水泥-骨料三相界面过渡区（ITZ）存在明显的弱化现象，玻璃粉表面光滑特性降低了与水泥水化产物的机械咬合力；③高掺量下玻璃粉产生的“稀释效应”不仅减少了体系的水泥用量，更关键的是破坏了水泥水化产物的连续网络结构。此外，20%掺量组的28天强度仍能达到对照组的84.9%，这一结果表明该掺量水平在保证材料环保性能的同时，仍能维持较好的力学性能。

对比国际同类研究，本试验20%掺量下84.9%的抗压强度保持率与Parghi等报道的常规砂浆强度保持率（80%~90%）基本吻合^[12-13]，而30%掺量下强度保持率仅为65.1%，强度衰减程度相较于文献报道更为显著。这种差异源于透水砂浆多孔结构对界面过渡区性能的敏感性，与Khan等在泡沫混凝土中的发现一致，表明多孔体系对玻璃粉掺量变化具有更强的响应特性^[14]。

在抗折强度方面，玻璃粉的影响更为突出。对照组透水砂浆试样3天、7天和28天的抗折强度分别为4.32 MPa、5.36 MPa和6.63 MPa（图4）。对于20%掺量组，虽然3天强度降低至3.38 MPa，但28天强度仍可达到6.12 MPa，说明玻璃粉的掺入会暂时降低材料的抗折性能，但后期火山灰反应能够部分补偿这一损失。当掺量增至30%时，各龄期试样抗压抗折强度均显著下降，3天、7天和28天强度值分别为3.03 MPa、3.94 MPa和5.39 MPa，较对照组降低幅度在18.7%至29.86%之间，这种现象可能与玻璃粉削弱了骨料和浆体界面过渡区的粘结性能有关。

由图5可知，砂浆抗折强度与抗压强度之间存在稳定的线性关系。通过建立两者之间的回归模型，可得其决定系数 R^2 达到0.977，显示出良好的相关性。这一发现为通过抗压强度预测抗折强度提供了理论支持，对工程应用具有重要参考价值。

2.3 透水系数

由图6可知，随着玻璃粉的掺量增大，透水砂浆的透水性能呈现规律性变化。未掺加玻璃粉的试样透水系数最高，达到1.67 mm/s。当掺入10%玻璃粉时，透水系数小幅下降至1.61 mm/s，降幅约为3.6%。继续增加掺量至20%，透水性进一步降低到1.58 mm/s，此时累计降幅达到5.4%。值得注意的是，30%掺量组的透水系数

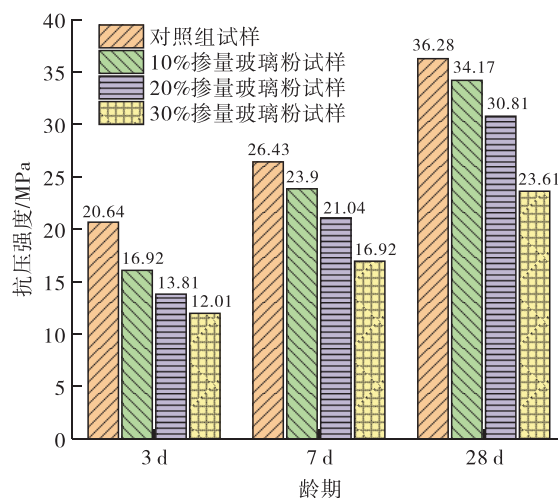


图3 废旧玻璃粉对透水砂浆抗压强度的影响

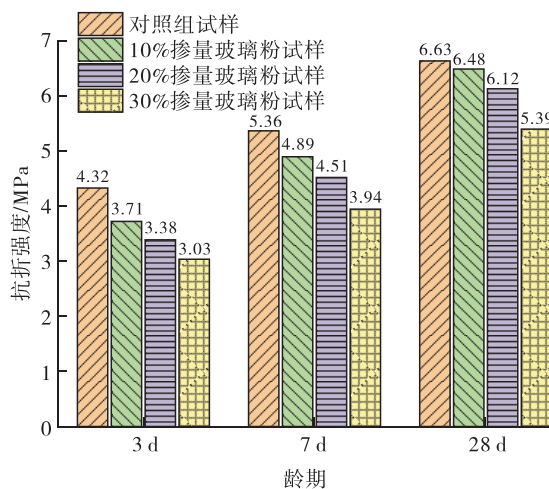


图4 废旧玻璃粉对透水砂浆抗折强度的影响

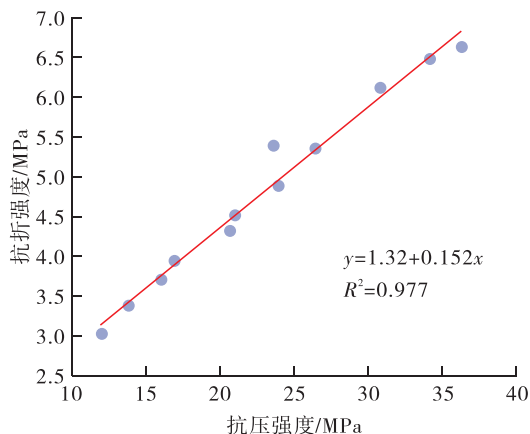


图5 透水砂浆抗压强度与抗折强度之间的相关性

降至1.27 mm/s，但降幅增速有所放缓。这种变化趋势反映出玻璃粉对孔隙结构的填充作用具有渐进性特征。初始掺入的玻璃粉更容易堵塞主要渗流通道，随着掺量增加，填充效果逐渐减弱^[15]。从微观作用机制来看，透水系数的下降主

要源于玻璃粉颗粒对连通孔隙的物理填充作用。随着掺量增加,玻璃粉有效堵塞了渗流通道,特别是在20%掺量时对宏观孔隙的填充趋于饱和,导致透水系数变化趋缓^[16-17]。由图7可知,透水系数与玻璃粉掺量之间存在高度吻合的二次多项式关系,其决定系数达到0.99,表明该模型具有很好的预测准确性。基于这一规律,在实际工程应用中,若需保持较好的透水性能,建议将玻璃粉掺量控制在20%以下。

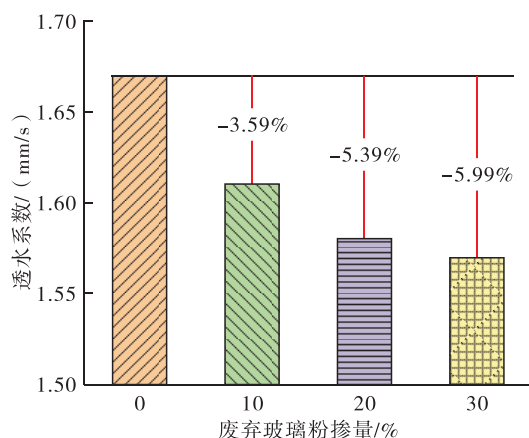


图6 废旧玻璃粉对透水砂浆透水系数的影响

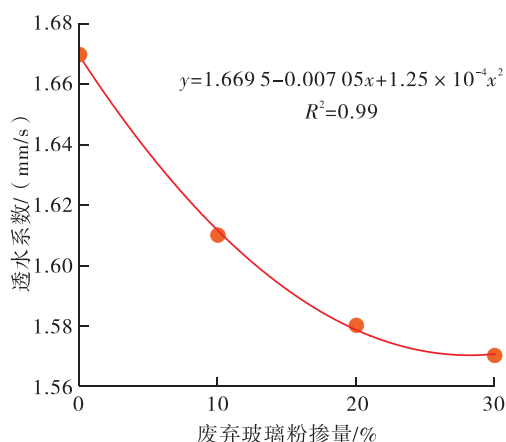


图7 废旧玻璃粉掺量与透水系数关系曲线

2.4 孔隙率

由图8可知,玻璃粉的掺入显著影响了砂浆的孔隙结构特征。未掺玻璃粉的基准试样28天孔隙率为32.13%,随着玻璃粉掺量提升至10%、20%和30%,孔隙率依次降低至27.06%、24.24%和22.00%,呈现明显的梯度递减规律。这种变化趋势说明玻璃粉对孔隙结构的改善效果与其掺量密切相关^[18]。从养护时间的影响来看,各组试样在5天至28天期间的孔隙率变化幅度较小,平均降幅维持在2%以内,这表明玻璃粉对孔隙结构的优化作用主要集中在材料成型早期。

当玻璃粉掺量超过20%后,孔隙率的下降速率明显放缓,可能此时玻璃粉的填充效应已趋于饱和。进一步分析发现,玻璃粉对孔隙率的调控存在显著的边际效应递减现象。掺量从0%增加到10%时,孔隙率降低了5.07%,而当掺量从20%提升至30%时,降幅缩减至2.24%。孔隙率的降低反映了玻璃粉对多尺度孔隙的调控作用,其微米级粒径既能填充骨料间的大孔隙,又能通过火山灰反应产物部分堵塞毛细孔隙。当掺量超过20%后,对孔隙结构的改善主要体现为微孔隙的细化而非孔隙率的显著下降。

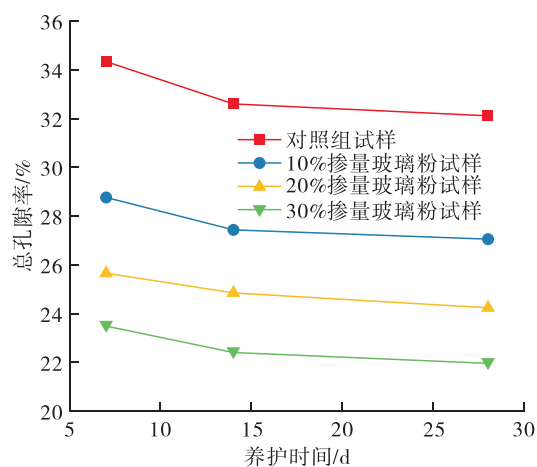


图8 废旧玻璃粉对透水砂浆孔隙率的影响

2.5 耐磨性

由图9可知,玻璃粉的掺入显著改善了透水砂浆的抗磨损性能。未掺玻璃粉的试样磨坑长度最大,达到31.43 mm。随着玻璃粉掺量提高,透水砂浆的耐磨性能呈现阶梯式提升。当掺量为10%时,磨坑长度缩短至28.82 mm。继续增加掺量至20%,磨坑长度进一步降至23.79 mm。在30%掺量条件下,磨坑长度最小,仅为21.23 mm。从变化规律来看,10%~20%掺量区间对耐磨性能的提升最为显著,与对照组相比,磨坑长度减少了8~10 mm。由图10可知未掺玻璃粉的试样磨耗量为2.35 kg/m²,而10%、20%、30%玻璃粉掺量的砂浆磨耗量较对照组分别降低2.55%、4.68%、6.38%。玻璃粉的掺入显著提升了透水砂浆的抗磨损性能,这主要归因于其微集料填充效应、界面结构强化和硬度贡献。玻璃粉颗粒细小,能有效填充水泥浆体中的孔隙,提高砂浆密实度,减少磨损过程中的应力集中。同时,玻璃粉中的活性SiO₂与水泥水化产物发生火山灰反应,生成更多C-S-H凝胶,强化骨料-浆体界面过渡区,增强粘结强度。此外,玻璃的硬

度高于水泥基体,进一步提升了砂浆的抗磨损能力。

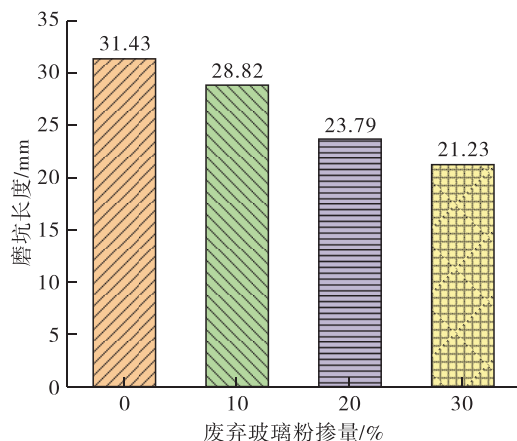


图9 废旧玻璃粉对透水砂浆磨坑长度的影响

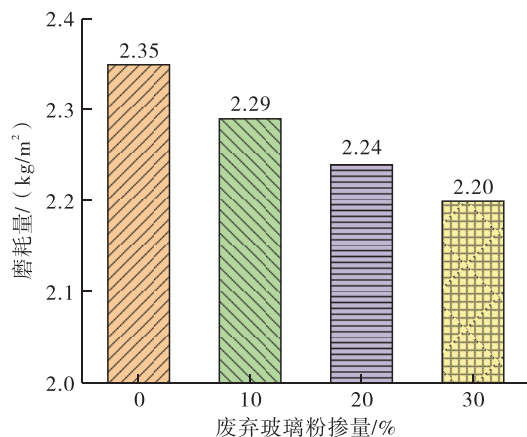


图10 废旧玻璃粉对透水砂浆磨耗量的影响

综合性能评估表明,当再生玻璃粉掺量控制在20%以内时,透水砂浆可保持84.9%的基准抗压强度,同时透水系数达1.58 mm/s,实现力学性能与透水功能的优化平衡。这一配比方案特别适用于人行道、公园绿道、广场铺装等轻载透水场景,以及海绵城市建设中要求透水率在1.5~2.0 mm/s范围内的工程应用。对于停车场、自行车道等中等荷载区域,建议将掺量控制在10%~15%以确保足够的承载能力。

3 结论

本文系统研究了再生玻璃粉掺量对透水砂浆工作性能、力学性能及耐久性的影响规律,通过流动度、抗压强度、抗折强度、透水系数、孔隙率和耐磨性等指标的测试分析,结果表明,玻璃粉的掺入显著改善了材料的综合性能,但其影响程度与掺量密切相关。

(1) 随着再生玻璃粉掺量从0%增至30%,流动度呈线性增长趋势,增幅达6.5%,表明再

生玻璃粉可有效提升新拌砂浆的工作性能。

(2) 抗压强度随玻璃粉掺量增加而降低,20%掺量时保持对照组84.9%的强度水平,同时透水系数为1.58 mm/s,磨坑长度减少27%,可作为工程应用的参考掺量范围之一。

(3) 砂浆的透水性能随再生玻璃粉掺量增加规律性降低,20%掺量后孔隙填充效应趋缓,掺量不超过20%以兼顾透水性与密实度。

(4) 再生玻璃粉显著增强透水砂浆的耐磨性,30%掺量下砂浆的磨坑长度减少38%,20%掺量即可实现27%的改善效果,适用于高抗磨需求场景。

参考文献:

- [1] 张岩. 海绵城市道路透水人行道路面施工技术要点分析[J]. 建筑安全, 2022, 37(6): 22-24.
- [2] 李彦林. 柔性透水混凝土面层砂浆的制备及性能研究[D]. 济南: 济南大学, 2018.
- [3] MENEGAKI M, DAMIGOS D. A review on current situation and challenges of construction and demolition waste management[J]. Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry, 2018, 13: 89-94.
- [4] ZHIMING C, BIN G, WENHAN Y, et al. Experimental study on stress-dependent gas permeability and porosity of artificially cracked cement mortar[J]. Construction and Building Materials, 2022, 359: 129290.
- [5] 魏柯, 孔爱散, 丁扬飞. 掺废玻璃粉水泥基材料性能研究综述[J]. 混凝土与水泥制品, 2024(6): 100-105.
- [6] 王春福, 王瑜玲. 废玻璃粉在水泥基材料中的研究和应用进展[J]. 混凝土与水泥制品, 2024(5): 98-103.
- [7] 熊伟. 玻璃混凝土的耐久性能综述[J]. 江西建材, 2020(4): 6, 8.
- [8] 罗浩然, 刘惠, 周一一, 等. 玻璃粉和生物炭对砂浆塑性收缩及开裂行为的影响[J]. 硅酸盐通报, 2024, 43(9): 3337-3347.
- [9] 李方, 杨健, 李粒琿. 废玻璃粉作为辅助胶凝材料对砂浆性能影响及作用机理[J]. 硅酸盐通报, 2022, 41(9): 3208-3218.
- [10] TAMANNA N, TULADHAR R. Sustainable use of recycled glass powder as cement replacement in concrete[J]. The Open Waste Management Journal, 2020, 13: 131-139.
- [11] PARGHI A, ALAM M S. Physical and mechanical properties of cementitious composites containing recycled glass powder (RGP) and styrene butadiene rubber (SBR)[J]. Construction and Building Materials, 2016, 104: 34-43.

(下转第12页)

面抗滑设计方面的成果,探讨在沥青混合料配合比设计阶段应用室内路面功能驱动轮式加速加载系统评价和优化沥青混合料抗滑性能的可行性和效果,以及室内外抗滑性能检测和评价的关联方法。主要结论如下:

(1) 基于驱动轮式路面功能加速加载试验系统和国际摩擦指数 (IFI) 建立的室内外抗滑性能关联方法,可有效实现沥青混合料设计阶段的抗滑性能评价与优化,为路面抗滑耐久性设计提供了科学手段。

(2) 沥青混合料的级配对长期抗滑性能影响显著:粗级配 (如 SMA1) 在加速加载试验后仍能保持较高的摩擦系数和构造深度稳定值,长期抗滑耐久性最优,满足规范要求;而细级配 (如 SMA3) 在长期荷载作用后的抗滑性能稳定值难以满足路面的长期使用要求。

(3) 在沥青混合料设计阶段,通过沥青混合料的优化设计 (如采用粗型级配),可显著提升路面初始抗滑性能及长期抗滑储备,削减因抗滑性能不足引发的养护工作量,降低全寿命周期成本。

需要说明的是,路面的抗滑性能检测与评价主要以摩擦系数和构造深度为指标。因此,作为一种方法,本研究中提出的“基于驱动轮式路面功能加速加载试验系统和国际摩擦指数 (IFI) 建立的室内外抗滑性能关联方法”理论上应该不仅适用于 SMA 体系的沥青混合料,也适用于其他类型沥青混合料,如密级配沥青混合料 (AC 类) 和多空隙沥青混合料 (PAC 或 OGFC 类) 等。未来,将结合实际工程开展其他类型沥青混合料抗滑性能评价、优化和验证工作。

参考文献:

- [1] MCGOVERN C, RUSCH P, NOYCE D A. State practices to reduce wet weather skidding crashes[R]. Washington D. C. : Federal Highway Administration, 2011:5.
- [2] 中华人民共和国交通部. 公路沥青路面施工技术规范: JTG F40—2004[S]. 北京: 中华人民共和国交通部, 2005.
- [3] KOWALSKI K, MCDANIEL R, OLEK J. Identification of laboratory technique to optimize superpave HMA surface friction characteristics[R]. Washington D. C. : Federal Highway Administration, 2010:10.
- [4] AASHTO. Guidelines for skid resistant pavement design [S]. Washington D. C. : American Association of State Highway and Transportation Officials, 1976.
- [5] LIU X Y, LUO H Y, CHEN C, et al. A technical survey on mechanism and influence factors for asphalt pavement skid-resistance[J]. Friction, 2024, 12 (5):845-868.
- [6] 雷超旭. 路面表面功能加速加载系统研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2010.
- [7] 孙晓立, 张肖宁, 蔡旭. 基于加速加载试验的微表处长期路用性能[J]. 同济大学学报 (自然科学版), 2012, 40 (5):691-695.
- [8] 梁何浩, 丁蓬勃, 钱琪, 等. 渗固型沥青混凝土路面封层性能室内试验评价[J]. 公路, 2015, 60 (11): 202-207.
- [9] 区仕权, 王端宜. 橡胶沥青碎石封层试验评价[J]. 科学技术与工程, 2011, 11 (19):4660-4664.
- [10] CAI X, WANG D Y, YU J M. Evaluation of the functional performance of paving materials based on the driving wheel pavement analyzer[J]. Applied Sciences, 2020, 10 (7):1-16.
- [11] 徐驰. 湿热地区重交通道路沥青路面抗滑性能衰减机理与改善措施研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2022.

(上接第6页)

- [12] KHAN S, SHEIKH N, MCCARTHY J, et al. Experimental investigation on foam concrete without and with recycled glass powder: A sustainable solution for future construction[J]. Construction and Building Materials, 2019, 201:369-379.
- [13] YIWEN W, CHAO L, HUAWEI L, et al. Pore structure and durability of green concrete containing recycled powder and recycled coarse aggregate[J]. Journal of Building Engineering, 2022, 53:104435.
- [14] YING X, ZHAO X, CUI H, et al. Recycled glass concrete with cementitious materials: Study of

mechanical prediction model and dry shrinkage mechanism[J]. Construction and Building Materials, 2024, 438:137159.

- [15] LU J, YAN X, HE P, et al. Sustainable design of pervious concrete using waste glass and recycled concrete aggregate[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 234:1102-1112.
- [16] JING X, PEIMIN Z, WEI Z, et al. Design and assessment of eco-friendly ultra-high performance concrete with steel slag powder and recycled glass powder[J]. Powder Technology, 2023, 419:118164.