

文章编号:1007-9629(2023)09-1023-09

高掺量丁苯乳液改性硫铝酸盐水泥的早期性能

元 强^{1,2}, 谢宗霖^{1,2}, 姚 灏^{1,2,*}, 张建强³, 姜孟杰^{1,2}

(1. 中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410075; 2. 中南大学 高速铁路建造技术国家
工程研究中心, 湖南 长沙 410075; 3. 中国铁路上海局集团有限公司, 上海 200071)

摘要:研究了丁苯(SBR)乳液掺量对硫铝酸盐水泥流变性能、水化放热及水化产物的影响.结果表明,当SBR乳液掺量超过20%时,硫铝酸盐水泥净浆的固含量增大,聚合物加速聚集黏附,增加了净浆的屈服应力和塑性黏度,缩短了净浆的凝结时间并增大了浆体的水化放热,钙矾石随着SBR乳液掺量的增大逐渐增多,促进了硫铝酸盐水泥的早期水化进程.

关键词:硫铝酸盐水泥;丁苯乳液;流变性能;水化;物相组成

中图分类号:TU528.042

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2023.09.010

Early Performance of High Use Level Styrene-Butadiene Rubber Latex Modified Sulphoaluminate Cement

YUAN Qiang^{1,2}, XIE Zonglin^{1,2}, YAO Hao^{1,2,*}, ZHANG Jianqiang³, JIANG Mengjie^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China; 2. National Engineering
Research Center of High-Speed Railway Construction Technology, Central South University, Changsha
410075, China; 3. China Railway Shanghai Bureau Group Co., Ltd., Shanghai 200071, China)

Abstract: The influence of styrene-butadiene rubber(SBR) latex content on the rheological properties, hydration heat release, and hydrates of sulphoaluminate cement(SAC) was investigated. The results show that if the SBR latex content is more than 20%, with increasing SBR latex content, the solid content of cement paste increases, and the agglomeration and adherence of the polymer are accelerated. It improves yield stress and plastic viscosity, shortens the setting time, and increases hydration heat release of cement paste. The content of ettringite gradually increases with the increase of SBR latex content. Therefore, high use level of SBR latex can promote the early hydration of SAC.

Key words: sulphoaluminate cement; styrene-butadiene rubber latex; rheological property; hydration; phase composition

硫铝酸盐水泥(SAC)具有快硬、早强等优点,已经被广泛应用于桥梁、道路等抢修工程之中^[1-3].聚合物乳液能够显著改善修复用水泥的韧性和耐久性.其中,丁苯(SBR)乳液因具有缓冲减振、弹性模量可调的特点,是聚合物复合硫铝酸盐水泥的优选材料^[4].

既有研究和工程应用主要关注SBR乳液掺量不超过20%的改性硫铝酸盐水泥.SBR乳液之所以能

够提高硫铝酸盐水泥的韧性和耐久性,一般认为是聚合物颗粒破乳后形成了三维网状聚合物薄膜,改善了水泥基材料的脆性和界面微结构^[5-6].此外,SBR乳液改性硫铝酸盐水泥的流变性能和凝结时间等早期性能直接影响其运输和施工^[7-11].研究表明,SBR乳液可以降低硫铝酸盐水泥的屈服应力和黏度,原因在于聚合物颗粒在浆体中的滚珠和引气作用^[8-9].同

收稿日期:2022-11-03; 修订日期:2022-12-01

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51922109);中国中铁股份有限公司科技研究开发计划项目(2020-专项-02);“十四五”国家重点研发计划项目(2022YFB2602600)

第一作者:元 强(1981—),男,江西乐安人,中南大学教授,博士生导师,博士. E-mail: yuanqiang@csu.edu.cn

通讯作者:姚 灏(1991—),男,江西浮梁人,中南大学讲师,硕士生导师,博士. E-mail: yaohao@csu.edu.cn

时,SBR乳液减缓了水泥早期水化的动力^[6],聚合物的吸附会阻碍未水化的水泥与水接触.对SBR乳液进行羧基改性能够进一步提升其增稠和缓凝效果^[11-14].根据Q/CR 659—2018《高速铁路混凝土结构用修补砂浆》,为满足CRTS I型板充填层修补砂浆100~300 MPa的低弹性模量要求,SBR乳液掺量需要高达50%.高掺量SBR乳液对硫铝酸盐水泥性能影响的研究尚不充分.

鉴于此,本文系统研究了SBR乳液掺量(质量分数,文中涉及的含量、掺量、组成、水灰比等除特别说明外均为质量分数或质量比)对硫铝酸盐水泥流变性能、水化放热与水化产物等早期性能的影响,并结合热重(DTG)和X射线衍射(XRD)测试半定量分析了水化产物的含量变化,研究成果可以为高掺量SBR乳液改性硫铝酸盐水泥的应用提供参考.

1 试验

1.1 原材料与浆体配比

水泥采用郑州建文科技有限公司产的硫铝酸盐水泥,其化学组成和矿物组成分别如表1、2所示.SBR乳液由丁二烯和苯乙烯共聚,固含量为50%,SBR聚合物的傅里叶红外光谱(FIR)图谱如图1所示.由图1可见,图谱中主要为亚甲基峰和苯环峰,无1 700、1 150 cm⁻¹峰,表明SBR分子结构上不含羧基.

表1 SAC的化学组成
Table 1 Chemical composition of SAC

w/%							
CaO	SO ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	MgO	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	K ₂ O
44.44	18.07	15.06	8.74	2.27	1.66	0.67	0.61

表2 SAC的矿物组成
Table 2 Mineral composition of SAC

w/%				
C ₄ A ₃ S	C ₂ S	CaSO ₄	Calcite	Dolomite
24.2	26.9	25.3	12.2	8.1

表3 SBR乳液改性硫铝酸盐水泥的配合比
Table 3 Mix proportions of SBR latex modified SAC

Specimen	w(SBR latex)/%	Mix proportion/g				m _w /m _c
		Water	SAC	SBR latex	Defoaming agent	
SBR-0	0	250.0	500.0	0	0.5	0.5
SBR-10	10	200.0	500.0	100.0	0.5	0.5
SBR-20	20	150.0	500.0	200.0	0.5	0.5
SBR-30	30	100.0	500.0	300.0	0.5	0.5
SBR-40	40	50.0	500.0	400.0	0.5	0.5
SBR-50	50	0	500.0	500.0	0.5	0.5

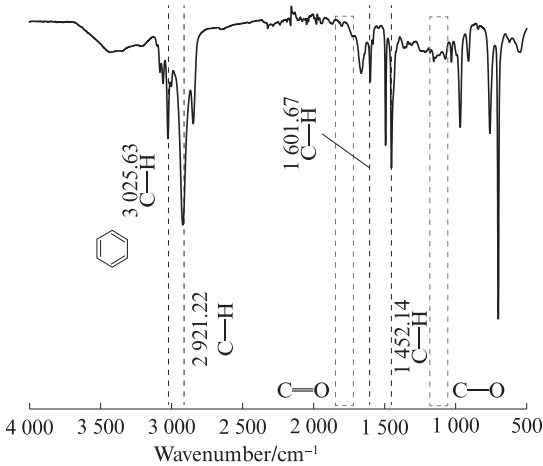


图1 SBR分子的FTIR图谱
Fig. 1 FTIR spectrum of SBR molecule

硫铝酸盐水泥和SBR聚合物颗粒的粒径分布见图2.由图2可见,聚合物颗粒的平均粒径为0.21 μm,远小于水泥颗粒的平均粒径15.48 μm.为在一定程度上降低SBR乳液的引气效果,试验选择ZJ-D130消泡剂.

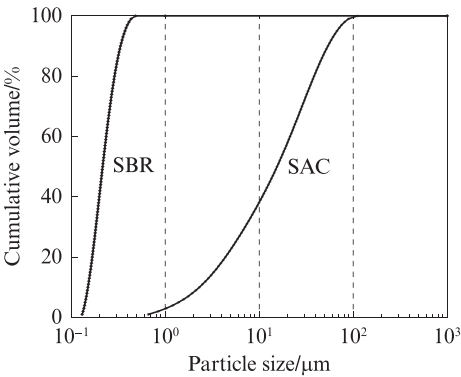
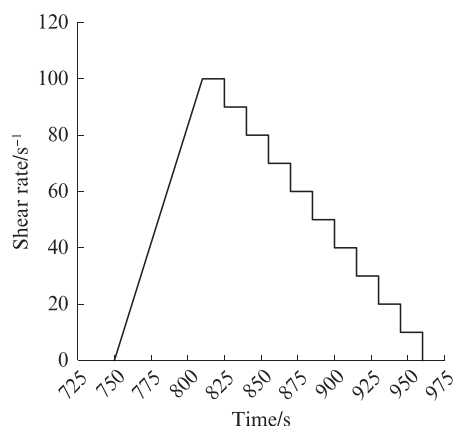


图2 硫铝酸盐水泥和SBR颗粒的粒径分布
Fig. 2 Particle size distributions of SAC and SBR

为研究高掺量SBR乳液对硫铝酸盐水泥流变性能、早期水化放热和水化产物的影响,试验控制水灰比(m_w/m_c)恒定为0.5,SBR乳液掺量从0%到50%,设置6组样品,具体配合比如表3所示.

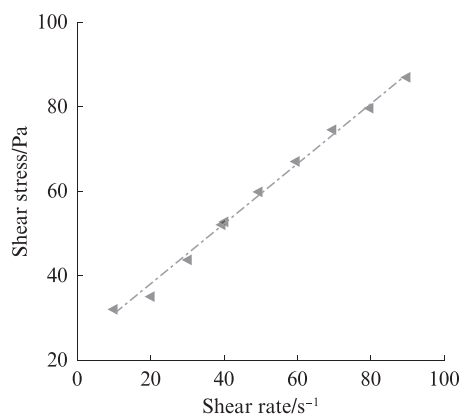
1.2 试验方法

水泥净浆的搅拌采用符合JC/T 729—2005《水泥净浆搅拌机》的水泥净浆搅拌机.在搅拌锅中依次加入称量好的水与乳液,低速搅拌1 min后加入粉体材料(水泥+外加剂).混合程序为:低速搅拌1.0 min后静置30 s(过程中快速将叶片和锅壁的胶砂刮入锅中),然后再快速搅拌2.0 min,最后低速搅拌1.0 min.



(a) Shear scheme

(1)流变测试:水泥净浆流变测试使用 Rheolab QC 型流变仪,扭矩和剪切应力的转换系数为 $1\ 887\ 876\ \text{Pa}/(\text{m}\cdot\text{Nm})$,剪切速率和速度的转换系数为 $0.497\ 1\ \text{s}^{-1}/\text{min}^{-1}$.在硫铝酸盐水泥与水接触后12.5 min开始测试,程序如图3(a)所示.采用Bingham模型拟合下降阶段($90\ \text{s}^{-1}$ 到 $10\ \text{s}^{-1}$)剪切应力-剪切速率曲线^[15-16],拟合流变曲线示意图见图3(b).



(b) Fitting curve

图3 水泥净浆流变测试

Fig. 3 Rheological shear test of cement paste

(2)凝结和水化测试:采用GL-AWK型自动维卡仪测定SBR乳液改性硫铝酸盐水泥净浆的初凝和终凝时间;量热试验使用TAM Air型八通道等温量热仪,严格控制环境温度为 $20\ ^\circ\text{C}$.统一不同掺量SBR乳液改性硫铝酸盐水泥净浆的比热,计算得出用于测试的混合物质量分别为5.19、5.50、5.80、6.10、6.40、6.69 g,对应SBR乳液掺量从低到高的6个梯度.

(3)物相组成测试:将水化12.5、30.0 min后的样品浸泡于异丙醇中混合研磨10.0 min,并用抽滤器(孔径 $2.5\ \mu\text{m}$)对其进行抽滤处理,抽滤后的粉体置于真空干燥箱烘干保存.采用Mettler-Toledo TGA2型TGA和Bruker D8-Advance型XRD测试粉体的物相组成,并采用DTG曲线计算净浆中物相的质量变化以及采用Highscore Plus软件进行半定量分析.

(4)形貌测试:将水化5.0 min后的SBR乳液改性硫铝酸盐水泥样品在异丙醇中超声分散10.0 min,抽滤后放入真空干燥箱中干燥3 d.采用日本JSM-IT500型扫描电镜(SEM)在 $20\ \text{kV}$ 加速电压下对喷金后的样品进行测试.

2 结果与分析

2.1 SBR乳液掺量对流变性能的影响

不同掺量SBR乳液改性硫铝酸盐水泥净浆在12.5 min的流变曲线如图4(a)所示.使用Bingham模

型(相关系数 $R^2 > 0.95$)计算净浆的屈服应力和塑性黏度如图4(b)所示.由图4可见:水泥净浆SBR-0的屈服应力和塑性黏度分别为 $7.311\ \text{Pa}$ 和 $0.425\ \text{Pa}\cdot\text{s}$;随着SBR乳液掺量的增加,水泥净浆的屈服应力和塑性黏度开始下降;当SBR乳液掺量不低于30%时,水泥净浆的屈服应力和塑性黏度开始快速上升;当SBR乳液掺量增加为50%时,水泥净浆SBR-50的屈服应力和塑性黏度分别达 $86.006\ \text{Pa}$ 和 $0.692\ \text{Pa}\cdot\text{s}$,显著大于空白组水泥净浆.

低掺量SBR乳液能够降低水泥的屈服应力和塑性黏度,可以归因为乳胶颗粒在水泥净浆中的滚珠作用^[7].即当水泥中SBR聚合物颗粒的含量不高时,其滚珠作用起主导作用,导致硫铝酸盐水泥的屈服应力和黏度降低.不同的是:当SBR乳液掺量从20%持续增加到50%时,SBR聚合物的含量逐渐增多,相同体积水泥净浆的固含量增大,摩擦阻力增加,滚珠作用显著降低,屈服应力和塑性黏度提高;另一方面,部分聚合物颗粒聚集粘附^[17],也能促进净浆屈服应力和塑性黏度的提升.

2.2 SBR乳液掺量对早期水化放热的影响

SBR乳液改性硫铝酸盐水泥净浆的初凝、终凝时间如表4所示.从表4可以看出,当SBR乳液掺量为10%或20%时,硫铝酸盐水泥净浆的初凝和终凝时间均延长,这个结果与既有文献报道相符^[6].SBR

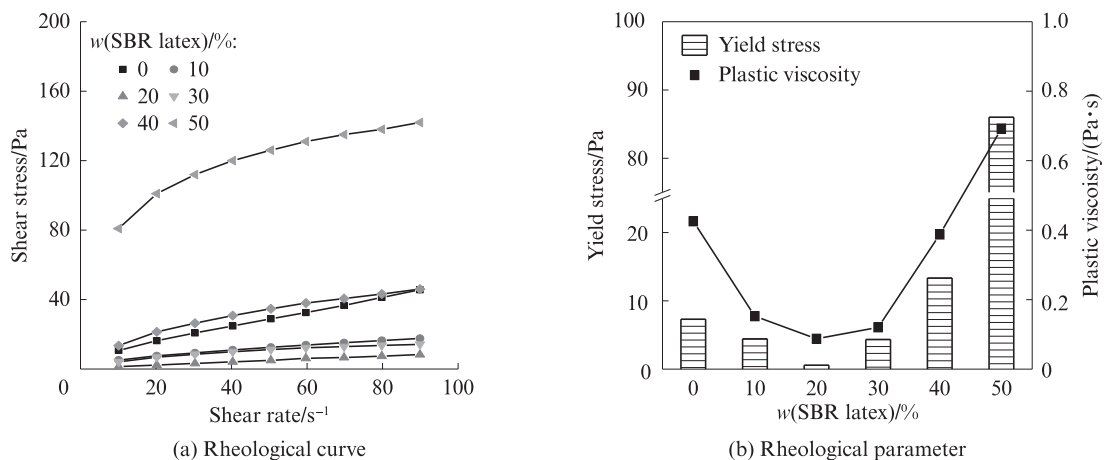


图4 不同测试组的流变曲线和流变参数

Fig. 4 Rheological curves and parameters of different test groups

表4 SBR乳液改性硫铝酸盐水泥净浆的凝结时间
Table 4 Setting times of SBR latex modified SAC pastes

Specimen	Setting time/min		Specimen	Setting time/min	
	Initial	Final		Initial	Final
SBR-0	21	26	SBR-30	21	28
SBR-10	28	49	SBR-40	20	26
SBR-20	25	43	SBR-50	20	30

聚合物颗粒吸附在水泥颗粒表面,进一步包裹部分水泥颗粒,阻碍水泥的水化进程.然而,当SBR乳液掺量继续增加时,SBR乳液改性硫铝酸盐水泥净浆的凝结时间开始逐渐缩短,并接近空白组试件SBR-0,这个现象目前未有报道.

为深入解释高掺量SBR乳液缩短硫铝酸盐水泥

的凝结时间,进一步利用量热测试分析体系水化放热速率和总放热量,结果如图5所示.水化热曲线均为每克水泥的放热速率和累计放热量.由图5可见:

(1)SBR乳液的加入未改变水化放热速率曲线的典型特征,但降低了水泥净浆早期的放热速率,且随着SBR乳液掺量的增加,作用效果更加明显.当SBR乳液掺量超过30%时,水泥净浆的水化放热速率开始上升.

(2)水化总放热量也呈现出同样的趋势.随着SBR乳液掺量的持续增加,水泥净浆在相同时间内的总放热量先降低后增加.结果表明,SBR乳液对硫铝酸盐水泥具有缓凝作用,其效果存在一个临界值,较低掺量的SBR乳液能促进硫铝酸盐水泥的早期水化.

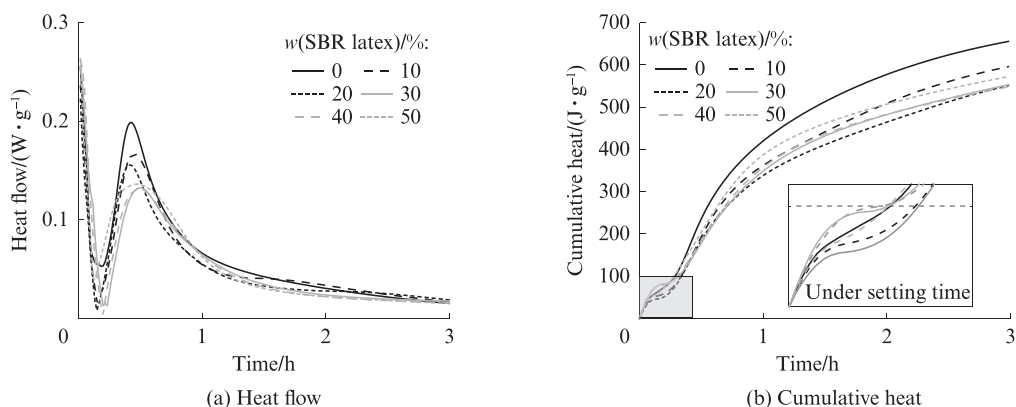


图5 不同测试组的水化曲线

Fig. 5 Hydration curves of different test groups

进一步使用水化动力学模型(边界成核BNG模型)进行分析,结果如表5所示.其中:成核常数 K_N 表示单位体积浆体中水化产物覆盖水泥颗粒表面的速率,生长常数 K_G 表示单位体积浆体中颗粒间孔隙空间的填充速率^[15].由表5可见:SBR乳液在一定程度上抑制了硫铝酸盐水泥的水化,降低了

水合物的成核和生长动力学参数;随着SBR乳液掺量的增加,硫铝酸盐水泥的成核和生长动力学参数增大,符合凝结时间先增大后降低的趋势.

2.3 SBR乳液掺量对物相组成的影响

为研究SBR乳液掺量对改性硫铝酸盐水泥物相组成的影响,测试了SBR乳液改性硫铝酸盐水泥在

表5 SBR乳液改性硫铝酸盐水泥的水化动力学参数			
Table 5 Hydration kinetic parameters of SBR latex modified SAC			
Specimen	K_G/h^{-1}	$K_N \times 10^{-3}/\text{h}^{-3}$	R^2
SBR-0	0.506 9	4.356 7	0.996
SBR-10	0.492 1	3.456 8	0.995
SBR-20	0.463 8	1.231 6	0.994
SBR-30	0.470 2	1.489 7	0.995
SBR-40	0.513 3	2.356 2	0.993
SBR-50	0.532 8	2.856 1	0.991

水化12.5、30.0 min时的DTG曲线,结果如图6所示.由图6可见:水化12.5 min时,根据不同物相的分解温度^[18-21],可知样品中存在钙矾石(AFt)、石膏、CaCO₃等矿物和SBR聚合物;水化30.0 min时,石膏被完全消耗,AFt的分解峰显著增强,单硫型硫铝酸钙(AFm)逐渐产生;此外,图中未见明显的氢氧化钙(CH)分解峰(350~550℃),这可能是由于硅酸二钙(C₂S)早期水化速率缓慢且生成的CH与硫铝酸钙反应被消耗所致.

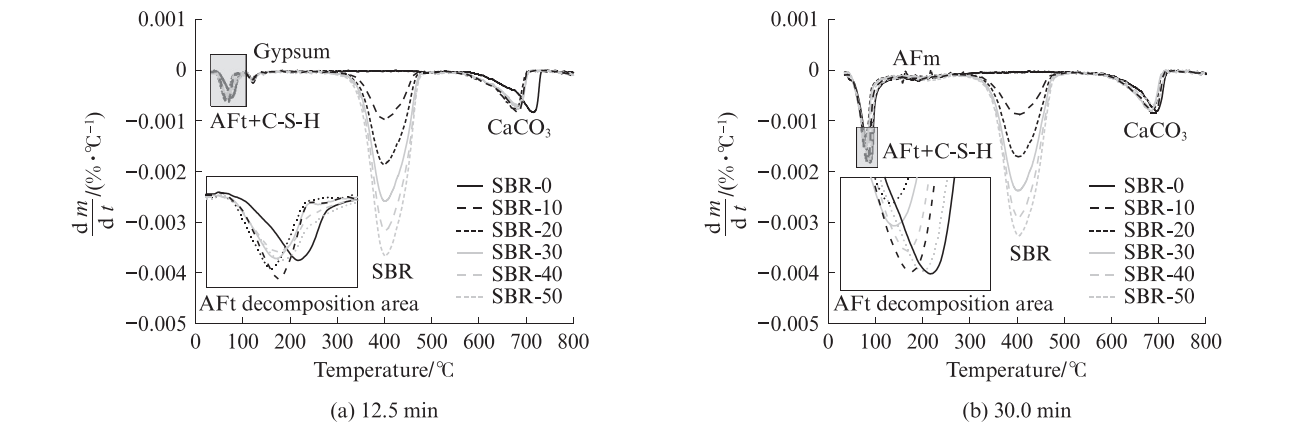


图6 不同样品的DTG曲线
Fig. 6 DTG curves of different specimens

研究发现,C₂S浆体水化18 h后生成的CH含量小于1%^[22],生成的水化硅酸钙(C-S-H)凝胶含量则更小,图6中C-S-H凝胶的分解峰不明显.因此,本文将50~120℃的质量损失视为AFt的分解,350~550℃的质量损失视为SBR聚合物的分解.由于硫铝酸盐水泥的水化产物没有单一的分解峰,在半定量分析前,本文将水化产物AFt的含量转换为硫铝酸

盐水泥含量,而非水泥-SBR乳液混合物含量,结果如表6所示.由表6可见:SBR聚合物的含量有呈线性增长的趋势,这与配合比设计过程中SBR乳液的掺量相匹配,未完全线性是因为硫铝酸盐水泥早期水化生成的少量CH同样分解;从水化12.5 min到水化30.0 min,SBR乳液掺量和AFt含量都增加了2倍以上,说明硫铝酸盐水泥仍在快速水化.

表6 不同测试组SBR和水化产物的含量			
Table 6 Content of SBR and hydration products of different test groups			
Specimen	12.5 min		30.0 min
	SBR	AFt	AFt
SBR-0	0	1.526	5.276
SBR-10	7.937	1.662	5.407
SBR-20	15.021	1.630	4.524

Specimen	12.5 min		30.0 min
	SBR	AFt	AFt
SBR-30	21.348	1.695	5.241
SBR-40	26.255	1.951	6.186
SBR-50	30.712	2.451	7.238

进一步使用XRD对改性硫铝酸盐水泥的物相进行分析,结果如图7所示.其中:Z为标底物ZnO的含量.由图7可见:在水化12.5、30.0 min的样品中均出现了AFt、硫铝钙石、石膏、CaCO₃和CH等的衍射峰;除衍射峰强度外,SBR乳液的掺入及其掺量变化未引发新的衍射峰.因此,本研究未发现SBR与硫铝酸盐水泥作用有新产物生成,这与现有报道一致^[23].

采用HighScore Plus软件对XRD图谱进行半定量计算分析,结果如图8所示.由图8可见,随着水化龄期的增加,AFt的含量显著增加,其他物相被不同程度地消耗,这与DTG结果相符.在硫铝酸盐水泥体系中,AFt的产生途径主要有2种,其区别可以用是否有CH参与反应来判断:当石膏存在时,无水硫铝酸钙与石膏反应生成AFt和铝胶;当石膏充足时,

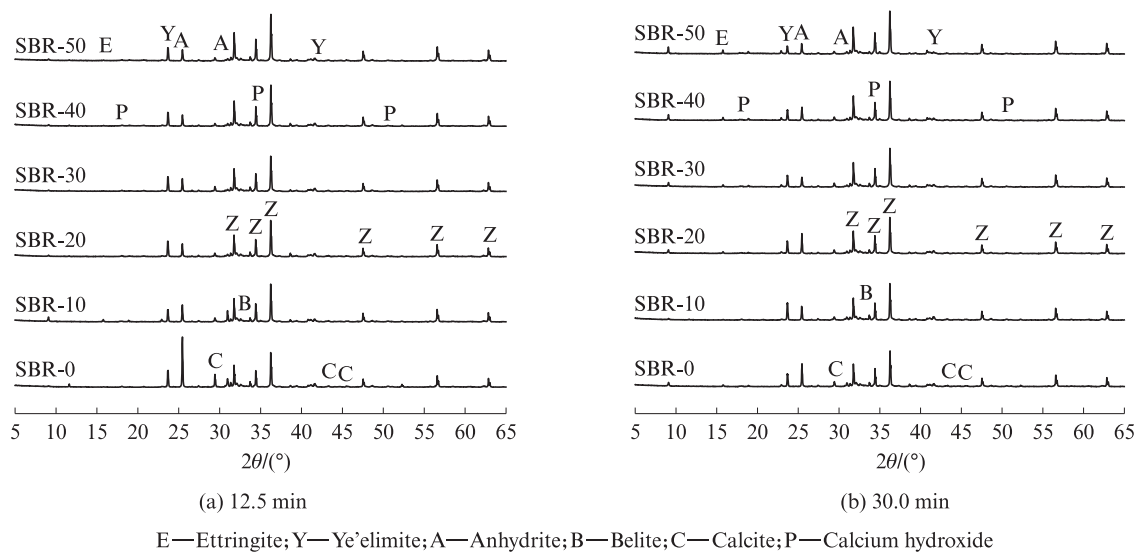


图7 不同测试组XRD谱

Fig. 7 XRD patterns of different test groups

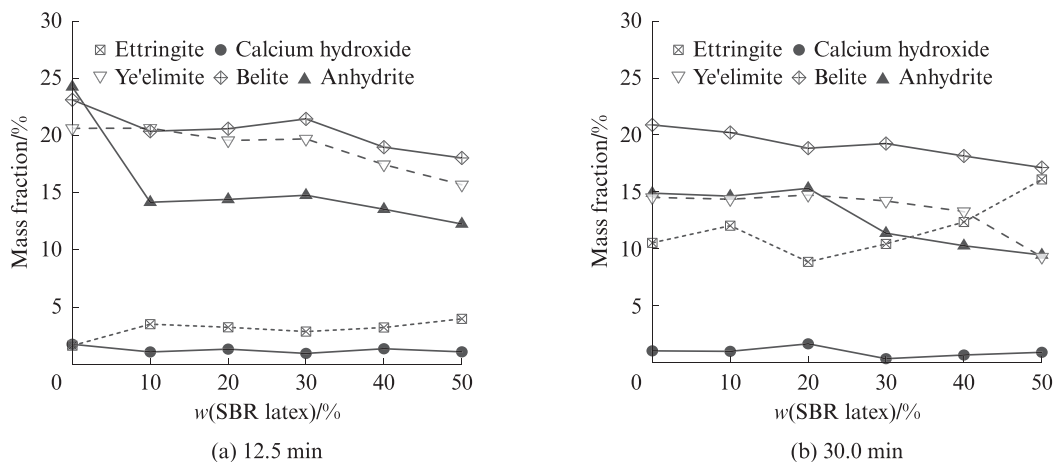


图8 不同测试组矿物的半定量含量

Fig. 8 Semi-quantitative contents of minerals in different test groups

CH能够参与上述反应,加速生成AFt^[18].

在硫铝酸盐-SBR乳液体系中,当SBR乳液掺量不超过20%时,虽然C₂S溶解,CH含量提高,但生成的CH并未充分与无水硫铝酸钙继续反应生成AFt,这可能是硫铝酸盐水泥凝结时间延长的原因.当SBR乳液掺量不低于30%时,C₂S进一步溶解,反应生成的CH含量逐渐降低且AFt含量进一步提升,这表明生成的CH充分与无水硫铝酸钙发生了反应.因此,相对于低掺量SBR乳液(不超过20%),高掺量SBR乳液能够一定程度上促进硫铝酸盐水泥的水化反应进程.

2.4 SBR乳液掺量对微观结构的影响

用SEM对不同SBR乳液掺量的硫铝酸盐水泥早期样品的形貌进行表征,结果如图9所示.由图9可见:随着SBR乳液掺量的增大,硫铝酸盐水泥颗粒的表面形貌发生了很大的变化;在水化5.0 min时,净

浆试件SBR-0中能够观察到水泥颗粒表面粗糙,覆盖有细小的水合物,AFt逐渐生成;当SBR乳液掺量为20%时,连续且较为光滑的SBR聚合物膜包裹部分水泥颗粒,水泥颗粒之间互相交联;当SBR乳液掺量为50%时,聚合物膜变厚,且分布范围几乎覆盖所有的水泥颗粒.

此外,在整个样品中观察到元素的不均匀分布.在叉点处使用能谱扫描,发现Pt元素的峰强在不同样品中皆较高,系样品表面喷金所致,消除Pt元素影响后的元素含量如表7所示.由表7可见:

(1)添加了SBR乳液的硫铝酸盐水泥样品的C含量显著高于SBR-0.当SBR乳液为50%时,C含量为44.14%;当SBR乳液为20%时,C含量为40.61%,表明叉点处为SBR乳液脱水并胶结后形成的乳胶,同时证实了SBR聚合物对硫铝酸盐水泥颗粒的覆盖包裹作用.

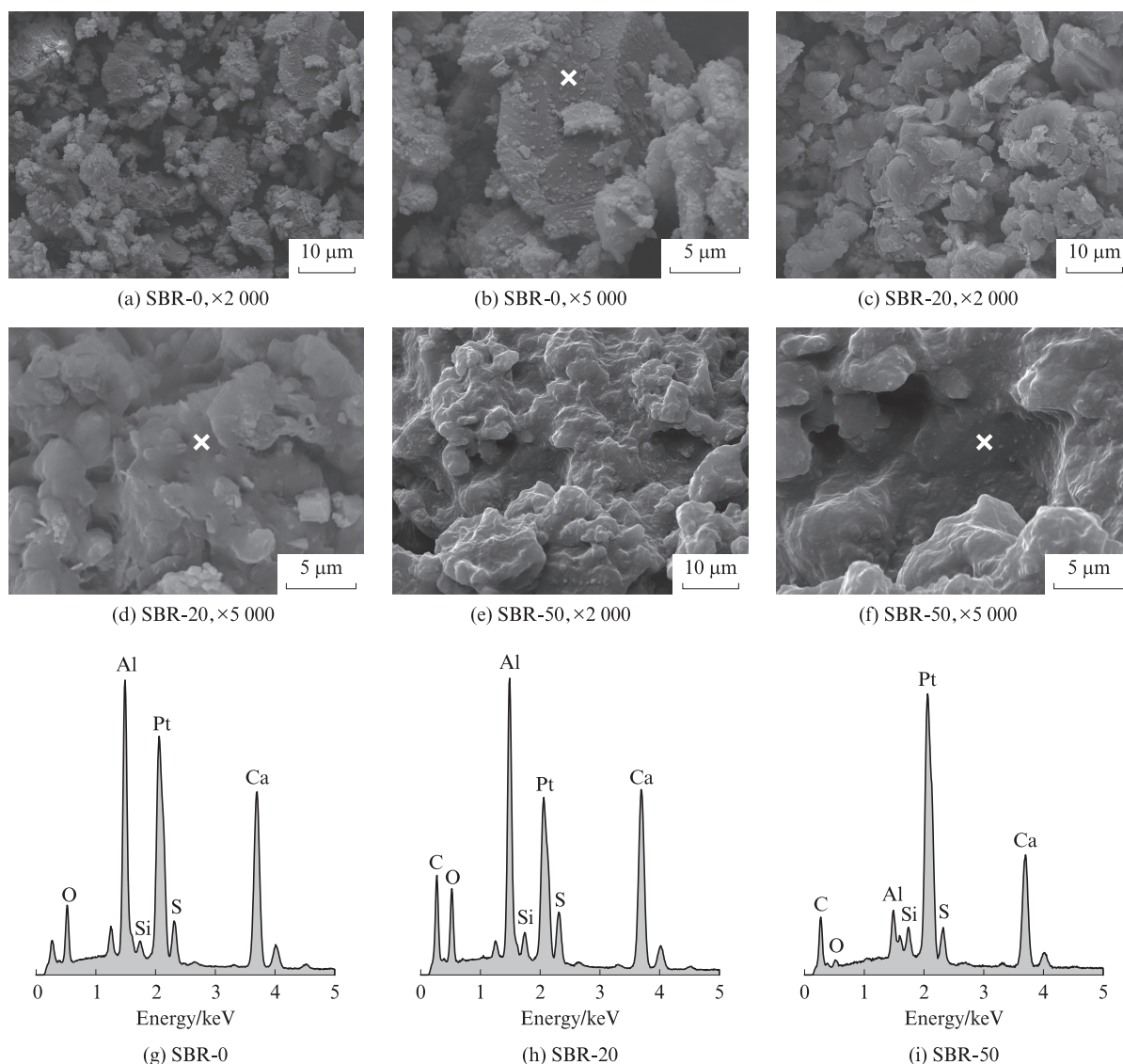


图9 不同测试组 5.0 min 水合物的扫描电镜结果

Fig. 9 SEM results of hydrates in different test groups at 5.0 min

表7 不同测试组叉点处的元素含量
Table 7 Element content in different test groups

Specimen	C	O	Al	Si	S	Ca
SBR-0		30.52	24.15	1.77	2.79	29.33
SBR-20	40.61	24.95	11.96	1.20	2.17	16.29
SBR-50	44.14	10.88	5.79	3.78	2.57	30.67

(2)此外,与SBR乳液掺量为20%时相比,SBR乳液掺量为50%时的O元素含量降低,Ca元素含量升高.这可能是由于表层的聚合物胶结物厚度增加,SBR聚合物分子不含O元素,因此O元素含量相对较低.同时,电子束打穿在Ca含量大的矿物或水化产物上,因此C、Ca元素含量升高.

由前文可知,SBR乳液改性硫铝酸盐水泥的早期性能与SBR乳液掺量密切相关.本文采用的SBR乳液固含量为50%,和文献报道使用的聚合物乳液

固含量类似^[5-6],为高固含量聚合物乳液.当SBR乳液掺量不超过20%时,硫铝酸盐水泥的溶解-水化过程需求体系中的水分属于额外引入的水,起到了稀释聚合物乳液的作用,减小了SBR乳液的固含量.但仍存在部分聚合物颗粒脱水,起滚珠作用,减小了硫铝酸盐水泥的屈服应力和塑性黏度.当SBR乳液掺量不低于20%且随着掺量继续增大,尤其是SBR乳液掺量为50%时,硫铝酸盐水泥需求的水分全部来自于乳液,导致体系中自由水的含量急剧下降,此时SBR乳液的固含量显著增大,导致稳定的乳液状态被破坏,大量的聚合物颗粒加速聚集黏附,进一步将多个水泥颗粒连成整体,相同体积水泥浆体的固含量增大,摩擦阻力也进一步增大.因此,高掺量SBR乳液显著增强了硫铝酸盐水泥的屈服应力和塑性黏度.此外,SBR乳液对硫铝酸盐水泥具有缓凝作用,

但该效果受SBR乳液掺量的影响显著,在高掺量条件下,硫铝酸盐水泥水化动力学过程加快, K_N 和 K_G 均增大,钙矾石的含量提高。

3 结论

(1)当SBR乳液掺量不超过20%时,乳胶颗粒的滚珠作用为主导,能够降低水泥净浆的屈服应力和塑性黏度。随着SBR乳液掺量的进一步升高,相同体积水泥净浆的固含量增大,摩擦阻力增加,聚合物聚集黏附,水泥净浆的屈服应力和塑性黏度提高。

(2)SBR乳液对硫铝酸盐水泥具有缓凝作用,但效果受SBR乳液掺量的影响显著。相较于低掺量,高掺量SBR乳液促进了硫铝酸盐水泥水化的动力学过程。当SBR乳液掺量大于20%时,硫铝酸盐水泥净浆的凝结时间逐渐趋近空白组,并且硫铝酸盐水泥的水化放热速率和总放热逐渐增大。

(3)当硫铝酸盐水泥的水化时间从12.5 min增加到30.0 min时,钙矾石的含量显著增加。当SBR乳液掺量大于20%时, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 充分参与反应,钙矾石的含量随着SBR乳液掺量的增大逐渐升高。

参考文献:

- [1] ZENG Z P, YE M X, WANG W D, et al. Analysis on mechanical characteristics of CRTSII slab ballastless track structures in rectification considering material brittleness [J]. Construction and Building Materials, 2022, 319: 126058.
- [2] 廖宜顺, 王思纯, 廖国胜, 等. 葡萄糖酸钠对硫铝酸盐水泥水化历程的影响[J]. 材料导报, 2023, 37(9):1-14.
LIAO Yishun, WANG Sichun, LIAO Guosheng, et al. Effect of sodium gluconate on hydration process of calcium sulphoaluminate cement [J]. Materials Review, 2023, 37(9): 1-14. (in Chinese)
- [3] 王茹, 张韬, 不同温湿度下丁苯乳液/硫铝酸盐水泥砂浆的干缩率[J]. 建筑材料学报, 2018, 21(5):768-774.
WANG Ru, ZHANG Tao. Dry shrinkage rate of styrene-butadiene copolymer dispersion/calcium sulphoaluminate cement mortar under different curing temperature and humidity [J]. Journal of Building Materials, 2018, 21(5):768-774. (in Chinese)
- [4] STARR J, SOLIMAN E M, MATTEO E N, et al. Mechanical characterization of low modulus polymer-modified calcium-silicate-hydrate (C-S-H) binder [J]. Cement and Concrete Composites, 2021, 124:104219.
- [5] SHI C, WANG P, MA C Y, et al. Effects of SAE and SBR on properties of rapid hardening repair mortar [J]. Journal of Building Engineering, 2020, 35(2):102000.
- [6] LI L, WANG R, LU Q Y. Influence of polymer latex on the setting time, mechanical properties and durability of calcium sulfoaluminate cement mortar [J]. Construction and Building Materials, 2018, 169:911-922.
- [7] SUN K, WANG S P, ZENG L, et al. Effect of styrene-butadiene rubber latex on the rheological behavior and pore structure of cement paste [J]. Composites Part B: Engineering, 2019, 163: 282-289.
- [8] ASSAAD J. Development and use of polymer-modified cement for adhesive and repair applications [J]. Construction and Building Materials, 2018, 163:139-148.
- [9] KIM H K, JEON J H, LEE H K. Workability, and mechanical, acoustic and thermal properties of lightweight aggregate concrete with a high volume of entrained air [J]. Construction and Building Materials, 2012, 29:193-200.
- [10] YANG Z, SHI X, CREIGHTON A T, et al. Effect of styrene-butadiene rubber latex on the chloride permeability and microstructure of Portland cement mortar [J]. Construction and Building Materials, 2009, 23(6):2283-2290.
- [11] BAUEREGER S, PERELLO M, PLANK J. Influence of carboxylated styrene-butadiene latex copolymer on Portland cement hydration [J]. Cement and Concrete Composites, 2015, 63:42-50.
- [12] BESSAIE-BEY H, BAUMANN R, SCHMITZ M, et al. Effect of polyacrylamide on rheology of fresh cement pastes [J]. Cement and Concrete Research, 2015, 76:98-106.
- [13] YAO H, FAN M H, HUANG T J, et al. Retardation and bridging effect of anionic polyacrylamide in cement paste and its relationship with early properties [J]. Construction and Building Materials, 2021, 306:124822.
- [14] YUAN Q, XIE Z L, YAO H, et al. Comparative study on the early properties of cement modified with different ionic polyacrylamides [J]. Construction and Building Materials, 2022, 339:127671.
- [15] HUANG T J, LI B Y, YUAN Q, et al. Rheological behavior of Portland clinker-calcium sulphoaluminate clinker-anhydrite ternary blend [J]. Cement and Concrete Composites, 2019, 104: 103403.
- [16] JIAO D W, SHI C J, YUAN Q, et al. Effect of constituents on rheological properties of fresh concrete-A review [J]. Cement and Concrete Composites, 2017, 83:146-159.
- [17] 王培铭, 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.
WANG Peiming, ZHAO Guorong, ZHANG Guofang. Research progress on microstructure of polymer cement concrete [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2014, 42(5): 653-660. (in Chinese)
- [18] 王茹, 周袁宇, 刘校荣, 等. HPMC对硫铝酸钙水泥水化的影响 [J]. 建筑材料学报, 2023, 26(5):538-546.
WANG Ru, ZHOU Yuanyu, LIU Xiaorong, et al. Effect of HPMC on the hydration of calcium sulfoaluminate cement [J]. Journal of Building Engineering, 2023, 26(5): 538-546. (in Chinese)
- [19] 徐玲琳, 杨青, 穆帆远, 等. 纤维素醚对硫铝酸盐水泥浆体水组