

DOI:10.20035/j.issn.1671-2668.2023.06.013

# 废旧印刷线路板非金属粉改性沥青混合料 路用性能研究\*

郭光辉<sup>1</sup>, 房硕<sup>2</sup>, 袁鹏宇<sup>3</sup>

(1.清远市金运再生资源有限公司, 广东 清远 511517; 2.河南省交通规划设计研究院股份有限公司, 河南 郑州 450046; 3.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)

**摘要:** 废旧印刷线路板非金属粉(Printed Circuit Board Non-metallic, PCBN)的主要成分是环氧树脂和玻璃纤维。为充分利用 PCBN 粉,结合公路工程领域树脂类及纤维类改性沥青的应用经验,将 PCBN 粉通过一定加工工艺掺加到基质沥青中制得改性沥青,并通过马歇尔试验、车辙试验、低温小梁弯曲试验、浸水马歇尔试验、冻融劈裂试验对 PCBN 粉改性沥青混合料进行路用性能研究。结果表明,与基质沥青相比,PCBN 粉改性沥青的动稳定度提高 151.3%,最大弯拉应变变化不大,残留稳定度提高 5.3%,劈裂强度提升 59.4%,掺加 PCBN 粉可显著提高沥青混合料的高温抗车辙性能,对抗水损害性能也有一定提升作用,对低温性能影响不大。总体来说,PCBN 粉改性沥青混合料的路用性能优于基质沥青混合料。

**关键词:** 公路;印刷线路板非金属粉(PCBN);改性沥青;沥青混合料;路用性能

中图分类号:U416.2

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2023)06-0065-08

电子产品是以消耗电能为工作基础的产品及其衍生物,主要有电视机、收音机、音响、计算机和手机等。虽然这些电子产品让人们的生活越来越方便,但如何处理废旧电子产品是一个值得思考的问题<sup>[1]</sup>。为了使废旧电子产品不再污染环境并变废为宝,中国相继颁布了《电子信息产品生产污染防治管理办法》、《废旧家电及电子产品回收处理管理条例》、《中华人民共和国固体废物污染环境防治法》等法规<sup>[2-3]</sup>。废旧印刷线路板在电子产品废弃物中占有相当大的比例,目前对废旧印刷线路板中的金属元素回收甚多,但对非金属材料的处置方式往往是直接填埋或焚烧<sup>[4-6]</sup>。填埋会浪费大量土地资源。非金属材料中含有大量卤素,燃烧过程中产生有害物质,严重污染环境,危害人类健康,制约可持续发展战略及和谐社会建设。因此,有必要采取合理的措施使之资源化,从而节约能源,减少碳排放<sup>[7-8]</sup>。

公路建设和养护需要消耗大量砂、石、水泥、沥青、改性剂等材料,大规模的公路交通基础设施建设带来不可忽视的能源消耗、生态环境保护问题。突破环境破坏与保护、资源消耗与节约、道路材料循环利用等技术瓶颈的制约,大力实施绿色公路建设,以

最少的资源维持交通的需求,保持交通与资源的协调至关重要<sup>[9-10]</sup>。可将废弃物部分替代筑路材料应用于沥青混合料中<sup>[11-12]</sup>。废旧印刷线路板非金属粉(Printed Circuit Board Non-metallic, PCBN)是将废旧印刷线路板非金属材料通过一定加工工艺磨碎而成,可应用于工业生产的各个领域,是回收废旧印刷线路板非金属材料的有效方法<sup>[13]</sup>。考虑到 PCBN 粉的主要成分是环氧树脂和玻璃纤维,结合公路工程领域树脂类及纤维类改性沥青的应用经验,可将 PCBN 粉应用于沥青路面修筑,以缓解筑路材料的需求压力,减少资源消耗和碳排放。本文将废旧 PCBN 粉经过处理后加入基质沥青中,经过适宜的制备工艺处理后制得 PCBN 粉改性沥青,并对 PCBN 粉改性沥青的路用性能进行试验研究,确定 PCBN 粉改性沥青的主要技术指标,为 PCBN 粉在沥青路面工程中的应用提供参考。

## 1 PCBN 粉改性沥青的制备

### 1.1 原材料

(1) 集料。粗集料、细集料均采用石灰岩,根据 JTG E42—2005《公路工程集料试验规程》<sup>[14]</sup>,分别

\* 基金项目:国家重点研发计划资助项目(2021YFB2601000)

采用容量瓶法和网篮法对粗集料、细集料进行表干密度测试,试验结果见表1。

表1 集料的密度

筛孔尺寸/ mm	密度/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	筛孔尺寸/ mm	密度/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )
16.000	2.781	0.600	2.712
13.200	2.782	0.300	2.715
9.500	2.758	0.150	2.718
4.750	2.756	0.075	2.713
2.360	2.722	矿粉	2.668
1.180	2.732		

(2) 基质沥青。基质沥青采用广州壳牌 70# 沥青,其基本性能指标见表2,均满足规范要求。

表2 基质沥青的技术指标

试验项目	技术要求	试验结果
针入度(25℃,100 g,5 s)/(0.1 mm)	60~70	68
软化点/℃	≥47	48.5
延度(10℃,5 cm/min)/cm	≥20	51
密度(15℃)/( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	实测记录	1.04
溶解度(三氯乙烯)/%	≥99.0	99.8
含蜡量/%	≤2.0	1.65
运动黏度(135℃)/(Pa·s)	—	0.41

(3) PCBN 粉。以 PCBN 粉作为基质沥青改性剂。PCBN 粉是以环氧树脂为基体、玻璃纤维为增强体的聚合物复合材料,不存在毒性,其主要技术指标见表3。

表3 PCBN 粉的技术指标

指标	指标值
产品成分	热固性环氧树脂(60%左右), 玻璃纤维(40%左右)
平均粒度/目	600
堆积密度/( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	0.5~1.0
安息角/(°)	40~50
吸油量/[ $\text{g} \cdot (100 \text{ g})^{-1}$ ]	40~60
吸水率/%	0.5~1.0

(4) 相容剂。PCBN 粉是以环氧树脂为基体、玻璃纤维为增强体的聚合物复合材料,而聚合物与沥青改性剂一般存在相容性不佳的问题,在长期贮

存中易发生离析。无论是环氧树脂还是玻璃纤维,它们的密度、介电常数等物理性质均与沥青存在相容性较差的问题。因此,参考文献[15—18],以桐油和甘油为主要原料,控制两者质量之比为 5:4 合成相容剂。桐油的物理、化学指标见表4。

表4 桐油的物理、化学指标

检测项目	检测结果
外观	棕黄色液体
气味	桐油固有的正常气味
透明度(24 h,20℃)	允许有少量沉淀
相对密度(20,4℃)	0.936 0~0.939 5
折射率(20℃)	1.517 0~1.522 0
碘值/[ $\text{g} \cdot (100 \text{ g})^{-1}$ ]	163~173
皂化值/( $\text{mgKOH} \cdot \text{g}^{-1}$ )	190~195
干燥时间/d	夏天 3~7 冬天 3~20
颜色	红<5
酸价/( $\text{mgKOH} \cdot \text{g}^{-1}$ )	<7
水分和挥发物/%	<0.20
杂质/%	<0.20
$\beta$ -桐油试验(3.3~4.4℃,24 h)	无结晶析出

## 1.2 PCBN 粉改性沥青的制备工艺

### 1.2.1 制备方法

室内制备聚合物改性沥青的方法有机械搅拌、胶体磨研磨和高速剪切。机械搅拌操作方便、省物省力,但不适合改性剂和沥青相容性较差的情况。胶体磨研磨对于颗粒粒径较大的改性剂很适用,粒径较小时不适用。高速剪切能使改性剂均匀分散在沥青中,改性沥青具有良好的均匀性和稳定性,但耗费电力资源。根据上述制备方法的优缺点,选取高速剪切法制备 PCBN 粉改性沥青,剪切时间为 45 min,剪切速率为 3 500 r/min,剪切温度为 175℃,发育时间为 70 min。

### 1.2.2 相容剂掺量

根据相容剂掺量对 PCBN 粉改性沥青针入度、软化点、延度的影响确定最佳相容剂掺量。不同相容剂掺量(与基质沥青的质量比)下 PCBN 粉改性沥青的三大性能指标见图1。

由图1(a)可知:随着相容剂掺量的增加,PCBN 粉改性沥青的软化点呈现先增后降的趋势,加入少量相容剂可提高 PCBN 粉改性沥青的软化点。相

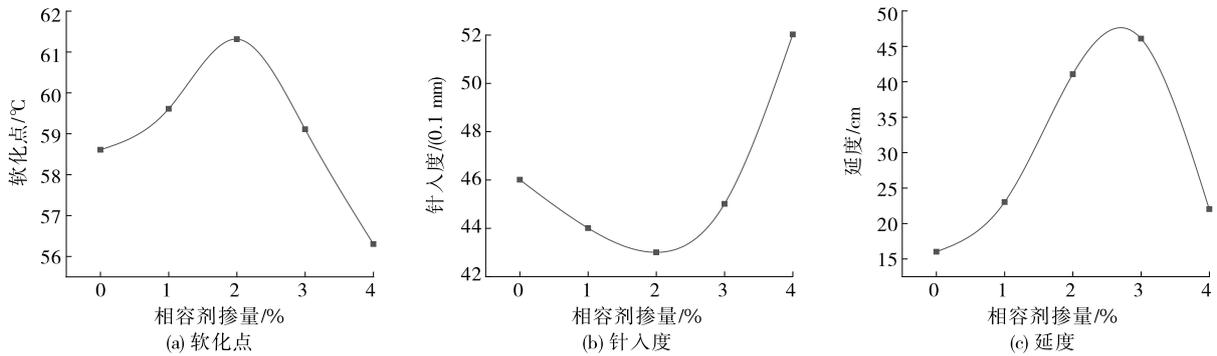


图1 相容剂掺量对沥青三大指标的影响

容剂掺量从零增加到2%时,软化点上升2.7℃,增大幅度为4.6%;之后随着相容剂掺量的增大,软化点下降。这可能是由于在加入少量相容剂时,桐油中的 $\alpha$ -桐油酸与PCBN粉中环氧树脂的环氧基发生有机反应,PCBN粉改性剂在基质沥青中形成结构性强的脂肪族长链及环氧基团,PCBN粉和基质沥青的相容性提高,两者结合较紧密,在改性沥青中形成有效的三维空间网络结构,沥青抵抗高温的能力增强,表现为软化点提高;加入过量相容剂时,PCBN粉不能完全吸收相容剂中的油分,且使改性沥青变软,抗高温性能减弱,软化点下降。相容剂掺量为2%时PCBN粉改性沥青的软化点最大,从软化点的角度推荐相容剂掺量为2%。

由图1(b)可知:随着相容剂掺量的增加,PCBN粉改性沥青的针入度先降低后升高。相容剂掺量从零增加到2%时,针入度降低0.3 mm,降低幅度为6.5%;之后随着相容剂掺量的增大,针入度增大。原因是添加少量相容剂时,相容剂和改性剂发生一定的有机反应,相容性提高,形成紧密的网络结构,针入度降低;继续增大相容剂掺量,出现植物油剩余过多的情况,使改性沥青变软,针入度增大。相容剂掺量为2%时PCBN粉改性沥青的针入度最小。

由图1(c)可知:随着相容剂掺量的增加,PCBN粉改性沥青的延度先升高后降低。相容剂掺

量从零增加到1%、从1%增加到2%时,延度分别上升7 cm、18 cm;相容剂掺量从2%增加到略小于3%时,延度上升5 cm;之后随着相容剂掺量的增大,延度下降,且下降速度较快。分析其原因,在加入少量相容剂时,桐油中的 $\alpha$ -桐油酸与PCBN粉中环氧树脂的环氧基发生有机反应,PCBN粉在基质沥青中形成结构性强的脂肪族长链及环氧基团,PCBN粉和基质沥青的相容性提高,两者结合较紧密,在改性沥青中形成有效的三维空间网络结构,PCBN粉改性沥青的抗拉性能提高,延度增大;加入过量相容剂时,PCBN粉无法全部吸收相容剂中的大量桐油,造成改性沥青中植物油分过多,沥青变得稀软,抗拉能力减弱。相容剂掺量为2%~3%时,PCBN粉改性沥青的延度最大。

综合不同相容剂掺量时PCBN粉改性沥青的软化点、针入度和延度,相容剂的最佳掺量为基质沥青质量的2%。

### 1.2.3 PCBN粉掺量

将PCBN粉放入烘箱中,在165℃温度下烘干2 h。按照外掺法以基质沥青质量的10%、20%、30%、40%分别加入基质沥青中,根据PCBN粉不同掺量下改性沥青的针入度、延度、软化点确定PCBN粉最佳掺量。不同PCBN粉掺量下PCBN粉改性沥青的三大性能指标见图2。

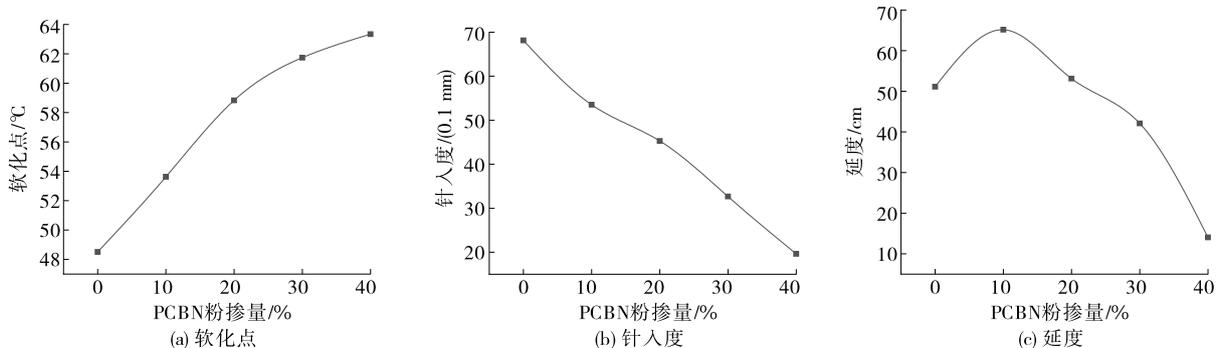


图2 PCBN粉掺量对改性沥青三大指标的影响

由图 2(a)可知:PCBN 粉掺量从零增加到 10%、从 10%增加到 20%、从 20%增加到 30%、从 30%增加到 40%时,PCBN 粉改性沥青的软化点分别上升 5.1℃、5.2℃、2.9℃、1.6℃,增加幅度分别为 10.5%、9.7%、4.9%、2.6%。随着 PCBN 粉掺量的增多,PCBN 粉改性沥青的软化点增大,但上升速率逐渐变缓。这一方面是由于改性沥青中形成的三维网络结构提高了 PCBN 粉改性沥青的抗高温性能,另一方面是 PCBN 粉中玻璃纤维作为增强体带来的效应。

由图 2(b)可知:PCBN 粉掺量从零增加到 40%时,PCBN 粉改性沥青的针入度降低。原因是在不断加入 PCBN 粉后,改性剂与沥青混合物中颗粒的密集度加大,且改性沥青形成三维空间网络结构后变得越来越硬,因而针入度下降。

由图 2(c)可知:PCBN 粉掺量从零增加到 10%时,PCBN 粉改性沥青的延度上升 14 cm,增加幅度为 27.5%;从 10%增加到 40%时,延度下降,且下降速率越来越大。其原因是 PCBN 粉的加入引起改性沥青一些界面的应力集中,PCBN 粉改性沥青变得硬脆,延度越来越低。

综合考虑不同 PCBN 粉掺量时改性沥青的软化点、针入度和延度,PCBN 粉的最佳掺量为基质沥青质量的 30%。

## 2 PCBN 粉改性沥青混合料设计

### 2.1 矿料配合比设计

采用马歇尔设计法设计沥青混合料配合比。根据集料的筛分结果,对 AC-13C 沥青混合料进行级配设计,合成级配见表 5。

表 5 AC-13C 沥青混合料的矿料级配

级配类型	下列筛孔(mm)的通过率/%										
	16.000	13.200	9.500	4.750	2.360	1.180	0.600	0.300	0.150	0.075	矿粉
规范上限	100.0	100.0	85.0	68.0	50.0	38.0	28.0	20.0	15.0	8.0	0.0
规范下限	100.0	90.0	68.0	38.0	24.0	15.0	10.0	7.0	5.0	4.0	0.0
规范中值	100.0	95.0	76.5	53.0	37.0	26.5	19.0	13.5	10.0	6.0	0.0
设计级配	100.0	98.0	80.0	40.0	25.5	18.0	13.0	9.0	7.5	6.0	0.0
筛余	—	2.0	18.0	40.0	14.5	7.5	5.0	4.0	1.5	1.5	6.0

### 2.2 最佳油石比

按照文献[19]的要求击实成型 PCBN 粉改性沥青马歇尔试件进行马歇尔试验,确定最佳油石比,试验结果见图 3~9。

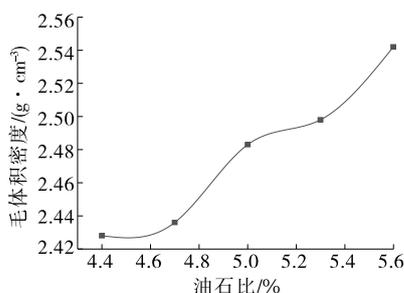


图 3 PCBN 粉改性沥青混合料的毛体积密度

最佳油石比的确定:1)从图 3~9 可以看出,毛体积密度没有出现峰值,而稳定度出现峰值。使用插值法,以空隙率 4.5%对应的油石比作为最佳油石比的初始值,得  $C_{OAC1} = 4.90\%$ 。2)各项指标均符合要求时,沥青用量  $C_{OACmax} = 5.20\%$ ,  $C_{OACmin} =$

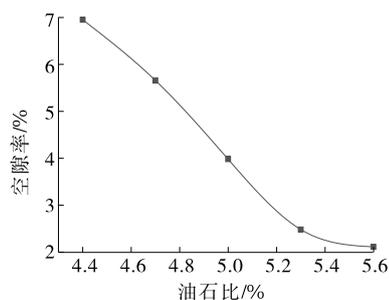


图 4 PCBN 粉改性沥青混合料的空隙率

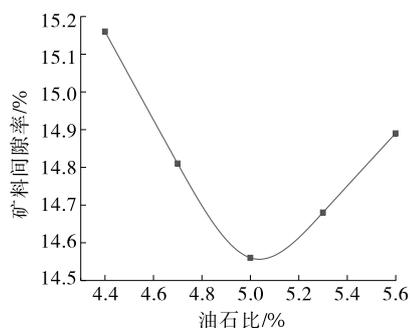


图 5 PCBN 粉改性沥青混合料的矿料回隙率

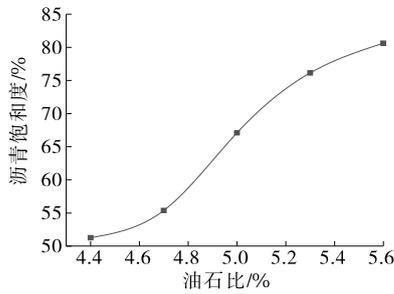


图6 PCBN粉改性沥青混合料的沥青饱和度

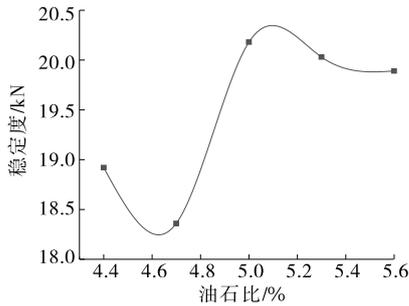


图7 PCBN粉改性沥青混合料的稳定度

4.90%, 则  $C_{OAC2} = (C_{OACmax} + C_{OACmin}) / 2 = 5.05\%$ 。  
 3) 沥青混合料最佳沥青用量  $C_{OAC} = (C_{OAC1} + C_{OAC2}) / 2 = 4.975\%$ 。4) 结合沥青路面工程实践经验, 确定 PCBN 粉改性沥青混合料的最佳油石比  $C_{OAC}$  为 5.0%。

表6 最佳油石比下 PCBN 粉改性沥青与基质沥青的马歇尔试验结果

混合料类型	油石比/ %	毛体积密度/ ( $g \cdot cm^{-3}$ )	空隙率/ %	矿料间隙 率/%	沥青饱和 度/%	稳定度/ kN	流值/ (0.1 mm)
PCBN 粉改性沥青	5.0	2.483	3.98	14.56	67.09	20.18	37.16
基质沥青	4.8	2.467	3.95	14.85	68.75	18.40	34.49

### 3 PCBN 粉改性沥青混合料路用性能分析

#### 3.1 高温性能

按最佳油石比, 根据 JTG E20—2011《公路沥青及沥青混合料试验规程》<sup>[19]</sup> 成型基质沥青混合料和 PCBN 粉改性沥青混合料车辙板试件进行标准车辙试验, 试验结果见图 10。

从图 10 可以看出: 最佳油石比下, PCBN 粉改性沥青混合料和基质沥青混合料的平均动稳定度分别为 6 606 次/mm、2 629 次/mm, 与基质沥青混合料相比, PCBN 粉改性沥青混合料的动稳定度提高约 151.3%, 满足 JTG F40—2004《公路沥青路面施工技术规范》<sup>[20]</sup> 的要求 ( $\geq 2 800$  次/mm)。根据实践经验, 影响沥青混合料稳定性的主要因素是黏结料之间的胶结作用, 这与沥青本身的性能密切相关。

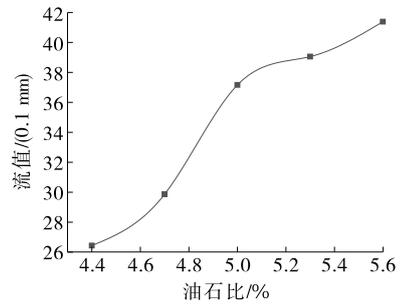


图8 PCBN粉改性沥青混合料的流值

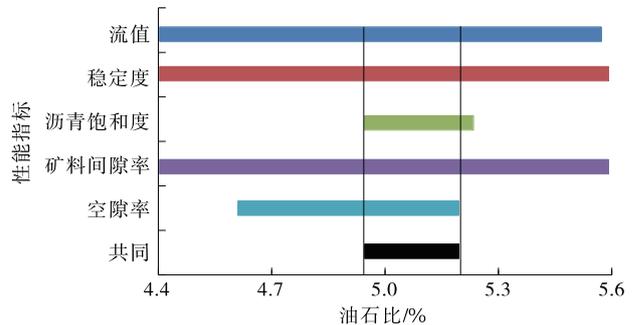


图9 PCBN粉改性沥青混合料油石比范围的确定

同理可得出基质沥青混合料的最佳油石比为 4.8%。最佳油石比下两种沥青混合料的马歇尔试验结果见表 6。

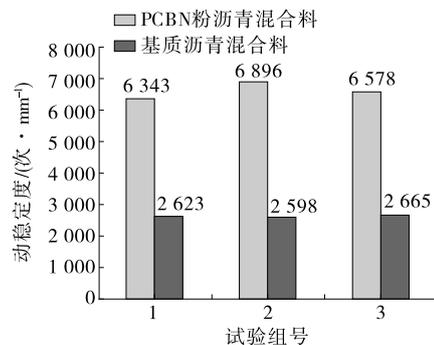


图10 PCBN粉改性沥青与基质沥青混合料车辙试验结果

相容剂的加入使 PCBN 粉和基质沥青能更好地融合, 沥青与矿料的黏结性得到改善, PCBN 粉改性沥青的高温抗车辙性能优于基质沥青。PCBN 粉可以提高沥青混合料的高温性能。

### 3.2 低温性能

采用低温小梁弯曲试验对基质沥青混合料和PCBN粉改性沥青混合料进行对比分析,评价PCBN粉的加入对沥青混合料低温抗裂性能的影响。成型尺寸为250 mm×30 mm×35 mm的沥青混合料小梁试件,采用MTS多功能材料试验系统进行小梁弯曲试验,试验温度为-10℃,加载速率为50 mm/min。计算公式见式(1)。低温小梁弯曲试验参数见表7,试验结果见图11。

$$R_B = \frac{3LP_B}{2bh^2}, \epsilon_B = \frac{6hd}{L^2}, S_B = \frac{R_B}{\epsilon_B} \quad (1)$$

式中: $R_B$ 为试件破坏时的抗弯拉强度(MPa); $L$ 为试件跨径(mm); $P_B$ 为试件破坏时的最大荷载(N);

$b$ 为跨中断面试件宽度(mm); $h$ 为试件跨中断面高度(mm); $\epsilon_B$ 为试件破坏时的弯拉应变; $d$ 为试件跨中破坏时的跨中挠度(mm); $S_B$ 为试件破坏时的弯曲劲度模量(MPa)。

表7 低温小梁弯曲试验参数

试验组号	试件类型	最大荷载/N	跨中挠度/mm
1	基质沥青混合料	1 216.8	0.478
	PCBN粉沥青混合料	1 240.8	0.467
2	基质沥青混合料	1 240.6	0.489
	PCBN粉沥青混合料	1 368.6	0.526
3	基质沥青混合料	1 248.5	0.497
	PCBN粉沥青混合料	1 143.9	0.462

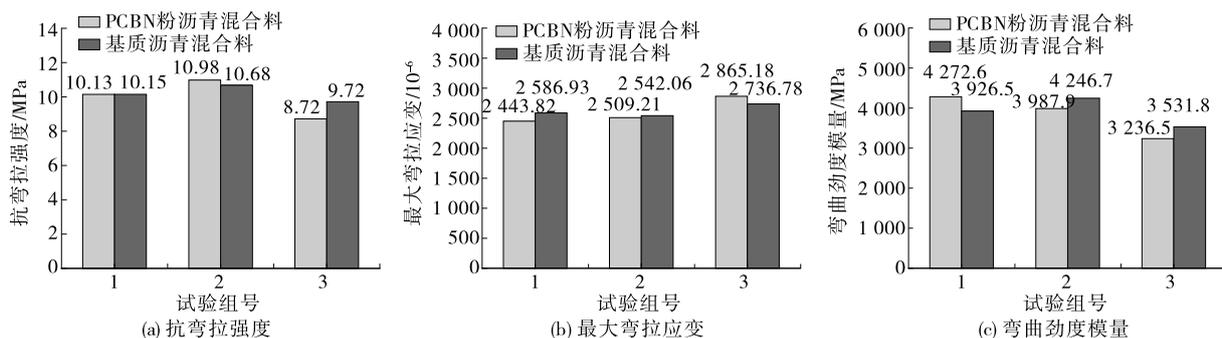


图11 沥青混合料低温小梁弯曲试验结果

由图11可知:基质沥青混合料、PCBN粉改性沥青混合料的最大弯拉应变平均值分别为 $2\ 621.92 \times 10^{-6}$ 和 $2\ 606.07 \times 10^{-6}$ ,均满足JTG F40—2004中弯拉应变不小于 $2\ 000 \times 10^{-6}$ 的要求,PCBN粉的加入对沥青混合料极限弯拉应变的影响不大;PCBN粉改性沥青混合料的抗弯拉强度和弯曲劲度模量平均值分别为9.94 MPa、3 832.3 MPa,与基质沥青混合料(抗弯拉强度和弯曲劲度模量平均值分别为10.18 MPa、3 901.7 MPa)相比略有下降,但下降幅度不大。PCBN粉的加入对沥青混合料低温抗裂性

能的影响较小,与基质沥青混合料的低温抗裂性能基本上无异,且满足规范要求。

### 3.3 水稳定性

通过浸水马歇尔试验和冻融劈裂试验对基质沥青混合料和PCBN粉改性沥青混合料的水稳定性进行对比分析。在最佳油石比下成别成型基质沥青混合料和PCBN粉改性沥青混合料试件进行浸水马歇尔试验,试验结果见图12、表8。从图12、表8可以看出:基质沥青混合料与PCBN粉改性沥青混合料的浸水残留稳定度均满足JTG F40—2004的

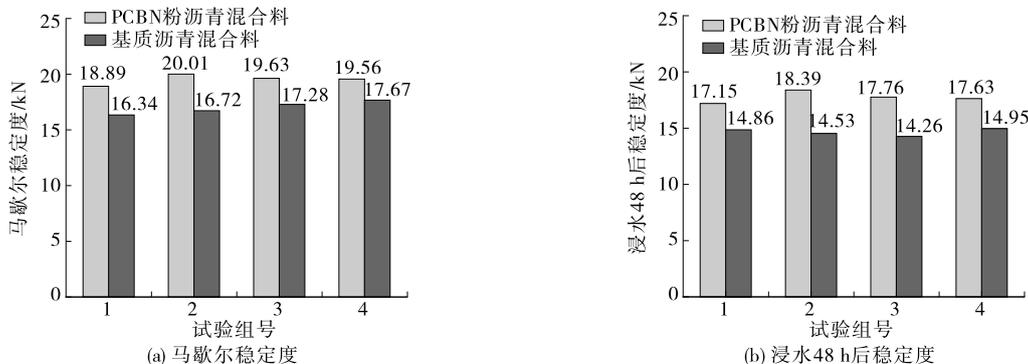


图12 沥青混合料浸水马歇尔试验结果

表 8 沥青混合料浸水马歇尔试验结果

混合料种类	马歇尔稳定度均值/kN	浸水 48 h 后稳定度均值/kN	浸水残留稳定度/%
基质沥青混合料	17.00	14.65	86.2
PCBN 粉改性沥青混合料	19.52	17.73	90.8

要求( $\geq 85\%$ );PCBN 粉改性沥青混合料的浸水残留稳定度比基质沥青混合料提高 5.3%,PCBN 粉改性沥青混合料的水稳定性更好。

在最佳油石比下分别成型基质沥青混合料和 PCBN 粉改性沥青混合料试件进行冻融劈裂试验,试件参数见表 9,试验结果见图 13。

表 9 沥青混合料冻融劈裂试验试件参数

试验组号	混合料类型	未经过冻融循环试件的参数		经过冻融循环试件的参数	
		荷载值 1/kN	试件高度 1/mm	荷载值 2/kN	试件高度 2/mm
1	基质沥青混合料	10.63	62.68	8.14	63.63
	PCBN 粉改性沥青混合料	16.68	63.16	14.19	63.68
2	基质沥青混合料	10.76	63.21	8.22	63.38
	PCBN 粉改性沥青混合料	17.56	62.68	13.68	64.15
3	基质沥青混合料	11.03	62.96	8.98	63.61
	PCBN 粉改性沥青混合料	17.89	62.96	14.03	64.59
4	基质沥青混合料	9.82	63.36	7.18	64.09
	PCBN 粉改性沥青混合料	15.78	63.83	12.86	64.23

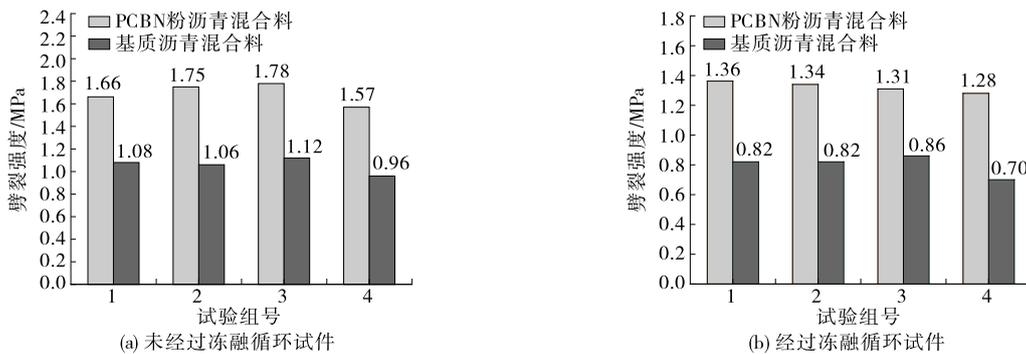


图 13 PCBN 粉改性沥青与基质沥青混合料冻融劈裂试验结果

从图 13 可以看出:冻融前基质沥青混合料与 PCBN 粉改性沥青混合料的劈裂强度平均值分别为 1.06 MPa、1.69 MPa,与基质沥青混合料相比,PCBN 粉改性沥青混合料的劈裂强度提高 59.4%;冻融循环后劈裂强度平均值分别为 0.80 MPa、1.32 MPa,与基质沥青混合料相比,PCBN 粉改性沥青混合料的劈裂强度提高 65.0%。无论是冻融前还是冻融后,PCBN 粉改性沥青混合料的劈裂强度都比基质沥青高。基质沥青混合料和 PCBN 粉改性沥青混合料的冻融劈裂强度比分别为 75.5%、78.7%,均大于 75%,满足规范要求;PCBN 粉改性沥青混合料的冻融劈裂强度比比基质沥青混合料提

高 4.2%。

## 4 环保性与经济性分析

### 4.1 环保性

根据《中华人民共和国固体废物污染环境防治法》,废旧印刷电路板属于危险废物。废旧印刷电路板非金属材料中含有大量卤素元素,将其直接填埋会浪费大量土地资源;将其焚烧,燃烧过程中产生有害物质,会破坏生态环境,影响人类健康,且制约可持续发展战略及和谐社会建设。如果采取合理的方式与技术对废旧印刷电路板非金属材料进行有效回收利用,不但能减少材料浪费,节约大量能源,而且

可减少碳排放,减轻环境污染。

沥青混合料中,矿粉主要起填补混合物空隙的作用,而PCBN粉的主要成分是环氧树脂和玻璃纤维,用环氧树脂填充集料空隙具有较好的黏度,玻璃纤维还可提高混合料的耐高温性能。因此,可以用PCBN粉代替部分矿粉,从而节省大量矿粉材料,减少生产矿粉时烟尘颗粒对环境的污染。

#### 4.2 经济性

根据市场调查结果,厂家回收1 t废旧印刷线路板非金属材料,政府补贴约30元。将其研磨制成PCBN粉,1 t的成本约为300元。可见,回收利用并制备PCBN粉的成本较低,相对于聚合物改性剂,其经济优势突出。

前述混合料试验中采用30%PCBN粉对基质沥青进行改性,矿粉占集料的6%,混合料的最佳油石比为5.0%,PCBN粉与矿粉的比例约为3:16。1 t骨料需要11.33 kg左右PCBN粉,可大量回收利用废旧印刷线路板非金属材料。

前述混合料试验中粉胶比为1.2。根据以往的矿粉替代品试验结果,粉胶比为1.0~1.4时,替代品的高温性能和水稳定性普遍强于矿粉。根据前面的分析,在AC-13沥青混合料配合比设计中,可以用PCBN粉代替部分矿粉。这样在骨料配制中也可以大量使用PCBN粉,从而节省大量矿粉材料,经济性突出。

## 5 结论

本文采用相容剂通过高速剪切法制备PCBN粉改性沥青,根据沥青三大指标确定最佳相容剂和最佳PCBN粉掺量。采用AC-13C级配设计基质沥青及PCBN粉改性沥青混合料,对两种沥青混合料进行路用性能对比分析。主要结论如下:

(1) 相容剂最佳掺量为基质沥青质量的2%,PCBN粉最佳掺量为基质沥青质量的30%。

(2) 在高温抗车辙方面,PCBN粉改性沥青混合料的动稳定度比基质沥青混合料大得多,增大幅度达151.3%,高温性能得到显著提升。

(3) 在低温抗开裂方面,PCBN粉改性沥青混合料和基质沥青混合料相差无几,均满足规范要求。

(4) 在抗水损害方面,PCBN粉改性沥青混合料的浸水残留马歇尔稳定度比基质沥青混合料提高5.3%,冻融后劈裂强度比比基质沥青混合料提高4.2%,抗水损害性能略有提升。

#### 参考文献:

- [1] 梁莉敏,单而芳,汪文青.评价电子行业绿色供应链实施障碍的图论方法[J].数学的实践与认识,2016,46(18):10-19.
- [2] 陈亚军.从源头上加强电子信息产品污染防治管理:《电子信息产品污染控制管理办法》解读[J].中国检验检疫,2007(3):41-42.
- [3] 王喜.基于GIS的上海市电子废弃物回收网络体系研究[D].上海:华东师范大学,2007.
- [4] 王蓉,陈梦君,黄金秀,等.电动力学技术回收废旧印刷线路板中的铜[J].中南大学学报(自然科学版),2016,47(4):1436-1440.
- [5] ZHANG X J, ZHANG C L, ZHENG F L, et al. Alkaline electrochemical leaching of Sn and Pb from the surface of waste printed circuit board and the stripping of gold by methanesulfonic acid [J]. Environmental Progress & Sustainable Energy, 2020, 39(2):13324.1-13324.8.
- [6] 陈斌,何杰,孙小钧,等.Fe-Cu-Pb合金液-液相分离及废旧电路板混合金属分级分离与回收[J].金属学报,2019,55(6):751-761.
- [7] TAN S F, CHEN Z Y, WANG R, et al. Emission characteristics of polybrominated diphenyl ethers from the thermal disassembly of waste printed circuit boards[J]. Atmospheric Environment, 2020, 226: 117402.1-117402.10.
- [8] 蒋英,郭杰,许振明.废旧印刷电路板中非金属材料资源化的新进展[J].材料导报,2011,25(11):133-138.
- [9] JYOTHI K R, BHAGYA K R, NAGABHUSHANA H, et al. Facile green synthesis, characterization and transport properties of LiAlSiO<sub>4</sub>: Ce<sup>3+</sup> nanocomposites[J]. Ceramics International, 2020, 46(7): 9706-9713.
- [10] LU H Q, HE B Z, JI Y, et al. Dopant-free hole transport materials processed with green solvent for efficient perovskite solar cells[J]. Chemical Engineering Journal, 2020, 385: 123976.1-123976.7.
- [11] 王海成,金娇,刘帅,等.环境友好型绿色道路研究进展与展望[J].中南大学学报(自然科学版),2021,52(7):2137-2169.
- [12] 陈宗武,冷真,肖月,等.面向沥青混凝土矿料全替代的钢-铁渣梯级利用[J].中国公路学报,2021,34(10):190-203.
- [13] 欧阳杰.聚合物基/废印刷电路板非金属粉末复合材料的制备与性能研究[D].长沙:湖南师范大学,2013.

(下转第136页)

4 结论

(1) 采用 FAHP 方法得到的权重比传统 AHP 法所得权重更精准,通过迭代得出权重向量,能减少由主观因素引起的误差。

(2) 车辆荷载、基坑与道路的距离是影响深基坑施工较突出的因素,车流量过大或基坑距离道路过近时,须加强基坑支护,避免因基坑施工导致路面产生裂缝和沉降。

(3) FAHP-BP 神经网络模型的预测精度满足深基坑施工安全风险评价的要求。施工过程中将发生变化的工况带入该模型,即可实现施工安全风险评价。将 FAHP-BP 神经网络模型与监测体系相结合,在基坑开挖阶段实时对路面沉降、开裂、支护结构墙体位移进行监控,可实现施工风险控制。必要时停止土方开挖,采取回填反压、增设锚杆等措施,保障深基坑施工安全、顺利进行。

参考文献:

[1] 郭金玉,张忠彬,孙庆云.层次分析法的研究与应用[J].中国安全科学学报,2008,18(5):148-153.

[2] 李永,胡向红,乔箭.改进的模糊层次分析法[J].西北大学学报(自然科学版),2005,35(1):11-12+16.

[3] 吕跃进.基于模糊一致矩阵的模糊层次分析法的排序[J].模糊系统与数学,2002,16(2):79-85.

[4] 郑重,赵云胜,张卫中,等.改进的模糊层次分析法在采动滑坡稳定性影响因素评价中的应用[J].安全与环境工程,2016,23(5):109-112.

[5] 应国柱,汪鹏程,朱大勇,等.模糊层次分析法的改进及其在地铁施工风险评估中的应用[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2014,37(10):1244-1248.

[6] 李晓峰.基于 AHP 的人工神经网络模型的建立[J].四川大学学报(工程科学版),2003,35(1):101-103.

[7] 兰守奇,张庆贺.基于模糊理论的深基坑施工工期风险评估[J].岩土工程学报,2009,31(4):648-652.

[8] 郭健,钱劲斗,陈健,等.地铁车站深基坑施工风险识别与评价[J].土木工程与管理学报,2017,34(5):32-38.

[9] 梁吉.基于模糊评判方法的铁路隧道施工风险评价研究[D].杭州:浙江大学,2010.

[10] 宋博.DEA-BP 神经网络下地铁车站深基坑施工安全评价[J].中国安全科学学报,2019,29(5):91-96.

[11] 王路杰.浅埋暗挖地铁车站施工风险评价研究[D].青岛:山东科技大学,2017.

[12] 张艺,刘辉,刘昶,等.石潭湘江特大桥水下施工安全风险评估及管控[J].公路与汽运,2020(6):161-165.

[13] 唐鹏.紧邻既有地铁高架桥梁深基坑施工开挖方案研究[J].公路与汽运,2020(2):136-140+166.

[14] 刘艳,汪彤,丁辉,等.地铁车站拥挤踩踏事故风险评价 DEA 模型研究[J].中国安全科学学报,2013,23(10):100-104.

[15] 吴贤国,丁保军,张立茂,等.基于贝叶斯网络的地铁施工风险管理研究[J].中国安全科学学报,2014,24(1):84-89.

[16] 周侃东,沈银斌,胡众,等.FAHP 的改进及其在地铁风险评估中的应用[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2021,44(11):1557-1562.

[17] 张胜昔,陈为公,王会会,等.基于 G-FAHP 的深基坑施工风险评估[J].土木工程与管理学报,2016,33(5):104-109.

[18] 沈花玉,王兆霞,高成耀,等.BP 神经网络隐含层单元数的确定[J].天津理工大学学报,2008,24(5):13-15.

收稿日期:2022-11-01

\*\*\*\*\*

(上接第 72 页)

[14] 交通部公路科学研究所.公路工程集料试验规程:JTG E42-2005[S].北京:人民交通出版社,2005.

[15] 潘磊,王玉婷,王成双,等.热固性环氧树脂改性沥青黏结剂的性能研究[J].热固性树脂,2011,26(4):33-37.

[16] 亢阳.高性能环氧树脂改性沥青材料的制备与性能表征[D].南京:东南大学,2006.

[17] 晏英,肖新颜,刘武,等.有机蒙脱土/环氧树脂复合改性沥青的性能[J].高分子材料科学与工程,2015,31(4):52-56.

[18] 杨飞,张晓平,李传宪,等.含芳香基团的梳状聚合物型降凝剂与沥青质协同改善合成蜡油的流变性[J].高等学校化学学报,2019,40(12):2606-2614.

[19] 交通运输部公路科学研究院.公路工程沥青及沥青混合料试验规程:JTG E20-2011[S].北京:人民交通出版社,2011.

[20] 交通部公路科学研究所.公路沥青路面施工技术规范:JTG F40-2004[S].北京:人民交通出版社,2004.

收稿日期:2022-10-26