

VAE 乳胶粉掺量对苯丙乳液水泥基路面填缝料 拉伸性能的影响

杨 宁¹, 白二雷¹✉, 许金余^{1,2}, 李为民³, 张 玺⁴

(1. 空军工程大学航空工程学院, 西安, 710038; 2. 西北工业大学力学与土木建筑学院, 西安, 710072;
3. 南部战区空军保障部机营处, 广州, 510052; 4. 93199 部队保障部运输机营处, 哈尔滨, 150001)

摘要 采用控制变量法研究了 VAE 可再分散乳胶粉掺量对聚合物水泥填缝料(Polymer-Modified Cement Based Composed Joint Sealant, PCJS)拉伸性能的影响规律。将苯丙乳液水泥基路面填缝料中的部分填料替换为 VAE 乳胶粉制成新型的 PCJS, 测量了不同 VAE 乳胶粉掺量下 PCJS 的拉伸强度、拉伸断裂伸长率、拉伸峰值应变、拉伸模量, 观察记录了拉伸破坏形态, 分析了温差对 PCJS 早期拉伸强度性能的影响, 研究了苯丙乳液(SAE)和 VAE 乳胶粉对 PCJS 的复合改性作用。试验结果表明: 30℃ 温差处理对 PCJS 早期拉伸强度发展无显著影响。且在 28 d 标准条件下养护完成后, 随着 VAE 乳胶粉掺量增加, PCJS 拉伸强度和拉伸模量显著上升, 拉伸破坏形态由“内聚破坏”向“粘结破坏”转变, 拉伸断裂伸长率和拉伸峰值应变随乳胶粉掺量增加呈先上升后下降趋势, 当乳胶粉掺量为 2%~3% 时, PCJS 拉伸变形性能最佳。

关键词 聚合物水泥; 苯丙乳液; VAE 乳胶粉; 填缝料; 拉伸性能

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2018.04.018

中图分类号 TU5 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2018)04-0105-07

Effects of VAE Re-Dispersible Emulsion Powder Content on Tensile Properties of Styrene-Acrylic Emulsion Based Cement Compound Joint Sealant

YANG Ning¹, BAI Erlei¹✉, XU Jinyu^{1,2}, LI Weiming³, ZHANG Xi⁴

(1. Aeronautical Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China;
2. College of Mechanics and Civil Architecture, Northwest Polytechnic University, Xi'an 710072, China;
3. Airport and Barracks Office, Air Force Logistics Department in Southern Military Region, Guangzhou 510052, China. 4. Transport and Barracks Office, Logistics Department of Unit 93199, Harbin 150001, China)

Abstract: This paper studies the law of the effect of the VAE re-dispersible emulsion powder content on the tensile properties of polymer-modified cement based composed joint sealant (PCJS) systematically by single factor test. A new kind of PCJS is produced by adding VAE re-dispersible emulsion powder into styrene-acrylic emulsion based cement compound joint sealant. Under condition of different polymer powder

收稿日期: 2018-03-12

基金项目: 国家自然科学基金(51208507, 51378497)

作者简介: 杨 宁(1994—), 男, 湖南常德人, 硕士生, 主要从事防护工程及建筑材料研究. E-mail: yangning_kgd@163.com

通信作者: 白二雷(1979—), 男, 河南焦作人, 副教授, 主要从事钢筋混凝土与防护工程研究. E-mail: bwxkg@163.com

引用格式: 杨宁, 白二雷, 许金余, 等. VAE 乳胶粉掺量对苯丙乳液水泥基路面填缝料拉伸性能的影响[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2018, 19(4): 105-111. YANG Ning, BAI Erlei, XU Jinyu, et al. Effects of VAE Re-Dispersible Emulsion Powder Content on Tensile Properties of Styrene-Acrylic Emulsion Based Cement Compound Joint Sealant[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2018, 19(4): 105-111.

content, the tensile strength, early tensile strength, tensile breaking elongation, peak strain and tensile modulus of PCJS are measured respectively. Moreover, the tension failure modes of the PCJS with different content of VAE re-dispersible emulsion powder are recorded and investigated. The effect of different cure condition and emulsion powder content on early tensile strength of PCJS is studied. The composite effect of styrene-acrylic emulsion (SAE) and VAE re-dispersible emulsion powder on the modification of PCJS is studied. The results show that no obvious differences in materials' early tensile strength emerge at the temperature variation of 30°C. The tests on specimens with full curing date of 28 days show that as the added proportion of VAE re-dispersible emulsion powder increases, significant growth in both PCJS's tensile strength and tensile modulus can be observed. In addition, the tensile failure mode is transformed from cohesive failure to adhesive failure with the increase of polymer powder content. Besides, the tensile deformation capacity of PCJS increases first and then decreases along with the increasing of the VAE re-dispersible emulsion powder content. Besides, the PCJS can optimize the performance of tensile deformation, as the VAE re-dispersible emulsion powder is added into it by 2%~3%.

Key words: polymer-cement composition; SAE; VAE re-dispersible emulsion powder; joint sealant; tensile property

接缝密封是水泥混凝土路面的薄弱环节,路面的破坏往往起源于接缝处的应力集中和渗水^[1]。近年来,研究人员根据大量的工程实践与相关试验研究,研制出了新型的聚氨酯^[2-3]、聚硫^[4-5]及有机硅类填缝料^[6-7],在施工性和耐久性方面有了较大的改进,在路面建设中广泛运用。但在实际工程使用中发现,聚氨酯类填缝料耐候性与抗老化性能较差,聚硫类填缝料抗嵌入性能较弱,硅酮类填缝料机械性能和耐化学药品性能较差^[8],且油性材料内部组分不稳定,易挥发,污染环境,危害施工人员健康,这些缺点在工程实践中,对混凝土路面的施工、使用和维护都造成了极大的困扰。

随着国家对环保力度的加大,混凝土路面填缝料开始往水性发展。聚合物水泥基复合材料是一种良好的选择,它是一种兼具有机聚合物材料“柔性”与无机硅酸盐材料“刚性”的复合材料,制备简单,绿色环保。当聚灰比(聚合物成分的量与水泥的量的比值)较大时,材料为具有良好力学性能和耐久性的柔性材料,且与混凝土有良好的粘结性,因此常用来做防水涂料^[9-12]。

国内外许多学者针对聚合物水泥基复合材料开展了大量研究,其中,董孔祥^[11]和张智强^[12]研究了各组分对聚合物水泥基防水涂料性能的影响,为高性能聚合物水泥基复合材料的研制提供了一定依据;Ohama^[13]对聚合物水泥基复合材料的微观结构进行了研究,提出了解释聚合物水泥增强机理的模型,并由 Ma^[14]、Plank^[15]从不同角度进行了改进;蹇守卫^[16]运用 XRD 和 SEM 等工具,对苯丙和 VAE 这种乳液与水泥的作用机理进行了比较研究,并根据聚合物是否与水泥水化产物发生反应,对聚

合物进行了分类;关于聚合物水泥基填缝料可行性研究方面,彭光^[17]和朱从进^[18]用苯丙乳液基水泥复合材料制成了 PCJS,并对其拉伸、剪切性能进行了研究,他们的研究结果初步验证了聚合物水泥复合材料用作路面填缝料的可行性,并为 PCJS 的制备设计提供了理论依据。

1 试验原材料及试件制备

1.1 原材料

本试验中水泥基填缝材料的主体部分采用德国巴斯夫(BASF)公司 Acronal S400F ap 苯丙乳液制成。主要性能如下:固含量 99±1%;灰分 13±2%;颗粒尺寸 1~7 μm;玻璃化温度 0 °C;成膜温度 0 °C。采用德国瓦克(WACKER)公司 5044N 型 VAE 可再分散乳胶粉替换等填缝材料中的重滑石粉,主要性能如下:固含量 99±1%;pH 值 7.0~8.5;玻璃化温度-7 °C;成膜温度<1 °C;膜抗拉强度 0.35 MPa;膜断裂伸长率>240%。

本文选用陕西蓝田尧柏牌 P.O 42.5 R 水泥制成水泥基试件,其初凝时间为 130 min,细度模数为 1.6;试件所需其余材料分别为市售滑石粉、聚羧酸钠盐分散剂、十二碳醇酯类成膜助剂、金属皂类消泡剂。

1.2 试件制备

本研究试件两侧为水泥砂浆基材,中间由 PCJS 粘结。水泥砂浆基材依据机场水泥混凝土路面接缝材料施工技术规程(GJB 6951—2010)制备,砂浆配合比为水泥:砂:水=1:2:0.4,尺寸为 75 mm×25 mm×12 mm。其中聚合物乳胶粉以粉料形式

添加,固定液粉比(聚合物乳液的量与粉料的量的比值)为1:0.4。按照乳胶粉掺量由0~6%的顺序,将试件依次标记为JF-1,JF-2,JF-3,JF-4,JF-5和JF-6。

试件中间的PCJS制备配合比见表1。

表1 PCJS配合比

Tab. 1 Mix proportion of PCJS g

试件	苯丙乳液	聚合物胶粉	水泥	粉煤灰	分散剂	消泡剂	成膜助剂
JF-1	100	0	10	30	0.84	0.70	5
JF-2	100	1	10	29	0.84	0.70	5
JF-3	100	2	10	28	0.84	0.70	5
JF-4	100	3	10	27	0.84	0.70	5
JF-5	100	4	10	26	0.84	0.70	5
JF-6	100	5	10	25	0.84	0.70	5

试件制备步骤为:首先向乳液中分别加入分散剂、成膜助剂和半份消泡剂并使用搅拌机搅拌均匀,随后将已经充分混合的水泥、滑石粉和乳胶粉加入到乳液中并持续高速搅拌10 min,加入另外半份消泡剂并继续低速搅拌。待拌合物搅拌均匀后,使用玻璃棒进行人工搅拌以减少气泡,并用注射器抽取拌合物在水泥基材料之间进行灌注。为保证试件养护干缩后试样表面与基材和垫块的上表面齐平,灌注时填缝料应略高于基材和垫块。将试件按养护时间分为2组,移入室内进行养护至试件及填缝材料形成强度,第1组养护1 d后取出,第2组养护28 d后取出,然后开展下一阶段试验。试件成型后标准填缝料见图1,具体尺寸见图2。



图1 标准填缝料试件
Fig. 1 Standard test specimen of joint sealant

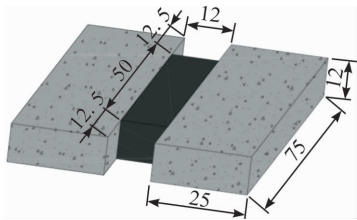


图2 标准填缝料试件尺寸(mm)
Fig. 2 Sample size of joint sealant (mm)

2 拉伸性能试验方案

本研究采用HS-3001B型电子拉力试验机进行拉伸试验,夹具通过两侧水泥砂浆基材向粘结材料施加拉力,如图3所示,将试件在标准条件下以5 mm/min的加载速率拉伸直至试件破坏,记录力与位移数据,每组测试3个试件,试验结果取3组数据的平均值。



图3 拉伸加载示意图

Fig. 3 Diagram of tensile loading mode

试验按研究目的的差异分为2个部分。

第1部分试验研究不同养护条件与不同VAE乳胶粉掺量对PCJS试件的早期抗拉强度的影响。由于我国北方和西北部地区具有昼夜温差大的气候特点,该地区机场的水泥基接缝材料两侧的道面板会产生膨胀和收缩效应,从而影响道面板的接缝宽度,并在接缝材料中产生拉伸应力。PCJS材料在养护初期强度尚未完全形成,易受力产生拉伸形变甚至开裂,造成道面板连接处的损伤。因此,研究PCJS的早期抗拉强度具有很高的现实意义。为验证PCJS在实际工程环境下的使用性,试验设置温差处理组和标况养护组,并且在每个组别设置6种掺量。所有试件均在标准条件下养护1 d后进行试验,标况养护组继续在标准养护条件下养护,温差处理组试件放入变温试验箱进行变温处理。变温试验箱如图4所示,试验箱最低温度设置为-10℃,最高温为20℃,控制精度为±0.5℃,且可通过控制程序自动完成变温过程。1个变温循环时间为24 h,具体步骤见表2。每经历1个变温循环进行1次拉伸试验,连续测量2组试件龄期为1~7 d时的拉伸强度 f_t' 。



图4 变温试验箱

Fig. 4 Temperature variation testing system

表2 变温循环步骤

Tab. 2 Process of variable temperature cycle

步骤	时间/h	变温速率/ ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{h}^{-1}$)	初始温度/ $^{\circ}\text{C}$	最终温度/ $^{\circ}\text{C}$
1	4.75	4.21	0	20
2	3.25	0	20	20
3	10	-3	20	-10
4	3	0	-10	-10
5	3	3.33	-10	0

第2部分试验研究不同乳胶粉掺量对完全成型后的PCJS试件拉伸性能的影响,取标准条件下养护28d后成型的PCJS试件进行拉伸测试,并通过试件拉伸强度、拉伸断裂伸长率、拉伸峰值应变、拉伸模量以及拉伸破坏形态5个性能指标对接缝材料的拉伸性能进行分析研究。

3 试验结果及分析

3.1 早期拉伸强度 f'_t

早期拉伸强度即养护初期PCJS的拉伸峰值应力,是衡量该材料养护成型过程中抗拉伸破坏的重要指标。对应到机场道面上,道面板受昼夜温差影响发生形变,PCJS填缝材料随之拉伸或收缩,发生开裂损伤,早期的抗拉强度可以表征材料抵抗该类型损伤的能力,从而为机场道面接缝处的早期养护与使用提供理论基础。第1部分试验测量了不同养护条件下不同VAE乳胶粉掺量的试件 f'_t ,其中,标况养护组试件 f'_t 见图5,温差处理组试件 f'_t 见图6。

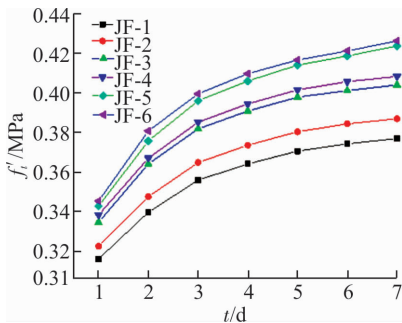


图5 VAE 乳胶粉掺量对标准养护条件下 PCJS 早期拉伸强度的影响

Fig. 5 Effect of VAE re-dispersible emulsion powder content on early tensile strength of PCJS cured in standard condition

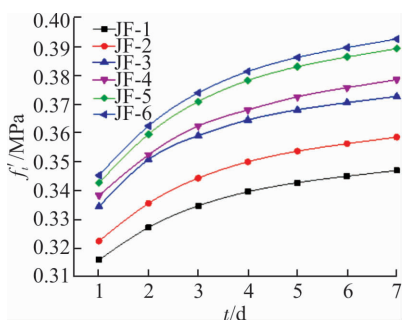


图6 VAE 乳胶粉掺量对温差养护条件下 PCJS 早期拉伸强度的影响

Fig. 6 Effect of VAE re-dispersible emulsion powder content on early tensile strength of PCJS cured in temperature variation condition

对比图5和图6可知,所有试件在标准条件下养护1d后均形成了一定强度,在龄期2~7d内温差养护条件下和标况下养护的试件的拉伸强度随养护时间的增加均发生了增长,而其强度增长率均随时间增加而逐步降低。温差处理对于试件早期拉伸强度的影响仅仅表现为在一定程度上降低了试件拉伸强度的生长速率,在7d时温差组试件的拉伸强度基本保持在标况养护组试件的85%左右,温差组试件的强度形成规律以及强度增长率随时间的发展规律均与标况下养护组基本保持一致。因此该实验说明了在一定范围内的温度变化(-10~20℃)对于PCJS材料的早期强度形成无显著影响。

3.2 成型后拉伸强度 f_t

拉伸强度即拉伸峰值应力,是反映填缝料试件承受拉力荷载能力的指标参数。 f_t 与VAE乳胶粉掺量的关系见图7。

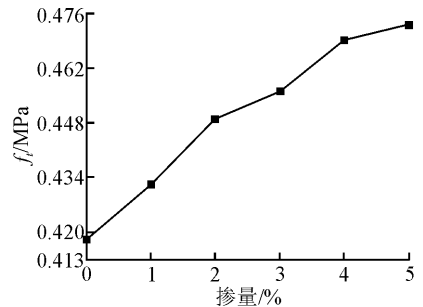


图7 VAE 乳胶粉掺量对 PCJS 拉伸强度的影响

Fig. 7 Effect of VAE re-dispersible emulsion powder content on tensile strength of PCJS

由图7可知, f_t 与乳胶粉掺量表现出明显的正相关性,试件 f_t 随乳胶粉掺量增加不断上升,当乳胶粉掺量为5%时, f_t 有最大增长率为13.23%。

3.3 拉伸断裂伸长率 $\delta_{t,b}$

拉伸断裂伸长率是指拉伸试件在拉力作用下破坏时的位移值与原长的比值,是表征材料变形性能的指标参数。 $\delta_{t,b}$ 与VAE乳胶粉掺量的关系如图8所示。

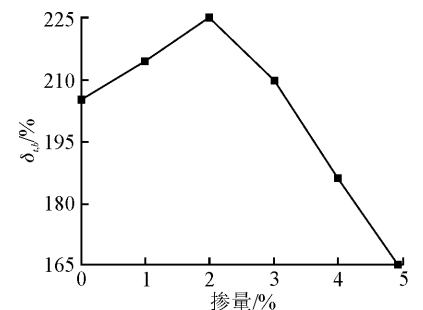


图8 VAE 乳胶粉掺量对拉伸断裂伸长率的影响

Fig. 8 Effect of VAE re-dispersible emulsion powder content on tensile breaking elongation of PCJS

由图 8 可知,当乳胶粉掺量小于 2% 时,试件 $\delta_{i,b}$ 随胶粉掺量增加而上升,乳胶粉掺量为 2% 时, $\delta_{i,b}$ 达到最大,增长率为 9.60%;当乳胶粉掺量大于 2% 时, $\delta_{i,b}$ 随胶粉掺量增加迅速下降,当乳胶粉掺量为 5% 时, $\delta_{i,b}$ 仅为 JF-1 的 79.86%。

3.4 拉伸峰值应变 $\epsilon_{t,p}$

拉伸峰值应变是指 PCJS 试件在拉力作用下达到峰值应力时的应变,用以表征 PCJS 在拉伸作用下的变形性能。 $\epsilon_{t,p}$ 与 VAE 乳胶粉掺量的关系见图 9。

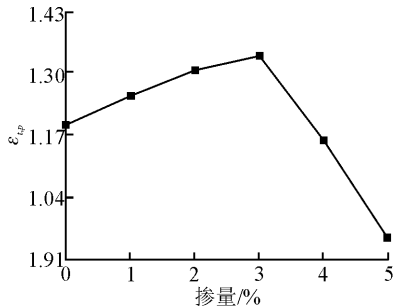


图 9 VAE 乳胶粉掺量对 PCJS 拉伸峰值应变的影响

Fig. 9 Effect of VAE re-dispersible emulsion powder content on tensile peak strain of PCJS

由图 9 可知,随着乳胶粉掺量增加,试件 $\epsilon_{t,p}$ 呈先上升后下降的趋势。当乳胶粉掺量小于 3% 时,试件 $\epsilon_{t,p}$ 随乳胶粉掺量增加而明显上升,掺量为 3% 时, $\epsilon_{t,p}$ 达到最大,增长率为 11.98%,随后 $\epsilon_{t,p}$ 随乳胶粉掺量增加而迅速下降,当掺量为 5% 时,试件 $\epsilon_{t,p}$ 仅为 JF-1 的 80.46%。

3.5 拉伸模量 E_t

拉伸模量是指试件拉伸到原试件宽度的 60% 时所对应的应力值,它在一定程度上反映了 PCJS 抵抗变形的能力。 E_t 与 VAE 乳胶粉掺量的关系见图 10。

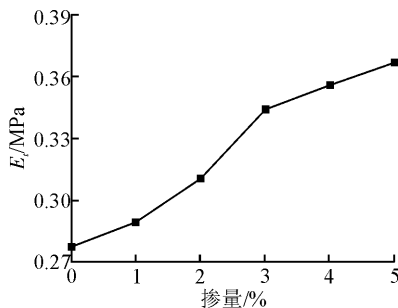


图 10 VAE 乳胶粉掺量对 PCJS 拉伸模量的影响

Fig. 10 Effect of VAE re-dispersible emulsion powder content on tensile modulus of PCJS

由图 10 可知,试件 E_t 随乳胶粉掺量增加而明显上升。当乳胶粉掺量为 5% 时,试件 E_t 的增长率为 32.51%。

3.6 拉伸破坏形态

拉伸破坏形态是指拉伸试件在拉伸荷载作用下破坏时的形态特征。通过分析试件拉伸破坏形态,可以辅助推测试件破坏时的受力情况。当填缝料内聚力小于填缝料与水泥砂浆基材的粘结力时,试件发生内聚破坏;反之,试件发生粘结破坏。本研究对各组试件在拉力作用下的拉伸破坏形态进行了观察和记录,如图 11 所示。

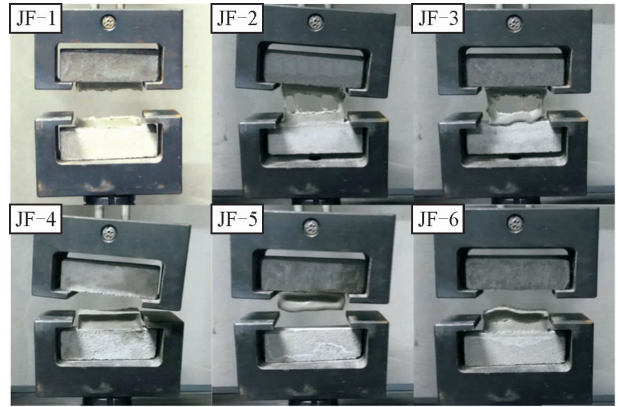


图 11 各组试件的拉伸破坏形态

Fig. 11 Tensile failure mode of specimens with different polymer powder content

图中, JF-1, JF-2 的拉伸破坏形态为内聚破坏,填缝料从中间断裂而填缝料-水泥砂浆基材粘结界面完好; JF-3 的拉伸破坏形态也为内聚破坏,但该组试件的填缝料-水泥砂浆基材粘结界面出现大面积填缝料剥离; JF-4, JF-5, JF-6 的拉伸破坏形态均为粘结破坏,填缝料与一侧水泥砂浆基材脱离且填缝料上未见明显破坏。综上可知,随着 VAE 乳胶粉掺量增加, PCJS 的拉伸破坏形态由“内聚破坏”向“粘结破坏”转变。

4 VAE 乳胶粉改善机理分析

将表征 PCJS 拉伸承载能力的 f_t 、 E_t 和拉伸破坏形态数据综合分析后发现,随着 VAE 乳胶粉掺量增加, f_t 、 E_t 不断提高,拉伸破坏形态由“内聚破坏”向“粘结”破坏转变。产生这些现象的原因主要有以下几点:①掺加 VAE 乳胶粉代替填料,增加了 PCJS 中聚合物的成分,提高了聚灰比,提高了填缝料的粘度,增大了填缝料与水泥砂浆基材之间的粘结力^[11,19], f_t 上升。②VAE 乳胶粉溶于水后形成的乳液 pH 值为 4.0~6.0, 偏酸性,而苯丙乳液中往往添加氨水作为 pH 值调节剂^[20], 苯丙乳液 pH 值为 7.0~8.5, 由于苯丙乳液掺量明显大于 VAE 乳胶粉掺量,因此添加乳胶粉对材料 pH 值影响较

小,但随着乳胶粉掺量增大,水泥水化收到影响, f_t 和 E_t 的增长速率有所减缓。③PCJS拉伸破坏形态的改变,主要原因是添加VAE乳胶粉改善了填缝料的内部结构,填缝料内聚力显著提高。由于苯丙乳液和VAE乳胶粉分别与水泥混合生成不同的体系,VAE乳胶粉为线性高分子材料,分子中没有活性官能团,因此它与水泥的体系属于非反应型的^[16-20]。均匀分布的苯丙分子与水泥水化生成的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 反应并生成以离子键结合的大分子网络交织结构,避免了VAE乳胶粉与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 不相容的问题^[21-22],之后,剩下的苯丙乳液与VAE乳胶粉分子在成团物质周围聚凝,水分挥发后成膜^[13-15]。由于VAE的分子粒径远大于苯丙的分子粒径,不同的粒径组合减少了孔隙,从而提高了材料的强度。

将表征PCJS拉伸变形能力的 $\delta_{t,b}$ 、 $\epsilon_{t,p}$ 数据综合分析后发现,断裂伸长率和峰值应变与乳胶粉掺量的关系曲线较为相似,随着乳胶粉掺量的增加,2个参数均呈现先增加后减少的趋势。适量掺加VAE乳胶粉时,聚灰比提高,填缝料有机聚合物的“柔性”特征得到强化,过量掺加乳胶粉时,材料内部密实度大幅提高,聚合物膜与水泥水化产物的结构紧密有序,从而妨碍了聚合物高分子链的自由伸缩,导致PCJS的变形能力下降。在两方面的交织作用下,乳胶粉掺量为2%~3%范围内时,试件变形能力的改性效果最佳。

5 结论

本研究用VAE可再分散乳胶粉替换等重滑石粉,研究了不同VAE乳胶粉掺量(0、1%、2%、3%、4%、5%)对苯丙乳液水泥基填缝材料拉伸性能的影响,主要结论如下:

1)掺加VAE乳胶粉对苯丙乳液水泥基填缝材料早期拉伸强度有明显的提升,可有效抵抗接缝处宽度因温差变化而导致的拉伸或开裂,最优掺量为4%。同时,温度差异大的养护条件不但会导致材料的开裂,也会大幅影响PCJS的强度生成,故前期养护过程中应当注意对PCJS材料的保温处理。

2)掺加VAE乳胶粉对聚合物水泥复合材料的内部结构以及复合材料与水泥砂浆基材的粘结能力有明显提升作用,填缝料试件拉伸强度和拉伸模量随乳胶粉掺量增加均呈上升趋势,试件承受拉力荷载能力得到增强。

3)掺加VAE乳胶粉对聚合物水泥复合材料拉伸变形能力明显相关,填缝料试件拉伸断裂伸长率和峰值应变随乳胶粉掺量增加均呈先上升后下降

趋势。

4)在本文所取的VAE乳胶粉掺量范围内,掺量取乳液质量的2%~3%时,填缝料拉伸性能最佳。

参考文献(References):

- [1] 刘再成,富志鹏,韦刚. 水泥混凝土路面常见病害与预防[J]. 山西建筑,2010,36(5):260-261.
LIU Z C, FU Z P, WEI G. Common Diseases of Cement Concrete Pavement and Preventive Measures [J]. Shanxi Architecture, 2010, 36(5):260-261. (in Chinese)
- [2] 丁伟国,刘继华. 聚氨酯填缝胶在水泥混凝土路面接缝中的应用[J]. 中国市政工程,2001(4):19-20.
DING W G, LIU J H. Application of Polyurethane Sealant to Cement Concrete Pavement [J]. China Municipal Engineering, 2001(4):19-20. (in Chinese)
- [3] 向凯,王好军,江琪. 聚氨酯密封胶在混凝土路面切割缝中的应用研究[J]. 中国建筑防水,2012(4):11-13.
XIANG K, WANG H J, JIANG Q. Research of Application of Polyurethane Sealant in Concrete Pavement Expansion Joints [J]. China Building Waterproofing, 2012, 04:11-13. (in Chinese)
- [4] 寿崇琦,康杰分,邢希学,等. 耐老化聚硫橡胶型水泥混凝土路面填缝胶的研究[J]. 公路交通科技,2006,23(7):47-49.
SHOU C Q, KANG J F, XING X X, et al. Research on the Anti-Aging Joint Sealants of Polysulfide for Cement Concrete Pavement [J]. Journal of Highway Transportation Research and Development, 2006, 23(7):47-49. (in Chinese)
- [5] 刘晓曦,王硕太. 机场混凝土道面封缝材料疲劳特性[J]. 交通运输工程学报,2006,6(1):44-47.
LIU X X, WANG S T. Joint Sealant Fatigue Property of Airport Concrete Pavement [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2006, 6(1):44-47. (in Chinese)
- [6] 李海川,许金余,邵式亮,等. 道康宁硅酮密封胶在机场混凝土道面灌缝中的应用[J]. 新型建筑材料,2006,33(4):60-62.
LI H C, XU J Y, SHAO S L, et al. Application of Dow Corning Silicone Sealant to Crack Pouring of Airport Concrete Pavement [J]. New Building Material, 2006, 33(4):60-62. (in Chinese)
- [7] 寿崇琦,尚盼,宋南京,等. 具有防水功能的水泥混凝土路面填缝料的研制[J]. 中国建筑防水,2008(2):4-7.
SHOU C Q, SHANG P, SONG N J, et al. Development of Waterproofing Joint Filler for Concrete Pave-

- ment [J]. *China Building Waterproofing*, 2008(2):4-7. (in Chinese)
- [8] 寿崇琦,张志良,邢希学,等. 水泥混凝土路面填缝材料的研究[J]. *公路*, 2005(2):113-115.
SHOU C Q, ZHANG Z L, XING X X, et al. Research on Joint Sealants for Cement Concrete Pavement[J]. *Highway*, 2005(2):113-115. (in Chinese)
- [9] 张沂. 聚合物水泥类防水涂料综述[J]. *中国建筑防水*, 2001(4):10-12.
ZHANG Y. Summary of Polymer Cement Waterproof Coatings [J]. *China Building Waterproofing*, 2001(4):10-12. (in Chinese)
- [10] 刘志勇. 聚合物水泥基材料研究综述[J]. *新型建筑材料*, 2000, 27(1):26-28.
LIU Z Y. Summarization for Studying the Material Based on Polymer Cement[J]. *New Building Material*, 2000, 27(1):26-28. (in Chinese)
- [11] 董孔祥,卢迪芬. 聚合物水泥基防水涂料性能的影响因素[J]. *新型建筑材料*, 2006, 33(5):19-21.
DONG K X, LU D F. Affecting Factor on Performance of Polymer Cement Based Waterproof Coatings [J]. *New Building Materials*, 2006, 33(5):19-21. (in Chinese)
- [12] 张智强,董松. 聚合物水泥复合防水涂料各组分对其性能的影响 [J]. *新型建筑材料*, 2002, 29(11):21-25.
ZHANG Z Q, DONG S. Influence of Every Component of Polymer Modified Cementitious Waterproofing Coating on Its Property[J]. *New Building Material*, 2002, 29(11):21-25. (in Chinese)
- [13] OHAMA Y. Polymer-Based Admixtures [J]. *Cement and Concrete Composites*, 1998(20):189-212.
- [14] MA H Y, TIAN Y, LI Z J. Interactions between Organic and Inorganic Phases in PA-and PU/PA-Modified-Cement Based Materials [J]. *Jorunal of Materials Civil Engineering*, 2011, 23(10):1412-1421.
- [15] PLANK J, GRETZ M. Study on the Interaction Between Anionic and Cationic Latex Particles and Portland Cement [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2008, 330(2-3):227-233.
- [16] 蹇守卫,陈露,马保国,等. 聚合物水泥防水涂料的拉伸性能及机理研究[J]. *新型建筑材料*, 2015, 42(7):62-66.
JIAN S W, CHEN L, MA B G, et al. Tensile Properties of the Polymer Cement Waterproof Coating and Mechanism[J]. *New Building Materials*, 2015, 42(7):62-66. (in Chinese)
- [17] 彭光,许金余,任韦波. 聚合物水泥路面填缝材料变形性能研究 [J]. *硅酸盐通报*, 2017, 36(9):2894-2899.
PENG G, XU J Y, REN W B. Deformation Property of Polymer Cement Pavement Joint Sealant[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2017, 36(9):2894-2899. (in Chinese)
- [18] 朱从进,白二雷,许金余,等. 灰粉比对苯丙乳液基水泥复合填缝料剪切性能的研究[J]. *硅酸盐通报*, 2017, 36(8):2576-2582.
ZHU C J, BAI E L, XU J Y, et al. Effects of Cement-Powder Ratio on Shear Properties of Stryrene-Acrylic Emulsion Based Cement Compound Joint Sealant[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2017, 36(8):2576-2582. (in Chinese)
- [19] 胡曙光. 聚合物-水泥界面粘结层的结构分析[J]. *武汉工业大学学报*, 1993, 15(4):12-17.
HU S G. Structural analysis of the Structure of the Interfacial Bond Layer Between Polymer and Cement [J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 1993, 15(4):12-17. (in Chinese)
- [20] 董松. 聚合物水泥基防水涂料的制备及涂膜性能_显微结构的研究[D]. 重庆:重庆大学, 2002.
DONG S. Preparation of Polymer Cement-Based Waterproof Coatings and Properties of Coatings and Microstructure Research [D]. Chongqing: Chongqing University, 2002. (in Chinese)
- [21] 赵春艳,孙顺杰,张琳,等. 聚合物水泥防水涂料拉伸性能影响因素分析[J]. *新型建筑材料*, 2010, 37(10):70-72.
ZHAO C Y, SUN S J, ZHANG L, et al. Factors Affecting Tensile Properties of Polymer Cement-Based Waterproof Coating[J]. *New Building Materials*, 2010, 37(10):70-72. (in Chinese)
- [22] 彭宇,赵国荣,王培铭,等. 基于 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 形貌的可再分散乳胶漆延迟水化的研究[J]. *电子显微学报*, 2016, 35(6):490-495.
PENG Y, ZHAO G R, WANG P M, et al. Study on the Retardation of Re-Dispersible Polymer Powders on Cement Hydration Based on Morphologies of $\text{Ca}(\text{OH})_2$ [J]. *Journal of Chinese Electron Microscopy Society*, 2016, 35(6):490-495. (in Chinese)

(编辑:姚树峰)