

玻璃砂喷射混凝土性能研究

高庆水¹,马凯凯¹,国灵芝¹,刘洪田¹,黄世梅¹,韩松²,胡朋^{2*}

(1.山东省交通工程监理咨询有限公司,山东济南 250010;2.山东交通学院 交通土建工程学院,山东 济南 250357)

摘要:为研究玻璃砂对喷射混凝土性能的影响,该文采用玻璃砂替代天然砂制备了喷射混凝土。通过抗压强度试验、劈裂抗拉强度试验、干燥收缩试验和氯离子侵蚀试验,分析了不同掺量的玻璃砂对喷射混凝土强度、收缩性和耐久性的影响。结果表明:① 50%的玻璃砂替代率对喷射混凝土强度的影响最小,相较于对照组其28 d抗压强度仅降低了2.19%;② 玻璃砂可以改善喷射混凝土的干缩性能,随着玻璃砂的替代率从10%增加到50%,喷射混凝土的28 d干燥收缩率减小了27.7%;③ 当玻璃砂的替代率为50%时,喷射混凝土侵蚀120 d的抗压强度损失率降低了17.65%。研究结论为玻璃砂在喷射混凝土中的应用和推广提供了理论支持,也为废旧玻璃的资源利用提供了解决方案。

关键词:喷射混凝土;玻璃砂;力学性能;耐久性;资源利用

中图分类号:U416.216

文献标志码:A

Research on Properties of Glass Sand Shotcrete

GAO Qingshui¹, MA Kaikai¹, GUO Lingzhi¹, LIU Hongtian¹, HUANG Shimei¹, HAN Song², HU Peng^{2*}

(1. Shandong Traffic Engineering Supervision Consulting Co., Ltd., Jinan, Shandong 250010, China;

2. School of Transportation Civil Engineering, Shandong Jiaotong University, Jinan, Shandong 250357, China)

Abstract: In order to study the effect of glass sand on the properties of shotcrete, shotcrete was prepared by using glass sand instead of natural sand. Through the compressive strength test, splitting tensile strength test, drying shrinkage test, and chloride ion erosion test, the effects of different amounts of glass sand on the strength, shrinkage, and durability of shotcrete were analyzed. The results show that: ① The 50% glass sand replacement rate has the least effect on the strength of shotcrete, and its 28-day compressive strength is only reduced by 2.19% compared with the control group; ② Glass sand can improve the drying shrinkage rate of shotcrete. As the replacement rate of glass sand increases from 10% to 50%, the 28-day drying shrinkage rate of shotcrete decreases by 27.7%; ③ When the replacement rate of glass sand is 50%, the compressive strength loss rate of shotcrete after 120 d erosion is reduced by 17.65%. This study provides theoretical support for the application and promotion of glass sand in shotcrete and provides a solution for the resource utilization of waste glass.

Keywords: shotcrete; glass sand; mechanical property; durability; resource utilization

0 引言

喷射混凝土是一种使用压缩空气将新拌混凝土喷射到受喷面的混凝土施工方式,具有早期强度高、操作便捷、适用性强和施工效率高等优点,广泛应用于隧道衬砌、基坑支护等地下工程建设中^[1-3]。喷射混凝土的配合比主要由水泥、碎石、细集料和外加剂组成,细集料主要为天然河砂,砂率为45%~60%^[4-6]。随着工程建设的发展,河砂的需求量逐年

增加,全球每年天然砂的用量超过了500亿t,过度开采天然砂会严重破坏国土资源和生态环境^[7]。近年来,中国越来越重视自然资源的保护,河砂作为一种难以再生的天然骨料被限制开采,人工砂替代天然砂是未来混凝土材料发展的必然趋势。国家发展和改革委员会等相关部门在《关于“十四五”大宗固体废弃物综合利用的指导意见》中强调要大力推进建筑垃圾源头减量和资源化利用^[8]。中国每年旧建筑拆除的废旧玻璃达数亿吨,而玻璃难以生物降解,大

收稿日期:2024-11-24 修回日期:2025-04-01

基金项目:山东省交通运输厅科技计划项目(编号:2024B108-01)

作者简介:高庆水,男,硕士,正高级工程师.E-mail:245966217@qq.com

*通信作者:胡朋,男,博士,教授.E-mail:204021@sdjtu.edu.cn

量废旧玻璃堆积对环境造成巨大的影响,如何实现废旧玻璃的资源化利用成为亟需解决的问题^[9-10]。

国内外学者对废旧玻璃的资源化利用进行了大量的研究。Su等^[11]、Baikerikar等^[12]指出玻璃中富含SiO₂,其主要化学成分与天然砂类似,使用玻璃砂替代混凝土中的天然砂,可以实现废旧玻璃的资源化利用;汪富杰等^[13]研究了废旧玻璃对沥青混凝土性能的影响,确定废玻璃的最佳替代率为10%;张亚芳等^[14]采用玻璃砂替代天然砂制备了水泥基复合材料,发现替代率为40%时的效果最好;林书立等^[15]研究了玻璃砂对透水混凝土性能的影响,结果表明,玻璃砂掺量为10%时,透水混凝土的力学性能和透水性能满足规范和实际使用要求;刘光焰等^[16]、张靖瑜等^[17]使用玻璃骨料分别替代混凝土中的粗骨料和细骨料,发现混凝土强度随玻璃骨料替代率的增加先增后减,当玻璃骨料替代粗骨料时混凝土的强度下降更快;Wei等^[18]认为再生玻璃颗粒可以优化混凝土的微观结构,提升混凝土的抗侵蚀能力;马晓彤^[19]研究了废旧玻璃骨料混凝土的抗氯盐侵蚀性能,确定玻璃骨料的最佳替代率为50%;Liang等^[20]研究发现用酸性处理后的玻璃碎末替代混凝土中的细集料,能够改善混凝土干缩性;张楚等^[21]研究了冻融和干湿循环对废玻璃喷射混凝土耐久性的影响,结果表明,试件表面的损伤随玻璃骨料替代率的提高而加重。以上学者对玻璃骨料在普通混凝土中的应用进行了大量研究,结果表明玻璃砂有利于提升普通混凝土的抗侵蚀能力。然而,喷射混凝土在配合比设计和施工工艺等方面与普通混凝土存在较大差异,普通混凝土中玻璃砂的最佳替代率不能直接用于喷射混凝土中的配合比设计。目前,玻璃砂在喷射混凝土中的应用鲜有报道,尤其在玻璃砂喷射混凝土干缩性和耐久性等方面的研究较少,限制了玻璃砂在喷射混凝土中的应用。

本文使用玻璃砂部分或全部替代河砂,通过抗压强度试验、劈裂抗拉强度试验、干缩性试验和氯离子侵蚀性能试验等,研究不同替代率的玻璃砂对喷射混凝土强度、干缩性和耐久性的影响,为玻璃砂在喷射混凝土中的应用提供理论支持。

1 原材料及配合比

1.1 原材料

(1) 水泥

水泥选用P·O 42.5级水泥,主要性能指标

见表1。

表1 P·O42.5水泥主要性能指标

Table 1 Main performance indicators of P·O42.5 cement

细度/ %	密度/ (g·cm ⁻³)	28 d强度/MPa		凝结时间/min	
		抗压	抗折	初凝	终凝
2.4	3.15	41.0	8.25	160	215

(2) 粗集料

粗集料选用5~10 mm粒径的连续级配碎石,主要性能指标见表2。

表2 碎石的主要性能指标

Table 2 Main performance indicators of crushed stone

表观密度/ (g·cm ⁻³)	堆积密度/ (g·cm ⁻³)	含泥量/ %	压碎值/ %	针片状颗 粒含量/%
2.5	1.53	0.4	6.5	4.5

(3) 细集料

细集料选用天然河砂和玻璃砂。天然砂的细度模数为2.6,玻璃砂的粒径范围为1.2~4.0 mm。天然砂和玻璃砂的主要性能指标和级配曲线见表3和图1。

表3 细集料主要性能指标

Table 3 Main performance indicators of fine aggregate

细集料	堆积密 度/(g·cm ⁻³)	最大粒 径/mm	SiO ₂ 含量/%	含泥 量/%	磨损 率/%
河砂	1.45	4.75	91.6	2.31	5.73
玻璃砂	1.61	4.00	72.3	0.17	12.40

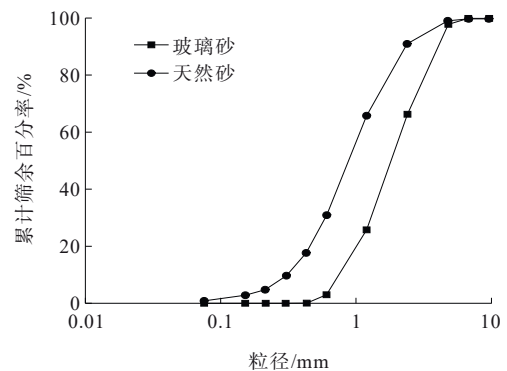


图1 细集料级配曲线

Figure 1 Fine aggregate grading curves

(4) 减水剂

减水剂选用聚羧酸系高性能减水剂,主要性能指标见表4。

(5) 速凝剂

速凝剂选用液体无碱速凝剂,符合《喷射混凝土

用速凝剂》(GB/T 35159—2017)^[22]要求,主要性能指标见表5。

表4 减水剂主要性能指标

Table 4 Main performance indicators of superplasticizer

减水率/%	含气量/%	含固量/%	pH值	碱含量/%
28.0	3.0	39.0	5.2	1.2

表5 液体无碱速凝剂主要性能指标

Table 5 Main performance indicators of liquid alkali-free accelerator

凝结时间/min		28 d抗压强度	90 d抗压强度	pH值
初凝	终凝	度比/%	保留率/%	
2.16	4.75	98.8	105	2.14

1.2 配合比

喷射混凝土的配合比设计参照《普通混凝土配合比设计规程》(JGJ 55—2011)^[23]和《喷射混凝土应用技术规程》(JGJ/T 372—2016)^[24],经室内试验确定喷射混凝土的基准配合比为水泥:碎石:砂:水=1:1.92:1.92:0.44,减水剂和速凝剂掺量分别为胶凝材料用量的0.8%和6%,采用内掺法用一定质量的玻璃砂替代天然河砂,玻璃砂的替代比例分别为10%、20%、50%和100%。具体材料用量见表6。

表6 喷射混凝土配合比
Table 6 Shotcrete mix ratio

试件 编号	各组份含量/(kg·m ⁻³)					
	水	水泥	砂	玻璃砂	碎石	减水剂
A0	198.5	450	866.0	0	865	3.6
A10	198.5	450	779.4	86.6	865	3.6
A20	198.5	450	692.8	173.2	865	3.6
A50	198.5	450	433.0	433.0	865	3.6
A100	198.5	450	0	866.0	865	3.6

2 试验

2.1 试件制备

通过喷射混凝土大板制备混凝土试件,混凝土大板模具的尺寸为350 mm×450 mm×120 mm。如图2所示,试验前将混凝土大板模具与水平夹角呈80°固定在试验棚内,根据各组配合比参数分别制备400 kg混凝土;试验时,设置混凝土湿喷机的工作风压为0.5 MPa,喷嘴与大板模具的距离和角度分别为1 m和90°,试验人员操作喷嘴自下而上将混凝土大板模具成型;喷射完成后,将大板模具覆膜养护24 h后脱模,然后移送至标准养护室[温度(20±2)°C,

相对湿度≥95%]进行养护。养护至对应龄期,用切割机将混凝土大板试件切割成尺寸为100 mm×100 mm×100 mm的立方体试件和100 mm×100 mm×400 mm的棱柱体试件。



图2 试件制备

Figure 2 Specimen preparation

2.2 试验方法

2.2.1 抗压强度试验

参照《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019)^[25],采用万能压力试验机进行玻璃砂喷射混凝土的抗压强度试验。试验时设备的加载速度为0.3~0.5 MPa/s,不同配合比至少取3个同龄期制作和养护的试件进行平行试验,试验结果取3个试件的算术平均值,抗压强度换算系数为0.95。

2.2.2 劈裂抗拉强度试验

参照《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019)^[25],采用万能压力试验机和劈裂夹具测试喷射混凝土的劈裂抗拉强度。试验时设备的加载速度为0.02~0.05 MPa/s,不同配合比至少取3个同龄期制作和养护的试件进行平行试验,试验结果取3个试件的算术平均值,劈裂抗拉强度的换算系数为0.85。

2.2.3 干燥收缩试验

参照《公路工程水泥及水泥混凝土试验规程》(JTG 3420—2020)^[26],如图3所示,采用接触法测定喷射混凝土试件的干燥收缩率。试验室的温度为(20±2)°C,相对湿度为60%±5%;试验时在龄期为0、7 d、14 d、21 d、28 d、35 d、42 d、49 d读取千分表表值,读取精度精确至0.001 mm;根据式(1)计算不同混凝土配合比各龄期试件的干燥收缩率。不同配合比至少取3个同龄期制作和养护的试件进行平行试验,试验结果取3个试件干缩率的算术平均值。

$$S_d = \frac{X_{01} - X_{d1}}{L_0} \quad (1)$$

式中: S_d 为干缩 d 天时干燥收缩率(%); L_0 为干燥收缩测试试件的初始长度(mm); X_{01} 为干燥收缩测试试件第1次测量时的千分表读数(mm); X_{d1} 为干燥收缩测试试件 t 龄期时的千分表测量数值(mm)。



图 3 干缩试验

Figure 3 Drying shrinkage test

2.2.4 氯离子侵蚀试验

如图 4 所示,采用智能盐雾试验机测试不同配合比混凝土试件的抗氯离子侵蚀性能。试验前加入浓度为 4.5% 的氯化钠溶液;调整设备试验室的温度为 25 °C,压力桶的温度为 40 °C;采用间歇喷雾的方法对混凝土试件进行周期性氯离子侵蚀,一个循环周期为 8 h(喷雾 4 h,除雾 4 h)。混凝土试件的侵蚀龄期为 120 d,达到龄期后测试混凝土试件的抗压强度,计算不同配合比混凝土试件的抗压强度损失率。



图 4 氯离子侵蚀试验

Figure 4 Chloride ion erosion test

2.2.5 微观试验

采用 ZEISS Sigma 500 型扫描电子显微镜检测普通喷射混凝土和玻璃砂喷射混凝土在 28 d 龄期时的微观形貌。首先将达到龄期的混凝土试件浸泡在无水乙醇中终止水化;其次用铁锤将试件破碎,取小块混凝土置于 60 °C 烘箱内烘干 24 h;然后制备成 5 mm 左右的混凝土薄片用于 SEM 试验。由于混凝土的导电性较差,SEM 测试前需要对混凝土薄片进行喷金处理。

3 结果与讨论

3.1 力学性能分析

3.1.1 抗压强度分析

根据试验结果,绘制了不同玻璃砂替代率下喷

射混凝土各龄期的抗压强度变化图,见图 5。

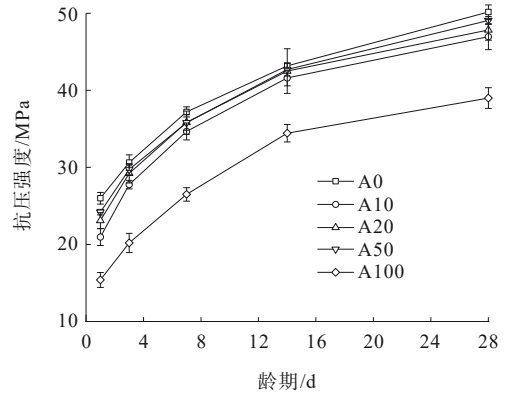


图 5 抗压强度变化图

Figure 5 Variation of compressive strength

从图 5 可以看出:玻璃砂喷射混凝土各龄期的抗压强度均低于普通喷射混凝土。当龄期达到 28 d 时,不同玻璃砂替代率的喷射混凝土抗压强度比对照组分别降低了 6.38%、4.68%、2.19% 和 22.26%。原因可能是玻璃砂颗粒表面比较光滑,其与水泥浆体的黏结性能较差,光滑的表面降低了其他骨料颗粒之间的机械咬合力,导致水泥浆体难以牢固地附着在骨料表面,从而降低了喷射混凝土的抗压强度;另一方面,玻璃砂属于脆性材料,在混凝土拌和及喷射过程中,大颗粒尺寸的玻璃砂与其他骨料颗粒发生挤压、碰撞易产生裂纹,进一步降低了混凝土的抗压强度。

3.1.2 劈裂抗拉强度分析

根据试验结果,绘制了不同玻璃砂替代率下喷射混凝土各龄期的劈裂抗拉强度变化图,见图 6。

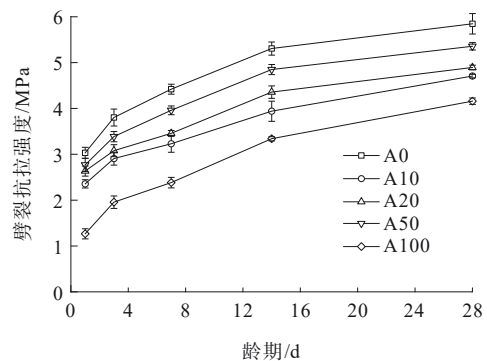


图 6 劈裂抗拉强度变化图

Figure 6 Variation of splitting tensile strength

由图 6 可以看出:喷射混凝土的劈裂抗拉强度变化规律与抗压强度相似。随着玻璃砂替代率的增加,混凝土的劈裂抗拉强度出现不同程度的降低。

当玻璃砂替代率为100%时,喷射混凝土的劈裂抗拉强度最低,原因是玻璃砂在粉碎过程中,受到碰撞、挤压、研磨等外力作用,其内部存在大量微裂缝,本身强度要低于天然砂;同时玻璃砂的保水性较差,其完全替代天然砂增大了混凝土的流动性,混凝土试件的密实性较差,造成玻璃砂喷射混凝土的劈裂抗拉强度降低。其余替代率的玻璃砂喷射混凝土劈裂抗拉强度约为普通喷射混凝土的80%,尤其当玻璃砂的替代率为50%时,喷射混凝土的劈裂抗拉强度降低幅度最小。原因是在混凝土中添加适量的玻璃砂提高了喷射混凝土的可喷性,小粒径的玻璃砂可以填充混凝土的部分空隙,在一定程度上弥补了自身强度低的缺陷。

3.2 干缩性能分析

根据试验结果,绘制了不同玻璃砂替代率下喷射混凝土试件干燥收缩率变化图,见图7。

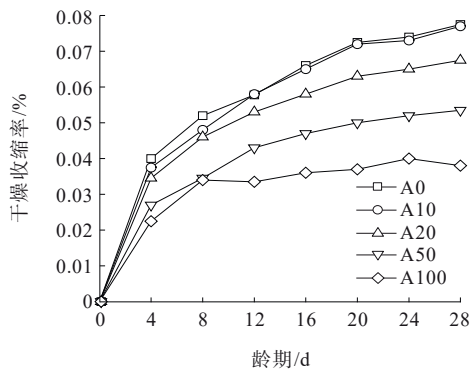


图7 干燥收缩率变化图

Figure 7 Variation of drying shrinkage rate

从图7可以看出:喷射混凝土的干燥收缩率随着玻璃砂替代率的增加而减小,当玻璃砂的掺量由0增加到10%时,各龄期混凝土试件的干燥收缩变化不明显;当玻璃砂的替代率由10%增加到50%时,混凝土试件的28 d干燥收缩率减小幅度为27.7%。这是由于玻璃破碎后尖锐的多棱角形状增加了玻璃砂与其他骨料之间的嵌挤效果,提高了混合料的密实度;另一方面,玻璃砂的平均粒径较小,有利于填充骨料空隙,降低了混凝土中的空气含量,进一步增加了混凝土的密实度,降低了喷射混凝土各龄期的干缩率。

3.3 抗氯离子侵蚀性能分析

根据试验结果,绘制了氯离子侵蚀120 d时不同替代率的玻璃砂喷射混凝土抗压强度损失率变化图,见图8。

由图8可以看出:随着玻璃砂替代率的增加,喷

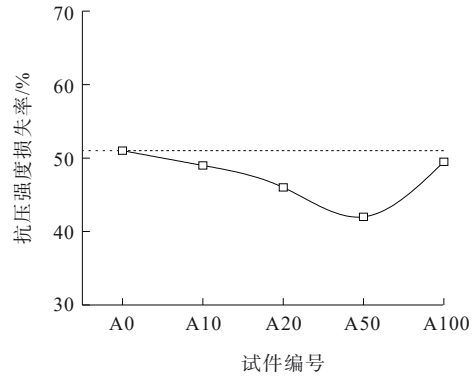


图8 氯离子侵蚀120 d抗压强度损失率

Figure 8 Loss rate of compressive strength after 120 d chloride ion erosion

射混凝土的120 d抗压强度损失率先减小后增加。当玻璃砂替代率为50%时,喷射混凝土的抗压强度损失率为42.0%,相较于普通喷射混凝土降低了17.65%。原因可能是玻璃砂能填充喷射混凝土的颗粒空隙,阻碍了氯离子的渗透路径;另一方面,玻璃砂的主要成分为 SiO_2 ,其与水泥水化产物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 发生二次水化生成水化硅酸钙凝胶(C-S-H)覆盖了混凝土空隙,有利于提高喷射混凝土抗氯离子侵蚀性能^[27]。

3.4 微观机理分析

为了进一步研究玻璃砂喷射混凝土的微观机理,分别对普通喷射混凝土和掺加50%玻璃砂的喷射混凝土进行了SEM试验。试验结果见图9、10。

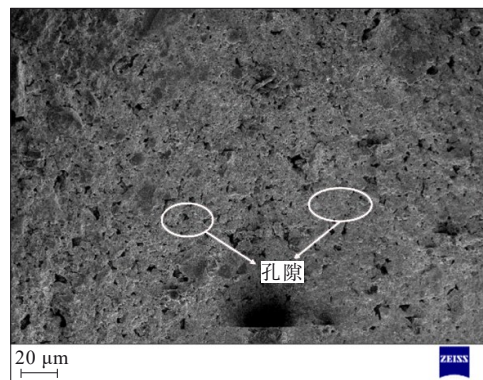


图9 普通喷射混凝土微观形貌

Figure 9 Microstructure of ordinary shotcrete

从图9可以看出:未掺加玻璃砂的普通喷射混凝土表面孔隙较多并且孔隙直径高于玻璃砂喷射混凝土,这一现象解释了普通喷射混凝土抗氯离子侵蚀性能较低的原因。

从图10可以看出:①玻璃砂喷射混凝土表面孔隙较少,原因是玻璃砂比天然砂的粒径小,在喷射混

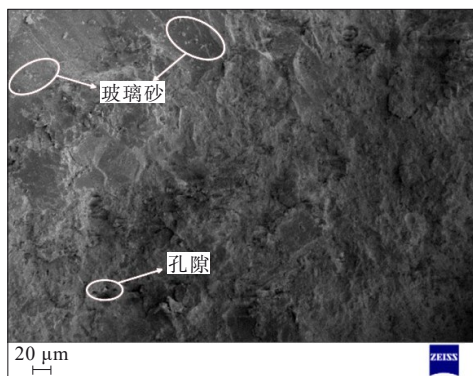


图10 玻璃砂喷射混凝土微观形貌

Figure 10 Microstructure of glass sand shotcrete

混凝土中掺加适量的玻璃砂可以改善混合料级配,玻璃砂可以填充粗集料与细集料之间的孔隙,使混凝土结构更加密实,阻碍了氯离子的渗透路径,这一现象解释了前期试验中喷射混凝土抗压强度损失率和干燥收缩率降低的原因;②玻璃砂的形状多为扁平状和棱角状,易造成局部应力集中,并且玻璃砂的本身强度要低于河砂,这就造成玻璃砂喷射混凝土的抗压强度低于普通喷射混凝土。

4 结论

本文通过抗压强度试验、劈裂抗拉强度试验、干燥收缩试验和氯离子侵蚀试验,分析了不同玻璃砂替代率对喷射混凝土的力学性能、干缩性能和抗氯离子侵蚀性能的影响,得出以下结论:

(1) 玻璃砂喷射混凝土各龄期的强度均低于普通喷射混凝土,当玻璃砂替代率为50%时,喷射混凝土的28 d抗压强度减小了2.19%,相比于其他替代率效果更好。

(2) 玻璃砂可以改善喷射混凝土的干缩性能,当玻璃砂的替代率从10%增加到50%,混凝土的28 d干缩率减小了27.7%。

(3) 玻璃砂喷射混凝土具有良好的抗氯离子侵蚀性能,当其替代率为50%时,喷射混凝土氯离子侵蚀120 d的抗压强度损失率降低了17.65%。

(4) 综合考虑强度损失、干缩性能和抗氯离子侵蚀性能,推荐玻璃砂代替天然砂的最佳替代率为50%。

参考文献:

References:

[1] ARMENGAUD J, CASAUX-GINESTET G, CYR M, et al. Characterization of fresh dry-mix shotcrete and

correlation to rebound[J]. Construction and Building Materials, 2017, 135: 225-232.

[2] 孙雅珍, 何放, 王金昌, 等. 基于山岭隧道高性能喷射混凝土应用研究进展[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(33): 14071-14080.

SUN Yazhen, HE Fang, WANG Jinchang, et al. Research progress in application of high-performance shotcrete based on mountain tunnel[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(33): 14071-14080.

[3] CUI Y, TAN Z S, ZHOU Z L, et al. Preparation and application of low rebound liquid alkali-free accelerator for shotcrete[J]. Construction and Building Materials, 2023, 367: 130220.

[4] 阎王虎, 赵翔, 潘慧敏, 等. 基于胶凝材料颗粒匹配的隧道喷射混凝土配合比优化设计[J]. 中外公路, 2022, 42(2): 223-227.

YAN Wanghu, ZHAO Xiang, PAN Huimin, et al. Optimal design of tunnel shotcrete mix ratio based on cementitious material particle matching[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2022, 42(2): 223-227.

[5] 张戈, 安明喆, 王月, 等. 隧道湿喷高性能喷射混凝土配合比试验研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2021(12): 12-15, 28.

ZHANG Ge, AN Mingzhe, WANG Yue, et al. Experimental study on mix proportion of high performance wet-mix shotcrete in tunnel[J]. China Concrete and Cement Products, 2021(12): 12-15, 28.

[6] 张建. 公路隧道高性能湿喷混凝土配合比研究与应用[J]. 公路交通技术, 2023, 39(2): 152-158.

ZHANG Jian. Research and application of high performance wet shotcrete mix ratio in highway tunnels[J]. Technology of Highway and Transport, 2023, 39(2): 152-158.

[7] 王军, 李曦, 徐芬莲, 等. 混凝土配合比设计中的骨料问题研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2024(9): 1-6, 12.

WANG Jun, LI Xi, XU Fenlian, et al. Research on aggregate issues in concrete mix proportion design[J]. China Concrete and Cement Products, 2024(9): 1-6, 12.

[8] 国家发展和改革委员会. 《关于“十四五”大宗固体废弃物综合利用的指导意见》[J]. 黄金科学技术, 2021, 29(2): 286.

Nation Development and Reform Commission. Guiding opinions on comprehensive utilization of bulk solid wastes in the 14th Five-Year Plan[J]. Gold Science and Technology, 2021, 29(2): 286.

[9] 李冬霞. 废弃旧玻璃在混凝土结构中的再生利用研究[J]. 科技创新导报, 2019, 16(28): 32-33.

LI Dongxia. Study on recycling of waste old glass in concrete structure[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2019, 16(28): 32-33.

[10] 金珊珊, 冯致皓. 废弃玻璃在混凝土中的应用情况综述[J]. 混凝土与水泥制品, 2021(9): 91-95.

JIN Shanshan, FENG Zhihao. A review of the application of waste glass in concrete[J]. China Concrete and Cement Products, 2021(9): 91-95.

- [11] SU Q, XU J M. Mechanical properties of concrete containing glass sand and rice husk ash[J]. *Construction and Building Materials*,2023,393:132053.
- [12] BAIKERIKAR A,MUDALGI S, RAM V V.Utilization of waste glass powder and waste glass sand in the production of Eco-Friendly concrete[J]. *Construction and Building Materials*,2023,377:131078.
- [13] 汪富杰,伍衡山,杨建明,等.废玻璃颗粒替代集料对沥青混合料体积参数的影响[J]. *中外公路*,2014,34(5):248-251.
WANG Fujie, WU Hengshan, YANG Jianming, et al. Influence of waste glass particles replacing aggregate on volume parameters of asphalt mixture[J]. *Journal of China & Foreign Highway*,2014,34(5):248-251.
- [14] 张亚芳,曾科,包嗣海,等.玻璃砂超高性能水泥基复合材料的制备及性能[J]. *深圳大学学报(理工版)*,2024,41(1):66-73.
ZHANG Yafang, ZENG Ke, BAO Sihai, et al. Preparation and properties of glass sand ultra-high performance cementitious composites[J]. *Journal of Shenzhen University (Science and Engineering)*,2024,41(1):66-73.
- [15] 林书立,梁毅,覃振林,等.不同废玻璃掺量对透水混凝土的性能影响[J]. *广西科技大学学报*,2023,34(3):29-37.
LIN Shuli, LIANG Yi, QIN Zhenlin, et al. Effects of different waste glass content on performance of pervious concrete[J]. *Journal of Guangxi University of Science and Technology*,2023,34(3):29-37.
- [16] 刘光焰,李龙蛟,樊磊.废弃玻璃骨料混凝土的力学性能试验研究[J]. *混凝土*,2016(2):74-76,80.
LIU Guangyan, LI Longjiao, FAN Lei. Experimental study on mechanical properties of waste glass aggregate concrete [J]. *Concrete*,2016(2):74-76,80.
- [17] 张靖瑜,程云虹,马慧玉,等.玻璃骨料替代方式对混凝土工作性能及强度的影响[J]. *混凝土*,2023(7):7-10,15.
ZHANG Jingyu, CHENG Yunhong, MA Huiyu, et al. Effect of substitution of glass aggregate on concrete performance and compressive strength[J]. *Concrete*,2023(7):7-10,15.
- [18] WEI L W,ZHANG N,SUN L.Rebar corrosion and bond in concrete with recycled glass granules[J]. *Journal of Building Engineering*,2024,98:111269.
- [19] 马晓彤.废弃玻璃水工混凝土抗氯盐侵蚀性能试验研究[J]. *水利科学与寒区工程*,2023,6(3):53-55.
MA Xiaotong. Experimental study on chloride corrosion resistance of waste glass hydraulic concrete[J]. *Hydro Science and Cold Zone Engineering*,2023,6(3):53-55.
- [20] LING T C, POON C S. Feasible use of recycled CRT funnel glass as heavyweight fine aggregate in barite concrete[J]. *Journal of Cleaner Production*,2012,33:42-49.
- [21] 张楚,王凤池,马一方.冻融和干湿循环对废玻璃混凝土耐久性能的影响研究[J]. *混凝土与水泥制品*,2022(5):95-99,104.
ZHANG Chu, WANG Fengchi, MA Yifang. Study on the influence of freeze-thaw and dry-wet cycle on the durability of waste glass concrete[J]. *China Concrete and Cement Products*,2022(5):95-99,104.
- [22] 中国建筑材料科学研究总院.喷射混凝土用速凝剂:GB/T 35159—2017[S].北京:中国标准出版社,2018.
China Building Materials Academy. Flash setting admixtures for shotcrete: GB/T 35159—2017[S]. Beijing: Standards Press of China,2018.
- [23] 中国建筑科学研究院.普通混凝土配合比设计规程:JGJ 55—2011[S].北京:中国建筑工业出版社,2011.
China Academy of Building Research. Specification for mix proportion design of ordinary concrete :JGJ 55—2011 [S].Beijing:China Architecture & Building Press,2011.
- [24] 厦门市建筑科学研究院集团股份有限公司,厦门特房建设工程集团有限公司.喷射混凝土应用技术规程:JGJ/T 372—2016[S].北京:中国建筑工业出版社,2016.
Xiamen Academy of Building Research Group Co., Ltd., Xiamen Special Housing Construction Engineering Group Co., Ltd.. Technical specification for application of sprayed concrete : JGJ/T 372—2016[S]. Beijing: China Architecture & Building Press,2016.
- [25] 中国建筑科学研究院有限公司.混凝土物理力学性能试验方法标准:GB/T 50081—2019[S].北京:中国建筑工业出版社,2019.
China Academy of Building Research. Standard for test methods of concrete physical and mechanical properties: GB/T 50081—2019[S]. Beijing: China Architecture & Building Press,2019.
- [26] 交通运输部公路科学研究院.公路工程水泥及水泥混凝土试验规程:JTG 3420—2020[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2020.
Highway Science Research Institute of the Ministry of Transport. Testing methods of cement and concrete for highway engineering: JTG 3420—2020[S]. Beijing: China Communications Press Co.,Ltd.,2020.
- [27] SERATI M, JAKSON N, ASCHE H, et al. Sustainable shotcrete production with waste glass aggregates[J]. *SN Applied Sciences*,2022,4(3):82.