

## 多元固废碱激发胶凝材料收缩行为研究进展

胡世聪<sup>1</sup>, 程岗<sup>2</sup>, 姜铭钰<sup>1</sup>, 卞宇轩<sup>1</sup>, 李英杰<sup>1</sup>, 郭可敖<sup>1</sup>, 邵建文<sup>1,3\*</sup>

1. 鲁东大学, 水利土木学院, 山东 烟台, 264025
2. 山东九宏建设集团有限公司, 山东 烟台, 264025
3. 山东省河口海岸与核环境重点实验室, 山东 烟台, 264025

**摘要:** 利用工业固废(粉煤灰与高炉矿渣)替代传统硅酸盐水泥制备新型低碳胶凝材料已成为建材领域实现“双碳”目标的重要技术路径。然而,碱激发材料在硬化过程中存在早龄期收缩变形大、约束状态下体积稳定性差缺陷,已成为限制其大规模应用的瓶颈。本文系统研究了多元固废碱激发材料的自由收缩与约束收缩行为、关键影响因素及其对体积稳定性的作用机制。在自由收缩方面,对比了接触法与非接触法的测试原理,揭示了基于化学收缩、自干燥效应及毛细管张力理论的物理化学机制;在约束收缩方面,本文对比并厘清了典型约束评估方法(平板法、圆环法、椭圆环法及外方内圆偏心约束法)的物理机制、应力分布特征及适用范围。进一步阐明了废旧轮胎橡胶颗粒、前驱体、功能外掺料对收缩与抗裂性能的调控规律及微观机制,为材料收缩行为的可控调节与性能协同优化提供理论支撑与实践路径。

**关键词:** 工业固废; 胶凝材料; 自由收缩; 约束收缩; 应力

## Research progress on shrinkage behavior of multi-component solid waste base-activated cementitious materials

Shicong Hu<sup>1</sup>, Gang Cheng<sup>2</sup>, Mingyu Lou<sup>1</sup>, Yuxuan Bian<sup>1</sup>, Yingjie Li<sup>1</sup>, Keao Guo<sup>1</sup>, Jianwen Shao<sup>1,3\*</sup>

1. School of Hydraulic and Civil Engineering, Ludong University, Yantai 264025, China
2. Shandong Jiuhong Construction Group Company Limited, Yantai 264025, China
3. Shandong Key Laboratory of Estuary and Coast & Nuclear Environment, Yantai 264025, China

**Abstract:** The utilization of industrial solid wastes (fly ash and ground granulated blast-furnace slag) as substitutes for traditional Portland cement to prepare novel low-carbon cementitious materials has become an important technological pathway for achieving the "carbon peak and carbon neutrality" goals in the field of construction materials. However, alkali-activated materials have large shrinkage deformation at early age and poor volume stability under constraint during hardening, which has become a bottleneck limiting their large-scale application. This study systematically investigated the free shrinkage and restrained shrinkage behavior of multi-component solid waste alkali activated materials, key influencing factors, and their mechanism of action on volume stability. For free shrinkage, the testing principles of contact and non-contact methods were compared, and the physico-chemical mechanism based on chemical shrinkage, self-drying effect and capillary tension theory was revealed. Regarding restrained shrinkage, this study systematically compared and elucidated the physical mechanisms, stress distribution characteristics, and applicability of typical restrained evaluation methods, such as the flat plate method, ring method, elliptical ring method, and restrained squared eccentric ring test method. The regulation and micro-mechanism of waste tire rubber particles, precursors and functional admixture on shrinkage and crack resistance were further clarified. The findings of this study provide theoretical support and practical path for controllable adjustment of shrinkage behavior and

synergistic optimization of properties.

**Keywords:** Industrial solid waste; Cementitious materials; Free shrinkage; Restrained shrinkage; Stress

全球基础设施的快速发展驱动了硅酸盐水泥的巨量消耗,然而,普通硅酸盐水泥(Ordinary Portland Cement, OPC)生产的主要问题在于其伴随的高能耗与严重的环境负荷。据统计,全球人类活动产生的CO<sub>2</sub>中约有7%-8%源自于水泥工业生产,其排放强度约为每生产1 t传统OPC熟料需排放760 kg CO<sub>2</sub><sup>[1]</sup>。在当前全球积极推进双碳战略的背景下,探索并研发低碳胶凝材料已成为土木工程领域应对日益严峻的碳排放挑战的重要举措。碱激发胶凝材料正是极具发展潜力和备受关注的典型代表,其主要制备原料通常为富含硅铝相的工业副产品或废弃物,在经过碱激发剂活化后可快速水化并形成三维网状结构的胶凝材料<sup>[2]</sup>。然而,由于其快速的“溶解-缩聚”反应,碱激发胶凝材料体积稳定性问题尤为突出,在相同的养护条件下,其收缩值约为OPC混凝土的4-7倍,在受到内部钢筋或外部边界约束时极易发生早期开裂<sup>[3]</sup>。收缩引发的宏观裂缝不仅会直接降低结构的承载能力,还会为水分、氯离子等侵蚀性介质提供入侵的快速通道,加速内部微观结构的劣化,从而严重损害结构的耐久性与长期服役寿命。

针对碱激发胶凝材料的体积稳定性难题,亟需从自由收缩与约束收缩两个层面系统揭示其演化规律,明晰相关表征方法、测试原理及物理化学机制。本文基于多维度视角研究多元固废碱激发胶凝材料的收缩行为,厘清各类测试方法的原理与适用条件,阐明固废组分、前驱体、功能外掺料对自由收缩变形与约束开裂性能的影响规律,为高体积稳定性抗裂材料的收缩调控提供理论依据与方法支撑。

## 1 自由收缩性能

自由收缩是胶凝材料在无物理边界或几何约束情况下因内部水分蒸发、化学反应或温湿度变化而产生的宏观体积减小的现象。碱激发胶凝材料的自由收缩为非破坏性的,在硬化初期和长期演化中影响显著,主要分为自收缩与干燥收缩两类。

### 1.1 自收缩与干燥收缩机制

自收缩发生在完全密封、与外界无水分和介质交换的环境中,由材料内部发生的化学及物理变化引起的宏观体积变形,其核心机制由化学收缩与自干燥效应共同主导。

#### (1) 化学收缩

富含硅铝质原料的前驱体(如高炉矿渣、粉煤灰)在碱性激发剂活化下,OH<sup>-</sup>攻击Si-O-Si/Al键,导致玻璃体表面解聚,生成[Si(OH)<sub>4</sub>]、[Al(OH)<sub>4</sub>]<sup>-</sup>等可溶性单体并重新缩聚形成水化产物(如C-A-S-H凝胶或N-A-S-H凝胶)<sup>[4]</sup>。但水化产物的绝对体积小于反应前前驱体固相体积与液相激发的绝对体积之和,导致材料体积缩小。矿渣碱激发胶凝材料的化学收缩约为普通硅酸盐水泥的2倍<sup>[5]</sup>。

#### (2) 自干燥效应

胶凝体系初凝形成硬化骨架后,持续水化消耗内部毛细孔自由水,且由于无法从外界汲取水分,孔隙液面下降从而产生毛细管张力。根据开尔文方程与拉普拉斯方程,内部孔隙液的相对湿度(RH)与毛细管负压( $P_{cap}$ )的数学关系可用热力学模型定量表征:

$$P_{cap} = -\frac{RT}{V_m} \ln(RH) = \frac{2\gamma \cos \theta}{r_c} \quad (1)$$

式中, $P_{cap}$ 为非润湿相与润湿相的压力差值, $P_{cap} > 0$ , Pa;  $R$ 为通用气体常数,取8.314 J/(mol·K);  $T=293.15$ K表示绝对温度;  $V_m$ 为液体的摩尔体积, m<sup>3</sup>/mol;  $\gamma$ 为液体的表面张力, N/m;  $\theta$ 为溶液与

孔壁夹角, 假定完全润湿取  $\theta = 0$ ;  $r_c$  为毛细管的内半径, m。

从式 (1) 可以看出, 极小的特征孔径  $r_c$  会导致  $P_{cap}$  呈几何级数增长。在凝结硬化初期, 毛细管张力作用于低弹性模量、易变形的胶凝体系上时, 自收缩变形值会显著增大。干燥收缩则发生在敞开环境中, 因材料内部水分向外界环境迁移引起。

## 1.2 非破坏性自由收缩测试手段

目前, 碱激发胶凝材料的自收缩与干燥收缩需采用非破坏性的测量手段, 常用如波纹管法、接触法和非接触法三种形式, 以确保试件在不受外部接触荷载和约束阻碍的前提下记录线性收缩随时间的演化曲线。波纹管法适用于净浆、砂浆和混凝土, 其原理是材料收缩推动波纹管端板, 通过 LVDT 或激光测量位移。净浆与砂浆的常用试件尺寸为直径 27-30mm、长 420mm; 混凝土试件则为直径 60-80mm、长 420mm。若测试终端连接收缩变形测定仪, 其收缩零点通过变形速率曲线对时间的导数计算确定。相对于波纹管法, 接触法应用更为广泛, 接触法包括采用精度为 0.01mm 的游标卡尺、千分表或百分表、LVDT、立式砂浆收缩仪、比长仪、HSP-540 型混凝土卧式收缩膨胀仪等。原理与波纹管法类似, 但试件形状不同。净浆常用 25mm×25mm×280mm, 砂浆为 40mm×40mm×160mm, 混凝土为 100mm×100mm×515mm。非接触法如 HC-CONE 型激光收缩变形测定仪、NELD-CS730 型非接触波纹管收缩膨胀测定仪分别利用了激光位移器测距与电涡流位移传感器测距原理。

目前, 学者们对自收缩时间零点的确定尚未达成共识, 不同收缩测试方法因零点定义不同, 其测得的收缩率绝对值不宜直接对比。非接触式方法 (激光法、电涡流法) 及波纹管法以浇筑完成时刻为零点, 能够完整记录从塑性阶段至硬化阶段的全程收缩 (包括早期自收缩)。而接触式方法 (千分表、收缩仪等) 以拆模或养护结束时刻为零点, 缺失了该时刻之前发生的早期收缩信息。因此, 研究早龄期自收缩时应优先采用非接触式方法或波纹管法, 而评价长期干燥收缩时可选用设备成本更低的接触式方法。普遍认为, 碱激发净浆、砂浆和混凝土由于骨料的引入, 其收缩行为有显著差异。净浆的自收缩最为显著, 加入细骨料后砂浆收缩降低, 而混凝土因粗骨料的约束作用收缩最小。

## 2 约束收缩性能

当碱激发胶凝材料的自由体积变化受到周围相邻结构 (如地基、相邻板体) 或内部嵌入体 (如钢筋、纤维) 的机械约束时, 材料内部将自发积聚限制拉应力。一旦这一由收缩引发的拉应力超出了其各龄期实时的极限抗拉强度, 材料内部即会产生微裂纹甚至发生瞬间宏观断裂。因此, 通过约束收缩试验来定量表征材料在边界限制下的应力演化规律、拉应变极限、变形延性及开裂破坏模式, 是实现碱激发材料抗裂性安全设计的关键依据。

### 2.1 限制状态下的应力学机制

在约束状态下, 碱激发胶凝材料内部的拉应力演化是一个受自由收缩驱动、材料粘弹性调制的时间依赖过程。根据粘弹性叠加原理<sup>[6]</sup>, 受约束试件内部累积的拉应力可一般性地表达为:

$$s(t) = \int_0^t R(t, t') [de_{total}(t') - de_{free}(t')] \quad (2)$$

式中,  $s(t)$  为龄期  $t$  时刻约束试件内部累积的环向或轴向拉应力, MPa;  $R(t, t')$  为松弛模量, 表示在  $t'$  时刻对材料施加单位应变后至  $t$  时刻材料内部的残余应力水平, MPa;  $de_{total}(t')$  为总应变增量;  $de_{free}(t')$  为自由收缩应变增量。

由式 (2) 可知, 约束应力来源于总应变与自由收缩应变的差值在时程上的加权累加, 权重由  $R(t, t')$  决定。从物理过程来看, 约束应力的演化呈现出典型的“驱动-松弛”竞争机制。当材料发生自由收缩而其变形受到外部约束限制时, 两者之差即产生驱动应力。同时, 碱激发材料的粘弹性特性

使部分应力随时间松弛。早期硬化阶段收缩速率高但松弛能力强,此时应力累积缓慢。随龄期增长,水化作用区域完全,自由收缩速率逐渐降低,弹性模量和松弛模量不断增加,材料松弛能力渐弱,原本被耗散的部分累积应力逐步凝固为真实拉应力。当 $s(t)$ 超过龄期 $t$ 所对应的极限抗拉强度 $f_t(t)$ 时,材料发生开裂。因此,碱激发胶凝材料的抗裂性能并非仅由自由收缩量或强度值单独决定,而是由自由收缩、约束刚度、松弛模量演化及强度发展四者动态平衡共同决定的。

## 2.2 约束收缩评价方法

为准确测试约束条件下材料的早期抗裂特性,国内外学者开发了多种形式的约束收缩评价方法,其中主流的方法包括平板法<sup>[7]</sup>、圆环法、椭圆环法、外方内圆偏心约束法。本文以这4种方法为例,总结其测试原理、关键特征及适用范围,以期为后续试验方法的选取提供依据。

### (1) 平板法

平板法试件底部和四周被刚性固定,在平板上面架设碘钨灯照射,并采用风扇强制对流干燥,试件表面快速失水其产生的收缩受底部钢板约束,形成双向剪切拉伸应力场引发开裂。一般24h内记录首条裂缝出现时间,再用图像分析计算总开裂面积、平均及最大裂缝宽度。主要用于模拟路面、大面积耐磨地坪、薄层修补砂浆等平面双向约束结构在早龄期(塑性及硬化初期)受表面不均匀快速失水诱发的开裂行为。

### (2) 圆环法与椭圆环法

ASTM C1581推荐的圆环法是目前学术界研究硬化胶凝材料收缩开裂行为最常用的定量手段。如图1所示,待硬化达到规定龄期后拆除外模,并将圆环的顶面和底面用石蜡或铝箔胶带进行完全密封,从而使得圆环外侧表面成为唯一的水分蒸发路径。随着试件水分向外径向蒸发,环状试件沿径向收缩,这一运动受到高弹性模量内钢环的阻碍,从而在圆环胶凝材料内部激发出高度对称的环向限制拉应力。圆环法凭借其结构简单、约束对称的优势,能够沿圆周方向提供均匀、持续的环向约束,通过对钢环内表面应变的监测可定量计算碱激发胶凝材料在约束收缩下的开裂应力。然而,圆环法最大的局限在于其没有应力集中,从而导致开裂测试周期延长,尤其是在评估收缩较小或徐变松弛较大的高韧性、低收缩材料时,圆环试件往往需要数月甚至更长时间才能开裂,其裂纹也具有随机性,观察不便。

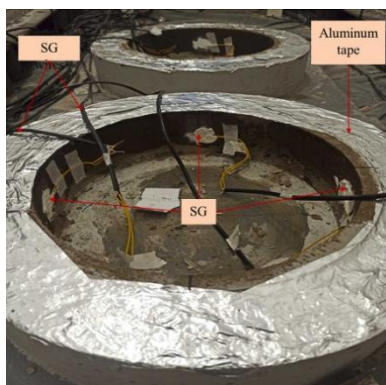


图1 约束圆环试件<sup>[8]</sup>

Fig. 1 Restrained ring test specimens<sup>[8]</sup>

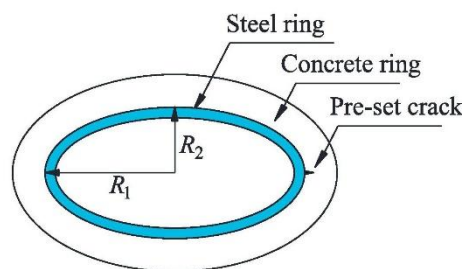


图2 椭圆环模具示意图<sup>[9]</sup>

Fig. 2 Schematic diagram of elliptical ring mold<sup>[9]</sup>

针对这一问题,大连理工大学董伟<sup>[9]</sup>等对圆环模具进行改进,通过将同心圆环改造为椭圆形环状试件(如图2所示)打破了结构对称性,在长轴端点会形成强烈应力集中,能大幅提前开裂时间,且首条裂缝几乎都出现在长轴端点,显著提升测试效率和裂缝捕获精度。

(3) 外放内圆偏心约束法

天津大学朱涵针对圆环法的缺陷同样进行了改进，砂浆与混凝土所用外方内圆偏心约束模具如图 3 和图 4 所示。由于这种独特的几何外方内圆非对称构造，当试件发生收缩变形时，其内部不仅承受圆柱刚性约束带来的径向发散压应力和环向限制拉应力，还由于方形尖角的边界约束和偏心偏置，在最薄侧壁区（偏心最窄截面）构造出极具挑战性的非对称拉伸-弯曲复合应力场。该方法不仅可以缩短试验周期，还可将裂缝固定在单一截面，这便于裂缝的监测与识别，有利于纤维增强、高延性高性能固废基胶凝材料抗裂性能的高效评估。基于数字图像相关(digital image correlation, DIC)法可清晰地观察到复合材料从弹性状态、微裂纹多重萌生状态到最终主裂缝宏观扩展开裂的多阶段演化特征。

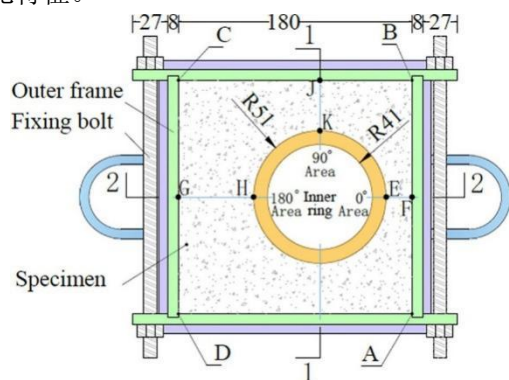


图 3 砂浆外方内圆偏心约束模具示意图<sup>[10]</sup>

Fig. 3 Schematic diagram of restrained squared eccentric ring mold for mortar<sup>[10]</sup>

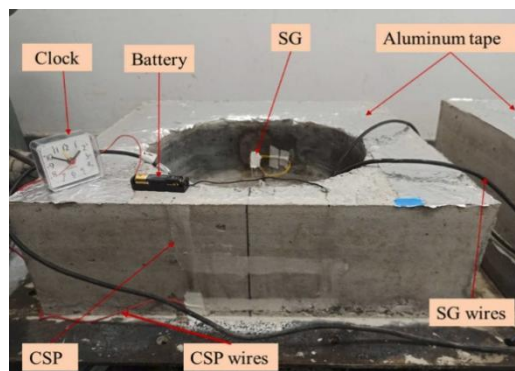


图 4 混凝土外方内圆偏心约束试件<sup>[8]</sup>

Fig. 4 Restrained squared eccentric ring specimen for concrete<sup>[8]</sup>

为了给工程实践中多元固废碱激发材料的抗裂性能测试提供清晰的试验方法选择指导，表 1 对比总结了上述 4 种方法的关键特征、优缺点及适用范围。

表 1 约束收缩试验方法对比

Table 1 Comparison of restrained shrinkage test methods

测试方法	测试原理	优点	缺点	适用范围
平板法	面层快速失水，下部强约束限制产生应力集中	较好模拟薄壁地坪、路面及大面积修补面层的真实风速/温度失水开裂	边界约束均匀度较差，重现性偏低	塑性阶段超早期开裂敏感性、风吹/日晒模拟加速开裂性能评估
圆环法	径向收缩受阻，产生对称、均匀拉应力	结构高度对称，应力解析模型成熟，标准规范健全	开裂位置具有随机性；对于低收缩材料，试验周期漫长	硬化后中长期抗裂性评价、约束开裂龄期及拉应变水平的精确测定
椭圆环法	不均匀曲率促使在长轴端产生局部应力集中	开裂位置可预测，缩短试验周期	应力状态非对称，断裂解析公式较为复杂	高断裂韧性或高性能复合材料的抗裂性加速试验
外方内圆偏心约束法	最薄弱截面在拉弯复合应力下诱发拉应变梯度，产生应力集中	开裂位置唯一，缩短试验周期	应力状态非对称，对应变场的有限元辅助解析依赖度高	高断裂韧性或高性能复合材料的抗裂性加速试验与 DIC 表征

3 收缩行为的影响因素分析

### 3.1 自由收缩的影响因素

碱激发胶凝材料自由收缩的核心影响因素包括固废组分、前驱体类型与活性、骨料改性、功能外掺料、外部养护条件等。本文从以下几个方面进行阐述。

#### (1) 固废组分、前驱体的影响

高炉矿渣作为富含钙的硅铝酸盐固废，其在碱性溶液中的水化反应十分迅速。高活性的  $\text{Ca}^{2+}$  快速溶出并重新缩聚生成 C-A-S-H 凝胶，该凝胶具有显著的化学收缩和自干燥效应。此外，矿渣碱激发材料硬化后生成的毛细孔、介孔比例占据主导，导致基体极易因失水和自干燥发生严重的早期宏观体积减小，故其自收缩与干燥收缩值比其他各类胶凝材料高<sup>[11]</sup>。粉煤灰在碱溶液中的常温反应活性相对较低，水化放热量微弱，主要生成以三维网络结构为特征的无定型钠基硅铝酸盐水化凝胶 (N-A-S-H)，收缩值远小于纯矿渣碱激发胶凝材料。将工业废旧轮胎橡胶破碎为细小颗粒作为砂的替代骨料引入碱激发胶凝材料中，但随着替代比例的增加基体的干燥收缩增大。目前，有关橡胶改性碱激发胶凝材料收缩方面的研究还不够充分，且长期服役性能下的表现也罕有报道<sup>[12]</sup>。

#### (2) 功能外掺料的影响

为了实现对多元固废碱激发材料收缩的精准靶向控制，一系列针对性化学和物理改性外掺料应运而生。高吸水性树脂 (SAP)、纳米二氧化硅 (NS)、纳米纤维素、膨胀剂、减缩剂等通常被用来调控高收缩复合材料特性。减缩剂 (如聚乙二醇类) 通过降低孔隙液表面张力减少干缩裂纹，膨胀剂 (如氧化镁、钙矾石系) 借助晶体生长产生体积膨胀以抵消收缩。SAP 由于在拌合过程中吸水并在硬化后释水而常被用作内养护剂。Song<sup>[13]</sup> 等采用波纹管法研究了单掺 SAP 与 NS 对粉煤灰-矿渣基自收缩性能的影响，图 5 展示了不同收缩阶段所对应的自收缩随龄期的变化规律，从中可以看出，单掺 SAP、NS 均可有效降低最终自收缩值，且随掺量提升收缩抑制效果进一步增强。

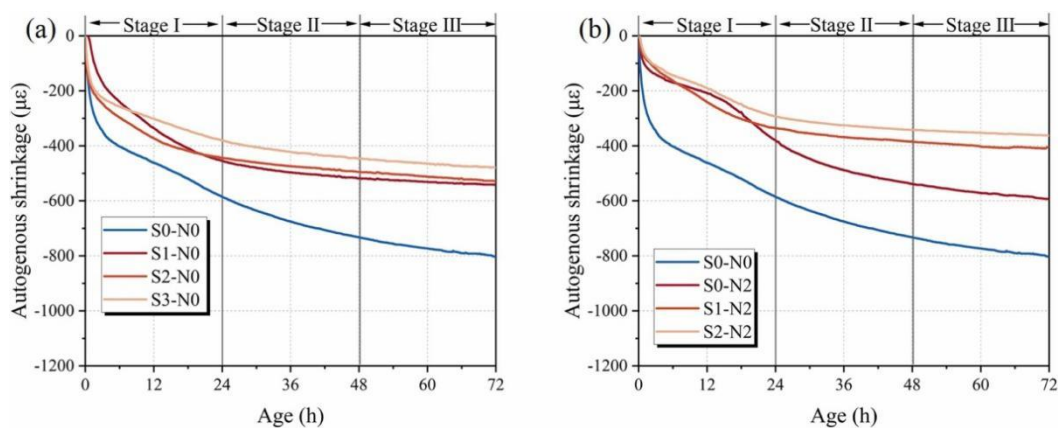


图 5 不同收缩阶段下自收缩随龄期的演化曲线<sup>[13]</sup>: (a)单掺 SAP; (b)单掺 NS。

Fig. 5 Evolution curves of autonomic shrinkage at different shrinkage stages<sup>[13]</sup>: (a) with SAP; (b) with NS.

### 3.2 约束收缩与抗裂性能的影响因素

当胶凝材料处于钢环、边界等约束状态下时，其行为不再局限于简单的体积变形大小，而是取决于拉伸应力累积速率与基体极限抗拉强度、拉伸变形能力、延性及局部能量释放 (开裂模态) 等诸多力学物理参量的动态平衡过程。

#### (1) 多元固废与橡胶颗粒对拉应变及变形延性的调控

多元固废配比和改性骨料的引入，对材料在约束状态下的变形能力与韧性具有改善作用。传统碱激发矿渣具有极其严重的早期脆性 (弹性模量大、延伸率低、脆性指数高)，在钢环下表现为突发

性、瞬时式的断裂。若在矿渣体系中引入适量的粉煤灰（复配制备矿渣-粉煤灰多元固废地聚物）可利用粉煤灰减缓胶凝材料的溶解-缩聚反应动力学进程，延长凝结时间，降低早期放热峰值，从而减小早期自收缩。同时，也可充分发挥粉煤灰的“滚珠效应”与孔隙填充作用，减小水分蒸发或水化反应引起的自由收缩。若在碱激发胶凝材料中引入橡胶颗粒这一柔性因子，橡胶颗粒在胶凝材料内部相当于无数个“弹性缓冲器”微元，当周围矿渣凝胶因水化失水向内发生物理缩聚时，由于橡胶颗粒极易发生压缩变形，它可以柔性地适应并吸收周围介质传递的拉应变能，在微观上阻止了宏观收缩的连续性累积。

#### (2) 开裂模态的演化与调控机制

开裂模态是衡量结构抗裂安全的核心指标，纯碱激发矿渣体系受约束时易产生单一突发性宏观贯穿裂缝，属于极脆性破坏，而通过加入橡胶颗粒、纤维或纳米纤维素，并配合粉煤灰与矿渣复配的改性体系，可将开裂模态重塑为多重细密分散微裂缝，使破坏模式由单一拉伸破坏转变为拉伸与剪切复合破坏，大幅提升材料延性与结构长期安全性。

## 4 结论

多元固废碱激发胶凝材料的体积变形与抗裂性能是制约该材料规模化工程应用和服役安全的关键问题。本文系统探究了碱激发胶凝材料的自由收缩机理、自由与约束收缩测试方法及多层级因素对材料体积稳定性与开裂行为的影响规律，主要研究结论如下：

(1) 自干燥效应与毛细管负压是诱发碱激发胶凝材料收缩加剧的核心驱动机制。高钙矿渣前驱体可发生快速溶解缩聚反应，产生的早期化学收缩远高于其它各类碱激发胶凝材料。同时，溶解-缩聚反应生成的致密化介孔孔隙网络会在内部水分消耗与表面水分蒸发的梯度作用下产生高强度毛细管负压，这是碱矿渣基碱激发胶凝材料早期自由收缩显著的根本原因。

(2) 在自由收缩测量方面，传统接触法测试对收缩零点的敏感性较低，难以精准捕捉碱激发胶凝材料超早期收缩演化规律。采用波纹管法或非接触式测量方法相比传统接触式方法（拆模后测量）具有更高的适配性。

(3) 传统圆环法约束均匀但周期长、开裂随机。椭圆环等偏心约束法通过引入曲率变异与应力集中，缩短周期、定向诱导裂缝，适用于评价纤维/橡胶增韧的碱激发胶凝材料或其它低收缩、高韧性复合材料的收缩开裂行为。建议在条件具备时引入圆环法开展平行对比测试，以保障测试数据具有良好的可比性。

(4) 在约束状态下，碱激发胶凝材料的抗裂性能取决于拉应力累积与抗拉、延性的动态平衡。多元固废组分对收缩开裂的调控，并非单一效应的叠加，而是一种此消彼长的协同。粉煤灰的作用在于抑制早期收缩的驱动能量；橡胶颗粒则以其柔性骨架，为应变能的耗散提供了通道。两者的互补，有助于引导约束开裂从能量瞬间释放的贯穿性脆断，转向渐进、分散的微细裂纹模式，从而改善材料在约束态下的失效韧性。

## 参考文献

- [1] 顾晓薇, 葛晓伟, 刘少迁, 等. 煤气化渣理化特性及其制备建筑材料研究进展[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(6): 29-45.
- [2] Fu Q, Bu M, Zhang Z, et al. Hydration characteristics and microstructure of alkali-activated slag concrete: a review[J]. Engineering, 2023, 20: 162-179.
- [3] Song N, Bai Y, Qian L, et al. Synergy of superabsorbent polymer and nano-silica in alkali-activated slag/fly ash-based concrete: Shrinkage mitigation and cracking resistance mechanism[J]. Construction and Building Materials, 2026, 518: 145840.

- [4] 黄国栋, 江鹏, 韩正虎, 等. 弱碱激发建筑废粉性能演变机制: 力学、凝结与流变特性研究[J]. 科学技术与工程, 2026, 26 (10): 4364-4374.
- [5] 顾晓薇, 王莹, 孙殿兴, 等. 复合激发剂作用下矿渣-钢渣胶凝体系的宏微观特性[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(8): 375-386.
- [6] BaZant Z P, Wittmann F H. Creep and shrinkage concrete structures [M]. New York: John Wiley & Sons Ltd.,1982.
- [7] Dhahir M K, Marx S, Shrinkage behaviour of high-strength concrete plates reinforced with carbon textile reinforcement [J]. Structures,2024, 69: 107504.
- [8] Borito S M, Bo Z, Zhu H, et al. Experimental Investigation on the Restrained Shrinkage of Internally Cured Concrete with Combined Use of Superabsorbent Polymers, Nanosilica and Basalt fibers[J]. Case Studies in Construction Materials, 2026: 05736.
- [9] Rong H, Dong W, Yuan W, et al. An improved ring test to assess cracking resistance of concrete under restrained shrinkage[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2021, 113: 102976.
- [10] Shao J, Zhu H, Xue G, et al. Mechanical and restrained shrinkage behaviors of cement mortar incorporating waste tire rubber particles and expansive agent[J]. Construction and Building Materials, 2021, 296: 123742.
- [11] Olayinka R, Jafari R, Fiset M. Shrinkage characteristics of geopolymer concrete: a comprehensive review[J]. Materials, 2025, 18(19): 4528.
- [12] Azunna S U, Abd Aziz F N A B, Al-Ghazali N A, et al. Review on the mechanical properties of rubberized geopolymer concrete[J]. Cleaner Materials, 2024, 11: 100225.
- [13] Song N, Bai Y, Qian L, et al. Synergy of superabsorbent polymer and nano-silica in alkali-activated slag/fly ash-based concrete: Shrinkage mitigation and cracking resistance mechanism[J]. Construction and Building Materials, 2026, 518: 145840.

**基金项目:** 国家级大学生创新创业训练计划项目 (202510451001), 山东省自然科学基金青年基金 (ZR2024QE185)。

<sup>1</sup> **第 1 作者简介:** 胡世聪 (2006-), 男, 本科在读, 研究方向: 固废资源化利用。E-mail: shicongHu@163.com。

**\*通讯作者简介:** 邵建文 (1992-), 男, 博士研究生, 讲师, 研究方向: 固废资源化利用。E-mail: jwshao@ldu.edu.cn。