

聚合物水泥基复合填缝料耐低温性能研究

王志航¹, 许金余^{1,2*}, 白二雷¹, 任彪¹, 宁镜彭¹

(1. 空军工程大学航空工程学院, 陕西 西安 710038;

2. 西北工业大学力学与土木建筑学院, 陕西 西安 710072)

摘要:针对寒区机场对填缝料耐低温性能的要求, 对不同负温作用时间(0、1、7、15、30 d)后的聚合物水泥基复合填缝料(Polymer-Cement Based Composed Joint Sealant, PCJS)的性能进行了测试, 通过测试-20℃条件下 PCJS 的粘结性能(定伸形态、弹性恢复率)、力学性能(剪切强度、剪切应变、剪切韧度)和变形性能(断裂伸长率), 研究了负温环境对 PCJS 性能的影响规律。结果表明, PCJS 具有良好的耐低温性能; 负温作用后 PCJS 定伸形态良好, 弹性恢复率、剪切韧度和断裂伸长率随负温作用时间的延长先增大后减小, 剪切强度不断增大, 剪切应变逐渐减小。同时结合 PCJS 的微观形貌, 提出了其微结构生成模型。

关键词: 聚合物; 水泥; 填缝料; 负温

中图分类号: TU528

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2021)S-0173-06

DOI: 10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2021.S.035

Research on low temperature resistance of polymer cement-based composite joint sealant

WANG Zhi-hang¹, XU Jin-yu^{1,2*}, BAI Er-lei¹, REN Biao¹, NING Yi-peng¹

(1. School of Aeronautical Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China; 2. School of Mechanics, Civil Engineering and Architecture, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: In accordance with the requirements of the airport in cold areas for the low temperature resistance of joint sealant, the properties of polymer cement-based composite joint sealant (PCJS) after different negative temperature action time (0 d, 1 d, 7 d, 15 d and 30 d) are tested. By testing the bonding properties (fixed elongation morphology and elastic recovery rate), mechanical properties (shear strength, shear strain and shear toughness) and deformation properties (elongation at break) of PCJS under the condition of -20℃, the influence of negative temperature environment on PCJS performance is studied. It is shown that PCJS has good low temperature resistance. PCJS has a good fixed elongation form after negative temperature, and its elastic recovery, shear toughness and elongation at break first increase and then decrease with the extension of negative temperature while the shear strength continues to increase, and the shear strain decreases gradually. Combined with the microscopic appearance of PCJS, a microstructure generation model is proposed.

Key words: polymer; cement; joint sealant; negative temperature

民用机场绝大多数是水泥混凝土道面, 水泥混凝土材料具有较强的热胀冷缩特性, 在机场建设施工中, 为了减小由温度或湿度变化引起的翘曲或收缩应力, 避免水泥混凝土道面板发生破坏, 需要设置各种形式的接缝^[1-2], 在缝槽内需要使用填缝料对接缝进行密封和防水。接缝虽然属于功能性构造, 在水泥混凝土道面中所占的比例很小, 但对水泥混凝土道面的结构影响很大。大量研究和实际经验表明, 水泥混凝土面层发生的早期破坏如接缝破碎、唧泥、脱空等均与填缝料失效有很大关系^[3-4]。

聚合物水泥基复合填缝料(PCJS)是以聚合物乳液和水泥为基体材料、无机填料与功能性助剂等

作为增强材料的一类高性能复合材料, 兼具聚合物基材料的“柔性”与水泥基材料的“刚性”, 在机场道面接缝工程中具有广阔的应用前景。有研究人员对 PCJS 的基础配比进行了研究^[5-7], 发现粉液比为 0.4、灰粉比为 0.35 时, PCJS 的性能最佳。另有研究者采用成膜助剂、增塑剂、硅烷偶联剂对 PCJS 进行了改性^[8-9], 发现成膜助剂掺量为 6%、增塑剂掺量为 1%、硅烷偶联剂掺量为 0.7% 时, PCJS 改性效果最佳。还有研究人员对 PCJS 的耐久性、耐候性进行了研究^[10-11], 发现 PCJS 的耐紫外老化、耐高温、耐航油侵蚀、耐干湿循环等性能良好。刘高杰等^[12]对比研究了 PCJS 的工程应用经济性, 发现

收稿日期: 2021-04-07; 修回日期: 2021-06-03

基金项目: 国家自然科学基金(51208507, 51378497)

作者简介: 王志航(1996-), 男, 硕士生, 研究方向为机场道面新型填缝料, 1833525542@qq.com; 许金余(1963-), 男, 博士, 教授, 研究方向为防护工程与结构工程, 通讯联系人, songchenwzh@163.com。

PCJS 每延米仅需 2~3 元,与聚氨酯、聚硫类填缝料相比,具有明显的经济优势。上述研究为 PCJS 在接缝工程中的应用提供了大量的理论依据^[13-15],然而尚缺乏对其耐低温性能的研究。我国西北、东北等地的机场位处高寒地区,冬季持续时间长,导致填缝料长期处于负温条件下,对填缝料的耐低温性能提出了更高的要求。

本文对 PCJS 进行了负温作用处理,通过定伸实验与剪切实验,研究 PCJS 在 -20℃ 条件下粘结性能、力学性能和变形性能的变化规律,并结合 PCJS 的微观形貌,探讨其微结构生成模型。

1 实验

1.1 材料

本文所制备的 PCJS 是一种双组分填缝材料,固体组分(无机粉料)包括水泥和无机填料,液体组分包括聚合物乳液和功能性助剂。聚合物乳液为苯丙乳液和 VAE 乳液,主要技术指标如表 1 所示;水泥为陕西蓝田尧柏牌 P. O 42.5 级水泥;无机填料为

滑石粉(600 目, SiO₂ 含量 60%, MgO 含量 30%) 和重质碳酸钙(500 目, 纯度 > 99%); 功能性助剂为 SN-Dispersant 5040 型分散剂、SN-Defoamer 345 型消泡剂、DN-12 型成膜助剂、ND-42 型硅烷偶联剂、DBP 型增塑剂。其中, 聚合物乳液及水泥是形成 PCJS 有机无机复合胶凝体系的主要物质, 是整个 PCJS 的基础; 无机填料一方面起填充作用, 另一方面对 PCJS 的稠度、柔韧性、耐久性等也有一定的调节作用; 功能性助剂是对聚合物成膜、粉料分散等起辅助改善作用的外加剂。

表 1 聚合物乳液主要技术指标

种类	固含量/%	黏度/(mPa·s)	pH	T _g /℃	MFFT/℃	平均粒度/μm
苯丙乳液	56±1	400~1800	7.0~8.5	-7	0	0.1
VAE 乳液	55±1	1500~5000	4.5~6.0	-10	0	1.5

1.2 试件制备

根据表 2 所示配合比制备 PCJS, 而后根据图 1 所示流程制备 PCJS 试件。

表 2 PCJS 配合比

聚合物乳液		水泥	滑石粉	重质碳酸钙	分散剂	消泡剂	成膜助剂	硅烷偶联剂	增塑剂
苯丙乳液	VAE 乳液								
65	35	14	13	13	1.12	0.7	6	0.7	1

注: 每份原料配比的单位可取 g 或 kg 等; 粉液比(无机粉料质量与聚合物乳液质量之比)为 0.4, 灰粉比(水泥质量与无机粉料质量之比)为 0.35。

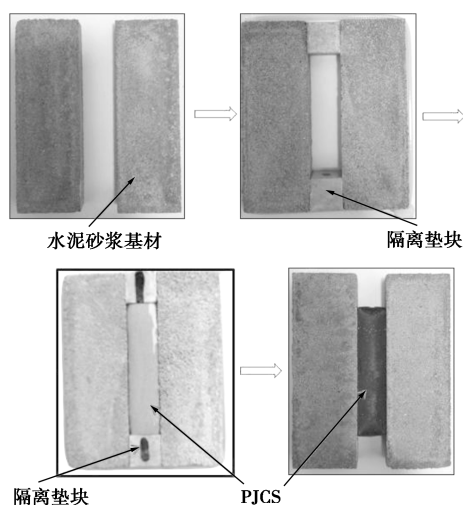


图 1 PCJS 试件的制备流程

PCJS 具体制备流程如下: ①将苯丙乳液与 VAE 乳液倒入混料机中, 搅拌 5 min, 而后加入分散剂, 搅拌均匀; ②将消泡剂和成膜助剂依次加入聚合物乳

液中, 搅拌 10 min, 制成 PCJS 液体组分; ③将无机填料加入水泥中, 搅拌均匀, 制成 PCJS 固体组分; ④将固体组分缓缓加入液体组分中, 同时缓慢搅拌, 避免固体组分被液体组分包裹成团粘附于混料机内壁或沉淀于底部, 再快速搅拌 10 min, 使固体组分彻底地均匀分散于液体组分中, 最终制成 PCJS。

PCJS 试件具体制备流程如下: ①利用制备好的水泥砂浆试块作为粘结基材, 将两块水泥砂浆基材置于实验平台; ②将隔离垫块置于水泥砂浆基材两端; ③采用挤出器将新制备的 PCJS 缓缓地注入水泥砂浆基材与隔离垫块形成的空腔内; ④标准实验条件养护 1 d 后, 卸除隔离垫块, 而后养护至 28 d, 最终制得图 1 所示 PCJS 试件。

1.3 实验方法

为研究 PCJS 的耐低温性能, 预先对 PCJS 试件进行负温作用处理: 将待测试件置于实验温度为

-20℃的高低温交变试验箱中,持续时间为1、7、15、30 d,然后取出试件,测试处理后的PCJS试件性能。参考《军用机场水泥混凝土道面接缝材料施工技术规范》和《建筑密封材料试验方法》^[16]进行定伸实验和剪切实验,均在常温环境下进行。

定伸实验如图2所示,将PCJS试件放入定伸试验模具中,拉伸PCJS,拉伸量为原始宽度的60%,然后插入相应尺寸的定位垫块,使PCJS处于定伸状态,保持24 h后检查试件定伸形态是否发生破坏。若试件未发生破坏,则取下垫块,将试件静置24 h,然后采用游标卡尺测量PCJS弹性恢复后的宽度,并按照式(1)计算PCJS的弹性恢复率。

$$R_e = [(w_1 - w_2)/(w_1 - w_0)] \times 100\% \quad (1)$$

式中: R_e 、 w_0 、 w_1 和 w_2 分别为PCJS的弹性恢复率、原始宽度、定伸时宽度及弹性恢复后的宽度。依据相关标准^[13],PCJS的弹性恢复率应大于60%。

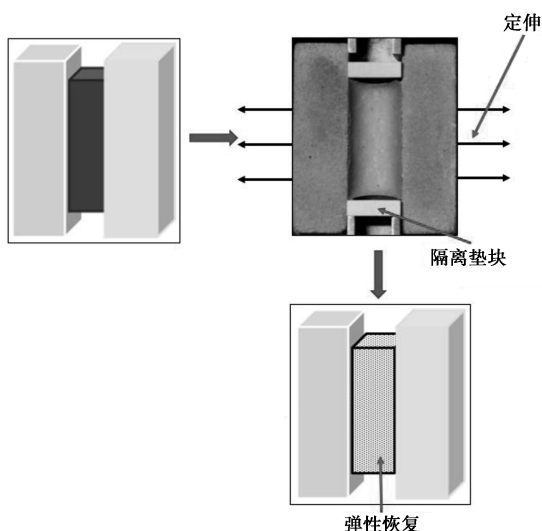


图2 定伸实验

剪切实验如图3所示,将试件装入HS-3001B型电子拉伸试验设备夹具中,采用5 mm/min的剪

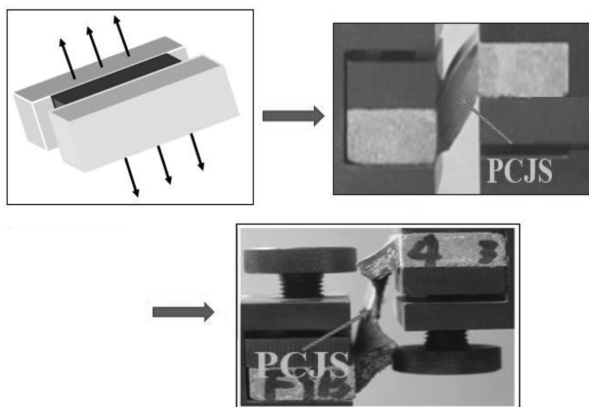


图3 剪切实验

切速度将PCJS剪切至破坏,剪切过程中相应的应力-应变数据由实验设备信息采集终端自动记录。

2 结果与分析

2.1 粘结性能

定伸形态和弹性恢复率是反应PCJS粘结性能的两个重要指标。PCJS试件在定伸状态下经-20℃环境温度作用1、7、15、30 d后均未发生内聚破坏或粘结破坏^[17],定伸形态良好。不同负温作用时间后PCJS的弹性恢复率如图4所示,从图4可以看出,经-20℃环境温度作用后,PCJS的弹性恢复率随着作用时间的延长先增大后减小。负温作用1 d后,PCJS的弹性恢复率最大,达到了75.4%,与常温时相比增大了8.9%。而后随着作用时间的延长,PCJS的弹性恢复率均较常温时小,作用7、15、30 d后弹性恢复率较常温时分别减小了0.7%、2.9%、6.8%。当环境温度由常温降低至-20℃时,由于负温环境下能量较少,聚合物分子的热运动受到抑制,因此PCJS的弹性恢复率随着作用时间的延长而不断减小。PCJS在-20℃环境下作用1 d后,于常温环境中保持定伸状态和完成弹性恢复,在此过程中PCJS经历“冷热交替”,导致其柔性增大,进而使得负温作用1 d后,PCJS的弹性恢复率较常温时有所增大。实验表明,经-20℃环境温度作用后,PCJS的弹性恢复率均大于60%,满足其粘结性能要求。

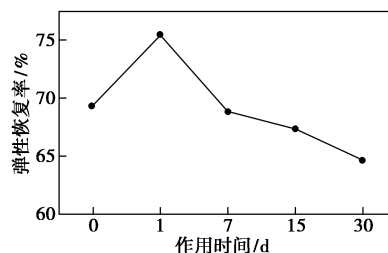


图4 不同负温作用时间后PCJS的弹性恢复率

2.2 力学性能

PCJS的力学性能由剪切强度、剪切应变和剪切韧度来表征。不同负温作用时间后PCJS的剪切强度、剪切应变和剪切韧度分别如图5、图6所示。从图5可以看出,随着作用时间的延长,PCJS的剪切强度不断增大,剪切应变不断减小。负温作用30 d后,PCJS的剪切强度较常温时增大了81.5%,剪切应变减小了47.1%。从图6中可以看出,PCJS的剪切韧度随作用时间的延长先增大后减小,负温作用1 d后,PCJS的剪切韧度最大,为2.7 J/cm³,较常温

时增大了 62.7%；而后随着作用时间的延长,PCJS 的剪切韧度有所减小,但均较常温时大,负温作用 7、15、30 d 后,PCJS 的剪切韧度较常温时分别增大了 57.8%、43.8%、37.0%。负温环境下,聚合物大分子链处于“冷冻凝结”状态,分子间的作用力增强,柔韧性降低,因此 PCJS 剪切强度明显增大,剪切应变显著降低。剪切韧度是表征 PCJS 在剪切荷载作用下强度和变形的综合指标,因此在剪切强度和剪切应变两方面的共同影响下,剪切韧度随作用时间的延长呈现出先增大后减小的趋势。

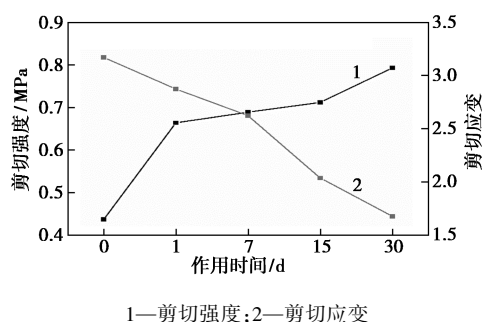


图 5 不同负温作用时间后 PCJS 的剪切强度和剪切应变

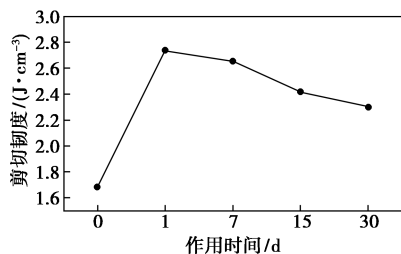


图 6 不同负温作用时间后 PCJS 的剪切韧度

2.3 变形性能

断裂伸长率是 PCJS 在剪切荷载作用下破坏时的位移值与试件原缝宽的比值,可用来表征 PCJS 的变形性能。不同负温作用时间后 PCJS 的断裂伸长率如图 7 所示,可以看出,随着作用时间的延长,PCJS 的断裂伸率先增大后减小。负温作用 1 d 后,PCJS 的断裂伸长率最大,为 571.0%,较常温时

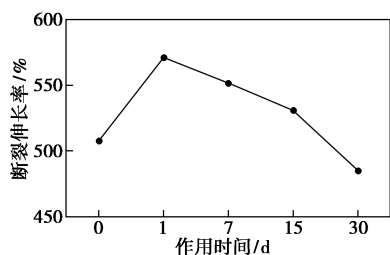


图 7 不同负温作用时间后 PCJS 的断裂伸长率

增大了 12.5%；负温作用 15 d 后 PCJS 的断裂伸长率较常温时增大了 4.5%；负温作用 30 d 后 PCJS 的断裂伸长率较常温时减小了 4.5%。由于负温环境下分子间作用力加强,外部荷载难以通过聚合物分子链段的运动伸展得以耗散,因而负温作用后 PCJS 的断裂伸长率有所增大。当负温作用时间过长时,PCJS 内部内聚能量过大,易产生“脆性断裂”,故断裂伸长率减小。综上,负温作用时间较短时 PCJS 的变形性能有所增大,负温作用时间较长时 PCJS 的变形性能易劣化。

2.4 机理分析

外荷载作用下聚合物大分子链的运动变形及构象改变是导致 PCJS 一系列性能变化的主要因素^[18]。当温度降至 -20°C 时,聚合物分子热运动能量很低,不足以克服主链内旋转位垒,导致链段运动基本处于“冻结”状态,因而此时在外荷载作用下只能使大分子链的侧基、链节、键长和键角等产生微小的改变^[19],在宏观上则表现为 PCJS 柔性降低,外荷载去除后的弹性恢复能力减弱,进而导致 PCJS 的弹性恢复率减小。同时,由于负温环境下分子间作用力加强,外部荷载难以通过分子链段的运动伸展得以耗散平衡,因而外荷作用能在 PCJS 内部不断积累增大,导致 PCJS 在宏观上表现为内聚强度迅速增大,力学性能得到优化。当外荷作用能积聚过多时,PCJS 易发生“脆性断裂”,变形性能将会劣化。

3 PCJS 微结构生成模型

PCJS 的成型是一个综合了水泥水化硬化、聚合物脱水成膜以及一系列无机组分与有机组分间物化反应的复杂过程。现有研究已提出了多种模型^[20-22]用以描述这一过程中微结构的生成与演变,如 Ohama 模型、Konietzko 模型、Puterman 与 Malorny 模型、B-O-V 模型等。然而,已有模型针对的聚合物水泥复合材料主要为聚合物改性混凝土或聚合物改性砂浆,这类材料的基本微观构型及原料组成与 PCJS 相比尚存在一定差别,因此,尽管部分所涉及的物化反应过程及机理一致,但是已有模型并不完全适用于描述填缝料的微结构生成过程。鉴于此,本文在已有模型的基础上,结合 PCJS 自身成型特点以及相应的微观形貌观测结果(如图 8 所示),提出了一种适用于 PCJS 的微结构生成模型。

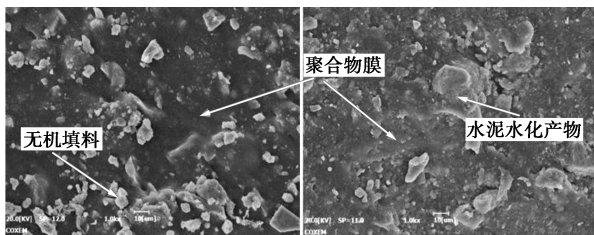


图8 PCJS的微观形貌

PCJS的微观反应过程示意图如图9所示,微结构生成模型如下:

(1)第一阶段:无机粉料和功能性助剂加入聚合物乳液之前,聚合物乳液颗粒均匀分散于水中,如图9(a)所示;各组分加入之后,无机粉料在消泡剂、分散剂等助剂的辅助作用下解聚分散于聚合物乳液中,水泥遇水立即发生水化反应并产生少量的水化硅酸钙和氢氧化钙等水化产物,聚合物乳液颗粒在成膜助剂、增塑剂等助剂的作用下,塑性流动和可移动性不断加强,加之水泥水化耗水和聚合物乳液挥发失水,聚合物乳液颗粒在失水引起的毛细压力作用下逐渐相互靠近并大量沉积吸附于水泥水化产物与未水化水泥颗粒及无机粉料的表面,如图9(b)所示。

(2)第二阶段:随着水泥水化反应吸水和聚合物乳液挥发失水的进一步加剧,聚合物乳液颗粒逐渐变形靠近并紧密接触,如图9(c)所示;当聚合物乳液中水分基本耗尽时,乳液颗粒膜开始破裂,相邻的聚合物乳液颗粒逐渐融合并开始成膜,不断生成的水泥水化产物中一部分与聚合物分子链上的活性基团发生交联反应形成致密的复合结构,剩余的大部分水泥水化产物和未水化的水泥颗粒及其他无机填料被包裹于聚合物膜中,如图9(d)所示。

(3)第三阶段:由于水泥水化程度的不断加深,体系中剩余的水分被不断吸收作为水化产物的化学结合水,聚合物乳液颗粒完全融合形成连续完整的聚合物网络膜结构,逐步硬化的水泥水化产物和少数未水化的水泥颗粒以及其他无机填料在一定区域内形成局部有序的硅酸盐网架为主体的骨架结构;此外,由于水分的蒸发、挥发性助剂(消泡剂、成膜助剂、增塑剂等)的挥发逸失及封闭气泡等因素的影响,使得体系中存在一定数量的具有不同孔径尺寸的孔隙。因此,PCJS的微观结构是以聚合物乳液连续网络膜结构为基体,水泥及其水泥水化产物与其他无机填料镶嵌其间,如图9(e)所示。

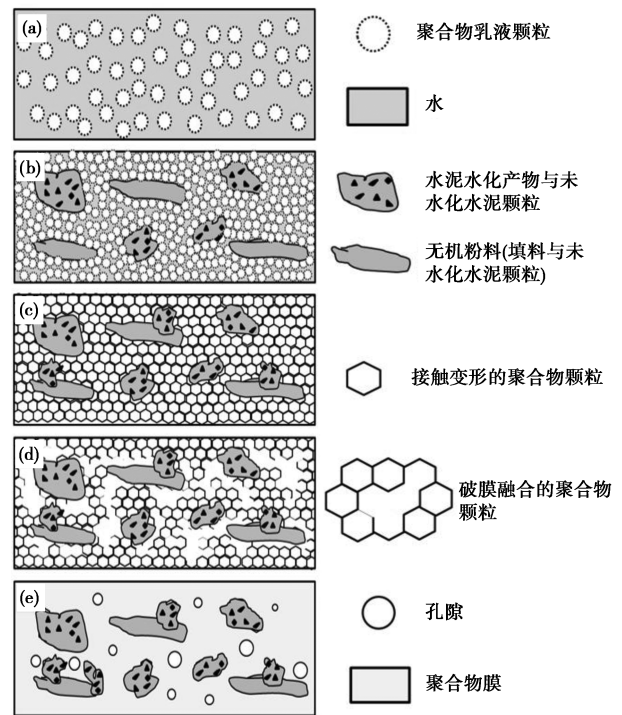


图9 PCJS微观反应过程示意图

4 结论

(1)负温环境下,PCJS的定伸形态良好,未发生破坏;长时间负温弹性恢复率较常温时有所减小,但均大于60%。粘结性能良好。

(2)负温作用后,PCJS的剪切强度、剪切韧度增大,剪切应变减小,剪切力学性能得到优化。

(3)随着负温作用时间的延长,PCJS的断裂伸长率先增大后减小;负温作用时间过长时,变形性能劣化。

(4)PCJS的微观结构是以聚合物乳液连续网络膜结构为基体,水泥及其水泥水化产物与其他无机填料镶嵌其间。

参考文献

- [1] 袁捷,刘文博.民用机场水泥混凝土道面接缝嵌缝材料性能指标分析[J].公路交通科技,2016,33(9):7-13.
- [2] Gao W T, Bie M Y, Liu F, *et al.* Self-healable and reprocessable polysulfide sealants prepared from liquid polysulfide oligomer and epoxy resin[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2017, 9(18): 15798-15808.
- [3] Bruno D L, Fabio B, Giandomenico T, *et al.* Experimental investigation on the influence of silicone sealant on the seismic behaviour of precast façades[J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2017, 15(4): 1771-1787.
- [4] 张献民,刘小兰,张子文.基于振动特性的机场刚性道面传荷性

- 能[J].北京航空航天大学学报,2018,44(9):4-13.
- [5] 韩思聪,白二雷,郭创,等.苯丙乳液基水泥复合道面填缝料力学性能研究[J].硅酸盐通报,2018,37(11):31-37,42.
- [6] 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影响[J].硅酸盐通报,2017,36(8):2576-2582.
- [7] Meng B X, Xu J Y, Gu C, *et al.* Effect of VAE latex powder addition on tensile and shear properties of styrene-acrylate based cement composite joint compound [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, 242(2): 1-8.
- [8] Wang T J, Xu J Y, Zhu C J, *et al.* Comparative study on the effects of various modified admixtures on the mechanical properties of styrene-acrylic emulsion-based cement composite materials [J]. Materials, 2020, 13(1): 1-19.
- [9] 彭光,许金余,任韦波.硅烷偶联剂改性苯丙乳液水泥复合材料的力学性能及孔隙结构[J].硅酸盐通报,2018,37(10):3076-3081.
- [10] Bai E L, Liu G J, Xu J Y, *et al.* Tensile and fixed elongation properties of polymer-based cement flexible composite under water/corrosive solution environment [J]. Materials, 2020, 13(9): 1-16.
- [11] Lou C X, Xu J Y, Liu S L, *et al.* Effects of external environments on the fixed elongation and tensile properties of the VAE emulsion-cement composite joint sealant [J]. Materials, 2020, 13(14): 1-20.
- [12] 刘高杰,白二雷,许金余,等.不同粉液比苯丙乳液水泥复合填缝料剪切性能试验研究[J].铁道科学与工程学报,2020,17(3):615-622.
- [13] 王志航,许金余,张彤,等.碳纤维改性聚合物水泥复合填缝材料拉伸力学性能研究[J/OL].化工新型材料,2021,(12):1-10 [2021-04-07]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2357.TQ.20210302.1340.004.html>.
- [14] 王志航,许金余,孟欣,等.高温环境下聚合物水泥复合填缝料性能研究[J/OL].化工新型材料,2022,(3):1-13 [2021-04-07]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2357.TQ.20210302.1021.002.html>.
- [15] Wang Zhihang, Xu Jinyu, Meng Xin, *et al.* Effect of VAE emulsion and inorganic fillers on the properties of styrene-acrylic emulsion based cement composite joint sealant [J]. Construction and Building Materials, 2021, 286: 1-15.
- [16] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.GB/T 13477—2002 建筑密封材料试验方法[S].北京:中国质检出版社,2002.
- [17] 王腾蛟,许金余,朱从进,等.灰粉比对苯丙乳液基水泥复合材料静态力学性能及破坏形态的影响[J].复合材料学报,2020,37(9):2324-2335.
- [18] 何曼君,张红东,陈维孝,等.高分子物理[M].上海:复旦大学出版社,2015.
- [19] 王培名,赵国荣,张国防.聚合物水泥混凝土的微观结构的研究进展[J].硅酸盐学报,2014,42(5):653-660.
- [20] 徐峰,刘林军.聚合物水泥基建材与应用[M].北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [21] Ohama Y. Principle of latex modification and some typical properties of latex-modified mortars and concretes [J]. ACI Materials Journal, 1987, 84(6): 511-518.
- [22] Wang Zhihang, Xu Jinyu, Meng Xin, *et al.* Effect of ultraviolet aging on the bonding and tensile properties of polymer-cement composite [J]. Journal of Renewable Materials, 2021, 9(6): 1157-1168. ■

(上接第 172 页)

- [5] 刘玉凤,杨利芳,焦倩.煤气脱硫工艺的发展现状[J].广州化工,2020,48(10):24-25,60.
- [6] Valle-Zermeño R D, Niubó M, Formosa J, *et al.* Synergistic effect of the parameters affecting wet flue gas desulfurization using magnesium oxides by-products [J]. Chemical Engineering Journal, 2015, 262: 268-277.
- [7] 王茜雯,王磊磊,吴昊,等.脱硫净烟气降温冷凝促进 WFGD 系统后次生细颗粒物的脱除[J].中南大学学报(自然科学版),2021,52(1):303-312.
- [8] 段珍华,黄冬丽,肖建庄,等.石材废弃物的处置利用现状及对策探究[J].硅酸盐通报,2020,39(8):2441-2448.
- [9] 雷鸣.区域矿业水污染防治与水循环经济发展——昆明“牛妈河”事件的启示[J].环境保护,2013,41(16):56-58.
- [10] 陈高丰,高建明,赵亚松.再生黏土砖粉-石灰石粉-水泥胶凝材料性能研究[J].东南大学学报(自然科学版),2020,50(5):858-865.
- [11] 王建昭,刘广录,卢金山,等.大理石废料制备人造石的研究[J].科技风,2017,(9):155-157.
- [12] 蔡娜,王毓华,李旭东,等.广东某石材加工废料综合回收试验研究[J].矿产综合利用,2016,(3):88-92.
- [13] Yang B, Yin W Z, Zhu Z L, *et al.* Differential adsorption of hydrolytic polymaleic anhydride as an eco-friendly depressant for the selective flotation of apatite from dolomite [J]. Separation and Purification Technology, 2020, 256: 117.
- [14] 国家环境保护总局.HJ/T 56—2000 CN 固定污染源排气中二氧化硫的测定-碘量法[S].北京:中国标准出版社,2000:1-4.
- [15] 冯宇,李阳,卢建军,等.高温煤气脱硫剂发展现状研究[J].天然气化工(C1 化学与化工),2018,43(4):119-125.
- [16] Yin L, Guo J. Study on wet FGD limestone quality [A]. 2011 Third International Conference on Measuring Technology and Mechatronics [C]. IEEE Computer Society, 2011.
- [17] Emre Altun N. Assessment of marble waste utilization as an alternative sorbent to limestone for SO₂ control [J]. Fuel Processing Technology, 2014, 128(2): 461-470.
- [18] 侯大伟,潘丹萍,周心澄,等.石灰石-石膏法脱硫过程中浆液雾化夹带与细颗粒排放的关系[J].化工学报,2018,69(4):1714-1722.
- [19] 印传磊,杨丽梅,田春阳,等.KR 铁水脱硫剂逸散及搅拌器黏渣分析[J].钢铁,2020,55(1):34-37,71.
- [20] 马双忱,华继洲,苟发全,等.白泥脱硫浆液与石膏理化特性[J].化工进展,2016,35(S2):381-388. ■