

文章编号:1007-9629(2024)02-0146-08

纤维素醚结构对 CSA 水泥砂浆 拉伸黏结强度的影响

许钰^{1,2}, 李建^{1,2}, 王茹^{1,2,*}

(1. 同济大学 先进土木工程材料教育部重点实验室, 上海 201804;

2. 同济大学 材料科学与工程学院, 上海 201804)

摘要:研究了固定水灰比条件下具有不同取代度和取代基团的 5 种纤维素醚在 0.3% 和 0.6% 掺量时对硫铝酸盐(CSA)水泥砂浆拉伸黏结强度的影响,并结合保水率测试及压汞法对砂浆孔结构进行分析,探讨了纤维素醚结构对其拉伸黏结强度的影响机制.结果表明:对于同类纤维素醚,高取代度的引气多,改性砂浆孔隙率大、拉伸黏结强度低;对于不同类纤维素醚,羟乙基甲基纤维素醚改性砂浆的孔隙率较羟丙基甲基纤维素醚改性砂浆的要小,拉伸黏结强度更高.基于测试结果提出了 CSA 水泥砂浆拉伸黏结强度影响因子模型.

关键词:硫铝酸盐水泥;纤维素醚;取代度;取代基;拉伸黏结强度;孔隙率

中图分类号:TU528.01

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2024.02.007

Effect of Cellulose Ether Structure on Tensile Bond Strength of CSA Cement Mortar

XU Yu^{1,2}, LI Jian^{1,2}, WANG Ru^{1,2,*}

(1. Key Laboratory of Advanced Civil Engineering Materials of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Effect of five types of cellulose ethers with different substitution degrees and groups at 0.3% and 0.6% dosage on the tensile bond strength of calcium sulphoaluminate(CSA) cement mortar at fixed water to cement ratio was studied. Based on the water retention rate and porosity measured by mercury intrusion porosimeter, the influence and the mechanism of cellulose ether structure on the tensile bond strength of CSA cement mortar were discussed. The results show that for the same cellulose ether, higher substitution degree makes more air entrainment which in turn leads to larger porosity and lower tensile bond strength. For different cellulose ethers, hydroxyethyl methyl cellulose has smaller porosity and higher tensile bond strength than hydroxypropyl methyl cellulose. A model to interpretate the influencing factors on the tensile bond strength of CSA cement mortar is proposed based on the experimental results.

Key words: calcium sulphoaluminate cement; cellulose ether; substitution degree; substitution group; tensile bond strength; porosity

与硅酸盐水泥相比,硫铝酸盐(CSA)水泥具有
早强、抗渗、抗冻及耐腐蚀等优良性能^[1-2],在瓷砖黏

结剂等特种建材中得到了广泛的应用.纤维素醚具
有缓凝及引气等多种功能,常用于改善水泥砂浆的

收稿日期:2023-03-04; 修订日期:2023-04-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51872203);中德科学中心资助项目(GZ 1290)

第一作者:许钰(1998—),女,江苏常州人,同济大学硕士生. E-mail:2813733618@qq.com

通讯作者:王茹(1975—),女,辽宁昌图人,同济大学教授,博士生导师,博士. E-mail:ruwang@tongji.edu.cn

性能^[3-4].已有研究表明,纤维素醚的掺入会改善砂浆的保水性,增加孔隙率,降低抗压强度和抗折强度^[5-11],增强剪切强度、柔韧性和黏结性等^[12].并且纤维素醚会吸附在钙矾石和氢氧化钙的表面,减少铝酸三钙的溶解和水化产物的生成^[13-16].

纤维素醚改性CSA水泥的研究工作开展较晚.李建等^[17]研究发现随着羟乙基甲基纤维素醚(HEMC)掺量的增加,在固定流动度下,CSA水泥的需水量和凝结时间增加,湿密度和强度降低.吴凯等^[18]研究发现HEMC对硫铝酸盐水泥砂浆含气量、水化放热、吸附作用的影响程度不如其对硅酸盐水泥砂浆相应性能的影响程度.欧志华等^[6]、徐玲琳等^[19]和孙振平等^[20]发现纤维素醚对于水化产物的生成具有一定的延缓作用.本课题组前期研究发现,在一定水化阶段,纤维素醚可促进硫铝酸盐水泥水化产物的生成与转化,不同纤维素醚对硫铝酸盐水泥水化和性能的影响不同^[21-26].

黏结强度是诸多特种砂浆的重要指标之一.为了深入探究纤维素醚结构对CSA水泥砂浆拉伸黏结

强度的影响,本文选取3类共5种纤维素醚对CSA水泥砂浆进行改性,研究纤维素醚取代基团、取代度及掺量对CSA水泥砂浆拉伸黏结强度的影响.同时,采用压汞法(MIP)对纤维素醚改性CSA水泥砂浆的孔结构进行表征.

1 试验

1.1 原材料及配合比

水泥采用52.5级快硬硫铝酸盐水泥,其化学组成¹⁾与矿物组成如表1、2所示.

砂采用水泥胶砂强度检验用ISO标准砂.拌和水采用自来水.

纤维素醚采用3类共5种纤维素醚.其中,一类为羟乙基纤维素醚(HEC),简称为H;一类为羟乙基甲基纤维素醚(HEMC),高、低取代度的HEMC分别简称为EH和EL;一类为羟丙基甲基纤维素醚(HPMC),高、低取代度的HPMC分别简称为PH和PL.试验中选取黏度接近的品种,以避免该参数变动造成的影响.所有纤维素醚的基本参数如表3所示.

表1 硫铝酸盐水泥的化学组成

Table 1 Chemical composition (by mass) of CSA cement

													Unit: %
Al ₂ O ₃	CaO	SO ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	Mn ₂ O ₃	Na ₂ O	P ₂ O ₅	SrO	TiO ₂	IL	
23.84	44.20	15.04	9.82	1.95	0.26	2.46	0.02	0.08	0.11	0.10	0.95	1.17	

表2 硫铝酸盐水泥的矿物组成

Table 2 Mineral composition (by mass) of CSA cement

										Unit: %
C ₄ A ₃ S̄	C ₂ S	C ₃ S̄	C ₄ AF	C ₁₂ A ₇	CT	CaMg(CO ₃) ₂	MgO	Amorphous		
35.4	26.4	14.3	4.6	3.1	1.0	1.5	1.9	11.7		

表3 纤维素醚的基本参数

Table 3 Basic parameters of cellulose ethers

Specimen	Type	Viscosity (Brookfield, 20 r/min, 6#, 20 °C)/(mPa·s)	Methoxyl degree of substitution	Hydroxyalkyl molar substitution
H	HEC	31 950	0	2.50
EH	HEMC	37 150	1.60	0.28
EL	HEMC	36 600	1.35	0.15
PH	HPMC	29 300	1.29	0.78
PL	HPMC	34 000	1.20	0.20

参照JC/T 547—2017《陶瓷砖胶粘剂》规定,采用42.5R普通硅酸盐水泥及不同粒径的集料制成2种混凝土板,吸水率均符合标准,表面拉伸强度至少为1.5 MPa.其主要差别为表面粗糙程度不同,一种为毛面混凝土板(毛面板),基板未经过打磨,表面较

粗糙;另一种为光面混凝土板(光面板),基板经过磨光机打磨,表面较平整光滑.

CSA水泥砂浆固定水灰比为0.56,灰砂比为3.纤维素醚的掺量(以水泥质量计)分别为0.3%和0.6%,在相应试件编号后分别加03、06来表示.参照

1)文中涉及的组成、掺量和水灰比等除特别说明外均为质量分数或质量比.

组为无纤维素醚掺入的CSA水泥砂浆。

1.2 测试方法

保水率的测试参照JGJ/T 70—2009《建筑砂浆基本性能试验方法标准》进行。首先称量定性滤纸、不透水底片与干燥试模的质量；然后将CSA水泥砂浆填入试模，插捣刮平后，抹去多余砂浆，称重；接着用纱布和定性滤纸覆盖在砂浆表面，再用不透水片及重物压在表面上，2 min后取出滤纸，称重；最后通过计算得到砂浆的保水率，结果如表4所示。

表4 砂浆保水率
Table 4 Water retention rate of fresh mortar

Specimen	Water retention rate(by mass)/%
Control	88.9
H-03	99.8
EH-03	99.8
EL-03	99.8
PH-03	99.8
PL-03	99.8
H-06	99.8
EH-06	99.9
EL-06	99.8
PH-06	99.8
PL-06	99.8

拉伸黏结强度测试参照GB/T 29756—2013《干混砂浆物理性能试验方法》进行。在光面板上，用橡胶模具成型40 mm × 40 mm × 5 mm的试样，养护龄期为7、28 d，各龄期下10个试样；在毛面板上，由于粗糙面表面不均匀，故用较大的橡胶模具成型50 mm × 50 mm × 5 mm的试样，养护龄期为1、7、28 d，各龄期下8个试样。试样的成型和养护均在(20 ± 2) °C、相对湿度(60 ± 5)%的环境下进行。测试前24 h用乐为E-51(618)环氧树脂、593固化剂、P II 525水泥混合制成的高强黏结剂将拉拔铁块粘在试样成型面上，继续养护至规定龄期进行测试；龄期为1 d的试样需在成型20 h时脱模并粘贴拉拔铁块，到24 h时再进行测试。

参照GB/T 17671—2021《水泥胶砂强度检验方法(ISO法)》，成型40 mm × 40 mm × 160 mm的试样，于28 d破碎取样以进行MIP测试，样品尺寸不超过15 mm。测试前，将样品放入10倍于其质量的无水乙醇中浸泡48 h后取出，置于真空干燥箱内在40 °C下烘至恒重。采用AutoPore V 9620型压汞仪测定水泥砂浆的孔隙率，压力范围为3 447.38 ~ 4.3 × 10⁸ Pa。

2 结果与讨论

2.1 拉伸黏结强度

图1为毛面板上纤维素醚改性CSA水泥砂浆的拉伸黏结强度。总体而言，纤维素醚改性CSA水泥砂浆的拉伸黏结强度普遍高于未改性砂浆，掺加的纤维素醚种类、掺量不同，试件拉伸黏结强度差异显著。

图1(a)为纤维素醚掺量为0.3%时改性CSA水泥砂浆的拉伸黏结强度。由图1(a)可以看出：拉伸黏结强度随着龄期的增大略有变化，说明1 d时CSA水泥砂浆的拉伸黏结强度已充分发展，而后变化不显著；与未改性砂浆相比，H改性砂浆试件H-03的1、7、28 d拉伸黏结强度分别提高了128%、150%、163%，EH改性砂浆试件EH-03分别提高了33%、78%、84%，EL改性砂浆试件EL-03分别提高了61%、152%、94%，PH改性砂浆试件PH-03分别提高了37%、32%、45%，PL改性砂浆试件PL-03分别提高了121%、128%、88%。可以发现，在5种纤维素醚中，HEC对砂浆拉伸黏结强度的增强能力要高于HEMC(EH、EL)和HPMC(PH、PL)，其中PH对拉伸黏结强度的增强能力最弱；在同类纤维素醚中，取代度对拉伸黏结强度的影响显著，就拉伸黏结强度增强效果而言，EL > EH，PL > PH，即低取代度纤维素醚改性砂浆的拉伸黏结强度明显高于高取代度纤维素醚改性砂浆。

图1(b)为纤维素醚掺量为0.6%时改性CSA水泥砂浆的拉伸黏结强度。由图1(b)可见，与未改性砂浆相比，试件H-06的1、7、28 d拉伸黏结强度分别提高了132%、138%、153%，试件EH-06分别提高了16%、30%、17%，试件EL-06分别提高了26%、56%、51%，试件PH-06的1、7 d拉伸黏结强度分别降低了14%、8%，28 d强度提高了36%，试件PL-06的1、7、28 d拉伸黏结强度分别提高了25%、49%、79%。

比较图1(a)、(b)发现，在毛面板上，0.6%纤维素醚掺量下龄期、纤维素醚种类对CSA水泥砂浆拉伸黏结强度的影响与0.3%掺量下类似，0.6%掺量的纤维素醚对于砂浆拉伸黏结强度的提高作用明显更低，且取代度不同所致拉伸黏结强度的差距也变小。

图2是光面板上纤维素醚改性CSA水泥砂浆的拉伸黏结强度。由图2(a)可见，在0.3%纤维素醚掺量下，光面板上未改性砂浆的拉伸黏结强度极低，只有0.2 MPa左右，小于其在毛面板上的拉伸黏结强度。与未改性砂浆相比，试件H-03的7、28 d拉伸黏结强度分别提高了239%、162%，试件EH-03分别提高

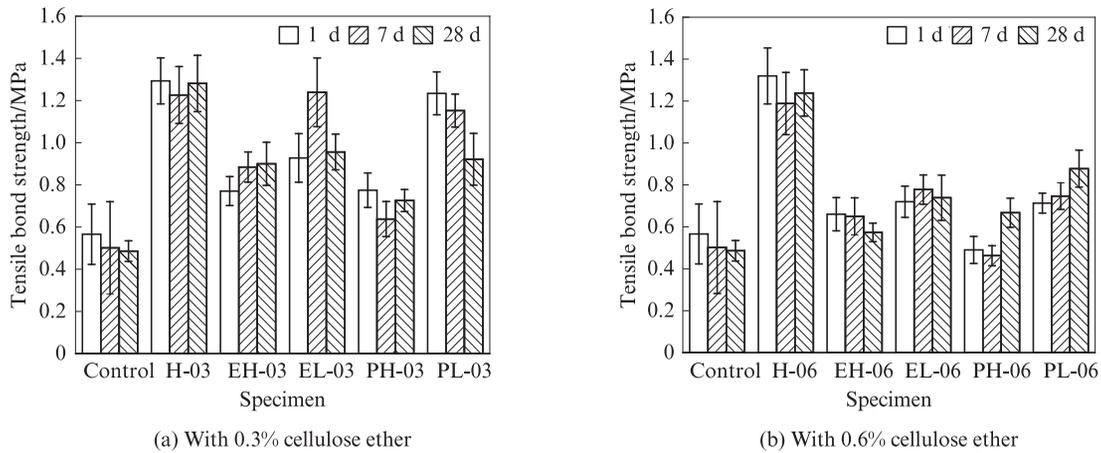


图1 毛面板上纤维素醚改性CSA水泥砂浆的拉伸黏结强度

Fig. 1 Tensile bond strength of cellulose ether modified CSA cement mortars on rough concrete slabs

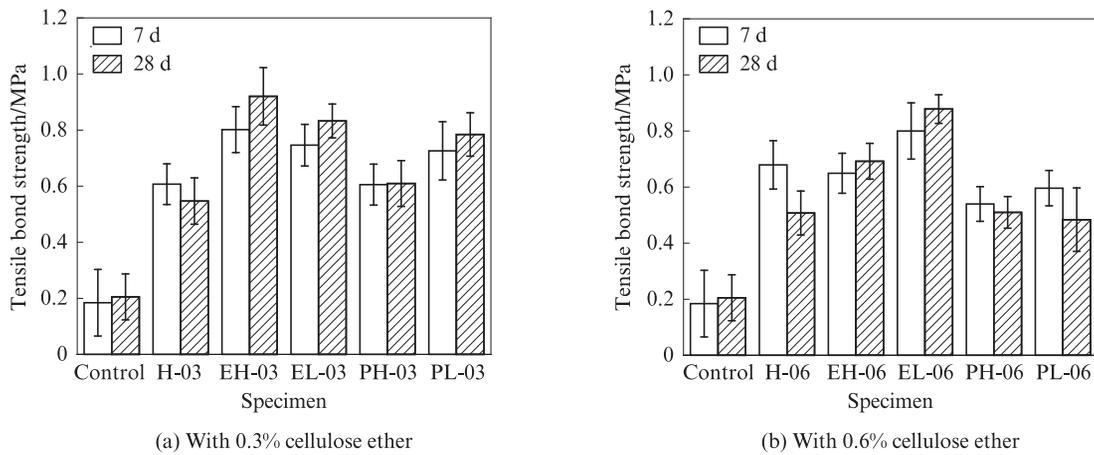


图2 光面板上纤维素醚改性CSA水泥砂浆的拉伸黏结强度

Fig. 2 Tensile bond strength of cellulose ether modified CSA cement mortars on smooth concrete slabs

了344%、338%，试件EL-03分别提高了317%、295%，试件PH-03分别提高了239%、190%，试件PL-03分别提高了306%、271%。纤维素醚对于拉伸黏结强度的增强效果从高到低为：HEMC>HPMC>HEC，其中EH>EL，PL>PH。除H改性砂浆是7d强度高于28d强度之外，其余纤维素醚改性砂浆的28d强度均高于7d强度。

由图2(b)可见，在0.6%纤维素醚掺量下，与未改性砂浆相比，试件H-06的7、28d拉伸黏结强度分别提高了278%、143%，试件EH-06分别提高了261%、229%，试件EL-06分别提高了344%、319%，试件PH-06分别提高了200%、143%，试件PL-06分别提高了233%、129%。纤维素醚对于拉伸黏结强度的增强效果从高到低为HEMC>HEC>HPMC。总体上HEMC改性砂浆的28d拉伸黏结强度略高于7d时，HEC和HPMC改性砂浆的28d拉伸黏结强度略低于7d时。

对比图2(a)、(b)发现，PH、PL和EH掺量从

0.3%增加到0.6%时拉伸黏结强度降低，而H和EL掺量从0.3%增加到0.6%时拉伸黏结强度提高。对改善砂浆拉伸黏结强度来说，各种纤维素醚的最佳掺量还有待进一步探索。

毛面板和光面板上CSA水泥砂浆的拉伸黏结强度存在一些相似的变化规律：2种板上改性砂浆的强度均高于未改性砂浆；同类纤维素醚中，低取代度纤维素醚改性砂浆的拉伸黏结强度大体上高于高取代度纤维素醚改性砂浆；大多数情况下，HEMC改性砂浆的拉伸黏结强度普遍高于HPMC改性砂浆，HEC改性砂浆普遍具有较高的拉伸黏结强度。另外，两者也存在显著的区别：虽然光面板上拉伸黏结强度的提高幅度均大于毛面板，但是毛面板上的拉伸黏结强度普遍高于光面板；HEC改性砂浆在毛面板上具有最高的拉伸黏结强度，在光面板上则没有优势，甚至不如其他纤维素醚改性砂浆。

2.2 拉伸破坏模式

一般拉伸黏结的破坏模式有2种：一种是发生在

砂浆和混凝土板界面处的界面破坏,此时混凝土板上会残留少量砂浆;另一种是发生在砂浆内部的内聚破坏,代表着砂浆与混凝土之间的界面作用力大于砂浆内部的内聚力.在毛面板上,未改性砂浆和低掺量改性砂浆大的破坏模式多为界面破坏,而高掺量改性砂浆的破坏模式大多为内聚破坏.说明在高掺量下,砂浆的内部强度低于界面强度,其拉伸黏结强度较低掺量下更低.在光面板上则不同,高掺量的试件也大多是界面破坏.由于表面粗糙度的不同,光面板上的拉伸黏结强度普遍低于毛面板,因此在高掺量下,光面板上的破坏模式普遍为界面破坏,而在毛面板上更多为内聚破坏.

2.3 孔径分布和孔隙率

纤维素醚具有引气作用,其对砂浆性能的影响大多与其对砂浆孔隙的影响有关.本文纤维素醚结构对拉伸黏结强度的影响也可能与其对砂浆孔隙的影响密切相关,因此接下来研究纤维素醚结构对砂浆的孔径分布和孔隙率的影响.图3为28 d龄期时未改性砂浆与改性砂浆的孔径分布曲线.

由图3(a)可知,未改性砂浆的孔径分布曲线只在5 nm~0.1 μm 范围内存在1个峰,0.3%纤维素醚的掺入使该峰的峰值略有增大.此外,更重要的是,

纤维素醚的掺入引入了2个新峰,分别位于0.1~5.0 μm 和5.0~100.0 μm 范围内.说明纤维素醚在砂浆中引入了气泡,显著增加了微米级孔隙.纤维素醚种类不同,其影响存在差异.比较可知,PH改性砂浆在0.1~5.0 μm 范围内峰值最低,但在5.0~100.0 μm 范围内峰值大于其他纤维素醚改性砂浆,表明PH倾向于引入更大的孔隙.而其余纤维素醚改性砂浆的最大峰值大多出现在5 nm~0.1 μm 范围内,并且孔径分布曲线上3个峰的峰值相差不大.

由图3(b)可知,掺入0.6%纤维素醚时,各砂浆在5 nm~0.1 μm 范围内的峰无显著差异,但在0.1~5.0 μm 和5.0~100.0 μm 范围内的2个新峰存在较大差异.0.1~5.0 μm 的峰中,试件EL-06的峰最高,并且EL-06>EH-06,PL-06>PH-06,H-06最低;在5.0~100.0 μm 范围内,试件PH-06的峰最高,其次是EH-06,再次是PL-06、H-06、EL-06,说明掺入HPMC时改性砂浆大孔体积大于掺入HEMC时;低取代度纤维素醚改性砂浆在0.1~5.0 μm 范围内的孔体积较大,而在5.0~100.0 μm 范围内的孔体积较小,说明低取代度纤维素醚引入的小孔多、大孔少,高取代度纤维素醚则引入的小孔少、大孔多,纤维素醚掺量越高,5.0~100.0 μm 内峰值越大,大孔体积也增大.

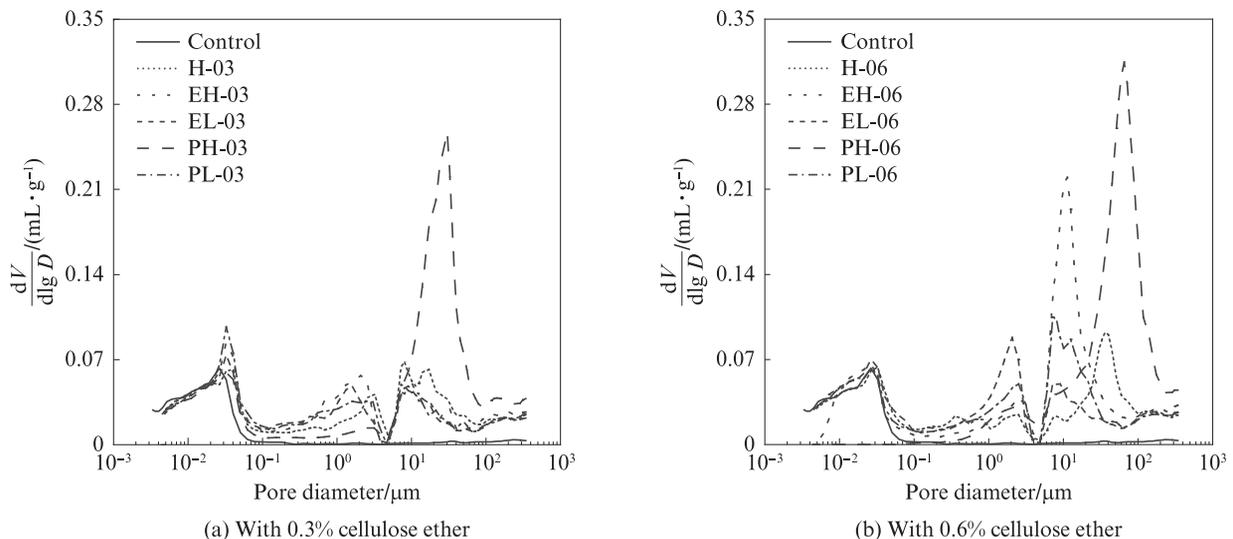


图3 28 d龄期时未改性砂浆与改性砂浆的孔径分布曲线

Fig. 3 Pore size distribution curves of unmodified and modified mortars at 28 d

图4为28 d龄期时未改性砂浆与改性砂浆的孔隙率.由图4可知:掺加纤维素醚后,由于纤维素醚具有引气作用,砂浆的孔隙率大幅增加,不同种类、不同掺量的纤维素醚对砂浆孔隙率的影响存在差异;纤维素醚掺量为0.3%时,HEC改性砂浆孔隙率比高取代度的EH和PH改性砂浆要小,较低取代度EL和PL改性砂浆略大;纤维素醚掺量为0.6%时,HEC

改性砂浆的孔隙率明显低于高取代度EH和PH改性砂浆,与低取代度PH和EH改性砂浆持平;取代度相似情况下,HPMC改性砂浆的孔隙率大于HEMC改性砂浆,尤其是高取代度时.这是由于HEC不含憎水性强的甲基基团,其溶液的表面张力高于HPMC与HEMC,HPMC较HEMC表面张力更低^[24-25],具有更强的引气作用.就同类纤维素醚而言,高取代度的

纤维素醚改性砂浆的孔隙率更大.这是由于取代度越高,羟基基团数量越多,降低了体系溶液的表面张力^[26],具有更强的引气作用.纤维素醚掺量由0.3%增大到0.6%时,砂浆孔隙率增大,但HEC和HPMC改性砂浆孔隙率增大幅度较小.

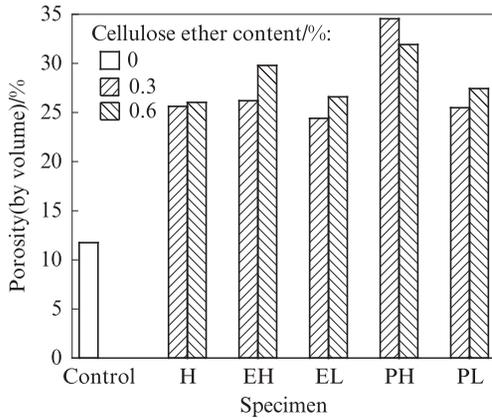


图4 28 d龄期时未改性砂浆与改性砂浆的孔隙率
Fig. 4 Porosity of unmodified and modified mortars at 28 d

2.4 拉伸黏结强度影响因子模型

根据试验结果提出拉伸黏结强度影响因子模型,如图5所示.试验发现,相较于未改性砂浆88.9%的保水率,掺入纤维素醚后,砂浆的保水率得到较好

的保持,均在99.8%左右.这说明改性砂浆的水分不易被基材吸收.此外,纤维素醚作为聚合物,能够有效改善砂浆的韧性,抵抗因收缩造成的应力^[12].这些是纤维素醚改性砂浆相较未改性砂浆具有更高拉伸黏结强度的根本原因.

在良好保水率的基础上,基材的粗糙程度会对拉伸黏结强度产生较大的影响,主要表现为其对砂浆拉伸黏结强度和破坏模式的影响.光面板表面较为光滑,大多发生界面破坏;而在粗糙程度较大的毛面板上,易发生内聚破坏,砂浆与界面处强度大于砂浆内部的强度.毛面板上的拉伸黏结强度大于光面板上的,因此粗糙表面有利于提升界面黏结强度.

当基底表面粗糙程度相同时,对黏结性影响较大的是改性砂浆的性质.纤维素醚的种类和掺量都会对砂浆的孔隙率产生较大影响,从而影响拉伸黏结强度.纤维素醚改性砂浆的孔隙率对于其在相同基材上的拉伸黏结强度起到决定性作用.一般而言,孔隙率较小的改性砂浆强度相对较高,孔隙率较大的改性砂浆强度较低.在试验掺量范围内,低取代度和低掺量的纤维素醚改性砂浆的孔隙率更低,具有较高的拉伸黏结强度.

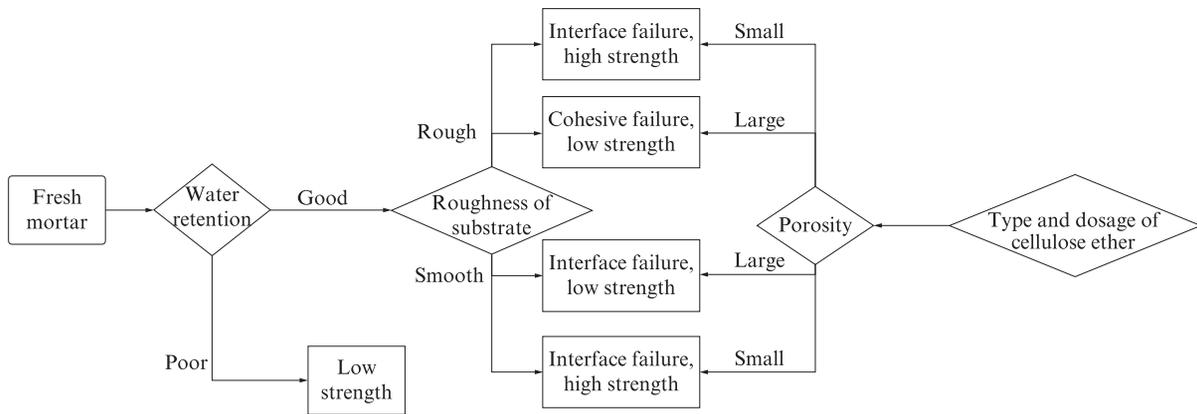


图5 拉伸黏结强度影响因子模型
Fig. 5 Mode of tensile bond strength influence factors

3 结论

(1)纤维素醚能够有效改善硫铝酸盐水泥砂浆的拉伸黏结强度.纤维素醚改性砂浆在不同粗糙度的基材上呈现出不同的拉伸黏结强度和破坏模式.在光面板上的拉伸黏结强度普遍低于毛面板,表面粗糙度较小时破坏主要发生在界面处,表面粗糙度较大且纤维素醚掺量较多时,易发生内聚破坏.在毛面板上,羟乙基纤维素醚对拉伸黏结强度的改善效果最好;而在光面板上,羟乙基甲基纤维素醚对拉伸

黏结强度的改善效果最好.

(2)在同种基材上,纤维素醚改性砂浆的拉伸黏结强度与砂浆孔隙率呈负相关,一般而言孔隙率越大,拉伸黏结强度越小.羟乙基甲基纤维素醚的孔隙率较羟丙基甲基纤维素醚要小,前者改性砂浆拉伸黏结强度更高.在同类纤维素醚当中,高取代度纤维素醚的引气较多,孔隙率较大,相对应的改性砂浆拉伸黏结强度较低.

(3)纤维素醚改性砂浆的拉伸黏结强度与砂浆保水率、基材表面粗糙度和砂浆自身的孔隙率密切

相关,而纤维素醚对砂浆保水率和孔隙率有显著影响,且不同取代基和取代度的影响均不同。

参考文献:

- [1] 李启棣, 吴淑华. 硫铝酸盐水泥混凝土的特性及其应用[J]. 铁道建筑, 1985(4):16-20.
LI Qidi, WU Shuhua. Characteristics and application of sulphoaluminate cement concrete[J]. Railway Engineering, 1985(4):16-20. (in Chinese)
- [2] 王燕谋, 苏慕珍, 张量. 硫铝酸盐水泥[M]. 北京:北京工业大学出版社, 1999:179-198.
WANG Yanmou, SU Muzhen, ZHANG Liang. Sulfoaluminate cement[M]. Beijing: Beijing University of Technology Press, 1999:179-198. (in Chinese)
- [3] 蹇守卫, 马保国, 苏雷, 等. 纤维素醚改性砂浆的研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2011, 30(3):560-566.
JIAN Shouwei, MA Baoguo, SU Lei, et al. Research progresses of cellulose ether-modified mortar[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2011, 30(3):560-566. (in Chinese)
- [4] 张国防, 王培铭, 张永明. 纤维素醚改性水泥浆体物理性能的研究[C]// 首届全国商品砂浆学术会议论文集. 北京:机械工业出版社, 2005:293-298.
ZHANG Guofang, WANG Peiming, ZHANG Yongming. The physical properties of cement pastes modified with cellulose ether [C]// 1st National Conference on Commercial Mortar. Beijing: China Machine Press, 2005:293-298. (in Chinese)
- [5] 欧志华, 马保国, 蹇守卫, 等. 纤维素醚分子参数对水泥浆体性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2016, 35(8):2371-2377.
OU Zhihua, MA Baoguo, JIAN Shouwei, et al. Influence of cellulose ethers molecular parameters on mechanical properties of cement pastes[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2016, 35(8):2371-2377. (in Chinese)
- [6] 欧志华, 毛泰威, 沈燕华, 等. 纤维素醚对不同水泥和单矿水化热的影响[J]. 硅酸盐通报, 2016, 35(5):1606-1611.
OU Zhihua, MAO Taiwei, SHEN Yanhua, et al. Influence of cellulose ethers on hydration heat of different cements and single mines[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2016, 35(5):1606-1611. (in Chinese)
- [7] POURCHEZ J, GROSSEAU P, ROUËCHE-POURCHEZ E, et al. Impact of cellulose ethers on the cement paste microstructure [C]// 10th International Conference and Exhibition of the European Ceramic Society. Berlin:Göller Verlag, 2007:2045-2050.
- [8] 詹镇峰, 李从波, 陈文钊. 纤维素醚的结构特点及对砂浆性能的影响[J]. 混凝土, 2009(10):110-112.
ZHAN Zhenfeng, LI Congbo, CHEN Wenzhao. Structure characteristic of cellulose ethers and its effect on mortar performances[J]. Concrete, 2009(10):110-112. (in Chinese)
- [9] 张国防, 王培铭. 羟乙基甲基纤维素影响水泥浆体微观结构的研究[C]// 第三届全国商品砂浆学术交流会论文集. 武汉:中国硅酸盐学会, 中国建筑学会, 2009:141-148.
ZHANG Guofang, WANG Peiming. Effects of hydroxyethyl methyl cellulose on the microstructure of cement pastes[C]// 3rd National Conference on Commercial Mortar. Wuhan: Chinese Portland Society, Architectural Society of China, 2009:141-148. (in Chinese)
- [10] 张国防, 王培铭. 羟乙基甲基纤维素对水泥水化的影响[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2009, 37(3):369-373.
ZHANG Guofang, WANG Peiming. Effect of hydroxyethyl methyl cellulose on cement paste hydration[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2009, 37(3):369-373. (in Chinese)
- [11] 王培铭, 许琦, 李纹纹. 羟乙基甲基纤维素对水泥砂浆性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2000, 3(4):305-309.
WANG Peiming, XU Qi, LI Wenwen. Effect of hydroxyethyl methylcellulose on properties of cement mortar[J]. Journal of Building Materials, 2000, 3(4):305-309. (in Chinese)
- [12] 黄连根. 掺纤维素醚水泥浆料对瓷砖粘结的改善[J]. 江西建材, 1997, (4):17-25.
HUANG Liangen. Improvement of cellulose ethers mixed cement paste on ceramic tile bonding [J]. Jiangxi Building Materials, 1997, (4):17-25. (in Chinese)
- [13] POURCHEZ J, PESCHARD A, GROSSEAU P, et al. HPMC and HEMC influence on cement hydration [J]. Cement and Concrete Research, 2005, 36(2):288-294.
- [14] POURCHEZ J, GROSSEAU P, GUYONNET R, et al. HEC influence on cement hydration measured by conductometry[J]. Cement and Concrete Research, 2006, 36(9):1777-1780.
- [15] BENTZ D P, HAECHEER C J, PELTZ M A, et al. X-ray absorption studies of drying of cementitious tile adhesive mortars [J]. Cement and Concrete Composites, 2007, 30(5):361-373.
- [16] POURCHEZ J, GROSSEAU P, RUOT B. Current understanding of cellulose ethers impact on the hydration of C₃A and C₃A-sulphate systems[J]. Cement and Concrete Research, 2009, 39(8):664-669.
- [17] 李建, 王肇嘉, 黄天勇, 等. HEMC对硫铝酸盐水泥砂浆性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(1):199-206.
LI Jian, WANG Zhaojia, HUANG Tianyong, et al. Influence of HEMC on properties of sulphoaluminate cement mortar [J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(1):199-206. (in Chinese)
- [18] 吴凯, 康旺, 徐玲琳, 等. 羟乙基甲基纤维素对硫铝酸盐水泥早期水化的影响[J]. 硅酸盐学报, 2020, 48(5):615-621.
WU Kai, KANG Wang, XU Linglin, et al. Influence of hydroxyethyl methyl cellulose on early hydration of calcium sulfoaluminate cement [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2020, 48(5):615-621. (in Chinese)
- [19] 徐玲琳, 杨肯, 穆帆远, 等. 纤维素醚对硫铝酸盐水泥浆体水组分及水化产物演变的影响[J]. 材料导报, 2022, 36(10):57-62.
XU Linglin, YANG Ken, MU Fanyuan, et al. Effect of cellulose ether on the water and hydration products evolution of calcium sulfoaluminate cement paste [J]. Materials Reports, 2022, 36(10):57-62. (in Chinese)
- [20] 孙振平, 穆帆远, 康旺, 等. 纤维素醚改性硫铝酸盐水泥浆体中可蒸发水的¹H低场核磁弛豫特征[J]. 硅酸盐学报, 2019, 47(8):1109-1115.