

石膏-矿渣-水泥三元胶凝体系单轴压缩损伤演化与脆韧性协同机制

郭 宁

(中铁十二局集团第四工程有限公司, 陕西 西安 710021)

摘要: 为揭示石膏-矿渣-水泥(GSC)三元胶凝体系在单轴压缩作用下的损伤演化规律及脆韧性协同机制,通过调节石膏、水泥与矿渣配比,开展不同养护龄期的单轴压缩试验,并结合数字图像相关法(DIC)与扫描电镜(SEM)技术,从宏观力学响应、裂纹扩展特征和微观结构演化三个层面进行了系统分析。结果表明:随着养护龄期延长,GSC体系的抗压强度、弹性模量及裂纹起始应力、损伤应力均明显提高,峰后破坏特征由早期典型脆性逐步向准延性转变;提高水泥掺量有助于增强材料强度、刚度和整体胶结能力,但会导致脆性增强;石膏掺量对材料性能有显著的非线性影响:石膏掺量为10%时,可有效促进内部应力重分布与多裂纹协同扩展,提升韧性与抗裂能力;过量石膏则易造成结构连续性下降和力学性能劣化。综合比较可知,配比G10S70C20在28 d龄期下表现出最高抗压强度与较优变形协调能力,裂纹呈较典型的对称“X”形扩展,性能最佳。上述研究结果表明,石膏与水泥的协同调控是实现GSC体系强度提升与脆韧性平衡优化的关键。

关键词: 石膏-矿渣-水泥体系;单轴压缩;损伤演化;脆性指数评价;裂纹演化

doi: 10.3969/j.issn.1009-3842.2026.04.012

中图分类号: TF813; TF804.2 文献标识码: A 文章编号: 1009-3842(2026)04-0094-10

在“双碳”目标持续推进的背景下,传统硅酸盐水泥高能耗、高碳排放的弊端日益受到关注,开发低碳、高性能的新型胶凝材料已成为土木工程材料领域的重要研究方向^[1-2]。石膏-矿渣-水泥(GSC)体系作为一种兼具资源化利用与减排潜力的复合胶凝材料,可有效利用矿渣、工业副产石膏等固体废弃物,降低熟料用量和碳排放量,具有良好的工程应用前景^[3]。

矿渣是工业生产过程中产生的废渣,具有潜在水硬性,但其活性发挥通常依赖于碱性环境或外部激发条件^[4]。水泥水化可为GSC体系提供必要的碱性条件,并生成水化硅酸钙(C-S-H)凝胶等胶结产物,从而促进矿渣反应和结构致密化^[5]。与此同时,石膏作为重要的硫酸盐激发组分,可与体系中的活性铝组分发生反应生成钙矾石,在一定程度上改善孔隙结构、增强颗粒间胶结作用,并调节材料的力学性能^[6]。由此可见,石膏、水泥与矿渣三者之间存在复杂的协同作用关系,其配比变化将直接影响胶凝体系的强度形成、裂纹扩展及破坏模式。

目前,关于石膏-矿渣类低碳胶凝材料的研究,多集中于水化反应^[7-8]、早期强度或配比优化^[9-11]等方面。李传海等^[12]认为,石膏矿渣水泥的强度发展由石膏和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 协同调控,并取决于水化产物的时变结构演化。权娟娟等^[13]研究发现,掺入改性磷石膏后,28 d龄期时的水泥水化产物主要为钙矾石和C-S-H凝胶,钙矾石的生成量在改性磷石膏掺量为15%时达到峰值,未检测到 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 。易耀林等^[14]采用矿渣对土体进行固化时发现,与水泥相比,矿渣能明显提高固化效果,具有降低工程造价、环境友好等优势。而针对其在受压条件下的损伤演化规律、裂纹扩展机制及脆韧性调控效应的系统研究仍相对不足^[15-16],尤其对不同石膏、水泥掺量共同作用下的材料宏观力学响应与微观结构演化之间的内在联系尚不清晰,一定程度上制约了该类材料的高性能设计与工程推广。

基于此,本研究以石膏-矿渣-水泥(GSC)三元胶凝体系为研究对象,设置不同石膏、水泥和矿渣配比,开展不同养护龄期的单轴压缩试验,并结合数字图像相关法(DIC)和扫描电镜(SEM)技术,系

收稿日期: 2026-04-25; 修订日期: 2026-07-03

基金项目: 中铁十二局集团有限公司技术研发项目(2023研-42号)

作者简介: 郭宁(1990—),男,甘肃武山人,本科,工程师,研究方向: 绿色低碳胶凝材料与工程应用, E-mail: 1134732722@qq.com

统研究该体系的抗压强度演化、裂纹萌生与扩展特征以及微观结构变化规律，重点揭示关键组分对GSC体系强度、脆性与韧性协同调控的作用机制，并进一步明确最优配比区间，为石膏-矿渣-水泥低碳胶凝材料的性能优化与工程应用提供理论依据。

1 试 验

为系统研究GSC三元胶凝体系的力学性能演化规律及其损伤特征，本研究从材料组成、力学响应、微观结构表征三个层面开展试验研究。首先，通过设置不同石膏、水泥和矿渣配比，构建GSC三元胶凝体系的对比试验方案。其次，采用单轴压缩试验，获取不同试样在受荷过程中的宏观力学参数与破坏

模式特征；在此基础上，基于DIC技术对加载过程中的应变场分布和裂纹演化进行动态监测，并利用SEM分析试样的微观形貌与水化产物特征。通过宏观试验与微观测试相结合的方法，进一步揭示不同组分比对GSC体系强度、变形及破坏机制的影响规律，为后续结果分析提供依据。

1.1 试验原料

本次试验的基础原料包括石膏、矿渣和水泥，其化学成分见表1^[12, 17]。其中，石膏为江西北斗星环保新材料有限公司的高强石膏；矿渣取自江西省某冶炼厂的高炉矿渣；水泥选用P·O 42.5型普通硅酸盐水泥；拌合用水为市政自来水。

表1 原材料的化学组成

Table 1 Chemical composition of raw materials (%, mass fraction)

原料	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	SO ₃	TiO ₂	Others
矿渣	34.46	32.63	16.90	0.26	10.56	0.35	2.37	0.69	1.78
石膏	37.18	2.10	0.74	0.40	1.13	0.14	44.79	0.03	13.49
水泥	59.580	21.195	5.745	5.652	1.798	0.752	2.808	0.637	1.833

1.2 材料配合比设计

为系统研究石膏、水泥、矿渣在三元胶凝体系中的协同作用规律，以石膏、水泥、矿渣为主要胶凝组分，设计了12组配比的GSC试样(见表2)。试验设置10%、15%、20%共3个水泥掺量水平，以及5%、10%、15%和20%共4个石膏掺量水平；矿渣掺量随石膏、水泥掺量相应调整，以保证3种固体组分总质量保持一致。各组试样液固比统一控制为0.4。

试验采用高分子圆柱形模具(50 mm×100 mm)完成制样，其中GSC试样制备工艺如下：

- 1)将试验前期准备的石膏、矿渣、水泥与水充分混合，持续搅拌15 min，直至得到符合试验要求的匀质料浆。
- 2)将料浆快速均匀地填充至模具，充分振实，待料浆初凝后修平试样表面，并于24 h后进行脱模。
- 3)将得到的完整GSC试样用保鲜膜包裹后放入养护箱中养护，养护箱温度、湿度分别控制在(25±2)℃、(95±2)%。

通过上述配比设计，重点考察水泥掺量和石膏

表2 石膏-矿渣-水泥三元胶凝体系试验配比

Table 2 Experimental formulation ratios of gypsum-slag-cement binder system

编号	石膏 /%	矿渣 /%	水泥 /%	液固比
G5S85C10	5	85	10	0.4
G10S80C10	10	80	10	0.4
G15S75C10	15	75	10	0.4
G20S70C10	20	70	10	0.4
G5S80C15	5	80	15	0.4
G10S75C15	10	75	15	0.4
G15S70C15	15	70	15	0.4
G20S65C15	20	65	15	0.4
G5S75C20	5	75	20	0.4
G10S70C20	10	70	20	0.4
G15S65C20	15	65	20	0.4
G20S60C20	20	60	20	0.4

掺量对GSC体系力学性能、裂纹扩展特征及微观结构演化的影响规律。

1.3 单轴压缩试验

为评价不同配比GSC试样的宏观力学性能，开展单轴压缩试验。每组试验设置4个平行试样，以减小试验误差并提高结果可靠性。试验采用HN-

SFD型微机伺服压力机进行加载(图1),设备最大试验力为100 kN,测量结果相对误差不超过1%。试验采用位移控制加载方式,加载速率为0.20 mm/min;当试样应力下降至峰值应力的70%时,试验自动终止。通过单轴压缩试验,获取各组试样在不同养护龄期下的应力-应变响应、峰值强度及峰后破坏特征,为分析GSC体系的损伤演化和脆韧性变化提供基础试验数据。



图1 微机伺服万能试验机及DIC测试系统

Fig. 1 Universal servo testing machine and DIC test system

1.4 DIC 测试

为进一步揭示GSC试样受压过程中的非均匀变形特征与裂纹演化机制,本研究引入DIC技术,对试样加载全过程进行实时监测与分析(图1)。测试前,首先在试样表面喷涂黑白哑光散斑,构建满足图像识别要求的随机纹理;随后对DIC系统进行标定,并根据试验需求调整相机位置和光照条件;之后选定试样表面的观测区域,设置DIC软件计算参数,包括子区尺寸和步长等;最后通过图像匹配计算获得试样表面的位移场与应变场分布。DIC技术可直观反映裂纹萌生、扩展、汇聚及贯通的全过程,为分析不同配比试样的破坏模式及应变局部化特征提供重要依据。结合单轴压缩结果,可更全面地揭示GSC体系在受压条件下的损伤演化规律。

1.5 SEM 测试

为从微观层面分析GSC体系的结构特征及其与宏观力学性能之间的关系,采用SEM技术对试样进行微观形貌观测。选取28 d龄期试样,将其压碎后

从试样中心部位取样,并在105℃烘箱中干燥8 h,随后进行喷金处理,再置于扫描电镜下观察其孔隙形态及水化产物分布情况。SEM观察主要用于识别试样内部C-(A)-S-H凝胶、钙矾石等水化产物的形成特征,以及不同组分掺量对孔隙结构、颗粒胶结状态和微观致密性的影响,从而为宏观强度演化与裂纹破坏机制的解释提供微观依据。

2 结果与讨论

基于单轴压缩试验、DIC测试及SEM分析结果,从宏观力学响应、裂纹扩展行为、微观结构演化三个层面,对GSC三元胶凝体系的性能变化规律进行讨论。通过对比不同配比、不同龄期试样,进一步揭示石膏与水泥掺量对材料强度发展、变形特征及破坏机制的综合影响,为后续优化配比设计和解析脆韧性调控规律提供依据。

2.1 宏观力学性能

宏观力学性能是评价GSC体系承载能力与变形特征的重要指标,也是分析其内部结构演化和损伤发展规律的基础。为此,从单轴抗压强度、强度特征、脆性指数及弹性模量等方面,对不同配比、不同养护龄期试样的受压响应进行系统分析,以反映材料在强度、刚度及破坏特征方面的变化规律。

2.1.1 无侧限抗压强度

图2汇总了不同配比GSC试样在7、14、28 d龄期下的单轴抗压强度(UCS)变化规律。结果表明,养护龄期对材料强度发展具有显著的促进作用。总体来看:7 d龄期时各组试样强度主要分布于10~15 MPa区间;养护至14 d时,多数试样强度提高至15~20 MPa;到28 d龄期后,试样强度显著增长,部分配比已达到27 MPa左右,其中G10S70C20试样表现最优,28 d抗压强度达到32.9 MPa。该结果说明,随着养护龄期延长,体系内部水化和激发反应持续推进,胶凝产物不断生成并填充孔隙,促使材料结构逐渐致密,进而显著提高其承载能力。

试样UCS的影响因素如图3所示。为简化分析过程,计算了掺量相同的4组试验的GSC平均值。以水泥掺量10%工况为例,对G5S85C10、G10S80C10、G15S75C10、G20S70C10 4组试样的测试结果取平均

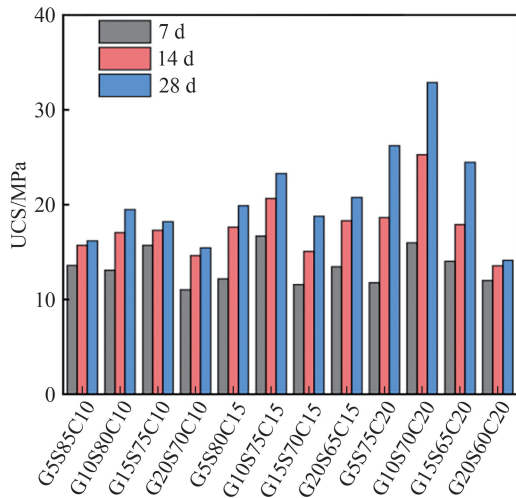


图2 不同配比GSC试样在7、14、28 d养护龄期下的单轴抗压强度

Fig. 2 Strength of GSC samples with various formulation ratios at curing ages of 7, 14, and 28 days

值,分析UCS的变化趋势。

从水泥掺量变化规律可知[图3(a)],在相同龄期条件下,提高水泥掺量可整体提升GSC体系的

抗压强度,但这一作用在不同龄期下表现出明显差异。7 d龄期时,各水泥掺量组强度差异较小,均维持在约13 MPa,说明早期阶段水泥掺量对强度的促进作用尚不显著;而在14 d与28 d龄期时,随着水泥掺量由10%增加至20%,试样强度呈明显上升趋势,表明水泥在后期能够持续提供碱性环境,生成更多C-(A)-S-H凝胶,从而增强体系整体胶结性能和结构稳定性。

从石膏掺量的影响来看[图3(b)],GSC体系抗压强度随石膏掺量增加呈现先升高后降低的变化特征。当石膏掺量由5%增加至10%时,试样强度明显提高;继续将石膏掺量增至15%和20%时,强度反而下降,说明石膏存在最优掺量范围。适量石膏能够促进体系中钙矾石生成,改善内部孔隙结构并增强颗粒间连接;但当石膏掺量过高时,易造成局部晶体过度生成和结构连续性下降,使材料内部出现较大孔隙或疏松区域,从而削弱宏观抗压性能。综合比较可知,在本研究试验范围内,石膏掺量为10%时对强度提升最为有利。

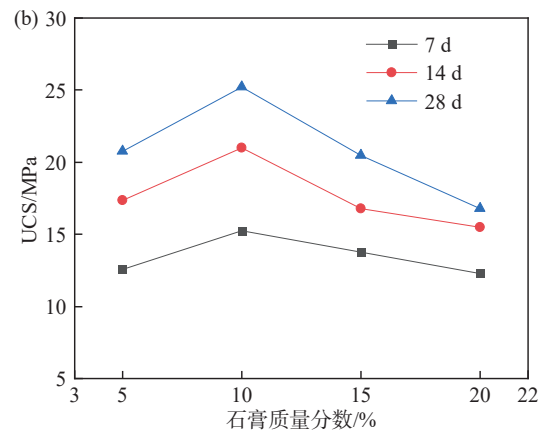
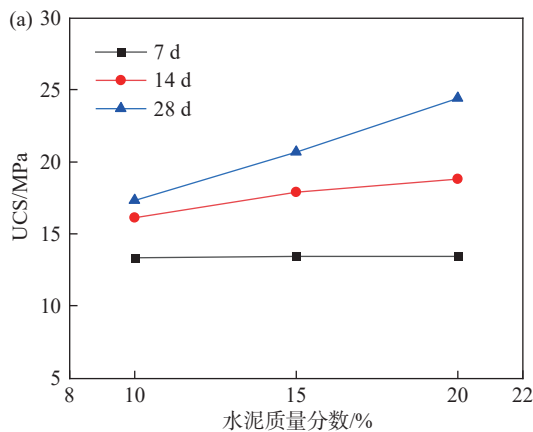


图3 UCS随(a)水泥掺量与(b)石膏掺量的变化趋势

Fig. 3 Variation of UCS with (a) cement content and (b) gypsum content

此外,不同配比试样在强度增长速率上也存在差异。部分试样在早期即表现出较高强度,但后续增长趋缓;而另一些试样则在后期呈现更明显的加速强化特征。这说明GSC体系力学性能并非由单一组分决定,而是取决于石膏、水泥与矿渣之间的协同作用。合理的组分匹配可在后期形成更加完善的胶凝网络,使材料在养护过程中持续获得强度增益。

2.1.2 强度特征

为全面分析试样受压破坏过程,可将单轴压缩试验获得的完整应力-应变曲线划分为不同的变形阶段。这种划分有助于识别与材料内部损伤状态临界转变相对应的特征应力阈值。以最高强度G10S70C20代表性试样为例,各变形阶段特征如图4所示。

1) 阶段 I: 初始孔隙压实阶段,曲线初始呈平缓凹陷形态,此时试样内部预先存在的孔隙和微裂

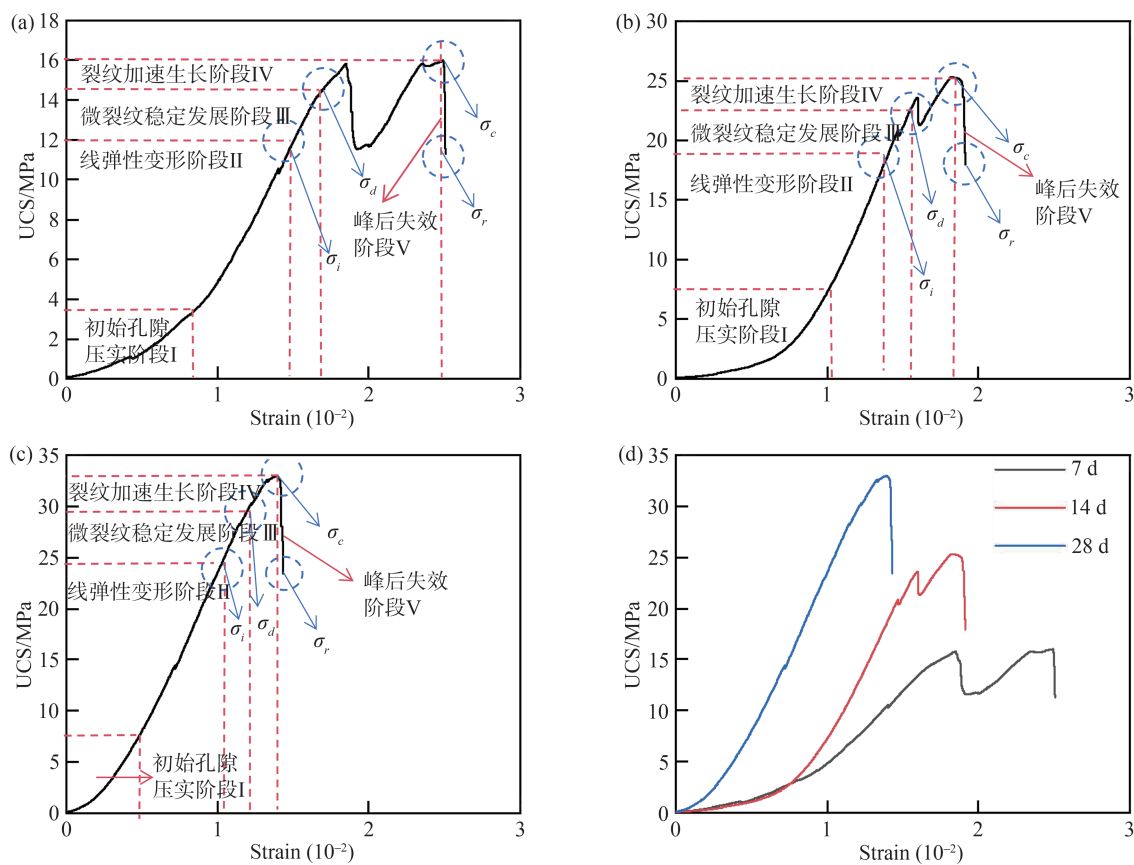


图4 GSC在不同养护龄期的单轴压缩应力-应变曲线及破坏阶段划分:(a) 7 d养护龄期;

(b) 14 d养护龄期;(c) 28 d养护龄期;(d) 各龄期汇总

Fig. 4 Uniaxial compressive stress-strain curves and failure stage division of GSC at different curing ages:

(a) 7 d; (b) 14 d; (c) 28 d; (d) Summary of all curing ages

纹在压缩作用下闭合。

2) 阶段Ⅱ: 线性弹性变形阶段, 曲线表现应力与应变之间的线性关系, 表明材料在积累可恢复弹性能量的同时, 仅产生微小的新损伤。

3) 阶段Ⅲ: 稳定裂纹发展阶段, 应力-应变曲线开始偏离线性, 稳定微裂纹从应力集中区萌生并扩展。

4) 阶段Ⅳ: 不稳定裂纹扩展阶段, 随着微裂纹开始融合, 损伤加速, 导致刚度显著降低直至达到峰值应力。

5) 阶段Ⅴ: 峰值后失效阶段, 随着宏观破坏面的形成与扩展, 试样的承载能力迅速下降。

裂纹起始应力(σ_i): 该阈值标志着新稳定微裂纹的形成。该参数可通过体积应变变化识别, 但学界普遍采用近似值峰值应力(σ_c)的75%作为取值标准, 本研究采用此值。

裂纹损伤应力(σ_d): 该点标志着裂纹从稳定扩

展向不稳定扩展的转变, 存在显著损伤累积。根据文献[7], 该数值定义为峰值应力的90%。

峰值应力(σ_c): 指试样在宏观失效前所能承受的最大应力。

残余应力(σ_r): 指材料达到峰值强度之后的强度。为便于分析并符合试验终止标准, 将其定义为峰值应力的70%。

软化模量(M_s): 计算峰值点后某一段的平均斜率。例如, 从峰值点到峰值应力85%处之间的斜率绝对值。

通过识别特征应力点, 可定量分析试样在变形与失效过程中各关键阶段的力学行为。

如表3所示, 除峰值应力外, 关键特征应力点随龄期显著变化。裂纹起始应力和损伤应力均随养护时间延长而提高。例如: 养护7 d的试样, σ_i 与 σ_d 相对较低且间隔较窄, 表明材料在较低应力水平下即开始出现不可逆损伤; 而在28 d试样中, 这两个

表3 G10S70C20的UCS特征值

Table 3 UCS characteristic values of G10S70C20

养护龄期/d	裂纹起始应力 σ_i /MPa	裂纹损伤应力 σ_d /MPa	峰值应力 σ_p /MPa	残余应力 σ_r /MPa	软化模量 M_i
7	11.99	14.39	15.99	11.19	176.82
14	18.97	22.77	25.3	17.71	155.21
28	24.67	29.61	32.9	23.03	90.21

特征点不仅数值更高，且间距更宽，反映出材料抵抗微裂纹萌生与扩展的能力更强。

此外，微裂纹稳定发展阶段(阶段Ⅲ)的持续时间随养护龄期延长而增加。这说明高龄期试样在达到峰值强度前能承受更大的非弹性变形，内部微结构对局部应力集中的缓冲能力增强，从而延缓了宏观破坏的发生。

对比峰后软化段发现：7 d试样表现出典型的脆性破坏特征，应力骤降；随着养护龄期延长至14、28 d，试样的峰后软化模量绝对值较7 d时降低。由此可见：仅7 d试样为“典型脆性破坏”；14 d与28 d试样虽仍以脆性为主导，但峰后行为已呈现一定程度的非脆性特征。

2.1.3 脆性指数评价

为定量评价GSC体系峰后力学行为及脆性特征，采用脆性指数进行分析，定义如下：

$$BI = \frac{\sigma_c - \sigma_r}{\sigma_c}$$

式(1)

式中： BI 为脆性指数； σ_c 表示单轴抗压强度，MPa； σ_r 表示残余应力，MPa，定义为峰值强度的70%。

脆性指标能够反映试样在峰值后承载能力衰减的程度， BI 值越大，材料峰后强度损失越明显，脆

性特征越突出。

图5汇总了水泥、石膏掺量对GSC试样脆性指数变化的影响。结果表明，水泥掺量对GSC体系脆性指数具有较为一致的增强作用[图5(a)]。水泥掺量由10%提升至20%的过程中，各龄期试样的脆性指数整体呈上升趋势，说明高水泥掺量虽可显著提高材料的峰值强度和刚度，但会使结构更趋刚性化，一旦裂纹形成便更容易迅速扩展并导致应力集中，从而表现出更明显的脆性失稳特征。尤其在28 d龄期下，尽管脆性指数变化存在一定波动，但总体仍保持上升趋势，说明材料强度的提升通常伴随着脆性增强的特性。相较之下，石膏掺量对脆性指数的影响更具复杂性和非线性特征[图5(b)]。7 d龄期下，随石膏掺量增加，试样脆性指数总体略有上升，表明早期石膏对韧性的改善作用尚不稳定；14 d龄期下，脆性指数随石膏掺量增加而下降，说明适当增加石膏有助于提高GSC体系的裂纹扩展协调能力和峰后残余承载能力；28 d龄期下，石膏对脆性指数的影响趋于弱化，虽有波动但整体未表现出显著单调规律。这说明石膏对GSC体系脆性的影响不仅受掺量控制，还与养护龄期、内部水化产物演化密切相关。总体而言，适量石膏能够在一定

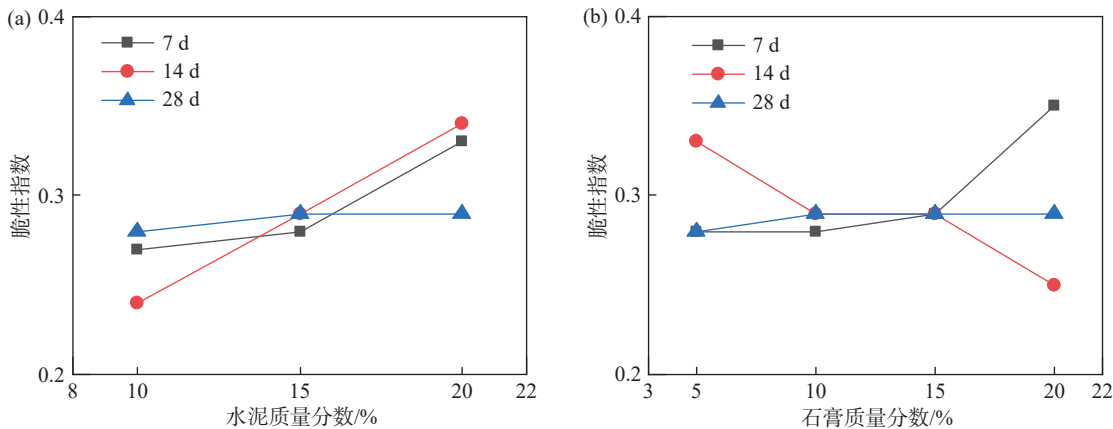


图5 脆性指数随(a)水泥掺量与(b)石膏掺量的变化趋势

Fig. 5 Variation of brittleness index with (a) cement content and (b) gypsum content

阶段内改善材料韧性,但当掺量过高时,这种促进作用会减弱甚至转化为不利影响。

2.1.4 弹性模量

GSC体系弹性模量的变化规律与抗压强度整体上具有较好的一致性。随着养护龄期延长,各组试样弹性模量均呈增加趋势,说明材料在持续养护过

程中内部结构不断致密,抵抗弹性变形的能力逐渐增强。与此同时,水泥掺量增加也会显著提高弹性模量,表明水泥生成的胶凝产物在增强试样整体刚度方面发挥了关键作用[图6(a)]。水泥掺量越高,体系内颗粒之间的胶结越充分,宏观上表现为更高的抗变形能力和更强的刚性特征。

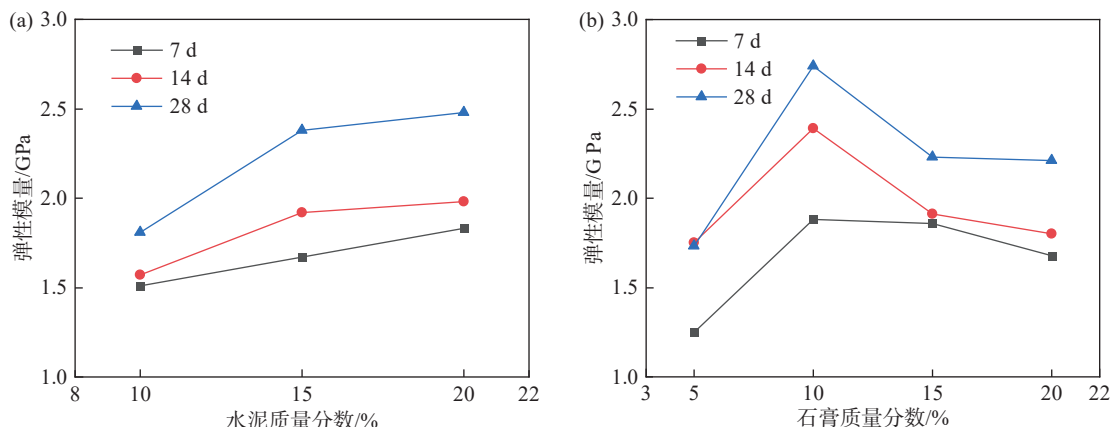


图6 弹性模量随(a)水泥掺量及(b)石膏掺量的变化趋势

Fig. 6 Variation of elastic modulus with (a) cement content and (b) gypsum content

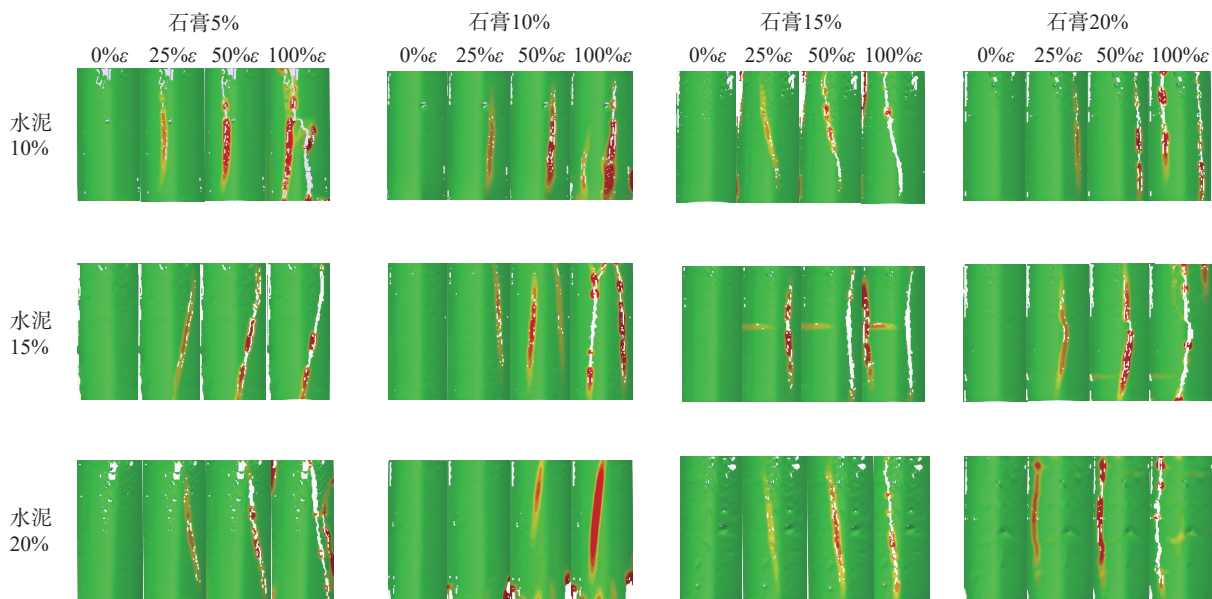
石膏掺量对弹性模量的影响则表现出典型的“倒U型”变化规律[图6(b)]。石膏掺量从5%增加至10%,试样弹性模量逐渐升高;当石膏掺量继续增加至15%和20%时,弹性模量开始下降。这表明:适量石膏有助于优化内部微结构、增强材料整体性,从而提升刚度;而石膏过量时,会使局部结构不均匀性增强,并降低体系整体连续性,进而削弱材料的抗变形能力。综合来看,石膏掺量为10%时GSC体系弹性模量达到较优水平,与其强度变化规律基本一致,进一步说明该掺量有利于宏观力学性能的协调提升。

2.2 裂纹扩展与破坏模式

图7汇总了不同配比条件下GSC体系在28 d养护龄期的破坏过程。结果表明,28 d龄期下不同配比的GSC试样均经历了由微裂纹萌生、扩展、汇聚到最终贯通破坏的演化过程,但不同组分配比条件下裂纹路径、应变局部化形态及最终破坏模式存在明显差异。DIC结果能够直观反映试样在加载过程中的非均匀变形区域及其随时间的发展规律,为揭示材料内部应力传递与裂纹演化机制提供了直接依据。

在固定石膏掺量条件下,随着水泥掺量增加,试样破坏模式由突发性脆性剪切逐步向较稳定的准延性剪切破坏转变。以石膏掺量15%为例:10%水泥掺量组裂纹多起始于试样中部或边缘,并迅速发展为单一斜向主裂缝,裂缝分支较少,最终表现为典型的剪切劈裂破坏,说明低水泥掺量下试样结构连续性不足、应力集中后难以实现有效分散。15%水泥掺量组在加载过程中则形成两条较为对称的剪切带,裂纹夹角约为 70° ,试样在峰值前经历了较充分的剪切滑移与局部应力重分布,表现出一定的准延性特征。20%水泥掺量组裂缝最为集中且规则,主裂纹路径清晰,破坏模式趋于稳定剪切断裂,反映出高水泥掺量增强了颗粒间的胶结作用,提高了结构整体性,并在一定程度上抑制了裂纹的随机扩展。

在固定水泥掺量条件下,石膏掺量对裂纹扩展模式同样具有显著调控作用。以水泥掺量15%为例:5%石膏掺量组主要表现为单一主裂缝快速贯通,破坏过程突发,属于典型单剪破坏。当石膏掺量增加至10%~15%时,试样中明显形成两组对称斜裂缝,最终构成较完整的“X”形共轭裂纹结构。其中,10%石膏掺量组裂纹对称性最好、扩展路径最协调,



* ϵ 表示试验结束时的最终应变, 25% ϵ 、50% ϵ 、100% ϵ 表示加载状态达到最终应变的25%、50%、100%。

图7 不同配比条件下GSC试样在28 d养护龄期的破坏过程

Fig. 7 Failure process of gypsum-slag-cement binder system with different formulation ratios at a curing age of 28 d

表明此时材料内部应力传递较为均匀, 裂纹扩展并非单一局部失稳控制, 而是表现为多裂纹协同演化机制。当石膏掺量增加至20%时, 裂纹又重新趋向于沿单一斜向快速贯通, 应变集中区主要局限于主裂缝两侧, 未见明显次生裂纹分化, 说明高石膏掺量会削弱体系的应力扩散和裂纹协同扩展能力。

综上可知, GSC体系裂纹扩展模式随配比变化呈现单裂纹快速贯通—多裂纹协同扩展—单裂纹快速贯通的演化特征。适量石膏和较高水泥掺量有助于形成更均匀的应力分布和更稳定的裂纹扩展路径, 从而延缓局部失稳并提升材料韧性; 而低胶结度或过量石膏则会导致裂纹扩展高度集中, 使试样更容易发生突发性脆性破坏。其中, G10S70C20配比在

28 d时形成较典型的对称“X”形裂纹形态, 表明其在强度与裂纹协调扩展能力之间达到了较优平衡。

2.3 微观结构特征

图8对比了两种不同配比的GSC试样养护28 d的微观结构。可以看出, 28 d龄期下GSC体系内部可观察到较为典型的C-(A)-S-H凝胶和钙矾石晶体, 说明石膏、水泥与矿渣在养护过程中发生了较充分的协同反应, 形成了支撑宏观强度发展的主要胶凝产物。微观图像显示, 不同石膏、水泥掺量条件下, 水化产物数量、形态及空间分布存在明显差异, 这也是导致各组试样宏观力学性能和破坏模式不同的主要原因。

对于高水泥掺量、适量石膏的试样[图8(a)],

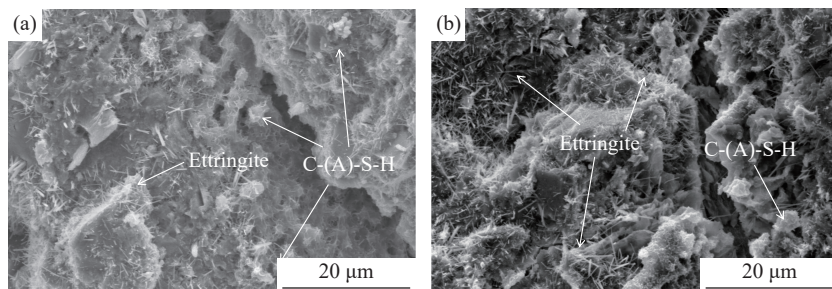


图8 两种不同配比的GSC试样在养护龄期为28 d时的微观结构

Fig. 8 Microstructure of GSC specimens with two different formulation ratios at a curing age of 28 d:

(a) G10S70C20; (b) G20S70C10

可见较多凝胶状产物包裹并胶结的颗粒,颗粒之间形成连接结构,仅存在少量钙矾石。这说明较高水泥掺量有利于生成更多凝胶,增强颗粒间黏结作用并限制其相对滑移,从而形成更稳固的内部骨架结构。该类微观特征与较高的抗压强度、较大的弹性模量相一致,也解释了高水泥掺量试样整体刚度增强、裂纹扩展更集中但结构可控性更强的宏观表现。

随着石膏掺量增加,体系中钙矾石数量明显增多,且晶体形态更加完整[图8(b)]。尤其在高石膏掺量试样中,可观察到大量针状钙矾石相互交织,形成簇状结构,并对孔隙起到一定填充作用。这表明石膏能够通过促进钙矾石生成,改善局部致密性,并在一定程度上增强内部应力传递能力。然而,当水泥掺量相对较低时,尽管钙矾石可填充部分孔隙,但由于凝胶产物不足,体系中仍会保留较明显间隙,整体结构连续性有限。由此可见,单纯增加石膏并不能持续提升材料性能,只有在石膏与水泥协同作用时,才能兼顾孔隙填充与结构胶结,从而实现强度与韧性的协调优化。

综合SEM与宏观试验结果可知,GSC体系性能演化的本质在于微观胶凝产物组成与空间结构的调控。适量石膏有利于钙矾石形成并促进孔隙填充,适当提高水泥掺量则有利于凝胶网络发育和整体胶结增强。二者协同作用决定了材料内部致密程度、裂纹扩展阻滞能力以及峰后承载特征,从而最终影响其抗压强度、弹性模量及脆韧性平衡。

3 结 论

1) GSC三元胶凝体系的力学性能受水泥掺量显著影响。随着水泥掺量提高,试样抗压强度与弹性模量整体增加,内部胶结结构更加稳定,但峰后应力衰减更明显,材料脆性随之增强。

2) 石膏掺量存在明显的最优区间。石膏由5%增加至10%时,试样强度、刚度及裂纹扩展协调性得到改善;当石膏继续增加时,材料结构趋于疏松,强度和弹性模量下降。适量石膏能够促进钙矾石形成并改善应力传递,过量石膏则不利于结构稳定。

3) 养护龄期的增长可显著提升GSC体系的抗损伤能力。随着养护时间延长,试样的抗压强度、裂

纹起始应力与裂纹损伤应力持续提高,稳定裂纹扩展阶段延长,峰后软化速率降低,材料由典型脆性破坏逐渐向准延性破坏转变。

4) 综合分析强度、弹性模量及破坏形态后发现,G10S70C20为本试验范围内的最优配比,在28 d龄期下表现出最高抗压强度(32.9 MPa)、较高弹性模量(2.7 GPa)以及较好的裂纹扩展协调性,具有较优综合力学性能。

参考文献:

- [1] 范定强, 陆建鑫, 刘康宁, 等. 高强二氧化碳泡沫混凝土的设计、制备与宏微观特性[J]. 硅酸盐学报, 2025, 53(5): 1193-1204.
- [2] Ishak S A, Hashim H. Low carbon measures for cement plant-a review [J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 103: 260-274.
- [3] 褚浒荣, 李睿, 包天鹏. 磷渣协同多固废胶凝材料的制备及性能研究[J]. 材料导报, 2025, 39(增刊2): 443-448.
- [4] Li H F, Bai X, Yan C L, et al. Sustainable ground improvement of stabilized loess using coal slag: laboratory investigation on mechanical characteristics [J]. Sustainability, 2026, 18(1): 301.
- [5] Rochanavibhata U, Lhajai S, Jongpradist P, et al. Enhancing mechanical and microstructural properties of lateritic soil using bottom ash and cement stabilization: a comparative analysis of destructive and nondestructive testing methods [J]. Cogent Engineering, 2025, 12(1): 2524443.
- [6] Ma B B, Chen S Y, Ye Z H, et al. Characterization and optimization of ternary solid waste CO₂ sequestration materials consist of titanium gypsum, fly ash, and calcium carbide residue and transformation of iron in the carbonation process [J]. Journal of Building Engineering, 2026, 123: 115954.
- [7] 张钦礼, 陶云波, 冯岩, 等. 采-选-冶-化固废基充填材料制备及综合性能研究综述[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(6): 65-81.
- [8] 李义胜, 吕伟, 吴赤球, 等. 高掺量磷石膏胶凝材料硬化体制备及其性能调节[J]. 硅酸盐通报, 2025, 44(8): 2944-2954.
- [9] 刘亚亚, 于新生, 赵霆, 等. 矿渣固化材料的力学与生态性能初步探索[J]. 环境科学与技术, 2026,

- 49(3): 277-284.
- [10] 王子帅, 陈益人, 王东星, 等. 工业废渣-水泥流态固化盾构渣土性能与配合比研究[J]. 岩土力学, 2026, 47(2): 595-606.
- [11] 厉帅康, 俞峰, 陈鑫, 等. 水泥-矿渣基早强固化剂制备及固化土宏观性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2023, 42(11): 3964-3977, 4005.
- [12] 李传海, 王嘉伟, 张冲, 等. 石膏矿渣水泥三元协同作用机制与性能研究[J/OL]. 材料导报, 1-13(2026-01-15)[2026-04-25]. https://link.cnki.net/urlid/50.1078.tb.20260115.1006.010.
- [13] 权娟娟, 张凯峰, 王可娜. 改性磷石膏对石膏矿渣水泥水化过程的影响研究[J]. 硅酸盐通报, 2017, 36(12): 4033-4037, 4043.
- [14] 易耀林, 卿学文, 庄焱, 等. 粒化高炉矿渣微粉在软土固化中的应用及其加固机理[J]. 岩土工程学报, 2013(增刊2): 829-833.
- [15] 张菊, 王凤林, 闫长旺, 等. 基于随机森林模型的电石渣混凝土微膨胀与强度发展协调性研究[J]. 河北大学学报(自然科学版), 2026, 46(4): 349358. DOI:10.3969/j.issn.10001565.2026.04.002.
- [16] 巫侯琴, 王海涛, 田佳, 等. 锂辉石尾矿-冶炼渣充填材料制备与性能调控[J]. 中国有色金属学报, 2026, 36(1): 315-327.
- [17] Zhang H N, Hu W H, Li H, et al. Study on mechanical behavior of inclined cemented tailings composite backfill (CTCB) under uniaxial compression[J]. Construction and Building Materials, 2024, 439: 137410.

Uniaxial Compression Damage Evolution and Brittle-Ductile Transition of Gypsum-Slag-Cement Ternary Cementitious System

Guo Ning

(China Railway 12th Bureau Group 4th Engineering Co., Ltd., Xi'an 710021, China)

Abstract: To reveal damage evolution and brittle-ductile synergistic behavior of the gypsum-slag-cement (GSC) ternary cementitious system under uniaxial compression, this study conducted uniaxial compression tests at different curing ages by adjusting the ratios of gypsum, cement, and slag. Combined with digital image correlation (DIC) and scanning electron microscopy (SEM) techniques, a systematic analysis was performed from three perspectives: macroscopic mechanical response, crack propagation characteristics, and microstructural evolution. Results indicated that with extension of curing age, compressive strength, elastic modulus, as well as crack initiation and damage stresses of GSC system significantly increased, while post-peak failure gradually transitioned from typical brittleness to quasi-ductility. Increasing the proportion of cement content helped enhance the material's strength, stiffness, and overall bonding capacity, but led to increased brittleness. Gypsum content exhibited a significant nonlinear influence on material properties. A proportion of 10% effectively promoted internal stress redistribution and synergistic multi-crack propagation, thereby improving toughness and cracking resistance, whereas excessive gypsum tended to cause a decline in structural continuity and deterioration of mechanical performance. Comprehensive comparison revealed that the formula G10S70C20 demonstrated the highest compressive strength and superior deformation coordination ability at curing age of 28 d, with cracks exhibiting a typical symmetrical "X" pattern, indicating optimal comprehensive performance. The findings suggested that synergistic regulation of gypsum and cement was the key to achieving both strength enhancement and an optimized brittle-ductile balance in the GSC system.

Key words: gypsum-slag-cement system; uniaxial compression; damage evolution; brittleness index evaluation; crack evolution

doi: 10.3969/j.issn.1009-3842.2026.04.012

引文格式: 郭宁. 石膏-矿渣-水泥三元胶凝体系单轴压缩损伤演化与脆韧协同机制[J]. 铜业工程, 2026(4): 94-103.

Guo Ning. Uniaxial compression damage evolution and brittle-ductile transition of gypsum-slag-cement ternary cementitious system[J]. Copper Engineering, 2026(4): 94-103.