

DOI:10.19951/j.cnki.1672-9331.20221219002

文章编号:1672-9331(2023)06-0039-10

引用格式:张恩源,郭光辉,李盛.掺废线路板非金属材料水泥稳定碎石抗温湿性能试验研究[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2023,20(6):39-48.

Citation: ZHANG Enyuan, GUO Guanghui, LI Sheng. Experimental study on temperature and humidity resistance of cement stabilized crushed stone mixed with non-metallic materials recycled from waste printed circuit boards[J]. J Changsha Univ Sci Tech (Nat Sci), 2023,20(6):39-48.

掺废线路板非金属材料水泥稳定碎石抗温湿性能 试验研究

张恩源¹,郭光辉²,李盛¹

(1.长沙理工大学 特殊环境道路工程湖南省重点实验室,湖南 长沙 410114;2.清远市金运再生资源有限公司,广东 清远 511517)

摘要:【目的】为缓解修筑水泥稳定碎石基层对天然细集料的需求,并解决废线路板非金属材料难以处理的问题。【方法】采用废线路板非金属材料(non-metallic materials recycled from waste printed circuit boards, NWPCB)等体积代替水泥稳定碎石中粒径为0~0.075 mm和0.6~1.18 mm的细集料,并掺入丁苯乳液以优化NWPCB-水泥稳定碎石的性能。通过干缩试验、温缩试验、冻融循环试验和干湿循环试验,分析NWPCB的掺入对水泥稳定碎石抵抗温湿作用破坏能力的影响,并研究丁苯乳液改性NWPCB-水泥稳定碎石的效果。【结果】NWPCB-水泥稳定碎石的平均干缩系数较普通水泥稳定碎石的增加了5.4%,平均温缩系数较普通水泥稳定碎石的减小了4.8%,但是经过冻融循环和干湿循环后,两者的28 d无侧限抗压强度残留值均高于90%。此外,经丁苯乳液改性的NWPCB-水泥稳定碎石较未改性的NWPCB-水泥稳定碎石具有更好的抗温湿性能。【结论】掺入NWPCB的水泥稳定碎石仍具有较好的抗温湿性能,且丁苯乳液能起到优化作用。

关键词:废线路板非金属材料;丁苯乳液;固废利用;干缩;温缩;冻融循环;干湿循环

中图分类号:U416

文献标志码:A

0 引言

随着“十四五”规划的逐步落实,我国进行了大规模的公路交通基础设施建设,修建了大量的高速公路和普通公路,预计截至2025年我国高速公路建设里程达19万km,公路通车总里程达550万km。其中,半刚性基层作为传统的路面结构,通常采用水泥稳定材料,这种结构需要大量的粗细集料,因此对自然资源和环境产生了较大的负担。

废线路板非金属材料(non-metallic materials recycled from waste printed circuit boards, NWPCB)是指从线路板中提取出有价值的金属后所剩余的部分,这部分材料通常占比在60%以上,常常被忽

视^[1-3]。一些企业往往采取焚烧、填埋等方式处理,这不仅加剧了能源的消耗,而且导致其中所残留的重金属析出,增加了环境污染的风险。因此,选择合适的方法回收利用废线路板非金属材料部分,能够在一定程度上减少碳排放^[4-5],并降低环境污染的风险。废线路板非金属材料的主要成分为玻璃纤维和环氧树脂,其具有化学性质稳定、轻质高强等特点,是一种优良的建筑材料。近年来,一些学者将废印刷线路板非金属材料应用到水泥基材料中,如NIU等^[6]利用水泥固化废线路板非金属材料所制备的混凝土具有优良的抗冲击性能和抗压强度;徐风广等^[7]将废线路板非金属粉末掺至高铝水泥中,其掺量控制在80.0%~83.5%,在750℃下煅烧制得的水泥基多孔材料性能最优;KAKRIA等^[8]采用粒径小于150 μm的废线路板非

收稿日期:2022-12-19;修回日期:2023-01-25;接受日期:2023-01-26

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFB2601000);湖南省研究生科研创新项目(CLSJCX22013)

通信作者:郭光辉(1962—)(ORCID:0009-0000-7120-6856),男,工程师,主要从事材料工程、固废资源化利用等方面的研究。E-mail:13922605607@139.com

金属粉末作为水泥混凝土中的填料替代品,并证明了非金属粉末的掺入可以提高水泥混凝土的弯拉强度、抗压强度和劈裂强度;KUMAR等^[9]用不同掺量的废电子塑料代替混凝土的粗骨料,发现随着废电子塑料掺量的增加,混凝土的和易性、抗压强度、劈裂强度和弯拉强度均有所下降;杨佳俊等^[10]对掺入废电子线路板非金属残渣的水泥砂浆进行了重金属含量测试,结果表明水泥砂浆中的重金属检出量满足国家排放标准。

利用废线路板非金属材料代替水泥稳定碎石中的部分细集料,不但可以降低工程造价,提高资源利用率,还能减小天然集料开挖对环境造成的破坏。与此同时,道路基层容易受到降雨、地表径流的影响^[11],水泥的固化作用也能很好地避免废线路板非金属材料中残留的重金属析出。一种材料若要应用到实体道路工程中,必须具有较好的路用性能,除了应具备足够的强度、刚度以及优良的疲劳性能,还应具有抵抗温缩、干缩、冻融循环以及干湿循环等温湿作用损坏的能力。有关研究表明,丁苯乳液不但对水泥混凝土的力学性能和耐久性有一定的提升作用^[12],还可以改善水泥稳定碎石材料的收缩性能^[13]。因此,本文通过温缩试验、干缩试验、冻融循环试验和干湿循环试验,研究了NWPCB的掺入对水泥稳定碎石性能的影响,明确了丁苯乳液对NWPCB-水泥稳定碎石性能的优化程度。这些研究成果对NWPCB在水泥稳定碎石基层中的推广应用具有重大意义。

1 材料与试验

1.1 原材料

水泥选用南方牌P·O42.5普通硅酸盐水泥,按照现行规范《公路工程水泥及水泥混凝土试验规程》(JTG 3420—2020)对其各项技术指标进行测定,测定结果见表1。由表1可知,该水泥的各项技术指标均满足《公路路面基层施工技术细则》(JTG/T F20—2015)的相关要求。

集料采用石灰岩集料,经检验其技术指标满足《公路工程集料试验规程》(JTG E42—2005)的相关要求,各项技术指标见表2。

NWPCB由清远市金运再生资源有限公司提供,其颜色为浅黄色,主要呈片状、针状和粉末状,有轻微刺鼻气味,过筛之后按粒径将其分成0.6~

1.18 mm和0~0.075 mm两档备用,其表观密度分别为1.7、1.5 g/cm³。NWPCB物质组成及质量分数见表3,其扫描电镜图如图1所示。

试验所用丁苯乳液由深圳市吉田化工有限公司提供,其技术指标见表4。

表1 水泥技术指标

Table 1 Technical specifications of cement

检测项目	技术要求	试验结果
0.045 mm方孔筛余/%	≤10	5.8
安定性/mm	≤5	1.5
标准稠度/%		27.5
凝结时间/min	初凝	≥45
	终凝	≤600
抗折强度/MPa	3 d	≥3.5
	28 d	≥6.5
抗压强度/MPa	3 d	≥17
	28 d	≥42.5

表2 集料技术指标

Table 2 Technical specifications of aggregate

集料尺寸/mm	表观密度/(g·cm ⁻³)	吸水率/%	压碎值/%
[0, 2.36)	2.583	2.80	25
[2.36, 4.75)	2.637	2.50	
[4.75, 9.5)	2.779	1.60	
[9.5, 19)	2.726	0.88	
[19, 31.5)	2.752	0.73	

表3 NWPCB的物质组成及质量分数

Table 3 Composition and content of NWPCB %

w(双酚A型环氧树脂)	w(玻璃纤维)	w(溴代环氧树脂)	w(氢氧化铝)	w(氢氧化镁)	w(其他)
33~35	46~47	12~14	4~5		3~4

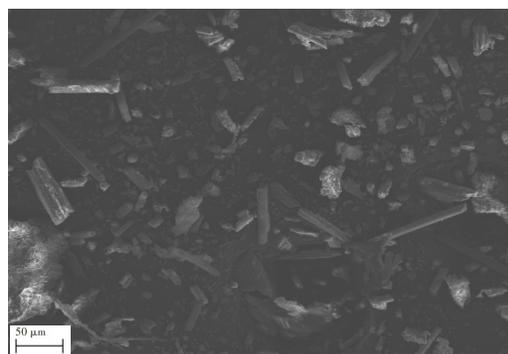


图1 NWPCB扫描电镜图

Fig. 1 Scanning electron microscope image of NWPCB

表4 丁苯乳液的技术指标

Table 4 Technical specifications of butadiene-styrene emulsion

指标	数值/描述
外观	乳白色蓝光液体
总固含量/%	50%±1%
pH值	6~7
黏度/(mPa·s)	1 000~1 200

表5 集料级配

Table 5 Grading of aggregate

级配类别	通过下列筛孔的集料质量百分率											
	26.5 mm	19 mm	16 mm	13.2 mm	9.5 mm	4.75 mm	2.36 mm	1.18 mm	0.6 mm	0.3 mm	0.15 mm	0.075 mm
级配上限	100.0	86.0	79.0	72.0	62.0	45.0	31.0	22.0	15.0	10.0	7.0	5.0
级配下限	100.0	82.0	73.0	65.0	53.0	35.0	22.0	13.0	8.0	5.0	3.0	2.0
级配中值	100.0	84.0	76.0	68.5	57.5	40.0	26.5	17.5	11.5	7.5	5.0	3.5

根据表5的级配,计算出0.6~1.18 mm和0~0.075 mm粒径的集料用量及其总体积。然后,采用等体积替换的方式,用NWPCB替换这两档石灰岩集料。替换后,NWPCB约占集料总体积的11%,占集料总质量的6%。

1.2.2 击实试验

通过击实试验,本研究确定普通水泥稳定碎石的最大干密度为2.490 g/cm³,最佳含水率为4.982%;NWPCB-水泥稳定碎石的最大干密度为2.436 g/cm³,最佳含水率为5.293%;改性NWPCB-水泥稳定碎石是在NWPCB-水泥稳定碎石中掺入丁苯乳液制备而成的,并考虑所掺丁苯乳液自身的含水率,控制改性NWPCB-水泥稳定碎石的含水率为5.293%,与NWPCB-水泥稳定碎石的最佳含水率保持一致。

1.2.3 丁苯乳液掺量

强度是水泥稳定碎石基层的主要性能指标。在无机结合料稳定材料施工过程中,其7 d无侧限抗压强度是施工质量控制的主要依据^[14-16],该指标能在一定程度上反映丁苯乳液的掺入对水泥稳定碎石性能的影响。因此,本文选取7 d无侧限抗压强度作为确定丁苯乳液最佳掺量的指标。依次设计0%、5%、10%、15%四种掺量(乳液中聚合物固体与水泥的质量比)的改性NWPCB-水泥稳定碎石,每种掺量分别成型9个试件并对其进行无侧限抗压强度试验,不同丁苯乳液掺量的改性NWPCB-水泥稳定碎石7 d无侧限抗压强度见表6。

1.2 混合料设计

1.2.1 集料级配

集料级配选用《公路路面基层施工技术细则》(JTG/T F20—2015)推荐的适用于高速公路和一级公路基层和底基层的C-B-1级配范围中值。将石灰岩集料从26.5 mm方孔筛往下依次筛分成12档备料。集料级配见表5。

表6 不同丁苯乳液掺量的改性NWPCB-水泥稳定碎石7 d无侧限抗压强度

Table 6 The 7 d unconfined compressive strength of modified NWPCB-cement stabilized crushed stone with different butadiene emulsion dosage

丁苯乳液掺量/%	7 d无侧限抗压强度代表值/MPa
0	5.56
5	6.77
10	5.83
15	3.92

根据表6的试验结果可知,丁苯乳液掺量为5%时制得的改性NWPCB-水泥稳定碎石7 d无侧限抗压强度最高,由此确定丁苯乳液最佳掺量为5%。

1.3 试件制备与养护

用NWPCB等体积替换天然细集料,丁苯乳液作为外掺剂,不会改变原有级配,所制备的各类试件级配类型相同,且均采用5%的水泥掺量。由于NWPCB与天然石灰岩集料在密度上相差较大,采用振动拌和的方式可以提高混合料分布的均匀性。所用搅拌机由许昌德通振动搅拌技术有限公司提供,型号为DT60ZEW,振动输入功率为2.2 kW,搅拌输入功率为4 kW,拌和时长为120 s。采用振动击实试验制备梁式试件和圆柱形试件,干缩和温缩试验采用尺寸为10 cm(宽)×10 cm(高)×40 cm(长)的梁式试件,这两个试验中每种类型的水泥稳定碎石平行试件数量均为6个;冻融循环和干湿循环试验采用尺寸为15 cm(直径)×

15 cm(高)的圆柱形试件,这两个试验中每种类型的水泥稳定碎石平行试件数量均为9个。振动击实仪生产厂家为杭州萧山真誉传动件厂,激振力为7.6 kN,振动频率为32 Hz,振动成型时间为180 s。试件成型后,套上塑料袋送入温度为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$,相对湿度为95%以上的标准养护室养护。

2 收缩试验研究

2.1 干缩试验

干缩试验按照《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTG E51—2009)的相关要求进行,于6 d养护龄期时将试件浸水一昼夜后取出,擦干试件表面水分后称取其初始质量 m_0 ,用砂纸将试件长轴端面磨平,再用502胶水粘贴上玻璃片。待玻璃片粘贴稳固后安置于底部放有玻璃棒的干缩仪上,干缩仪两端固定有千分表。

干缩试验观测周期为31 d,从试件移入干缩室后开始计时,前7 d每隔24 h读取一次千分表读数,7 d以后每隔48 h读数一次,每次读数后立即称取试件的质量,观测结束后将其烘干至恒重并称取质量记为 m 。计算失水率、干缩应变、干缩系数时取平均值作为结果,平均干缩系数为累计干缩应变与累计失水率的商。

1) 龄期与累计失水率的关系。

以龄期为横坐标,将不同龄期下的三种水泥稳定碎石的累计失水率作为纵坐标绘制成图2。

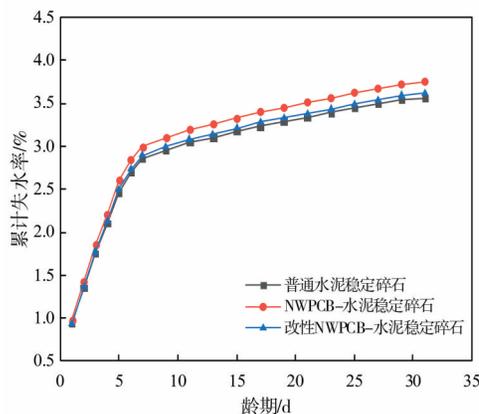


图2 龄期与累计失水率的关系

Fig. 2 Relationship between age and cumulative water loss rate

由图2可以看出,同普通水泥稳定碎石一样,NWPCB-水泥稳定碎石和改性NWPCB-水泥稳定碎石的累计失水率会随着龄期的延长而逐渐增

大,在养护龄期7 d以内失水率增加速率较快,养护7 d时各类试件的累计失水率均达到养护31 d时的80.0%左右。在整个观测龄期内,NWPCB-水泥稳定碎石和改性NWPCB-水泥稳定碎石的累计失水率一直较普通水泥稳定碎石的大,截至31 d时,NWPCB-水泥稳定碎石的累计失水率较普通水泥稳定碎石的增加了5.3%,掺入丁苯乳液后的改性NWPCB-水泥稳定碎石的累计失水率较NWPCB-水泥稳定碎石的减小了3.5%。主要原因是NWPCB的掺入使得水泥稳定碎石的最佳含水率增加,试件中的含水率较大,进而导致累计失水率较大,但由于改性剂丁苯乳液的掺入,其中的聚合物颗粒占据了试件内部原本存在的微小孔隙,致使毛细水散失的通道被阻断或覆盖,减小了试件内部的失水面积。因此,在同一龄期下,经丁苯乳液改性过的NWPCB-水泥稳定碎石的累计失水率更小。

2) 龄期与累计干缩应变的关系。

以龄期为横坐标,将不同龄期下的三种水泥稳定碎石的累计干缩应变作为纵坐标绘制成图3。

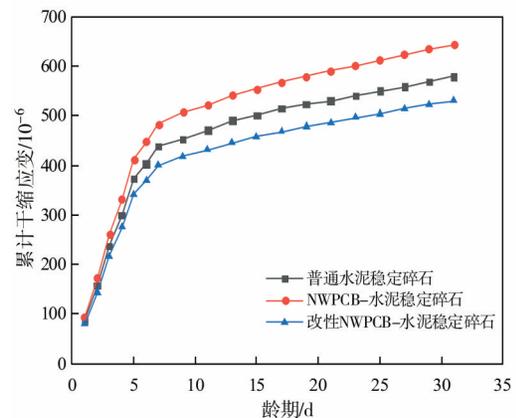


图3 龄期与累计干缩应变的关系

Fig. 3 Relationship between age and cumulative shrinkage strain

由图3可以看出,三种水泥稳定碎石的累计干缩应变随龄期的变化规律与累计失水率的变化规律基本相同。在7 d前累计干缩应变增长较快,随后增速放缓。三种水泥稳定碎石按累计干缩应变由大到小排序,依次为: NWPCB-水泥稳定碎石、普通水泥稳定碎石、改性NWPCB-水泥稳定碎石。水分的散失会引起干缩应变的增大,具有较高含水率的NWPCB-水泥稳定碎石表现出更大的累计干缩应变,而丁苯乳液凝固后形成的聚合物会与水泥的水化产物共同形成交错的网状结构,起到

类似纤维的作用,可以抵御内部骨架间收缩应力的进一步发展^[17],干燥失水所引起的体积收缩得以改善,因此,改性NWPCB-水泥稳定碎石表现出较小的累计干缩应变。在养护31 d时,NWPCB-水泥稳定碎石的累计干缩应变较普通水泥稳定碎石的增加了11.2%,掺入丁苯乳液后的改性NWPCB-水泥稳定碎石的累计干缩应变较NWPCB-水泥稳定碎石的减小了17.5%。

3) 龄期与平均干缩系数的关系。

以龄期为横坐标,将不同龄期下的三种水泥稳定碎石的平均干缩系数作为纵坐标绘制成图4。

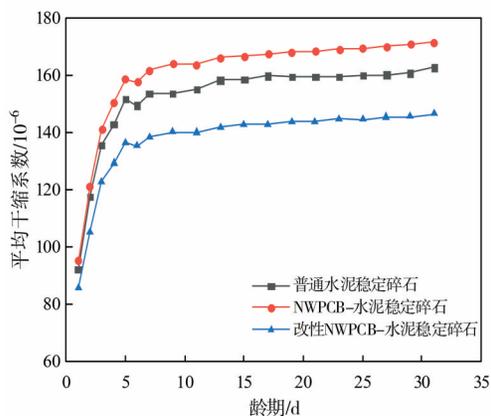


图4 龄期与平均干缩系数的关系

Fig. 4 Relationship between age and mean shrinkage coefficient

由图4可以看出,三种水泥稳定碎石的前期平均干缩系数均增长较快,之后增速均减缓。在任意龄期,三种水泥稳定碎石按平均干缩系数由大到小排序,依次为:普通水泥稳定碎石、NWPCB-水泥稳定碎石、改性NWPCB-水泥稳定碎石。在养护31 d时,NWPCB-水泥稳定碎石的平均干缩系数较普通水泥稳定碎石的增加了5.4%,掺入丁苯乳液后的改性NWPCB-水泥稳定碎石的平均干缩系数较NWPCB-水泥稳定碎石的减小了19.0%。这说明,虽然NWPCB的掺入会导致水泥稳定碎石的干缩特性劣化,但是影响相对较小,丁苯乳液的掺入可以显著改善NWPCB-水泥稳定碎石的干缩特性。

2.2 温缩试验

温缩试验采用仪表法进行,所用试件的类型、数量与干缩试验的相同。6 d养护龄期时将试件浸水一昼夜后取出,试件烘干至恒重后记录试件长度,采取与干缩试验同样的方法安装玻璃片后放置于收缩仪上。

温缩试验在可程式恒温恒湿试验箱中进行,

温度变化区间为 $-10\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$,从 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 逐渐下降至 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$,降温速率为 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$,每下降 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为一级,每级温度保温3 h,保温结束前5 min之内记录千分表的读数,试验结果如图5所示。

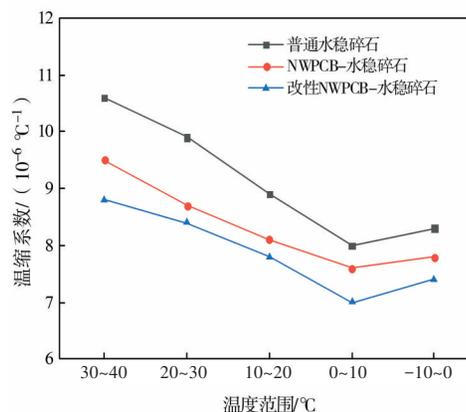


图5 不同温度范围的温缩系数

Fig. 5 Temperature shrinkage coefficient test results of different temperature ranges

由图5可以看出,在 $-10\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的整个温度区间内,三种水泥稳定碎石按其温缩系数由大到小排序,依次为:普通水泥稳定碎石、NWPCB-水泥稳定碎石、改性NWPCB-水泥稳定碎石。三种水泥稳定碎石的温缩系数变化趋势基本相同,即温缩系数随着温度的降低大体呈下降趋势,均在 $30\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度区间内存在最大值,在 $0\sim 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度区间达到最小值。产生这种现象的主要原因是由于水泥发生水化反应所生成的 CaO 、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、 $\text{Si}(\text{OH})_2$ 和C-S-H凝胶等晶体具有较高的热胀缩系数,温度较高时试件的热胀缩明显,进而导致其温缩系数较高;在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,试件内部残留的一些自由水开始结冰、膨胀,抵消了试件部分的收缩变形,因此温缩系数在 $0\sim 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度区间存在最小值;而在 $-10\sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度区间,试件内部的孔隙水由于冻结而引起的体积增大更为明显,对其体积变形起主导作用,该温度区间的温缩系数较 $0\sim 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度区间的增大^[18]。

从整个试验结果来看,普通水泥稳定碎石的平均温缩系数为 $9.1\times 10^{-6}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$,改性前后NWPCB-水泥稳定碎石的平均温缩系数分别为 $8.3\times 10^{-6}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ 和 $7.9\times 10^{-6}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ 。掺入NWPCB后,水泥稳定碎石的平均温缩系数较普通水泥稳定碎石的减小了8.8%,这是由于粉末状的NWPCB代替了粒径在 0.075 mm 以下的填料,减少了水泥稳定碎石中温缩系数较大的次生矿物的数量,从而在一定程度上

上减小了材料整体的温缩系数^[19]。其次,NWPCB的主要成分为玻璃纤维和固化了的环氧树脂,其自身的物理化学性质就极为稳定,加之废线路板中含有一定数量的溴代阻燃剂,经破碎、分选后残留于NWPCB中。这使得NWPCB较天然集料具有更加优良的热稳定性。经过丁苯乳液改性的NWPCB-水泥稳定碎石的平均温缩系数较未改性的NWPCB-水泥稳定碎石的又进一步减小了4.8%。由此可知,NWPCB代替部分细集料可以提高水泥稳定碎石的温缩性能,丁苯乳液则起到了进一步的优化作用。

3 循环试验研究

3.1 冻融循环试验

根据《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTG E51—2009),采用5次反复冰冻-泡水-再冰冻来模拟水泥稳定碎石基层经历冻融循环的过程。试件在养护27 d时取出,浸水一昼夜,用干燥的毛巾吸干表面水分,并记录下各个试件的初始高度和质量。冰冻过程中应使试件之间的距离大于20 mm,以利于冷气充分流通。设置冰冻温度为 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$,冰冻16 h,融化温度为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$,融化8 h。每经历一次冻融循环后,都需要将试件取出擦干其表面水分并进行称重,5次冻融循环结束后将试件进行无侧限抗压强度试验。与此同时,从三种水泥稳定碎石试件中各取一组养护龄期为28 d的试件作为对照组,测定试件未经过冻融循环破坏的无侧限抗压强度。

1) 冻融循环次数与质量变化率的关系(图6)。

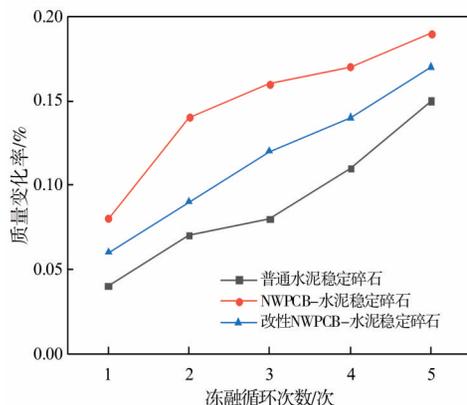


图6 冻融循环次数与质量变化率的关系

Fig. 6 The relationship between the times of freeze-thaw cycles and the rate of mass change

由图6可以看出,随着冻融循环次数的增加,三种水泥稳定碎石质量变化率也随之增加。这表明在该试验过程中各类试件的表层剥落质量大于试件的吸水质量。5次冻融循环后,普通水泥稳定碎石的质量变化率最小,仅为0.15%;NWPCB-水泥稳定碎石和改性NWPCB-水泥稳定碎石的质量变化率分别为0.19%和0.17%。由此可知,NWPCB的掺入会导致水泥稳定碎石在冻融作用下产生更多的质量损失,出现这种情况可能由于针片状和粉末状的NWPCB填充作用有限,试件表面存在较多孔隙,自由水容易进入试件内部,水冻结成冰时产生的冻胀力引起试件内部的损伤,削弱了水泥在集料之间的黏结作用,部分细集料在试件浸水融化过程中剥落。在丁苯乳液掺入后,其凝固形成的聚合物膜可填充试件内部的孔洞,改善了水泥稳定碎石内部结构^[20],阻碍了外部水分的进入,减小了冰冻时产生的冻胀力,降低了冻融循环对试件的损伤作用,试件浸水融化剥落的细集料也随之变少。

2) 冻融循环强度损失(图7)。

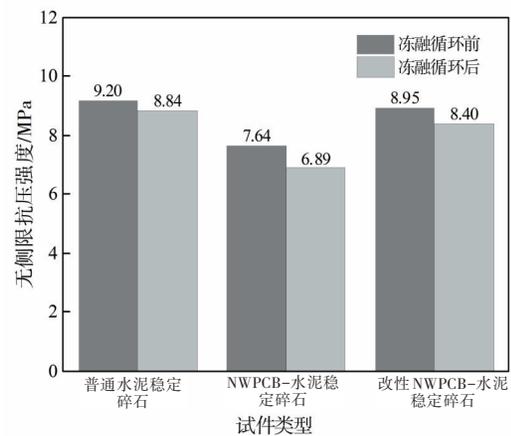


图7 冻融循环强度损失

Fig. 7 Strength loss of freeze-thaw cycle

由图7可知,5次冻融循环后,三种水泥稳定碎石的无侧限抗压强度残留值均高于90%。三种试件按照其冻融循环后无侧限抗压强度的残留值由大到小排序,依次为:普通水泥稳定碎石(96.1%)、改性NWPCB-水泥稳定碎石(93.8%)、NWPCB-水泥稳定碎石(90.2%)。这说明经5次冻融循环后各类试件的抗压强度损失均较小。虽然NWPCB的掺入会降低水泥稳定碎石的抗压强度残留值,但是降低幅度并不大,NWPCB-水泥稳定碎石与普通水泥稳定碎石的抗冻性能基本相当。

丁苯乳液则可以改善由于NWPCB的掺入而引起试件抗冻性能劣化的问题。

3.2 干湿循环试验

进行干湿循环试验前,首先要确定一次干湿循环的烘干时长和浸水时长^[21]。取养护龄期为 28 d 的圆柱体试件,浸水一昼夜后取出,用干布擦干试件表面水分后放入烘箱以 70 °C 烘干,分别在烘干第 3、6、9、12、15、18 小时等时间点取出试件并对其进行称重,直至相邻两次称得试件的质量差值不超过 0.02% (约为 1 g) 时认为试件达到干燥状态。同理,将干燥的试件浸水,分别在浸水第 3、6、9、12、15 小时等时间点取出试件,轻轻吸干试件表面水分后并对其称重,直至相邻两次称得试件的质量差值不超过 0.02% (约为 1 g) 时认为试件达到饱水状态。通过这种方法分别得出三种水泥稳定碎石的烘干时长和浸水时长。

对经过 5 次干湿循环后的三种水泥稳定碎石试件进行抗压强度试验。试件在仅饱水后的无侧限抗压强度与经历干湿循环后的无侧限抗压强度的比值,可以表征干湿循环后试件的抗压强度损失。比值越大,表明材料抵抗反复干燥、浸水的能力越强;反之,则越弱。

1) 烘干时长与失水率的关系(图 8)。

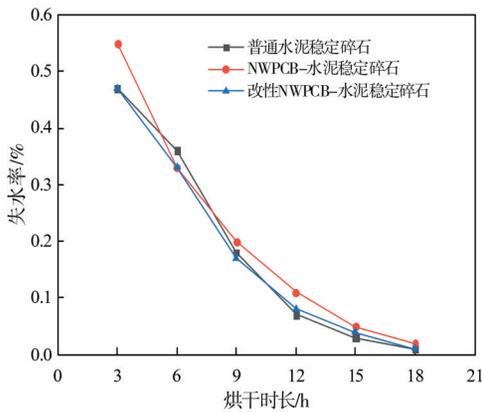


图 8 烘干时长与失水率的关系

Fig. 8 Relationship between drying time and water loss rate

由图 8 可知,三种水泥稳定碎石的失水率随着烘干时长的增加逐步减小,在烘干时长小于 6 h 时,NWPCB-水泥稳定碎石的失水率下降幅度最大,累计失水率达 0.88%;在烘干时长大于 6 h 时,三种水泥稳定碎石的失水率大致相当。这可能是由于 NWPCB-水泥稳定碎石试件存在较多的孔隙,试件达到干燥状态的前期,内部水分的散失更为容易,在相同烘干条件下,其失水率更大。烘干

时长为 18 h 时,三种水泥稳定碎石试件的失水率均小于 0.02%,由此确定一次干湿循环的烘干时长为 18 h。

2) 浸水时长与吸水率的关系(图 9)。

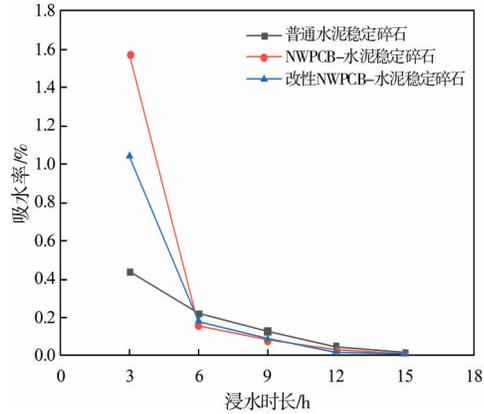


图 9 浸水时长与吸水率的关系

Fig. 9 The relationship between soaking time and water absorption

由图 9 可知,三种水泥稳定碎石的吸水率随着浸水时长的增加逐步减小。在浸水过程中的前 6 h,三种水泥稳定碎石的吸水率变化均较显著,按照吸水率由大到小排序,依次为: NWPCB-水泥稳定碎石、改性 NWPCB-水泥稳定碎石、普通水泥稳定碎石;三种水泥稳定碎石的吸水率在浸水 6 h 后的变化大致相当,并均于浸水 15 h 时达到饱水状态。这表明三种水泥稳定碎石在浸水过程的早期吸水速率快,后期吸水速率慢,并确定一次干湿循环试验的浸水时长为 15 h。

3) 干湿循环强度损失(图 10)。

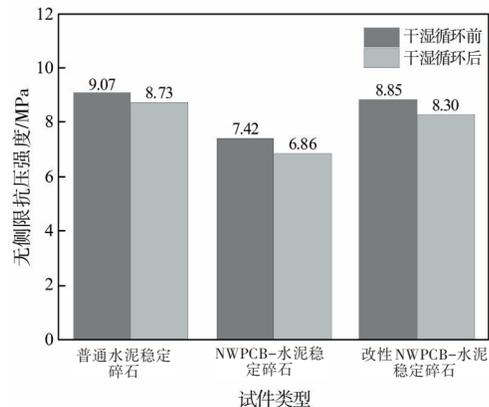


图 10 干湿循环强度损失

Fig. 10 Dry-wet cycle strength loss

由图 10 可知,经历 5 次干湿循环后,三种试件的无侧限抗压强度残留值均高于 90%。三种试件按照其干湿循环后无侧限抗压强度的残留值由大

到小排序,依次为:普通水泥稳定碎石(96.3%)、改性NWPCB-水泥稳定碎石(93.8%)、NWPCB-水泥稳定碎石(92.5%)。这说明经5次干湿循环后各类试件的抗压强度损失均较小。虽然NWPCB的掺入会降低水泥稳定碎石的抗压强度残留值,但是降低幅度并不大,NWPCB-水泥稳定碎石与普通水泥稳定碎石的干湿循环特性基本相当。丁苯乳液则可以改善NWPCB-水泥稳定碎石的干湿循环特性。

4 结论

本研究采用高速公路基层常用的C-B-1型级配的中值,将粒径为0.6~1.18 mm和0~0.075 mm的废线路板非金属材料等体积替代天然细集料制备水泥稳定碎石,并掺入丁苯乳液对水泥稳定碎石的性能进行优化。通过对普通水泥稳定碎石、NWPCB-水泥稳定碎石和改性NWPCB-水泥稳定碎石进行收缩试验和循环试验,对比分析三种水泥稳定碎石抵抗温湿作用损坏的能力。主要结论如下:

1) 在干缩性能方面,NWPCB-水泥稳定碎石的平均干缩系数较普通水泥稳定碎石的增加了5.4%,掺入丁苯乳液后的改性NWPCB-水泥稳定碎石的平均干缩系数较NWPCB-水泥稳定碎石的减小了19.0%。NWPCB的掺入对水泥稳定碎石的干缩性能影响不大,丁苯乳液可以显著改善NWPCB-水泥稳定碎石的干缩性能。

2) 在温缩性能方面,NWPCB-水泥稳定碎石的平均温缩系数较普通水泥稳定碎石的减小了8.8%,经过丁苯乳液改性的NWPCB-水泥稳定碎石平均温缩系数较未改性的NWPCB-水泥稳定碎石的又进一步减小了4.8%。这表明NWPCB代替部分细集料可以提高水泥稳定碎石的温缩性能,丁苯乳液则起到了进一步优化作用。

3) 在抗冻融性能方面,NWPCB-水泥稳定碎石的冻融循环质量损失略高于普通水泥稳定碎石的质量损失。然而,三种水泥稳定碎石的28 d无侧限抗压强度残留值均高于90%。NWPCB-水泥稳定碎石的抗冻融性能与普通水泥稳定碎石的大致相当。此外,丁苯乳液可以改善NWPCB-水泥稳定碎石的抗冻融性能。

4) 在干湿循环特性方面,NWPCB-水泥稳定

碎石较普通水泥稳定碎石显示出更易失水和吸水的特性,三种水泥稳定碎石的28 d无侧限抗压强度残留值均高于90%,NWPCB-水泥稳定碎石的干湿循环特性与普通水泥稳定碎石的大致相当。此外,丁苯乳液的掺入对NWPCB-水泥稳定碎石的干湿循环特性起到了优化作用。

[参考文献]

- [1] VEIT H M, DIEHL T R, SALAMI A P, et al. Utilization of magnetic and electrostatic separation in the recycling of printed circuit boards scrap [J]. *Waste Management*, 2005, 25 (1): 67-74. DOI: 10.1016/j.wasman.2004.09.009.
- [2] CUI J R, FORSSBERG E. Mechanical recycling of waste electric and electronic equipment: a review [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2003, 99 (3): 243-263. DOI: 10.1016/S0304-3894(03)00061-X.
- [3] LI J, XU Z M, ZHOU Y H. Application of corona discharge and electrostatic force to separate metals and nonmetals from crushed particles of waste printed circuit boards [J]. *Journal of Electrostatics*, 2007, 65 (4): 233-238. DOI: 10.1016/j.elstat.2006.08.004.
- [4] 马俊伟,王真真,李金惠. 电选法回收废印刷线路板中金属Cu的研究 [J]. *环境科学*, 2006, 27 (9): 1895-1900. DOI: 10.13227/j.hjcx.2006.09.036. MA Junwei, WANG Zhenzhen, LI Jinhui. Study on recovery of copper from waste printed wiring boards by electrostatic separation [J]. *Environmental Science*, 2006, 27 (9): 1895-1900. DOI: 10.13227/j. hjcx. 2006.09.036.
- [5] VEIT H M, BERNARDES A M, FERREIRA J Z, et al. Recovery of copper from printed circuit boards scraps by mechanical processing and electrometallurgy [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2006, 137 (3): 1704-1709. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2006.05.010.
- [6] NIU X J, LI Y D. Treatment of waste printed wire boards in electronic waste for safe disposal [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, 145 (3): 410-416. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2006.11.039.
- [7] 徐风广,陈浩,陈小卫,等. 废弃电路板非金属粉制备水泥基多孔材料的研究 [J]. *新型建筑材料*, 2021, 48 (10): 30-34. DOI: 10.3969/j. issn. 1001-702X.2021.10.007. XU Fengguang, CHEN Hao, CHEN Xiaowei, et al. Study on the preparation of cement base multi-hole material by scrap circuit board grinding powder [J]. *New Building Materials*, 2021, 48 (10): 30-34. DOI: 10.3969/j.issn.1001-702X.2021.10.007.
- [8] KAKRIA K, PRIYA S. Use of non-metallic powder reclaimed from waste printed circuit boards in rigid

- concrete pavement [J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2021, 1075(1): 012032. DOI: 10.1088/1757-899x/1075/1/012032.
- [9] KUMAR K S, BASKAR K. Recycling of E-plastic waste as a construction material in developing countries [J]. Journal of Material Cycles and Waste Management, 2015, 17(4): 718-724. DOI: 10.1007/s10163-014-0303-5.
- [10] 杨佳俊, 陆文雄, 郑爱新, 等. 掺废电子线路板非金属材料水泥砂浆安全性能的研究[J]. 新型建筑材料, 2010, 37(6): 64-65, 68. DOI: 10.3969/j.issn.1001-702X.2010.06.019.
- YANG Jiajun, LU Wenxiong, ZHENG Aixin, et al. Study on safety of the cement mortar comprising non-metallic residue of discarded print circuit boards [J]. New Building Materials, 2010, 37(6): 64-65, 68. DOI: 10.3969/j.issn.1001-702X.2010.06.019.
- [11] 许可, 刘萌, 李盛, 等. 基于SWMM的岳阳市海绵城市低影响设计及效果评价[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2022, 19(2): 77-87. DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.2022.02.008.
- XU Ke, LIU Meng, LI Sheng, et al. Low-impact design and effect evaluation of sponge city in Yueyang City based on SWMM [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2022, 19(2): 77-87. DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.2022.02.008.
- [12] 刘方, 王宝民, 袁晓洒, 等. 丁苯胶乳改性水泥混凝土的力学性能及耐久性实验分析[J]. 功能材料, 2019, 50(6): 6167-6173. DOI: 10.3969/j.issn.1001-9731.2019.06.029.
- LIU Fang, WANG Baomin, YUAN Xiaosa, et al. Experimental analysis on mechanical properties and durability of cement concrete modified by styrene-butadiene latex [J]. Journal of Functional Materials, 2019, 50(6): 6167-6173. DOI: 10.3969/j.issn.1001-9731.2019.06.029.
- [13] 严士军, 李平, 程迪胜. SBR胶乳改善水泥稳定碎石材料性能的机理研究[J]. 交通标准化, 2010, 38(17): 140-144.
- YAN Shijun, LI Ping, CHENG Disheng. Mechanism of SBR emulsion improving performance of cement-stabilized macadam [J]. Transport Standardization, 2010, 38(17): 140-144.
- [14] 李雪连, 宁佐飞, 叶峻宏, 等. 振动搅拌水泥稳定碎石的强度及其形成机理[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2021, 18(3): 8-15. DOI: 10.19951/j.cnki.cslgdxzbk.2021.03.001.
- LI Xuelian, NING Zuofei, YE Junhong, et al. Strength and its formation mechanism of vibration mixing cement stabilized macadam [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2021, 18(3): 8-15. DOI: 10.19951/j.cnki.cslgdxzbk.2021.03.001.
- [15] 刘新海, 彭小林. 水泥粉煤灰稳定碎石力学参数影响因素研究[J]. 交通科学与工程, 2020, 36(1): 38-43. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2020.01.007.
- LIU Xinhai, PENG Xiaolin. Study on influence factors of mechanical parameters of cement fly ash stabilized crushed stone [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2020, 36(1): 38-43. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2020.01.007.
- [16] 张显安, 周宇豪, 李雪连, 等. 振动搅拌水泥稳定碎石的力学性能研究[J]. 中外公路, 2021, 41(4): 332-336. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2021.04.065.
- ZHANG Xian'an, ZHOU Yuhao, LI Xuelian, et al. Study on mechanical properties of cement stabilized macadam by vibration stirring [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2021, 41(4): 332-336. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2021.04.065.
- [17] 张阳, 田绍强, 马涛, 等. 固废基地聚物稳定碎石力学性能和干燥收缩特性研究[J/OL]. 中国公路学报, 2023: 1-19[2023-12-08]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1313.U.20231107.1253.002.html>.
- ZHANG Yang, TIAN Shaoqiang, MA Tao, et al. Mechanical performance and drying shrinkage characteristics of solid waste based geopolymer-stabilized macadam [J/OL]. China Journal of Highway and Transport, 2023: 1-19[2023-12-08]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1313.U.20231107.1253.002.html>.
- [18] 甄珍. 基于抗裂性能的水泥炉渣稳定碎石基层试验研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2020. DOI: 10.27242/d.cnki.gnjlu.2020.000211.
- ZHEN Zhen. Experimental study on cement stabilized MSWI-BA macadam base based on crack resistance [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2020. DOI: 10.27242/d.cnki.gnjlu.2020.000211.
- [19] 张建明, 杨冉, 蔡琼. 无机结合料综合稳定材料温度收缩性能[J]. 建材发展导向, 2014(5): 60. DOI: 10.3969/j.issn.1672-1675.2014.05.052.
- ZHANG Jianming, YANG Ran, CAI Qiong. Temperature shrinkage properties of inorganic binders synthetically stabilized materials [J]. Development Guide to Building Materials, 2014(5): 60. DOI: 10.3969/j.issn.1672-1675.2014.05.052.
- [20] 姚江龙, 扈惠敏, 韩风. 可再分散乳胶粉对水泥稳定碎石材料性能影响的试验研究[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(27): 11816-11827.
- YAO Jianglong, HU Huimin, HAN Feng. Experimental study on the effect of redispersible latex powder on the properties of cement stabilized crushed

stone material [J]. *Science Technology and Engineering*, 2023, 23(27): 11816–11827.

[21] 商晓儒. 水泥稳定建筑垃圾路面基层的技术性能研究[D]. 西安: 长安大学, 2019.

SHANG Xiaoru. Research on technical performance of cement stabilized construction waste pavement base [D]. Xi'an: Chang'an University, 2019.

Experimental study on temperature and humidity resistance of cement stabilized crushed stone mixed with non-metallic materials recycled from waste printed circuit boards

ZHANG Enyuan¹, GUO Guanghui², LI Sheng¹

(1. Key Laboratory of Special Environment Road Engineering of Hunan Province, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 2. Qingyuan Jinyun Renewable Resources Co., Ltd., Qingyuan 511517, China)

Abstract: [Purposes] The study aims to alleviate the demand of natural fine aggregate for cement stabilized macadamia base, the problem of waste circuit board non-metallic materials being difficult to deal with was solved. [Methods] Non-metallic materials recycled from waste printed circuit Boards (NWPCB) was substituted by equal volume for fine aggregates of 0~0.075 mm and 0.6~1.18 mm in cement stabilized macadam, and styrene butadiene emulsion was added to optimize the performance of NWPCB-cement stabilized macadam. Through dry shrinkage test, temperature shrinkage test, freeze-thaw cycle test and dry-wet cycle test, the influence of NWPCB incorporation on the damage resistance of cement stabilized macadamia was studied, and the effect of styrene butadiene emulsion modified NWPCB cement stabilized macadamia was proved. [Findings] The average shrinkage coefficient of NWPCB-cement stabilized crushed stone is 5.4% larger than that of conventional cement stabilized crushed stone, and the average shrinkage coefficient of NWPCB-cement stabilized crushed stone is 4.8% lower than that of ordinary cement stabilized crushed stone. After freeze-thaw cycle and dry-wet cycle, the residual value of 28 d unconfined compressive strength of NWPCB-cement stabilized crushed stone is above 90%. The above indexes of the NWPCB-cement stabilized crushed stone modified by butadiene emulsion are better than those of the unmodified NWPCB-cement stabilized crushed stone. [Conclusions] Cement stabilized crushed stone mixed with NWPCB still has good temperature and humidity resistance, and butadiene emulsion can play an optimization role.

Key words: non-metallic materials recycled from waste printed circuit boards; butadiene emulsion; solid waste utilization; dry shrinkage; temperature shrinkage; freeze-thaw cycle; dry-wet cycle

Manuscript received: 2022-12-19; **revised:** 2023-01-25; **accepted:** 2023-01-26

Foundation item: Project (2021YFB2601000) supported by the National Key Research and Development Program of China; Project (CLSJCX22013) supported by Research and Innovation Project of Hunan Province for Postgraduate Students

Corresponding author: GUO Guanghui (1962—) (ORCID: 0009-0000-7120-6856), male, engineer, research interest: material engineering, solid waste resource utilization and so on. E-mail: 13922605607@139.com

(责任编辑:刘平;校对:石月珍;英文编辑:吴高桥)