

文章编号:1674-2869(2015)10-0023-05

水性环氧改性半柔性路面材料的低温抗裂性能

孙 政,何桂平\*

深圳市公路交通工程试验检测中心,广东 深圳 518049

摘 要:为了改善传统半柔性路面材料的低温抗裂性能,采用水泥-乳化沥青-水性环氧树脂三相有机无机复合材料作为新型胶结体系制备的半柔性路面材料.采用匀质性及回弹模量检测方法确定胶结材料中的乳化沥青与水泥的质量比,调整水性环氧树脂与乳化沥青的质量比研究其低温抗裂性能.结果表明:当水性环氧树脂占乳化沥青的质量比为 0.6 时,半柔性路面材料的弯拉劲度模量达到 2 332 MPa,最大弯拉应变达到 2 662  $\mu\epsilon$ ,接近沥青玛蹄脂混合料的水平.扫描电镜研究表明:三相有机无机胶结体系形成以沥青材料为连续相、水性环氧树脂为改性分散相、水泥水化产物为衔接体的三维空间网络结构,既改善了水泥浆材料的干缩应力,同时增强了胶浆与基体沥青混合料的界面粘结力.

关键词:三相胶结体系;干缩应力;交织网络

中图分类号:U414 文献标识码:A doi:10.3969/j.issn.1674-2869.2015.10.005

0 引 言

水泥混凝土路面具有强度高、承载力大、温度敏感性小等优点,但同时具有行车舒适性差、维修困难的缺点;相对而言,沥青混凝土路面的功能性及维修方便使其成为高等级公路的发展主流.但是,我国幅员辽阔、气候特点复杂,外加渠化交通的影响,沥青路面承载力差、温度敏感性大、水稳定性差等缺点成为其破坏的主要因素<sup>[1-3]</sup>.基于此背景,一种兼具水泥混凝土路面及沥青混凝土路面优点的新型路面材料应运而生,半柔性路面材料是以大孔隙(孔隙率高达 25%以上)的骨架-空隙型沥青混合料为基体材料,然后灌入水泥砂浆而形成的路面材料<sup>[4-6]</sup>.

国内外的研究成果普遍认为半柔性材料是一种价格适宜、性能良好的路面材料,但是当前各种应用都表明半柔性材料容易出现开裂病害.主要由于沥青基材料与水泥基材料的界面粘结力仅为范德华力,无法抵抗因水泥基材料收缩以及沥青基材料的热胀冷缩带来的内应力<sup>[7]</sup>.国内外相关学者通过沥青基材料的结构优化设计、灌浆材料的优选改性等措施来改善半柔性材料的开裂缺点,但是取得的效果却并不理想.本研究综合利用水性环氧树脂的高强粘结力、乳化沥青的柔性复合改

性水泥砂浆,并以此制备高性能半柔性材料,研究其低温抗裂性能及抗裂机理.

1 原材料

1.1 乳化沥青

本研究选取泰普克公司生产的阳离子慢裂型 SBS 改性乳化沥青,其主要性能参数见表 1.

表 1 SBS 乳化沥青性能参数  
Table 1 Parameters of SBS emulsified asphalt

| 检测参数                                    | 单位                        | 结果                      |
|---|---------------------------|-------------------------|
| 破乳速度                                    | -                         | 慢裂                      |
| 离子电荷                                    | -                         | 阳离子(+)                  |
| 筛上剩余量(1.18 mm)                          | %                         | 0.04                    |
| 乳液颗粒平均尺寸                                | $\mu\text{m}$             | 3.6                     |
| 质量分数                                    | %                         | 60.2                    |
| 针入度(100 g, 25 $^{\circ}\text{C}$ , 5 s) | 0.1mm                     | 81                      |
| 蒸发残留物                                   | 软化点                       | $^{\circ}\text{C}$ 53.5 |
|   | 延度(5 $^{\circ}\text{C}$ ) | cm 24                   |
| 贮存稳定性                                   | 1 d                       | % 0.9                   |
|   | 5 d                       | % 2.1                   |

1.2 水 泥

本研究选用广东海螺牌 P.O42.5 普通硅酸盐水泥,主要性能参数见表 2.

收稿日期:2015-09-08  
基金项目:深圳市科学技术创新委员会科技项目(CXZZ20140820151319424).  
作者简介:孙 政(1987-),湖北仙桃人,硕士,工程师.研究方向:公路、桥梁及隧道建筑材料的研究及检测.\*通信联系人.

表 2 P.O42.5 水泥性能参数  
Table 2 Parameters of P.O42.5 cement

| 比表面积/(m <sup>2</sup> /kg) | 初凝时间/min | 终凝时间/min | 抗压强度/MPa |      | 抗折强度/MPa |      |
|---------------------------|----------|----------|----------|------|----------|------|
|                           |          |          | 3 d      | 28 d | 3 d      | 28 d |
| 324                       | 240      | 405      | 30.5     | 44.0 | 5.05     | 6.72 |

### 1.3 水性环氧树脂及固化剂

水性环氧树脂按照制备工艺的不同会带有不同的电荷,其颗粒尺寸、电荷特性对整个胶浆体系的固结效果、匀质性都有显著影响,研究表明:阳离子型水性环氧树脂与水泥拌合后亦会迅速发生

团聚、阴离子水性环氧树脂与本研究选取的阳离子乳化沥青拌合时会出现团聚效应. 本研究选取自制的基于 E51 环氧树脂及自乳化型非离子水性固化剂,具体指标见表 3.

表 3 水性环氧树脂及其固化剂控制参数  
Table 3 Parameters of waterborne epoxy resin and curing agent

| 项目      | 操作时间 25 ℃/h | 乳液颗粒平均粒径/μm | 固含量(质量分数)/% |
|---------|-------------|-------------|-------------|
| 水性环氧树脂  | 3.0         | 0.25        | 100         |
| 自乳化型固化剂 |             |             | 40          |

### 1.4 集料

选取深圳平湖产辉绿岩作为基体沥青混合料集料,粗集料表观相对密度 2.710,吸水率 0.41%,压碎值 13.9%,洛杉矶磨耗损失 16.3%. 细集料表观相对密度 2.700,吸水率 0.70%. 矿粉采用石灰岩轧制,相对密度 2.720.

### 1.5 沥青

基体沥青混合料为骨架-空隙型结构,其抗剪强度主要由骨料之间嵌挤所形成的内摩擦角提供,为了增强基体沥青混合料的抗剪强度,需要采用高黏度改性沥青增强集料之间的黏结力,高黏度改性沥青针入度 47(0.01 mm),软化点 97 ℃,15 ℃延度 64 cm,60 ℃动力黏度 86 450 Pa·s.

/乳化沥青(A)条件下胶浆材料的匀质性系数,确定最小水泥用量比为 C/A=0.4,此时匀质性系数为 0.950. 固定 E/A=1,以最小水泥用量比为 C/A=0.4 为起点,测试不同 C/A 条件下胶浆材料的回弹模量,为匹配基体沥青混合料模量,取回弹模量达到 5 010 MPa 时的 C/A 为最大水泥用量比. 以最低水泥用量和最高水泥用量的中值(C/A=0.55)、E<sub>固化剂</sub>/E=1 为基础,设计 E/A=0.0、0.2、0.4、0.6、0.8、1.0 进行抗裂性能研究.

### 2.2 基体沥青混合料配比

参考大孔隙沥青混合料(OGFC)设计方法,通过控制关键筛孔 2.36 mm 及 4.75 mm 通过,采用体积法设计孔隙率为 30%、连通孔隙率超过 23%的基体沥青混合料.

## 2 配合比设计

### 2.1 灌浆材料配比

本研究提出有机无机复合灌浆材料体系复杂,水泥主要起到吸收两种水性物质所带来的水分及吸附环氧树脂固化物和沥青的作用,它同时也是整个灌浆材料强度的保证和半柔性路面材料中偏“刚性”的保证. 水性环氧树脂主要起到改善灌浆材料与基体沥青混合料界面黏结的作用,但是它本身具有低温脆性的特征,所以它并不能成为连续相存在于灌浆材料体系之中. 因此,本研究中的灌浆材料是以沥青为连续相、环氧树脂固化物为黏结改性剂、水泥为强度调节剂而得到的复合材料.

基于沥青为连续相、水性环氧树脂为分散相的设计思路,确定水性环氧树脂(E)/乳化沥青(A)的最大掺配比例为 1. 固定 E/A=1,测试不同水泥(C)

## 3 低温抗裂性能

由于半柔性路面材料仍然偏属于柔性路面体系,其开裂原因主要由两方面的综合作用所致,一方面沥青基材料属于温感性材料,随着外界温度的下降,沥青材料达到劲度模量将增大,进而增加沥青混合料的强度、降低混合料的抗变形能力,在外力荷载的作用下容易出现脆性损坏. 温度下降还会导致沥青面层的收缩,受限于沥青中下面层对上面层的摩擦力约束,沥青上面层的变形将变为温度收缩应力<sup>[8-10]</sup>. 另一方面胶浆体系中的水泥水化形成材料收缩应力,这两种应力超过各自材料的抗拉强度以及两者界面黏结力时就会造成开裂. 本研究采用-10 ℃小梁弯曲试验研究半柔性材料的抗裂性能,试验结果见表 4.

表 4 低温弯曲测试结果  
Table 4 Low temperature bending test results

| E/A         | 抗弯拉强度/MPa | 最大弯拉应变/ $\mu\epsilon$ | 弯拉劲度模量/MPa |
|-------------|-----------|-----------------------|------------|
| 0.0         | 7.28      | 2 083                 | 3 495      |
| 0.2         | 7.01      | 2 229                 | 3 145      |
| 0.4         | 6.42      | 2523                  | 2 545      |
| 0.6         | 6.18      | 2 662                 | 2 322      |
| 0.8         | 6.12      | 2 374                 | 2 578      |
| 1.0         | 6.08      | 2 074                 | 2 932      |
| SMA-13      | 8.26      | 2 892                 | 2 856      |
| 水泥砂浆制备半柔性材料 | 8.02      | 950                   | 8 442      |

材料的弯拉劲度模量越小、最大弯拉应变越大,那么材料的低温抗裂性能越好. 表 4 的试验结果表明:未掺加水性环氧树脂及乳化沥青的半柔性材料的最大弯拉应变不到 1 000  $\mu\epsilon$ , 仅掺加乳化沥青的半柔性材料的最大弯拉应变为 2 000  $\mu\epsilon$  左右,乳化沥青的掺加亦明显降低材料整体的刚度,但是较之 SMA-13 的低温抗裂性能要差,这是由于水泥水化产物与沥青基材料的低温收缩系数不一致,这直接影响了普通半柔性材料的低温抗裂性能. 随着水性环氧树脂的掺量提高,半柔性材料的弯拉劲度模量呈现先减小后增大的趋势、最大弯拉应变呈现先增大后减小的趋势,因此低温抗裂性能是先增强,后降低的趋势. 这是因为,在水性环氧树脂掺量小于等于 0.6 的时候,环氧固化物与水泥基材料将沥青基材料固定住,在温度降低的时候,沥青基材料本身是要产生收缩的,但是环氧固化物本身的高强黏结性能将这种收缩应力吸收,从而提高了半柔性的低温抗裂性能. 但是,当水性环氧树脂掺量超过 0.6 的时候,过量的环氧固化物除了与沥青基材料胶黏以外,还有部分游离的成分,而环氧树脂本身也是一种低温脆性材料,因此这个时候尽管其可以缓解沥青基材料的收缩应力,但是它本身却也开始出现收缩应力,进而导致整个材料的低温抗裂性能降低.

4 抗裂机理

水性环氧树脂-乳化沥青-水泥三相胶结形成的胶浆材料灌注于基体沥青混合料之中,显著改善了半柔性路面材料的低温抗裂性能. 本研究采用扫描电子显微镜 SEM (scanning electron microscope) 测试复合胶结体系的微观形貌,分析水泥水化产物、水性环氧树脂固化产物与乳化沥青破乳产物的分布结构,具体测试图见图 1~图 4,其中图 1 为 28 d 纯水泥水化产物、图 2 为 28 d 水性环

氧树脂+水泥水化产物(E+C)、图 3 为 28 d 乳化沥青+水泥水化产物(A+C)、图 4 为 28 d 水性环氧树脂+乳化沥青+水泥水化产物(E+A+C).

图 1 表明:28 d 纯水泥水化产物形貌为团簇状 C-S-H 凝胶为基体,针棒状钙矾石贯穿其中,整体材料有明显空隙. 对比图 1,由图 2 知:颜色较暗的部分是水性环氧树脂固化产物,呈现亮色的未水化水泥颗粒及水化产物 C-S-H 凝胶与环氧树脂固化产物交织共生,形成了较纯水泥水化试样明显致密的结构,但是未见针棒状晶体钙矾石生成. 对比图 1,由图 3 知:光滑成片、色泽暗淡的沥青材料与亮色、层状或团簇状水泥水化产物搭接交织, C-S-H 凝胶与针棒状钙矾石交联,整体表现为孔隙较大的骨架网状结构. 图 4 为 28 d 三相复合胶结体系 SEM 形貌图,整体结构为以平滑连续、颜色暗淡的沥青质材料为连续相、褶皱体的水性环氧固化产物为分散相、亮色团簇状水泥水化产物搭接其中,形成了更具空间立体感的结构. 相比较图 2、图 3 微观形貌图,三相胶结体系立体结构增强、明显空隙未见、体系更为致密. 在沥青基体表面可以明显看到除了有较大的水泥水化产物与环氧固化物交联共生体外,还有一些微微凸起的水化产物,这也进一步说明了复合胶结体系的空间交织网络

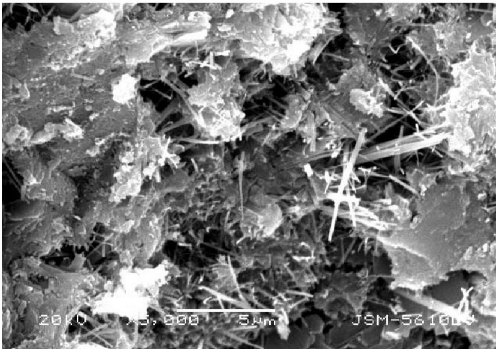


图 1 纯水泥水化 28 d 扫描电镜( $\times 5\,000$ )

Fig.1 Scanning electron microscopy image of pure cement hydration

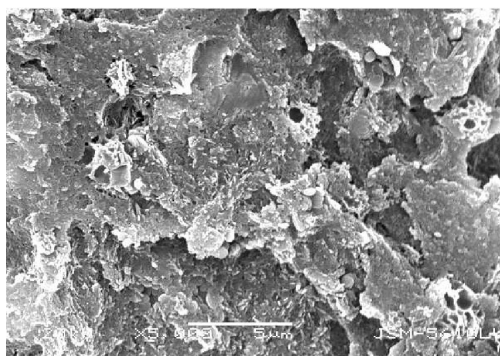
图 2 E+C 28 d 扫描电镜( $\times 5\,000$ )

Fig.2 Scanning electron microscopy image of E+C

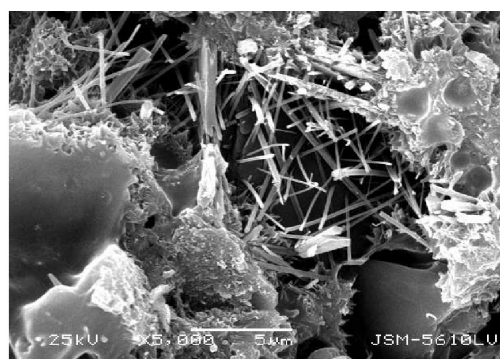
图 3 A+C 28 d 扫描电镜( $\times 5\,000$ )

Fig.3 Scanning electron microscopy image of A+C

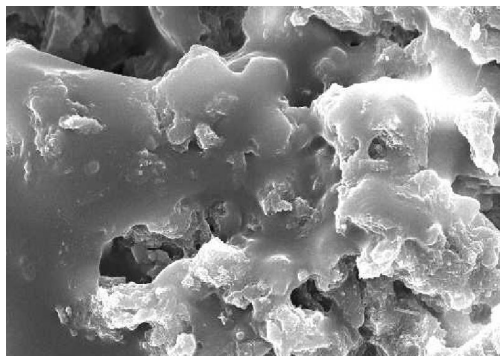
图 4 E+A+C 28 d 扫描电镜( $\times 5\,000$ )

Fig.4 Scanning electron microscopy image of E+A+C

结构。

结合微观形貌分析可知,相较于水泥砂浆作为灌浆材料,复合胶结体系的连续相组分由有干缩效应的水泥水化产物转变为具有黏弹特性的沥青基材料,一方面胶浆材料与基体沥青混合料的协同变形能力加强了,另一方面水性环氧树脂固化产物加强了胶浆与基体沥青混合料的界面黏结力,综合作用下增强了半柔性材料的抗裂性能。

## 5 结 语

a.采用水性环氧树脂-乳化沥青-水泥三相复合胶结体系制备的半柔性路面材料较水泥砂浆制备的半柔性路面材料具有显著的低温抗裂性能,

当  $E/A=0.6$  时,半柔性路面材料的最大弯拉应变达到  $2\,662\,\mu\epsilon$ ,接近 SMA-13 的水平。

b.抗裂机理研究表明:三相胶结体系形成以沥青材料为连续相、水性环氧树脂为改性分散相、水泥水化产物为衔接体的三维空间网络结构,既改善了水泥浆材料的干缩应力,同时增强了胶浆与基体沥青混合料的界面黏结力。

## 致 谢

感谢深圳市科学技术创新委员会对本研究的资助!感谢课题研究人员侯茜茜、黄志松、邱群聪协助完成部分实验及数据处理工作!

## 参考文献

- [1] 彭波. 沥青混合料集料几何特性与结构研究 [D]. 西安:长安大学, 2008:4-10.  
PEN Bo. Study on geometric characteristics and structure of asphalt mixture aggregate [D]. Xi'an: Chang'an University, 2008:4-10. (in Chinese)
- [2] 杜顺成. 沥青混合料高温稳定性评价指标和级配设计方法研究[D]. 西安:长安大学, 2007:2-6.  
DU Shun-cheng. Study of evaluation index of high-temperature stability and design methodology for asphalt mixture [D]. Xi'an: Chang'an University, 2007:2-6. (in Chinese)
- [3] 黎振民. 灌注橡胶粉的半柔性路面复合材料温度稳定性研究[D]. 柳州:广西科技大学, 2013:10-15.  
LI Zheng-min. The composite temperature stability study on Perfusion rubber powder semi-flexible pavement [D]. Liuzhou:Guangxi University of Science and Technology, 2013:10-15. (in Chinese)
- [4] 张大可,成长庆,吴国雄. 半柔性路面水稳定性及低温抗裂性能分析[J]. 重庆交通学院学报,2007,3(26):55-57.  
ZHANG Da-ke, CHENG Chang-qing, WU Guo-xiong. Water susceptibility and crack resistance at low temperature of semi-flexible pavement [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University, 2007,26(3):55-57. (in Chinese)
- [5] 张荣鹏. 高性能灌注式半柔性路面材料的研究与应用[D]. 武汉:武汉理工大学, 2009:2-10.  
ZHANG Rong-kun. Research and application on high-performance pouring semi-flexible pavement material [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2009:2-10. (in Chinese)
- [6] 吴丹. 半柔性路面材料抗疲劳性能的试验研究[D]. 重庆:重庆交通大学, 2009:25-30.  
WU Dan. Research on fatigue property of semi-flexible

- pavement[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2009:25-30. (in Chinese)
- [7] 黄冲. 半柔性路面材料的体积稳定性与抗裂性能研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2010: 5-10.
- HUANG Chong. Research on volume-stability and crack-resistance of semi-flexible pavement material [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2010: 5-10. (in Chinese)
- [8] 周晓军, 沈丽娟. 沥青混合料结构与强度的认识[J]. 民营科技, 2008(2): 156-157.
- ZHOU Xiao-jun, SHEN Li-juan. Knowledge about structure and strength of the asphalt mixture[J]. Private science and technology, 2008(2): 156-157. (in Chinese)
- [9] Setyawan. Development of semi-flexible heavy-duty pavements [J]. PhD Thesis University of Leeds, 2003, 143(5): 72-84.
- [10] 沈凡. 水泥-乳化沥青-水性环氧复合胶结钢桥面铺装材料研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2012: 40-55.
- SHEN Fan. Research on composite steel bridge deck pavement of cement-emulsifying asphalt and water-borne epoxy [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2012: 40-55. (in Chinese)

## Low-temperature cracking resistance of water-borne epoxy resin modified semi-flexible pavement

*SUN Zheng, HE Gui-ping*

Testing Center of Shenzhen City Road Traffic Engineering, Shenzhen 518049, China

**Abstract:** To improve the low temperature crack resistance of traditional pavement, semi-flexible pavement was prepared by using cement-emulsified asphalt-waterborne epoxy resin three-phase organic inorganic composite materials as grouting material. The mass ratio of emulsified asphalt and cement in grouting materials was determined by the method of homogeneous and resilient modulus testing. Results showed that when the mass ratio of waterborne epoxy and emulsified asphalt was 0.6, the maximum bending strain and bending stiffness modulus reached  $2\ 662\ \mu\epsilon$  and  $2\ 332\ \text{MPa}$ , respectively, which was close to those of the stone matrix asphalt. SEM analysis illustrated that in the three-phase organic inorganic grouting system, three-dimensional network structure was formed, in which asphalt, waterborne epoxy resin and cement hydrates worked as continuous phase, dispersed phase and connector, respectively. This structure not only improved the cement material shrinkage stress but also enhanced the bonding force between mortar and matrix asphalt mixture.

**Keywords:** three-phase grouting system; dry shrinkage stress; weaving network

本文编辑: 龚晓宁