

文章编号:1007-9629(2024)04-0359-08

碳酸钙晶须对碱矿渣胶凝材料的减缩增强作用

赵俊¹, 王爱国^{1*}, 张祖华², 刘开伟¹, 孙道胜¹

(1. 安徽建筑大学 安徽省先进建筑材料重点实验室, 安徽 合肥 230022;

2. 同济大学 材料科学与工程学院, 上海 201804)

摘要:针对碱矿渣胶凝材料易收缩开裂等问题,采用一种新型微米级纤维——碳酸钙晶须对碱矿渣胶凝材料进行减缩增强,研究了碳酸钙晶须掺量对碱矿渣胶凝材料流变性能、抗压强度和干燥收缩的影响,并探究其显微增强机理.结果表明:微米级碳酸钙晶须的掺入对碱矿渣胶凝材料流动性影响较小,当碳酸钙晶须掺量为3%时,其新拌浆体塑性黏度为12.33 Pa·s,较未掺碳酸钙晶须的对照组仅增长14.48%,其硬化浆体28 d抗压强度可达105.8 MPa;碱矿渣胶凝材料的干燥收缩率随着碳酸钙晶须掺量的增加而降低,当碳酸钙晶须掺量为5%时,其28 d干燥收缩率仅有0.87%,较未掺碳酸钙晶须的对照组降低32.56%;碳酸钙晶须与基体紧密结合,在基体受力破坏时分散其所受应力,提升了碱矿渣胶凝材料的力学性能;碳酸钙晶须在体系内部的桥接作用能够有效延缓碱矿渣胶凝材料微裂纹的形成与扩展,在一定程度上遏制了宏观裂纹的发展.

关键词:碱矿渣胶凝材料;碳酸钙晶须;干燥收缩;裂纹

中图分类号:TQ427.2⁺6

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2024.04.010

Effect of Calcium Carbonate Whisker on Shrinkage Reduction and Reinforcement of Alkali-Activated Slag Cementitious Materials

ZHAO Jun¹, WANG Aiguo^{1*}, ZHANG Zuhua², LIU Kaiwei¹, SUN Daosheng¹

(1. Anhui Key Laboratory of Advanced Building Materials, Anhui Jianzhu University, Hefei 230022, China;

2. School of Materials Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: In response to the problem of shrinkage and cracking of alkali-activated slag cementitious material, a new type of micrometer sized fiber—calcium carbonate whisker was used to reduce drying shrinkage and enhance mechanical properties of alkali-activated slag cementitious material. The effects of different contents of calcium carbonate whiskers on the rheological properties, compressive strength and drying shrinkage of alkali-activated slag cementitious material were studied, and the micro reinforcement mechanism was explored. The results show that the addition of micrometer sized calcium carbonate whisker has little effect on the fluidity of alkali-activated slag cementitious material. When the calcium carbonate whiskers' content is 3%, the plastic viscosity of the freshly mixed slurry is 12.33 Pa·s, which is only 14.48% higher than the control group without calcium carbonate whiskers. The 28 d compressive strength of the hardened slurry reaches 105.8 MPa. The drying shrinkage rate of alkali-activated slag cementitious material decreases with the increase of calcium carbonate whiskers' content. When the calcium carbonate whiskers' content is 5%, its 28 d drying shrinkage rate is only 0.87%, which is 32.56% lower than that of alkali-activated slag cementitious material without calcium carbonate whiskers. Calcium carbonate whiskers are

收稿日期:2023-05-08;修订日期:2023-06-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52278236, 52172013);安徽省高校优秀科研创新团队项目(2022AH010017);安徽省重点研究与开发计划项目(202104a07020018);安徽建筑大学科研储备库培育项目(2021XMK02)

第一作者:赵俊(1998—),男,江苏扬州人,安徽建筑大学硕士生.E-mail:junzhao1998@126.com

通讯作者:王爱国(1978—),男,安徽合肥人,安徽建筑大学教授,博士生导师,博士.E-mail:wag3134@126.com

tightly combined with the matrix, dispersing the stress on the matrix when it is subjected to stress and improving the mechanical properties of alkali-activated slag cementitious material. The bridging effect of calcium carbonate whisker can effectively delay the formation and propagation of microcracks in alkali-activated slag cementitious material, and the development of macroscopic crack can be restrained to a certain extent.

Key words: alkali-activated slag cementitious material; calcium carbonate whisker; drying shrinkage; crack

碱激发胶凝材料是由碱性激发剂与具有火山灰活性或潜在水硬性固废原料反应生成的胶凝材料^[1-2]. 它具有绿色环保、强度高和耐久性好等优点,是一种具有广阔应用前景的低碳胶凝材料^[3-4]. 但部分碱激发胶凝材料存在凝结硬化快、收缩大等^[5-7]缺点. 碱矿渣胶凝材料表现出较大的自主收缩和干燥收缩,远高于普通硅酸盐水泥^[8-9]. 众多学者对此展开研究,如 Collins 等^[10]认为碱激发矿渣收缩大是由于其孔隙较细,毛细孔压力较大所致,水分散失非主要因素;Ye 等^[11]指出碱矿渣胶凝材料在高相对湿度条件下,碱性阳离子的渗入会影响水化硅酸钙(C-S-H)凝胶的堆叠规律,导致C-S-H凝胶在干燥后更容易发生结构上的破坏与重组;Tennis 等^[12]认为碱激发矿渣反应产物中占比较大的低密度C-S-H凝胶会产生更大收缩. 碱激发胶凝材料过大的收缩会诱导微裂纹的萌生和扩展,降低材料的密实度和耐久性. 收缩过大是制约部分碱激发胶凝材料推广应用的瓶颈,亟待解决. 掺入纤维是提升水泥基材料性能的有效方法,然而传统钢纤维的团聚和锈蚀^[13]、有机纤维(聚乙烯纤维、聚丙烯纤维和聚乙烯醇纤维等)的老化、纳米纤维的分散性差和

高成本等均是不可忽视的问题. 碳酸钙晶须作为一种用于水泥复合材料的新型微米级纤维,可以抑制水泥复合材料微裂缝的产生,具有增强增韧效果^[14].

本文针对收缩率较大的碱矿渣胶凝材料,研究了碳酸钙晶须掺量对其流变性能、抗压强度和干燥收缩的影响,并探究了其显微增强机理,以期降低收缩碱矿渣胶凝材料的设计与制备提供技术支持.

1 试验

1.1 原材料

矿粉选用武汉微神科技发展有限公司产V600矿粉,其化学组成(质量分数,文中涉及的组成、激固比等均为质量分数或质量比)见表1. 碳酸钙晶须为东莞巨正源公司提供的T98型碳酸钙晶须,其物理力学性能见表2. 碱激发剂为改性水玻璃,模数为1.20,由水玻璃和氢氧化钠按照一定比例混合而成,其中水玻璃来自广东佛山科凝新材料有限公司,模数为2.43,化学组成为32.35% SiO₂+13.73% Na₂O+53.92% H₂O;氢氧化钠为分析纯,NaOH含量大于等于96%. 试验用水为去离子水.

表1 矿粉的化学组成

Table 1 Chemical composition (by mass) of slag powder

										Unit: %
CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	MnO	TiO ₂	IL
38.42	30.01	16.50	9.56	2.53	0.38	0.35	0.49	0.25	1.10	0.06

表2 碳酸钙晶须的物理力学性能

Table 2 Physical and mechanical properties of calcium carbonate whisker

Length/ μm	Diameter/ μm	Aspect ratio/%	Relative density	Tensile strength/GPa	Elastic modulus/GPa
20-30	1-2	10-30	2.8±0.2	5.2	700

1.2 配合比及试验方法

1.2.1 配合比

本研究采用矿粉和改性水玻璃来制备碱矿渣胶凝材料,激固比为1:1. 将碳酸钙晶须掺量(以矿粉质量计)取为0%、1%、2%、3%、4%和5%,共设计6组配合比,试件编号记为CW₀、CW₁、CW₂、CW₃、CW₄和CW₅.

1.2.2 试验方法

(1)流变性能

使用MCR 302型流变仪进行测试. 先对新拌碱

矿渣胶凝材料进行预剪切;再采用阶梯上升-下降方式测得其扭矩与转速的关系^[15]. 采用Bingham模型和式(1)对剪切曲线进行拟合,获得浆体的屈服应力 τ_B (Pa)和塑性黏度 η_B (Pa·s).

$$\tau = \tau_B + \eta_B \gamma \quad (1)$$

式中: τ 为剪切应力,Pa; γ 为剪切速率,s⁻¹.

(2)抗压强度

按照GB/T 17671—2020《水泥胶砂强度检验方法(ISO法)》,使用QJ-212型电子万能试验机,以加压速率0.2 MPa/s测定试件的3、28 d抗压强度.

(3)干燥收缩率和质量损失率

将制备好的碱矿渣胶凝材料倒入尺寸为 $\phi 90 \times 8$ mm的饼状模具中,待浆体完全凝结硬化后,称取其初始质量 m_1 (g);然后放入30℃烘箱中,用数码相机对不同龄期试件进行拍照,通过PS软件对图片进行二值法处理,从而获得试件的经时变化图,同时测量其直径 d (mm)和烘干质量 m_2 (g).试件的干燥收缩率 ϵ 和质量损失率 W 分别按式(2)、(3)进行计算.

$$\epsilon = \frac{D-d}{D} \times 100\% \quad (2)$$

$$W = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100\% \quad (3)$$

式中: D 为试件的初始直径,mm.

(4)孔结构

对碱矿渣胶凝材料试件进行24 h负压饱水处理后,使用MesoMR23-060V-1型低场核磁共振检测仪对其进行孔结构测试.

(5)微观形貌

通过ZEISS Gemini SEM 500型肖特基发射场扫描电子显微镜(SEM)和OLS4000型激光共聚焦显微镜观测碳酸钙晶须在基体中的分布情况,并分析其作用机理.

2 结果与分析

2.1 流变性能

图1显示了碳酸钙晶须掺量对碱矿渣胶凝材料屈服应力和塑性黏度的影响.由图1可见:(1)碱矿渣胶凝材料的屈服应力和塑性黏度随着碳酸钙晶须掺量的增加而增大.(2)与未掺碳酸钙晶须的 CW_0 组试件相比,碳酸钙晶须掺量为1%的 CW_1 组试件的屈服应力与塑性黏度分别增加11.64%和4.36%;碳酸钙晶须掺量为3%的 CW_3 组试件的屈服应力与塑性黏度增大40.7%和14.48%;碳酸钙晶须掺量为5%的 CW_5 组试件屈服应力与塑性黏度增大79.48%和36.3%.这是因为微米级碳酸钙晶须的掺入增加了颗粒之间碰撞的可能性,增大了内摩擦阻力^[16].虽然具有更大比表面积的碳酸钙晶须在掺入碱矿渣胶凝材料后需要更多的水分来润湿^[17],但是碱矿渣胶凝材料受“纤维阻塞作用”影响较小,浆体仍然可以自由地流动^[18].

2.2 抗压强度

图2给出了碳酸钙晶须掺量对碱矿渣胶凝材料抗压强度的影响.由图2可见:(1)随着碳酸钙晶须掺量的增加,碱矿渣胶凝材料3、28 d抗压强度呈先增后减趋势.(2)对于碳酸钙晶须掺量为3%的 CW_3 组试件,其3、28 d抗压强度可达到70.1、105.8 MPa,较

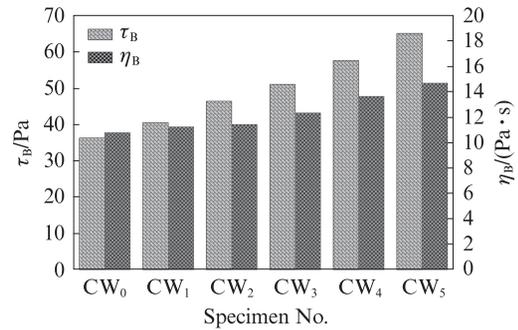


图1 碳酸钙晶须掺量对碱矿渣胶凝材料屈服应力与塑性黏度的影响

Fig. 1 Effect of calcium carbonate whiskers' content on yield stress and plastic viscosity of alkali-activated slag cementitious materials

未掺碳酸钙晶须的 CW_0 组试件提高16.3%、14.5%.(3)当碳酸钙晶须掺量小于3%时,碳酸钙晶须对碱矿渣胶凝材料抗压强度有显著提升,可能是因为微米级碳酸钙晶须的填充效应提高了碱矿渣胶凝材料的密实度;当碳酸钙晶须掺量超过3%时,碱矿渣胶凝材料的抗压强度有所降低.(4)对于碳酸钙晶须掺量为5%的 CW_5 组试件,其3、28 d抗压强度仅有66.3、94.1 MPa,较未掺晶须的 CW_0 组试件基本无提高,较 CW_3 组试件3、28 d抗压强度分别下降28.2%、11.1%,表明过量的碳酸钙晶须对碱矿渣胶凝材料抗压强度起到负面作用.这可能是因为碳酸钙晶须掺量越高,晶须团聚现象越为严重,其在基体中的分散程度越低^[19],在这种情况下,碳酸钙晶须很难起到增强作用;另外,碳酸钙晶须掺量越大,其与基体之间的界面数量也会随之增多.两者均不利于碱矿渣胶凝材料获得更高的抗压强度.

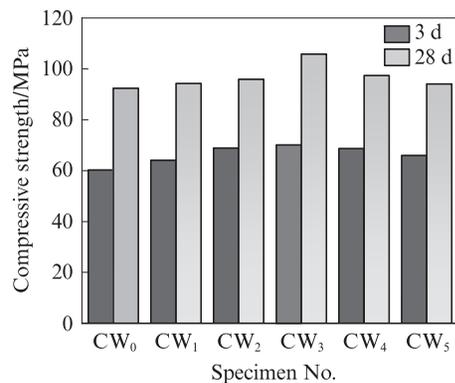


图2 碳酸钙晶须掺量对碱矿渣胶凝材料抗压强度的影响

Fig. 2 Effect of calcium carbonate whiskers' content on compressive strength of alkali-activated slag cementitious materials

图3为碳酸钙晶须掺量对碱矿渣胶凝材料孔隙率和孔径分布的影响.由图3可见:(1)随着碳酸钙晶

须掺量的增加,碱矿渣胶凝材料的总孔隙率逐渐增加。(2) CW_0 组试件的总孔隙率最小,为0.7761%,表明未掺碳酸钙晶须的碱矿渣胶凝材料内部致密性很高; CW_1 组和 CW_5 组试件的总孔隙率分别为0.8206%和0.8876%,较 CW_0 组试件增长5.73%和14.37%。碱矿渣胶凝材料具有相对致密的微观结构,但掺入碳酸钙晶须会产生许多新的界面过渡区,从而导致碱矿渣胶凝材料孔隙率有所增加^[20]。根据Meng等^[21]对水泥基材料内部孔隙的划分,本文同样将碱矿渣胶凝材料内部孔隙分为凝胶孔(孔径 $d' < 10$ nm)、毛细孔($d' = [10, 5000]$ nm)和大孔($d' > 5000$ nm)。由图3还可见:随着碳酸钙晶须掺量的增加,碱矿渣胶凝材料的凝胶孔孔隙率基本不变,毛细孔孔隙率随之增加,但该孔径范围对于材料的力学性能影响并不突出;过量碳酸钙晶须的掺入会增大体系内大孔的孔隙率,当碳酸钙晶须掺量为5%时,体系内大孔的孔隙率最高为0.0838%,较 CW_0 组试件中大孔的孔隙率增加76.01%。

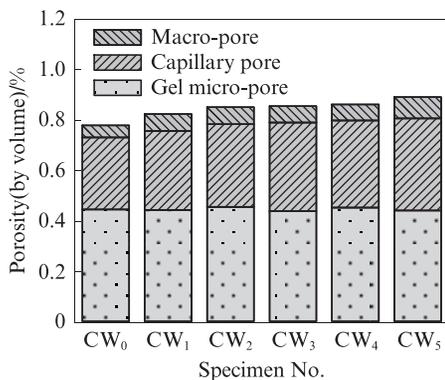


图3 碳酸钙晶须掺量对碱矿渣胶凝材料孔隙率和孔径分布的影响

Fig. 3 Effect of calcium carbonate whiskers' content on porosity and pore size distribution of alkali-activated slag cementitious materials

2.3 干燥收缩和质量损失率

图4为碳酸钙晶须掺量对碱矿渣胶凝材料干燥收缩的影响。由图4可见:(1)随着碳酸钙晶须掺量的增加,碱矿渣胶凝材料的干燥收缩率呈逐渐降低趋势。(2) CW_0 组试件的干燥收缩率最大,其28 d干燥收缩率达1.29%,这可能是碱矿渣胶凝材料较细的孔隙结构产生的较高毛细管应力所致^[22]; CW_1 组试件的28 d干燥收缩率为1.17%,较 CW_0 组试件降低9.3%,这说明碳酸钙晶须的掺入对碱矿渣胶凝材料的干燥收缩有一定改善效果;当碳酸钙晶须掺量为5%时, CW_5 组的28 d干燥收缩率最小,仅有0.87%,较 CW_0 组试件降低32.56%,这可能是微米级碳酸钙晶须在体系中

作为一种“限制相”起到了限制收缩的作用。晶须均匀分散在基体内,当基体受到内应力作用产生收缩时,晶须与基体紧密结合而产生的内摩擦力抵消了材料内部的部分收缩应力,从而达到减缩的效果。与普通硅酸盐水泥相比,碱激发胶凝材料中几乎不会有 $Ca(OH)_2$ 、钙矾石(Aft)和单硫型水化硫铝酸钙(AFm)等晶相物质生成,这些晶体结构在干燥条件下几乎不产生收缩^[23]。因此碳酸钙晶须的掺入相当于在体系中加入晶相物质,起到了减缓收缩的作用。

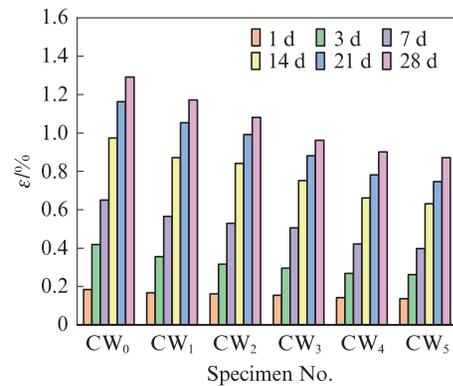


图4 碳酸钙晶须掺量对碱矿渣胶凝材料干燥收缩的影响

Fig. 4 Effect of calcium carbonate whiskers' content on drying shrinkage of alkali-activated slag cementitious materials

碳酸钙晶须掺量对碱矿渣胶凝材料质量损失率的影响如图5所示。由图5可见:(1) CW_0 组试件的质量损失率远小于其余组试件。李爽等^[24]认为碱矿渣胶凝材料中大部分水以结合水的形式存在于凝胶中,在干燥条件下水分散失较少,表明自由水的散失并不是碱矿渣胶凝材料干缩较大的主要原因。(2)随着碳酸钙晶须掺量的增加,碱矿渣胶凝材料质量损失率逐渐增大。这是因为过量的碳酸钙晶须分布在碱矿渣胶凝材料内部,体系中存在更多的界面过渡区,导致失水过程更为严重;另外碳酸钙晶须的掺入增大了碱矿渣胶凝材料的孔隙率,使得水分能够更快地蒸发散失。由此说明,过高的碳酸钙晶须掺量会降低碱矿渣胶凝材料的工作性能和力学性能,选择适宜的碳酸钙晶须掺量对提高碱矿渣胶凝材料性能有着重要意义。

2.4 收缩开裂

图6为不同碳酸钙晶须掺量下碱矿渣胶凝材料的经时变化图。由图6可见:(1)在干燥条件下,随着龄期的延长,碱矿渣胶凝材料收缩开裂情况越发严重。(2)未掺碳酸钙晶须的 CW_0 组试件收缩开裂最为明显,在3 d时就出现明显的宏观裂缝,并且随着龄期的延长,裂缝逐渐向试件内部发展,且宽度也随之

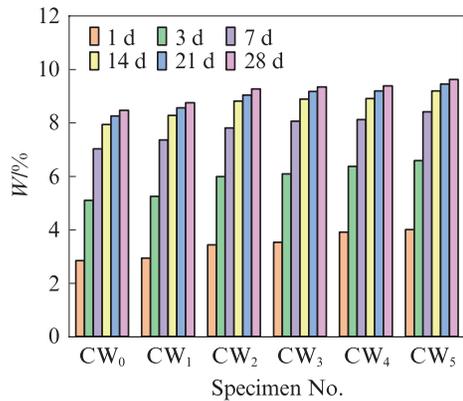


图5 碳酸钙晶须掺量对碱矿渣胶凝材料质量损失率的影响
Fig. 5 Effect of calcium carbonate whiskers' content on mass loss rate of alkali-activated slag cementitious materials

变宽;当碳酸钙晶须掺量为1%时,CW₁组试件开裂情况在同一龄期内较CW₀组试件有显著改善,裂纹数量显著减小且裂缝宽度也相应减小。(3)掺入碳酸钙晶须后,碱矿渣胶凝材料的开裂情况有显著改善,且晶须掺量越大,试件的初裂时间逐渐延长,表明晶须的掺入可以延缓裂纹产生的时间,这可能是因为碳酸钙晶须的桥接作用分散了基体所受的部分收缩开裂应力。(4)当碳酸钙晶须掺量为5%时,CW₅组试件早期未出现明显裂缝,试件表面遍布着如“蛛网”般的细小裂纹,但并没有明显的宏观裂纹,这表明碳酸钙晶须可有效限制碱矿渣胶凝材料的收缩开裂,其在受力拉伸、拔出和拉断过程中消耗了能量,降低了收缩应力对碱矿渣胶凝材料的破坏作用。

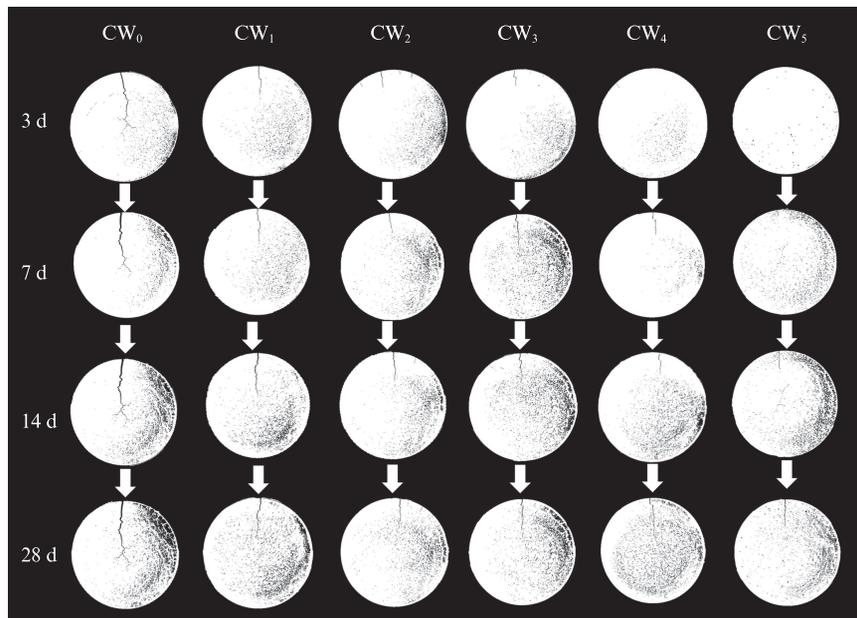


图6 不同碳酸钙晶须掺量下碱矿渣胶凝材料的经时变化图

Fig. 6 Longitudinal changes of alkali-activated slag cementitious materials under different calcium carbonate whiskers' contents

2.5 碳酸钙晶须对碱矿渣胶凝材料的减缩增强机理分析

图7为不同碳酸钙晶须掺量下碱矿渣胶凝材料的SEM照片.由图7可见:(1)随着碳酸钙晶须掺量的增加,试件因收缩产生的裂纹不断减少.(2)未掺碳酸钙晶须的CW₀组试件基体上裂纹较多,龟裂般地分布在基体内部,这表明CW₀组试件基体内部缺陷较多,在基体抵抗收缩应力时,很容易产生微裂纹,微裂纹随着时间的延长逐渐发展成宏观裂缝.(3)掺入3%碳酸钙晶须的CW₃组试件内部裂纹明显减少,这主要是因为碳酸钙晶须的掺入使裂纹沿着晶须和胶凝材料的界面发展,改变了裂纹的传播方向,从而推迟了裂缝的形成和展开.(4)掺入5%碳酸钙晶须

的CW₅组试件表面裂纹较CW₃组试件略有减少,但产生了数量较多的白色团聚,这是因为微米级的碳酸钙晶须分散性差,晶须掺量越多团聚现象越为明显,团聚的晶须在基体内部不仅不能起到增强作用,反而会作为缺陷增大基体孔隙,降低碱矿渣胶凝材料的密实程度.这种晶须团聚现象不利于提高材料的力学性能,且会造成浆体流动性变差.故碳酸钙晶须掺量不宜过高,应控制在合理范围内.

图8为碳酸钙晶须在碱矿渣胶凝材料基体中的激光共聚焦图像.由图8可见:(1)碳酸钙晶须的显微增强机理由晶须桥接、晶须拔出和晶须断裂组成^[25].(2)碳酸钙晶须在基体中起到了裂纹桥接作用(图8(a)),当应力沿着裂纹发展时,晶须阻挡在裂纹发展

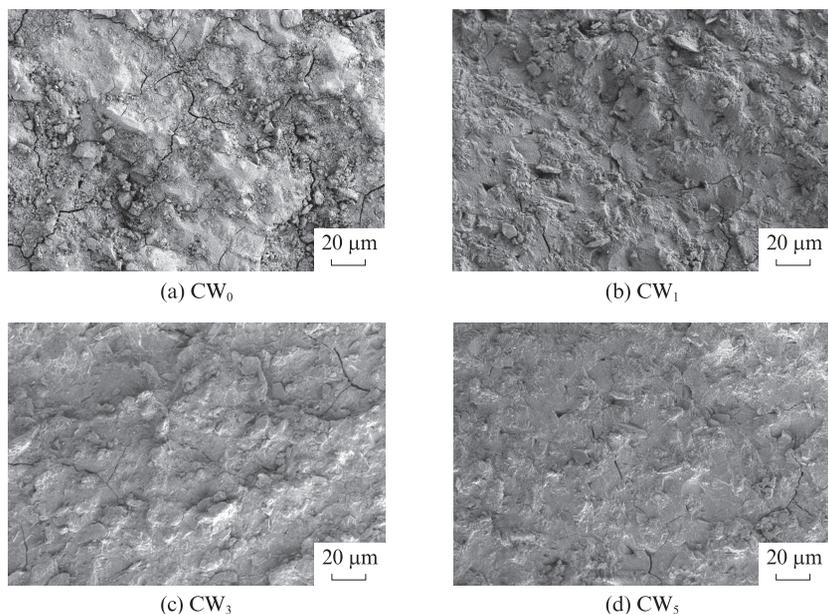


图7 不同碳酸钙晶须掺量下碱矿渣胶凝材料的SEM照片

Fig. 7 SEM images of alkali-activated slag cementitious material with different calcium carbonate whiskers' contents

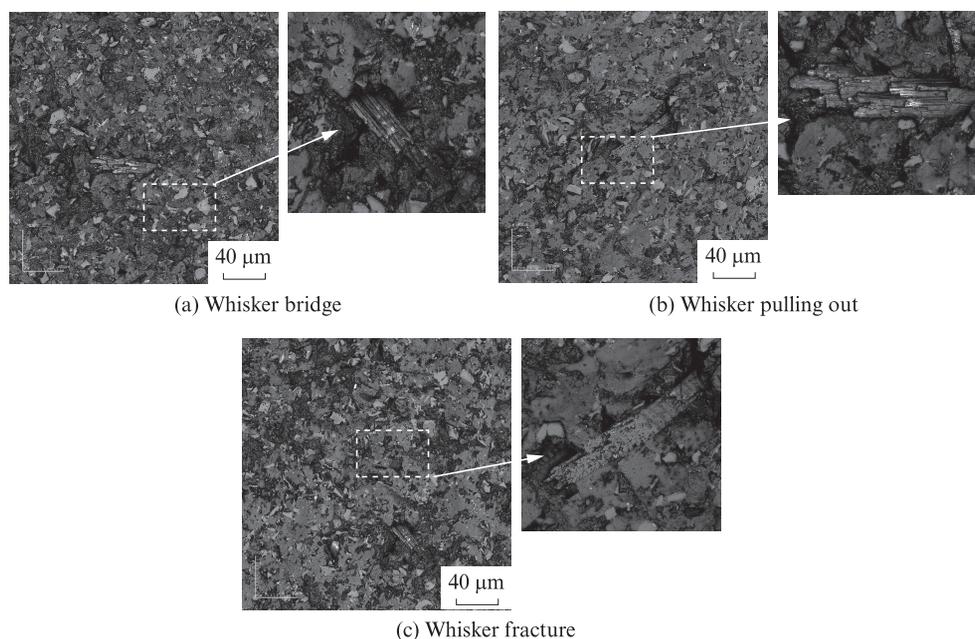


图8 碳酸钙晶须在碱矿渣胶凝材料中的激光共聚焦图像

Fig. 8 Laser confocal images of calcium carbonate whisker in alkali-activated slag cementitious materials

路线上,不仅会阻挡裂纹发展,且分散了基体所受应力;当晶须受力破坏后,裂纹贯穿晶须继续发展(图8(b)),或是沿着晶须与基体的界面继续发展(图8(c)),有效消耗了碱矿渣胶凝材料的破坏能量.在基体受到拉应力作用时,晶须拔出和晶须断裂成为主要增强效应.碳酸钙晶须在拔出或断裂的过程中,与基体相邻界面发生剥离或摩擦作用,耗散一部分裂纹发展能量,保证了材料在应力较大情况下和裂后阶段的力学性能.这3种增强阻裂机理在材料的不同部位或不同拉压环境下协同作用,改善了碱矿渣胶

凝材料的性能.

3 结论

(1)碱矿渣胶凝材料的屈服应力与塑性黏度均随着碳酸钙晶须掺量的增加而增大,但掺入微米级碳酸钙晶须的碱矿渣胶凝材料受“纤维阻塞作用”影响较小,浆体的流动性能依然较好.当碳酸钙晶须掺量为3%时,碱矿渣胶凝材料的塑性黏度仅较未掺碳酸钙晶须的对照组增加14.48%.

(2)碱矿渣胶凝材料3、28 d抗压强度随着碳酸

钙晶须掺量的增加呈先增后减趋势.当碳酸钙晶须掺量为3%时,CW₃组试件3、28 d抗压强度最高,分别为70.1、105.8 MPa.

(3)碳酸钙晶须对碱矿渣胶凝材料的干燥收缩起到了缓解作用.碱矿渣胶凝材料的干燥收缩率随碳酸钙晶须掺量的增加而降低.未掺碳酸钙晶须的CW₀组试件28 d干燥收缩率为1.29%;当碳酸钙晶须掺量为5%时,CW₅组试件28 d干燥收缩率仅有0.87%,较未掺晶须的CW₀组试件降低32.56%.碳酸钙晶须的裂纹桥接作用不仅有效抑制了微裂纹的萌生和发展,延缓了碱矿渣胶凝材料的初裂时间,且在一定程度上限制了宏观裂纹的产生.

(4)碳酸钙晶须的显微增强机理由晶须桥接、晶须拔出和晶须断裂组成.碳酸钙晶须与基体紧密结合,不仅能够分散基体所受应力,阻碍基体内部裂纹发展,提高碱矿渣胶凝材料的抗压强度,而且晶须与基体结合而产生的内摩擦力抵消了材料内部的部分收缩应力.3种机理协同作用下,碳酸钙晶须在碱矿渣胶凝材料中起到显著的减缩增强作用.

参考文献:

- [1] PROVIS J L, PALOMO A, SHI C J. Advances in understanding alkali-activated materials[J]. Cement and Concrete Research, 2015, 78:110-125.
- [2] 丁兆洋, 苏群, 李明泽, 等. 水玻璃模数对地聚物再生混凝土力学性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2023, 26(1):61-70. DING Zhaoyang, SU Qun, LI Mingze, et al. Influence of sodium silicate modulus on mechanical properties of geopolymers reclaimed concrete[J]. Journal of Building Materials, 2023, 26(1):61-70. (in Chinese)
- [3] 杨凯, 杨永, 李欣媛, 等. 碱矿渣胶结材低温水化行为与早期微观结构[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(5):993-1000, 1015. YANG Kai, YANG Yong, LI Xinyuan, et al. Low temperature hydration behavior and early microstructure of alkali slag cement [J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(5):993-1000, 1015. (in Chinese)
- [4] 郑毅, 王爱国, 刘开伟, 等. 不同地聚物砂浆抗硫酸盐侵蚀性能及其机理分析[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(6):1224-1233. ZHENG Yi, WANG Aiguo, LIU Kaiwei, et al. Analysis of sulfate corrosion resistance and mechanism of different polymer mortars [J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(6):1224-1233. (in Chinese)
- [5] 王爱国, 王星尧, 孙道胜, 等. 地聚物凝结硬化及其调节技术的研究进展[J]. 材料导报, 2021, 35(13):5-14. WANG Aiguo, WANG Xingyao, SUN Daosheng, et al. Research progress in coagulation hardening and regulating techniques of geopolymers[J]. Material Reports, 2021, 35(13):5-14. (in Chinese)
- [6] 马保国, 亓萌, 李宗津. 碱-矿渣水泥快速凝结的影响因素与机理研究[J]. 建筑材料学报, 1999, 2(2):9-14. MA Baoguo, QI Meng, LI Zongjin. Study on the influencing factors and mechanisms of rapid setting of alkali slag cement[J]. Journal of Building Materials, 1999, 2(2):9-14. (in Chinese)
- [7] ARCHEZ J, FARGES R, GHARZOUNI A, et al. Influence of the geopolymers formulation on the endogenous shrinkage[J]. Construction and Building Materials, 2021, 298:123813.
- [8] ZHANG B, ZHU H, CHENG Y Z, et al. Shrinkage mechanisms and shrinkage-mitigating strategies of alkali-activated slag composites: A critical review [J]. Construction and Building Materials, 2022, 318:125993.
- [9] YE H L, RADLIŃSKA A. Shrinkage mitigation strategies in alkali-activated slag[J]. Cement and Concrete Research, 2017, 101:131-143.
- [10] COLLINS F, SANJAYAN J G. Effect of pore size distribution on drying shrinking of alkali-activated slag concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2000, 30(9):1401-1406.
- [11] YE H L, RADLIŃSKA A. Shrinkage mechanisms of alkali-activated slag[J]. Cement and Concrete Research, 2016, 88, 126-135.
- [12] TENNIS P D, JENNINGS H M. A model for two types of calcium silicate hydrate in the micro structure of Portland cement pastes [J]. Cement and Concrete Research, 2000, 30(6):855-863.
- [13] 姜正平, 明维. 蒸压养护碱激发矿渣混凝土中钢筋早期锈蚀状况[J]. 建筑材料学报, 2018, 21(2):222-227. JIANG Zhengping, MING Wei. Early corrosion of steel bars in alkali activated slag concrete by autoclave curing[J]. Journal of Building Materials, 2018, 21(2):222-227. (in Chinese)
- [14] CAO M L, ZHANG C, WEI J Q. Microscopic reinforcement for cement based composite materials[J]. Construction and Building Materials, 2013, 40:14-25.
- [15] 刘翼玮, 张祖华, 史才军, 等. 硅灰对高强度地聚物胶凝材料性能的影响[J]. 硅酸盐学报, 2020, 48(11):1689-1699. LIU Yiwei, ZHANG Zuhua, SHI Caijun, et al. Effect of silica fume on the properties of high-strength geopolymers cementitious materials[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2020, 48(11):1689-1699. (in Chinese)
- [16] CAO M L, XU L, ZHANG C. Rheology, fiber distribution and mechanical properties of calcium carbonate (CaCO₃) whisker reinforced cement mortar[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2016, 90:662-669.
- [17] 曹明莉, 许玲, 张聪. 不同水灰比、砂灰比下碳酸钙晶须对水泥砂浆流变性的影响[J]. 硅酸盐学报, 2016, 44(2):246-252. CAO Mingli, XU Ling, ZHANG Cong. Effect of calcium carbonate whiskers on the rheological properties of cement mortar under different water cement ratios and sand cement ratios[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2016, 44(2):246-252. (in Chinese)
- [18] CAO M L, WEI J Q, WANG L J. Serviceability and reinforcement of low content whisker in Portland cement [J].