

废旧玻璃沥青混合料的集料破碎行为及其对性能的影响

李艺铭,李欣泽,程培峰,陈修乐,郭爽

(东北林业大学 土木与交通学院,黑龙江 哈尔滨 150040)

摘要:采用破碎的废旧玻璃替代沥青混合料中的天然集料具有较大的经济潜力和环保优势,但相较于天然集料,低强度的玻璃集料易在荷载作用下出现破碎问题,因此需探究玻璃集料在荷载作用下的破碎行为及其对沥青混合料性能的影响。该文通过旋转压实试验、数字图像处理技术对混合料的破碎行为进行分析,并以混合料集料破碎指数为指标对混合料路用性能进行分析。结果表明:随着压实次数和玻璃集料掺量的增加,混合料的集料破碎指数增大,玻璃沥青混合料的集料破碎现象越明显,且以玻璃集料发生破碎为主。通过对玻璃沥青混合料试件截面空隙信息的提取,发现混合料的空隙数量与空隙面积随压实次数和玻璃集料掺量的增加而减少。在一定玻璃掺量范围内,玻璃集料的破碎行为对沥青混合料的路用性能及耐久性能均会产生较大影响,对抗滑性能无明显影响;随着玻璃沥青混合料集料破碎指数的增大,混合料的高温性能减弱,当破碎指数大于4.45%时,其抗高温变形能力不符合规范要求;当破碎指数小于3.25%时,混合料的低温抗裂性、水稳定性和耐久性均有所提升,而破碎指数大于3.25%时,则会对混合料低温抗裂性、水稳定性和耐久性产生不利影响。因此,建议玻璃沥青混合料中玻璃掺量不超过20%,旋转压实次数不超过150次。

关键词:玻璃集料;沥青混合料;集料破碎;数字图像技术;路用性能;破碎指数
中图分类号:U414 **文献标志码:**A

Aggregate Crushing Behavior of Asphalt Mixture Incorporating Waste Glass and Its Effect on Performance

LI Yiming, LI Xinze, CHENG Peifeng, CHEN Xiule, GUO Shuang

(School of Civil Engineering and Transportation, Northeast Forestry University, Heilongjiang, Harbin 150040, China)

Abstract: Utilizing crushed waste glass as a substitute for natural aggregate in asphalt mixtures presents significant economic potential and environmental protection advantages. However, compared with natural aggregates, the low-strength glass aggregates are prone to crushing under load, necessitating an investigation into the crushing behavior of glass aggregates under load and its influence on the performance of asphalt mixture. In this paper, the crushing behavior of the mixture was analyzed through rotational compaction test and digital image processing technology, using the aggregate crushing index of the mixture as an indicator to evaluate its road performance. The results show that as the number of compaction times and the proportion of glass aggregates increase, the aggregate crushing index of the mixture rises, leading to more pronounced crushing phenomena in glass asphalt mixtures, primarily due to the crushing of glass aggregates. By extracting the void information from the cross-section of the glass asphalt mixture specimen, it is found that the void number and the void area in the mixture decrease with an increase in the number of compaction times and the proportion of glass aggregates. Within a certain range of glass content, the crushing behavior of glass aggregates significantly impacts the road performance and durability of the asphalt mixture, while having no noticeable effect on skid resistance. As the aggregate crushing index of the glass asphalt mixture increases, the

收稿日期:2025-02-11 修回日期:2025-06-26

基金项目:黑龙江省重点研发项目(编号:GZ20220062);黑龙江省交通运输厅科技项目(编号:HJK2024B003;2024Z0012);龙建路桥股份有限公司博士后自主研发项目(编号:230000100004258240011)

作者简介:李艺铭,男,博士,副教授.E-mail:liyiming@nefu.edu.cn

high-temperature performance of the mixture deteriorates; when the crushing index is greater than 4.45%, its resistance to high-temperature deformation does not meet the specification requirements. Conversely, when the crushing index is below 3.25%, the low-temperature cracking resistance, water stability, and durability of the mixture are improved, but exceeding this threshold adversely affects the mixture's low-temperature cracking resistance, water stability, and durability. Therefore, it is suggested that the glass content in glass asphalt mixture should not exceed 20%, and the number of rotary compaction times should not exceed 150.

Keywords: glass aggregate; asphalt mixture; aggregate crushing; digital imaging technique; road performance; crushing index

0 引言

全球每年产生大量固体废弃物,其中,废旧玻璃约占总固体废弃物的5%。在世界范围内,废旧玻璃回收利用率平均水平为50%,而中国仅为13%,2023年中国废玻璃资源回收量仅为980万t^[1]。由于玻璃化学性质稳定,无法像普通生活垃圾一样自然降解,因此废旧玻璃一般采用填埋的方式进行处理,这不仅占用较多的土地资源,且玻璃完全降解需要约100万年,对环境危害较大^[2]。废玻璃作为一种再生资源,将其回收再利用对节约资源和实现垃圾减量均有重要意义^[3]。

随着经济发展,世界交通运输行业也取得巨大进步。以中国为例,2023年末中国公路里程已达543.68万km。结合公路工程覆盖范围广、建设规模大的特点,将废旧玻璃合理应用到道路工程中,不仅可以缓解石料紧缺的问题,而且可以实现废旧资源的回收再利用^[4]。

玻璃集料应用于沥青混合料中对改善道路部分路用性能、道路排水效果等均有积极作用^[5-6]。首先,废旧玻璃在生活中较为常见,破碎的玻璃碎片可获得较多供工程使用粒径范围内的集料,且玻璃集料密度小的特点使其掺入沥青混合料中能够有助于减少应力集中^[7];其次,玻璃的主要成分为二氧化硅,二氧化硅为疏水性材料,且玻璃表面平滑,将其制成多孔沥青混合料具有较好的排水效果^[8];另外,玻璃沥青混合料可以提高路面对光的反射,当路面在雾霾、降雨降雪等不良天气导致的能见度较差以及隧道等照明条件差的情况时,玻璃集料反射的光线可以改善道路行车环境的能见度;最后,玻璃在沥青混合料中可以起到保温的作用。玻璃的导热系数低于石料,在混合料摊铺、施工过程中,可以增强混合料的保温效果,减少摊铺过程中出现“死料”,且便于在较低的温度下施工与维修^[9-11]。

现阶段的研究主要集中在玻璃沥青混合料的路

用性能方面。Du等^[12]在研究中使用导热系数较低的空心玻璃微珠替代石灰石矿粉,研究发现,沥青胶浆导热系数降低了40%,红外反射率提高了60%,虽然玻璃微珠对沥青胶浆的车辙性能产生负面影响,但可以延长疲劳寿命;Lachance-Tremblay等^[13]研究发现以玻璃集料为骨料的沥青混合料在10次以内的冻融循环作用下比普通热拌沥青混合料损伤更快,但两种混合料在10次冻融循环后损坏程度基本一致。

同时,国内外大量的专家学者针对玻璃沥青混合料水稳定性问题展开了研究。赵晓宁^[14]对比物理与化学两种表面处理工艺对玻璃集料的处理效果,通过水煮法试验、像素分析法和接触角试验发现使用硅烷偶联剂对玻璃表面进行改性处理可有效改善玻璃集料与沥青之间的黏附力;王浩博^[15]通过对比分析不同种类的硅烷偶联剂的改性效果并结合表面能理论计算和分子动力学的仿真模拟,得出硅烷偶联剂最佳改性时间是74 min。同时,有研究发现10%掺量的硅烷偶联剂改性对提升玻璃-沥青界面黏附效果最佳^[16]。

沥青混合料中不同集料破碎问题也是道路工程领域的研究热点。Zhang等^[17]研究了集料破碎对轻质沥青混凝土的影响,研究发现轻集料对大于其粒径的玄武岩集料破碎影响不大,但可以防止小粒径玄武岩骨料破碎。此外,骨料破碎对轻质沥青混凝土的低温抗裂性影响较小,对其水稳定性有积极影响;王二兵等^[18]通过旋转压实试验模拟再生集料沥青混合料压实过程中集料破碎行为,研究发现再生集料沥青混合料随着集料破碎程度增加,混合料的高温稳定性和低温抗裂性出现一定下降;吴胜坤等^[19]从细观结构角度分析了多孔沥青混合料中粗集料的破碎规律,运用Matlab软件模拟了混合料受压过程,发现4.75~9.5 mm和2.36~4.75 mm粒径范围内的集料承受主要荷载,另外集料越扁平越早开裂;Shi等^[20]运用数字图像处理技术研究了沥青混合料主骨架,通过对比车辙试验前后集料接触点的变化,

发现随着荷载作用次数的增加,粗集料接触点的数量不断上升,逐渐形成一个稳定的骨架状态,直至集料发生破碎。

综上,玻璃集料代替石料加入沥青混合料中,其对混合料路用性能的影响已有较多研究,但对玻璃集料在沥青混合料中的破碎行为研究较少,而研究集料破碎的规律及其破碎对玻璃沥青混合料性能的影响具有重要意义。本文针对玻璃沥青混合料中玻璃集料的集料破碎规律进行总结,同时通过对混合料断面图进行数字图像处理,分析其空隙面积和数量的变化。采用低温间接拉伸试验、冻融劈裂试验、高温车辙试验以及半圆疲劳试验来评价混合料集料破碎对玻璃沥青混合料路用性能的影响。

1 材料与试验

1.1 原材料

本文所用废旧玻璃集料以废玻璃瓶为原材料,经清洗、破碎、筛分、烘干等集料加工工艺处理后的最终产品如图1所示,本文采用的废旧玻璃集料主要粒径范围为4.75~9.5 mm。对玻璃集料的物理性质进行测试,结果如表1所示。

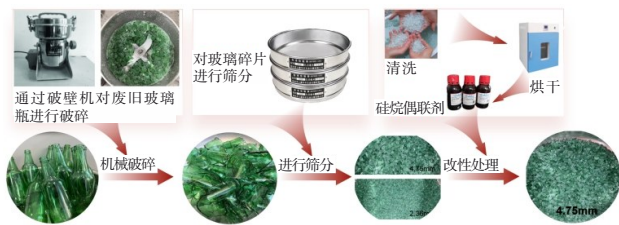


图1 玻璃集料处理流程

Figure 1 Process flow for glass aggregates

表1 玻璃集料的主要技术指标

Table 1 Main technical indicators of glass aggregates

材料	表观密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	吸水率/ %	压碎值/ %
玻璃	2.63	0.21	24.8
粗集料	2.84	0.58	17.4
规范要求	≥ 2.60	≤ 2.00	≤ 26.0

试件由SBS改性沥青、木质素纤维、玄武岩集料、矿粉及废旧玻璃集料制成。由于玻璃集料与沥青黏附性较低,采用硅烷偶联剂对玻璃表面进行处理。常用的硅烷偶联剂有KH540、KH550、KH560、KH570。本研究采用KH550试剂,其具有较好的黏结促进作用。通过扫描电子显微镜对改性处理前后

的玻璃集料进行观察,扫描结果如图2所示。

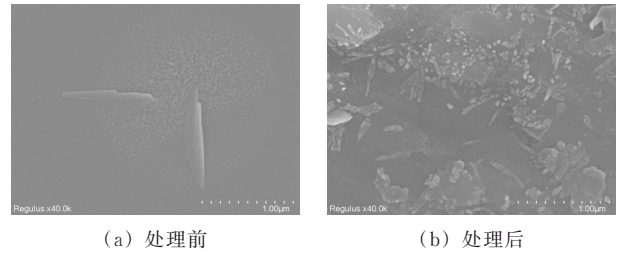


图2 玻璃集料SEM

Figure 2 SEM of glass aggregates

由图2可知:处理前的玻璃集料表面较为光滑,处理后的玻璃集料表面形貌复杂,表面出现较多的花纹,这是硅烷偶联剂中的硅烷成分发生水解,在玻璃表面产生的复合改性结构。这种结构呈网状覆盖在玻璃集料表面,使得玻璃集料表面的沥青膜不易脱落,从而增加玻璃集料与沥青的黏附性。

本文采用的SBS沥青性能见表2,天然集料的密度如表3所示。

表2 SBS沥青性能

Table 2 Performance of SBS asphalt

针入度(25℃)/ (0.1 mm)	软化点/ ℃	延度(5℃, 5 cm/min)/cm	动力黏度 (135℃)/(Pa·s)
68.2	67	46	1.37

表3 集料密度

Table 3 Aggregate density

集料粒径/mm	表观密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)
13.2~16	2.764
9.5~13.2	2.739
4.75~9.5	2.766
2.36~4.75	2.711
1.18~2.36	2.633
0.6~1.18	2.672
0.3~0.6	2.633
0.15~0.3	2.745
0.075~0.15	2.989

1.2 配合比设计

采用SMA-13的级配中值作为本文的研究级配(图3)。根据SMA-13的集料级配和原材料的密度,计算出SMA-13各筛孔尺寸范围的集料所占体积比。选取的玻璃集料粒径范围为4.75~9.5 mm。同时,粒径在4.75~9.5 mm范围内的玄武岩集料占集料总体积的35.5%。本文采用等体积替代法替代玄武岩骨

料,采用不同体积替代率的废旧玻璃(体积分数为0、10%、20%、30%)与玄武岩骨料共混制作试件。

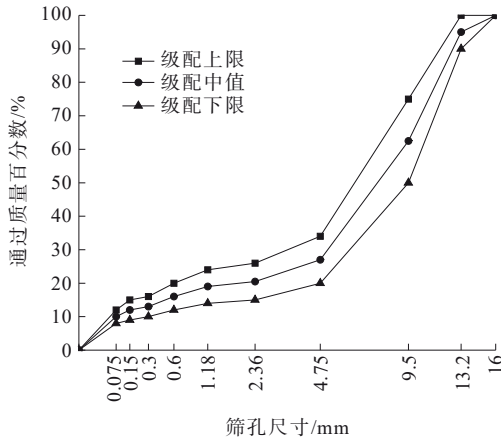


图3 玻璃沥青混合料设计级配

Figure 3 Design gradation of glass asphalt mixture

1.3 最佳沥青用量

对玻璃沥青混合料进行马歇尔试验,试验过程中控制沥青混合料拌和温度为75~185℃,试件成型温度控制为140~145℃。根据《公路沥青路面施工技术规范》(JTGF40—2004)中的马歇尔配合比设计方法,结合混合料马歇尔试验结果中各项体积指标和力学参数,确定不同玻璃集料掺量下的沥青混合料的最佳沥青用量,具体见表4。

表4 玻璃沥青混合料最佳沥青用量

Table 4 Optimal asphalt dosage for glass asphalt mixtures

玻璃集料替代率/%	最佳沥青用量/%	毛体积密度/(g·cm ⁻³)	空隙率/%	沥青饱和度/%	骨架空隙率/%	稳定度/kN	流值/(0.1mm)
0	5.4	2.413	4.0	77.2	17.31	18.54	38.5
10	5.5	2.408	3.9	77.1	17.16	18.57	39.6
20	5.5	2.403	4.0	76.8	17.24	18.73	39.5
30	5.6	2.400	4.1	76.5	17.17	18.82	40.6
标准			3~4	75~85	>17.0	>6.0	20~50

1.4 试验方法

通过旋转压实仪成型的沥青混合料与实际摊铺中沥青路面在胶轮式压路机中压实成型的效果相似。本文借助旋转压实试验对玻璃沥青混合料路面中集料的破碎行为进行研究。采用的旋转压实仪制作的试件直径为100mm,压实仪旋转角度1.25°,压力600kPa。本文分别取100次、150次和200次压实次数的试件来研究玻璃沥青混合料的破碎情况。每组试验均进行3次平行试验,以保证试

验结果准确。

1.4.1 抽提试验

为更好地观察玻璃沥青混合料集料破碎情况,对不同压实功作用下的玻璃沥青混合料进行抽提试验。将旋转压实成型后的试件放入烘箱加热,待试件软化后手动打散,利用抽提仪对打散后的试件进行抽提试验,抽提过程中保证集料没有缺少,对抽提完的集料重新进行筛分、称重。在试验过程中细集料(<2.36mm)损失较大,且玻璃集料破碎后有相当的一部分为细集料,因此对混合料受荷载作用后的细集料质量需精准量化。按照试验前后混合料质量守恒的定律,所有粒径大于2.36mm的各档集料重量变化之和的相反数即为粒径小于2.36mm的细集料质量变化,由此可以准确得到细集料质量变化:

$$G_{<2.36\text{mm}} - (G_{2.36\text{mm}} + G_{4.75\text{mm}} + G_{9.5\text{mm}} + G_{13.2\text{mm}}) = 0 \quad (1)$$

式中: G 为集料质量变化。

1.4.2 摆式摩擦试验与铺砂法

玻璃沥青混合料在压实过程中出现集料破碎的现象,粗集料破碎导致细集料增多,因此需研究集料破碎对混合料抗滑性能的影响。本文采用摆式摩擦系数仪与铺砂法测定不同破碎指数下的玻璃沥青混合料的抗滑性能。

1.4.3 间接拉伸试验

沥青混合料低温抗裂性体现了沥青混合料抵抗低温收缩或低温疲劳收缩的能力。通过间接拉伸试验来评价其低温性能^[21]。根据《沥青混合料间接拉伸强度的标准试验方法》(ASTMD6931—2017),玻璃沥青混合料试件采用旋转压实仪压实成型,间接拉伸试验温度设置为-15℃,加载速率设置为50mm/min。

1.4.4 车辙试验

采用车辙试验评价玻璃沥青混合料SMA-13(GSMA-13)的高温稳定性。本文将旋转压实试件进行切割,放入改装的车辙板模具(图4)中,用于进行动稳定度车辙试验。按照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTGE20—2011)的方法,对玻璃沥青混合料试件进行动稳定度车辙试验。试验温度为60℃,橡胶轮的接触压力为0.70MPa,试验时间为60min。

1.4.5 冻融劈裂试验

通过冻融劈裂试验研究玻璃集料的破碎对

GSMA-13 抗水损害能力的影响。GSAM-13 试件通过旋转压实仪压实成型,高度 63.5 mm、直径 100 mm。将试件分成 2 组,其中一组参与冻融循环,之后利用万能试验机对 2 组试件进行劈裂试验,计算其各自的劈裂强度,得到冻融劈裂强度比 R_{TSR} ,加载过程中控制加载速率为 50 mm/min。

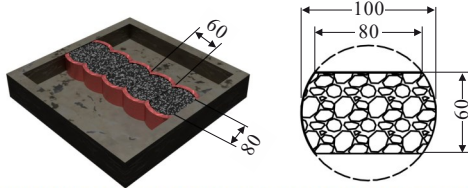


图 4 车辙试件模具(单位:mm)

Figure 4 Rutting test specimen mold (unit: mm)

1.4.6 半圆弯曲重复加载疲劳试验

通过半圆弯曲重复加载疲劳试验对玻璃沥青混合料的疲劳抗裂性能进行评价。使用液压材料多功能试验机对半圆试件进行疲劳试验,通过控制应力的加载模式对半圆试件进行疲劳加载,加载过程中采用三点接触加载模式,两支间距为 80 mm。加载温度为 15 °C。考虑疲劳试验周期以及试验数据的代表性,并将研究中试件的平均疲劳寿命控制在合理范围内,首先对试件进行半圆弯拉试验确定破坏荷载,进而选取合适的应力比。经过若干应力比的尝试,最后选取 0.2 作为疲劳试验采用的应力比。同时,采用半正弦波形模式对混合料进行加载,加载频率为 10 Hz,加载装置图见图 5。

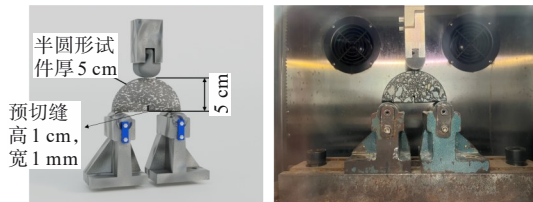


图 5 疲劳试验装置及试件加载情况

Figure 5 Fatigue test set and specimen loading conditions

1.4.7 数字图像处理

将不同压实功作用下的玻璃沥青混合料试件进行纵向切割,对切割的试件断面进行清洗和干燥处理,对其进行扫描从而得到一个清晰试件截面图。将得到的截面图通过灰度直方图均衡化技术进行灰度处理,以提高图像对比度^[22]。通过 OTSU 法对图像进行阈值分割,分割后的图像通过 Image J 软件进行空隙细观参数的提取,处理流程见图 6。

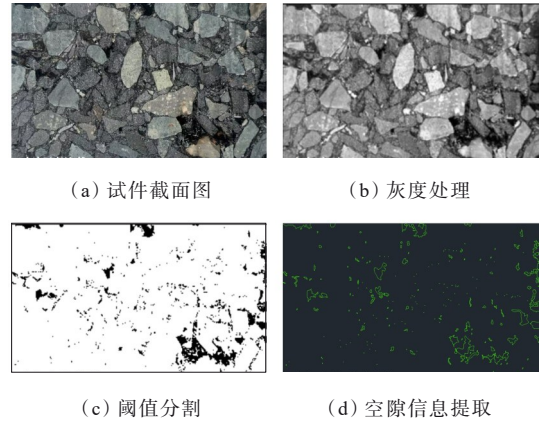


图 6 玻璃沥青混合料截面处理

Figure 6 Cross-section treatment of glass asphalt mixture

2 玻璃沥青混合料破碎规律与路用性能分析

借助旋转压实仪压实过程中输出的高度随压实次数变化曲线,得到不同玻璃集料的压实度曲线,如图 7 所示,混合料在 200 次压实后的空隙率如表 5 所示,根据规范,空隙率大于 2% 满足使用要求。

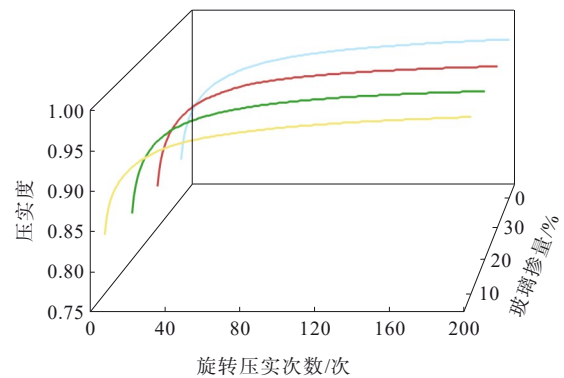


图 7 压实度曲线

Figure 7 Compaction degree curves

表 5 200 次压实空隙率

Table 5 Void ratio after 200 compaction cycles

玻璃集料替代率/%	理论最大相对密度	毛体积相对密度	空隙率/%
0	2.464	2.413	2.27
10	2.471	2.408	2.07
20	2.468	2.403	2.18
30	2.463	2.400	2.45

2.1 玻璃集料破碎

为研究玻璃沥青混合料在不同压实功作用下集料的破碎情况,将混合料抽提后进行筛分、称重,不同粒径范围内集料的质量变化率如图 8 所示。

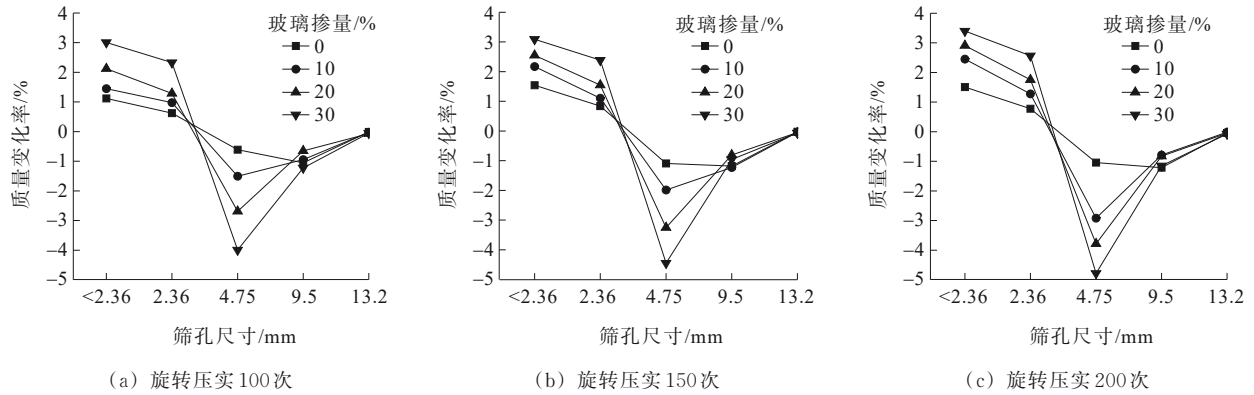


图 8 GSMA-13 不同粒径集料质量变化率

Figure 8 Incremental quality ratio of different particle sizes of GSMA-13 aggregate

由图 8 可知:对于 GSMA-13,尽管混合物中玻璃集料的体积替代率不同,但 4.75~9.5 mm 之间骨料质量变化率的增量较大,说明 4.75~9.5 mm 范围的集料的质量损失较为明显。且玻璃集料的替代率越大,4.75~9.5 mm 粒径范围内的集料损失越大。无论是玻璃集料对玄武岩集料的体积替代率,还是旋转压实的次数,均对 9.5 mm 以上粒径的集料破碎情况影响不大。因此,玻璃集料的破碎对玄武岩集料的破碎影响较小。

对于未掺玻璃集料的 SMA-13 混合物,经过旋转压实试验后,2.36 mm 以上粒径的集料发生破碎,导致细集料质量增加。在未掺玻璃集料前,9.5~13.2 mm 的集料产生破碎更明显;加入玻璃集料后,产生破碎的主要粒径范围变成 4.75~9.5 mm。且玻璃集料的替代率越大,产生的破碎越明显。说明旋转压实的压实功主要由粗集料吸收,而加入玻璃集料后,玻璃集料强度较低,在试件受力的情况下玻璃集料发生破碎。

根据软件统计的不同玻璃沥青混合物试件内部空隙数量和面积的演变规律,可以得出不同压实功作用下玻璃集料试件断面空隙参数如图 9、10 所示。

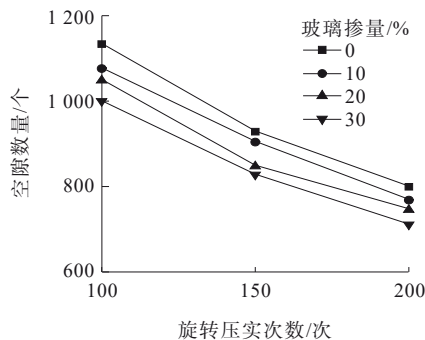


图 9 试件截面空隙数量

Figure 9 Number of voids in specimen cross-section

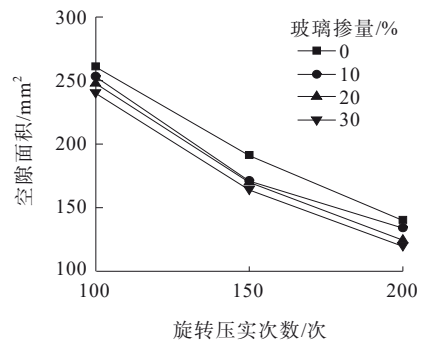


图 10 试件截面空隙面积

Figure 10 Void area in specimen cross-section

由图 9、10 可知:玻璃沥青混合物在旋转压实过程中,随着压实次数的增加,混合物试件内部空隙数量和空隙面积逐渐减小。旋转压实次数越多时其空隙数量和面积减少速率越慢,表明混合物试件在不断压实的过程中,抵抗变形的能力在提升。而混合物空隙数量和面积减小的原因包括集料重新排列、集料的破碎、集料间的压实以及沥青砂浆的压实等,这些因素共同作用导致混合物内部空隙结构变化,表现出空隙数量和面积的减小。而掺有玻璃集料的沥青混合物在空隙面积和数量上少于普通混合物,间接表明玻璃集料发生了破碎,且破碎的玻璃集料在荷载作用下填补了混合物的空隙,导致空隙数量和面积的降低。

2.2 玻璃沥青混合物破碎指数

为研究集料破碎对玻璃沥青混凝土的影响,并便于对 GSMA-13 的集料破碎情况进行评价,需建立一个量化指标。玻璃沥青混合物在荷载作用下主要表现为粒径尺寸大于 4.75 mm 的各档集料质量降低,且 4.75~9.5 mm 粒径范围内集料的质量变化最为明显。综上考虑,本研究将 4.75~9.5 mm 粒径范围内

集料质量变化率的绝对值作为玻璃沥青混合料的集料破碎指数,用来表征玻璃沥青混合料的破碎程度。集料的破碎指数越大,玻璃沥青混合料中集料的破碎情况就越严重。具体破碎指数见表6。

表6 GSMA-13玻璃集料破碎指数

Table 6 Crushing index of GSMA-13 glass aggregates

玻璃集料替代率/%	不同旋转压实次数(次)对应的集料破碎指数/%		
	100	150	200
0	0.61	0.75	1.04
10	1.51	1.99	2.92
20	2.69	3.25	3.78
30	3.99	4.45	4.79

由表6可知:玻璃沥青混合料GSMA-13的集料破碎指数受混合料中玻璃集料替代率影响,同时旋转压实次数的变化也会对其产生影响。玻璃集料的替代率越大,旋转压实次数越多,混合料的破碎指数越大,集料破碎情况越明显。

2.3 玻璃沥青混合料路用性能

2.3.1 抗滑性能

采用摆式摩擦系数仪与铺砂法测定不同破碎指数下的玻璃沥青混合料抗滑性能,试验结果如图11所示。

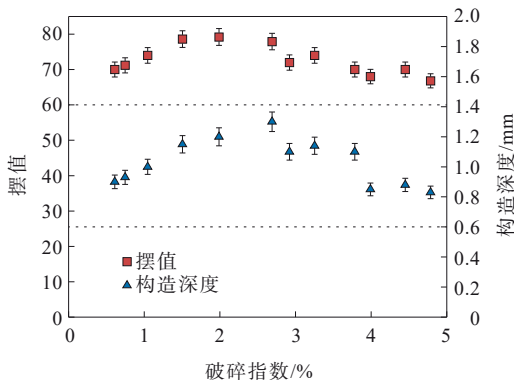


图11 摆值与构造深度

Figure 11 Pendulum values and structural depths

由图11可知:玻璃沥青混合料摆值大于60,构造深度大于0.6 mm,满足中潮湿地区的路面抗滑指标要求。掺有玻璃集料的沥青混合料测试的摆值平均值为72.9,构造深度平均值为1.06 mm,摆值与构造深度的标准差较小,分别为3.97 mm和0.15 mm,说明集料破碎对抗滑性能无明显影响,GSMA-13具有较好的抗滑性能。同时,玻璃沥青混合料的集料破碎值小于4.79%,集料破碎对玻璃沥青混凝土的抗滑

性能影响不明显。

2.3.2 低温抗裂性

玻璃沥青混合料在压实过程中发生集料破碎,其骨架结构发生变化,在荷载作用下更容易出现开裂现象。通过低温间接拉伸试验研究集料破碎对玻璃沥青混合料低温抗裂性的影响,试验结果如图12所示。

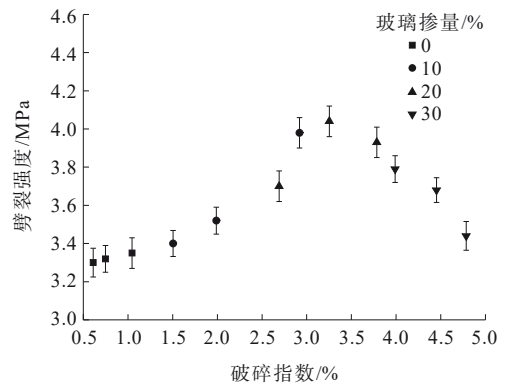


图12 低温间接拉伸强度

Figure 12 Indirect tensile strength at low temperature

由图12可知:在破碎指数小于3.25%时,随着玻璃沥青混合料集料破碎指数的增大,混合料的低温间接拉伸强度升高,破碎指数3.25%试件对应的低温拉伸强度比破碎指数1.51%试件高出17%左右;而随着破碎指数大于3.25%后,混合料的低温间接拉伸强度不断减小。初期混合料低温抗裂性提升的原因可能与玻璃集料吸水率小有关。沥青混合料的低温抗裂性与混合料的组成密切相关,在混合料中使用吸水率大的集料,沥青路面往往会出现较多温度裂缝。而当玻璃集料的破碎指数不断增加,虽然其棱角性较好,但强度低于玄武岩石料,当破碎玻璃数量不断增多,在外部荷载作用下,就越容易发生断裂,导致混合料低温抗裂性产生衰减^[5,23]。

2.3.3 高温稳定性

玻璃沥青混合料在压实过程中粗集料破碎,集料骨架受力结构发生改变,导致混合料抗车辙能力下降。通过车辙试验评价玻璃沥青混合料的高温稳定性,试验结果如图13所示。

由图13可知:玻璃沥青混合料中玻璃集料破碎指数与动稳定度构成线性关系,随着破碎指数的增加动稳定度下降。当破碎指数大于4.45%时,玻璃沥青混合料的动稳定度不满足规范要求。分析原因:一方面,玻璃沥青混合料中玻璃集料破碎导致粗骨料形成的受力结构不稳,试件抵抗高温变形的能

力下降;另一方面,集料破碎新暴露的玻璃集料的花白面与沥青的结合不好,导致玻璃集料与沥青的黏附性下降,产生较多自由沥青,混合料中玻璃集料易受力产生移动,使混合料的高温稳定性下降^[24-25]。

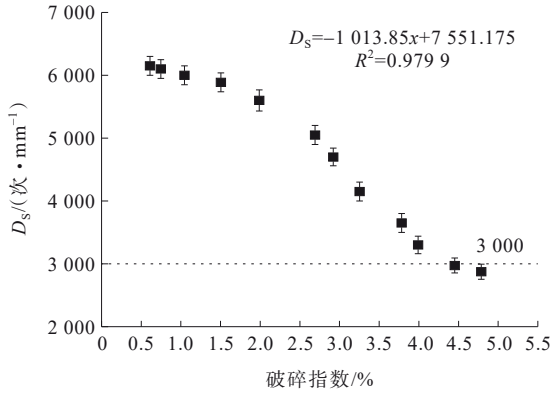


图13 动稳定度试验结果

Figure 13 Dynamic stability test results

2.3.4 水稳定性

为研究集料破碎对玻璃沥青混合料水稳定性的影响,对不同破碎程度的混合料试件进行冻融劈裂试验,其各自冻融劈裂试验强度比(R_{TSR})见图14。

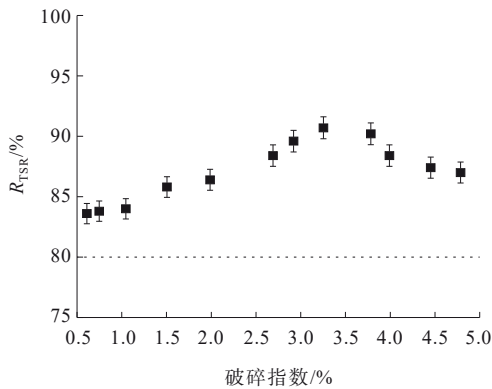


图14 冻融劈裂强度比

Figure 14 Freeze-thaw splitting strength ratios

由图14可知:随着玻璃沥青混合料的破碎指数增大,混合料的冻融劈裂强度比先上升后下降,但其数值均在80%以上,满足规范要求。在破碎指数较小时,破碎指数越大则冻融劈裂强度比越大,说明在一定范围内玻璃集料的破碎对混合料的抗水损害性能有积极影响。分析主要有以下两个原因:①在旋转压实过程中4.75~9.5 mm的玻璃集料破碎成细集料,导致细集料增多,空隙率变小,混合料更加紧实,水分子对混合料的剥离作用被削弱,进而增强混合料抗水损害能力;②硅烷偶联剂表面处理过的废旧

玻璃表面形成一层薄膜,能较好地抵抗水损害。而在图像的后半段,冻融劈裂强度比随混合料破碎指数增大而降低,其原因可能是随着玻璃集料破碎的越来越多,其没有被改性剂改性的花白面暴露出来,玻璃集料与沥青之间的黏结作用被削弱,两者间连接的界面被水分子破坏,导致混合料内部骨架之间黏结力减弱,进而降低其抵抗水损害的能力^[24]。

2.3.5 耐久性

通过半圆弯曲重复加载疲劳试验对玻璃沥青混合料的疲劳抗裂性能进行评价,采用疲劳寿命来表征试件的耐久性,试验结果如图15所示。

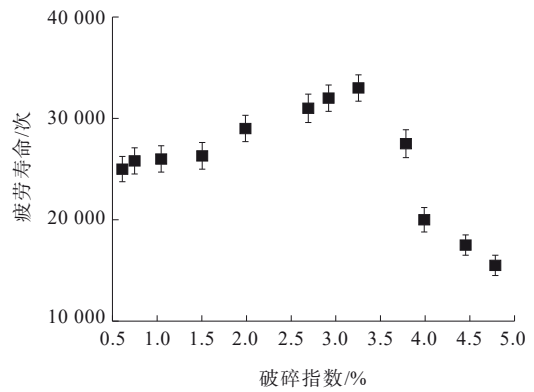


图15 混合料耐久性

Figure 15 Durability of mixture

由图15可知:随着破碎指数的增加,玻璃沥青混合料疲劳寿命先增大后降低。说明玻璃集料的破碎在一定范围内对混合料的疲劳性能有积极影响。但破碎指数超过3.25%后,疲劳性能出现下降。这说明玻璃破碎程度较低时能有效提高混合料的疲劳性能,破碎指数超过3.25%后其会对混合料疲劳性能产生不利影响。分析原因为:玻璃集料破碎较少时,破碎的玻璃集料使混合料更密实,其疲劳性能得到提升。而随着破碎指数逐渐增大,破碎的玻璃集料越来越多,混合料的骨架受力结构受到影响,疲劳性能降低^[26-27]。

3 结论

本文通过马歇尔混合料设计方案确定GSMA-13的最佳沥青用量。借助旋转压实试验研究玻璃沥青混合料在压实过程中集料的破碎程度对混合料性能的影响,通过间接拉伸试验、车辙试验、冻融劈裂试验和半圆弯曲重复加载疲劳试验,对混合料低温抗裂性、高温稳定性、水稳定性和耐久性进行研究。得出以下结论:

(1) 随着压实次数和玻璃集料掺量的增多,GSMA-13的集料破碎指数不断增加,玻璃沥青混合料中的集料破碎现象越显著。同时,混合料中主要破碎的集料为玻璃集料,玻璃集料的破碎对石料的破碎影响不大。

(2) 通过对玻璃沥青混合料试件截面进行数字图像处理可以发现,破碎的玻璃集料会填充混合料的部分空隙,压实次数和玻璃掺量的增加都会导致混合料试件空隙数量和空隙面积降低。

(3) 在一定范围内,集料的破碎行为对混合料的抗滑性能无明显影响。然而随着集料破碎指数的增加,混合料的高温性能减弱,当破碎指数大于4.45%时,混合料的抗滑性能不满足规范要求;随破碎指数增加,混合料低温抗裂性、水稳定性和耐久性能有所提升,当破碎指数大于3.25%时,性能逐渐下降。

(4) 综合考虑玻璃沥青混合料的路用性能,本文推荐玻璃沥青混合料中玻璃掺量不超过20%,控制掺有玻璃集料的混合料集料破碎指数不超过3.25%。

(5) 本文只针对玻璃沥青混合料中4.75~9.5 mm粒径范围内玻璃集料的破碎进行研究,未来需进一步研究全粒径范围内玻璃集料的破碎和破碎的玻璃集料在混合料内部的分布状态。

参考文献:

References:

- [1] 中国物资再生协会. 2024中国再生资源回收行业发展报告[J]. 资源再生, 2024(7): 27-38.
China National Resources Recycling Association. 2024 China renewable resource recycling industry development report[J]. Resource Recycling, 2024(7): 27-38.
- [2] SUDHARSAN N, PALANISAMY T, YARAGAL S C, et al. Environmental sustainability of waste glass as a valuable construction material: A critical review(Review) [J]. Ecology, Environment and Conservation, 2018, 24: S331-S338.
- [3] YUAN X H, WANG J B, SONG Q M, et al. Integrated assessment of economic benefits and environmental impact in waste glass closed-loop recycling for promoting glass circularity[J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 444: 141155.
- [4] 白伟, 孔维康, 孟勇军. 玻璃纤维改性沥青用于张力带的路面寿命和成本研究[J]. 中外公路, 2023, 43(5): 62-66.
BAI Wei, KONG Weikang, MENG Yongjun. Study on pavement life and cost of glass fiber modified asphalt for tension belt[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2023, 43(5): 62-66.
- [5] SUN Z L, CHEN B W, LIU S, et al. Polyurethane modified asphalt mixture incorporating waste glass with a wide particle size range: Preparation and performance evaluation[J]. Case Studies in Construction Materials, 2024, 20: e03119.
- [6] 张思成, 盛冬发, 罗志敏. 玻璃沥青混合料的制备与路用性能研究[J]. 公路, 2021, 66(6): 11-16.
ZHANG Sicheng, SHENG Dongfa, LUO Zhimin. Research on the preparation and road performance of glass asphalt mixture[J]. Highway, 2021, 66(6): 11-16.
- [7] SU N, CHEN J S. Engineering properties of asphalt concrete made with recycled glass[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2002, 35(4): 259-274.
- [8] 陈永志. 废玻璃对排水沥青混合料路用性能影响研究[J]. 公路工程, 2015, 40(2): 299-305.
CHEN Yongzhi. Research of waste glass on the performance of drainage asphalt mixture[J]. Highway Engineering, 2015, 40(2): 299-305.
- [9] ARABANI M. Effect of glass cullet on the improvement of the dynamic behaviour of asphalt concrete [J]. Construction and Building Materials, 2011, 25: 1181-1195.
- [10] 袁峻, 黄俊, 王波, 等. 玻璃沥青混凝土阻热降温性能[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(32): 13880-13885.
YUAN Jun, HUANG Jun, WANG Bo, et al. Thermal resistance and cooling performance of glass asphalt concrete[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(32): 13880-13885.
- [11] 袁峻, 黄俊, 王波, 等. 废旧玻璃沥青混凝土路用性能和导热性能研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2021, 37(3): 502-509.
YUAN Jun, HUANG Jun, WANG Bo, et al. Study on road performance and thermal conductivity of waste glass asphalt concrete[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2021, 37(3): 502-509.
- [12] DU Y F, DAI M X, DENG H B, et al. Incorporating hollow glass microsphere to cool asphalt pavement: Preliminary evaluation of asphalt mastic[J]. Construction and Building Materials, 2020, 244: 118380.
- [13] LACHANCE-TREMBLAY É, PERRATON D, VAILLANCOURT M, et al. Degradation of asphalt mixtures with glass aggregates subjected to freeze-thaw cycles[J]. Cold Regions Science and Technology, 2017, 141: 8-15.
- [14] 赵晓宁. 基于表面处理工艺的废旧玻璃沥青混合料路用性能研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2022.
ZHAO Xiaoning. Study on road performance of waste glass asphalt mixture based on surface treatment technology[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2022.
- [15] 王浩博. 废玻璃表面改性及其与沥青界面黏附性能影响研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2022.
WANG Haobo. Study on surface modification of waste glass and its influence on interfacial adhesion with asphalt

- [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2022.
- [16] LI C Q, WANG H B, FU C L, et al. Effect and mechanism of waste glass powder silane modification on water stability of asphalt mixture[J]. Construction and Building Materials, 2023, 366: 130086.
- [17] ZHANG M, QIAN Z D, ZHOU Y D, et al. Test and evaluation for effects of aggregates fragmentation on performance of lightweight asphalt concrete[J]. Construction and Building Materials, 2018, 169: 215-222.
- [18] 王二兵, 杜西江, 徐良, 等. 再生集料破碎行为对沥青混合料性能影响[J]. 公路工程, 2021, 46(2): 77-81, 102.
WANG Erbing, DU Xijiang, XU Liang, et al. Effect of crushing behavior on the road performance of asphalt mixture containing recycled aggregate[J]. Highway Engineering, 2021, 46(2): 77-81, 102.
- [19] 吴胜坤, 朱文兵, 周俊, 等. 多孔沥青混合料内粗集料破碎规律分析[J]. 现代交通技术, 2020, 17(4): 20-26.
WU Shengkun, ZHU Wenbing, ZHOU Jun, et al. Analysis on crushing regulation of coarse aggregate in porous asphalt mixture[J]. Modern Transportation Technology, 2020, 17(4): 20-26.
- [20] SHI L W, WANG D Y, XIAO X, et al. Meso-structural characteristics of asphalt mixture main skeleton based on meso-scale analysis[J]. Construction and Building Materials, 2020, 232: 117263.
- [21] 刘宇, 张肖宁, 迟凤霞. 国外 SCB(半圆弯抗)试验方法在沥青混合料中的研究与应用[J]. 中外公路, 2008, 28(3): 190-192.
LIU Yu, ZHANG Xiaoning, CHI Fengxia. Research and application of SCB (semi-circular bending resistance) test method in asphalt mixture abroad[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2008, 28(3): 190-192.
- [22] LI X L, LYU X C, ZHOU Y H, et al. Homogeneity evaluation of hot in-place recycling asphalt mixture using digital image processing technique[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 258: 120524.
- [23] 吕松涛, 陈淇, 鲁巍巍, 等. 沥青混合料低温半圆弯抗试验评价指标研究[J]. 中外公路, 2025, 45(3): 25-36.
LYU Songtao, CHEN Qi, LU Weiwei, et al. Study on evaluation index of semi-circular bending test of asphalt mixture at low temperature[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2025, 45(3): 25-36.
- [24] ZHOU B C, ZHANG J P, PEI J Z, et al. Design and evaluation of high-luminance porous asphalt mixtures based on wasted glass for sponge city[J]. Construction and Building Materials, 2021, 273: 121696.
- [25] ALI ANWARI R, COSKUN S, SALTAN M. Research on recycle of waste fluorescent lamp glasses and use as mineral filler in asphalt mixture[J]. Journal of Material Cycles and Waste Management, 2023, 25(1): 258-271.
- [26] NOURA S, YAGHOUBI E, FRAGOMENI S, et al. Fatigue and stiffness characteristics of asphalt mixtures made of recycled aggregates[J]. International Journal of Fatigue, 2023, 174: 107714.
- [27] 黄优, 张允宝, 刘朝晖, 等. 考虑正交异性的粒料压实特性及其结构力学行为研究[J]. 中外公路, 2024, 44(5): 117-124.
HUANG You, ZHANG Yunbao, LIU Zhaohui, et al. Compaction characteristics of granular material and its structural mechanical behavior considering orthotropy[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2024, 44(5): 117-124.