

文章编号:2095-7386(2021)03-0109-06

DOI:10.3969/j.issn.2095-7386.2021.03.019

偶联剂对聚合物水泥防水涂料的性能影响

卢雨婷,付弯弯,任皓,吴世芳,谭晓明,刘杰胜
(武汉轻工大学 土木工程与建筑学院,武汉 430023)

摘 要:偶联剂作为一种能够改善聚合物与无机物实际粘结强度的材料,可以提高聚合物水泥防水涂料的综合性能。研究了不同类型及掺量的偶联剂对聚合物水泥防水涂料拉伸性能、吸水率及硬度的影响。结果显示:添加偶联剂 KH-550 制得的涂层的拉伸性能在最优掺量下(1%)仍无法满足聚合物水泥防水涂料规范的要求;添加 KH-560 和 YDH-151 作为偶联剂,均可有效降低涂层的吸水率并显著提高涂层硬度,且在最优掺量下(KH-560 为 1%,YDH-151 为 2%),其拉伸性能分别符合 GB/T 23445-2009 中 I 型和 II 型防水涂料的要求。

关键词:聚合物水泥防水涂料;偶联剂;拉伸性能;吸水率;硬度

中图分类号:TU 56⁺1.65

文献标识码:A

Effect of coupling agent on properties of polymer cement waterproof coating

LU Yu-ting, FU Wan-wan, REN Hao, WU Shi-fang, TAN Xiao-ming, LIU Jie-sheng

(School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China)

Abstract: As a material which can improve the actual bonding strength between polymers and inorganics, coupling reagent can improve the comprehensive performance of polymer cement waterproof coatings. In this paper, the effects of different types and dosages of coupling reagents on the tensile properties, water absorption and hardness of polymer cement waterproof coatings were studied. The results showed that the tensile properties of the coating prepared by adding the optimal content (1%) of coupling reagent KH-550 still couldn't meet the requirements of polymer-modified cement compounds for waterproofing membrane. The addition of coupling reagents KH-560 and YDH-151 could effectively reduce the water absorption and significantly increase the hardness of the coating. Moreover, under the optimal contents of KH-560 and YDH-151 (1% for KH-560, 2% for YDH-151), their tensile properties could respectively meet the requirements of type I and type II waterproof coatings according to GB/T 23445-2009.

Key words: polymer cement waterproof coating; coupling reagent; tensile property; water absorption; hardness

收稿日期:2021-04-01.

作者简介:卢雨婷(1997-),女,硕士研究生,E-mail:lyt1124401882@163.com.

通信作者:付弯弯(1990-),女,博士,讲师,E-mail:whwanwanfu@whpu.edu.cn.

基金项目:武汉轻工大学校立科研项目(2021Y40).

1 引言

聚合物水泥防水涂料是一种以丙烯酸酯乳液、乙烯—乙酸乙烯酯乳液等聚合物乳液和水泥为主要原料^[1],加入填料及其他助剂制备而成,经水分挥发和水泥水化反应固化成膜的双组分水性防水涂料^[2]。由于聚合物水泥防水涂料是由有机聚合物乳液与无机水泥材料复合而成的^[3],所以其兼具聚合物涂膜弹性大、防水性好的特点,又具有水泥胶凝材料强度高^[4],与潮湿基面粘结力强的特点,涂料的整体防水效果佳且绿色环保^[5],现已被广泛应用于厨房、卫浴间、建筑外墙等防水工程^[6]。

在聚合物水泥防水涂料的各组成成分中,外加剂所占份额很小,但对聚合物水泥防水涂料的性能影响很大^[7],它的加入不仅可以避免产生许多涂料的缺陷,还可赋予涂料一些特殊的功能^[8]。常用于制备聚合物水泥防水涂料的外加剂有消泡剂、成膜助剂、分散剂、偶联剂等^[9]。在多种外加剂中,硅烷偶联剂作为一种能改善聚合物与无机物实际粘结强度的材料^[10],通过分子中同时存在亲有机材料和无机材料的两种官能团,把有机材料和无机材料与界面连接起来,显著改善界面性能^[11],提高复合材料的综合性能方面效果优异,被广泛采用。乔红斌等^[12]研究得出硅烷偶联剂掺入涂料中,可提高涂膜的凝聚强度,增强涂膜的抗盐雾腐蚀性能,需根据不同的应用需要选择适宜种类的偶联剂用于涂层制备中。刘福杰等^[13]研究了硅烷偶联剂对有机硅涂层性能的影响,得出随着硅烷偶联剂含量的增加,涂层的弹性模量和吸水率增大,硬度和接触角减小,且硅烷偶联剂添加过多会导致涂层表面亲水基团增多,接触角降低,影响涂层防护效果。目前,在已公开发表的文献中,研究主要集中在外加剂对涂料性能影响,关于单一偶联剂对聚合物水泥防水涂料性能影响的详细研究还很少,因此,笔者研究了三种不同硅烷偶联剂的不同掺量对聚合物水泥防水涂料抗拉强度、断裂伸长率等性能的影响,以期后续高性能聚合物水泥防水涂料的制备和应用化提供一定的理论依据。

2 材料与方法

2.1 原材料

氯丁橡胶乳液,固含量为 62%,pH 为 8—9,北

京蒙泰伟业建材有限公司生产;42.5 级普通硅酸盐水泥,华新水泥厂生产;普通河砂,粒径 100—200 目; γ -氨丙基三乙氧基硅烷(KH-550,其分子式: $C_9H_{23}NO_3Si$,分子结构见图 1),山东优索化工科技有限公司;3-缩水甘油醚氧基丙基三甲氧基硅烷(KH-560,分子式: $C_9H_{20}O_5Si$,分子结构见图 2),山东优索化工科技有限公司;乙烯基三乙氧基硅烷(YDH-151,分子式: $C_8H_{18}O_3Si$,分子结构见图 3),上海阿拉丁生化科技股份有限公司。

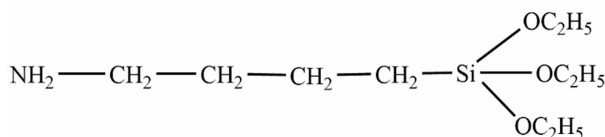


图 1 KH-550 分子结构

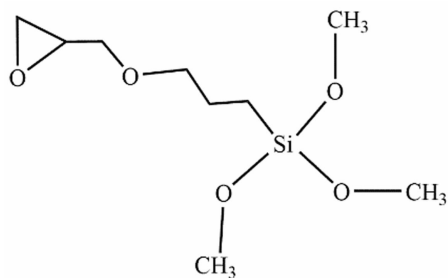


图 2 KH-560 分子结构

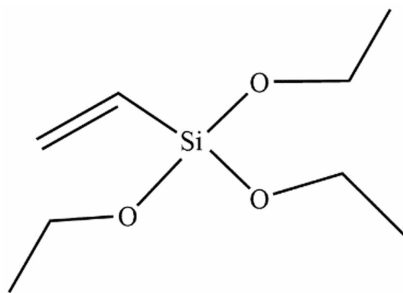


图 3 YDH-151 分子结构

2.2 配合比设计及试样制备

2.2.1 配合比设计

根据聚合物水泥防水涂料制备经验并结合涂料的流动性及成膜性能的前期试验结果,查阅大量参考文献得出聚合物水泥防水涂料的基准配方 R_0 ,在此基础上,分别加入 0.5%,0.75%,1%,1.5%,2%,3%,4% (相对于水泥质量) 的三种不同偶联剂,构成 21 组不同配方,加上不添加偶联剂(空白组)制得涂层作对比,共设 22 组实验,具体配方如表 1 所示。

表 1 聚合物水泥防水涂料配合比

编号	偶联剂 种类	偶联剂 掺量/%	水泥 /g	砂 /g	乳液 /g	水/g
R ₀	—	0	60	24	58.1	3.1
R ₁	KH-550	0.5	60	24	58.1	3.1
R ₂	KH-550	0.	60	24	58.1	3.1
R ₃	KH-550	75	60	24	58.1	3.1
R ₄	KH-550	1	60	24	58.1	3.1
R ₅	KH-550	1.5	60	24	58.1	3.1
R ₆	KH-550	2	60	24	58.1	3.1
R ₇	KH-550	3	60	24	58.1	3.1
R ₈	KH-550	4	60	24	58.1	3.1
R ₉	KH-560	0.5	60	24	58.1	3.1
R ₁₀	KH-560	0.	60	24	58.1	3.1
R ₁₁	KH-560	75	60	24	58.1	3.1
R ₁₂	KH-560	1	60	24	58.1	3.1
R ₁₃	KH-560	1.5	60	24	58.1	3.1
R ₁₄	KH-560	2	60	24	58.1	3.1
R ₁₅	KH-560	3	60	24	58.1	3.1
R ₁₆	KH-560	4	60	24	58.1	3.1
R ₁₇	YDH-151	0.5	60	24	58.1	3.1
R ₁₈	YDH-151	0.	60	24	58.1	3.1
R ₁₉	YDH-151	75	60	24	58.1	3.1
R ₂₀	YDH-151	1	60	24	58.1	3.1
R ₂₁	YDH-151	1.5	60	24	58.1	3.1
R ₂₂	YDH-151	2	60	24	58.1	3.1
R ₂₃	YDH-151	3	60	24	58.1	3.1
R ₂₄	YDH-151	4	60	24	58.1	3.1

2.2.2 聚合物水泥防水涂料试样制备

按比例称取水泥、河砂并混合搅拌均匀,得到粉料;再按比例称取氯丁橡胶乳液,将偶联剂加入氯丁橡胶乳液中,在电动搅拌器中混合 5 min,制得均匀的液料。然后将液料缓慢加入粉料中,边加边搅拌,转速为 500 r/min,搅拌 5 min,搅拌停止后,静置 5—8 min,即得聚合物水泥防水涂料。根据国家标准 GB/T23445 - 2009《聚合物水泥防水涂料》进行防水涂层涂覆和养护 6 d,最后用裁刀将试样裁成相应试样进行相关性能测试。

2.3 性能测试

2.3.1 拉伸性能

拉伸试验采用江苏新真威试验机械有限公司生产的 DL - D 系列电子万能试验机,参照国家标准 GB/T 16777 - 2008《建筑防水涂料试验方法》进行,测得涂膜的拉伸强度和断裂伸长率。

2.3.2 吸水率

养护到规定龄期后,将涂层裁成(20 × 20) mm 的试样,用 BSA 系列电子天平称重。然后将试样放入装有自来水的烧杯中浸泡,达到测试龄期后,将试样取出迅速擦干其表面水分后称重^[14]。吸水率按如下公式计算:

$$W = \frac{W_2 - W_1}{W_1} \times 100\% .$$

其中:W 为试样的吸水率,% ;W₁ 为试样浸水前的质量,g;W₂ 为试样浸水后的质量,g。

2.3.3 铅笔硬度

试样养护到规定龄期后,采用沧州欧谱检测仪器有限公司生产的 OU4300 铅笔硬度计测定涂层铅笔硬度。

3 结果与分析

3.1 偶联剂对聚合物水泥防水涂料拉伸性能的影响

3.1.1 硅烷偶联剂 KH-550 对聚合物水泥防水涂料拉伸性能的影响

由图 4 可知,随着硅烷偶联剂 KH-550 添加量的增加,涂层的抗拉强度大体上呈现递增趋势,这是由于 KH-550 含有氨基官能团,呈弱碱性,具备自身催化水解的能力,能水解生成硅醇^[15],部分硅醇(Si-OH)之间脱水缩合成低聚硅氧烷^[16],而剩余部分硅醇键能与无机填料表面的羟基形成氢键,在无机材料与有机材料之间起到“架桥”作用^[11],增强有机材料与无机材料的粘接力,因而添加 KH-550 后制得涂层的抗拉强度均有所提高,断裂伸长率随着 KH-550 添加量增加呈现先增加后减小的趋势。当 KH-550 添加量小于 1% 时,涂层的断裂伸长率随 KH-550 添加量增加而增加,但当其加入量超过 1% 时,涂层的断裂伸长率反而下降,这是因为添加过量的 KH-550 会引起其大量的水解,因而一定程度上破坏了聚合物膜的完整性,导致涂层的断裂伸长率下降。由涂层的抗拉强度和断裂伸长率测试结果可知,KH-550 的最优添加量为 1% ,此时涂层的抗拉强度为 1.05 MPa,断裂伸长率为 484% ,按照 GB/T 23445 - 2009 中对聚合物水泥防水涂料拉伸性能中对 I 型涂料的要求(涂层的抗拉强度 ≥ 1.2 MPa,断裂伸长率 ≥ 200%),制得的涂层在 KH-550 最优添加量下仍不能满足聚合物水泥防水涂料规范对无处理涂层的拉伸性能的要求。

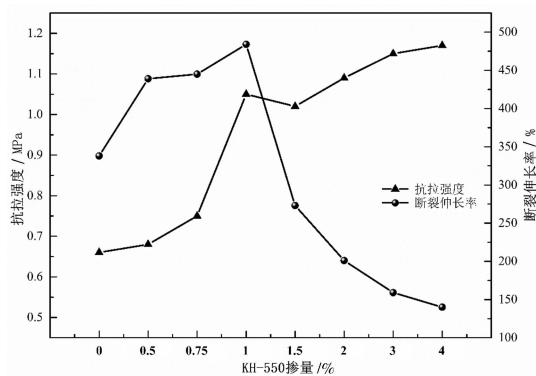


图4 不同 KH-550 掺量制得涂层的拉伸性能

3.1.2 硅烷偶联剂 KH-560 对聚合物水泥防水涂料拉伸性能的影响

由图5可知,对于硅烷偶联剂 KH-560,当其掺量为 0.5%—4% 时,涂层的抗拉强度呈现递增趋势,断裂伸长率呈现递减趋势。KH-560 为环氧基官能团硅烷,其环氧基和烷基与聚合物乳液结合,形成氢键作用,增强水泥与聚合物相的连接强度,导致涂层的抗拉强度增大。同时,KH-560 是硬单体,硬段比例比较高,因此随着其用量增加,胶膜的硬度增大,断裂伸长率逐渐降低^[17]。

当 KH-560 的掺量分别为 0.5%, 0.75%, 1%, 1.5%, 2%, 3%, 4% 时,涂层的抗拉强度分别为 0.65 MPa, 1.27 MPa, 1.43 MPa, 1.47 MPa, 1.45 MPa, 1.54 MPa, 1.63 MPa, 对应其断裂伸长率分别为 336%, 212%, 204%, 201%, 200%, 180%, 163%, 说明 KH-560 对涂层的拉伸性能的改善是有一定限度的,并不是添加量越多,性能改善越明显。参照 GB/T 23445—2009 中防水涂料拉伸性能的要求,当 KH-560 的添加量为 0.75%—2% 时,制得涂层符合聚合物水泥防水涂料规范对 I 型涂层的拉伸性能要求(涂层的抗拉强度 ≥ 1.2 MPa,断裂伸长率 $\geq 200\%$)。

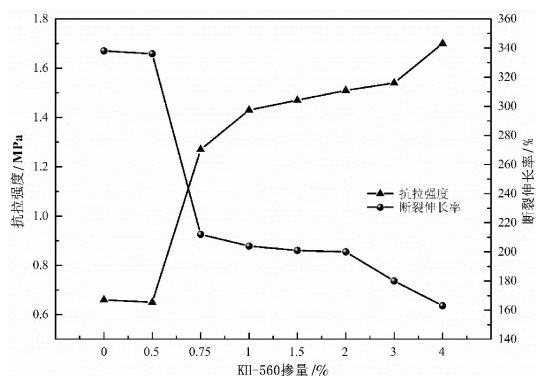


图5 不同 KH-560 掺量制得涂层的拉伸性能

3.1.3 硅烷偶联剂 YDH-151 对聚合物水泥防水涂料拉伸性能的影响

对于硅烷偶联剂 YDH-151,由图6可知随着其添加量的增加,涂层的抗拉强度呈增加趋势。当 YDH-151 添加量由 0.5% 增加到 2% 时,涂层的抗拉强度由 1.28 MPa,增加至 2.1 MPa,涂层抗拉强度增加明显。继续提高 YDH-151 添加量至 3% 时,涂层抗拉强度虽然相比添加 2% 时有所降低,仍然高于不添加偶联剂时的涂层抗拉强度,而 YDH-151 添加量为 4% 时,涂层在养护 1 d 后出现起鼓、开裂现象,不能形成完整的涂膜(见图7)。由此可知,YDH-151 的添加量过多时,会严重影响涂膜的成膜性能,在选择 YDH-151 作为添加剂改善涂膜性能时,其掺量应控制在 4% 以下为宜。

由图6还可以看出,涂层的断裂伸长率随 YDH-151 添加量增加呈降低趋势,这是因为在 YDH-151 中存在不饱和双键,其在涂层制备过程中与聚合物产生化学反应,拉紧界面上胶粘剂的结构,形成模量递减的拘束层,从而使聚合物固化收缩时导致的界面上产生的较大附加应力,能够均匀地传递^[18],从而可以改善聚合物乳液与水泥的实际粘结性,使二者的界面结合更紧密,进而涂层的抗拉强度明显提高,但也使得聚合物相之间的聚合物膜的完整性受到一定的破坏,导致涂层的断裂伸长率降低明显。当 YDH-151 的添加量为 1.5%, 2% 时,制得涂层的抗拉强度分别为 2.09 MPa, 2.1 MPa, 断裂伸长率分别为 124%, 105%, 符合聚合物水泥防水涂料规范中对 II 型涂层的拉伸性能要求(涂层的抗拉强度 ≥ 1.8 MPa,断裂伸长率 $\geq 80\%$)。

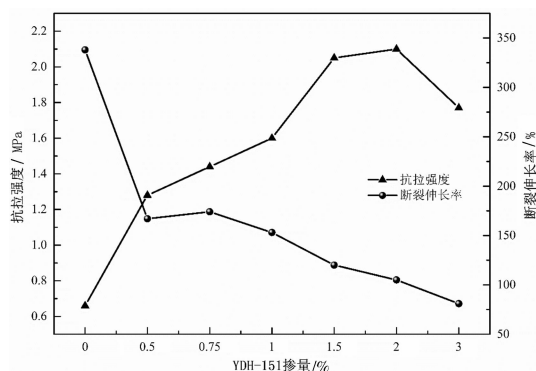


图6 不同 YDH-151 掺量制得涂层的拉伸性能

综上所述,选取 KH-560 和 YDH-151 作为偶联剂,即可制得满足聚合物水泥防水涂料规范的拉伸性能的要求的涂层,因此,选择添加硅烷偶联剂 KH-560 和 YDH-151 制得的涂层,进行后续性能测试实验,研究这两种偶联剂的添加对涂层其他性能的影响。

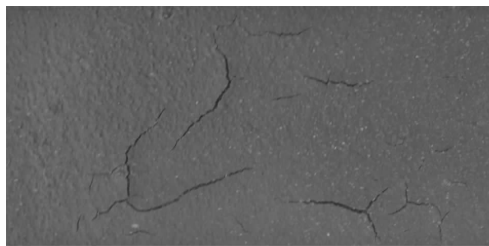
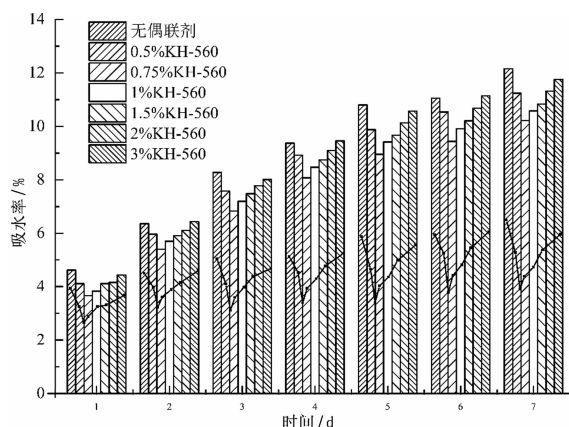


图7 YDH-151 掺量为4%制得涂层

3.2 偶联剂对聚合物水泥防水涂料吸水率的影响

图8为不同KH-560添加量制得涂层的1—7 d吸水率。由图8可知,添加偶联剂制得涂层1—7 d的吸水率均低于未添加偶联剂的涂层,这说明在涂层中加入偶联剂可以有效提高涂层的耐水性。对于KH-560,一方面因其自身的低表面张力和低表面能使其具有较强的疏水性^[19],可一定程度上降低涂层的吸水率;另一方面作为环氧基硅烷偶联剂,它的添加可以增强体系的交联密度,使得交联间距和交联分子长度缩短^[17],并与水泥形成相互交织的网状胶膜结构,从而降低涂层的吸水率。此外,随着KH-560添加量的增加,涂层的1—7 d吸水率呈现先减小后增大趋势。当添加0.5%的KH-560时,涂层7 d的吸水率为11.24%,小于未添加偶联剂涂层的7 d吸水率12.16%,远小于标准行业标准《JG-T 375-2012 金属屋面丙烯酸高弹防水涂料》中规定的涂层吸水率 $\leq 15\%$ 的要求;当KH-560的添加量为0.75%时,涂层的吸水率最低,7 d吸水率为10.22%,与未添加偶联剂的涂层相比,涂层吸水率降低了15.94%。但KH-560的添加量继续增大时,涂层的吸水率开始呈上升趋势,当添加量达到3%时,涂层的7 d吸水率达到11.76%。由此可见,在涂层中添加KH-560并不是越多越好,当添加过量的KH-560不但不会降低吸水率,反而会引起涂层的多层包覆而导致吸水率增大。

图8 不同KH-560掺量制得涂层的1—7 d吸水率
添加不同量的YDH-151对涂层的7 d吸水率

的影响如图9所示。对于YDH-151,其分子中具有疏水基团 $-C \equiv C-$,对抑制水分子向涂层中浸透起到一定作用^[20],而且兼有偶联剂和交联剂的作用^[21],不溶于水,同时因其分子中含有乙烯基而具有疏水性^[22],可以作为憎水剂,由图9可知,随着YDH-151添加量的增加,涂层的7 d吸水率逐渐降低,涂层的耐水性得到显著改善。当YDH-151的添加量为0.5%时,7 d吸水率为10.03%,比未添加偶联剂的涂层低17.5%。当YDH-151的添加量增加为2%时,涂层7 d吸水率仅为9.06%,与未添加偶联剂的涂层相比,吸水率降低了25.5%。继续增加YDH-151的添加量至3%时,此时涂层7 d吸水率仅为9.01%,与未添加偶联剂的涂层吸水率相比,降低了25.9%。很明显,当YDH-151添加量由0.5%增加至2%,涂层的7 d吸水率降低了8.0%,而YDH-151添加量由2%提高至3%时,涂层的7 d吸水率仅再降低了0.4%。由此可知,YDH-151适量地加入可以显著降低涂层的吸水率,但当其添加量超过2%时,再继续增大其含量对涂层吸水率改善效果并不明显。

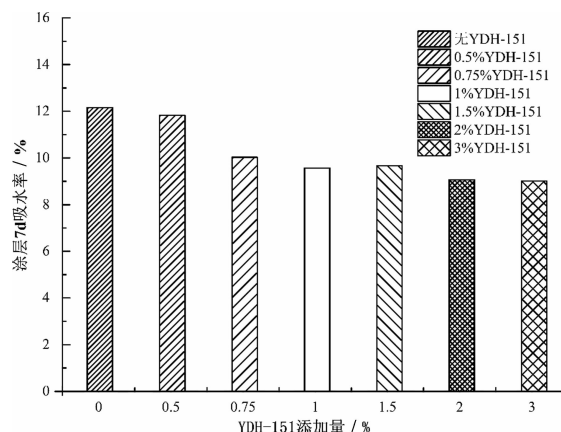


图9 不同YDH-151掺量制得涂层的7 d吸水率

3.3 偶联剂对聚合物水泥防水涂料铅笔硬度的影响

铅笔硬度能够反映涂层表面耐划痕或耐产生其他缺陷的能力,是衡量涂层性能的重要指标之一,按照国家标准《GB/T 6739-1996 涂膜硬度铅笔测定法》对涂层硬度进行测试^[23],本文中笔者研究硅烷偶联剂KH-560、YDH-151掺量对涂层铅笔硬度的影响如表2所示。由表2可知,随着KH-560掺量的增加,涂层的铅笔硬度呈先上升后稳定趋势,当KH-560掺量在1%—3%时,涂层的铅笔硬度可达到2H。涂层的铅笔硬度的该种变化趋势可能与涂层的抗拉强度变化有关,涂层的抗拉强度随偶联剂增加而增大,使得涂层的硬度也相应有所改善。综合考虑涂层的拉伸性能、吸水率及铅笔硬度,可知KH-560的最

优添加量为 1%。如表 2 所示,随着硅烷偶联剂 YDH-151 的掺量增加,涂层的铅笔硬度呈先上升后下降的趋势,当 YDH-151 的掺量达到 1.5%、2% 时,涂层的铅笔硬度最大,达到 3H。综合考虑涂层的拉伸性能、吸水率及铅笔硬度,可知 YDH-151 的最优添加量为 2%。

表 2 硅烷偶联剂掺量对涂层铅笔硬度的影响

硅烷偶联剂掺量/%	KH-560 铅笔硬度	YDH-151 铅笔硬度
0.50	HB	H
0.75	H	2H
1.00	2H	2H
1.50	2H	3H
2.00	2H	3H
3.00	2H	2H

4 结论

在本文中,笔者研究了 KH-550、KH-560 和 YDH-151 三种偶联剂对聚合物水泥防水涂料拉伸性能、吸水率和铅笔硬度的影响。研究结果显示,选用 KH-550 作为偶联剂,即使在最优掺量下(1%),涂层仍无法满足聚合物水泥防水涂料规范对拉伸性能的要求。选用 KH-560 作为偶联剂,涂层 1—7 d 的吸水率随 KH-560 添加量增大呈先减小后增大趋势,在最优掺量下(1%),其拉伸性能符合 GB/T 23445—2009 中 I 型防水涂料的要求,铅笔硬度可达 2H;选用 YDH-151 作为偶联剂,在最优掺量下(2%),涂层拉伸性能符合国家标准 GB/T 23445—2009《聚合物水泥防水涂料》中 II 型防水涂料的拉伸性能要求,7 d 吸水率仅为 9.06%,铅笔硬度达到 3H。

参考文献:

- [1] 李倩. 浅析聚合物水泥防水涂料拉伸性能检测的主要影响因素[J]. 工程质量, 2012, 30(12): 75-77.
- [2] GB/T 23445—2009, 聚合物水泥防水涂料[S].
- [3] 严芬英, 赵春英. 聚合物水泥防水涂料的机理及应用进展[J]. 电镀与精饰, 2012, 34(09): 25-28 + 33.
- [4] 余剑英, 周虎, 罗小峰. 聚合物水泥复合防水涂料的改性研究[J]. 中国建筑防水, 2003, (09): 14-16.
- [5] 贺行锐. 丙烯酸酯系聚合物水泥防水涂料研究[J]. 中国建材科技, 2012, 21(04): 12-14 + 24.
- [6] 赵守佳, 田翠. 聚合物水泥防水涂料发展现状与展望[J]. 中国建筑防水, 2014(12): 7-13
- [7] 杨忠敏. 防水涂料助剂的功能特点及应用[J]. 化学工业, 2015, 33(Z1): 33-37.
- [8] 文翠琴. 聚合物水泥防水涂料性能关键影响因素分析[J]. 福建建材, 2009, (01): 29-30.
- [9] 刘红花. 聚合物-硫酸铝盐水泥基防腐涂层的制备及性能研究[D]. 导师: 芦令超. 济南大学, 2019.
- [10] 王丽华. 聚丙烯/凹凸棒土纳米复合材料的制备、表征及性能研究[D]. 天津: 天津大学, 2004.
- [11] 熊联明. 偶联剂的生产与应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2017.
- [12] 乔红斌, 余金阳, 古绪鹏, 等. 硅烷偶联剂在涂料与涂装中的应用进展[J]. 安徽工业大学学报(自然科学版), 2008, (04): 379-382.
- [13] 刘福杰, 齐育红, 张占平. 固化剂和硅烷偶联剂对有机硅涂层性能的影响[J]. 中国表面工程, 2014, 27(01): 114-119.
- [14] 龙庆. 二氧化硅超细粉改性聚合物水泥防水涂料的制备及其对混凝土耐久性的影响[D]. 广州: 华南理工大学, 2016.
- [15] 魏强, 王伟宏. KH550 改性酚醛树脂层压板电绝缘性能的研究[J]. 林业工程学报, 2017, 2(01): 30-35.
- [16] 王鑫鑫. 黄麻纤维的复合处理及其聚丙烯基复合材料研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.
- [17] 赵擎霄, 苏秀霞, 宋洁, 等. 硅烷偶联剂 KH560 改性水性硝化纤维乳液的性能研究[J]. 电镀与涂饰, 2016, 35(06): 286-290.
- [18] 姚钟尧. 有机硅烷偶联剂[J]. 塑料工业, 1991(06): 13-18.
- [19] 李培双. 氟硅丙烯酸聚氨酯双组份涂料的制备与性能研究[D]. 福州: 福建师范大学, 2018.
- [20] 李丰. 镁锂合金表面硅烷改性纳米粒子环氧树脂涂层防腐蚀性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2014.
- [21] 国内硅烷偶联剂发展现状及市场简析[J]. 有机硅氟资讯, 2009, (03): 31-33.
- [22] 宋莹莹. 镁锂合金表面硅烷改性及其腐蚀与防护研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2013.
- [23] 马晓芳. 聚丙烯酸酯型超分散剂的合成与应用[D]. 郑州: 郑州大学, 2014.