文章编号:1007-9629(2023)12-1303-07

氯化钡对高延性碱矿渣复合材料力学性能的影响

阚黎黎[1,*], 刘　能[1], 王　飞[2]
(1.上海理工大学 环境与建筑学院,上海 200093; 2.同济大学 土木工程学院,上海 200092)

摘要:通过开展单轴拉伸与抗压力学性能试验,系统探究了$BaCl_2$对高延性碱矿渣复合材料(HDASC)力学性能的影响.结果表明:当$BaCl_2$掺量为3.0%时,HDASC的凝结时间延长至109 min;HDASC的初裂强度、抗拉强度及抗压强度随着$BaCl_2$掺量的增加逐渐降低,尤其是$BaCl_2$掺量为3.0%时,HDASC强度的下降率高达50.0%,但其拉伸应变基本维持在6.24%~9.66%的高延性区间;$BaCl_2$的掺入使得HDASC的水化程度逐渐降低、孔隙数目增多,降低了基体的密实度,削弱了纤维与基体的黏结.

关键词:缓凝剂;氯化钡;纤维增强;碱矿渣;力学性能
中图分类号:TU526　　**文献标志码:**A　　**doi:**10.3969/j.issn.1007-9629.2023.12.009

Effect of $BaCl_2$ on Mechanical Properties of High Ductile Alkali-Activated Slag-Based Composites

KAN Lili[1,*], *LIU Neng*[1], *WANG Fei*[2]
(1. School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: By uniaxial tensile and compressive tests, the effects of $BaCl_2$ on the mechanical properties of high ductile alkali-activated slag-based composite (HDASC) were investigated. The results indicate that the addition of $BaCl_2$ with 3.0% content makes the setting time prolongate to 109 min. The increase in $BaCl_2$ content leads to gradual decrease in the initial cracking strength, tensile strength and compressive strength, especially the addition of 3.0% $BaCl_2$ corresponds to a 50.0% decrease ratio, nevertheless, the tensile strain almost maintains the range between 6.24%-9.66%. The microscopic testing results show that the addition of $BaCl_2$ incurs the decrease of hydration reaction degree of HDASC and the increase of pore numbers, thereby reducing the compactness of matrix and weakening the bonding between fibers and matrix.

Key words: retarder; $BaCl_2$; fiber-reinforced; alkali-activated slag; mechanical property

碱激发材料(AAM)是一种具有三维空间网状结构的高性能无机聚合物[1],具有优异的力学强度、耐久性能及耐高温等特点.相较于传统水泥,AAM无需煅烧,且温室气体排放量可减少44%~64%[2],呈现出显著的低碳优势.AAM被认为是可完全替代水泥的绿色胶凝材料[3-7].

为进一步克服AAM的脆性,可引入适量短切纤维制备高延性碱矿渣复合材料(HDASC).一般而言,HDASC的拉伸延性可达3%~6%,但碱矿渣复合材料凝结过快[8-9],难以保障现场施工的正常进行[10],这成为推广其工程应用的一大阻碍[11].已有研究表明,$BaCl_2$对AAM具有显著的缓凝作用[12].然而,有关HDASC在掺入$BaCl_2$后凝结作用的改善效果以及对力学性能的影响却鲜有报道.需要注意是,虽然$BaCl_2$中含有重金属离子,具有一定的毒性,但AAM具有较好的重金属固化能力,能

收稿日期:2022-12-21; 修订日期:2023-03-02
基金项目:上海市自然科学基金资助项目(232R1444000);国家自然科学基金资助项目(51978401,52008151)
第一作者(通讯作者):阚黎黎(1980—),女,云南宣威人,上海理工大学副教授,硕士生导师,博士.E-mail: kanlili@usst.edu.cn

够显著控制其毒性的渗出[13-14].

综上,本文详细探讨了$BaCl_2$对HDASC凝结时间、单轴拉伸性能以及抗压强度的影响,并结合Image J软件、烧失量测试与扫描电镜(SEM)对其微观性能进行了表征.

1 试验

1.1 原材料

上海宝田新型建材有限公司生产的S95矿粉(GGBS);Ⅰ级粉煤灰(FA);法国艾肯公司生产的940硅灰(SF);上海国药集团生产的$BaCl_2$;普通河砂(S);优瑞耐火材料有限公司生产的模数为3.3的Na_2SiO_3溶液;由上海国药集团生产的NaOH配制而成的碱激发剂;聚乙烯(PE)纤维,长12 mm,直径24 μm,密度970~980 kg/m^3,抗拉强度3 000 MPa,弹性模量110 GPa,伸长率2%~3%;自来水.GGBS、FA和SF的主要化学组成(质量分数,文中涉及的组成、掺量等除特殊说明外均为质量分数)见表1,GGBS、FA、SF和S的粒径分布见图1.

表1 GGBS、FA和SF的主要化学组成

Table 1 Main chemical compositions of GGBS, FA and SF

w/%

Material	CaO	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	Na_2O	K_2O	P_2O_5	TiO_2	SO_3	IL
GGBS	42.60	35.20	10.40	0.51	4.95	0.31	0.40		0.53	2.00	
FA	3.49	42.30	27.70	3.55	0.29		0.80	0.41	1.55		
SF	0.30	93.00	0.30	0.80	0.30	0.36				0.80	1.50

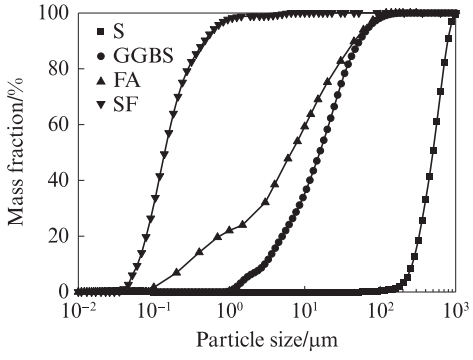


图1 GGBS、FA、SF和S的粒径分布

Fig. 1 Particle size distribution of GGBS, FA, SF and S

1.2 试件的制备

称取Na_2SiO_3溶液164 g、NaOH颗粒36 g,混合后加入适量水(总用水量为260 g)并不断搅拌,使NaOH充分溶解于Na_2SiO_3溶液,得到模数为1.1的碱激发剂,在空气中静置冷却24 h后使用.分别称取400 g GGBS、400 g FA、100 g SF、400 g S,先将其倒入无锡建仪仪器机械有限公司JJ-5型水泥胶砂搅拌机中以(140±5) r/min的低速搅拌3 min,使原材料混合均匀;缓慢倒入剩余水与碱激发剂,继续保持低速搅拌3 min;待浆体具有一定的流动性后,加入体积分数为1.5%的PE纤维,以(285±10) r/min高速搅拌5~8 min,使纤维均匀分散;最后将拌和物倒入相应的模具中成型,得到HDASC试件.成型试件的表面覆盖保鲜膜以防止水分流失,常温养护24 h后拆模,随后转移至空气中养护至28 d龄期.鉴于$BaCl_2$具有一定的潜在危害性,建议掺量不宜超过3.0%[15-17],设置$BaCl_2$掺量$w(BaCl_2)$为0%、0.1%、0.5%、1.0%、1.5%、2.0%、2.5%、3.0%.

1.3 试验方法

根据JGJ/T 70—2009《建筑砂浆基本性能试验方法标准》,采用贯入阻力法确定HDASC基体(不含PE纤维)的凝结时间,试验温度为(20±2) ℃,压力表精度为0.1 N,每种配比测试2个试样,结果取其平均值.

采用济南川佰仪器设备有限公司WDW-300型电子万能试验机对狗骨试件[18]开展单轴拉伸试验及抗压强度测试.单轴拉伸试验加载速率为0.5 mm/min.在试件两侧各安装1个线性变形位移计,记录试件长度的变化,取平均值进行应变计算.抗压强度测试采用边长为50 mm立方体试件,加载速率为1.5 mm/min.通过烧失量法[19]测定不同$BaCl_2$掺量下HDASC净浆的化学结合水含量,并以此来比较HDASC最终的水化程度.将净浆试件研磨成粉后过80 μm筛,每组试样取约3 g,平均放置于3个坩埚内进行试验.试验过程为:先将粉末与坩埚置入105 ℃烘箱中烘至恒重,冷却后记录灼烧前的质量m_1;再将其置入高温炉中以5 ℃/min的速率升温至950 ℃,烧至恒重后待其冷却,记录灼烧后的质量m_2.化学结合水含量W的计算式[20-21]为:

$$W=\left(\frac{m_1-m_2}{m_1}-\frac{L}{1-L}\right)\times 100\% \qquad (1)$$

$$L=L_G W_G+L_F W_F+L_S W_S \qquad (2)$$

式中:L为HDASC基体的烧失量;L_G、L_F及L_S分别为GGBS、FA及SF的烧失量;W_G、W_F及W_S分别为HDASC净浆中GGBS、FA及SF的含量.

采用Image J软件对试件进行二维孔结构分析．沿边长50 mm立方体试件的正中间光滑切开，随机取一侧作为试验面．为清楚拍摄孔隙，对试验面进行预处理，先喷1层白漆，然后用黑墨涂抹表面．利用像素为48 mega-pixel相机拍摄截面，通过Image J软件对试件截面的二值图孔直径与孔数量进行统计分析，结果取3个截面的统计平均值．该方法能分辨的最小孔径为10 μm，为降低误差，只统计孔径大于100 μm的孔．

从拉伸后的试件上截取厚5 mm的试样，进行喷金处理后，使用Zeiss Ultra 55型扫描电子显微镜（SEM）对基体和纤维的形貌进行观测．

2　结果与讨论

2.1　凝结时间

考虑到纤维掺入后会产生“假凝”现象，凝结时间测试采用的是不含PE纤维的HDASC基体．不同$BaCl_2$掺量下HDASC基体的贯入阻力变化图见图2．将HDASC基体贯入阻力为0.5 MPa时对应的时间记为其凝结时间．由图2可见：$BaCl_2$对碱激矿渣体系具有显著的缓凝效果，随着$BaCl_2$掺量的增加，HDASC的凝结时间持续增长；与未掺$BaCl_2$的HDASC基体相比，$BaCl_2$掺量为1.0%、2.0%的HDASC基体凝结时间分别延长了61%、144%；当$BaCl_2$掺量为3.0%时，HDASC基体的凝结时间可延长至109 min，是未掺$BaCl_2$时的203%．这是因为$BaCl_2$与Na_2SiO_3的反应产物会附着在前驱体材料表面，形成致密的保护层[22]，阻碍其与碱激发剂的直接接触，从而对水化反应产生抑制作用．余其俊等[15]进一步通过能谱分析测试了该保护层的化学组成，发现Ba^{2+}是$BaCl_2$发挥缓凝作用的主要决定因素．

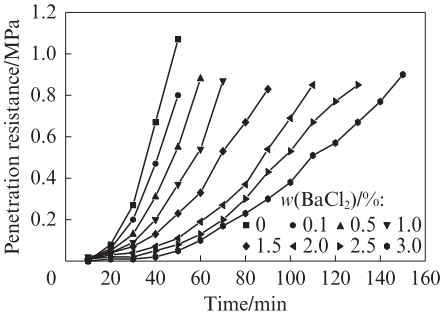


图2　不同$BaCl_2$掺量下HDASC基体的贯入阻力变化图

Fig. 2　Variation of penetration resistance of HDASC matrix under different $BaCl_2$ dosages

2.2　单轴拉伸性能

相较于传统碱激发体系，HDASC具有高延性特征[23-24]．为探究$BaCl_2$对其拉伸性能的影响，对HDASC进行单轴拉伸试验，得到不同$BaCl_2$掺量下试件的应力-应变曲线，结果见图3．由应力-应变曲

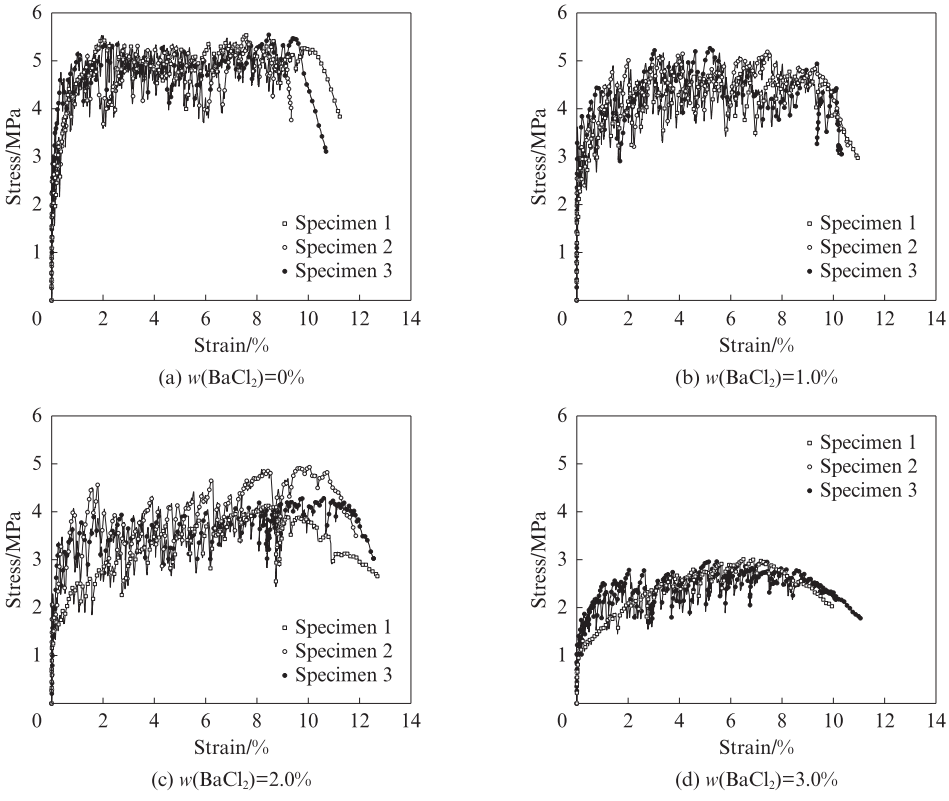


图3　不同$BaCl_2$掺量下试件的应力-应变曲线

Fig. 3　Stress-strain curves of specimens under different $BaCl_2$ dosages

线，可得到试件的拉伸性能指标[25]——抗拉强度（峰值应力）、初裂强度（初始开裂对应的应力）、拉伸应变（峰值应力对应的应变）及弹性模量（弹性变形阶段应力与应变的比值），结果见表2.由表2可见：随着$BaCl_2$掺量的增加，试件的抗拉强度、初裂强度和弹性模量均表现出降低的趋势，可见$BaCl_2$的掺入对HDASC拉伸性能产生了不利的影响；与未掺$BaCl_2$的试件相比，$BaCl_2$掺量为1.0%试件的抗拉强度、初裂强度、弹性模量分别降低了7.6%、3.5%、17.8%，而$BaCl_2$掺量为3.0%试件的抗拉强度、初裂强度、弹性模量降低率均可达50.0%.其原因可以从以下2个方面进行解释：(1) $BaCl_2$的掺入会抑制HDASC最终的水化程度（详见**2.5**），这将导致其没有足够的水化产物填补在纤维与基体之间，从而降低了纤维的桥接能力，而纤维的桥接作用正是助力抗拉强度的主要因素[26]；(2)$BaCl_2$的掺入会造成基体内孔结构的劣化（详见**2.6**），这不仅会降低基体的密实度，还会削弱纤维与基体的黏结.不过，值得注意的是，$BaCl_2$的掺入似乎对HDASC拉伸应变并没有产生明显的影响.不同$BaCl_2$掺量下，HDASC拉伸应变仍处于6.24%～9.66%的高延性区间.因此，在考虑建立HDASC工作性能提升和拉伸性能折损平衡之间，适量的$BaCl_2$掺入显得十分必要.从当前数据来看，$BaCl_2$掺量应不超过2.0%为宜.

表2 试件的拉伸性能指标

Table 2 Tensile properties indexes of specimens

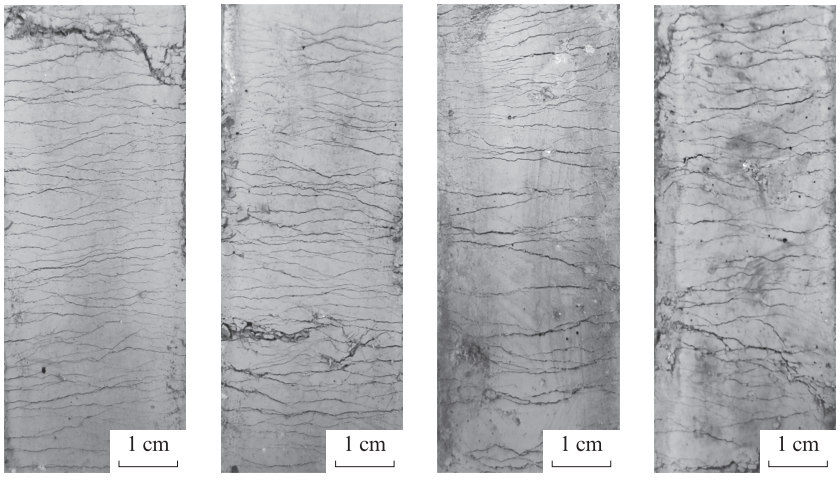
$w(BaCl_2)$/%	Tensile strength/MPa	Initial crack strength/MPa	Tensile strain/%	Elastic modulus/GPa
0	5.50±0.07	2.59±0.22	7.90±0.41	24.25±0.92
1.0	5.08±0.21	2.50±0.06	6.98±1.31	19.93±0.40
2.0	4.46±0.36	1.92±0.04	9.66±0.92	13.42±1.99
3.0	2.93±0.08	1.33±0.21	6.24±0.56	11.26±2.74

2.3 开裂特征

不同$BaCl_2$掺量下试件拉伸后的表面裂缝见图4.由图4可得试件的开裂特征[3]——裂缝数量、平均裂缝宽度及平均裂缝间距，结果见表3.由表3可见：$BaCl_2$对HDASC的多缝开裂能力产生了抑制效应；随着$BaCl_2$掺量的增加，试件裂缝数量逐渐减少，平均裂缝宽度与平均裂缝间距逐渐增加；与未掺$BaCl_2$的试件相比，$BaCl_2$掺量为1.0%、3.0%试件的裂缝数量分别下降了15.5%、31.0%，平均裂缝宽度分别增加了1.9%、13.9%，平均裂缝间距分别增加了17.7%、47.8%.裂缝数量与平均裂缝宽度是决定纤维增强复合材料拉伸应变的2个主要因素[27]，结合**2.2**中$BaCl_2$没有显著影响HDASC的拉伸应变这一结论，可以认为，裂缝宽度在本研究中起主导作用.虽然裂缝数量有所减少，但裂缝宽度的增加使得HDASC仍然保持高延性.

2.4 抗压强度

不同$BaCl_2$掺量下HDASC的抗压强度见图5.由图5可见：随着$BaCl_2$掺量的增加，HDASC抗压强度整体呈下降趋势；低掺量$BaCl_2$产生的不利影响是有限的，当$BaCl_2$掺量为1.0%时，$BaCl_2$造成的强度降低率不超过10%；当$BaCl_2$掺量为2.0%时，HDASC



(a) $w(BaCl_2)$=0% (b) $w(BaCl_2)$=1.0% (c) $w(BaCl_2)$=2.0% (d) $w(BaCl_2)$=3.0%

图4 不同$BaCl_2$掺量下试件拉伸后的表面裂缝

Fig. 4 Surface cracks of specimens under different $BaCl_2$ dosages after tension

表3　不同$BaCl_2$掺量下试件拉伸后的开裂特征

Table 3　Cracking characteristics of specimens under different $BaCl_2$ dosages after tension

$w(BaCl_2)$/%	Crack number	Average crack width/μm	Average crack spacing/mm
0	71±1	90.7± 3.4	1.13±0.02
1.0	60±1	92.4±16.6	1.33±0.03
2.0	61±5	125.8± 2.6	1.31±0.10
3.0	49±8	103.3±12.7	1.67±0.24

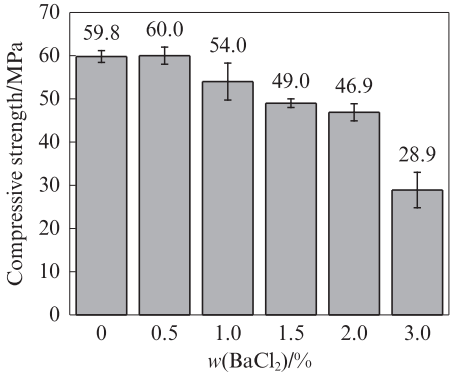


图5　不同$BaCl_2$掺量下HDASC的抗压强度

Fig. 5　Compressive strength of HDASC under different $BaCl_2$ dosages

抗压强度降低了22%，但其值仍超过45 MPa，可满足大多数工程的实际需求；当$BaCl_2$掺量为3.0%时，HDASC抗压强度降低了52%，且其值低于30 MPa. 考虑到如此显著的强度发展抑制效应，合理掺量的$BaCl_2$对HDASC应用尤为关键. 理论上讲，$BaCl_2$造成HDASC抗压强度损失与拉伸性能降低的原因大致相同，具体参考**2.2**.

2.5　化学结合水

不同$BaCl_2$掺量下HDASC基体的化学结合水含量见图6. 由图6可见：与未掺$BaCl_2$的HDASC基体相比，当$BaCl_2$掺量为2.0%时，HDASC基体的化学结合水含量下降率低于2.0%；当$BaCl_2$掺量为3.0%时，HDASC基体的化学结合水含量降低率则高达6.0%；相较于$BaCl_2$掺量为2.0%的HDASC基体而言，仅增加1.0%掺量的$BaCl_2$就导致其化学结合水含量降幅增大了2倍. 由此再一次表明，控制$BaCl_2$掺量不超过2.0%，具有明显的化学意义，且当前结果可以很好地解释$BaCl_2$为何会对HDASC抗拉强度、初裂强度和抗压强度造成负面影响. 经对比发现：对于抗拉强度而言，纤维与基体的界面黏结具有决定性影响[3]；随着化学结合水含量（或水化程度）的减少，纤维表面基体的水化产物含量降低，因此产生了较弱的界面结合作用；初裂强度和抗压强度的主导因素是基体性能，随着水化程度的降低，反应产

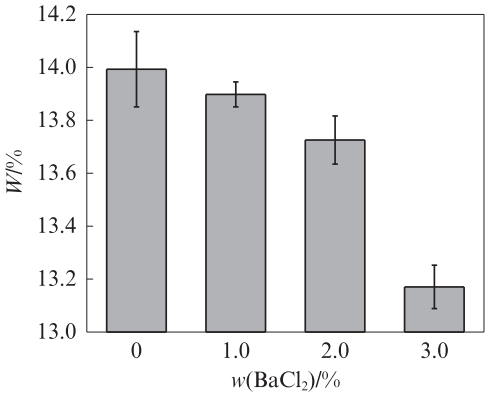


图6　不同$BaCl_2$掺量下HDASC基体的化学结合水含量

Fig. 6　Chemical bond water contents of HDASC matrix under different $BaCl_2$ dosages

物的减少应该是强度降低的根本原因.

2.6　截面孔隙特征

为探究$BaCl_2$对HDASC孔结构造成的影响，采取二维孔结构分析法来统计截面孔径大小和孔隙数量，结果见图7. 由图7可见：$BaCl_2$的掺入明显增加了HDASC内部孔隙的数量；与未掺$BaCl_2$的试件相比，直径为200～400、400～600、600～800、800～1 000及大于1 000 μm的孔隙数量分别增加了77%、50%、120%、133%、71%. 该结果与前文HDASC抗拉强度、初裂强度及抗压强度在$BaCl_2$掺量为3.0%时出现大幅降低相对应，孔隙数量的增加势必会对HDASC内部结构产生影响，从而造成宏观强度的下降.

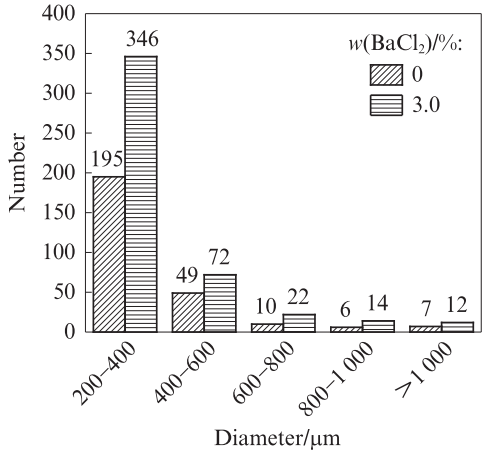
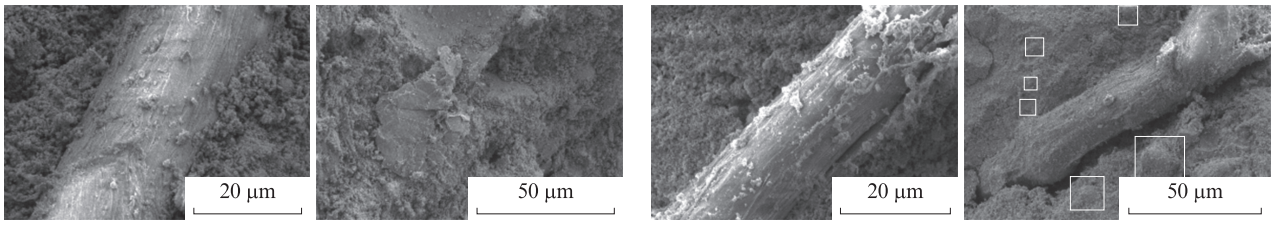


图7　$BaCl_2$掺量为3.0%HDASC的截面孔隙数量

Fig. 7　Number of cross-sectional pores of HDASC with $w(BaCl_2)=3.0\%$

2.7　SEM

HDASC纤维表面及基体的SEM照片见图8. 由图8可见：对比纤维表面的磨损程度，未掺$BaCl_2$的HDASC纤维表面磨损较$BaCl_2$掺量为3.0%时更为严重，且其表面黏附有较少的无定形状产物，这是由



(a) $w(BaCl_2)$=0% (b) $w(BaCl_2)$=3.0%

图8 HDASC纤维表面及基体的SEM照片

Fig. 8 SEM images of fiber surface and martix of HDASC

于未掺$BaCl_2$的HDASC纤维与基体黏结更为紧密，致使纤维在拔出过程中承受更大的摩擦力而出现了更为严重的损伤，且表面较少的附着物也是致密纤维-基体界面的另一证据，因为黏结作用越强，附着物越不易被拉出；对比基体的微观形貌，发现$BaCl_2$掺量为3.0%的HDASC基体内较未掺$BaCl_2$时含有更多未参与水化反应的球状粉煤灰颗粒(见图8(b)中白色方框).这在一定程度上说明$BaCl_2$的掺入抑制了HDASC的水化反应作用，与**2.5**化学结合水测试结果一致.SEM结果从微观形貌角度进一步阐释了$BaCl_2$对HDASC力学性能产生不利影响的原因.

3 结论

(1)$BaCl_2$对HDASC基体具有较好的缓凝作用.当$BaCl_2$掺量$w(BaCl_2)\leqslant 3.0\%$时，凝结时间随着$BaCl_2$掺量的增加不断延长；当$BaCl_2$掺量为3.0%时，HDASC基体凝结时间可延长至109 min，是未掺$BaCl_2$时的203%.

(2)$BaCl_2$的掺入对HDASC的初裂强度、抗拉强度及抗压强度产生了不利影响.当$BaCl_2$掺量为3.0%时，HDASC强度的折损效应愈发显著，降低率高达50.0%.$BaCl_2$对HDASC的拉伸应变性能影响较小，不同$BaCl_2$掺量对应的HDASC拉伸应变维持在6.24%～9.66%的高延性区间.因此，考虑将$BaCl_2$应用于纤维增强碱激发体系中时，建议其掺量不高于2.0%.

(3)随着$BaCl_2$掺量的增加，HDASC水化反应程度不断降低，这应该是HDASC力学强度损失的主要原因.掺$BaCl_2$试件明显呈现出更多的孔隙，这对强度的发展不利.$BaCl_2$会弱化纤维基体的黏结作用.

参考文献：

[1] SHUBBAR A A, SADIQUE M, KOT P, et al. Future of clay-based construction materials—A review[J]. Construction and Building Materials, 2019, 210:172-187.

[2] MCLELLAN B C, WILLIAMS R P, LAY J, et al. Costs and carbon emissions for geopolymer pastes in comparison to ordinary portland cement[J]. Journal of Cleaner Production, 2011, 19(9/10):1080-1090.

[3] KAN L L, WANG F, ZHANG Z, et al. Mechanical properties of high ductile alkali-activated fiber reinforced composites with different curing ages[J]. Construction and Building Materials, 2021, 306:124833.

[4] 阚黎黎，王文松，王家豪，等.高延性偏高岭土-粉煤灰基地聚合物的制备及拉伸性能[J].建筑材料学报，2019，22(5)：673-679，699.
KAN Lili, WANG Wensong, WANG Jiahao, et al. Preparation and tensile property of metakaolin-fly ash based engineered geopolymer composites[J]. Journal of Building Materials, 2019, 22(5):673-679, 699.(in Chinese)

[5] BOUGUERMOUH K, BOUZIDI N, MAHTOUT L, et al. Stabilization of flotation wastes resulting from the treatment of Pb/Zn ore based on geopolymers[J]. Materials Letters, 2018, 227:221-224.

[6] LAHOYI M, TAN K H, YANG E H. A critical review of geopolymer properties for structural fire-resistance applications[J]. Construction and Building Materials, 2019, 221:514-526.

[7] 安强，潘慧敏，赵庆新，等.碱激发赤泥-粉煤灰-电石渣复合材料性能研究[J].建筑材料学报，2023，26(1)：14-20.
AN Qiang, PAN Huimin, ZHAO Qingxin, et al. Study on properties of alkali-activated red mud-fly ash-carbide slag composite[J]. Journal of Building Materials, 2023, 26(1):14-20.(in Chinese)

[8] 朱绘美，张煜雯，李辉.超细粉煤灰和减水剂对碱激发粉煤灰胶凝材料的常温性能影响[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 superplasticizer on properties of alkali-activated fly ash cementitious materials at room temperature[J]. Journal of Building Materials, 2023, 26(4):419-428.(in Chinese)

[9] 郭晓潞，杨君奕，熊归砚.硅酸镁铝及静置时间对3D打印地聚合物砂浆流变性能的影响[J].建筑材料学报，2022，25(1)：89-96.
GUO Xiaolu, YANG Junyi, XIONG Guiyan. Effect of magnesium aluminum silicate and rest time on rheological property of 3D printing geopolymer mortar[J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(1):89-96.(in Chinese)

[10] SINHA A K, TALUKDAR S. Enhancement of the properties of silicate activated ultrafine-slag based geopolymer mortar using retarder[J]. Construction and Building Materials, 2021, 313:125380.

[11] 阎培渝. 碱激发胶凝材料发展瓶颈在哪里[J]. 硅酸盐学报，2022，50(8)：2067-2069.
YAN Peiyu. What is the development bottleneck of activated binder[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society，2022，50(8)：2067-2069.（in Chinese）

[12] 谢建和，李丽明，黄俊健，等. 缓凝剂对碱激发材料性能影响的研究进展[J]. 建筑科学与工程学报，2023，40(5)：20-31.
XIE Jianhe，LI Liming，HUANG Junjian，et al. Effects of retarders on performance of alkali-activated materials：A state-of-the-art review[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering，2023，40(5)：20-31.（in Chinese）

[13] 郑娟荣，刘丽娜. 碱激发胶凝材料固化Pb^{2+}及浸出毒性的试验研究[J]. 硅酸盐通报，2009，28(3)：435-439.
ZHENG Juanrong，LIU Lina. Test investigation on the solidification of heavy metal（Pb^{2+}）by alkali-activated cementing materials and their soaking toxicity[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society，2009，28(3)：435-439.（in Chinese）

[14] ZHANG P P，MUHAMMAD F，YU L，et al. Self-cementation solidification of heavy metals in lead-zinc smelting slag through alkali-activated materials[J]. Construction and Building Materials，2020，249：118756.

[15] 余其俊，赵三银，黄家琪，等. 碱激发碳酸盐矿-矿渣胶凝-灌浆材料缓凝与流动性能的改善[J]. 硅酸盐学报，2005，33(7)：871-875.
YU Qijun，ZHAO Sanyin，HUANG Jiaqi，et al. Retardation of gelation and improvement of flowability for alkali-activated carbonatite-slag cementitious-grouting material[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society，2005，33(7)：871-875.（in Chinese）

[16] ABDEL-GAWWAD H A，METWALLY K A，TAWFIK T A. Role of barium carbonate and barium silicate nanoparticles in the performance of cement mortar[J]. Journal of Building Engineering，2021，44：102721.

[17] ZHANG B，FENG Y，XIE J H，et al. Rubberized geopolymer concrete：Dependence of mechanical properties and freeze-thaw resistance on replacement ratio of crumb rubber[J]. Construction and Building Materials，2021，310：125248.

[18] Japan Society of Civil Engineers. Recommendations for design and construction of high performance fiber reinforced cement composites with multiple fine cracks（HFRCC）[J]. Concrete Engineering Series，2008(82)：6-10.

[19] 阚黎黎，王飞，邬海江，等. 不同养护条件下混杂钢纤维超高性能混凝土的早龄期力学性能及开裂特性[J]. 硅酸盐学报，2022，50(2)：429-437.
KAN Lili，WANG Fei，WU Haijiang，et al. Mechanical properties and cracking characteristics of UHPC with hybrid steel fibers at early age under different curing conditions[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society，2022，50(2)：429-437.（in Chinese）

[20] AN M，WANG Y，YU Z R. Damage mechanisms of ultra-high-performance concrete under freeze-thaw cycling in salt solution considering the effect of rehydration[J]. Construction and Building Materials，2019，198：546-552.

[21] ZHANG Y M，SUN W，YAN H D. Hydration of high-volume fly ash cement pastes[J]. Cement and Concrete Composites. 2000，22：445-452.

[22] 樊晓丹，李玉祥，王少剑，等. 碱激发超细矿渣粉制备灌浆料的缓凝问题研究[J]. 混凝土，2014(10)：81-85.
FAN Xiaodan，LI Yuxiang，WANG Shaojian，et al. Study on retardation of preparing grouting material by alkali-activated fine slag powder[J]. Concrete，2014(10)：81-85.（in Chinese）

[23] KAN L L，WANG F. Mechanical properties of high ductile alkali-activated fiber reinforced composites incorporating red mud under different curing conditions[J]. Ceramics International，2022，48(2)：1999-2011.

[24] 阚黎黎，龚雅文，王靖荣. 硫酸盐-干湿循环下高延性纤维增强水泥基材料的自愈合[J]. 建筑材料学报，2019，22(2)：192-198，213.
KAN Lili，GONG Yawen，WANG Jingrong. Self-healing of ECC materials under sulface-wet-dry cycles[J]. Journal of Building Materials，2019，22(2)：192-198，213.（in Chinese）

[25] 阚黎黎，朱嘉伦，王飞，等. 聚乙烯纤维增强赤泥-碱矿渣复合材料的力学性能[J]. 复合材料学报，2022，39(11)：5367-5374.
KAN Lili，ZHU Jialun，WANG Fei，et al. Mechanical properties of polyethylene fiber reinforced red mud-alkali slag composite[J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2022，39(11)：5367-5374.（in Chinese）

[26] ZHANG Z G，ZHANG Q. Matrix tailoring of engineered cementitious composites（ECC）with non-oil-coated，low tensile strength PVA fiber[J]. Construction and Building Materials，2018，161：420-431.

[27] LI V C. Tailoring ECC for special attributes：A review[J]. International Journal of Concrete Structures and Materials，2012，6(3)：135-144.