

文章编号:1007-9629(2025)01-0065-07

有机硅单体对聚合物水泥涂料相容性与抗渗性的影响

苏延俐^{1,2}, 姜东兵^{1,2}, 李成铭³, 梁辰^{1,2}, 赵丕琪^{1,2,*}

(1. 济南大学 山东省建筑材料制备与测试技术重点实验室, 山东 济南 250022; 2. 济南大学 材料科学与工程学院, 山东 济南 250022; 3. 中建八局新型建造有限公司山东分公司, 山东 济南 250011)

摘要:在优选聚合物水泥涂料乳液配比的基础上,通过钙离子稳定性、筛上残余率和 Zeta 电位等探究了有机硅单体对聚合物水泥涂料相容性与抗渗性的影响,并结合流变测试阐明了有机硅对乳液稳定性的影响机制.结果表明:有机硅在乳液改性过程中使分子链缠绕絮凝增加,Zeta 电位下降;当有机硅掺量为 2% 时,聚合物水泥涂料性能最佳,其防腐抗渗性能得到显著提升;与市售乳液相比,有机硅聚合物水泥涂料的吸水率、电通量分别降低了 27.8%、35.1%.

关键词:有机硅单体;聚合物乳液;稳定性;涂料;抗渗性能

中图分类号:TQ172

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2025.01.009

Effect of Organosilicon Monomer on Compatibility and Impermeability of Polymer-Modified Cementitious Coating

SU Yanli^{1,2}, JIANG Dongbing^{1,2}, LI Chengming³, LIANG Chen^{1,2}, ZHAO Piqi^{1,2,*}

(1. Shandong Provincial Key Lab of Preparation and Measurement of Building Materials, University of Jinan, Jinan 250022, China; 2. School of Materials Science and Engineering, University of Jinan, Jinan 250022, China; 3. China Construction Eighth Bureau New Construction Engineering Co., Ltd., Shandong Branch, Jinan 250011, China.)

Abstract: Based on the optimized ratio of polymer-modified cementitious coating emulsion, the effect of organosilicon monomer on the compatibility and impermeability of polymer-modified cementitious coating was investigated through calcium ion stability, sieve residue rate, and Zeta potential. In addition, the mechanism of organosilicon monomer's impact on emulsion stability was elucidated in combination with rheological test. The results show that during the modification process of emulsions with organosilicon, molecular chain entanglement flocculation increased, leading to a decrease in Zeta potential. When the dosage of organosilicon is 2%, the polymer-modified cementitious coating exhibits optimal performance, with significantly enhanced anti-corrosion and impermeability properties. Compared to commercially available emulsions, the organosilicone polymer-modified cementitious coating exhibits 27.8%, 35.1% reduction in water absorption ratio and electrical flux, respectively.

Key words: organosilicon monomer; polymer emulsion; stability; coating; impermeability

聚合物水泥涂料广泛应用于混凝土表面防护, 泥涂料主要成膜物质的聚合物乳液,主链上的亲水性基团导致其乳胶膜耐水性较差,影响其服役寿命[1-2].然而,作为聚合物水

收稿日期:2024-01-24; 修订日期:2024-04-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52172021, U22A20126);“十四五”国家重点研发计划项目(2021YFB3802002);山东省优秀青年自然科学基金资助项目(ZR2023YQ041);山东省自然科学基金资助项目(ZR2021ME123);泰山学者计划项目;山东省高校青年科研人员科技创新支持计划项目(2019KJA017)

第一作者:苏延俐(2000—),男,四川德阳人,济南大学硕士生. E-mail: suyanlis@163.com

通讯作者:赵丕琪(1987—),男,山东青岛人,济南大学教授,硕士生导师,博士. E-mail: mse_zhaopq@ujn.edu.cn

命^[3-4]。目前,研究者通过在丙烯酸酯主链中引入含有一CH₃等低表面能基团的有机硅单体,制备了有机硅改性聚丙烯酸酯乳液,改善了聚合物乳液的耐水性能^[5],但有机硅改性聚合物乳液与水泥的相容性往往被人忽略。

聚合物水泥涂料的相容性是指在聚合物成膜和水泥水化的相互作用下,聚合物与水泥二者形成均匀致密膜的能力。考虑有机硅作为聚合物乳液改性的关键成分,其疏水性和易水解交联的特性对乳液的稳定性带来了显著影响。特别是在高离子浓度、高pH值以及液相快速失水的水泥水化环境下,聚合物乳液的亚稳态体系稳定性更是受到显著挑战^[6]。因此,本文聚焦于有机硅改性聚合物乳液与水泥的相容性,研究了有机硅单体对聚合物水泥涂料相容性与抗渗性的影响,为提升聚合物水泥涂料的成膜性能及防腐抗渗能力提供理论基础与技术指导。

1 试验

1.1 原材料

制备乳液的主要原材料为丙烯酸丁酯(BA)、甲基丙烯酸甲酯(MMA)、丙烯酸(AA)、过硫酸铵(APS)、十二烷基硫酸钠(SDS)、壬基酚聚氧乙烯-10(OP-10)、碳酸氢钠、 γ -甲基丙烯酰氧基丙基三甲氧基硅烷(KH570)和氨水,均购自于国药集团化学试剂有限公司,且所有化学试剂在使用之前均未经过任何其他处理。制备涂料的原材料为:曲阜中联水泥厂生产的42.5型硫铝酸盐水泥,其化学组成(质量分数,文中涉及的掺量、比值等均为质量分数或质量比)见表1;填料选用滑石粉,购自海城市诚信微细目石粉厂,粒径为44 μm ;外加剂为促进涂料中固体颗粒均匀分散的分散剂六偏硫酸钠、用于消除涂料混合过程中产生孔洞和缺陷的消泡剂MO 2190AC以及用于改善涂料成膜性能的成膜助剂2,2,4-三甲基-1,3-戊二醇单异丁酸酯,分别购自国药集团化学试剂有限公司、德国巴斯夫公司以及美国伊士顿化学公司;去离子水为实验室自制。

表1 硫铝酸盐水泥的化学组成

Table 1 Chemical composition(by mass) of sulphoaluminate cement

Unit: %							
CaO	Al ₂ O ₃	SO ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	MgO	Other	IL
50.23	19.49	14.72	8.57	2.13	1.70	2.43	0.73

1.2 乳液的制备工艺及测试

基于前期试验所确定的最优制备参数,BA与MMA的质量比为60:40,引发剂的用量(以BA与

MMA总质量计)为0.4%,乳化剂SDS与OP-10的质量比为2:3,乳化剂用量(以单体的总质量计)为4.0%。采用半连续预乳化聚合^[7]合成有机硅改性聚丙烯酸酯乳液,其制备工艺为:(1)将一部分乳化剂、丙烯酸、甲基丙烯酸甲酯单体和去离子水混合,在40 $^{\circ}\text{C}$ 下搅拌30 min,进行预乳化处理,制得预乳化液;(2)将另一部分乳化剂、1/10的过硫酸铵溶液、氨水和去离子水单独混合,置于三口烧瓶中加热至75 $^{\circ}\text{C}$;(3)将上述预乳化液的1/3匀速加入三口烧瓶的混合溶液中,直至混合液变为蓝色;(4)在2 h内匀速加入剩余的预乳化液和过硫酸铵以及有机硅单体KH570滴加完毕后保温2 h;(5)当水浴温度降至室温时,用氨水调节乳液的pH值,通过75 μm 筛网过滤,得到有机硅改性聚丙烯酸酯乳液。设置丙烯酸单体的掺量 w_{AA} 为0%、1%、2%、3%,有机硅单体KH570的掺量 w_{KH} 为0%、1%、2%、3%、4%。

根据GB/T 16777—2008《建筑防水涂料试验方法》测试乳液的固含量S。先将质量为 m_1 的乳液倒入预先干燥的培养皿中,再将其放入100 $^{\circ}\text{C}$ 的烘箱内干燥直至质量不变,最后将培养皿取出并置于室温下冷却,测量其质量 m_2 。乳液固含量的计算式为:

$$S = \frac{m_2}{m_1} \times 100\% \quad (1)$$

乳液凝胶率A的测试方法为:聚合完成后,从反应器和滤网中收集凝聚物,将其在100 $^{\circ}\text{C}$ 烘箱中干燥至质量不再变化;计算凝聚物质量 m_3 与乳液聚合所用单体总质量 m 的比值,即为乳液的凝胶率A。

聚合物乳胶膜吸水率W的测试方法为:将干燥的聚合物乳胶膜裁剪成20 mm $\times$ 20 mm的试样,称量其质量并记为 m_0 ;再将试样浸水24 h后,吸去表面水分,称量其质量并记为 m_n 。吸水率计算式为:

$$W = \frac{m_n - m_0}{m_0} \times 100\% \quad (2)$$

使用英国马尔文公司生产的Zetasizer Nano ZSP测定乳液的Zeta电位,为确保测试数据稳定准确,测试前用去离子水将乳液稀释50倍。

1.3 聚合物水泥涂料的制备及测试

聚合物水泥涂料的制备过程为:首先将粉料(硫铝酸盐水泥、滑石粉、分散剂)和液料(乳液、成膜助剂、消泡剂、去离子水)以300 r/min搅拌15 min,确保混合均匀;接着将粉料加入液料,依次以600 r/min快速搅拌20 min、300 r/min慢速搅拌10 min,静置1~3 min以消除气泡;然后将得到的料浆倒入350.0 mm $\times$ 320.0 mm $\times$ 1.5 mm的模具中,在(23 $\pm$ 2) $^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度RH为(50 $\pm$ 10)%的条件下静置

96 h;最后,脱模,将试件反面朝上置于 $(40\pm 2)^{\circ}\text{C}$ 的干燥箱中48 h,冷却至室温,即得最终产品。

参考 SHT0099.6—1991《乳化沥青水泥拌合性测定法》测试筛上残余率 R 。先将 $100\ \mu\text{m}$ 的方孔筛干燥称重,质量记为 m_5 ;再按照0.1的聚灰比将质量为 m_7 的料浆搅拌均匀并倒入筛中;然后用水冲洗直至筛中流水变清;最后将带有残留物的筛子在 100°C 下烘干,质量记为 m_6 。筛上残余率 R 的计算式为:

$$R = \frac{m_6 - m_5}{m_7} \times 100\% \quad (3)$$

参考 GB/T 20623—2006《建筑涂料用乳液》测试乳液钙离子稳定性。

采用 QUANTA FEG 250 FEI 型场发射扫描电镜(SEM)观察样品的微观形貌,工作电压为 $10\ \text{kV}$ 。测试前将样品在真空干燥箱 60°C 下烘干至恒重后,切成 $3\ \text{mm}$ 厚的薄片,使用导电胶将切割后的试件粘贴在样品台上,并进行真空喷金处理。

根据 GB/T 50082—2024《混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》测试氯离子侵蚀性能。将搅拌好的聚合物水泥涂料分3次涂布在砂浆试样底面,控制涂层厚度为 $1.5\ \text{mm}$,涂布完成后在室内自然条件下养护7 d。用电通量法来评估涂层的抗氯离子侵蚀性能。

采用上海雷韵试验仪器制造有限公司的DTS-III型不透水仪,并根据 GB/T 16777—2008《建筑防水涂料试验方法》测试透水性,透水压力维持在 $0.3\ \text{MPa}$ 。

采用美国赛默飞公司的HAAKE MARS 40型旋转流变仪测定涂料料浆的流变性能。测试程序为: $0\sim 30\ \text{s}$ 以 $100\ \text{s}^{-1}$ 的剪切速率进行预剪切,静置 $20\ \text{s}$;剪切速率在 $50\sim 110\ \text{s}$ 内从 $0\ \text{s}^{-1}$ 增加至 $150\ \text{s}^{-1}$,在 $110\sim 170\ \text{s}$ 内从 $150\ \text{s}^{-1}$ 降低至 $0\ \text{s}^{-1}$ 。

2 结果与讨论

2.1 丙烯酸单体对乳液性能的影响

丙烯酸单体作为水溶性单体在调节乳液稳定性方面具有关键作用。前人研究表明水溶性单体有助于增强乳化剂的乳化效果,加强乳化剂与乳胶颗粒之间的相互作用^[8],从而有效提升乳液的稳定性。丙烯酸单体对乳液性能的影响见表2。由表2可见:乳液均呈现乳白色泛蓝,且具有良好的成膜性能;随着丙烯酸单体掺量的增大,乳液的凝胶率显著降低,可见聚丙烯酸酯乳液的聚合稳定性得到了显著提升;聚丙烯酸酯乳液成膜后的吸水率随着丙烯酸单体掺量的增加而提高,这是由于丙烯酸单体具有较强的亲水性。

筛上残余率与钙离子稳定性可以对聚合物水泥涂料浆体内部颗粒的团聚行为进行表征,以此量化

表2 丙烯酸单体对乳液性能的影响
Table 2 Influence of acrylic acid monomer on properties of emulsions

$w_{\text{AA}}/\%$	Appearance	W/%	S/%	A/%	Film formation performance
0	Milky white blue	4.1	41.80	1.40	Good
1	Milky white blue	5.3	43.60	0.50	Good
2	Milky white blue	5.7	45.20	0.20	Good
3	Milky white blue	6.3	46.00	0.20	Good

乳液与水泥的相容性。丙烯酸单体对乳液与水泥相容性的影响见图1。由图1可见,随着丙烯酸单体掺量的增加,筛上残余率呈现下降的趋势,钙离子稳定性呈现上升的趋势。这主要归因于丙烯酸单体的引入提升了乳胶颗粒之间的稳定性,乳液能够稳定地存在于水泥浆体中。水泥在水化过程中,会释放出大量离子,丙烯酸单体增加了乳胶颗粒水合层的厚度,水合层减弱了钙离子对乳胶颗粒表面双电层的压缩作用,进而提高了乳液对钙离子的屏蔽作用^[9]。

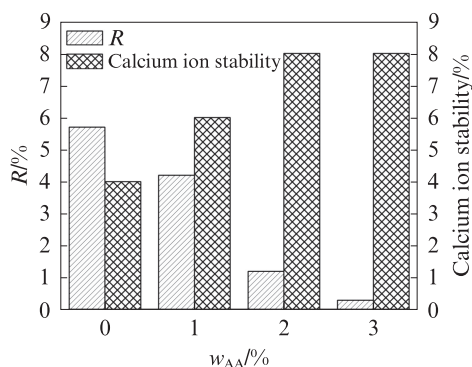


图1 丙烯酸单体对乳液与水泥相容性的影响
Fig. 1 Influence of acrylic acid monomer on compatibility between emulsion and cement

丙烯酸单体对乳液Zeta电位的影响见图2。由图2可见,随着丙烯酸单体掺量的增大,乳液的Zeta电位呈现先上升后平缓的趋势。这是因为丙烯酸单体的亲水 $-\text{COO}^-$ 基团暴露于乳胶颗粒表面,乳胶颗粒表面呈电负性,同种电荷的排斥效应使乳化剂呈电负性的亲水基团迅速倾向水相,疏水基团则倾向油相,使乳胶颗粒表面带负电荷,而这些负电荷可以与周围的水分子和离子相互作用,形成双电层结构,最终导致乳液的Zeta电位为负值。此外,同种电荷的排斥作用增加了乳化剂在乳胶颗粒表面的吸附量,乳胶颗粒表面电负性增强,从而使Zeta电位逐渐升高。然而乳化剂的吸附量是有限的,当丙烯酸单体含量达到一定程度后,乳化剂在乳胶颗粒表面的吸附趋于饱和,故Zeta电位不再显著增大。

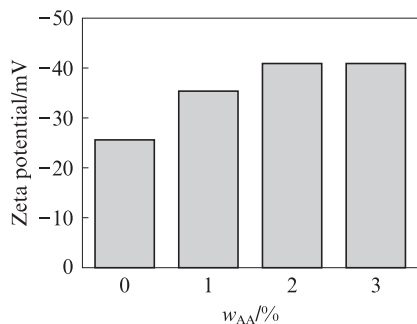


图2 丙烯酸单体对乳液 Zeta 电位的影响

Fig. 2 Influence of acrylic acid monomer on Zeta potential of emulsions

2.2 有机硅单体对乳液性能的影响

有机硅单体对乳液性能的影响见表3。由表3可见:当有机硅单体掺量较低($w_{KH} \leq 2\%$)时,乳液外观不受其影响,均呈现乳白色泛蓝,随着有机硅单体掺量的增大,乳液外观发生了变化;有机硅单体的加入显著降低了乳液的吸水率,改善了其吸水性;当有机硅掺量从1%增加至3%时,乳液的吸水率分别降低了16.2%、42.6%、52.9%,这是因为有机硅中憎水基团—CH₃接枝在乳胶颗粒上;随着有机硅单体掺量的增大,乳液固含量降低,凝胶率逐渐增大;当 $w_{KH}=4\%$ 时,乳液性能较差,表面出现絮凝物,涂膜发生开裂。

表3 有机硅单体对乳液性能的影响
Table 3 Influence of organosilicon monomer on properties of emulsions

$w_{KH}/\%$	Appearance	W/%	S/%	A/%	Film formation performance
0	Milky white blue	6.8	42.10	0.41	Good
1	Milky white blue	5.7	39.56	0.47	Good
2	Milky white blue	3.9	40.05	1.27	Good
3	Milky white	3.2	38.39	5.60	Good
4	Flocculation				Cracking

有机硅单体对乳液与水泥相容性的影响见图3。由图3可见:当 $w_{KH}=2\%$ 时,筛上残余率较低,钙离子稳定性较高,分别为1.7%和7.0%;随着有机硅单体掺量的增大,有机硅单体发生水解和交联,导致聚合过程中凝聚物大量生成,进而影响体系的整体稳定性,使筛上残余率上升;同时过多的有机硅单体易产生分子链间的缠绕,降低了有机硅单体和水溶性单体对聚合物的接枝效率,使得乳液的水合层厚度降低,导致乳液在水泥体系中对离子的屏蔽性下降,乳液的钙离子稳定性下降。

有机硅单体对乳液 Zeta 电位的影响见图4。由图4可见:当 $w_{KH}=2\%$ 时,乳液 Zeta 电位的绝对值由

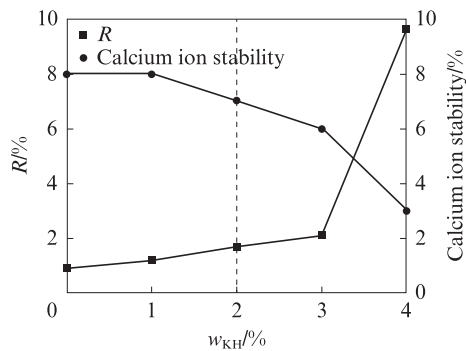


图3 有机硅单体对乳液与水泥相容性的影响

Fig. 3 Influence of organosilicon monomer on compatibility between emulsion and cement

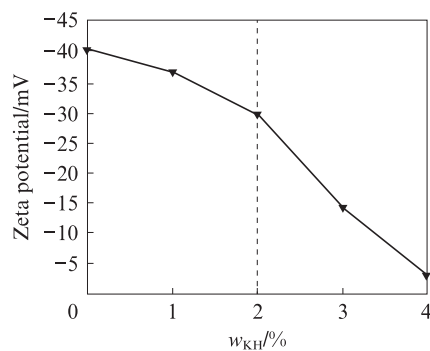


图4 有机硅单体对乳液 Zeta 电位的影响

Fig. 4 Influence of organosilicon monomer on Zeta potential of emulsions

40.7 mV($w_{KH}=0\%$)下降至31.3 mV;继续增大有机硅单体的掺量,乳液 Zeta 电位的绝对值继续下降,最终降低至7.8 mV($w_{KH}=4\%$)。为了保持乳液体系的静电稳定,通常需要超过30 mV的电势,而在5~15 mV之间会导致聚合物乳液稳定性下降,产生絮凝^[10]。

不同有机硅掺量下聚合物水泥涂料的 SEM 照片见图5。由图5可见:当 $w_{KH}=2\%$ 时,聚合物交联程度较高,在水泥水化产物(如钙矾石)表面形成了良好的包裹,聚合物与水泥结构之间较为致密,因此整体成膜性较好,此时有机硅单体的掺量较为适宜;当 $w_{KH}=4\%$ 时,聚合物的交联程度有所下降,在微观层面产生了缺陷,主要体现为断裂和空洞的形成,这种结构缺陷影响了聚合物的完整覆盖,减弱了聚合物与水泥的整体性,导致涂料的成膜性能下降,表明此时有机硅单体的掺量过高。

不同有机硅掺量下聚合物水泥涂料的成膜状态见图6。由图6可见:当 $w_{KH}=2\%$ 时,涂层外观致密、完整性较好;当 $w_{KH}=4\%$ 时,涂层开裂严重。综上,有机硅单体掺量为2%时为最佳掺量。

2.3 有机硅单体对聚合物水泥涂料流变性能的影响

流变学是研究物质微观流动性的科学,能反映聚合物水泥涂料的颗粒流动状态和微观结构发

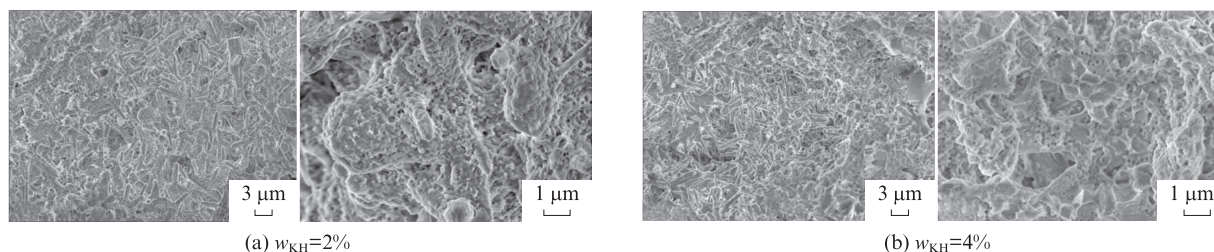


图5 不同有机硅单体掺量下聚合物水泥涂料的SEM照片

Fig. 5 SEM images of polymer-modified cementitious coating with different organosilicon monomer dosages

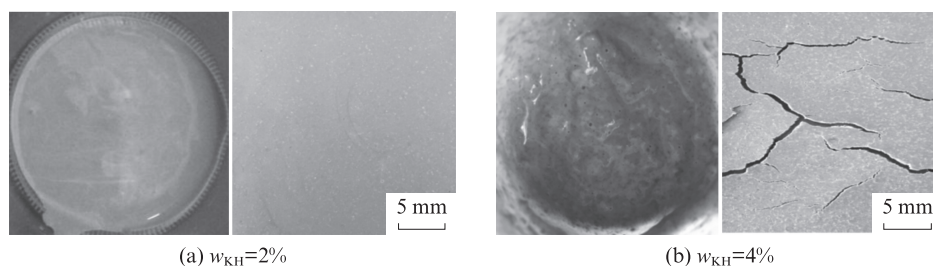


图6 不同有机硅单体掺量下聚合物水泥涂料的成膜状态

Fig. 6 Film formation states of polymer-modified cementitious coating with different organosilicon monomer dosages

展^[11-12]. 基于宾汉姆模型^[13], 通过对剪切应力曲线进行线性拟合, 可以得到聚合物水泥涂料浆体的屈服应力(截距)和塑性黏度(斜率). 有机硅单体掺量对聚合物水泥涂料浆体流变性能的影响见图7. 由图7可见: 所有有机硅单体掺量下聚合物水泥涂料浆体均呈现出剪切变稀的现象, 符合非牛顿流体特征^[11]; 随着有机硅单体掺量的增加, 聚合物水泥涂料浆体的表观黏度呈增大的趋势; 聚合物水泥涂料浆体的剪切应力也随有机硅单体掺量增大呈增大的趋势, 剪切应力在有机硅掺量2%~3%范围内的增幅尤为显著; 当 $w_{KH}=2\%$ 时, 乳液能够有效包裹

水泥颗粒, 使得水泥颗粒表面的润滑度增加, 剪切过程中所需的应力降低, 表现为较低的屈服应力和塑性黏度; 同时, 乳液颗粒之间能够有效交联成膜, 聚合物水泥涂料的成膜性能较好. 在与水泥混合的过程中, 乳液早期破乳现象导致水泥与乳液之间的包裹效果变差, 水泥颗粒周围的凝胶率增加, 内部粗糙度提高, 屈服应力和塑性黏度也随之增加. 特别是当 $w_{KH}=4\%$ 时, 聚合物乳液在水泥颗粒周围的破乳形成了大量不规则和不连续的凝胶, 降低了乳液的交联能力, 进而使得聚合物水泥涂料难以形成连续膜.

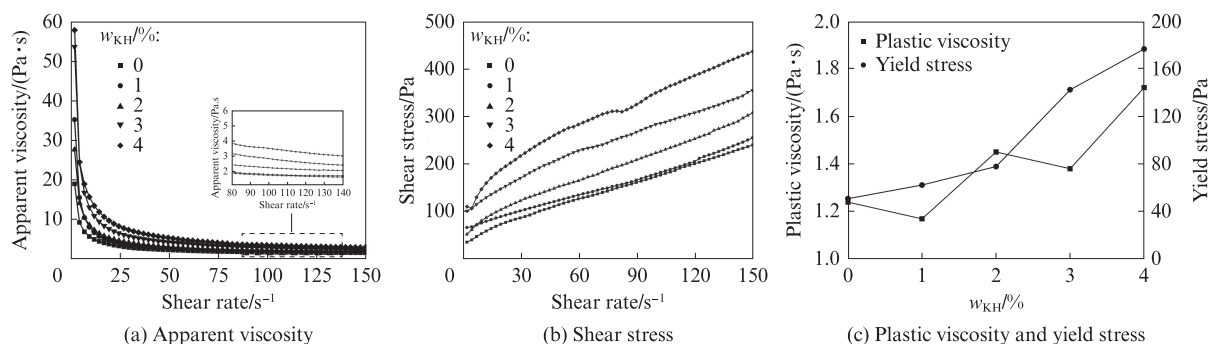


图7 有机硅单体对聚合物水泥涂料流变性能的影响

Fig. 7 Influence of organosilicon monomer on rheological properties of polymer-modified cementitious coating

2.4 微观机理分析

有机硅单体对聚合物水泥涂料的影响机理见图8. 由图8可见: 由于有机硅水解稳定性差^[14], 当有机硅单体掺量增加时, 其自身水解和交联反应加剧, 在聚合过程中会形成大量凝聚物, 这类凝聚物形成的大分子颗粒和非规则缠绕物增加了涂料的

凝胶率和固相含量, 从而导致聚合物水泥涂料的塑性黏度和屈服应力增加; 含有不饱和键的丙烯酸会与有机硅单体共聚生成凝胶^[15], 使其转化率降低, 乳化剂的乳化效果下降^[16], 从而导致乳液的Zeta电位绝对值及其乳胶颗粒的水合层厚度降低, 对钙离子的屏蔽作用降低.

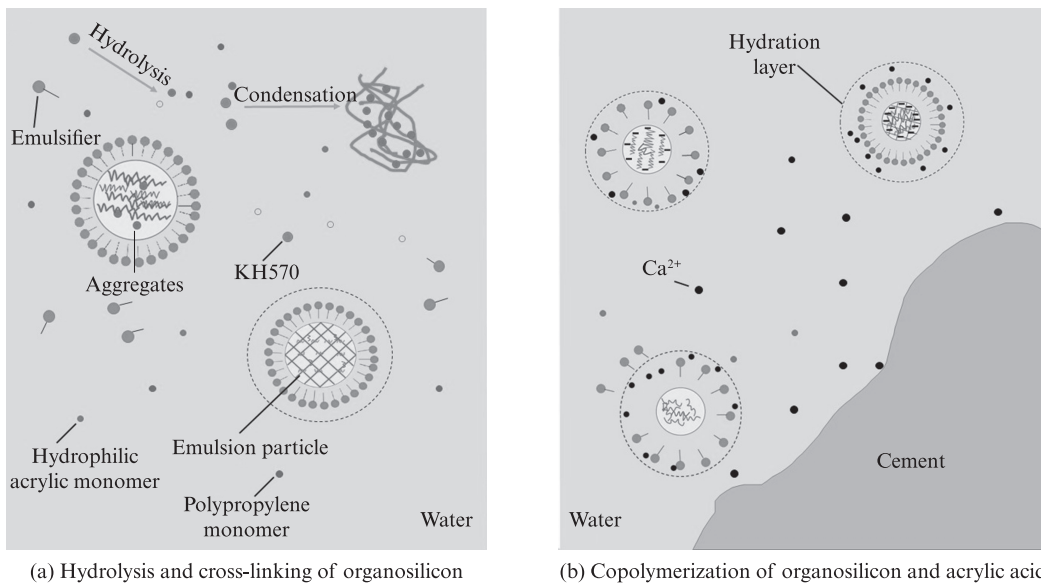


图8 有机硅单体对聚合物水泥涂料的影响机理
Fig. 8 Mechanism of organosilicone monomer on polymer-modified cementitious coating

对于有机硅单体改性乳液与水泥的相容性研究,基于上述机理,可以通过提升有机硅单体的接枝效率,降低其自身的水解和交联反应,来改善乳液的凝胶率.这将有助于优化乳液与水泥的相互作用,提升聚合物水泥涂料的成膜性能.

2.5 自制乳液和市售乳液制备涂层的性能对比

基于现有条件下的最优有机硅单体改性聚丙烯酸酯乳液的配方,制备了液粉比为1.2:1.0、聚灰比为

1.0的聚合物水泥涂料,并与通过市售乳液制备的聚合物水泥涂料(除乳液外,其余原材料与配比保持一致)的性能进行对比,结果见表4.由表4可见:自制乳液涂层有较低的吸水率、电通量与较高的不透水时间;与市售乳液涂层相比,自制乳液涂层的吸水率和电通量分别减少了27.8%、35.1%,不透水时间延长了50.0%.这进一步证明了自制乳液在防水性能和耐久性方面的优势.

Table 4 Performance comparison of coating prepared using self-made emulsion and commercially available emulsion			
Emulsion	Water absorption ratio(by mass)/%	Electric flux/C	Impermeable time/h
Self-made	3.9	772	33
Commercially available	5.4	1 190	22

3 结论

(1)在适宜的有机硅单体掺量下,聚合物水泥涂料展现出良好的成膜性能,其吸水性得到显著改善.掺入2%有机硅单体能有效降低乳液的吸水率,降低率为42.6%.有机硅掺量过高会导致乳液的钙离子稳定性下降,凝胶率上升,进而削弱了乳液的成膜性能,引起涂膜开裂.

(2)相较于市售乳液,有机硅单体的加入显著提高了聚合物水泥涂料的防腐抗渗效果,其吸水率、电通量分别降低了27.8%、35.1%,不透水时间延长了50.0%.然而,过高掺量的有机硅单体对聚合物水泥涂料的性能产生了负面影响,主要体现在筛上残余率上升,塑性黏度和屈服应力增加,成膜性能下降.

参考文献:

[1] 李晓晴,卞立波,丁林娜,等.丙烯酸乳液改性氯氧镁水泥的性能及其机理研究[J]. 建筑材料学报, 2024, 27(6):479-486.
LI Xiaoqing, BIAN Libo, DING Linna, et al. Properties of acrylic emulsion modified magnesium oxychloride cement and its mechanism[J]. Journal of Building Materials, 2024, 27(6): 479-486. (in Chinese)

[2] LIANG C, ZHAO P Q, XIE N, et al. Enhanced comprehensive performance of polymer-CSA cement coating with graphene oxide [J]. Construction and Building Materials, 2023, 363:129885.

[3] 周虎. 高性能聚合物水泥基防水涂料的研究[D]. 武汉:武汉理工大学, 2004.
ZHOU Hu. Studies on high performance polymer cement based waterproofing coating [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2004. (in Chinese)

- [4] 刘贵. 有机硅改性丙烯酸乳液及其水性防腐涂料的研制[D]. 广州:华东理工大学, 2012.
LIU Gui. Study on the silicone modified acrylic and water-borne anti-corrosion coatings[D]. Guangzhou: East China University of Science and Technology, 2012. (in Chinese)
- [5] 王国建. 有机硅氧烷/丙烯酸酯共聚弹性乳液的研制[J]. 建筑材料学报, 2001, 4(4):378-384.
WANG Guojian. Preparation of siloxane/acrylate copolymeric elastic emulsion[J]. Journal of Building Materials, 2001, 4(4): 378-384. (in Chinese)
- [6] OHAMA Y. Polymer-based admixtures[J]. Cement and Concrete Composites, 1998, 20(2/3):189-212.
- [7] 芦令超, 李云超, 王守德, 等. 聚合物改性硫铝酸盐水泥抗硫酸盐侵蚀性能[J]. 建筑材料学报, 2009, 12(6):631-634, 655.
LU Lingchao, LI Yunchao, WANG Shoude, et al. Resistance to sulphate attack of polymer modified sulfoaluminate cement [J]. Journal of Building Materials, 2009, 12(6):631-634, 655. (in Chinese)
- [8] 瞿金清, 陈焕钦. 亲水单体对聚氨酯丙烯酸复合乳液性能的影响[J]. 精细化工, 2004, 21(4):292-296.
QU Jinqing, CHEN Huanqin. Effects of hydrophilic monomer on the properties of polyurethane-acrylate hybrid emulsion[J]. Fine Chemicals, 2004, 21(4):292-296. (in Chinese)
- [9] LIANG C, ZHAO P Q, HOU P K, et al. Investigation of compatibility of fluorine-acrylic emulsion and sulfoaluminate cement in the design of composite coating: Effects of sorbitol and its mechanism[J]. ES Materials and Manufacturing, 2020, 8: 36-45.
- [10] WU L M, DENG J J, LIU H S, et al. Understanding synergistic mechanisms of silicate decorated polyaluminium chloride and organic polymer flocculation for enhancing polymer-flooding wastewater treatment[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2023, 170:1-10.
- [11] 郑少鹏, 牛开民, 田波, 等. 聚合物乳液对水泥砂浆流变性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2017, 20(6):962-969.
ZHENG Shaopeng, NIU Kaimin, TIAN Bo, et al. Effect of polymer latex on rheological properties of cement mortar[J]. Journal of Building Materials, 2017, 20(6):962-969. (in Chinese)
- [12] CHEN M X, LIU B, LI L B, et al. Rheological parameters, thixotropy and creep of 3D-printed calcium sulfoaluminate cement composites modified by bentonite [J]. Composites Part B: Engineering, 2020, 186:107821.
- [13] CHEN M X, LI L B, ZHENG Y, et al. Rheological and mechanical properties of admixtures modified 3D printing sulphoaluminate cementitious materials [J]. Construction and Building Materials, 2018, 189:601-611.
- [14] 李萌萌, 吴聪, 金祖权, 等. 滨海环境下水泥基材料有机硅防护涂层研究进展[J]. 建筑材料学报, 2024, 27(4):332-342.
LI Mengmeng, WU Cong, JIN Zuquan, et al. Research progress on silane protective coatings of cementitious materials in coastal environment[J]. Journal of Building Materials, 2024, 27(4): 332-342. (in Chinese)
- [15] 袁学芹, 陈松, 李效玉. 新型硅-丙乳液及其建筑涂料的合成与性能研究[J]. 涂料工业, 2010, 40(11):38-44.
YUAN Xueqin, CHEN Song, LI Xiaoyu. Studies on synthesis and properties of new silicone-acrylate emulsion and architectural coatings[J]. Paint and Coatings Industry, 2010, 40(11):38-44. (in Chinese)
- [16] 康剑姝, 张发爱. 聚合单体对乳化剂临界胶束浓度和表面张力的影响[J]. 胶体与聚合物, 2011, 29(3):102-105.
KANG Jianshu, ZHANG Faai. Effects of monomer on the CMC and surface tension of dodecyl sodium sulfate [J]. Chinese Journal of Colloid and Polymer, 2011, 29(3): 102-105. (in Chinese)