

文章编号:1671-6833(2013)05-0017-05

# 水泥乳化沥青砂浆与修补材料的力学性能匹配性研究

刘元文<sup>1</sup>, 刘云鹏<sup>2,3</sup>

(1. 武汉理工大学, 湖北 武汉 430070; 2. 武汉理工大学 土木工程与建筑学院, 湖北 武汉 430070; 3. 武汉理工大学 硅酸盐建筑材料国家重点实验室, 湖北 武汉 430070)

**摘要:** 采用四点抗弯实验评估不同力学性能的修补材料与基体水泥沥青砂浆的匹配性; 采用有限元模型分析了不同弹性模量差异的修补材料与基体砂浆组合试块的应力应变分布. 结果表明, 修补材料与基体砂浆之间弹性模量的差异决定着组合试块的荷载传输效率与破坏形式, 是影响两者力学性能匹配性的主要因素. 针对水泥乳化沥青砂浆的受力形式, 采用四点弯曲疲劳试验对两者的匹配性实验结果做了进一步的验证.

**关键词:** 水泥乳化沥青砂浆; 修补; 匹配性; 有限元模型分析

**中图分类号:** TU528.41 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2013.05.004

## 0 引言

水泥乳化沥青砂浆是高速铁路板式无砟轨道的关键结构材料,起着支撑列车重量、调整轨道精度、弹性减振等重要作用<sup>[1-4]</sup>,其质量决定着高速铁路的运行安全与舒适性.由于高速列车运行速度快、砂浆服役环境恶劣,水泥乳化沥青砂浆在服役过程中容易出现不同程度的破损、劣化,严重影响轨道结构安全与列车行驶安全<sup>[5-7]</sup>,这就需要砂浆进行及时有效的修补.

水泥乳化沥青砂浆的修补除了需要性能优异的修补材料外,还要与基体材料具有良好的匹配性,其中力学性能匹配是非常重要的方面.这是因为修补后两者组成整体共同服役,力学性能如不匹配会使两者受到荷载时变形不一致,容易产生应力集中及修补失效.在水泥混凝土修补领域,已有学者开展了基体混凝土与修补材料间的匹配性研究.由于界面粘接失效是修补后最常见的破坏形式,并且混凝土结构中修补区域多处于受拉区域<sup>[8]</sup>,因此,有学者采用四点弯曲试验<sup>[9]</sup>测试修补材料与基体混凝土间的粘接强度,并对失效模式进行分类<sup>[10]</sup>.

水泥乳化沥青砂浆在材料组成与性能、受力形式上与混凝土材料有着较大的区别,它的抗弯强度要远小于混凝土材料,在加载过程中可能出现基体提前失效的问题,能否采用评估混凝土材料匹配性的方法还有待验证.此外,水泥乳化沥青砂浆更多是受到列车荷载的纵向冲击作用,需要针对性地开发符合其受力特点的评价方法.

针对上述问题,笔者采用四点弯曲试验评估水泥乳化沥青砂浆与修补材料的匹配性,探讨该方法的可行性.采用有限元模型在理论上分析新老材料的匹配性实验结果,提出两者的匹配机理.针对水泥乳化沥青砂浆独特的受力特点,采用四点弯曲疲劳试验,对其与修补材料的匹配性做进一步的验证评估.

## 1 原材料及试验方法

### 1.1 原材料

#### 1.1.1 基体水泥乳化沥青砂浆

采用自主开发的干粉料及阴离子乳化沥青配制基体水泥乳化沥青砂浆,其配合比及性能如表1、2所示.阴离子乳化沥青的性能如表3所示.

收稿日期:2013-05-02;修订日期:2013-06-30

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51172173)

作者简介:刘元文(1963-),男,武汉理工大学工程师,E-mail:zhangly@whut.edu.cn;

通信作者:刘云鹏(1986-),男,博士生,E-mail:lyp027@126.com.

表1 基体水泥乳化沥青砂浆配合比

Tab.1 Mix proportion of substrate CA mortar

kg/m <sup>3</sup>					
编号	干料	乳化沥青	减水剂	水	消泡剂
CAM	1 500	250	3.2	143	4.0

## 1.1.2 修补砂浆

修补材料选择硫铝酸盐水泥基修补砂浆,其

表2 基体水泥乳化沥青砂浆性能

Tab.2 Properties of substrate CA mortar

序号	检测项目	CAM	
1	流动度/s	96	
2	出机扩展度	t <sub>280</sub> /s	8
		D <sub>5</sub> /mm	330
3	强度(28 d)	抗折/MPa	4.4
		抗压/MPa	25.6

表3 阴离子乳化沥青的性能

Tab.3 Properties of anionic asphalt emulsion

平均粒径 /μm	水泥适应性 /mL	储存稳定性 (5 d, 25 ℃) /%	蒸发残留物			
			固含量/ %	针入度 (25 ℃, 100 g, 5 s)/ 0.1 mm	软化点 (R&B) / ℃	延度 (25 ℃) / cm
2.0	240	1.3	60.1	67	46.5	>100

干料组成如表4所示,配合比如表5所示.通过不同的A/C比例调控得到不同力学性能的修补砂浆.水泥:采用SAC42.5硫铝酸盐水泥及P.042.5普通硅酸盐水泥.两种水泥的化学组成及物理性能如表6所示.乳化沥青采用表3中的阴离子乳化沥青.砂:河砂,颗粒粒径小于2.36 mm,表观密度2 630 kg/m<sup>3</sup>,吸水率为1.8%,含泥量为

0.4%.减水剂:天津雍阳减水剂厂生产的高效羧酸系减水剂,固含量20%,减水率为26.6%.水:使用洁净自来水.消泡剂:河南道纯有限公司生产的有机硅类消泡剂,固含量30.1%.缓凝组分、早强组分:采用自主研发的复合外加组分,调控修补砂浆的可工作时间及早期小时强度.

表4 硫铝酸盐水泥基修补砂浆干料组成

Tab.4 Composition of dry blend of sulphoaluminate cement based repair mortar

材料	硫铝酸盐水泥	硅酸盐水泥	矿粉	细集料	缓凝组分	早强组分
组成	415	45	40	1 000	0.83	0.20

表5 修补砂浆的配合比

Tab.5 Mix proportion of repair mortar

kg/m <sup>3</sup>							
编号	干料	水	乳化沥青	消泡剂	减水剂	A/C	W/C
R1	1 500	240	0	—	8	0	0.52
R2	1 500	220	50	0.06	8	0.1	0.52
R3	1 500	180	150	0.10	8	0.3	0.52
R4	1 500	140	250	0.16	8	0.5	0.52

作为对比,笔者同时制备了树脂基修补砂浆.树脂材料为市售丙烯酸树脂,其黏度为(300 ± 50) mPa·s,密度为1.13 kg/m<sup>3</sup>.固化剂为过氧化二苯甲酰(简称BPO),有效含量74%~76%,填充料选择石英砂.树脂砂浆(MO)配合比(质量比)为树脂:BPO:石英砂=100:1.5:235,编号为MO.

## 1.2 试验方法

四点弯曲试验采用如图1所示的尺寸为100×100×400 mm的组合试块,其由基体水泥乳化沥青砂浆及修补材料组成.在成型基体水泥乳化

沥青砂浆前,预先在试模底部放置如图所示的梯形有机玻璃模具,砂浆浇注1 d后脱模并置于标准养护箱中养护27 d后取出,将缺口区域打磨,在空气中继续养护28 d后浇注修补材料.修补材料浇注后第二天的拆模,将组合试块继续置于标准养护箱中养护6 d后进行四点弯曲实验.由于水泥乳化沥青砂浆的抗弯强度较混凝土低,因此加载速率选择0.05 mm/min.

## 1.2.1 力学性能测试

水泥乳化沥青砂浆及修补材料抗压、抗折强度测试方法参考水泥胶砂强度测试方法,试块尺

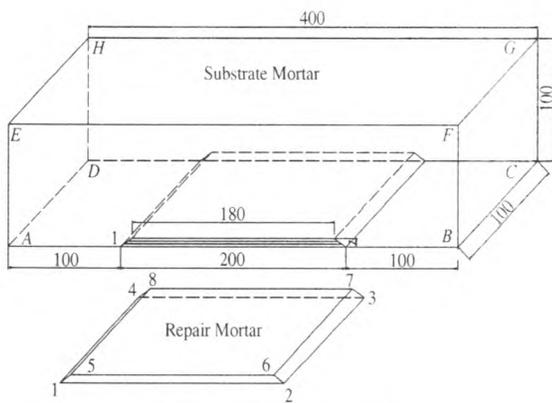


图 1 四点弯曲试验

Fig.1 Four point bending test

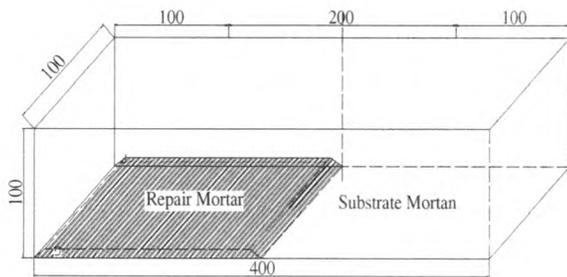


图 2 四点弯曲疲劳试验

Fig.2 Four point bending fatigue test

表 6 硅酸盐水泥、硫铝酸盐水泥化学组成与物理性能  
Tab.6 Physical properties of portland cement and fast hardening cement

化学组成 (质量比)	普通硅酸盐水泥 (PC)	硫铝酸盐水泥 (SAC)
SiO <sub>2</sub> /%	21.46	6.45
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /%	5.64	20.58
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /%	2.95	1.35
CaO/%	60.59	43.72
MgO/%	1.64	1.83
SO <sub>3</sub> /%	2.75	17.89
烧失量/%	2.95	6.13
物理性能	普通硅酸盐水泥 (PC)	硫铝酸盐水泥 (SAC)
表面积/(m <sup>2</sup> ·kg <sup>-1</sup> )	349	282
凝结时间		
初凝	129	28
终凝	190	50
标准稠度/%	27.7	—
抗压强度		
3 d	24.0	45.2
28 d	51.7	50.4

寸为 40 × 40 × 160 mm. 其中抗折强度测试加载速率为 0.05 kN/s, 抗压强度测试加载速率为 0.5 kN/s. 水泥乳化沥青砂浆与修补材料弹性模量的测试参考 CRTS I 型水泥乳化沥青砂浆弹性模量的测试方法, 测试时将试块以 1 mm/min 的速率

加载到 800 N 后再以相同速率卸载, 反复 4 次后, 取第 5 次的测试曲线中 3/4 处及 0.5 MPa 处的应力、应变值计算试块的弹性模量.

$$E = \frac{(\sigma_b - \sigma_a)h}{b - a} \quad (1)$$

式中:  $E$  为试件的弹性模量;  $h$  为试件的高度;  $\sigma_b$  为试件加载曲线 3/4 的抗压强度;  $\sigma_a$  为 0.5 MPa;  $b$  为试验时第 5 次加载, 加载曲线 3/4 抗压强度时试样的变形;  $a$  为试验时第 5 次加载, 加载曲线 0.5 MPa 处试样的变形.

### 1.2.2 四点弯曲疲劳试验

四点弯曲疲劳试块如图 2 所示. 在进行完四点弯曲静态试验后, 进行四点弯曲疲劳试验, 加载最大应力为静态试验破坏应力的 0.35, 应力比为 0.1, 加载频率为 12 Hz, 加载波形为正弦波.

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同力学性能的修补材料与基体砂浆的适应性研究

表 7 为不同力学性能的修补材料与基体水泥乳化沥青砂浆组成的组合试块抗弯强度及破坏形式. 由表 7 可知, 组合试块的抗弯强度与修补材料/基体材料的抗弯、抗压强度比值之间没有明显的相关性, 而与修补材料的弹性模量密切相关. 组合试块的抗弯强度随着修补材料与基体材料间弹性模量差异的增大而增大, 并且砂浆的破坏形式也由从组合试块中央处破坏向沿修补材料边缘处破坏转变, 如图 3.

### 2.2 有限元模型分析

为了研究修补材料与基体材料间弹性模量差异对组合试块应力、应变分布的影响, 按图 1 所示建立有限元模型. 基体砂浆的弹性模量设定为 8 000 MPa, 修补材料的弹性模量分别设定为基体砂浆的 0.7、1.0 及 1.3 倍, 保持两者间的泊松比为 0.168, 加载速率为 0.05 mm/min.

不同弹性模量的修补材料与基体砂浆组成的组合试块在受到荷载时的应力分布如表 8 所示. 由表可知, 基体水泥乳化沥青砂浆中央处的应变为 2.125 MPa, 应变为 0.287. 当修补材料的弹性模量高于基体砂浆时, 组合试块中央处承担了较小的应变(0.277)与较高的应力(2.842 MPa). 这表明修补材料不能像基体砂浆那样有足够大的变形, 两者间的界面可以将荷载充分地传递到修补材料处, 因此组合试块更容易在中央处或修补材料处断裂. 当修补材料的弹性模量低于基体砂浆

表7 组合试块的抗弯强度及破坏形式

Tab.7 Flexural strength and failure mode of composite sample

编号	抗弯强度 /MPa	弹性模量 /MPa	抗弯强度 比值	抗压强度 /MPa	抗压强度 比值	复合梁抗弯 强度/MPa	复合梁抗弯 强度比值	破坏 形式
CAM	4.82	1 159	—	28.1	—	2.68	—	—
R1	4.70	1 495	0.98	43.2	1.54	1.91	0.71	中央
R2	4.52	1 269	0.94	27.6	0.98	2.47	0.92	中央
R3	3.64	961	0.76	22.2	0.79	3.33	1.16	中央
R4	3.28	695	0.68	12.7	0.45	3.47	1.29	侧边
M0	17.55	271	3.64	26.6	0.95	3.26	1.22	侧边

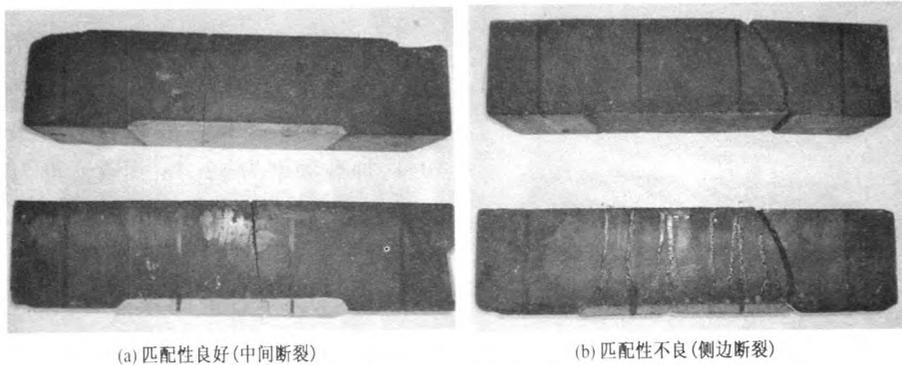


图3 匹配性实验试块破坏模式

Fig.3 Failure mode of sample for compatibility test

时,组合试块中央处承担了较大的应变(0.299)与较小的应力(1.81 MPa).应变的增加意味着低的荷载传输效率,即荷载无法完全传递到修补材料处.分析基体砂浆与修补材料粘接边缘处的应变可知,低弹模修补材料的组合试块粘接边缘处应变为-0.353,基体砂浆及高弹模修补材料组合试块在此处的应变分别为-0.222与-0.145,低弹模材料在界面粘接处受到较为明显的束缚,产生应力集中,当修补材料与基体砂浆的粘接强度足够大时,试块更倾向于在粘接边缘处破坏.

表8 基体砂浆与修补材料组合试块的有限元分析

Tab.8 Finite element analysis of composite sample

修补材料/ 基体材料弹 性模量比例	组合试块 中央应力 /MPa	组合试块 中央应变
1.0	2.125	0.287
0.7	1.81	0.299
1.3	2.842	0.277

### 2.3 四点弯曲疲劳实验

图4为四点弯曲疲劳试验结果由图4(a)可知,基体水泥乳化沥青砂浆在经受15万次疲劳试验后依然不断裂,具有良好的服役性能,而组合试块的疲劳寿命大大降低,均小于5万次,且疲劳寿命随着修补材料与基体材料弹性模量差异的增大

而减少.与基体砂浆弹性模量差异最大的树脂砂浆组合试块的疲劳寿命只有13 141次.从试块的破坏形式(图4(b))来看,所有试块均沿着基体砂浆与修补材料的粘接边缘处断裂.由于修补材料与基体砂浆弹性模量的差异,导致在承受荷载时变形不一致,低弹模的修补材料变形更大,在基体砂浆的束缚作用下产生应力集中,从而在两者粘接边缘处破坏,这也进一步验证了弹性模量匹配对服役性能的重要影响.

### 3 结论

(1)修补砂浆与水泥乳化沥青砂浆弹性模量的差异决定着两者的力学匹配性.随着修补材料与基体材料弹性模量差异的增大,组合试块的抗弯强度逐渐增加,破坏形式也由中央破坏转变为修补砂浆与基体砂浆粘接边缘破坏.

(2)高弹模修补材料与基体砂浆组成的整体荷载传输效率高,荷载可以有效地传递到底部修补材料上,其破坏形式主要为中央断裂.低弹模修补材料与基体砂浆组成的整体荷载传输效率低,荷载不能有效地传递到修补材料上,修补材料受到的应力不足以让其破坏.低弹模材料的高形变受到高弹模基体材料的严重束缚,容易在两者粘

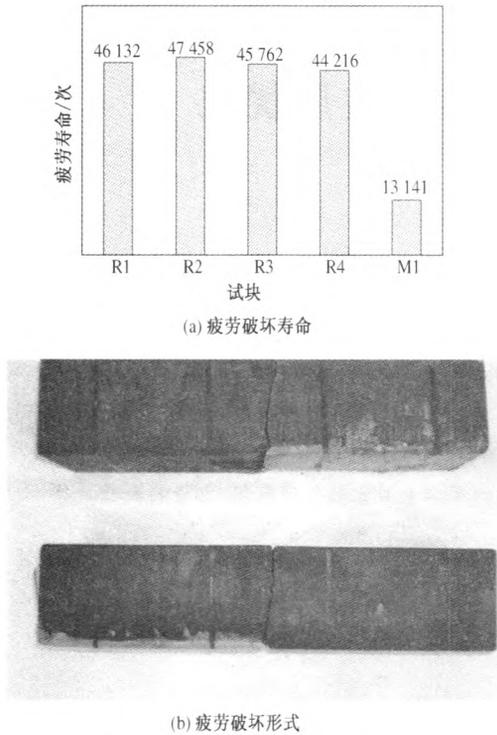


图4 四点弯曲疲劳试验结果

Fig.4 Result of our point bending fatigue test

接边缘处产生应力集中,沿粘接边缘处发生破坏。

#### 参考文献:

- [1] ESVELD C. Recent development in slab track [J]. *European Railway Review*, 2003(2): 81-85.
- [2] 王涛. 高速铁路板式无砟轨道 CAM 的研究与应用 [D]. 武汉: 武汉理工大学材料科学与工程学院, 2008.
- [3] MIURA S, TAKAI H, UCHIDA M, et al. The mechanism of railway tracks [J]. *Japan Railway & Transport Review*, 1998(3): 38-45.
- [4] WANG Fa-zhou, LIU Zhi-chao, WANG Tao, et al. A novel method to evaluate the setting process of cement and asphalt emulsion in CA mortar [J]. *Materials&Structure*, 2008, 41(4): 643-7.
- [5] 向俊, 赫丹, 曾庆元. 水泥沥青砂浆劣化对板式轨道动力学性能的影响 [J]. *中南大学学报: 自然科学版*, 2009, 40(3): 791-796.
- [6] 曾真. 高速铁路板式无砟轨道破损分析及工务修程修制研究 [D]. 成都: 西南交通大学土木学院, 2009.
- [7] 赵伟. 单元板式无砟轨道伤损及纵向受力分析 [D]. 成都: 西南交通大学土木学院, 2008.
- [8] POSTON R W, KESNER K E, MCDONALD J E, et al. Concrete repair material performance-Laboratory study [J]. *ACI Materials Journal*, 2001, 98(4): 117-125.
- [9] RASHMI R P, PRASADA R R. Analysis of compatibility between repair material and substrate concrete using simple beam with third point loading [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2007, 19(12): 1060-1069.
- [10] CZARNECKI L, GARBACZ A, LUKOWSKI P, et al. Polymer composites for repairing of Portland cement concrete-compatible project. [R]. NISTIR 6394, Building and Fire Research Laboratory, NIST, Gaithersburg, Md.

### Analysis on the Compatibility of Mechanical Properties Between Cement and Asphalt Mortar and Repair Materials

LIU Yuan-wen<sup>1</sup>, LIU Yun-peng<sup>2,3</sup>

(1. Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture; 3. State Key Laboratory for Silicate Materials for Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** The compatibility of mechanical properties between cement and asphalt mortar and repair materials was studied by the four point bending method. With the help of finite element model, the effect of difference in modulus of substrate mortar and repair mortar on the stress and strain distribution of composite sample was studied. Results indicated that difference in modulus of substrate mortar and repair mortar decided the loading transfer efficiency and failure mode, which mainly influenced compatibility of mechanical properties. According to the service state of CAM, four point bending fatigue test was employed to identify the compatibility between CAM and repair material.

**Key words:** Cement and asphalt mortar; repair; compatibility; finite element model analysis