文章编号:1007-9629(2024)06-0536-07

水玻璃种类对聚合物改性碱激发矿渣性能的影响

潘　晔[1,2]，　卢子臣[1,2,*]，　杨晓杰[1,2]，　马一平[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:从水化过程、力学性能、收缩性能等方面系统研究了2种水玻璃对苯丙乳液(SA乳液)改性碱激发矿渣(AAS)性能的影响及其作用机理,以期指导SA乳液在AAS中的应用.结果表明:钾水玻璃(PWG)加速矿渣水化进程的能力强于钠水玻璃(SWG);SA乳液不影响AAS的水化进程,不会阻碍水化硅酸钙/水化硅铝酸钙的生成,但会抑制水滑石的生成;SA乳液显著降低了AAS的抗压强度,并且对PWG激发AAS的影响强于SWG激发AAS;AAS的抗折强度随着SA乳液掺量的增加呈先增大后减小的趋势,在SWG与PWG激发AAS中,SA乳液的最佳掺量分别为2.5%与5.0%;PWG激发AAS在14 d内的总变形量高于SWG激发AAS,SA乳液可显著降低硬化浆体的总收缩量.

关键词:水玻璃;聚合物乳液;碱激发矿渣;水化进程;力学性能
中图分类号:TU528.042　　**文献标志码:**A　　**doi:**10.3969/j.issn.1007-9629.2024.06.008

Effect of Different Water Glass on Properties of Polymer Modified Slag

PAN Ye[1,2], *LU Zichen*[1,2,*], *YANG Xiaojie*[1,2], *MA Yiping*[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: The effects of two types of water glass on the properties of styrene-acrylic latex(SA latex) modified alkali-activated slag(AAS) were investigated from hydration process, mechanical strength and shrinkage. The results show that potassium water glass(PWG) is stronger to accelerate the hydration process of slag than sodium water glass(SWG). The SA latex does not hinder the hydration process of AAS and the formation of hydrate calcium silicate/stratlingite, but inhibits the formation of hydrotalcite. The SA latex significantly reduces the compressive strength of AAS, and its effect on PWG-activated slag is stronger than SWG-activated slag. The flexural strength of AAS shows a tendency to firstly increase and then reduce along with the increased SA latex dosage. The optimal dosages of the SA latex in SWG-activated slag and PWG-activated slag are 2.5% and 5.0%, respectively. The total deformation caused by PWG was higher than that of SWG in 14 d, and the SA latex can significantly reduce the total shrinkage of hardened pastes.

Key words: water glass; polymer latex; alkali-activated slag; hydration; mechanical property

碱激发胶凝材料(AAM)是一种利废节能且具有良好工程性能的绿色低碳建筑材料[1-2].然而,限制AAM发展的一个关键因素为其较大的脆性和较高的收缩[3].聚合物乳液是一种常用的水泥基材料外加剂,可显著改善其流变性、黏结性及抗收缩性等[4-6],因此诸多研究聚焦于聚合物乳液对AAM性能的影响[7-12].Lee等[7]研究发现,丁二烯乳液显著降低了钠水玻璃激发粉煤灰/矿渣的抗折强度与抗压强度.

收稿日期:2023-07-24; 修订日期:2023-11-06
基金项目:非金属材料创新中心TDA项目(2023TDA6-2)
第一作者:潘　晔(2000—),男,安徽安庆人,同济大学硕士生. E-mail:2130616@tongji.edu.cn
通讯作者:卢子臣(1987—),男,河北涿州人,同济大学副教授,博士生导师,博士. E-mail:luzc@tongji.edu.cn

Kusbiantoro等[8]和Ribeiro等[9]研究发现,随着温度的升高,掺加适量聚合物对提高AAM的强度有益.El-Yamany等[10]和Vo等[11]对丁苯乳液、丙烯酸酯和苯丙乳液的研究也得到了相似的结论.Lu等[12]研究发现,苯丙乳液在掺量为2.5%时能显著提高碱激发矿渣的抗折强度.

聚合物乳液通过在水泥混凝土中稳定成膜来发挥功效.显然,为对比聚合物乳液对AAM性能的影响,其基本前提为聚合物乳液的稳定存在.然而,由于碱激发体系较高的pH值及离子强度,在水泥中可以稳定存在的聚合物乳液在AAM中极可能失稳破乳[12].同时,基于碱激发剂的多样性,同一前驱体在不同激发剂作用下的性能差别显著.相较于对激发剂中阴离子的诸多研究,对其中阳离子的作用仍缺乏系统认知.

考虑到钠碱与钾碱为AAM常用的碱激发剂,本文系统研究带有不同阳离子的水玻璃对苯丙乳液(SA乳液)改性碱激发矿渣(AAS)性能的影响,以期为SA乳液在AAS中的应用提供理论指导.

1　试验

1.1　原材料

粒化高炉矿渣的化学组成(质量分数,文中涉及的组成、含量、水胶比等除特别说明外均为质量分数或质量比)与粒径分布分别如表1和图1所示.矿渣粒径在75 μm内,中值粒径(d_{50})为11.5 μm.钾水玻璃(PWG)和钠水玻璃(SWG)购自德国沃尔纳公司,未经进一步处理,其模数分别为1.02和1.81,pH值分别为14.3与13.5,固含量分别为40.0%和44.5%.为确保聚合物乳液在碱激发体系中可以稳定存在,基于前期研究成果,本文选用乳液类型为SA乳液[13],其中值粒径为185 nm,乳液粒子的Zeta电位为−22.2 mV,固含量53.5%.

表1　矿渣的化学组成

Table 1　Chemical composition(by mass) of slag

Unit: %

SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	Fe_2O_3	SO_3
35.4	13.1	39.8	8.2	0.4	0.6	<0.5	1.2

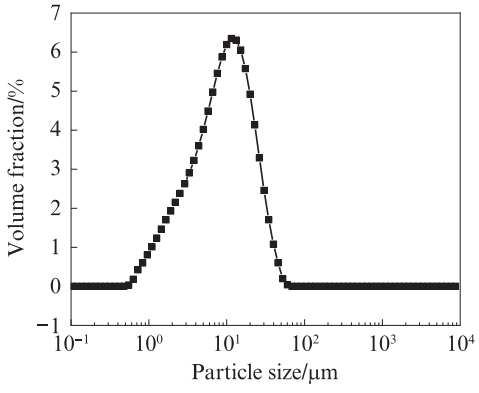


图1　矿渣的粒径分布

Fig. 1　Particle size distribution of slag

1.2　样品制备

SWG激发体系中Na_2O掺量为矿渣质量的2.5%,水玻璃掺量为矿渣质量的6.9%,配制浆体离心获得的上清液的初始pH值为12.62.由于K、Na元素相对原子质量的差异,为对比相同碱金属质量分数与摩尔浓度下不同水玻璃对AAS性能的影响,PWG激发体系中K_2O掺量为矿渣质量的2.5%(相同质量浓度)与3.8%(相同摩尔浓度),对应水玻璃掺量为矿渣质量的4.1%和6.3%,配制浆体离心获得的上清液对应的初始pH值分别为13.39和13.55.浆体水胶比为0.5,SA乳液掺量分别为0%、2.5%、5.0%、10.0%.样品编号为激发剂+Na_2O/K_2O掺量+SA乳液掺量,如SWG-2.5%表示激发剂为SWG,Na_2O掺量为2.5%,其余以此类推.为避免乳液的引气作用,消泡剂掺量固定为矿渣质量的0.08%.采用行星式搅拌机将矿渣、水和水玻璃低速(140 r/min)搅拌1 min,静置5 min后加入聚合物乳液与消泡剂,再高速(285 r/min)搅拌1 min.

1.3　试验方法

采用TAM-Air八通道量热仪测试AAS的水化过程,试验配合比如**1.2**中所述.测试选用内搅拌方式,将装有10 g矿渣的安瓿瓶及装有水玻璃溶液与SA乳液的注射器连接好后置于设备内部稳定12 h,其后将水玻璃溶液注入矿渣中,充分混合30 s后开始记录数据,再将SA乳液注入,混合30 s.测试温度为20 ℃,测试时间为168 h.

采用德国耐驰TG209 F3 Tarsus型热重分析仪(TG-DTG)测试AAS的水化产物,测试温度范围为室温至1 000 ℃,升温速率为10 ℃/min,测试氛围为氮气.采用德国兹韦克罗睿Toni Technik Model 2060型压力机,以2.4 kN/s的加载速率测定硬化浆体(2 cm×2 cm×2 cm)在不同龄期的强度,每个龄期下重复3次,结果取其平均值.采用德国史来宾格Shrinkage drain型收缩测量仪测试硬化浆体(6 cm×4 cm×50 cm)的收缩形变.用塑料薄膜对样品进行保水密封,以测试前7 d的自收缩形变,随后撤去塑

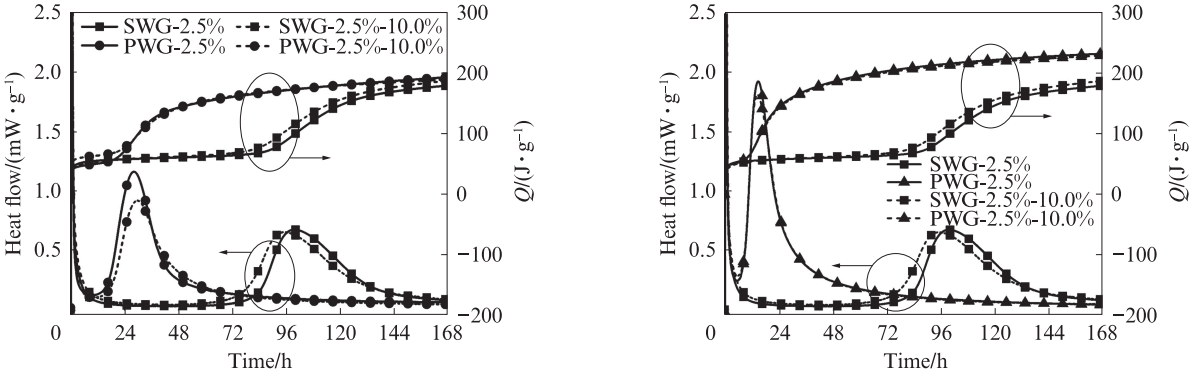
料薄膜，再测量后7 d的干燥收缩形变．使用Porosimeter 2000型压汞仪（MIP）测量样品在终止水化后的孔径分布和总孔隙率．

2 结果与讨论

2.1 水化进程

图2为SWG与PWG对AAS水化的影响．由图2可见：

（1）与水泥水化过程类似，矿渣在碱激发作用下同样发生放热反应，可以观测到2个反应放热峰．首先，矿渣与激发剂拌和后在很短的时间内出现了显著的放热，这可以归结于矿渣颗粒表面的润湿热及矿渣在高碱性溶液中部分Ca—O键、Al—O键及Si—O键断裂引起的溶解放热[2]．随着水化的进行，AAS的水化放热速率显著降低，进入诱导期．Wang等[14]认为水玻璃激发矿渣反应为溶解-沉淀过程，因此诱导期出现的原因是液相中大量的SiO_3^{2-}与矿渣中溶解出的Ca^{2+}迅速反应，生成水化硅酸钙（C-S-H）/水化硅铝酸钙（C-A-S-H）凝胶，覆盖在矿渣颗粒表面，阻碍离子的溶出扩散[15]．在诱导期结束后，AAS反应进入加速期，出现主反应放热峰．关于加速期出现的原因，目前仍无统一结论．Gebregziabiher等[16]认为这是由于液相中OH^-的不断消耗，提高了SiO_3^{2-}的浓度，进而促进了Ca^{2+}的溶出．Zuo等[17]认为是由于诱导期内逐渐积累的Ca^{2+}或AlO_2^-大量消耗了激发剂中的SiO_3^{2-}，促进了矿渣的溶解．由于激发剂总量的提高，相较于K_2O掺量为2.5%时，3.8%掺量K_2O对矿渣的促进作用更加明显，诱导期更短，且总放热量（Q）增加．此后，反应进入衰退期，碱激发矿渣的水化反应受扩散过程控制，生成的大量水化产物降低了离子的扩散速率[13]．



(a) Same mass ratio (b) Same molar ratio

图2 SWG与PWG对AAS水化的影响

Fig. 2 Effect of SWG and PWG on hydration of AAS

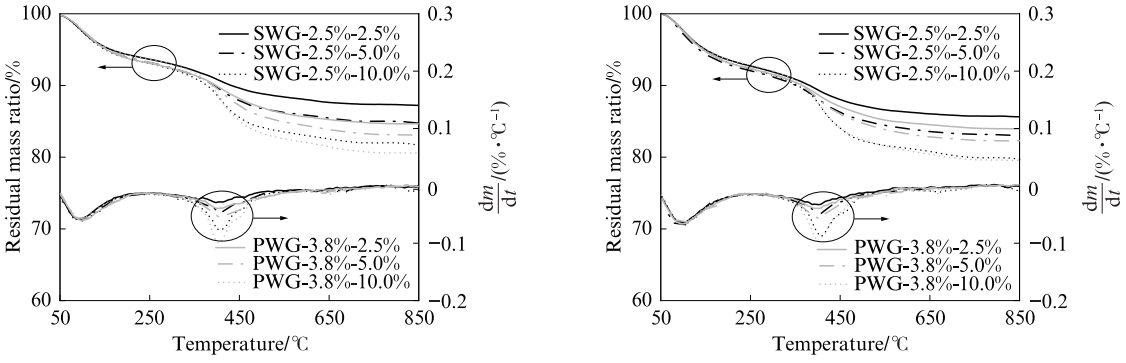
（2）对比含有不同碱金属离子的激发剂可以看出，在相同质量分数或摩尔浓度下，PWG激发矿渣水化的诱导期均较短，且具有更高的峰值反应放热速率与总放热量，这与前人工作所得结论相符[18-19]．这可能源于如下两点原因：一方面，PWG由于模数低，相同碱金属摩尔浓度下，激发剂中OH^-的浓度较高，促进了矿渣颗粒表面化学键的断裂，进而促进其溶解与水化；另一方面，溶剂化的K^+对水分子的束缚能力较弱[20]，因此PWG的黏度显著低于SWG[19]，更有利于离子的扩散，从而促进碱激发矿渣的早期水化．

对于SA乳液的影响，不同于其对硅酸盐水泥水化进程的显著抑制作用[21]，SA乳液几乎不影响碱激发矿渣的水化进程，这可能是由于AAS体系中快速形成的水化产物阻碍了SA乳液在矿渣颗粒表面的吸附．

2.2 水化产物分析

图3为不同SA乳液掺量AAS的热失重曲线．由图3可见，对于不含SA乳液的样品，可以观察到2个主要失重峰，分别对应于C-S-H/C-A-S-H的脱水失重（50～200 ℃）和水滑石相的脱水失重（200～400 ℃）[21]．

由文献[13]可知，SA乳液的分解温度在350～450 ℃区间内，与水滑石相的分解温度区间存在一定的重叠，因此通过扣除SA乳液引起的质量损失后，进一步计算只由水滑石引起的质量损失，结果如表2所示（温度范围扩大至500 ℃以完全消除SA乳液的影响）．由表2可见，无论是否含有SA乳液，随着养护龄期的增加，水化产物的含量整体呈增加趋势，并且PWG激发下所形成的水化产物含量均高于SWG，这与图2所得结论相符．进一步比较SA乳液的影响，可见在50～200 ℃温度范围内，随着SA乳液掺量的



(a) 7 d　　(b) 28 d

图3　不同SA乳液掺量AAS的热失重曲线

Fig. 3　Thermogravimetric curves of AAS with different SA dosages

表2　硬化AAS浆体在不同温度范围内的重量损失

Table 2　Mass loss of hardened AAS at different temperature ranges

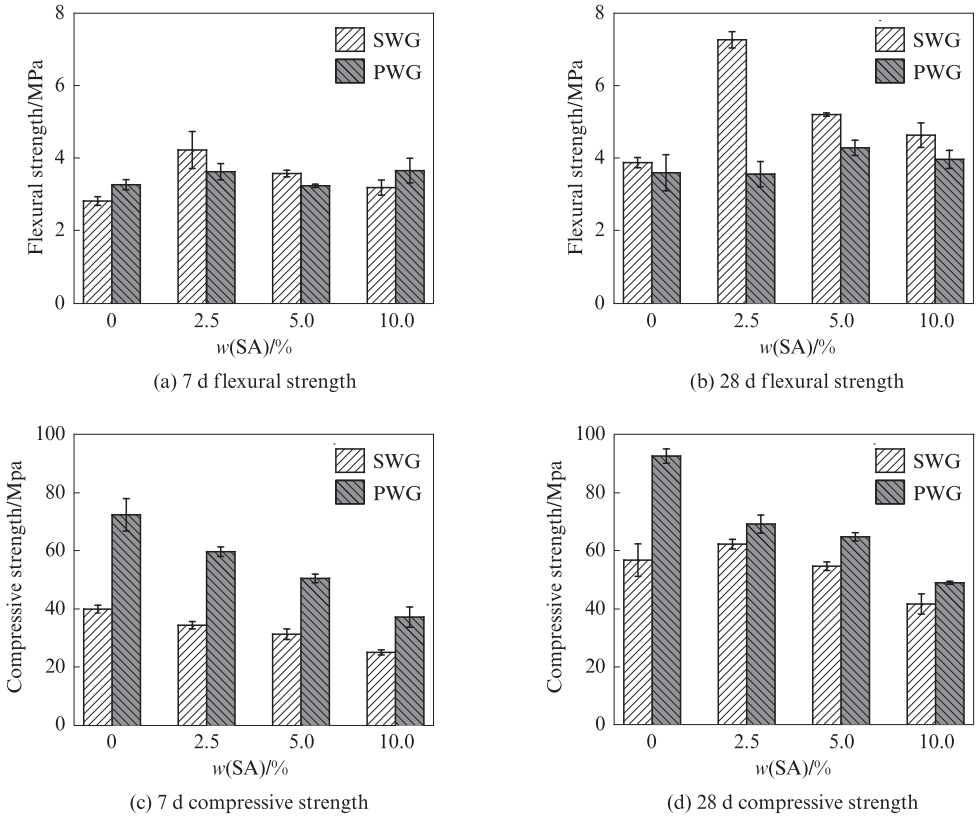
Unit: %

Sample	7 d		28 d	
	50-200 ℃	200-500 ℃	50-200 ℃	200-500 ℃
SWG-2.5%-2.5%	5.7	4.0	6.6	3.9
SWG-2.5%-5.0%	6.1	2.7	7.3	3.3
SWG-2.5%-10.0%	6.2	1.3	7.1	2.5
PWG-3.8%-2.5%	6.3	5.0	7.1	5.3
PWG-3.8%-5.0%	6.2	4.4	7.0	4.6
PWG-3.8%-10.0%	5.7	3.2	6.7	3.3

增加,水化产物的质量变化不明显,说明SA乳液的加入不会影响C-S-H/C-A-S-H凝胶的形成;在200～500 ℃温度范围,随着SA乳液掺量的增加,水滑石的生成量显著下降.

2.3　力学性能

图4为SA乳液改性AAS硬化浆体的力学性能.由图4可见:整体而言,在相同摩尔浓度下,PWG激发AAS的抗压强度均显著高于SWG激发AAS,但抗折强度要弱于SWG激发AAS;对于SWG激发AAS,SA乳液的加入均能提高其抗折强度,并且其抗折强度随着SA乳液掺量的增加出



(a) 7 d flexural strength　　(b) 28 d flexural strength

(c) 7 d compressive strength　　(d) 28 d compressive strength

图4　SA乳液改性AAS硬化浆体的力学性能

Fig. 4　Mechanical properties of SA modified hardened AAS pastes

现先增高后降低趋势，当SA乳液掺量为2.5%时，其7、28 d抗折强度达到最大；随着SA乳液掺量的增加，硬化浆体的抗压强度显著降低；对于PWG激发AAS，当不含SA乳液时，其在7、28 d抗折强度与SWG激发AAS接近，但SA乳液对PWG激发AAS抗折强度的增强作用显著弱于SWG激发AAS；SA乳液的加入并没有改善AAS的抗折强度．对于抗压强度，无论是养护7 d还是28 d，在相同碱金属摩尔浓度下，PWG激发AAS的抗压强度均显著高于SWG激发AAS，这与Tänzer等[18]在相同碱金属摩尔浓度及相同激发剂模数时所得研究结果一致．但Dakhane等[19]发现，在相同碱金属质量分数及相同激发剂模数时，由于PWG中可提供的硅酸根离子总量小于SWG，因此PWG激发AAS在14 d后的力学性能要弱于SWG激发AAS．在保证相同碱金属摩尔浓度时，SWG激发AAS中的硅酸根离子总量要高于PWG激发AAS，但14 d后仍是PWG激发AAS具有更高的抗压强度，说明K^+更有利于提升AAS的抗压强度．在PWG激发AAS中，随着SA乳液掺量的增加，矿渣的抗折强度稍有增加，当SA乳液掺量为5.0%时，其28 d抗折强度最大，抗压强度随着SA乳液掺量的增加显著降低．

2.4 自收缩与干燥收缩

不同水玻璃对SA乳液改性AAS自收缩与干燥收缩的影响如图5所示．由图5可见：PWG激发AAS在14 d内的总变形量显著高于SWG激发AAS；随着PWG掺量的增加，总收缩值更大；SA乳液的加入显著降低了硬化浆体的总收缩量．

为进一步分析不同水玻璃的作用，把图5中的数据按自由收缩与干燥收缩进行分割归零，所得结果如图5(b)、(c)所示．

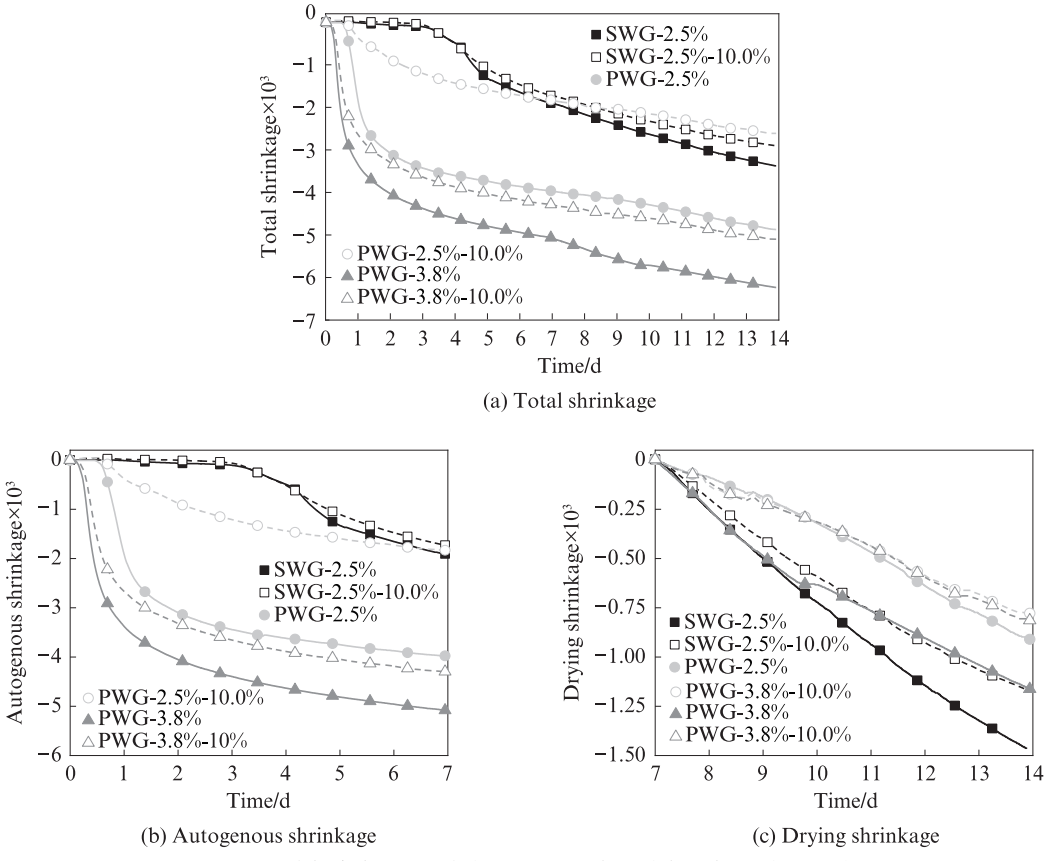


图5 不同水玻璃对SA乳液改性AAS自收缩与干燥收缩的影响

Fig. 5 Effect of different water glass on autogenous shrinkage and drying shrinkage of SA modified AAS

在自收缩阶段，对于SWG激发AAS，其在3 d内的收缩变形并不显著，其后随着水化反应进入加速期(图2)，浆体中的自由水不断被消耗，硬化浆体出现明显的体积变形．SA乳液的加入对SWG激发AAS的收缩变形影响并不显著．对于PWG激发AAS，其在1 d内即可发生明显的收缩变形，这与其1 d内水化进程相符(图2)，并且其收缩值显著高于SWG激发AAS．随着PWG掺量的提高，AAS浆体的收缩值增大．与在SWG激发AAS中不同，SA乳液的加入虽不能延缓AAS开始出现收缩的时间，但

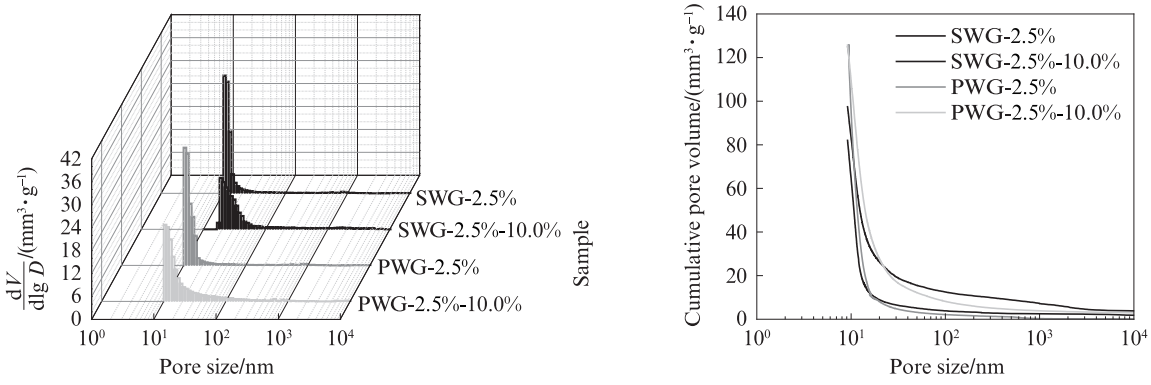
可以显著减缓体系的自由收缩值．在干燥收缩阶段，SWG激发AAS收缩明显，显著高于PWG激发AAS的收缩值，同时SA乳液的加入会极大减少硬化浆体的收缩值．

2.5　孔结构分析

为理解不同水玻璃对SA乳液改性AAS力学及收缩性能的影响，采用压汞法测试了水化7 d后AAS的孔径分布和累计孔隙率，结果如图6所示．由图6可见：

（1）在相同碱金属摩尔浓度下，PWG激发AAS硬化浆体的总孔隙率显著高于SWG激发AAS，特别是当孔径小于50 nm时，此种细孔结构将引起较大的毛细拉应力，导致PWG激发AAS具有更大的自由收缩值（如图5所示）．此外，虽然PWG激发AAS的总孔隙率远大于SWG激发AAS，但其抗压强度仍显著高于SWG激发AAS，这可能源于其较高的水化程度（如图2所示）．由此可见，水化进程与微结构的差异是决定不同水玻璃对碱激发AAS力学性能及体积稳定性的重要原因．

（2）无论PWG激发AAS还是SWG激发AAS，SA乳液的加入均能粗化孔隙结构，显著增加50 nm以上毛细孔的含量，进而减小体系的毛细应力，缓解了硬化矿渣的收缩．但同时SA乳液的加入也会导致体系力学性能下降．对于SWG激发AAS，SA乳液的加入可显著增加体系的总孔隙率，但对PWG激发AAS的影响并不显著．



(a) Pore size distribution　　(b) Cumulative distribution

图6　不同水玻璃对SA乳液改性AAS孔结构的影响

Fig. 6　Effects of different water glass on the pore structure of SA modified AAS

3　结论

（1）在水化方面，在相同质量分数或摩尔浓度下，钾水玻璃（PWG）促进水化的作用均强于钠水玻璃（SWG），这可归因于PWG较强的碱性和较低的黏度．苯丙乳液（SA乳液）的加入不会抑制矿渣的水化进程，这与其在硅酸盐水泥中的现象完全不同．这可能源于碱激发矿渣（AAS）体系中快速形成的水化产物阻碍了SA乳液在矿渣颗粒表面的吸附．

（2）在相同碱金属摩尔浓度下，无论是否加入聚合物，PWG激发AAS的抗压强度均显著高于SWG激发AAS，但抗折强度规律相反．随着SA乳液掺量的增加，抗折强度呈先增加后降低趋势，SWG激发AAS中抗折强度最优的SA乳液掺量为2.5%，而PWG激发AAS中抗折强度最优的SA乳液掺量为5.0%．抗压强度随着SA乳液掺量的增加显著降低，SA乳液对于PWG激发AAS抗压强度的影响要强于SWG激发AAS．

（3）在相同碱金属质量分数或摩尔浓度下，PWG激发AAS在14 d内的总变形量均显著高于SWG激发AAS.SA乳液的加入显著降低了硬化浆体的总收缩量，粗化了硬化浆体的孔隙结构，减小了体系的毛细应力，缓解了硬化矿渣的收缩．

参考文献：

［1］　蔡渝新，刘清风．碱激发混凝土抗氯离子侵蚀性能的数值研究［J］．建筑材料学报，2023，26(6)：596-603，622.
CAI Yuxin，LIU Qingfeng. Numerical estimation on chloride erosion resistance of alkali-activated concrete［J］. Journal of Building Materials，2023，26(6)：596-603，622.（in Chinese）

［2］　朱绘美，张煜雯，李辉．超细粉煤灰和减水剂对AAFA胶凝材料常温性能的影响［J］．建筑材料学报，2023，26(4)：419-428.
ZHU Huimei，ZHANG Yuwen，LI Hui. Effect of ultra-fine fly ash and superplasticzer on properties of alkaliactivated fly ash binder at room temperature［J］. Journal of Building Materials，2023，26(4)：419-428.（in Chinese）

［3］　PROVIS J L. Thematic issue：Alkali activated materials［J］. Materials and Structures，2015，48(3)：515.

［4］　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)

[5] 王培铭, 陈彩云, 张国防. 0~20 ℃养护对聚合物水泥砂浆拉伸黏结强度的影响[J]. 建筑材料学报, 2014, 17(3):446-449, 453.
WANG Peiming, CHEN Caiyun, ZHANG Guofang. Influences of 0-20 ℃ curing systems on tensile bonding strength of polymer modified cement mortar[J]. Journal of Building Materials, 2014, 17(3):446-449, 453. (in Chinese)

[6] 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)

[7] LEE N K, KIM E M, LEE H K. Mechanical properties and setting characteristics of geopolymer mortar using styrene-butadiene (SB) latex[J]. Construction and Building Materials, 2016, 113:264-272.

[8] KUSBIANTORO A, RAHMAN N, CHIN S C, et al. Effect of poly (ethylene-co-vinyl acetate) as a self-healing agent in geopolymer exposed to various curing temperatures[J]. Materials Science Forum, 2016, 841:16-20.

[9] RIBEIRO D B, PINTO E, MELO D M A, et al. A study of compressive strength of the geopolymerics pastes additivated with nonionic latex [C]//Proceedings of the 11th International Conference on Advanced Materials. São Paulo:SBPMat, 2009: 20-25.

[10] EL-YAMANY H E, EL-SALAMAWY M A, EL-ASSAL N T. Microstructure and mechanical properties of alkali-activated slag mortar modified with latex[J]. Construction and Building Materials, 2018, 191:32-38.

[11] VO D H, HWANG C L, THI K D T, et al. Effect of polymer latex on the efflorescence, drying shrinkage and microstructure of alkali-activated slag paste[J]. Journal of Sustainable Cement-Based Materials, 2023, 12(4):460-470.

[12] LU Z C, MERKL J P, PULKIN M, et al. A systematic study on polymer-modified alkali-activated slag-Part Ⅱ:From hydration to mechanical properties[J]. Materials, 2020, 13(15):3418.

[13] LU Z C, MERKL J P, SCHMIDTKE C, et al. A systematic study on polymer modified alkali-activated slag-Part Ⅰ:Stability analysis of colloidal polymer dispersion in sodium water glass[J]. Construction and Building Materials, 2019, 221:40-49.

[14] WANG S D, SCRIVENER K L. Hydration products of alkali activated slag cement[J]. Cement and Concrete Research, 1995, 25(3):561-571.

[15] KRIZAN D, ZIVANOVIC B. Effects of dosage and modulus of water glass on early hydration of alkali-slag cements[J]. Cement and Concrete Research, 2002, 32(8):1181-1188.

[16] GEBREGZIABIHER B S, THOMAS R J, PEETHAMPARAN S. Temperature and activator effect on early-age reaction kinetics of alkali-activated slag binders[J]. Construction and Building Materials, 2016, 113:783-793.

[17] ZUO Y B, YE G. Preliminary interpretation of the induction period in hydration of sodium hydroxide/silicate activated slag[J]. Materials, 2020, 13(21):4796.

[18] TÄNZER R, JIN Y, STEPHAN D. Alkali activated slag binder: Effect of cations from silicate activators [J]. Materials and Structures, 2017, 50(1):91.

[19] DAKHANE A, PENG Z, MARZKE R, et al. Comparative analysis of the influence of sodium and potassium silicate solutions on the kinetics and products of slag activation[J]. Advances in Civil Engineering Materials, 2014, 3(1):371-387.

[20] BACH T T H, CHABAS E, POCHARD I, et al. Retention of alkali ions by hydrated low-pH cements:Mechanism and Na^+/K^+ selectivity[J]. Cement and Concrete Research, 2013, 51:14-21.

[21] KONG X M, EMMERLING S, PAKUSCH J, et al. Retardation effect of styrene-acrylate copolymer latexes on cement hydration [J]. Cement and Concrete Research, 2015, 75:23-41.