

改性硅酸盐水泥基修补材料性能试验研究

李福辰¹ 郭昱涛¹ 王之钧²

1 北京首都国际机场股份有限公司, 北京市顺义区, 101300;

2 杭州萧山国际机场有限公司, 浙江杭州, 311200;

摘要: 以改性硅酸盐水泥为基材, 系统研究了养护方式、砂胶比及掺合料等因素对改性硅酸盐修补材料力学性能、干缩性能和热膨胀系数等性能的影响。试验结果表明: 改性硅酸盐水泥应注重前期的保湿养护, 相同水胶比时, 砂胶比越大, 力学性能呈上升趋势; 少量的掺合料对综合性能影响较小。

关键词: 改性硅酸盐; 养护方式; 干缩性能; 热膨胀性能

DOI: 10. 64216/3080-1508. 25. 07. 001

前言

水泥道面修复用的无机胶凝材料主要包括硅酸盐水泥、磷酸盐水泥、硫铝酸盐水泥、高铝水泥和石膏等。本文以改性硅酸盐水泥为基材, 分析研究养护方式、胶砂比、掺合料掺量因素对改性硅酸盐水泥基材料力学性能、干缩性能和热膨胀性能的影响, 为改性硅酸盐材料的研究及应用提供参考与借鉴。

1 试验材料与试验方法

1.1 试验材料

(1) 改性硅酸盐水泥基材

选择两种改性硅酸盐水泥基材, 第一种为杭州修路人生产的快通 9 号水泥基材料, 第二种为日本电化 DEN KA 水泥用快硬混合材料, 两者均不含骨料。

(2) 掺合料

掺合料为二级低钙灰, 细度 14.2%, 烧失量 3.7%, 需水比 101%, 游离氧化钙含量为 0.54%。

(3) 细集料

细集料为河砂, 其细度模数为 2.87, 最大粒径约 5 mm, 含泥量小于 1%, 符合国标《建设用砂》(GB/T 14 684—2022) 中 1 区级配的要求。

(4) 添加剂

快通 9 号用的是复配的改性剂, 由专用的减水剂、早强剂、缓凝剂和其它添加剂复配而成, 日本电化 DEN KA 水泥配用的是专用液体减水剂(红棕色液体)和专用缓凝剂(白色粉末状)。

1.2 试验方法

试验内容主要有砂浆流动度试验、砂浆抗折(压)强度试验、干缩性能和热膨胀系数试验等。

1.2.1 砂浆流动度测试

砂浆(混凝土)工作性包括流动性、粘聚性和不泌水性, 流动性是其最重要的指标, 砂浆流动性采用砂浆

流动度/扩展度表示, 混凝土流动性采用混凝土坍落度表示。根据 GB/T 2419-2005《水泥胶砂流动度测试方法》测试, 测量其不振动和振动 25 次的流动度。

1.2.2 砂浆抗折(压)强度

试验采用尺寸为 40mm×40mm×160mm 的试件, 依据 GB/T 17671-1999《水泥胶砂强度检测方法》进行试验。首先采用水泥电动抗折试验机进行抗折强度测试, 记录抗折强度, 此时试件一分为二; 然后在压力试验机上, 配合使用 40mm×40mm 水泥抗压夹具测试两个断开试件的抗压力值, 最后按公式(2-1)计算其抗压强度。

$$P=F/S \quad (1-1)$$

P—抗压强度, MPa;

F—抗压力值, KN;

S—接触面积为 1600mm²。

1.2.3 砂浆干缩性能

试验采用 40mm×40mm×160mm 的试件, 试件两端安置测量钉头, 在室内环境中养护, 通过 BC156-300 比长仪测试试件规定龄期的长度变化情况, 来确定试件的干缩性能。按 JGJ/T70-2009《建筑砂浆基本性能试验方法》计算砂浆规定龄期的干缩率:

$$S_i=(L_0-L_i)/(L-L_d)*100 \quad (1-2)$$

S_i—i 天龄期干缩率, %;

L₀—初始测量读数, mm;

L_i—i 天龄期测量读数, mm;

L—试件的长度 160mm;

L_d—两个收缩头埋入砂浆中长度之和, 即 20±2mm。

1.2.4 砂浆热膨胀系数

热膨胀系数是衡量材料热稳定性好坏的重要参数, 也是评估修补材料与混凝土材料性能是否匹配的一个重要指标。

试验试件测试完干缩性能后, 把试件放入干燥箱中进行烘干处理, 直至试件恒重为止, 烘干温度为 100℃。取出试件, 并放入干燥器中冷却至室温, 以备测试用。

热膨胀系数测定与计算

(1) 试件基准长度测定：从干燥器中取出已预处理好的试件，首先在在室温（T₀）下测定该试件长度，该值即为基准长度或初始长度 L₀。

(2) 不同温度下长度测定：把测好初始长度的试件放入干燥箱中并升温，每次升温 10℃，并在该温度下恒定至少 1h，然后测定该温度（T_n）下的长度值 L_n，如此继续直到升温到 60℃后停止试验测试。

(3) 热膨胀系数计算：材料的热膨胀系数按下列公式计算得到：

$$\alpha = (L_0 - L_n) / [(L_0 - l_0) (T_0 - T_n)] \quad (1-3)$$

式中 α —材料的线膨胀系数；
L₀—在温度为 T₀时试样的长度；
L_n—在温度为 T_n时试样的长度；
l₀—试件端头两个测试铜头的总长度。

2 试验结果与分析

2.1 养护方式对力学性能的影响

分析自然养护和湿养护对砂浆抗折、抗压强度的影响，试验选用 3 组配比，它们的工作性相当，配合比分别为：

表 1 改性硅酸盐修补材料典型配合比 1

编号	水胶比	砂胶比	掺合料	改性剂	流动性
a	0.3	2:1	0	3%	185mm
b	0.3	2:1	5%	3%	180mm
c	0.33	2.5:1	5%	4%	182mm

备注：①分别采用自然养护和保湿养护两种养生方式；
②自然养护记为“自”，保湿养护记为“湿”。

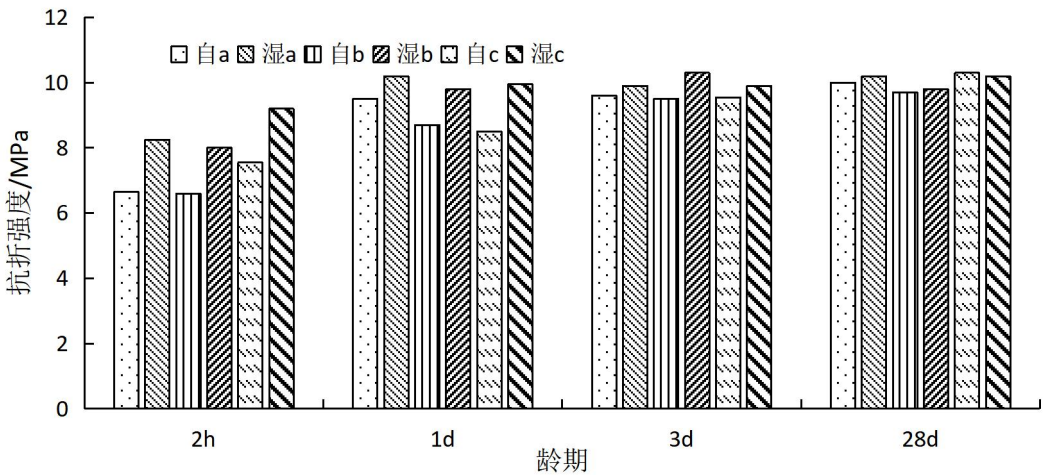


图 1 养护方式对抗折强度的影响

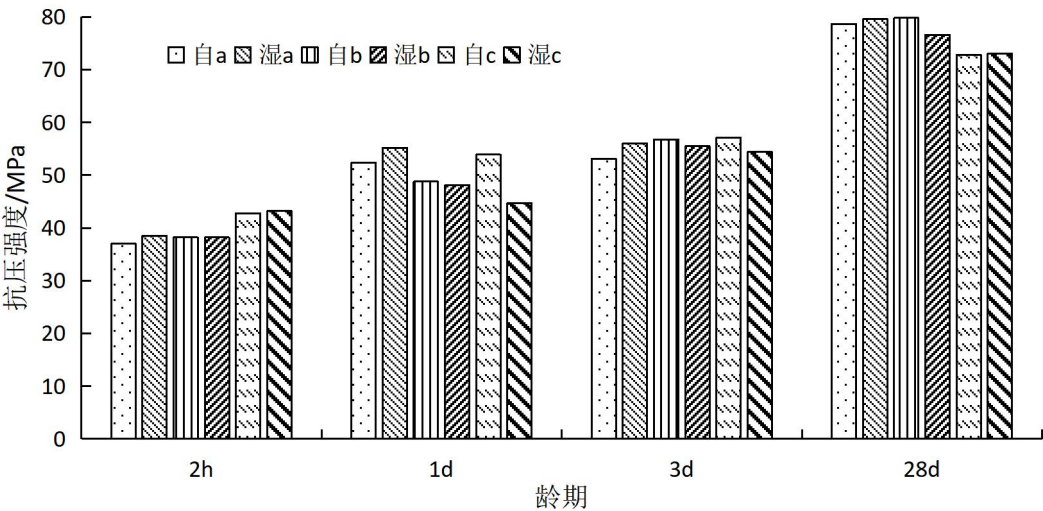


图 2 养护方式对抗压强度的影响

注：①自 a/自 b/自 c 分别 表示配合比分别为 a/b/c 时自然养护的强度；

②湿 a/湿 b/湿 c 分别 表示配合比分别为 a/b/c 时湿养护的强度；

上图和表显示，采取两种养护方式的砂浆强度随时间逐渐增大；龄期到达 28d 时，砂浆强度基本不增长；对比配比 a 和 b 可知，掺入 5% 的粉煤灰略微降低了抗折强度，抗压强度影响不大；对比配比 b 和 c 可知，配比 c 提高砂用量时，砂浆 2h 强度提高，但由于水胶比也相应增大，1d 以后强度较 b 略有降低；因此，改性硅酸盐材料中可适量掺入粉煤灰，且当一定水灰比时，适量提高砂用量可提高砂浆强度。

对比自然养护和保湿养护的数据可得，采取湿养护时，2 小时的抗折强度明显更高，1d 和 3d 的抗折强度也略高于自然养护，但 28d 的抗折强度与自然养护的差异不大，可能是由于室内湿度也能达到 65% 以上，且后期阴雨天湿度更大；从以上数据还可得出，两种养护方式对抗压强度影响不大；因此，应注重改性硅酸盐材料的前期湿养护，可采用湿布覆盖，有利于早期抗折强度的增长，对早期裂缝有较好的抵御作用。

2.2 干缩性能试验结果与分析

分析了 4 种不同配比的改性硅酸盐修补材的干缩性能，并与 P. 052. 5 水泥砂浆进行了对比试验，其中热膨

胀系数的测定试件采用干缩性能试验后的砂浆试块。主要配合比如下：

表 2 改性硅酸盐修补材料典型配合比 2

编号	砂胶比	粉煤灰/%	水胶比	改性剂/%
A1	1.5:1	—	0.28	2
A2	2.0:1	—	0.30	3
A3	2.0:1	5	0.30	3
A4	2.5:1	5	0.33	4
基准	2.0:1	—	0.30	3

按以上配合比成型砂浆干缩试件，标准养护至规定脱模时间后，根据此后砂浆 30 天龄期的收缩情况得知，改性硅酸盐修补材料的干缩率只有 P. 052. 5 水泥砂浆的 50% 左右，且前期部分出现微膨胀现象，可间接说明相同配合比下，改性硅酸盐材料的干缩应力要小一些，更不容易出现开裂现象；随着砂胶比的增加，改性硅酸盐水泥的干缩率进一步呈下降趋势，掺合料的掺入，也降低了材料的干缩率，说明适当提高骨料掺量，降低每方混凝土中水泥的用量，可减少改性硅酸盐修补材料的干缩，同时采用粉煤灰替代部分改性硅酸盐水泥，也对干缩率的控制有一定效果。

2.3 热膨胀系数试验结果与分析

测试 5 组试件在 10~60℃ 环境下的膨胀率，进而计算出相应的膨胀系数，并采用线性回归的分析测试的热膨胀系数，结果见表 3。

表 3 改性硅酸盐修补材料膨胀率和热膨胀系数的测试结果

配比	膨胀率/ $\times 10^{-6}$						热膨胀系数 / $\times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
	10	20	30	40	50	60	
A1	0	167	292	542	688	833	17.08
A2	0	229	313	563	687	854	16.84
A3	0	188	229	458	604	812	15.83
A4	0	167	292	521	625	771	15.59
基准	0	167	208	417	521	667	13.16

从表 3 测量和计算的结果看，改性硅酸盐修补材料的热膨胀系数均略高于基准的 P. 052. 5 水泥材料；对比配比 A1、A2 和 A4 可知，随着砂胶比的提高，热膨胀系数逐渐降低，符合一般规律；对比 A2 和 A3 可看出，粉煤灰也降低了改性硅酸盐材料的热膨胀系数。该方法测试的热膨胀系数受试验环境因素的影响，试验可能存在一定的误差，但整体数据符合普通硅酸盐水泥混凝土热膨胀系数的范围内。

3 结论

(1) 养护方式对改性硅酸盐材料的早期抗折强度影响较大，应注重开放交通前的保湿养护，适当提高砂胶比和掺合料掺量，有利于改善改性硅酸盐修补砂浆抗折抗压强度。

(2) 改性硅酸盐修补材料的干缩率明显低于普通

硅酸盐水泥基材料；随着砂胶比和粉煤灰掺量的提高，改性硅酸盐修补砂浆的干缩率呈下降趋势，适当增加骨料掺量，降低每方混凝土中水泥的用量，有利于提高改性硅酸盐修补材料的体积稳定性。

(3) 与普通硅酸盐水泥砂浆相比，改性硅酸盐修补砂浆的热膨胀系数略高，两者的匹配性总体较好。

参考文献

- [1] 中国民用航空局. MH/T5084-2025 民用机场水泥混凝土道面维护技术规范[S]. 北京：中国民航出版社，2025.
- [2] 中华人民共和国工业和信息化部. JC/T1099-2009 硫铝酸钙改性硅酸盐水泥[S]. 北京：中国建材工业出版社，2009.